

# Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse für die initiale Krisenbewältigung von Stromausfällen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

M.Sc. Thomas Münzberg

Karlsruhe

---

Tag der mündlichen Prüfung:	7. Juni 2019
Referent:	Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Frank Fiedrich
Karlsruhe	3. Dezember 2018





# Kurzfassung

Wird durch einen Stromausfall der kontinuierliche Betrieb von so genannten Kritischen Infrastrukturen wie Krankenhäuser, Trinkwasserwerke oder Dialysekliniken gefährdet, drohen dramatische Konsequenzen für die Bevölkerung. Entsprechend bedarf es an einer effektiven Katastrophenvorsorge. In der vorliegenden Arbeit wird für diesen Zweck eine spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse entwickelt, mit der eine sachgerechte Beurteilung der Dringlichkeit und der Erheblichkeit von stromausfallbedingten Gefahren für einen beliebigen Landkreis oder eine beliebige kreisfreie Stadt samt einer Priorisierung der dort verorteten Kritischen Infrastrukturen bzw. ihrer Stadtteile oder Gemeinden für verschiedene Szenarios möglich wird.

Grundlage der Vulnerabilitätsanalyse ist ein indikatorenbasierter Ansatz mit modifizierten multiattributiven Analysen. Hierfür wurden Indikatoren entwickelt, mithilfe derer auf die Kritikalität und die Bewältigungskapazität von den in einem Landkreis oder einer kreisfreien Stadt befindlichen Kritischen Infrastrukturen und damit auf das raumzeitliche Gefahrenpotential eines Stromausfalls geschlossen wird. Zur Abschätzung des Gefahrenpotentials anhand dieser Indikatoren wurden Workshops mit Entscheidungsträgern der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes durchgeführt. Die in den Ergebnissen anhaftende Subjektivität der Abschätzungen und die sich daraus ergebene Parameterunschärfe wird mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation als Streuung im Ergebnis berücksichtigt. Darüber hinaus wurde für eine zeitliche Differenzierung einzelne Indikatoren dynamisiert und ein modifiziertes Delphi-Verfahren entwickelt, mit dem Gruppenentscheidungen in Führungs- und Verwaltungsstäben unterstützt werden. Die Vulnerabilitätsanalyse wurde in die Entscheidungsprozesse der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung in Deutschland eingebettet.

Für die Beurteilung stromausfallbedingter Gefahren in einem Landkreis oder einer kreisfreien Stadt werden mehrere Vulnerabilitätsaggregationen und Bewertungsverfahren verwendet. Hierdurch ergeben sich verschiedenartige raum-zeitliche Auflösungen der Gefahrenpotentiale und der örtlich individuellen Stromausfallfolgen, die Rückschlüsse über die Bedeutung von einzelnen Kritischen Infrastrukturen und Stadtteilen bzw. Gemeinden für die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung, den schwerwiegendsten und den mildesten Stromausfallverlauf, die Erfüllung von Schutzzielansprüchen, örtliche Vulnerabilitätsdichten und die potentiellen Wirkung von zu erwägenden Maßnahmen ermöglichen. Hierdurch wird der Handlungsbedarf unterhalb der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städten identifiziert, was ebenso die Zusammenarbeit zwischen Behörden und Betreibern Kritischer Infrastrukturen als auch die Bildung eines einheitlichen Gefahrenverständnisses im Rahmen von Sicherheitspartnerschaften fördert. Beispielhaft wurde das Verfahren unter Verwendung realitätsnaher Daten auf die Stadtkreise Mannheim und Karlsruhe angewendet.

Neben der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung kann die Anwendung des Analyseverfahrens und seine Ergebnisse die Erfüllung der strategischen Ziele des Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, denen sich die Bundesregierung verpflichtet hat, unterstützen. Ebenso kann die sachgerechte Priorisierung und prioritäre Versorgung von Kritischen Infrastrukturen oder Gebietskörperschaften anhand eines objektiven Vulnerabilitätsmaßes sowohl bei der Umsetzung des Gesamtkonzeptes Notstrom der Konzeption Zivile Verteidigung als auch im Kaskadenprinzip der VDE-AR-N 4140 bei kritischen Netzsituationen Anwendung finden.

Der methodischen Entwicklung einer solchen präskriptiven Entscheidungsunterstützung gingen grundlegende entscheidungsnormative Auseinandersetzungen voraus, in deren Ergebnis nicht nur die Grundlagen des Risiko- und Krisenmanagements betrachtet wurden, sondern auch stromausfallbedingte Gefahren schutzgutorientiert spezifiziert, plausible Stromausfallszenarien systematisch reflektiert, Lokale Kritischen Infrastrukturen definiert, Standards für KRITIS-Kataster erstellt, ein Bemessungsstromausfall als auslegungsrelevanter kritischer Stromausfall festgelegt und Schutzziele zur bedarfsorientierten Dimensionierung von Vorsorge- und Bewältigungsmaßnahmen betrachtet wurden. Da hierdurch bisherige Lücken in der Debatte zum Schutz Kritischer Infrastrukturen und in der sachgerechten Entscheidungsfindung bei der Vorbereitung auf Stromausfälle auf kommunaler Ebene geschlossen werden konnten, bilden diese Ergebnisse, neben der entwickelten Vulnerabilitätsanalyse, einen wertvollen Beitrag in der normativen Entscheidungsunterstützung.



# Abstract

A power outage can have dramatic consequences for the population. In particular, if the continued functionality of so-called critical infrastructures (e.g. hospitals, waterworks and dialysis clinics) is endangered, life-threatening situations can be expected. In this context, the present thesis conducts a spatial-temporal vulnerability assessment that should facilitate local authorities to analyze and to foresee the potential threats of a power outage in a city or a county which they are in charge for.

The proposed spatial-temporal vulnerability methodology assesses the temporal and spatial proximity and intensity of power outage consequences. It takes into account the criticality and the infrastructure provider's ability to keep a continuous supply of critical infrastructures during a potential power outage. The assessment is essentially based on an indicator-based approach combined with a modified multi-attributive analysis. Indicators are used to quantify the criticality and coping capacity of considered critical infrastructures. To operationalize indicator values, available information from land registers or critical infrastructure cadasters are used. For some selected values, which could not be operationalized in this way, multiple workshops with representatives of local disaster management authorities were undertaken. The results are integrated into a modified Delphi method application to facilitate group decisions to those emergency response teams who are in charge and were not part of the undertaken workshops. This operationalization has an inherent degree of subjectivity, which is additionally mathematically integrated by using Monte Carlo simulation. Furthermore, time-depending consequences are included by a dynamization of selected indicator values.

The vulnerability assessment is embedded to the planning processes for disaster preparation and disaster response actions. It provides decision makers a deep and clear understanding about the spatial-temporal threats of power outages in a given area (i.e. city or county). The indicators are aggregated and evaluated in different ways. This leads to various spatial-temporal resolutions and depths. The results lead to conclusions about the importance of each critical infrastructure, each considered district and municipality regarding the provision of vital products and services for the population. Additionally, worst and mildest power outage scenarios, spatial vulnerability densities, achievement of predefined protection goals, and potential effects of considered counter measures can be demonstrated. The region-specific results facilitate the cooperation between the public authorities and critical infrastructure providers by generating a common picture of forthcoming power outage consequences. Vulnerability assessments were applied to the German cities of Mannheim and Karlsruhe as examples.

As a planning tool for response on disasters, the proposed vulnerability assessment also addresses the strategic aims of the UNISDR Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, which the German Federal Government is committed to. Furthermore, the proposed vulnerability assessments pave the way to facilitate the overall concept for emergency power supply (Gesamtkonzept Notstrom) which is part of the German civil protection concept (Konzeption Ziviler Verteidigung). In view of the highly limited emergency power supply resources in Germany, the assessment identifies the priorities of power consumers. Such a conceptual consideration could lead to a proportionate distribution of limited resources and a prioritized supply of critical infrastructures or crucial regions. These abilities could also be embedded to the cascade principles VDE-AR-N 4140 in the power system operations. The primary aim of the cascade principles is to keep under control critical network situations, in particular by the shutdown of consumers and thus a reduction of electrical load. The integration of the proposed vulnerability assessment in the cascade

principles could prevent vital consumers from a shutdown during such critical electricity network situations.

In order to make the vulnerability assessment consistent with the addressed normative requirements of the decision environment, several systematic scientific reviews were necessary. Therefore, this thesis includes considerations about fundamentals in risk and crisis management, power outage triggered threats addressing public protective goods, plausible power outage scenarios and a derivation of a rated and design-relevant power outage scenario, determination of local critical infrastructures, standards of critical infrastructure cadasters, and a consideration of protection targets for ensuring a demand-orientated continued service of critical infrastructures. These resulting investigations are valuable contributions to fill information gaps in the protection of critical infrastructures and the appropriate preparations to power outage consequences in Germany.

# Danksagung

Die Entwicklung der initialen Idee und die grundlegende Umsetzung der vorliegenden Arbeit entstand in mehreren Forschungsprojekten in den Jahren 2011 bis 2017 während meiner parallelen Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET), am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) und am Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.

Motiviert hat mich in dieser Zeit der Anspruch, aus wissenschaftlichen Erkenntnissen einen gesellschaftlichen Gewinn zu erzielen, wodurch Leiden - gleich in welcher Form - in einer zukünftigen Krisensituation vermieden oder zumindest reduziert wird. Die vorliegende Arbeit stellt die fachliche Auseinandersetzung und die Entwicklungsergebnisse vor, die bereits in Teilen auf zahlreichen Wissenschafts- und Fachkonferenzen sowie zahlreichen Beiträgen sowohl für die internationale Wissenschaftsgemeinde als auch für die Entscheidungsträger der Gefahrenabwehr in Deutschland vorgestellt und diskutiert wurden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die mich maßgeblich bei diesem Vorhaben unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann für die hervorragende Möglichkeit zur Promotion und die exzellente wissenschaftliche Betreuung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Fiedrich von der Bergischen Universität Wuppertal danke ich für die Unterstützung, die Beratung und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg möchte ich für die Schaffung der hervorragenden Rahmenbedingung danken.

Für die vielen unzähligen fachlichen Diskussionen, antreibenden Impulse, wertvollen Ideen, Visionen, Ermöglichkeiten, Alltagsfluchten, Zeit und Freundschaften möchte ich mich herzlich bedanken bei Herrn Wolfgang Raskob, Herrn Dr. Tim Oliver Müller, Herrn Dr. Markus Wiens, Herrn Dr. Sadeeb Ottenburger, Frau Elvira Munz, Herrn Dr. Christian Bidart, Frau Dr. Stella Möhrle, Herrn Dr. Friedmar Fischer, Herrn Dr. Florian Brauner, Frau Annemarie Wengert und Herrn Dr. Frank Schätter. Gleichwohl ich an dieser Stelle weitere unzählige Personen aufführen könnte, nein müsste, muss ich mich doch beschränken auf den Dank für das erfreuliche kollegiale Miteinander am Karlsruher Institut für Technologie.

Mein weiterer Dank gilt den Mitarbeitern des IKET, des IIP, dem CEDIM, der ProScience GmbH und dem Deutschen GeoForschungsZentrum sowie allen Partnern und Drittmittelgebern der Forschungsprojekte Security2People, SEAK, RIKOV, KritisF&E, GRASB, INCA, KRITISKapa, StromResilienz, Resilienz städtischer Infrastrukturen und des HGF Portfolios Sicherheitsforschung für die gute und kollegiale Zusammenarbeit. Herzlich bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei Herrn Handermann und Frau Straub vom Amt 37 Feuerwehr und Katastrophenschutz der Stadt Mannheim für die intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Des Weiteren bedanke ich mich für die anregenden Diskussionen und den fachlichen Austausch bei den Kameraden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes der Stadt Karlsruhe, dem Regierungspräsidium Karlsruhe, des Hochtaunuskreises, der Stadt Emden und der Stadt Köln.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Gudrun Bergmann, Lena Münzberg und Ruth Petters-Raskob für die kritische Durchsicht meines Manuskripts. Herausragender Dank für unermüdlichen Einsatz, seelenfriedenstiftender Motivation und uneingeschränkte Unterstützung gilt meiner Frau Lena Münzberg. Ihr ist diese Arbeit gewidmet.

Warendorf, im Juli 2018



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>vii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Entscheidungsunterstützung zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Zielstellung, Lösungsweg und Struktur der Arbeit .....	7
<b>2 Erscheinungsformen von Stromausfällen</b> .....	<b>11</b>
2.1 (Zer-)Störung von Netzkomponenten .....	11
2.2 Kritische Netz- und Systemzustände.....	14
2.3 Fazit .....	15
<b>3 Krisenmanagement in Deutschland</b> .....	<b>16</b>
3.1 Grundprinzipien des Krisenmanagements in Deutschland .....	16
3.1.1 Schutzpflichtprinzip .....	17
3.1.2 Dezentralisationsprinzip .....	18
3.1.3 Kooperationsprinzip.....	20
3.1.4 Vermeidungs- und Vorbereitungsprinzip.....	20
3.1.5 Selbsthilfeprinzip .....	21
3.2 Gefahr und Gefahrenprognose .....	21
3.3 Vorbereitung auf Katastrophen und Katastrophenschutzplanung .....	23
3.3.1 Erstellen von Katastrophenschutz-, Einsatz- und Alarmplänen .....	23
3.3.2 Risikoanalyse im deutschen Katastrophenschutzrecht.....	24
3.3.3 Bedarfsgerechte Vorbereitung auf Katastrophengefahren .....	28
3.3.4 Schutzziele im Risikomanagement und in der Gefahrenabwehr .....	29
3.4 Fazit .....	31
<b>4 Krisenmanagement von Stromausfällen in Deutschland</b> .....	<b>32</b>
4.1 Vermeidung von Stromausfällen und stromausfallbedingten Gefahren .....	32
4.2 Relevante Stromausfallszenarien .....	34
4.2.1 Szenarien in der Fachliteratur.....	34
4.2.2 Szenarien anhand der empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeit.....	36
4.2.3 Szenarien anhand der Auswertung von Medieninhalten .....	38
4.2.4 Szenarien anhand der Zollenkopf-Kriterien I und II .....	43
4.2.5 Szenario des Netzinselbetriebs .....	45
4.2.6 Szenario der diskriminierungsfreien Lastreduzierung .....	46

4.2.7	Szenarien zum Netzwiederaufbau .....	47
4.2.8	Kategorisierung der Stromausfallszenarien .....	48
4.3	Ausübung der Schutzpflichten zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren .....	49
4.4	Selbsthilfe und Sicherheitspartnerschaften .....	50
4.5	Stromausfallbedingte Gefahr und Kritische Infrastrukturen .....	52
4.5.1	Nachfrage nach Leistungen von Kritischen Infrastrukturen.....	52
4.5.2	Kritische Infrastruktur als Schutzgut .....	53
4.5.3	Die stromausfallbedingte Gefahr .....	57
4.6	Bestimmung Kritischer Infrastrukturen .....	59
4.6.1	Definitionen Kritischer Infrastrukturen .....	59
4.6.2	Bestimmung der Typen Lokaler Kritischer Infrastrukturen .....	66
4.7	Vorbereitung der Abwehr stromausfallbedingter Gefahren .....	68
4.7.1	Planung von vorbereitenden Maßnahmen für Stromausfälle .....	68
4.7.2	Bedarfsplanung für die Vorbereitung auf Stromausfälle .....	70
4.7.3	Stand der Schutzzielefestlegung für die Vorbereitung auf Stromausfälle .....	72
4.7.4	Schutzzielefestlegung für die Vorbereitung auf Stromausfälle.....	74
4.8	Akute Abwehr stromausfallbedingter Gefahren .....	75
4.9	Fazit .....	77
<b>5</b>	<b>Theorien der Katastrophenvorsorge .....</b>	<b>79</b>
5.1	Vulnerabilität.....	79
5.2	Resilienz.....	82
5.3	Kritikalität .....	87
5.4	Bewältigungskapazität.....	88
5.5	Value-of-Lost-Load .....	91
5.6	Interdependenzanalysen und Simulation.....	93
5.7	Fazit .....	96
<b>6</b>	<b>Methodische Grundlagen .....</b>	<b>97</b>
6.1	Entscheidungstheorie und -modelle .....	97
6.1.1	Grundlagen der Entscheidungstheorie .....	97
6.1.2	Grundlagen der Entscheidungsmodelle .....	98
6.1.3	Rationalität in der präskriptiven Entscheidungstheorie.....	99
6.2	Multikriterielle Analysemethoden .....	99
6.2.1	Ansätze multikriterieller Analysemethoden .....	99
6.2.2	Multi-attributive Entscheidungsverfahren.....	101
6.2.3	Gewichtung innerhalb multiattributiver Analysen.....	102
6.2.4	Gruppenentscheid in multikriteriellen Analysen .....	103
6.2.5	Multiattributive Verfahren für spatial-temporale Vulnerabilitätsanalysen .....	104
6.2.6	Unschärfe in multikriteriellen Analysen.....	105
6.3	Zielprogrammierung.....	105
6.4	Fazit .....	107
<b>7</b>	<b>Entscheidungspraktische und methodische Implikationen .....</b>	<b>108</b>
7.1	Entscheidungsproblem.....	108
7.2	Entscheidungsträger.....	109
7.3	Lösungsmethode .....	110
7.4	Zielsystem.....	111

7.5	Entscheidungsfeld .....	112
7.6	Fazit .....	113
<b>8</b>	<b>Einführung in die Entwicklung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse .....</b>	<b>114</b>
8.1	Einbettung in die Entscheidungsprozesse der Vorbereitung .....	114
8.2	Einbettung in die die Entscheidungsprozesse der akuten Krisenbewältigung .....	116
8.3	Einbettung in Theorien der Katastrophenvorsorge .....	117
8.4	Struktur und Verfahren der Vulnerabilitätsanalyse .....	118
8.5	Fazit .....	124
<b>9</b>	<b>Analysekomponenten .....</b>	<b>125</b>
9.1	Notation und Mengen von KRITIS-Einrichtungen .....	125
9.2	Relevanzgewichte .....	126
9.2.1	Begriffsbestimmung des Relevanzgewichts .....	126
9.2.2	Operationalisierung des Relevanzgewichts .....	126
9.2.3	Mathematische Beschreibung der Relevanzgewichte .....	127
9.3	Kritikalitätsindikator Leistungsvermögen .....	127
9.3.1	Begriffsbestimmung des Leistungsvermögens .....	127
9.3.2	Operationalisierung des Leistungsvermögens .....	128
9.3.3	Mathematische Beschreibung des Leistungsvermögens .....	129
9.4	Kritikalitätsindikator fehlende Versorgungsleistung .....	132
9.4.1	Begriffsbestimmung der fehlenden Versorgungsleistung .....	132
9.4.2	Operationalisierung fehlender Versorgungsleistung .....	135
9.4.3	Mathematische Beschreibung fehlender Versorgungsleistung .....	138
9.5	Bewältigungsindikator Resistenzverlust .....	138
9.5.1	Begriffsbestimmung des Resistenzverlustes .....	138
9.5.2	Operationalisierung des Resistenzverlusts .....	143
9.5.3	Mathematische Beschreibung des Resistenzverlustes .....	147
9.6	Fazit .....	151
<b>10</b>	<b>Bestimmung der Eingangswerte der Analysekomponenten .....</b>	<b>152</b>
10.1	Schnittstellen zwischen Entscheidungsprozessen und Entscheidern .....	152
10.2	Eingangswerte für die Relevanzgewichte .....	154
10.3	Eingangswerte für das Leistungsvermögen .....	159
10.4	Eingangswerte für die fehlende Versorgungsleistung .....	161
10.5	Eingangswerte für den Resistenzverlust .....	162
10.6	Bestimmung eines Bemessungsstromausfalls .....	167
10.7	Fazit .....	169
<b>11</b>	<b>Vulnerabilitätsaggregationen .....</b>	<b>171</b>
11.1	Überblick über Vulnerabilitätsaggregationen .....	171
11.2	Demonstrationsbeispiel .....	173
11.3	Statischer Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung .....	174
11.4	Dynamischer Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung .....	177
11.5	Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Einrichtungen .....	181
11.6	Aggregationsebene KRITIS-Typ .....	183
11.7	Aggregationsebene Gebietskörperschaft .....	186
11.8	Fazit .....	189

<b>12 Bewertung von Gefahrenpotentialen .....</b>	<b>190</b>
12.1 Sensitivitätsanalyse .....	190
12.2 Vulnerabilitätsgradient.....	191
12.3 Szenariobasierte Resilienzwerte .....	193
12.4 Heat Maps für Standort- und Vulnerabilitätsdichten .....	195
12.5 Schutzzielorientierte Bewertung mithilfe Zielprogrammierung.....	196
12.6 Fazit .....	201
<b>13 Anwendungsfälle .....</b>	<b>202</b>
13.1 Grundkonfiguration .....	202
13.2 Anwendungsfall Stadtkreis Karlsruhe.....	205
13.2.1 Schwerwiegendster und mildester Ausfallbeginn.....	206
13.2.2 Gefahrenpotentiale im Stadtkreis Karlsruhe.....	208
13.2.3 Bewertung der Gefahrenpotentiale .....	225
13.2.4 Szenariobasierte Analysen .....	230
13.3 Anwendungsfall Stadtkreis Mannheim .....	234
13.3.1 Schwerwiegendster und mildester Ausfallbeginn.....	236
13.3.2 Gefahrenpotentiale im Stadtkreis Mannheim .....	238
13.3.3 Bewertung der Gefahrenpotentiale .....	251
13.3.4 Szenariobasierte Analysen .....	256
13.4 Fazit .....	260
<b>14 Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>262</b>
14.1 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse .....	262
14.2 Schlussfolgerungen zur Methodik der Vulnerabilitätsanalyse .....	264
14.2.1 Kooperation zwischen KRITIS-Betreibern und Entscheidungsträgern .....	264
14.2.2 Relevanzgewichtung .....	266
14.2.3 Indikatoren .....	268
14.2.4 Alternativenbildung, Aggregationen und Bewertungen der Gefahrenpotentiale .....	269
14.3 Anschlussfähigkeit und zukünftiger Forschungsbedarf .....	270
<b>15 Zusammenfassung .....</b>	<b>273</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>277</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>310</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Struktur der vorliegenden Arbeit.....	8
Abbildung 3.1:	Übersicht über die zu erstellenden Pläne entsprechend den Katastrophenschutzgesetzen der Länder. ....	24
Abbildung 3.2:	Implizite und explizite Forderungen nach einer Risikoanalyse zur Vorbereitung auf Katastrophen. ....	25
Abbildung 3.3:	Überblick über implizite Forderungen zur Durchführung von Risikoanalysen. ....	25
Abbildung 3.4:	Übersicht über implizite Forderungen zur Durchführung von Risikoanalysen. ....	26
Abbildung 4.1:	Klassifizierung der Ausfalldauer von Stromausfällen anhand der empirischen Verteilfunktion.....	38
Abbildung 4.2:	Klassifizierte Stromausfälle mit und ohne Umschaltungen oder Einsätzen nach Ausfalldauer und Betroffene. ....	41
Abbildung 4.3:	Histogramm der Ausfalldauer klassifizierter Stromausfälle. ....	41
Abbildung 4.4:	Relative Häufigkeit der Ausfalldauer der klassifizierten Stromausfälle und obere Dezile. .....	42
Abbildung 4.5:	Zollenkopf-Kriterien I und II mit Darstellung der Netzebene und Maßnahmen der Wiederherstellung. ....	44
Abbildung 4.6:	Grundprinzip der operativen Kaskade nach VDE-AR-N 4110 und deren bevölkerungsschutzrelevante Wirkungen. ....	46
Abbildung 4.7:	Kategorisierung von Stromausfallszenarien. ....	48
Abbildung 4.8:	Vorschlag zur Bemessung vorbereitender Maßnahmen durch das BBK (BBK, 2012).....	71
Abbildung 5.1:	Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Resilienz samt Resilienz-Integral und Resilienz-Triangel.....	84
Abbildung 5.2:	Zusammenhang zwischen Resilienz und Vulnerabilität bei zeitlicher Variabilität des Systemzustandes. ....	85
Abbildung 5.3:	Darstellung von Kontinuitätskenngrößen im Performanz-Verlauf während einer Unterbrechung. ....	86
Abbildung 5.4:	Zusammensetzung des Begriffs Bewältigungskapazität. ....	89
Abbildung 5.5:	Bewältigungsbandbreite bei stationärer Betrachtung und in Anbetracht des Planungshorizonts. ....	90
Abbildung 6.1:	Klassifikation von multikriteriellen Verfahren mit Beispielen. ....	100
Abbildung 6.2:	Phasen eines typischen multiattributiven Verfahrens. ....	102
Abbildung 8.1:	Prozess der Bedarfsplanung zur Vorbereitung auf stromausfallbedingte Gefahren mit Verweis zum Risikomanagementprozess. ....	115
Abbildung 8.2:	Prozess der akuten Krisenbewältigung von stromausfallbedingten Gefahren mit Verweisen zum Risikomanagementprozess. ....	116
Abbildung 8.3:	Analysekomponenten der Vulnerabilitätsanalyse.....	120
Abbildung 8.4:	Modifizierter Indikatorenbaum der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse.....	120

Abbildung 8.5:	Schematische Darstellung des Verfahrens zur spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse.....	122
Abbildung 8.6:	Übersicht über die Darstellung der Ergebnisse einer Vulnerabilitätsanalyse.....	123
Abbildung 9.1:	Darstellung des absoluten Leistungsvermögens von Krankenhäusern. ....	130
Abbildung 9.2:	Darstellung des relativen Leistungsvermögens von Krankenhäusern. ....	132
Abbildung 9.3:	Übliche Schwankungen der Versorgungsleistung an einem Werktag ohne Stromausfall. ....	133
Abbildung 9.4:	Mutmaßlicher Verlauf von Versorgungsleistung und Nachfrage. ....	134
Abbildung 9.5:	Ergebnisse des Resistenzverlusts unter Verwendung verschiedener Verbrauchsfunktionen. ....	146
Abbildung 9.6:	Darstellung der Verbrauchsquote für drei fiktive KRITIS-Einrichtungen. ....	148
Abbildung 9.7:	Berücksichtigung eines Leistungsverlustes im Resistenzverlust. ....	149
Abbildung 9.8:	Berücksichtigung eines Teilleistungserhalts im Resistenzverlust. ....	150
Abbildung 9.9:	Berücksichtigung von Leistungsverlust und Teilleistungserhalt im Resistenzverlust. .	151
Abbildung 10.1:	Schnittstellen zwischen den Entscheidungsträgern, dem KRITIS-Kataster und der Bestimmung der Eingangswerte. ....	152
Abbildung 10.2:	Aufbau des modifizierten Delphi-Verfahrens zur Bestimmung des Relevanzgewichtes. ....	154
Abbildung 10.3:	Fragebogen zur Bestimmung von Relevanzgewichten. ....	156
Abbildung 10.4:	Abschätzung von Relevanzgewichten durch Entscheider, N=32. ....	157
Abbildung 10.5:	Streuung und statistische Verteilungen der Rückmeldungen für den KRITIS-Typ Krankenhäuser. ....	158
Abbildung 10.6:	Ergebnisse der Expertenbefragung zur Abschätzung des Resistenzwertes für unterschiedliche Verbrauchsquoten.....	163
Abbildung 10.7:	Resistenzverlust-Verbrauchsquote-Diagramm für die ausgewählten Dezil-Verbrauchsquoten. ....	166
Abbildung 10.8:	Dauer des Bemessungsstromausfalls anhand der kumulierten relativen Häufigkeit (empirische Verteilfunktion). ....	168
Abbildung 11.1:	Empfohlene Aggregationsverfahren zur Vulnerabilitätsanalyse. ....	172
Abbildung 11.2:	Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex für KRITIS-Einrichtungen nach Variante 1. ....	175
Abbildung 11.3:	Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex für KRITIS-Einrichtungen nach Variante 2. ....	176
Abbildung 11.4:	Ergebnisse der progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes am Beispiel. ....	180
Abbildung 11.5:	Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Einrichtungen. ....	182
Abbildung 11.6:	Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindizes für KRITIS-Typen nach beiden Varianten. ....	184
Abbildung 11.7:	Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Typen. ....	185
Abbildung 11.8:	Ergebnisse der statischen Vulnerabilitätsindizes für Gebietskörperschaften nach beiden Varianten. ....	186

Abbildung 11.9: Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von Gebietskörperschaften. ....	188
Abbildung 12.1: Resilienzwerte basierend auf dem progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil. ....	193
Abbildung 12.2: Schutzzielorientierte Bewertung eines Performanzverlaufs. ....	196
Abbildung 12.3: Schutzzielorientierte Bewertung eines Vulnerabilitätsprofils. ....	197
Abbildung 12.4: Beispiele für eine infrastrukturzeitliche und raumzeitliche Schutzzielformulierung. ....	198
Abbildung 13.1: Standorte von KRITIS-Einrichtungen in den Stadtteilen des Stadtkreises Karlsruhe. ....	206
Abbildung 13.2: Verlauf des am schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Karlsruhe. ....	207
Abbildung 13.3: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Karlsruhe. ....	209
Abbildung 13.4: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Karlsruhe ohne die Berücksichtigung von Versorgungsleistungen. ....	211
Abbildung 13.5: Heat Map der Standortdichte der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Karlsruhe. ....	212
Abbildung 13.6: Verlauf der Vulnerabilität der Karlsruher Krankenhäuser. ....	213
Abbildung 13.7: Verlauf der Vulnerabilität aller Karlsruher Krankenhäuser ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung. ....	214
Abbildung 13.8: Heat Map der Vulnerabilitätsdichte für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Karlsruhe. ....	216
Abbildung 13.9: Vulnerabilitätsverlauf der Karlsruher Stadtteile. ....	217
Abbildung 13.10: Räumliche Gefahrenpotentiale in Karlsruhe für verschiedene Zeitpunkte. ....	219
Abbildung 13.11: Gegenüberstellung der Vulnerabilität der Karlsruher Stadtteile am zweiten Ausfalltag um 8:15 Uhr und 9:30 Uhr. ....	220
Abbildung 13.12: Vulnerabilitätsverlauf der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen. ....	221
Abbildung 13.13: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Dialysekliniken, Hausärzte, Trinkwassereinrichtungen und Alten-/Pflegeeinrichtungen in Karlsruhe mit Streuung. ....	223
Abbildung 13.14: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Krankenhäuser, Apotheken und Haushalte in Karlsruhe mit Streuung sowie eine Übersicht. ....	224
Abbildung 13.15: Vulnerabilitätsverläufe ausgewählter Stadtteile von Karlsruhe mit Streuung. ....	225
Abbildung 13.16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von geänderten Gewichtswerten im Anwendungsfall Karlsruhe. ....	226
Abbildung 13.17: Identifizierte Plateaus im Anwendungsfall Karlsruhe. ....	227
Abbildung 13.18: Identifizierte Tipping Points im Anwendungsfall Karlsruhe. ....	227
Abbildung 13.19: Ergebnis der schutzzielorientierten Bewertung des Gefahrenpotentials für die Stadt Karlsruhe. ....	228
Abbildung 13.20: Histogramm der aggregierten Zielerreichung bei prioritärer Versorgung einzelner Karlsruher Stadtteile. ....	229
Abbildung 13.21: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Weststadt. ....	229

Abbildung 13.22: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen. ....	230
Abbildung 13.23: Übersicht der vom Netz zu trennenden Umspannwerkbezirke bei Lastreduzierung im Stadtkreis Karlsruhe. ....	231
Abbildung 13.24: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 30. Januar 2008 in Karlsruhe. ....	232
Abbildung 13.25: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 3. November 2012 in Karlsruhe. ....	233
Abbildung 13.26: Standorte von KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim. ....	235
Abbildung 13.27: Verlauf des am schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim. ....	237
Abbildung 13.28: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim. ....	238
Abbildung 13.29: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim ohne die Berücksichtigung von Versorgungsleistungen. ....	240
Abbildung 13.30: Heat Map Standortdichte der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim. ....	241
Abbildung 13.31: Verlauf der Vulnerabilität der Mannheimer Krankenhäuser. ....	242
Abbildung 13.32: Verlauf der Vulnerabilität aller Mannheimer Krankenhäuser ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung. ....	243
Abbildung 13.33: Heat Map Vulnerabilitätsdichte für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim. ....	244
Abbildung 13.34: Vulnerabilitätsverlauf der Mannheimer Stadtbezirke. ....	245
Abbildung 13.35: Räumliche Gefahrenpotentiale in Mannheim für verschiedene Zeitpunkte. ....	246
Abbildung 13.36: Gegenüberstellung der Vulnerabilität der Mannheimer Stadtbezirke am zweiten Ausfalltag um 7:15 Uhr und 9:15 Uhr. ....	247
Abbildung 13.37: Vulnerabilitätsverlauf der Stadtbezirke Neckarstadt-Ost, Schwetzingen/Oststadt und Lindenhof. ....	248
Abbildung 13.38: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Dialysekliniken, Hausärzte, Betreutes Wohnen und Alten-/Pflegeeinrichtungen in Mannheim mit Streuung. ....	249
Abbildung 13.39: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Krankenhäuser, Apotheken und Haushalte in Mannheim mit Streuung sowie eine Übersicht. ....	250
Abbildung 13.40: Vulnerabilitätsverläufe ausgewählter Stadtbezirke von Mannheim mit Streuung. ....	251
Abbildung 13.41: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse von geänderten Gewichtswerten im Anwendungsfall Mannheim. ....	252
Abbildung 13.42: Identifizierte Plateaus im Anwendungsfall Mannheim. ....	253
Abbildung 13.43: Identifizierte Tipping Points im Anwendungsfall Mannheim. ....	253
Abbildung 13.44: Ergebnis der schutzzielorientierten Bewertung des Gefahrenpotentials für die Stadt Mannheim. ....	254
Abbildung 13.45: Histogramm der aggregierten Zielerreichung bei prioritärer Versorgung einzelner Mannheimer Stadtbezirke. ....	255
Abbildung 13.46: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Innen-stadt/Jungbusch. ....	255

Abbildung 13.47: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Lindenhof.....	256
Abbildung 13.48: Übersicht der vom Netz zu trennenden Umspannwerkbezirke bei einer rollierenden Abschaltung im Stadtkreis Mannheim.....	257
Abbildung 13.49: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 11. Juni 2014 in Mannheim. ....	258
Abbildung 13.50: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 06. Juli 2015 in Mannheim.....	259
Abbildung 14.1: Screenshot der Nutzeroberfläche des Java-basierten Demonstrators.....	270



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abschätzung der Folgen durch (Zer-)Störung ausgewählter Netzkomponenten. ....	13
Tabelle 2:	Abgestufte Szenarien im Krisenhandbuch Stromausfall (vgl. Hiete et al., 2010). ....	35
Tabelle 3:	Abgestufte Szenarien in den hessischen Rahmenempfehlungen zur Vorbereitung auf Stromausfälle (vgl. HdMI, 2013). ....	35
Tabelle 4:	Sektoren- und Brancheneinteilung in Deutschland (vgl. BMI, 2011a).....	64
Tabelle 5:	Vorgeschlagene Schutzziele des BBKs nach Mayer und Lauwe (2015). ....	73
Tabelle 6:	Klassifikation von Entscheidungsmodellen anhand eines morphologischen Kastens in Anlehnung an Götze und Bloech (1995). ....	98
Tabelle 7:	Gängige Bezeichnung von Profiltypen und ihre Zuordnung zu Kundengruppen.....	136
Tabelle 8:	Liste geeigneter Vergleichsattribute für ausgewählte KRITIS-Typen und mögliche Quellen. ....	160
Tabelle 9:	Zuordnung von KRITIS-Typen zu Stromlastprofilen der BDEW.....	162
Tabelle 10:	Übersicht über parametrisierte Dezil-Verbrauchsfunktionen. ....	165
Tabelle 11:	Auszug aus einem KRITIS-Kataster mit Merkmalen von KRITIS-Einrichtungen des fiktiven Beispiels. ....	173
Tabelle 12:	Ränge der im Beispiel analysierten statischen Vulnerabilität der KRITIS-Einrichtungen ..... .....	177
Tabelle 13:	Morphologischer Kasten mit möglichen Maßen und Metriken der Schutzzielformulierung. ....	198
Tabelle 14:	Übersicht über die berücksichtigten KRITIS-Typen in den Anwendungsfällen. ....	202
Tabelle 15:	Übersicht der jeweils fünf schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginne eines Bemessungsstromausfalls in Karlsruhe. ....	207
Tabelle 16:	Rangliste der KRITIS-Typen nach Gefahrenpotential im Stadtkreis Karlsruhe.....	210
Tabelle 17:	Rangliste der Karlsruher Stadtteile nach Gefahrenpotential.....	218
Tabelle 18:	Übersicht der jeweils fünf schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginne eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim.....	236
Tabelle 19:	Rangliste der KRITIS-Typen nach Gefahrenpotential.....	239
Tabelle 20:	Rangliste der Stadtbezirke von Mannheim nach Gefahrenpotential. ....	245
Tabelle 21:	Abgeleitete Thesen aus den Erkenntnissen der bisherigen Anwendungsfälle. ....	263



# Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland
AHP	Analytic Hierachy Process
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
Art.	Artikel
BABS	Bundesamt für Bevölkerungsschutz, nachgeordnete Behörde des Eidgenössischen Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, nachgeordnete Behörde des Bundesministeriums des Innern
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMI	Bundesministerium des Innern
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BNetzA	Bundesnetzagentur
BPD	Amt für Bauordnung und Hochbau Bauprüfdienst
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CARRI	Community and Regional Resilience Institute
CCER	Council of European Energy Regulators
CEDIM	Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology
CI	Critical Infrastructures
CIPRE	Critical Infrastructure Protection and Resilience Europe
CONSENTEC	Consulting für Energiewirtschaft und-technik GmbH
dena	Deutsche Energie-Agentur GmbH

DST	Deutscher Städtetag
ebd.	ebenda
ECIs	European Critical Infrastructures
ENTSOE	European Network of Transmission System Operators for Electricity
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HAW Landshut	Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut
HdMI	Hessisches Ministerium des Innern und für Sport
HGF	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.
Hrsg.	Herausgeber
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion am Karlsruher Institut für Technologie
Inkl.	inklusive
IKET	Institut für Kern- und Energietechnik am Karlsruher Institut für Technologie
Lst	Leitstelle
KAS	Kommission für Anlagensicherheit
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
KZV	Konzeption Zivile Verteidigung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LÜKEX	Länderübergreifende Krisenmanagementübung
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MAO	Maximum Acceptable Outage
MBCO	Minimum Business Continuity Objective
MIS RLP	Ministerium des Innern und für Sport Rheinland-Pfalz
MKRO	Ministerkonferenz für Raumordnung

MODM	Multi-Objective Decision Making
MTPD	Maximum Tolerable Period of Disruption
MVK	Mindestversorgungskonzept
PCIIP	President's Commission on Critical Infrastructure Protection
PwC	PricewaterhouseCoopers
Rn.	Rundnummer
RSS	Residual Sum of Squares
RTO	Recovery Time Objective
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
S.	Seite
SDL	Systemdienstleistungen
SEAK	BMBF-finanziertes Forschungsprojekt „Entscheidungsunterstützung zur Bewältigung von Engpässen in der Nahrungsmittelversorgung“
SKK	Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
UN	United Nations
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
UTCE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDN	Verband der Netzbetreiber e. V.
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.
VNB	Verteilnetzbetreiber
VoLL	Value of Lost Load
z. B.	Zum Beispiel







# 1 Einleitung

## 1.1 Entscheidungsunterstützung zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren

Stromausfälle können den Betrieb von lebensnotwendigen Einrichtungen wie Krankenhäusern, Dialyseklini-  
ken und Hausärzten - sogenannte Kritische Infrastrukturen (KRITIS) - empfindlich beeinträchtigen oder  
gar zu deren Ausfall führen. Damit drohen „nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Stö-  
rungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen“ (BMI, 2009), die durch die kommu-  
nale Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz zu vermeiden oder, wenn nicht anders möglich, zu  
beherrschen sind.

In Städten und Landkreisen bedarf es daher einer effektiven Vorbereitung auf Stromausfälle. Diese Arbeit  
adressiert diese Problemstellung mit der Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse, die  
für Entscheidungsträger der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes eine Entschei-  
dungsunterstützung sowohl im Rahmen der Bedarfsplanung als auch in der akuten Krisenbewältigung an-  
bietet. Neben einer tiefgreifenden Untersuchung der Anforderungen an die Entscheidungsfindung zur Ab-  
wehr stromausfallbedingter Gefahren werden hierfür ebenso geeignete Bemessungsgrundlagen erörtert  
und das Verständnis von Kritischen Infrastrukturen im Hinblick auf die kommunale Ausrichtung des deut-  
schen Krisenmanagements spezifiziert.

Mit der entwickelten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wird ein für die Entscheidungsfindung in  
der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes geeignetes und systematisches Beurteilungsverfahren  
bereit gestellt, durch das einerseits ein ganzheitliches und einheitliches Verständnis über die lokalen  
und raum-zeitlichen Wirkungen eines Stromausfalls und andererseits eine Priorisierung von Einrichtungen  
Kritischer Infrastrukturen oder Gliederungen einer Gebietskörperschaft möglich wird. Dadurch ergeben  
sich nicht nur neue lokal- und objektspezifische Erkenntnisse über den Handlungsbedarf für die Vorberei-  
tung auf Stromausfälle und deren Beherrschung, sondern auch neue Impulse für die kommunalen Sicher-  
heitspartnerschaften zwischen den Betreibern der Kritischen Infrastrukturen, der Gefahrenabwehr und  
des Katastrophenschutzes.

Darüber hinaus bietet die Vulnerabilitätsanalyse ein Maß für das raumzeitliche Gefahrenpotential im  
Netzbetrieb, anhand dessen eine prioritäre und damit diskriminierende Versorgung von Kritischen Infra-  
strukturen oder Gliederungen einer Gebietskörperschaft während netzkritischer Situationen möglich  
wird. Neben der Unterstützung von Entscheidern der Gefahrenabwehr bzw. des Katastrophenschutzes  
führt ein solches Maß für das raumzeitliche Gefahrenpotential bei der Umsetzung von Netz- und System-  
sicherheitsmaßnahmen wie Lastreduzierungen und Inselbetrieben zu einer Stärkung der gesellschaftli-  
chen Resilienz gegenüber den Gefahren eines (drohenden) Stromausfalls.

Die vorliegende Arbeit entstand am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in den Instituten für Kern-  
und Energietechnik (IKET) und für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) sowie am Cen-  
ter for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM). Sie knüpft inhaltlich an die Arbeiten  
zum Krisenhandbuch Stromausfall (Hiete, Merz, Trinks, Grambs und Thiede, 2010) an, das federführend  
am IIP entstanden ist und sich in Deutschland zur Standardliteratur bei der Vorbereitung auf Stromausfälle

entwickelt hat. Entstanden ist die vorliegende Arbeit parallel und in Verknüpfung zu assoziierten Forschungstätigkeiten u. a. in den Projekten KritisF&E<sup>1</sup>, SEAK<sup>2</sup>, HGF Port Folio Sicherheitsforschung<sup>3</sup>, Resilienz städtischer Infrastrukturen<sup>4</sup> und ResilienzStrom<sup>5</sup>. Dabei entstanden mehrere wissenschaftliche und gutachterlich bewertete Publikationen, anhand derer die nachfolgenden Forschungsergebnisse in der internationalen Wissenschaftsgesellschaft diskutiert wurden. Gleichwohl im Eingang der nachfolgenden Kapitel auf die jeweiligen Publikationen verwiesen wird, sind an dieser Stelle insbesondere die Publikationen Münzberg und Ottenburger (2018), Münzberg, Wiens und Schultmann (2017), Münzberg, Wiens, Raskob und Schultmann (2015a und b) sowie Münzberg, Wiens und Schultmann (2015) hervorzuheben. Durch sie sind prägnante methodische Ansätze und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit öffentlich. Des Weiteren wurden Erkenntnisse für einen anhaltenden Wissenstransfer in zahlreichen Artikeln in der einschlägigen Fachliteratur der Gefahrenabwehr veröffentlicht.

Besonders erfreulich ist, dass die erkannte Kernproblematik der vorliegenden Arbeit auch Eingang in die innen- und energiepolitische Debatte gefunden hat. Die Forderung nach einer priorisierten Versorgung von Kritischen Infrastrukturen durch den Deutschen Städtetag (DST) und der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland (AGBF) (AGBF und DST, 2015) stützt sich auf wesentliche Beiträge dieser Arbeit. In diesem Bezug steht auch eine Stellungnahme zur priorisierten Versorgung von Kritischen Infrastrukturen, die im Rahmen der Erstellung der VDE-AR-N 4140 verfasst wurde. Gleichwohl in der VDE-AR-N 4140 aufgrund des Festhaltens am diskriminierungsfreien Netzbetrieb keine Priorisierung vorgesehen ist, wird sich die Problematik gerade mit der anhaltenden Digitalisierung des Netzbetriebes im wiederkehrenden Abstimmungsprozess zur Entwicklung der VDE-AR-N 4140 auch in Zukunft zu diskutieren sein.

## 1.2 Problemstellung

Mit der digitalen Transformation durchdringen digitale Technologien alle Lebensbereiche und Branchen. Sie verändern die Art und Weise wie wir kommunizieren, den Alltag gestalten, arbeiten, uns fortbewegen und mit Daten umgehen. Auch in der Industrie und Wirtschaft werden durch intelligente, digital vernetzte und selbstorganisierte Systeme Prozesse und Wertschöpfungsketten effektiver. In einer digitalisierten und vernetzten Welt steigt jedoch die Abhängigkeit von einer zuverlässigen Stromversorgung. Die Anfälligkeit, aufgrund eines Stromausfalls Schäden zu erleiden, steigt. Bereits kurzzeitige Stromausfälle oder Schwankungen von Winkel und Frequenz führen in Büros und Produktionsstätten zu erheblichen Schäden (Roon und Eberl, 2017; Flechtner und Bolay, 2015; Ruschmann, 2015). Entsprechend steigt die Sensibilisierung für die betriebliche Vorbereitung auf das operative Risiko eines Stromausfalls (ebd. sowie Bruch, Münch, Aichinger, Kuhn, Weymann und Schmid, 2011; Herre, Wieben, Wolf und Dierks, 2012).

---

1 BMI-finanziertes Forschungsprojekt „Review von Forschungsprojekten im Bereich Schutz Kritischer Infrastruktur“ (KritisF&E)

2 BMBF-finanziertes Forschungsprojekt „Entscheidungsunterstützung zur Bewältigung von Engpässen in der Nahrungsmittelversorgung“ (SEAK)

3 Durch die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. finanziertes Forschungsprojekt „Portfoliothema Sicherheitsforschung“ mit dem Schwerpunkt Schutz Kritischer Infrastrukturen

4 CEDIM-gefördertes Forschungsprojekt „Resilienz städtischer Infrastrukturen im Wandel der Zeit“

5 IKET-finanziertes Forschungsprojekt „Stärkung der Resilienz gegenüber Stromausfallgefahren durch Entscheidungsunterstützung unter besonderer Berücksichtigung von Kritischen Infrastrukturen und der kommunalen Gefahrenabwehr“ (Resilienz-Strom)

Bei den Bürgerinnen und Bürgern ist demgegenüber kein überzeugter Wille zur Vorbereitung auf einen Stromausfall zu erkennen. Zahlreiche Studien untersuchten die Vorbereitung auf Schadenslagen wie Stromausfälle und zeigen, dass in der deutschen Gesellschaft eine gewisse Verweigerung zu beobachten ist, sich individuell und ausreichend auf plausible Schadenslagen vorzubereiten (Ohder, Röpcke, Sticher, Geißler und Schweer, 2014; Rhein, 2013; Goersch, 2010; Menski und Gardemann, 2008; Rasche, Schmidt, Schneider und Waldtmann, 2000). Die behördlichen Empfehlungen zur Selbsthilfe werden stellenweise ignoriert, so dass ein Selbstschutz der Bevölkerung, mit den Wirkungen eines langanhaltenden Stromausfalls umzugehen, nur lückenhaft vorhanden ist. In der Praxis der Gefahrenabwehr ist bezüglich der privaten Notfallvorsorge der Bevölkerung vermehrt Unwissenheit, Anspruchsdenken und Hilflosigkeit wahrzunehmen (Schopp, 2016). Die Ressourcen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes zur Beherrschung und Bewältigung eines Stromausfalls sind derart limitiert, dass langanhaltende und großflächige Stromausfälle in kurzer Zeit Auslegungsgrenzen erreichen. Die Tendenz einer gewissen Selbstschutzverweigerung der Bevölkerung stellt daher eine zunehmende Herausforderung in der bedarfsgerechten Vorbereitung auf Stromausfälle dar.

Auch mit der Anpassung an den Klimawandel ist die Bedeutung für die Vorbereitung auf Stromausfälle gestiegen. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird für Deutschland das häufigere und intensivere Auftreten von Extremwetterereignissen und wetterbedingten Naturkatastrophen wie Orkane, Hitzewellen, Tornados, Hagel und Starkregen erwartet (u. a. Schwarz, Harmeling und Bals, 2007; Forzieri, Feyen, Russo, Voudoukas et al., 2016; Buth, Kahlenborn, Savelsberg, Becker et al., 2015). Extremwetterereignisse und wetterbedingte Naturkatastrophen führen regelmäßig zu Störungen im Netzbetrieb oder zu Zerstörungen von Netzelementen, die in Stromausfällen münden können. Zusätzlich wird in Hitzeperioden und bei Extremniedrigwasser die Stromproduktion von thermischen Kraftwerken regelmäßig eingeschränkt (Schönthaler, von Andrian-Werburg, van Rühl und Hempten, 2015), was die Zuverlässigkeit einer Stromversorgung bedrohen kann. Mit anhaltendem Klimawandel ist daher bei fehlender Anpassung mit häufigeren derartigen atmosphärischen Einwirkungen auf die Stromversorgung zu rechnen.

Die Bedeutung von Stromausfällen kann nicht von der anhaltenden Energiewende entkoppelt werden. Mit der Energiewende unterliegt das deutsche Stromversorgungssystem einem fundamentalen Wandel, der hohe Anforderungen an den Betrieb von Stromnetzen stellt. Die Netze werden an ihre Belastungsgrenzen gefahren. Um deren Stabilität zu gewährleisten, kommt es fast täglich zu Noteingriffen im Netzbetrieb (BNetzA, 2017a). Nur durch diese umfangreichen Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen konnten bisher langanhaltende und großflächige Stromausfälle abgewendet werden. Gerade im Zusammenhang mit besonderen Ereignissen wie das Nachgehen von Synchronuhren aufgrund der Absenkung der Netzfrequenz im Frühjahr 2018 (ENTSOE, 2018), dem sprunghaften Anstieg von Redispatchmaßnahmen in den Jahren 2015 und 2017 (BDEW, 2018), dem schleppenden Ausbau der Übertragungsnetze (u. a. Roon und Eberl, 2017; BNetzA, 2015; Flechtner und Bolay, 2015; Ruschmann, 2015), der Kalten Dunkelflaute im Januar 2017 (BNetzA, 2017b), der partiellen Sonnenfinsternis vom 20. März 2015 (BNetzA, 2015; Killinger, Kreifels, Burger, Müller, Stiff und Wittwer, 2016; Weniger, Bergner, Tjaden und Quaschnig, 2014) und dem Atommoratorium (BNetzA, 2011) werden wiederkehrend gesellschaftliche Diskussionen über die Sicherstellung der Stromversorgung und den Folgen von möglichen Stromausfällen geführt. Trotz des Netzbetriebs an den Stabilitätsgrenzen konnte bisher ein hierdurch ausgelöster langanhaltender und großflächiger Stromausfall vermieden werden. Auch ist die Störanfälligkeit der Stromversorgung in Deutschland im Vergleich zu anderen Staaten in Europa weiterhin äußerst gering (CEER, 2017). So blieb der SAIDI-Wert, der als Maß für die Versorgungssicherheit eines Netzes gilt, trotz der grundlegend angespannten Situation im Netzbetrieb in den vergangenen Jahren auf einem weitestgehend konstanten Niveau (BNetzA, 2017a).

Die kontrovers geringe Störanfälligkeit trägt zur Entstehung von Aufmerksamkeits- und Vulnerabilitätsparadoxen bei (Rosenthal, 1992, zitiert nach Riegel, 2015a). Da vermeintlich wenige Störungen auftreten, könnte der bestehende Sicherheitsaufwand als ausreichend angenommen werden und davon ausgegangen wird, dass durch die sowieso schon wenig stattfindenden Störereignisse auch mit weniger Ausfällen zu rechnen ist (Aufmerksamkeitsparadoxon) (ebd.). Gleichzeitig führt die anhaltende digitale Transformation und die damit verbundene erhöhte Abhängigkeit von der Stromversorgung sowie die geringe Störanfälligkeit dazu, dass sich Stromausfälle umso stärker auswirken (Verletzlichkeitsparadoxon) (ebd.). Beide Paradoxa münden in einer Verringerung des gesellschaftlichen Problembewusstseins und zu einer allgemeinen Überschätzung der Bewältigungsfähigkeiten.

Aufgabe der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes ist es, Schäden an Menschen, Tieren und Vermögenswerten, die durch einen Stromausfall verursacht werden, zu vermeiden, oder, wenn nicht anders möglich, zu minimieren (vgl. Kapitel 3). Eine erhebliche Sensibilisierung der Akteure der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes gegenüber den Gefahren eines langanhaltenden und großflächigen Stromausfalls ist seit der strategischen Neuordnung des deutschen Bevölkerungsschutzes im Jahr 2004 und mit der Durchführung der Länderübergreifenden Krisenmanagementübung (LÜKEX) im selben Jahr zu erkennen. Im Grünbuch „Risiken und Herausforderungen für die öffentliche Sicherheit in Deutschland“ des Zukunftsforums öffentliche Sicherheit (Reichenbach, Göbel, Wolff und Stokar von Neuforn, 2008) und in der Allianz-Studie „Katastrophenschutz auf dem Prüfstand“ (Kreutzer, 2008) wurden Stromausfälle als Schlüsselszenarios für die zukünftige Ausrichtung der Katastrophenabwehr identifiziert. Daraufhin haben sich eine Reihe von Arbeiten (u. a. Hiete et al., 2010; Petermann, Bradke, Lüllmann, Poetzsch und Riehm, 2010; Kirchner, Heinrich, Kemmler, Rits, Schlesinger und Weinmann, 2009; Klinger, Landeg, Murray, 2014) und Projekten (eine Übersicht findet sich bei Brenig, Fekete, Blümel, Münzberg et al., 2013) mit den möglichen Folgen eines Stromausfalls beschäftigt. Hierdurch existieren tiefgreifende Auseinandersetzungen und Kenntnisse über die allgemeinen Folgen eines Stromausfalls. Grundlegend zeigen die Ergebnisse dieser Arbeiten, dass die Beherrschung von Stromausfallgefahren unmittelbar mit dem kontinuierlichen Betrieb von Kritischen Infrastrukturen zusammenhängt. Die Schlüsselrolle Kritischer Infrastrukturen wurde auch mit der strategischen Neuordnung des deutschen Bevölkerungsschutzes 2004 stärker adressiert. Seitdem gibt es anhaltende Aktivitäten zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (u. a. BMI, 2005, 2007, 2009; Brenig et al., 2013).

Die Rolle Kritischer Infrastrukturen wird auch im aktuellen Sendai Rahmenwerk zur Reduzierung von Katastrophenrisiken der Vereinten Nationen thematisiert (das sogenannte Sendai Framework for Disaster Risk Reduction - UNISDR 2016-2021 (UNISDR, 2015)), dessen Umsetzung sich die Bundesregierung angeschlossen hat. Mit dem Rahmenwerk wird u. a. das Ziel verfolgt, Ausfälle von Kritischen Infrastrukturen nicht nur zu reduzieren, sondern auch die gesellschaftliche Resilienz gegenüber deren Ausfall zu stärken (UNISDR, 2015). Die Stärkung der Resilienz wird daher als eine Stärkung der Fähigkeit verstanden, zeitgerecht und effizient negativen Wirkungen zu widerstehen, sie zu absorbieren und sich zu erholen (UNISDR, 2009). Das schließt die Aufrechterhaltung und Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Kritischen Infrastrukturen ein (ebd.).

Im Rahmen der angeschobenen Novellierung der Rahmenrichtlinie für die Gesamtverteidigung und der Aktualisierung der Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) (BMI, 2016) werden Ausfälle oder Störungen Kritischer Infrastrukturen ebenso als ein zentrales Bedrohungsszenario erkannt. Zum Schutz der Zivilbevölkerung vor kriegsbedingten Gefahren im Spannungs- und Verteidigungsfall wird dabei der fortlaufende Schutz Kritischer Infrastrukturen als Voraussetzung für die Notfallversorgung erkannt. In Bezug auf die

Stromversorgung ist die Erstellung eines Gesamtkonzeptes Notstrom vorgesehen, mit dem „eine Minimalversorgung der Bevölkerung sowie eine Aufrechterhaltung der Grund- und Kernfunktionen der staatlichen Notfallvorsorge“ (ebd.) im Spannungs- und Verteidigungsfall abgesichert werden soll.

Bei der Vorbereitung auf Stromausfälle ist auch der unterschiedlichen Schutzwürdigkeit der Einrichtungen u. a. aufgrund ihrer bereitgestellten Dienstleistung und Größe Rechnung zu tragen. Trotz der langjährigen Aktivitäten in Deutschland existiert jedoch bisher weder eine vorherrschende Methodik, die eine Vergleichbarkeit der Schutzwürdigkeit herstellt, noch eine einheitliche Festlegung, welche Einrichtungen im Sinne des Katastrophenschutzes als Kritische Infrastrukturen anzusehen sind (vgl. Abschnitt 4.5.2). Die häufig anzufindende Deutung von Kritischen Infrastrukturen als überregionale Infrastruktursysteme spiegelt nicht ausreichend das individuell vorhandene Gefahrenpotential wider, was durch die örtliche Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz einer Gebietskörperschaft zu beherrschen ist. Ein solcher Definitionsansatz verschleiert darüber hinaus, dass bei einem Stromausfall auch Schaden droht von Einrichtungen wie Störfallbetrieben, Krematorien, Bergwerken, Talsperren, Pumpwerken oder Schleusen, die klassischerweise nicht als Kritische Infrastrukturen erkannt werden. Für eine effektive Gefahrenabwehr bedarf es daher einem Verständnis von Kritischen Infrastrukturen, das nicht nur lokal, sondern auch in einem weiteren Sinne als in der klassischen Definitionsauslegung zu fassen ist (vgl. Abschnitt und 4.6.2).

Durch eine Vielzahl an Studien (Übersicht bei Brenig et al., 2013) sind die generellen Folgen eines Stromausfalls in Deutschland bekannt. Nichtsdestotrotz lässt sich von diesen oft nur pauschalen und qualitativen Projektergebnissen nicht konkret ableiten, wann und welche Gefahren während eines bestimmten Stromausfallsszenarios in einer Stadt oder in einem Landkreis entstehen und wie diese hinsichtlich ihrer zeitlichen Nähe und Erheblichkeit zu beurteilen sind (vgl. Abschnitt 4.1). Bei der für eine effektive Vorbereitung auf Stromausfälle als auch zu deren Beherrschung notwendig werdende sachgerechten und objektiven Beurteilung von Gefahrenpotentialen führen die infrastrukturellen Zusammenhänge, die individuellen Eigenschaften der Einrichtungen und die unzähligen und unbekanntenen Interdependenzen zu einer hohen Komplexität. Hinzu kommt, dass für eine effektive Katastrophenvorsorge die eigenverantwortliche Vorbereitung der Betreiber Kritischer Infrastrukturen bedarfsgerecht verzahnt werden muss mit dem Vorgehen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes (vgl. Abschnitt 4.4). Die betreiberseitigen Betrachtungen enden jedoch regelmäßig an den jeweiligen Betriebsgrenzen. Es bedarf daher eines ganzheitlichen und einheitlichen Verständnisses aller Akteure über die lokalen stromausfallbedingten Wirkungen (vgl. Abschnitt 4.1).

Die Mehrzahl der Stromausfälle halten äußerst kurz an, so dass häufig keine Unterversorgung der Bevölkerung mit lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen droht (vgl. Abschnitt 4.2). Eine Unterversorgung kann sich jedoch aufgrund der weitgreifenden gegenseitigen Interdependenzen von Kritischen Infrastrukturen in das gesamte Versorgungssystem einer Gebietskörperschaft ausbreiten (vgl. Abschnitt 5.6). Daher ist es umso wichtiger, grundlegende Abhängigkeiten von KRITIS-Einrichtungen von der Stromversorgung zu verstehen und bereits in frühzeitigen Eskalationsphasen geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen, damit drohende Domino- und Kaskadeneffekte verhindert oder zumindest verzögert werden. Die Beherrschung der initialen Folgen eines Stromausfalls für die KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft erscheint dabei als einer der bedeutendsten Hebel für die Stärkung der gesellschaftlichen Resilienz (vgl. Abschnitt 5.6). Hierfür bedarf es der Beurteilung des Gefahrenpotentials einzelner KRITIS-Einrichtungen als auch deren jeweiligen Rolle im Verbund aller KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft. Für die Beurteilung dieser individuellen und örtlichen raum-zeitlichen Gefahren fehlt es den Entscheidungsträgern der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes bisher an geeigneten Maßen, Bemessungsgrundlagen und einer Entscheidungsunterstützung.

Geeignete Maße für eine Beurteilung raum-zeitlicher Gefahrenpotentiale können auch netztechnisch bei der Umsetzung der operativen und informatorischen Kaskade nach VDE-AR-N 4140, insbesondere bei Lastreduzierungen und Netzinselbetrieben, zu einer Stärkung der Resilienz führen. Im Hinblick auf die anhaltende Digitalisierung des Netzbetriebs und dem in Zukunft flächendeckend möglichen objektscharfen Schalten von Netzendkunden, kann mithilfe geeigneter Gefahren- oder Kritikalitätsmaße ein priorisiertes Schalten von KRITIS-Einrichtungen möglich werden. So kann es je nach Schadenslage und je nach Netzsteuerung technisch möglich sein, bei Lastreduzierungen und bei Netzinselbetrieb nicht nur den Forderungen der operativen und informatorischen Kaskade zu entsprechen, sondern gleichzeitig KRITIS-Einrichtungen entsprechend ihres Gefahrenpotentials diskriminierend und kontinuierlich mit Strom weiter zu versorgen. Die hierfür notwendige Anwendung eines geeigneten raum-zeitlichen Gefahrenmaßes zur Priorisierung von Netzendkunden ermöglicht damit eine wesentliche Steigerung der Resilienz einer Stadt oder eines Landkreises.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich eine Reihe von Modellansätzen und Analyseverfahren, mit denen die Wirkungen von Infrastrukturausfällen beurteilt werden (vgl. Abschnitte 5.5 und 5.6). Keines dieser Ansätze und Verfahren hat sich jedoch bisher in der Gefahrenabwehr als Entscheidungsunterstützung durchsetzen können. Gründe hierfür lassen sich im Wesentlichen darin finden, dass die Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung, insbesondere die durch die Gefahrenprognose, nicht ausreichend adressiert werden. Die gewählte Auflösungsebene führt zumeist zu abstrakten Ergebnissen, anhand derer die Ableitung konkreten Handlungsbedarfs in einem konkreten Stromausfallszenario für eine bestimmte Gebietskörperschaft nicht ausreichend entsprechend der örtlichen Zuständigkeit möglich sind. Einschätzungen der Entscheidungsträger, die auf Erfahrung, örtlichen Kenntnissen und insbesondere Tatsachewissen in der Entscheidungssituation beruhen und für eine rechtssichere Entscheidung Berücksichtigung finden müssen, lassen sich in der Regel nicht einbinden. Zudem werden zur Durchführung häufig entweder Daten verwendet, die derart generisch sind, dass durch sie keine lokalspezifischen Umstände abgebildet werden, oder Daten benötigt, die in der geforderten Quantität und Qualität nicht zentral verfügbar sind bzw. deren Zusammenstellung, auch im Hinblick auf die notwendige stetige Aktualisierung, weder verwaltungspraktisch umsetzbar noch im Verhältnis zum anvisierten Erkenntnisgewinn steht. Auch werden den Entscheidungsprozessen in der akuten Krisenbewältigung als auch in der Phase der Vorbereitung nicht ausreichend Bedeutung zugemessen. Insbesondere bei größeren Schadenslagen ist zu berücksichtigen, dass Entscheidungen nicht durch eine alleinige Instanz getroffen werden, sondern vielmehr in einer Koordinierungsgruppe oder in einem Führungs- bzw. Verwaltungsstab im Konsens entwickelt werden. Gruppenentscheidungen und die Diskussion zur Konsensfindung sind daher von wesentlicher Bedeutung in der Entscheidungsfindung.

Für die Katastrophenvorsorge haben sich indikatorenbasierte Vulnerabilitätsanalysen als ein erfolgreicher Ansatz einer Entscheidungsunterstützung erwiesen (vgl. Abschnitt 5.1). Gerade wenn Wirkungen auf ein System nicht direkt gemessen werden können, kann durch geeignete Indikatoren und Aggregationen auf die Vulnerabilität des Systems geschlossen und anhand dessen eine Gefahrenanalyse durchgeführt werden. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich einige multiattributive Ansätze von Vulnerabilitätsanalysen, die raum-zeitliche Analysen von Gefahren ermöglichen (vgl. Abschnitt 6.2.5). Keines dieser Verfahren adressiert jedoch die Analyse von Stromausfallfolgen. Hierfür fehlt es bisher an geeigneten Indikatoren und methodischen Erweiterungen, die die besonderen Belange der Gefahrenprognose berücksichtigen. Im Hinblick auf multiattributive Verfahren existieren darüber hinaus Ansätze, durch die Gruppenentscheidungen unterstützt und Parameterunsicherheiten berücksichtigt werden. Da beides für eine geeignete Entscheidungsunterstützung von Relevanz ist, erscheint der Ansatz einer indikatorenbasierten und eine auf einem multiattributiven Verfahren basierende Vulnerabilitätsanalyse zielführend.

## 1.3 Zielstellung, Lösungsweg und Struktur der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine geeignete Beurteilungsmethodik zu entwickeln, um spatial-temporale Gefahrenpotentiale mithilfe einer Vulnerabilitätsanalyse zu bewerten und hierdurch für das initiale Krisenmanagement eine Entscheidungsunterstützung zur Verfügung zu stellen. Hierbei sind

- Lokale Kritische Infrastrukturen für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr in Deutschland zu spezifizieren,
- geeignete Bemessungsgrundlagen zu entwickeln,
- der durch einen Stromausfall bedrohte kontinuierliche Betrieb von Kritischen Infrastrukturen als Gefahrenpotential mithilfe eines objektiven Maßes darzustellen,
- für eine Gefahrenprognose raum-zeitliche Wirkungen von Stromausfällen unterhalb der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städten zeitlich geeignet aufzulösen,
- Gruppenentscheide und die Einflussnahme der Entscheidungsträger mit ihren ortslokalen Kenntnissen und Tatsachenwissen zu ermöglichen und
- die zur Verfügung stehenden oder mit verhältnismäßigem Aufwand zu recherchierenden Daten über ortsspezifische und individuelle Eigenschaften Kritischer Infrastrukturen zu verwenden.

Hinsichtlich der Methodik leitet sich hiervon die *Forschungsfrage* ab, wie eine geeignete multiattributive Analysemethodik für eine Vulnerabilitätsanalyse entwickelt werden kann, die die aufgezeigten Anforderungen adressiert und für beliebige Gebietskörperschaften angewendet werden kann.

Gelöst wird dies mit der Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse, die, basierend auf einem multiattributiven Analyseverfahren, indikatorenbasiert eine Beurteilung von raum-zeitlichen Gefahrenpotentialen ermöglicht. Hierfür werden Lokale Kritische Infrastrukturen für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr in Deutschland spezifiziert und geeignete Bemessungsgrundlagen erörtert. Für die Vulnerabilitätsanalyse werden Indikatoren gewählt, die die Kritikalität und die Bewältigungskapazität von KRITIS-Einrichtungen beschreiben und dadurch ihre Schutzwürdigkeit und ihre Betriebsfähigkeit während eines Stromausfalls aufzeigen. Zudem werden einige Indikatoren dynamisiert, damit zeitliche Analysen möglich werden. Zur Operationalisierung der Indikatoren werden Informationen über die KRITIS-Einrichtungen verwendet, die üblicherweise in KRITIS-Katastern zur Verfügung stehen. Entscheidungsträger werden bei der Beurteilung der Indikatorenwerte mithilfe von Expertenabschätzungen und der methodischen Kombination mit einem Delphi-Verfahren so eingebunden, dass einerseits Beurteilungen durch Durchschnittsentscheider deutlich werden und andererseits örtliche Kenntnisse und Tatsachenwissen in die Analyse einfließen können. Gleichzeitig werden die aufgrund der Subjektivität von Expertenabschätzungen bestehenden Parameterunschärfen durch die Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigt. Die Ergebnisse von multiattributiven Analyseverfahren werden üblicherweise mithilfe einer Aggregation erstellt. Da mit jeder Aggregation auch entscheidungsrelevante Informationen verloren gehen, werden innerhalb der Vulnerabilitätsanalyse verschiedene Aggregationsverfahren und zusätzliche Beurteilungsansätze für Gefahrenpotentiale verwendet.

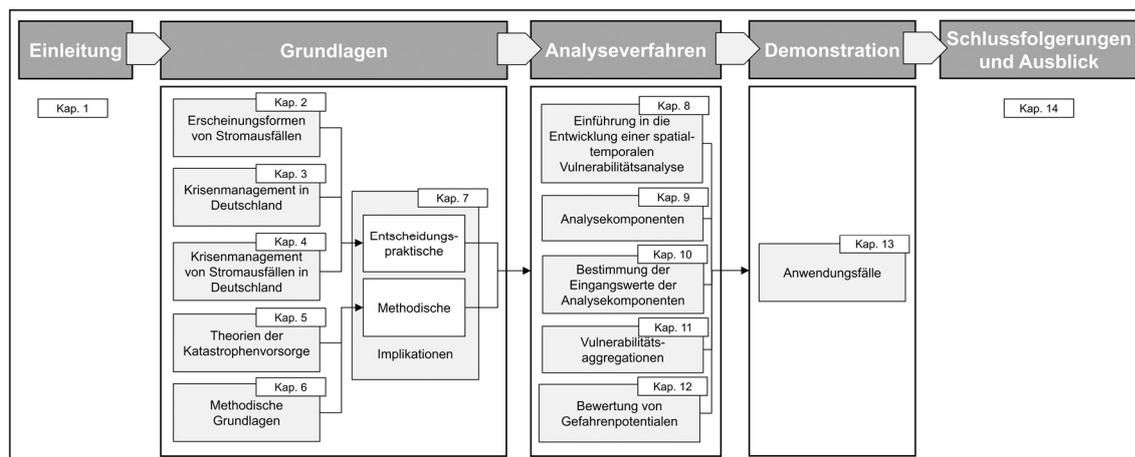


Abbildung 1.1: Struktur der vorliegenden Arbeit.

Aus Abbildung 1.1 geht die Struktur der vorliegenden Arbeit hervor. Zur Entwicklung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wird zunächst in wichtige Grundlagen eingeführt. Dabei werden sowohl entscheidungspraktische als auch methodische Implikationen erörtert.

Im Hinblick auf entscheidungspraktische Implikationen werden die Erscheinungsformen von Stromausfällen (Kapitel 2) und die Grundlagen des Krisenmanagements in Deutschland im Allgemeinen (Kapitel 3) sowie im Besonderen in Bezug auf Stromausfälle (Kapitel 4) erläutert. In der allgemeinen Betrachtung des Krisenmanagements in Kapitel 3 wird auf die Entscheidungsfindung, die Beurteilung von Gefahren und die Katastrophenschutzplanung eingegangen. In Bezug auf Stromausfälle werden in Kapitel 4 stromausfallbedingte Gefahren spezifiziert, relevante Stromausfallszenarien erörtert und Schutzpflichten herausgestellt. Darüber hinaus wird die Rolle von Kritischen Infrastrukturen als lokalspezifische Schutzgüter bzw. als Lokale Kritische Infrastrukturen betrachtet. Es wird auf den Stand der Vorbereitung auf stromausfallbedingte Gefahren eingegangen.

Bezüglich der methodischen Implikationen werden in Kapitel 5 theoretische Grundsätze der Katastrophenvorsorge vorgestellt. Dabei werden die Theorien der Vulnerabilität, Resilienz, Kritikalität, Bewältigungskapazität sowie der Stand der Technik der Methodik des Value-of-Lost-Load und der Interdependenzanalyse erläutert, mit denen Stromausfallfolgen beurteilt werden. In Kapitel 6 wird Entscheidungstheorie und -modelle sowie die Grundlagen multikriterieller Analysemethoden und die Zielprogrammierung beleuchtet.

Diese hinführenden Erörterungen werden in Kapitel 7 zu entscheidungspraktischen und methodischen Implikationen zusammengeführt und das zu adressierende Entscheidungsproblem, die Entscheidungsträger und die Lösungsmethoden samt Zielsystem und Entscheidungsfeld zusammengefasst.

Die eigentliche Entwicklung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse ist in fünf Kapitel gegliedert. Einführend wird in Kapitel 8 die zu entwickelnde Vulnerabilitätsanalyse eingebettet in die Entscheidungsprozesse der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung sowie in die Theorien der Katastrophenvorsorge. Dabei werden auch die Struktur und das Verfahren der Vulnerabilitätsanalyse im Detail erläutert. Es folgt in Kapitel 9 die Erörterung der einzelnen Analysekomponenten der Gewichtung und der Indikatoren. In Kapitel 10 werden die Eingangswerte der Analysekomponenten bestimmt. Die eigentlichen Ergebnisse werden mithilfe verschiedener Vulnerabilitätsaggregationen in Kapitel 11 und Bewertungen

von Gefahrenpotentialen in Kapitel 12 ermittelt. Deren Aufbau, Darstellung und Interpretation wird jeweils erläutert.

Zur Demonstration der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse werden im Kapitel 13 zwei Anwendungsfälle umgesetzt. Anhand der Stadtkreise Karlsruhe und Mannheim wird der jeweils schwerwiegendste und mildeste Ausfallbeginn ermittelt sowie die Gefahrenpotentiale und szenariobasierten Ergebnisse entsprechend einer durchgeführten Vulnerabilitätsanalyse dargestellt.

In Kapitel 14 findet eine kritische Auseinandersetzung mit der Methodik und den Ergebnissen der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse statt. Die Anschlussfähigkeit und der zukünftige Forschungsbedarf werden aufgezeigt.



## 2 Erscheinungsformen von Stromausfällen

Je nach Ursache ergeben sich unterschiedliche Erscheinungsformen eines Stromausfalls. Entsprechend unterscheidet sich die Entstehung von stromausfallbedingten Gefahren, was auch Folgen für deren Bewältigung hat. Im Nachfolgenden werden die zwei wesentlichen Erscheinungsformen von Stromausfällen beleuchtet. Zum einen werden Stromausfälle beleuchtet, die durch die Zerstörung von Netzinfrastruktur ausgelöst werden. Zum anderen werden die Stromausfälle betrachtet, die durch nicht beherrschte kritische Netz- und Systemzustände entstehen.

### 2.1 (Zer-)Störung von Netzkomponenten

Eine Ursache von Stromausfällen kann die (Zer-)Störung einzelner oder mehrerer Netzkomponenten sein. Durch die Anwendung des sogenannten (n-1)-Kriteriums ist jedoch die Mehrzahl der (Zer-)Störungen von Netzkomponenten netzseitig zu beherrschen, so dass langanhaltende Stromausfälle vermieden werden können.

Das (n-1)-Kriterium ist ein grundlegendes Sicherheitsprinzip der Netzplanung und des Netzbetriebs, durch das Großstörungen aufgrund des Ausfalls einzelner Netzkomponenten verhindert werden. Anhand des (n-1)-Kriteriums sind Netze und ihr Betrieb so zu konzipieren, dass ausreichend Redundanzen vorhanden sind und die Netzsicherheit auch bei einem Ausfall oder bei einer betrieblichen Abschaltung einzelner Betriebsmittel gewährleistet ist. Grenzen des (n-1)-Kriteriums sind jedoch bei der Beherrschung von Mehrfachfehlern zu erkennen, wie sie z. B. durch den Ausfall einer Sammelschiene, Common-Mode-Failures oder unabhängige Mehrfachausfälle von Betriebsmitteln entstehen (vgl. 50Hertz, Amprion, TenneT und TransnetzBW, 2015).

Die Dauer eines durch die (Zer-)Störung von Netzkomponenten verursachten Stromausfalls ist abhängig von der Dauer der Aktivierung des (n-1)-Kriteriums (bzw. des Umschaltens) und ggf. von der Dauer der Reparatur der betroffenen Bauteile, wenn durch die Nutzung des (n-1)-Kriteriums eine Wiederherstellung der Stromversorgung nicht möglich ist. Die Dimensionierung der Maßnahmen zur Sicherstellung des (n-1)-Kriteriums erfolgt regelmäßig anhand der so genannten Zollenkopf-Kriterien (vgl. Abschnitt 4.2.4). Demnach sind die unvermeidbaren Ausfallzeiten in der Mittelspannungsebene auf acht bis zehn Stunden zu begrenzen, was der maximal möglichen Ausfallzeit von Tiefkühlgeräten entspricht (Scheffler, 2016; Bosch & Partner GmbH und Forschungsgruppe Umweltpsychologie, 2015; Vennegeerts et al., 2013).

Die (Zer-)Störung von Netzkomponenten kann unterschiedliche Ursachen haben. U. a. nach Bosch & Partner GmbH und Forschungsgruppe Umweltpsychologie, 2015, Hiete et al., 2010 und Petermann et al., 2011, können dies

- Naturereignisse mit auslegungsüberschreitenden Belastungen wie Blitzschlägen mit rückwärtigem Überschlag, Hochwasser (mit Wasser-, Schlamm- und Schmutzeintritt sowie Kurz- und Erdschlüssen etc.), Stürme (mit Seiltanzen, Windbruch etc.), extreme Eis- und Schneelasten (mit Mastbruch, Schneebruch etc.), elektromagnetische Belastungen (wie durch Sonnenstürme) und Erdbeben,
- Tiere (Kabelbiss, Kurzschlüsse etc.),
- fahrlässige menschliche Handlungen (Baggerbisse, Spundwandrammen oder Verkehrsunfälle etc.),
- vorsätzliche menschliche Handlungen (Sabotage, Manipulationen, kriminelle Handlungen, terroristische Anschläge, Cyberangriffe etc.),
- sonstige Einflüsse der Umwelt in unmittelbarer Wirkung (wie Brände, Explosionen, elektromagnetische Impulse etc.)
- Bauteilversagen,
- fehlerhafte Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten oder
- auslegungsüberschreitende Belastungen durch kritische Netz- und Systemzustände

sein.

In Tabelle 1 sind ausgewählte Netzkomponenten aufgezählt und plausible Konsequenzen ihrer Zerstörung abgeschätzt. Dabei wird das vom Stromausfall betroffene Gebiet und die Dauer des Stromausfalls abgeschätzt. Da tatsächliche Folgen nur anhand von Einzelfallbetrachtungen unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten der Netztopologie und des vom Zeitpunkt abhängigen Netzbetriebs ermittelt werden können, erfolgt die Abschätzung in qualitativer und generischer Weise und stellt lediglich plausible anzunehmende Folgen dar. Darüber hinaus ist zu betonen, dass je nach Ursache der (Zer-)Störungen auch mehrere Bauteile betroffen sein können, wodurch das betroffene Gebiet größer sein und der Ausfall länger andauern kann.

Die Abschätzung der Tabelle 1 zeigen, dass (Zer-)Störungen von einzelnen Netzkomponenten zu keinem gravierenden Stromausfall führen. Die Ereignisse sind im überwiegenden Maße lokal und zeitlich begrenzt. Nichtsdestotrotz zeigen flächendeckend wirkende Ereignisse der Vergangenheit wie der Sturm Lothar (u. a. Broggi und Roch, 1999) oder das Münsterländer Schneechaos (u. a. BAM, 2006), dass es zu Kombinationen von Einzel(zer-)störungen kommen kann, die aufgrund der zu erwartenden langen Dauer der Wiederherstellung und Reparatur zu langandauernden Stromausfällen führen können.

Tabelle 1: Abschätzung der Folgen durch (Zer-)Störung ausgewählter Netzkomponenten.

<b>(Zer-)Störung der Netzkomponenten (Auswahl)</b>		<b>Abschätzung des vom Stromausfall betroffenen Gebietes</b>	<b>Abschätzung der Dauer des Stromausfalls</b>
Konservative Großkraftwerke	Einzelne (Zer-)Störung von Großkraftwerken	Kein Stromausfall*	Kein Stromausfall*
	Gleichzeitige (Zer-)Störung mehrerer Großkraftwerke	Bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Verteilnetzen	Kurzweilig, je nach Dauer der Lastreduzierung
Dezentrale Energieeinspeisung durch erneuerbare Energie	(Zer-)Störung einer einzelnen Anlage zur dezentralen Energieeinspeisung	Kein Stromausfall	Kein Stromausfall
	Gleichzeitige (Zer-)Störung mehrerer Anlagen zur dezentralen Energieeinspeisung	Bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Verteilnetzen	Kurzweilig, je nach Dauer der Lastreduzierung
Netzbetrieb von Übertragungsnetzen (Höchstspannungsnetze)	(Zer-)Störung einer Netzleitstelle eines Übertragungsnetzes	Ausfall der betroffenen Regelzone	Mehrere Stunden je nach Dauer der Aktivierung des Ausweichsitzes und ggf. der Netzwiederherstellung
	(Zer-)Störung einer Höchstspannungsleitung	Kein Stromausfall*	Kein Stromausfall*
	Gleichzeitige (Zer-)Störung mehrerer Höchstspannungsleitungen	Bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Verteilnetzen	Je nach Dauer der ggf. notwendig werdenden Dauer der Lastreduzierung und der Reparatur
	(Zer-)Störung einer oder mehrerer Grenzkupplstellen	Bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Verteilnetzen	Je nach Dauer der ggf. notwendig werdenden Dauer der Lastreduzierung und der Reparatur
	(Zer-)Störung eines Umspannwerks für die Kopplung von Höchst- und Hochspannung	Wahrscheinlich kein Stromausfall*, bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Verteilnetzen	Wahrscheinlich kein Stromausfall*, Je nach Dauer der ggf. notwendig werdenden Dauer der Lastreduzierung und der Reparatur

<b>(Zer-)Störung der Netzkomponenten (Auswahl)</b>		<b>Abschätzung des vom Stromausfall betroffenen Gebietes</b>	<b>Abschätzung der Dauer des Stromausfalls</b>
Netzbetrieb von Verteilnetzen (Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze)	(Zer-)Störung einer Netzleitstelle eines Verteilnetzes	Ausfall des betreffenden Verteilnetzes	Mehrere Stunden je nach Dauer der Aktivierung des Ausweichsitzes und ggf. der Netzwiederherstellung
	(Zer-)Störung einer Hochspannungsleitung	Bei Störung der Systembilanz Lastreduzierung in einzelnen Teilen des Verteilnetzes	Je nach Dauer der ggf. notwendig werdenden Dauer der Lastreduzierung und Umschaltung
	(Zer-)Störung einer Mittelspannungsleitung	Stromausfall bei nachgelagerten Umspannwerkbezirken (Ortsteilnetze)	Für die Dauer der Umschaltung oder der Reparatur
	(Zer-)Störung einer Niederspannungsleitung	Stromausfall bei einzelnen Netzkunden, ggf. einige Straßenzüge	Für die Dauer der Umschaltung oder der Reparatur
	(Zer-)Störung eines Umspannwerks für die Kopplung von Hoch- und Mittelspannung bzw. von Mittel- und Niederspannung	Stromausfall bei nachgelagerten Umspannwerkbezirken (Ortsteilnetze)	Für die Dauer der Umschaltung oder der Reparatur

\* kein Ausfall bei erfüllten (n-1)-Kriterium

## 2.2 Kritische Netz- und Systemzustände

Kritische Netz- und Systemzustände können zu unterschiedlichen Formen von Stromausfällen führen. Im schwerwiegendsten Fall kommt es zum Zusammenbruch eines oder mehrerer Übertragungsnetze. Ein derartiger Netzzusammenbruch (auch als Schwarzfall oder Blackout bezeichnet) hat weitreichende Folgen, da hierdurch auch die nachgelagerten Verteilnetze, die mit dem einspeisenden Übertragungsnetz synchronisiert sind, von einem Ausfall bedroht sind. Den gekoppelten, nachgelagerten Verteilnetzen und deren Netzkunden droht die Spannungslosigkeit. Zusätzlich kann es bei einem Netzzusammenbruch des Übertragungsnetzes zur Auftrennung der Netze kommen.

Aufgrund der weitläufigen Versorgung eines Übertragungsnetzes sind bei dessen Zusammenbruch mehrere Landkreise und kreisfreie Städte in mehreren Bundesländern betroffen. Der Wiederaufbau gestaltet sich kompliziert und langwierig (zur Dauer der Netzwiederherstellung vgl. Abschnitt 4.2.7).

Ausgelöst werden kann ein Netzzusammenbruch durch eine nicht ausgeglichene Systembilanz oder durch Netzengpässe (fehlende Netzsicherheit) (vgl. VDE-AR-N 4140). Zur Vermeidung von Netzzusammenbrüchen sind durch die Netzbetreiber Maßnahmen geplant, die zu kleinräumigen und kurzen Abkopplungen von einigen Netzkunden von der Stromversorgung führen. Diese so genannten diskriminierungsfreien Lastreduzierungen sind als eigenständige Erscheinungsform eines Stromausfalls zu verstehen und werden

im Abschnitt 4.2.5 im Detail betrachtet. Auf die Vermeidung und den Umgang mit Netzzusammenbrüchen wird im Abschnitt 4.1 eingegangen.

## **2.3 Fazit**

Die möglichen Ursachen von Stromausfällen sind vielfältig und lassen sich im Wesentlichen auf die Zerstörung von Netzinfrastrukturen oder auf kritische Netz- und Systemzustände zurückführen. Die einzelnen Ursachen lassen sich jedoch nicht in jedem Fall in diese beiden Kategorien trennscharf einordnen und bedingen teilweise einander. Je nach Ursachen variiert die Erscheinungsform eines Stromausfalls. Zwar hängt die Entstehung von stromausfallbedingten Gefahren von der Erscheinungsform eines Stromausfalls ab, für die eigentliche Bewältigung der stromausfallbedingten Gefahren spielt die Ursache aufgrund der Unvorhersagbarkeit und der Vielfältigkeit der Erscheinungsformen jedoch eine untergeordnete Rolle. Daher wird der Ursache eines Stromausfalls auch in der Entwicklung der Entscheidungsunterstützung im Nachfolgenden nur eine nachgeordnete Bedeutung beigemessen.

## 3 Krisenmanagement in Deutschland

Für das Tätigwerden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes bedarf es der formellen und materiellen Rechtmäßigkeit. Sie bilden die normativen Grundlagen und damit die entscheidungstheoretischen Randbedingungen der Entscheidungsfindung eines rational handelnden Entscheiders. Ausgehend von dieser Grundlage sind die eigentlichen Entscheider und die praxisrelevanten Anforderungen an eine Entscheidungsunterstützung zur Beherrschung stromausfallbedingter Gefahren abzuleiten.

In diesem Kapitel werden zunächst die normativen Grundlagen des Krisenmanagements in Deutschland anhand seiner Grundprinzipien erörtert. Anschließend erfolgen detaillierte Auseinandersetzungen mit der Auslegung des Begriffs der Gefahr und der Gefahrenprognose, der planerischen Vorbereitung auf Katastrophen sowie den Schutzziele zur bedarfsgerechten Vorbereitung. In den Darlegungen der rechtlichen Gegebenheiten des Krisenmanagements stehen weniger die detaillierte rechtsphilosophische Herleitung als die durch die entsprechende Gesetzeslage etablierten normativen Anforderungen an die Organisation und an die Durchführung der Entscheidungsfindung im Vordergrund.

Die Aufarbeitung in diesem Kapitel ist der Ausgangspunkt für das nachfolgende Kapitel 4, in dem das Krisenmanagement von Stromausfällen in Deutschland spezifiziert wird. Die Erkenntnisse beider Kapitel dienen der Herausarbeitung entscheidungspraktischer Implikationen für die Entwicklung der Entscheidungsunterstützung. Diese werden hierfür in Kapitel 7 zusammengefasst.

### 3.1 Grundprinzipien des Krisenmanagements in Deutschland

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen normativen Grundprinzipien der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes in Deutschland erläutert. Ziel ist es, die im Hinblick auf die Entwicklung der Entscheidungsunterstützung relevanten entscheidungstheoretischen Rahmenbedingungen darzustellen. Die davon abgeleiteten Erkenntnisse dienen der Ausrichtung der zu entwickelnden Entscheidungsunterstützung an die bestehende (Rechts-)Praxis.

Die Abwehr von Gefahren in Deutschland folgt gesetzlich festgelegten Grundprinzipien. Aus der Literatur des Katastrophenschutzrechts werden für die Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung die relevanten Prinzipien

- der Schutzpflicht,
- der Dezentralisation,
- der Kooperation,
- der Vermeidung und der Vorbereitung und
- der Selbsthilfe

erörtert. Die Erörterung erfolgt im Wesentlichen beziehungsweise auf die Arbeiten von Walus (2012) und Kloepfer (2015).

### 3.1.1 Schutzpflichtprinzip

Für den Eingriff der Gefahrenabwehr bzw. des Katastrophenschutzes bedarf es eines drohenden Schadens an rechtlich geschützten Interessen. Rechtlich geschützte Interessen ergeben sich aus Schutzpflichten. Schutzgüter verkörpern dabei die aus Schutzpflichten hergeleiteten öffentlichen Interessen. Allgemeines Ziel bei der Wahrnehmung einer Schutzpflicht ist es, ein Schutzgut vor Bedrohungen und Gefahren zu schützen (Schutzziel).

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei Schutzpflichten von herausragender Bedeutung.

Aus dem Grundrecht „auf Leben und körperlicher Unversehrtheit“ nach Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG in Verbindung mit dem im Art. 1 Abs. 1 Satz 2 GG verankerten Schutz der unantastbaren Menschenwürde leitet sich die Abwehr vor unzulässigen Eingriffen als Schutzpflicht des Staates her (u. a. BVerfGE 46, 160, 164; BVerfGE 45, 187, 254 f.; BVerfGE 56, 54, 63; Dietlein, 2005, S. 62 ff.; Stern, 2010, 241 ff.; Schulze-Fielitz, 2004, Rn. 76 ff.; Sachs, 2009, Art. 1 Rn. 35; Walus, 2012). Diese Schutzpflicht gilt sowohl gegenüber dem Einzelnen als auch gegenüber der Gesamtheit aller Bürger. Sie verpflichtet den Staat, jedes menschliche Leben umfassend zu schützen und gegenwärtige oder drohende Gefahr für das Leben abzuwenden (u. a. Dreier, 2004, Rn. 102; Steinkamm, 1989). Die Schutzpflicht bezieht sich nicht nur auf die Abwehr der tatsächlich vorliegenden Gefahren, sondern auch auf die Vorbereitung der Abwehr möglicher Gefahren (vgl. Kloepfer, 2010a, S. 394). Sie ist unabhängig von der Kausalität einer Gefahr, die sowohl menschlich als auch natürlich sein kann (Walus, 2012). Regelmäßig sind Präventions- und Vorsorgemaßnahmen anzupassen (zu legislativen Schutzpflichten auch auf dem Gebiet der Risikoprävention siehe auch Steinkamm, 1989).

Neben der Herleitung der Schutzpflicht auf Grundlage des Rechts auf Leben und körperlicher Unversehrtheit wird darüber hinaus noch die sozialstaatliche Leistungspflicht als relevante Schutzpflicht erkannt (vgl. Murswiek, 2009, Rn. 213). Sie leitet sich aus dem Sozialstaatsprinzip nach Art. 20 Abs. 1. GG her (ebd.). Demnach führt das Sozialstaatsprinzip zu einer Schutzpflicht zur Daseinsvorsorge, die in den Fällen eintritt, in denen sich der Einzelne nicht allein helfen kann und es der Solidarität der Gemeinschaft bedarf (ebd.). In der Literatur wird dieser Ansatz kontrovers diskutiert und kritisiert (Walus, 2012, S. 33), da durch eine solche Herleitung das Schutzrecht des Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG auf Übergriffe durch andere Menschen oder des Staates begrenzt wird und sich so eine Schutzpflicht vor Gefahren nicht abbilden lässt (ebd.). Gleichwohl würde eine aus dem Art. 20 Abs. 1 GG hergeleitete Schutzpflicht auch die Sicherstellung einer Daseinsvorsorge beinhalten.

Das durch Schutzpflichten begründete Eingreifen hat entsprechend dem rechtsstaatlichen Prinzip des Art. 20 Abs. 3 GG verhältnismäßig zu erfolgen. Demnach ist bei jeder behördlichen Maßnahme zu prüfen, ob ein legitimer Zweck vorliegt und ob die Maßnahme geeignet, erforderlich und angemessen ist (Verhältnismäßigkeitsprüfung). Geeignete Maßnahmen erreichen oder fördern zumindest den legitimen Zweck. Erforderlich ist eine Maßnahme dann, wenn sie gegenüber anderen geeigneten Maßnahmen das mildere, weniger belastende Mittel darstellt. Die Angemessenheit erfüllt eine Maßnahme dann, wenn Vor- und Nachteile der Maßnahme gegeneinander abgewogen sind und die negativen Eingriffsauswirkungen in Relation zur Wertigkeit der Zielerreichung stehen.

Da die auf Schutzpflichten basierende Eingriffsgrundlage einer Gefahr für ein Schutzgut bedarf, ist der Begriff der Gefahr näher zu betrachten. Diese Betrachtung findet im Abschnitt 3.2 statt. Hinsichtlich der sozialstaatlichen Leistungspflicht wird der Begriff der Daseinsvorsorge im Detail im Abschnitt 4.5.2 betrachtet.

### 3.1.2 Dezentralisationsprinzip

Die Bund-Länder-Kompetenzen zur Gesetzgebung und zur Verwaltung der Abwehr von Gefahren sind dezentral verteilt. Bei der Zuweisung der Kompetenzen nach Art. 30 GG, Art. 70 Abs. 1 GG und Art. 83 ff. GG wird im Allgemeinen zwischen Friedens- und Kriegszeiten und im Besonderen zwischen der alltäglichen Gefahrenabwehr, dem Katastrophenschutz und dem Zivilschutz unterschieden (u. a. Lange und Gusy, 2015). Da verfassungsrechtlich die alltägliche Gefahrenabwehr und der Katastrophenschutz zur Beherrschung und Bewältigung von Krisen in Friedenszeiten nicht dem Bund zugewiesen werden, liegt eine Residualkompetenz der Länder vor. Hierfür führen die Länder die Ressourcenvorsorge als auch das operative Krisen- und Koordinationsmanagement aus (ebd.). Entsprechend ihrer Gesetzgebungskompetenz nach Art. 70 GG regeln sie dies durch landesspezifische Sicherheits-, Polizei- und Ordnungsgesetze, Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetze sowie Rettungsdienstgesetze.

Der Bund ist nach Art. 115a Abs. 1 Satz 1 GG und Art. 73 Abs. 1 Nr. 1 GG zuständig für den Schutz vor Kriegswirkungen im Verteidigungsfall sowie nach Nr. 14 für Gefahren durch Freiwerden von Kernenergie und ionisierender Strahlung. Der Bund unterhält für diesen Zweck den Zivilschutz, den er im Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG) regelt. Im Rahmen des Zivilschutzes und seiner Zuständigkeit unterstützt und berät der Bund die Länder beim Schutz Kritischer Infrastrukturen nach § 18 Abs. 2 ZSKG. Darüber hinaus verfügt der Bund über weitreichende Eingriffs- und Ermächtigungsrechte durch Notstandsgesetze, um Versorgungsleistungen zur zivilen Verteidigung (Sicherstellungsgesetze), die teilweise auch bei Krisen außerhalb des Spannungsfall (Art. 80 Abs. 1 GG) oder Verteidigungsfall (Art. 115 Abs. 1 GG) Anwendung finden, oder zur Deckung des lebenswichtigen Bedarfs sicherzustellen (Vorsorgegesetze). Sie regeln u. a. Eingriffe in die Bereiche Arbeit, Ernährung, Verkehr, Wasserversorgung, Wirtschaft, Post- und Telekommunikation zur Versorgung der Zivilbevölkerung, der Streitkräfte und anderer Bedarfsträger. Diese Versorgungsleistungen werden in diesem Kontext als verteidigungswichtig verstanden. Vorsorgegesetze können teilweise auch in Friedenszeiten bei Naturkatastrophen, besonders schweren Unglücksfällen, Sabotagehandlungen, Terrorlagen oder wirtschaftlichen Krisenlagen Anwendung finden. Sie regeln u. a. Eingriffe in die Nahrungsmittel- und Energiewirtschaft, wenn die Deckung des lebenswichtigen Bedarfs an Nahrungsmitteln und Energie in wesentlichen Teilen des Bundesgebietes ernsthaft gefährdet oder gestört ist. Die Maßnahmen der auf den Vorsorge- und Sicherstellungsgesetzen basierenden Ermächtigungsrechte sind fortlaufend Gegenstand politischer Diskussionen.

Im Kontext dieser Arbeit sind die mit der Energie- und Elektrizitätsversorgung in Verbindung stehenden Sicherstellungsgesetze anzusprechen. Soweit unmittelbare Gefahren und Störungen der Energieversorgung nicht durch marktgerechte Maßnahmen beherrscht werden können, stehen dem Bund mit dem Energiesicherungsgesetz (EnSG) umfangreiche Ermächtigungsrechte zur Verfügung, mit denen er in die Energiewirtschaft eingreifen und so eine Deckung des lebenswichtigen Bedarfs an Energie erzielen kann. Im Besonderen bestehen mit der Elektrizitätssicherungsverordnung (EltSV) und der Elektrizitätslastverteilungs-Verordnung (EltLastV) umfangreiche Eingriffsrechte in die Elektrizitätswirtschaft für den Fall, in dem die bedarfsdeckende Elektrizitätsversorgung nicht sichergestellt werden kann. So kann zur Sicherung der Versorgung mit Elektrizität in weite Teile der Elektrizitätswirtschaft, in die ihr angeschlossenen Unternehmen und in die direkte Lastverteilung eingegriffen werden.

Die Länder regeln aufgrund ihrer Gesetzgebungskompetenz für den Katastrophenschutz ihre Katastrophenschutzverwaltungskompetenz durch landesspezifische Katastrophenschutzgesetze. Der Aufbau dieser Verwaltung ist unterschiedlich, lässt sich aber in einigen Punkten für Flächenländer und Stadtstaaten nach Kloepfer (2015) wie folgt generalisieren. Der Katastrophenschutz in den Stadtstaaten ist Aufgabe des

Landes, wohingegen sich in den Flächenländern oft ein dreistufiger Behördenaufbau finden lässt. Die Obersten Katastrophenschutzbehörden stellen die zuständigen Ministerien. Soweit ein Mittelbau vorhanden ist, stellen die Oberen Katastrophenschutzbehörden die Regierungspräsidien oder die Landesämter. Die Unteren Katastrophenschutzbehörden stellen die Landkreise und kreisfreien Städte (mehr hierzu s. Klopfer, 2015).

Walus (2012) führt aus, dass die Landkreise und kreisfreien Städte ihre Katastrophenschutzaufgabe vornehmlich als pflichtige Selbstverwaltungsaufgabe zur Erfüllung nach Weisung oder als Auftragsangelegenheit wahrnehmen. Damit findet eine Kommunalisierung des Katastrophenschutzes statt, durch die die Landkreise und kreisfreien Städte zuständig sind für allgemeine Maßnahmen des Katastrophenschutzes (Vgl. § 6 Abs. 1 Satz 1 LKatSG B-W; §§ 4 und 5 BbgBKG; §§ 4 und 5 HBKG; §§ 2 Abs. 1 und 4 BHKG NRW; §§ 4 und 6 LBKG R-P; § 2a KatSG-LSA; § 4 Abs. 1 LKatSG S-H; § 27 Abs. 1 ThürKatSG). Der operativ-taktische Katastrophenschutz findet somit dezentral auf der Ebene der Unteren Katastrophenschutzbehörden statt (vgl. Klopfer, 2015). Die jeweils nächsthöheren Katastrophenschutzbehörden nehmen zentrale Aufgaben wie die der Fachaufsicht über den Katastrophenschutz wahr. Sie unterstützen die Unteren Katastrophenschutzbehörden (ebd.).

Nach Walus (2012) ergibt sich die örtliche Zuständigkeit anhand der Landeskatastrophenschutzgesetze oder durch Rückgriff auf das allgemeine Ordnungsrecht. Im Ordnungsrecht wird regelmäßig festgelegt, dass die Behörde örtlich zuständig ist, in deren Bezirk bzw. Amtsbereich „eine Aufgabe der Gefahrenabwehr wahrzunehmen ist“ (vgl. § 4 Abs. 1 BrandOBG; § 5 Abs. 1 SOG M-V; § 100 Nds. SOG; § 4 Abs. 1 OBG NRW; § 91 Abs. 1 POG R-P; § 88 Abs. 1 SOG LSA; § 4 Abs. 3 Satz 2 ThürOBG) und in dem „die zu schützenden Interessen verletzt oder gefährdet werden“ (vgl. Hornmann, 2008; Walus, 2012).

Sind mehrere Landkreise und kreisfreien Städte von einem Ereignis betroffen, besteht dieser Örtlichkeitsbezug weiter. In diesen Fällen kann der Bedarf an einer einheitlichen überörtlichen operativ-taktischen Koordination bestehen, durch die die Maßnahmen in den einzelnen Gebietskörperschaften unter Abwägung der Umstände in allen betroffenen Gebieten geregelt und harmonisiert werden. Problematisch erscheint das insbesondere in der Sicherstellung der Verhältnismäßigkeit in der Verteilung beschränkt zur Verfügung stehender Ressourcen. Walus (2012) erkennt in derartigen Konstellationen die fehlende Koinzidenz von örtlicher Handlungskompetenz. Dies setzt sich fort, wenn neben mehreren Verwaltungsgebieten von Landkreisen und kreisfreien Städten auch mehrere Bezirke und Bundesländer betroffen sind. In Verbindung mit Ereignissen, denen eine so genannte Bundesrelevanz anhaftet, wird zunehmend ein Koordinierungs- und Steuerungsbedarf auf Bundesebene und eine Entscheidungsdistanz beim Bund konstruiert (u. a. vgl. Kirchbach, Franke und Biel, 2002; BBK, 2015a und c; Deutscher Bundestag, 2013a und b), die teilweise in Ideen zur Einrichtung einer Zentralstelle des Bundes für operatives Krisenmanagement gipfeln (vgl. Bundesrechnungshof, 2013). Eine Bundesrelevanz wird bei Ereignissen erkannt, bei denen mehrere Bundesländer gleichzeitig betroffen sind und in umfangreiche Ressourcen des Bundes zum Einsatz kommen, denen eine politische Brisanz für eine nationale Krise anhaftet oder die ihren Ursprung im Ausland haben und sich auf das Gebiet der Bundesrepublik auswirken (vgl. Deutscher Bundestag, 2013a und b). Seit der Neuordnung der Zusammenarbeit zwischen Bund und Länder im Zivil- und Katastrophenschutz 2002 wird eine Koordinierungs- und Steuerungskompetenz des Bundes diskutiert (Wissenschaftlicher Dienst, 2007). Zunehmend wird dem Bund eine Zuständigkeit bei Ereignissen mit Bundesrelevanz zugesprochen (ebd.; Bundesrechnungshof, 2013), ohne dass konkrete Rechtsbezüge hergestellt werden. Welche konkrete operative Kompetenz dem Bund in Ereignissen mit Bundesrelevanz zusteht, ist allein auf den Begriff der Bundesrelevanz abstellend nicht zweifelsfrei herleitbar.

### 3.1.3 Kooperationsprinzip

Der Katastrophenschutz kann nicht allein durch staatliche Stellen sichergestellt werden (vgl. Walus, 2012, S.107 ff.). Es bedarf vielmehr einer gemeinschaftlichen Verantwortung von Staat und Gesellschaft (vgl. Kloepfer, 2015, S.155 ff.), die durch Mitwirkung von Privaten als auch im Rahmen der Amtshilfe durch die Unterstützung der Kommunen und Länder untereinander und mithilfe des Bundes erreicht wird (vgl. Walus, 2012).

Die Amtshilfe als Teil des Kooperationsprinzips findet sich in § 5 f. VwVfG wieder. Behörden können Amtshilfe bei Kommunen, Landkreisen, Ländern und dem Bund ersuchen, wenn sie aus tatsächlichen Gründen und insbesondere beim Fehlen der zur Vornahme einer Amtshandlung erforderlichen Kräfte und Mittel die Amtshandlung nicht selbst vornehmen können oder sie die Amtshandlung nur mit wesentlich größerem Aufwand vornehmen könnten als die ersuchte Behörde. Ein Überforderungsvorbehalt wie bei der polizeilichen Notstandshilfe ist nicht vorgesehen (vgl. Walus, 2012). Gerade bei nur beschränkt zur Verfügung stehenden Mitteln und Kräften zur Gefahrenabwehr wird Amtshilfe entsprechend der Landeskatastrophenschutzgesetze als Nachbarschaftshilfe, überörtliche Hilfe und Überlandhilfe geleistet.

Bestehen Vorbehalte, kann die ersuchte Behörde die Amtshilfe ablehnen. Vorbehalte bestehen dann, wenn rechtliche Gründe dagegensprechen (§ 5 Abs. 2 Nr. 1 VwVfG), aus der Hilfeleistung Nachteile entstehen (§ 5 Abs. 2 Nr. 2 VwVfG) oder ein eigener Bedarf besteht (§ 5 Abs. 3 Nr. 3 VwVfG). Gerade überregionalen Gefahrenereignissen kann dabei ein rechtliches Konfliktpotential inne liegen, wenn mehrere Gebietskörperschaften um Amtshilfe bitten, für die mangelbedingt nicht im erforderlichen Umfang entsprochen werden kann (vgl. Walus, 2012). Ein solcher Konflikt erscheint vorprogrammiert, wenn mehrere Gebietskörperschaften oder Bundesländer von einem Stromausfall betroffen sind und im Rahmen der Amtshilfe um Notstromaggregate und Netzersatzanlagen insbesondere bei der Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) ersuchen. Eine Amtshilfe zwischen gleichzeitig betroffenen Gebietskörperschaften wird unter dem Vorbehalt des jeweiligen Eigenbedarfs abgelehnt. Der Bund und die Landkreise und kreisfreien Städte setzen dann die ihnen verfügbaren Ressourcen in ihrem Zuständigkeitsgebiet ein, ohne dass sie das Gefahrenpotential der anderen ersuchenden Behörde in Relation setzen. Der Vorbehalt des Eigenbedarfs kann dann zu einer nicht effektiven Gefahrenabwehr führen. Ersuchen von einem Stromausfall betroffene Behörden Amtshilfe bei unbetroffenen Dritten, ist eine isolierte Prüfung der Gefahrenpotentiale in den einzelnen Gebietskörperschaften weder sachgerecht noch zielführend. Da es in solchen Fällen zu divergierenden Lagebeurteilungen und Prioritätensetzungen kommen kann (vgl. Walus, 2012, S. 152), erscheint auf der Grundlage des § 5 Abs. 5 VwVfG ein Tätigwerden der jeweils gemeinsamen fachlich zuständigen Aufsichtsbehörde erforderlich, was in diesem Fall die übergeordnete Katastrophenschutzbehörde ist.

### 3.1.4 Vermeidungs- und Vorbereitungsprinzip

Ziel der Katastrophenvermeidung ist es, Katastrophengefahren bereits vor ihrer Entstehung soweit möglich und angemessen zu verhindern (vgl. Kloepfer, 2015, 110 ff.). In diesem Stadium sind Gefahren potentiell und als Risiko zu betrachten. Die Vermeidungspflicht bemisst sich nach Kloepfer aus dem Risikopotential der Größe und Schwere des Geschehens und der Entstehungswahrscheinlichkeit. Sie gipfelt nicht in einer absoluten Sicherheit, in der jegliche Gefährdung ausgeschlossen werden kann. Ist die Vermeidung

unverhältnismäßig, haben Bürger das Restrisiko hinzunehmen (vgl. Kloepfer, 2015, 110 ff.; BVerfGE 49, 89). Da die Katastrophenvermeidung nicht im engeren Sinne zum Katastrophenschutz gehört, findet sich ihre Regelung nicht in den Katastrophenschutzgesetzen (vgl. Kloepfer, 2015).

### 3.1.5 Selbsthilfeprinzip

Die Gefahrenabwehr und der Katastrophenschutz werden subsidiär tätig und entbinden den Einzelnen nicht davon, selbst Vorsorge zu betreiben oder im Gefahrenfall tätig zu werden. So regeln einige Brand- und Hilfeleistungsgesetze, dass Hilfe nur derjenige rufen darf, dem es nicht mehr eigenständig möglich und zumutbar ist, eine Gefahr zu beseitigen (vgl. § 13 FwG Berl, § 4 BremHilfeG, § 11 BbgBKG, § 29 FwG B-W, § 24 BrSchG S-A, § 24 BrSchG S-H, § 7 NBrandSchG, § 23 Abs. 1 BrSchG M-V, § 30 FwG B-W, § 23 Abs. 2 BrSchG M-V, § 31 LBKG R-P). Einige Katastrophenschutzgesetze verweisen explizit auf die Selbsthilfe der Bevölkerung. Soweit ein öffentliches Interesse besteht, ergänzen behördliche Maßnahmen des Katastrophenschutzes die Selbsthilfe (vgl. § 1 Abs. 3 HessBKG, § 1 Abs. 4 LBKG R-P, § 1 Abs. 3 Hmb-KatSG, § 1 Abs. 3 ThürBKG, § 1 Abs. 3 SaarBKG, § 1 Abs. 4 BHKG NRW). Kloepfer (2015, S. 120) erkennt keine materiellen Unterschiede zwischen der Selbsthilfe für Krisen in Friedenszeiten und dem Selbstschutz gegen Kriegswirkungen zur Zivilverteidigung. Synonym wendet er daher die Selbstschutz-Definition ebenso für die Selbsthilfe an und versteht darunter freiwillige, aus eigener Kraft erbrachte Maßnahmen eines Einzelnen, eines Betriebes oder der Gemeinschaft, die geeignet sind, drohende oder eingetretene Schäden im engeren Wohn- und Arbeitsbereich zu verhindern, zu mildern bzw. zu beseitigen (vgl. Kloepfer, 2015, S. 120).

## 3.2 Gefahr und Gefahrenprognose

Der Begriff der Gefahr wird in den Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetzen der Länder nicht näher erläutert. Mit der Einordnung dieser Gesetze in das besondere Ordnungsrecht kann jedoch zur Deutung des Begriffs der Gefahr auf die jeweiligen Ordnungs- bzw. Sicherheitsbehördengesetze (vgl. Walus, 2012, S. 92) und im Besonderen auf die polizei- und ordnungsrechtliche Generalklausel zurückgegriffen werden. Nach allgemeiner Begriffsauslegung der polizei- und ordnungsrechtlichen Generalklausel wird unter einer Gefahr eine Sachlage verstanden, die in absehbarer Zeit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit bei ungehindertem Geschehensablauf zu einem Schaden für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen würde (u. a. Götz, 2001, S. 61 ff.; BVerwGE 45, 51, 57; OVG Koblenz, NVwZ, 1992, 499; Jochum und Rühle, 1996, Rn. 38; § 2 Nds. SOG). Ein Schaden stellt eine objektive Verschlechterung oder Verletzung des Schutzguts der öffentlichen Sicherheit und Ordnung dar (Götz, 2001, S. 61 ff.).

Das Handeln der Gefahrenabwehr orientiert sich an zukünftig eintretenden Entwicklungen (vgl. Gusy, 2009). Um Gefahren festzustellen und sie zu beurteilen, bedarf es deswegen einer vollständig gerichtlich nachvollziehbaren Gefahrenprognose. Im Rahmen einer Gefahrenprognose sind alle tatsächlichen Anhaltspunkte und Anzeichen heranzuziehen und zu würdigen, die von den Entscheidern verfügbar und erreichbar sind. In diesem Sinne ist von einem rational handelnden Entscheider auszugehen, der nach Einhaltung der normativen Grundlagen strebt. Anhand aller tatsächlichen Anhaltspunkte ist auf den zu

erwartenden und hypothetischen Geschehensverlauf hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit<sup>1</sup> eines Schadenseintritts (Gefahrenpotential) im konkreten Einzelfall zu schließen (Kugelman, 2012, 98 f.).

Nach der Auslegung des polizeilichen Rechts braucht es nach Gusy (2009) dabei

- der Tatsachenfeststellung,
- der Ermittlung der Gefahrindizien,
- der Ermittlung der Gegenindizien und
- der Abwägung der verbleibenden Anhaltspunkte.

In der nicht-polizeilichen Gefahrenabwehr findet sich ein vergleichbares Vorgehen im Führungsvorgang der Dienstvorschrift 100 (DV 100) (SKK, 1999) in den Schritten der Lagefeststellung und der Planung (im Besonderen in der Beurteilung und in der Entschlussfassung) wieder.

Für die Feststellung, dass eine Gefahr besteht, existieren juristische Anforderungen, die nachfolgend bezugnehmend auf die einschlägige Literatur des Polizeirechts erörtert werden (u. a. Götz, 2001; Gusy, 2009; Kugelman, 2012; Lisken und Denninger, 2007). Der zukünftige Geschehensablauf und der Schaden bei ungehindertem Ablauf ist nach objektiven ex ante Maßstäben zu prognostizieren (Gefahrenprognose). Ausschlaggebend ist die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts, die durch einen Entscheider adäquat in der konkreten Situation ex ante getroffen werden würde (objektives Maß). Als Maßstab eines Entscheiders wird ein typischer Durchschnittsentscheider angenommen, der gut ausgebildet und sachkundig ist und sorgfältig, pflichtgemäß, gewissenhaft, besonnen, vernünftig und klug handelt. Für die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts ist der Zeitpunkt maßgeblich, in dem eine Gefahr durch den Entscheider festgestellt wird (BVerwG, DVBl., 1975, 888 f.). Zu diesem Zeitpunkt ist das Tatsachenwissen zu Grunde zu legen, das augenblicklich im Erkenntnishorizont des Entscheiders liegt. Die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts ist nicht im strengen mathematischen Sinne zu beurteilen, sondern stellt lediglich unterschiedliche Grade einer Beschreibung des möglichen Geschehensverlaufes dar. Es wird dabei zwischen unmöglichen und möglichen Geschehensverläufen unterschieden. Als hinreichend wahrscheinlich kann dabei schon die entfernte Möglichkeit gelten (vgl. Schwabe, 1987, S. 427 ff). Aufgrund der Natur der Entscheidungssituation ist zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit das verfügbare Tatsachenwissen stets mit Ungewissheit, Unschärfe und Unwissen behaftet. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Gefahrenprognose im Hinblick auf die zu prognostizierende Wahrscheinlichkeit sind geringer, je höher die Bedeutung des Schutzgutes und je größer der zu erwartende Schaden ist (Grundsatz umgekehrter Proportionalität) (BVerwG, DVBl., 1975, 888 f.).

Entsprechend der Erkenntnisse einer Gefahrenprognose liegt eine abstrakte Gefahr dann vor, wenn lediglich eine gewisse Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts nach der Sichtweise, allgemeiner Lebenserfahrung und aus reiner subjektiver Überzeugung des Entscheiders als entfernte Möglichkeit oder bloße Mutmaßung unterstellt wird (subjektives Maß) oder Erkenntnisse einer sachkundigen Stelle vorliegen, welche jedoch noch keinen sofortigen Handlungsbedarf erkennen lässt (u. a. Götz, 2001; Gusy, 2009; Kugelman, 2012; Lisken und Denninger, 2007).

---

<sup>1</sup> Im Polizeirecht wird der Begriff der Wahrscheinlichkeit sehr weit gefasst und in keiner Weise im strengen mathematischen Sinne ausgelegt. Der Begriff der Wahrscheinlichkeit im Kontext des Polizeirechtes wird nachfolgend spezifiziert.

Aus einer abstrakten Gefahr kann sich mit Eintritt eines Geschehensablaufs eine konkrete (drohende) Gefahr ergeben. Eine konkrete (drohende) Gefahr ist dann zu erkennen, wenn der Geschehensablauf bereits begonnen hat und dabei ist, sich zu verwirklichen. Kommt es bei einer konkreten Gefahr zum Schadenseintritt und der Geschehensablauf hält weiter an, so dass weiterer Schaden droht, handelt es sich im juristischen Sinne um eine Störung (ebd.).

Hinsichtlich der zeitlichen Nähe des Schadenseintritts wird der Begriff der gegenwärtigen Gefahr bzw. der synonym zu verstehenden unmittelbar bevorstehenden Gefahr (u. a. OVG Saarlouis, DÖV, 1973, 863) verwendet. Bei einer gegenwärtigen Gefahr wirkt ein schädigendes Ereignis bereits oder die Wirkung steht unmittelbar oder in allernächster Zeit bevor. Der Geschehensverlauf ist mit einer an „Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit“ bzw. „fast mit Gewissheit“ (u. a. BVerwG, 6 C 21.07, 14) abzusehen und die Sicherheit der Prognose durch die zeitliche Nähe hoch (u. a. OVG Saarlouis, DÖV, 1973, 863; BGH, NJW 1951, 769; Müller-Heidelberg, 1956; Stephan, Deger, Wöhrle, Wolf und Reiff, 2009). Ist die Bedeutung des gefährdeten Schutzgutes besonders hoch, liegt eine erhebliche Gefahr vor (vgl. § 2 Nds. SOG). Besteht sowohl eine gegenwärtige als auch eine erhebliche Gefahr, wird von dringender Gefahr gesprochen (vgl. BVerfGE 109, 279; BVerwG 47, 31, 40).

Ist ungewiss, ob eine Gefahr vorliegt, und bestehen Anhaltspunkte, die unter Würdigung und hinreichender Sachverhaltsaufklärung für das Vorhandensein einer Gefahr sprechen, liegt ein Gefahrenverdacht vor. In diesem Fall sind dem Umfang der Gefahr angemessene Gefahrenforschungseingriffe zulässig (Wapler, 2012, 86 ff.). Um eine Gefahr anzunehmen (Gefahrenverdacht), reicht auch die Feststellung eines drohenden Schadens, der nach Lebenserfahrung hinreichend wahrscheinlich ist und sich bei ungehindertem Ablauf einstellt (vgl. BayVGH, NJW 1979, 2631; OVG Münster, NJW 1980, 956). Da die Formen der Anscheinsgefahr und der Putativgefahr für die Entwicklung der Entscheidungsunterstützung nur bedingt relevant sind, werden sie an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

## **3.3 Vorbereitung auf Katastrophen und Katastrophenschutzplanung**

Da die Entscheidungsunterstützung wesentliche Aspekte der Vorbereitung auf einen Stromausfall adressieren soll, wird in den nachfolgenden Abschnitten ein Überblick über die gesetzlichen Anforderungen an die Erstellung von Katastrophenschutz-, Alarm- und Einsatzplänen und die Durchführung von Risikoanalysen gegeben. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft hinsichtlich der bedarfsgerechten Vorbereitung auf Schadenslagen und der Verwendung und Festlegung von Schutzziele erörtert.

### **3.3.1 Erstellen von Katastrophenschutz-, Einsatz- und Alarmplänen**

Zur Vorbereitung auf Gefahren größeren Ausmaßes haben die Behörden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes entsprechende Pläne zu erstellen. In den Katastrophenschutzgesetzen finden sich hierfür unterschiedliche Bezeichnungen wie Katastrophen-, Einsatz- und Alarmpläne (Abbildung 3.1). So sehen die Katastrophenschutzgesetze der Länder vor, dass interne (bzw. betriebliche) und externe Notfallpläne für Betriebsbereiche zu erstellen sind, von denen eine erhebliche Gefahr durch schwere Unfälle mit gefährlichen Stoffen ausgeht und für die daher entsprechend der Störfall-Verordnung in der jeweils geltenden Fassung ein Sicherheitsbericht zu erstellen ist (vgl. § 8a Abs. 1 LKatSG BW, Art. 3a Abs. 1 BayKSG, § 5 Abs. 1 KatSG Berlin, § 14 Abs. 1 Pkt. 3a und § 40 Abs. 1 BbgBKG,

§ 4 Abs. 4 Pkt. 3a und § 47 Abs. 1 BremHilfeG, § 13a HmbKatSG, § 38 Abs. 1 und § 45 Abs. 1 Pkt. 3 HBKG, § 13 Abs. 1 und § 17 Abs. 1 LKatSG M-V, § 10 Abs. 1 NKatSG, § 29 Abs. 3 und § 30 Abs. 1 BHKG NRW, § 5a Abs. 1 und § 31 Abs. 2 Pkt. 3 LBKG RLP, § 33 Abs. 2 Pkt. 3 und § 34 Abs. 1 Pkt. SBKG, § 43 Abs. 1 und § 55 Abs. 3 SächsBRKG, § 7 Abs. 2 KatSG-LSA, § 6 Abs. 2 Pkt. 5b LKatSG SH, § 33 Abs. 1 ThürBKG). Darüber hinaus haben die Katastrophenschutzbehörden nach den entsprechenden Landeskatastrophenschutzgesetzen Katastrophenschutz-, Alarm- und Einsatzpläne zu erstellen (Abbildung 3.1).

Katastrophenschutzpläne	Alarm- und Einsatzpläne	Katastrophenschutzpläne + Alarm- und Einsatzpläne	Keine Angaben
Ber NdS Bre MeV	RLP SAn*	BWü Saa Bay Sac Brb* SHo NRW* Thü	Ham

\* mit Sonder(-schutz)-Plänen

Abbildung 3.1: Übersicht über die zu erstellenden Pläne entsprechend den Katastrophenschutzgesetzen der Länder.

Je nach Landesgesetz beinhalten diese Pläne Erreichbarkeiten und Kontaktdaten, Übersichten über verfügbare Einsatzkräfte und -mittel, Ausrückeordnungen, Vorbereitungen für ein lageabhängiges Führungssystem, Warnmittel und -wege und vorbereitete Vorkehrungen für vorgeplante Notfallmaßnahmen. Anhand der Gesetzestexte lassen sich die Zweckstellungen und die Inhalte der Pläne oft nicht vollständig abgrenzen. Sie werden teilweise parallel und synonym verwendet, bauen aufeinander auf oder überschneiden sich inhaltlich.

In Berlin (nach § 4 Abs. 1 Pkt. 3 KatSG Berlin), Bremen (nach § 45 Abs. 2 Pkt. 3 BremHilfeG), Hessen (nach § 29 Abs. 1 Pkt. 4 HBKG), Niedersachsen (nach § 10 Abs. 1 NKatSG) und Mecklenburg-Vorpommern (nach § 12 Abs. 1 und 2 LKatSG M-V) sind ausschließlich Katastrophenschutzpläne zu erstellen. Die Gesetze sehen in diesen Ländern keine Alarm- und Einsatzpläne vor. In Rheinland-Pfalz sind ausschließlich Alarm- und Einsatzpläne (nach § 4 Abs. 1 Pkt. 4 und 5, § 5 Abs. 1 Pkt. 4 und 5 sowie § 6 Pkt. 1 LBKG RLP) und in Sachsen-Anhalt ausschließlich Gefahrenabwehr- und Einsatzplanungen in sogenannten Abwehrkalendern (nach § 7 Abs. 1 KatSG-LSA) zu erstellen. In Baden-Württemberg (nach § 2 Abs. 1 Pkt. 3 LKatSG BW), Bayern (nach Art. 3 Abs. 1 BayKSG), Brandenburg (nach § 4 Abs. 2 Pkt. 1, § 5 Abs. 2 Pkt. 1, § 37 Abs. 1 Pkt. 4 und § 39 BbgBKG), Nordrhein-Westfalen (nach § 4 Abs. 3 und § 5 Abs. 1 BHKG NRW), Saarland (nach § 3 Abs. 2 und § 20 Abs. 1 SBKG), Sachsen (nach § 7 Abs. 1 und § 36 SächsBRKG), Schleswig-Holstein (nach § 6 Abs. 2 Pkt. 5a und § 8 Abs. 2 Pkt. 1 LKatSG SH) und Thüringen (nach § 6 Abs. 1 Pkt. 3, § 7 Abs. 1 Pkt. 1 und § 31 Abs. 1 Pkt. 4 ThürBKG) sind sowohl Alarm- und Einsatzpläne als auch Katastrophenschutzpläne zu erstellen. Darüber hinaus existieren in Hessen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Nordrhein-Westfalen auch Anforderungen zur Erstellung von Sonder(-schutz)plänen. Einzig in Hamburg sieht das Katastrophenschutzgesetz keine explizite Erstellung von Plänen vor.

### 3.3.2 Risikoanalyse im deutschen Katastrophenschutzrecht

Für die Vorbereitung auf Katastrophen fordern die Landeskatastrophenschutzgesetze explizit oder implizit die Durchführung von Risikoanalysen (Abbildung 3.2). Ziel einer Risikoanalyse ist es, strukturiert Tatsachen festzustellen und für die Bemessung einer ausreichenden Vorbereitung zu untersuchen. Risikoanalysen stellen daher besondere Anforderungen an die Durchführung von Gefahrenprognosen (vgl. Abschnitt 3.2). Einige Landeskatastrophenschutzgesetze fordern explizit die Durchführung von entsprechenden Bestandteilen einer Risikoanalyse. In anderen Landesgesetzen finden sich wiederum nur

implizite Forderungen nach einer Risikoanalyse. Bei diesen wird gefordert, dass die Vorbereitung auf Katastrophen dem Verhältnismäßigkeitsprinzip Rechnung zu tragen hat. Hierzu sind die Durchführungen von Risikoanalysen zwangsläufig unumgänglich.

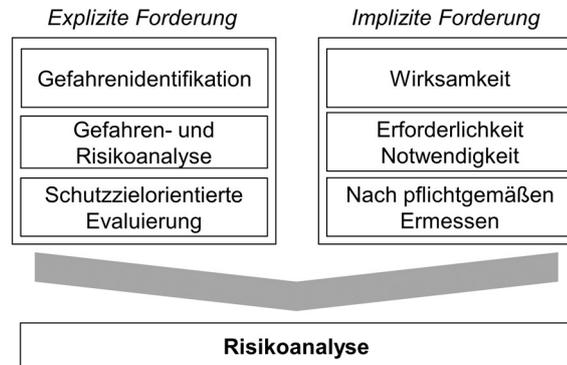


Abbildung 3.2: Implizite und explizite Forderungen nach einer Risikoanalyse zur Vorbereitung auf Katastrophen.

Soweit Gesetze explizite Forderungen nach einer Risikoanalyse beinhalten, sind Gefahren und Risiken zu identifizieren, zu untersuchen, abzuschätzen oder zu analysieren. Derartige Anforderungen finden sich außer in Bayern, Berlin, Bremen, Hamburg und Nordrhein-Westfalen in allen Landeskatastrophenschutzgesetzen mit unterschiedlichen Wortlauten wieder. Ein Überblick über die Formen der Risikoanalyse in den einzelnen Landeskatastrophenschutzgesetzen zeigt Abbildung 3.3.

Explizite Forderung	Gefahren-identifikation	Gefahren-untersuchung	Risikoanalyse o. Gefahrenanalyse	Schutzziele + Risikoanalyse + Gefahrenanalyse	Keine Angaben
	Hes <sup>**</sup> Thü <sup>**</sup>	BWit <sup>**</sup> NdS <sup>**</sup>	Sac <sup>**</sup>	Saa <sup>'</sup> Brb	Bay Ber
	RLP <sup>**</sup>	SHo SAn	MeV		Bre Ham
					NRW

\*\* als sog. Katastrophengefahr    ' Gefahrenabschätzung    \*\* indirekt

Abbildung 3.3: Überblick über implizite Forderungen zur Durchführung von Risikoanalysen.

In Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen sind drohende Gefahren zu identifizieren. In Hessen sind vorbereitende Maßnahmen für „besondere Gefahrenlagen“ (§ 31 Abs. 2 HBKG), in Rheinland-Pfalz für „Gefahren größeren Umfangs“ (§ 4 Abs. 1, § 5 Abs. 1 und § 6 LBKG RLP) und in Thüringen für „Gefahr bringende Ereignisse“ (§ 7 Abs. 1 Pkt. 1 ThürBKG) zu realisieren. Hierzu bedarf es neben der Identifikation möglicher Gefahren auch einer Bewertung, inwieweit diese ‚besonders‘ bzw. ‚umfangreich‘ sind.

In einigen Bundesländern sind Gefahren nicht nur zu identifizieren, sondern auch zu untersuchen und zu analysieren. So ist in Baden-Württemberg nach § 2 Abs. 1 Pkt. 3 LKatSG BW und in Niedersachsen nach § 7 Abs. 1 NKatSG zu untersuchen, welche Katastrophengefahren drohen. In Sachsen-Anhalt sind nach § 5 Abs. 1 KatSG-LSA „Risiken und Gefahrenquellen“ und in Schleswig-Holstein nach § 6 Abs. 2 Pkt. 1 LKatSG SH die „drohenden“ Katastrophen zu untersuchen. In Mecklenburg-Vorpommern wird in § 12 Abs. 1 LKatSG M-V geregelt, dass „auf der Grundlage von Gefährdungsanalysen Katastrophenschutzpläne“ zu erstellen sind. In Sachsen ist nach § 8 Abs. 1 Pkt. 9 SächsBRKG die oberste Brandschutz-, Rettungsdienst- und Katastrophenschutzbehörde zuständig „für die Erarbeitung und Fortschreibung einer landesweiten Analyse von Katastrophengefahren“.

In Saarbrücken und Brandenburg sind darüber hinaus auch schutzzielorientierte Evaluierungen vorzunehmen. In Saarbrücken hat das Land nach § 5 Abs. 3 SBKG „auf der Grundlage einer Gefährdungsabschätzung Schutzziele für gefährbringende Ereignisse“ festzulegen. In Brandenburg legen sowohl das Land als auch die Landkreise Schutzziele fest. So wird in § 4 Abs. 2 Pkt. 2 BbgBKG geregelt, dass Landkreise „eine überörtliche Gefahren- und Risikoanalyse erstellen und Schutzziele für ihr Gebiet festlegen“. Nach § 5 Abs. 2 Pkt. 2 BbgBKG legt das Land „auf der Grundlage einer Gefahren- und Risikoanalyse Schutzziele für Ereignisse“ fest, bei denen mehrere Landkreise oder kreisfreie Städte betroffen sein können. Auf die Bedeutung von Schutzziele wird im Abschnitt 3.3.3 eingegangen.

Ob Unterschiede zwischen einer Untersuchung, einer Abschätzung und einer Analyse von Gefahren bestehen, lässt sich aus den Gesetzestexten nicht zweifelsfrei auslegen und ist ggf. abhängig von den mit ihnen in Verbindung stehenden Rechtsverordnungen, Satzungen und Verwaltungsvorschriften. Nichtsdestotrotz sind sie mitsamt der Identifikation von Gefahren und Risiken Bestandteile einer Risikoanalyse.

In Bayern, Berlin, Bremen, Hamburg und Nordrhein-Westfalen wird auf das Festlegen von expliziten Rechtsvorschriften zur Durchführung einer Risikoanalyse verzichtet. Gleichwohl findet die Vorbereitung auf Katastrophen nicht nach Belieben statt. Entsprechend dem Verhältnismäßigkeitsprinzip sind der Aufwand und die Wirkungen einer Planung in das Verhältnis zum Zweck und Ziel der Gefahrenabwehr zu setzen. So fordern die Katastrophenschutzgesetze, vorbereitende Planungen von Schadensereignissen nach Notwendigkeit, Erforderlichkeit bzw. nach pflichtgemäßem Ermessen vorzunehmen (Abbildung 3.4).

Implizite Forderung	Notwendigkeit			Erforderlichkeit			Pflichtgemäßes Ermessen		Wirksamkeit		
	BWü	Ber	Hes	NdS	SAn	Bay	Ber	Bre	Bre	Brb	MeV
	MeV	RLP	SHo	SHo	Sac	NRW	Sac	SHo	Saa	Sac	NRW
	Bay	Brb	Ham	Saa	NdS		Saa	Ham	SHo	Ham	

Abbildung 3.4: Übersicht über implizite Forderungen zur Durchführung von Risikoanalysen.

So sind beispielhaft in Bayern nach Art. 1 Abs.1 BayKSG die für die Katastrophenabwehr „notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen zu treffen“. In Berlin sind entsprechend § 4 Abs. 1 KatSG Berlin „nach pflichtgemäßem Ermessen die notwendigen Maßnahmen zur Vorbereitung auf die Bekämpfung von Katastrophen“ zu treffen und nach § 4 Abs. 1 Pkt. 3 KatSG Berlin „erforderlichenfalls ereignisbezogene und objektbezogene Einsatzpläne zu erstellen und fortzuschreiben“. In Bremen wird in § 45 Abs. 2 Pkt. 3 BremHilfG gefordert, dass „nach pflichtgemäßem Ermessen [...] alle vorbereitenden Maßnahmen zu treffen [sind], die einen wirksamen Katastrophenschutz gewährleisten“. In Nordrhein-Westfalen heißt es im § 4 Abs. 2 BHKG NRW, dass „die erforderlichen Maßnahmen zur Vorbereitung der Bekämpfung von Großsinsatzlagen und Katastrophen“ zu treffen sind. In Hamburg wiederum heißt es in § 13 HmbKatSG, dass „nach pflichtgemäßem Ermessen die notwendigen Maßnahmen zur Vorbereitung der Bekämpfung von Katastrophen“ zu treffen sind.

Beim Ermessen ist zwischen Erschließungsermessen und Auswahlermessen zu unterscheiden. In Anbetracht der Gefahr für hochwertige Schutzgüter kann sich das Erschließungsermessen, ob bei einem Sachverhalt einzugreifen ist, „auf Null“ reduzieren (vgl. Walus, 2012, S.136 f.). Das Behörden zustehende Erschließungsermessen wandelt sich in derartigen Fällen in eine Handlungspflicht um (ebd.). Dem eingeräumten Auswahlermessen hinsichtlich der Wahl der Maßnahmen des Eingriffs geht jedoch nach den grundgesetzlichen Bestimmungen des Art. 20 Abs. 2 Satz 2 GG sowie der Art. 62 ff. und Art. 83 ff. GG

ein Effektivitätsgebot einher (ebd.). Zur Hilfeleistung sind solche Mittel zu wählen, die eine effektive Schutzzielerreichung und damit die Schutzpflichtenerfüllung ermöglichen.

Gleichzeitig wird das Effektivitätsgebot beim Auswahlermessen, eine effektive Abwehr von Gefahren sicherzustellen, durch das Verhältnismäßigkeitsprinzip begrenzt. Nicht für sämtliche denkbaren und teilweise äußerst unwahrscheinlichen Katastrophenszenarien können ausreichend sächliche und personelle Mittel vorgehalten werden. Die Vorsorgepflicht mit dem Effektivitätsgebot ist daher in ihrer Absolutheit nicht grenzenlos (ebd.). Vor dem Hintergrund der Selbsthilfe, der Amtshilfe und der Katastrophenhilfepflicht des Art. 35 Abs. 2 Satz 2 GG bezieht sich die Vorbereitungspflicht vielmehr auf die Sicherstellung eines leistungsfähigen und zuverlässigen Abwehrsystems anstatt eines absolut unabhängigen Katastrophenschutzes (ebd.).

Vorbereitende Maßnahmen sind ereignisspezifisch im Sinne des § 40 VwVfG dann notwendig und erforderlich, wenn sie geeignet sind, den Zweck und die Zielstellung der jeweiligen Katastrophenschutzgesetze zu erreichen. Der legitime Zweck liegt dabei in der Abwehr von Katastrophen. Einige Gesetze unterstreichen, dass dabei eine wirksame Abwehr zu erzielen ist (so nach § 45 Abs. 2 Pkt. 3 BremHilfeG, § 37 Abs. 1 Pkt. 4 BbgBKG, § 9 Abs. 1 LKatSG M-V, § 20 Abs. 1 SBKG, § 1 Abs. 1 SächsBRKG, § 1 Abs. 2 Pkt. 2 BHKG NRW, § 1 Abs. 1 LKatSG SH und § 14 Abs. 1 HmbKatSG). Eine wirksame Abwehr ist gebunden an die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Katastrophenschutzes. Damit vorbereitende Maßnahmen notwendig werden, muss festgestellt werden, ob von dem im Fokus stehenden Ereignis eine potentielle Katastrophengefahr im Sinne des jeweiligen Katastrophenschutzgesetzes ausgeht. Für diese Prüfung sind zwangsläufig drohende Katastrophengefahren zu identifizieren und hinsichtlich des Eintretens einer erheblichen und dringlichen Gefahr zu bewerten. Gleichsam ist sicherzustellen, dass die vorbereitenden Maßnahmen im Vergleich zu allen anderen verfügbaren Mitteln das mildeste Mittel darstellen und damit die geringsten Beeinträchtigungen herbeiführen. Entsprechende Untersuchungen sind hierfür unumgänglich.

Ein explizites pflichtgemäßes Ermessen bei der Vorbereitung von Maßnahmen wird den Katastrophenschutzbehörden in den Bundesländern Berlin (nach § 4 Abs. 1 Pkt. 3 KatSG Berlin), Bremen (nach § 45 Abs. 2 Pkt. 3 BremHilfeG), Sachsen (nach § 36 SächsBRKG), Schleswig-Holstein (nach § 1 Abs. 2 LKatSG SH), Saarland (nach § 21 Abs. 1 SBKG) und Hamburg (nach § 13 HmbKatSG) eingeräumt. Dabei wird nicht konkretisiert, ab wann Vorbereitungen vorzunehmen sind, sondern die Behörden können in Anlehnung an § 40 VwVfG nach sachlichen Gesichtspunkten selbst entscheiden, ob sie vorbereitende Maßnahmen für die Zwecke der Katastrophenabwehr und im Rahmen der geltenden Katastrophenschutzgesetze für richtig halten. Ermessensfehler können dabei nur vermieden werden, wenn sie bei dieser Entscheidung geeignete Sachgründe heranziehen. Zur Ermittlung dieser Sachgründe sind wiederum einschlägige Untersuchungen und Analysen der Katastrophengefahren unumgänglich.

Es zeigt sich, dass bei der Vorbereitung auf Katastrophen sowohl bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit als auch beim Ausüben des pflichtgemäßen Ermessens Beurteilungen der möglichen Folgen einer Gefahr und der Wirkung von vorgeplanten Maßnahmen durchzuführen sind. Ohne diese Beurteilungen kann nicht geprüft werden, ob Vorbereitungen für ein Schadensereignis notwendig, erforderlich und gegenüber der prognostizierten Gefährdung im Verhältnis stehen. Beim pflichtgemäßen Ermessen stehen ohne derartige Beurteilungen keine Tatsachenfeststellungen zur Verfügung, um sachgerechte Entscheidungen über die Vorbereitung von Maßnahmen zu treffen. In beiden Fällen ist daher zu erkennen, dass implizit eine Risikoanalyse unumgänglich ist (implizite Forderung).

Die Auswertung der Katastrophenschutzgesetze zeigt, dass zur Vorbereitung auf Katastrophen explizite oder implizite Forderungen an die Durchführung von Risikoanalysen bestehen.

#### **3.3.3 Bedarfsgerechte Vorbereitung auf Katastrophengefahren**

Wie bereits in Abschnitt 3.2 diskutiert, müssen sich präventive und reaktive Schutzmaßnahmen an der potentiellen Gefahr bemessen. Sie dürfen in finanzieller, technischer und organisatorischer Hinsicht weder unter- noch überdimensioniert sein. Im Rahmen der Risikoevaluierung stellt sich die Frage, wie Schutzmaßnahmen bemessen sein müssen und welche Wirkungen durch die vorbereitenden Maßnahmen zu erreichen sind.

Zur Bemessung vorzubereitender Maßnahmen werden in der Gefahrenabwehr regelmäßig Bedarfspläne erstellt. Bedarfspläne sind strategische Steuerwerkzeuge zur sachgerechten Dimensionierung von präventiven und reaktiven Schutzmaßnahmen. Sie berücksichtigen die technische, bauliche und personelle Gestaltung eines Gefahrenabwehrsystems und basieren auf Bedarfsanalysen, in denen die durch die Maßnahmen erreichten Sicherheitsniveaus (Ist-Zustand) den zu erreichenden Zielniveaus (Soll-Zustand) gegenübergestellt werden (Ist-Soll-Vergleich). Zu erreichende Zielniveaus werden im Allgemeinen Sprachgebrauch der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes als Schutzziele beschrieben. Sie sind vordefiniert und adressieren häufig szenariobasierte Schutz- und Planungsziele, die sich auf ein geeignetes Schadensereignis (Referenzereignis/-szenario) beziehen. Der Zweck der auf den Bedarfsanalysen aufbauenden Planung ist entsprechend der Katastrophenschutzgesetze die langfristige Sicherung einer leistungsfähigen und zuverlässigen Gefahrenabwehr durch eine bedarfsgerechte Versorgung mit Gefahrenabwehrleistungen.

Für den Rettungsdienst, den Brandschutz und die technischen Hilfeleistungen ist die Erstellung von Bedarfsplänen (auch Brandschutz-, Rettungsdienst-, Feuerwehr- oder Gefahrenabwehrbedarfsplanung oder Feuerwehrbedarfs- und Entwicklungsplanung) in den meisten Landesgesetzen des Brandschutzes und des Rettungsdienstes geregelt (mehr hierzu vgl. Abschnitt 4.7). Dahingegen finden sich analog keine expliziten Forderungen zur Durchführung von Bedarfsanalysen und zur Erstellung entsprechender Pläne für den Katastrophenschutz (Katastrophenschutzbedarfspläne).

Gleichwohl fordern einige Katastrophenschutzgesetze die Sicherstellung einer wirksamen Katastrophenabwehr (vgl. Abschnitt 3.3). Eine wirksame Katastrophenabwehr kann nur gewährleistet werden, wenn die Gestaltung des Gefahrenabwehrsystems einen leistungsfähigen und zuverlässigen Katastrophenschutz sicherstellt. Um dies zu prüfen, ist die Durchführung von Ist-Soll-Vergleichen in Bedarfsanalysen unumgänglich (Stresstest), womit die implizite Notwendigkeit zur Durchführung von Bedarfsanalysen als Teil von Risikoanalysen sowie die Erstellung von Bedarfsplänen für den Katastrophenschutz zu erkennen ist.

Die bedarfsgerechte Vorbereitung auf Katastrophen ist mithilfe entsprechender Bedarfsanalysen ereignisspezifisch zu planen. Dass jedoch Bedarfsanalysen für den Katastrophenschutz in allen Bundesländern systematisch, ausreichend wiederkehrend und in der notwendigen Tiefe durchgeführt werden, ist insbesondere im Hinblick der nicht immer eindeutigen Gesetzeslagen und den damit verbundenen nur geringfügigen bis fehlenden fachlich verbindlichen Anforderungen zu bezweifeln. So bleiben die über die gesetzlich formulierten Anforderungen an die zu wählende Systematik, der Periodik und die inhaltlichen Tiefe der Auseinandersetzung zentrale Themen fachlicher wie auch politischer Debatten, die auch in Zukunft aufgrund des inhärenten Mangels an einer zweifelsfreien Methodik zu führen sind. Nichtsdestotrotz stellen

Bedarfsanalysen das einzige etablierte Mittel dar, um eine bedarfsgerechte Vorbereitung auf Katastrophen sicherzustellen.

#### **3.3.4 Schutzziele im Risikomanagement und in der Gefahrenabwehr**

Innerhalb einer Bedarfsanalyse ist zu prüfen, ob die getroffenen Maßnahmen einer gewählten Vorsorge- und Bewältigungsstrategie ausreichend sind. Hierzu werden im Rahmen der üblichen Bedarfsplanungen des Rettungsdienstes und der Feuerwehr Bemessungsgrundlagen, Bewertungsmaßstäbe und Referenzmetriken regelmäßig mithilfe von Schutzzielen formuliert. Schutzziele werden hierbei definiert als anzustrebende messbare Zustände von Schutzgütern, die bei einem Schadensereignis zu erzielen sind (u. a. BBK, 2012b; vfdb, 2007). Da die Erfüllung der Schutzpflicht nicht unermesslich ist und die Vorbereitungspflicht durch das Verhältnismäßigkeitsprinzip begrenzt wird, dienen Schutzziele weniger der Sicherung eines absoluten Schutzes als vielmehr der Sicherung eines zuverlässigen und leistungsstarken Abwehrsystems. Schutzziele dienen darüber hinaus in der akuten Bewältigung von Schadensereignissen als objektiver Maßstab für die Effektivität der Abwehr von Gefahren.

Schutzziele dienen innerhalb der Risikoevaluierung als auch bei der Interpretation der Gefahrenprognose der Deutung von Grenzkrisen bzw. Risikolimits. Durch sie lassen sich zwischen akzeptablen und nicht akzeptablen Zuständen eines Schutzguts unterscheiden. Anzustrebende Zustände werden als Schutzniveaus oder Schutzansprüche verstanden. Im Rahmen der Vorbereitung auf Schadensereignisse sind sie üblicherweise an Schadensszenarien geknüpft, die eine plausible und repräsentative Annahme einer Schadenswirkung darstellen. Ohne solche Festlegungen ist eine Prüfung, ob ein Vorbereitungsstand oder eine Gefahrenabwehrplanung sachgerecht, verhältnismäßig und damit bedarfsangepasst dimensioniert ist, nicht möglich. Häufig werden standardisierte Referenzereignisse wie der „kritische Wohnungsbrand“ in der Feuerwehrbedarfsplanung verwendet (vfdb, 2007).

Regelmäßig wird erkannt, dass die Festlegung und Formulierung von Schutzzielen eines politischen Prozesses bedarf (vgl. Wachsmuth et al., 2013; Hess, 2011), der mit einem gesellschaftspolitischen Diskurs einhergeht. Wie dieser Diskurs zu gestalten ist, auf welcher politischen Ebene Abstimmungsprozesse stattfinden (Bund, Länder, Kreise, Gemeinden) und wer (z. B. Betreiber, Behörden, Wissenschaftler) Schutzziele schlussendlich mit welcher Verbindlichkeit festlegt (z. B. als gute, vorherrschende Praxis, Normen, Verordnungen, Gesetze), ist kontextabhängig und regelmäßig Gegenstand der wissenschaftsfachlichen und politischen Diskussion, der Ressortforschung und der sicherheitspolitischen Umsetzung.

Je nach Kontext einer Risikobewertung finden sich unterschiedliche Prinzipien der Schutzzielefestlegung und -formulierung im Risikomanagement. Schutzniveaus haben nach Rae (2007) im Allgemeinen logisch, rational, praktikabel und sozial akzeptiert zu sein. Häufig basiert ihre Festlegung auf quantitativen, qualitativen oder semiquantitativen Risikobeurteilungen. Hierzu werden Erfahrungswerte, die einheitlich verwendete bzw. akzeptierte Praxis oder Ergebnisse aus Risikoanalysen, Verlustkalkulationen und Auswirkungenanalysen genutzt.

Zu den vorherrschend verwendeten Prinzipien gehören u. a.<sup>2</sup>

- „As Low As Reasonably Practicable“ (ALARP),
- „Minimum Endogenous Mortality“ (MEM),
- „Globalement au Moins aussi Bon“ (GAMAB),
- „Value at Risk“ (VaR),
- „Minimum Industry Safety Return on Investment“ (MISRI),
- „Value of Statistical Life“ (VSL),
- „Value for Preventing a Fatality“ (VPF),
- „Adjusted Cost per Statistical Life Saved“ (ACSLs)
- „Service Integrity Levels“ (SIL) wie im Sinne der DIN EN 61508 und
- „Management By Objectives“ (MBO).

Details zu diesen Prinzipien finden sich u. a. bei Rae (2007) und Fairmen (2007).

Ein übergeordnetes Ziel kann in mehrere kleine Teilziele untergliedert werden. Das Erreichen eines einzelnen Zieles impliziert dabei nicht, dass das Gesamtziel automatisch erreicht wird (vgl. Aven, 2013). Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Ziele ermöglicht das (teilweise) Erfüllen eines Teilziels erst das Erreichen eines anderen Teilziels (ebd.). Die einzelnen Zielerreichungen sind daher in ihrer Gesamtheit zu betrachten (ebd.).

Für den Katastrophenschutz in Deutschland fehlt bisher die fundierte fachliche Auseinandersetzung, wie Schutzniveaus zu bilden sind. Lediglich die beiden Landeskatastrophenschutzgesetze von Brandenburg und dem Saarland sehen vor, Katastrophenschutz-, Alarm- und Einsatzplänen anhand festgelegter Schutzziele zu evaluieren. Die jeweiligen Katastrophenschutzbehörden haben hierfür entsprechende Schutzziele eigenständig festzulegen. Diese Art der Schutzzielefestlegung folgt dem Prinzip des „Management By Objectives“. Ein vorherrschend etabliertes Festlegungsverfahren besteht nicht.

Die schlussendliche Festlegung von Schutzziele ist jedoch nicht allein abhängig vom Ergebnis des fachlichen und politischen Diskurses, sondern wird wesentlich beeinflusst von demjenigen, der diesen Diskurs gestaltet und wie er in der Öffentlichkeit geführt wird (zu Aspekten der Risikokommunikation von Schutzziele s. a. Fekete, 2012 und Hess, 2011). Der Verlauf des Diskurses führt dazu, dass die festgelegten Schutzniveaus ihre gesellschaftliche Verbindlichkeit erhalten. Da bisher kein Standard zur Schutzzielefestlegung existiert und die Festlegung nicht gänzlich objektiv erfolgen kann, sind unerwünschte Einflüsse aus subjektiven Betrachtungen, verzerrten Wahrnehmungen und Manipulationen nicht auszuschließen (vgl. Aven, 2013; Hess, 2011). Daher sind Schutzzielefestlegungen wiederkehrend und ereignisabhängig kritisch zu hinterfragen.

---

<sup>2</sup> Durch die Prägung der Prinzipien im angelsächsischen Sprachraum, der vorherrschenden Verwendung des englischen Ausdrucks in der deutschsprachigen Fachliteratur und in der Praxis sowie aufgrund fehlender geeigneter Übersetzungen wird auf eine deutsche Übersetzung verzichtet.

## 3.4 Fazit

Das Tätigwerden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes erfolgt nicht zufällig. In diesem Kapitel wurden allgemeine und für die Entwicklung der Entscheidungsunterstützung relevante Prinzipien des Krisenmanagements in Deutschland und deren umfangreiche entscheidungspraxisorientierte Anforderungen an die Eingriffsschwelle, die Wahl der Maßnahmen und die Durchführung vorbereitender Planungen dargestellt. Darüber hinaus wurde die Zuständigkeit zur Abwehr von Gefahren betrachtet. Hierdurch ergibt sich der allgemeine Entscheidungsrahmen, der als Ausgangspunkt für die zu entwickelnde Entscheidungsunterstützung dient.

Es ergeben sich hieraus eine Reihe von entscheidungspraktischen Implikationen, die für die Entwicklung der anvisierten Entscheidungsunterstützung in Kapitel 7 zusammengefasst werden.

Damit die mit einem Stromausfall einhergehenden Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung erfüllt werden können, sind die vorgenannten allgemeinen Aspekte auf die Abwehr stromausfallbedingter Gefahren zu übertragen. Zur Schärfung der Problemstellung sind daher weitere stromausfallrelevante Details der Entscheidungsfindung zu beleuchten.

## 4 Krisenmanagement von Stromausfällen in Deutschland

Die anvisierte spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse muss sich in die gegebenen normativen Rahmenbedingungen einbetten. Wurden im Kapitel 3 die allgemeinen Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung aufgezeigt, werden im vorliegenden Kapitel das Krisenmanagement im Bezug zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren spezifiziert. Die davon abzuleitenden entscheidungspraktischen Implikationen werden in Kapitel zusammengefasst.

Im nachfolgenden Kapitel werden deshalb begriffliche Definitionen und die Schärfung der entscheidungstheoretischen Situation vorgenommen. Dabei wird zunächst in Abschnitt 4.1 auf die Pflicht der Stromausfallvermeidung eingegangen. Um für die Entscheidungsunterstützung geeignete Stromausfallszenarien herauszustellen, werden in Abschnitt 4.2 verschiedene Stromausfallszenarien reflektiert. Zuständigkeiten und damit zusammenhängende Rahmenbedingungen zur Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren werden in Abschnitt 4.3 erläutert. In diesem Zusammenhang sind auch die Pflichten des Selbstschutzes und der Kooperation mithilfe von Sicherheitspartnerschaften zu beleuchten (Abschnitt 4.4). Die eigentliche Herleitung und Definition der stromausfallbedingten Gefahr und die Herstellung des Zusammenhangs zu Kritischen Infrastrukturen wird in Abschnitt 4.5 vorgenommen. Was unter Kritischen Infrastrukturen im Allgemeinen und im Besonderen im Kontext der angepeilten Entscheidungsunterstützung zu verstehen ist, wird in Abschnitt 4.6 erläutert und definiert. Abgerundet wird das Kapitel durch die Betrachtungen der Vorbereitung auf die stromausfallbedingten Gefahren (Abschnitt 4.7) und der akuten Abwehr derselben (Abschnitt 4.8).

Einige nachfolgende Ansichten wurden bereits in Publikationen vorgestellt. In Münzberg, Wiens, Raskob und Schultmann (2015b) wurden erste Ergebnisse einer Pilotstudie zur Medienanalyse vorgestellt (vgl. Abschnitt 4.2). Die Auslegung Kritischer Infrastrukturen im weiteren und insbesondere örtlichen Sinne, um die Anforderungen an den Gefahrenbegriff für die Unterstützung der Entscheidungsfindung besser zu adressieren, wurde bereits in Münzberg und Ottenburger (2018) thematisiert. Dabei wurde auch ein Bezug zum Kritikalitätsbegriff hergestellt.

### 4.1 Vermeidung von Stromausfällen und stromausfallbedingten Gefahren

Die relevanten staatlichen Schutzpflichten umfassen neben der akuten Gefahrenabwehr auch die Gefahrenvorsorge (vgl. Witte 2013, S. 76; Murswiek, 2009, Rn. 213). Die Vermeidungspflicht adressiert daher im engeren Sinne die Unterbindung der Entstehung stromausfallbedingter Gefahren durch eine kontinuierliche und ausreichende Stromversorgung. Entsprechend der allgemeinen Regelungen der Energiegesetze obliegt dies den Energieversorgungsunternehmen. Im Besonderen verpflichtet sie das EnWG zu einer sicheren und zuverlässigen Versorgung (nach § 1 Abs. 1 und 2 EnWG in Verbindung mit § 2 Abs. 1 EnWG).

Aus strategischer Sicht kommen Energieversorgungsunternehmen dieser Vermeidungspflicht durch die Beachtung der Regeln zu Konstruktionsauslegungen, nachhaltiger Netzentwicklung und kontinuierlicher

Instandhaltung nach. Im Alltag zielen der netzdienliche Betrieb und die Notfallmaßnahmen zur Beherrschung von kritischen Netz- und Systemzustände auf die Sicherstellung der Stromversorgung ab. Hierfür bestehen entsprechende Empfehlungen (wie VDE FNN S 1002), Leitfäden (wie VKU und BDEW, 2012; PwC und VKU, 2017) und technische Regeln wie der TransmissionCode 2007 (Berndt et al., 2007) und der DistributionCode 2007 (Epe et al., 2007), deren Regelungen sich teilweise auch aktualisiert in technischen Normen (z. B. VDE-AR-N 4001:2011-04 oder die VDE-AR-N 4140:2017:02) wiederfinden.

Das wesentliche Regelwerk für Notfallmaßnahmen zur Beherrschung von kritischen Netz- und Systemzuständen ist die operative Kaskade nach VDE-AR-N 4140:2017:02, durch die die Kommunikation der Energieversorgungsunternehmen und die Durchführung der netzbezogenen Maßnahmen nach § 13 Abs. 1 EnWG, der marktbezogenen Maßnahmen nach § 13 Abs. 1 EnWG und der Anpassungsmaßnahmen nach § 13 Abs. 2 EnWG geregelt werden. Netzbezogene Maßnahmen adressieren Topologiemassnahmen und nutzen die betrieblichen Toleranzbänder aus (vgl. CONSENTEC, EWI und IAEW, 2008). Zu den marktbezogenen Maßnahmen zählen u. a. der Einsatz von Regelenergie, das präventive Engpassmanagement durch Engpassauktionen oder durch die Nichtannahme von intra day-Fahrplänen, die Mobilisierung von zusätzlichen Reserven, das Countertrading und das Redispatching (ebd.). Anpassungsmaßnahmen sind durch Fahrplankürzungen, Lastabschaltungen, Spannungsabsenkungen und das direkte Schalten von Erzeugern und Verbrauchern möglich. Welche Konsequenzen drohen, wenn die operative Kaskade keinen Erfolg hat, wird im Abschnitt 4.2.5 erläutert.

Trotz der Wahrnehmung der Vermeidungspflicht kann der Eintritt eines Stromausfalls nicht absolut ausgeschlossen werden. Dabei können auch Stromausfallmagnituden eintreten, die aufgrund netzbetrieblicher Sicherheitsmaßnahmen vernünftigerweise auszuschließen sind. Diese werden als Dennoch-Stromausfälle beschrieben.

Da die relevanten Schutzpflichten auch die akute Gefahrenabwehr von stromausfallbedingten Gefahren beinhaltet, ist unter der Vermeidungspflicht im weiteren Sinne auch die Gefahrenvorsorge durch vorbereitete Maßnahmen zu verstehen. Durch diese Maßnahmen soll vermieden werden, dass stromausfallbedingte Gefahren erst entstehen. Im Hinblick auf die Schutzpflicht zur Sicherstellung der Daseinsvorsorge sind hierzu solche Maßnahmen zu zählen, die eine kontinuierliche Leistungsverfügbarkeit der Daseinsvorsorge während eines Stromausfalls sicherstellen.

Diese Wahrnehmung der Vermeidungspflicht im weiteren Sinne obliegt den jeweiligen Betreibern Kritischer Infrastrukturen, die Maßnahmen zur Sicherstellung eines kontinuierlichen Betriebs während eines Stromausfalls treffen. Aufbauend auf den grundgesetzlichen Schutzpflichten finden sich betriebspezifische Regelungen. So sind z. B. Betreiber von Apotheken zu einer ständigen Dienstbereitschaft verpflichtet (§ 23 Abs. 1 Apothekenbetriebsordnung), durch den ein Notdienst zwischen 20:00 Uhr und 6:00 Uhr des Folgetages bereitzustellen ist (§ 20 Abs. 1 Apothekengesetz, s. a. Apothekennotdienst-Sicherstellungsgesetz) und Arzneimittel und apothekenpflichtige Medizinprodukte zu bevorraten (§ 15 Abs. 1 Apothekenbetriebsordnung).

Auf die konzeptuelle Vorbereitung der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes wird in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.3 näher eingegangen.

## 4.2 Relevante Stromausfallszenarien

Vergangene Stromausfälle haben gezeigt, dass Stromausfälle unterschiedliche Ausmaße annehmen können. Sie können zu jeder Uhrzeit eintreten, ein Gebiet unterschiedlicher Größe treffen und Sekunden bis Tage andauern (vgl. Anagnostatos et al. 2013; UTCE, 2007; Vleuten und Lagendijk, 2010; Howell, 2012).

Um einen Überblick zu erhalten, welche Stromausfallszenarien für eine spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse relevant sind, werden in den nachfolgenden Abschnitten mithilfe

- einer Literaturrecherche in der Fachliteratur der Gefahrenabwehr,
- einer empirischen Datenanalyse und anhand der empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeit,
- einer Analyse von Medienberichten eines Jahres über Stromausfälle,
- des Zollenkopf-Kriteriums und
- der besonderen Szenarien des Netzinselbetriebes, der Lastreduzierung und der Netzzusammenbrüche

Szenarien exzerpiert. Abschließend erfolgt eine Kategorisierung der exzerpierten Stromausfallszenarien. Die Erkenntnisse haben einerseits entscheidungspraktische Implikationen (s. Kapitel 7) und dienen andererseits als Basis zur Bestimmung eines Bemessungsstromausfalls (s. Abschnitt 10.6).

### 4.2.1 Szenarien in der Fachliteratur

Zur Ermittlung der bereits in der Fachliteratur verwendeten Stromausfallszenarien wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die Auswertung der identifizierten Fachliteratur zeigt, dass in Deutschland derzeit kein einheitliches Verständnis darüber besteht, auf welches Stromausfallszenario sich die Dimensionierung der kommunalen Gefahrenabwehr stützen soll (s. auch Abschnitt 4.7.3). Regelmäßig werden Szenarios mit „großflächig“ und „langanhaltend“ beschrieben, ohne dass hierfür numerische Werte genannt oder Sachgründe zur Festlegung angeführt werden. Es lassen sich Schadensszenarios mit unterschiedlichen Magnituden eines Stromausfalls finden. Als vorherrschend in der Gefahrenabwehrplanung verwendet hat sich jedoch bisher keines dieser Stromausfallszenarios etabliert.

Mayer und Lauwe (2015) haben für die Vorbereitung der staatlichen Notfallvorsorge vorgeschlagen, eine Vorsorge für einen sechs Wochen andauernden Stromausfall zu betreiben (Szenario BBK-Schutzziel-Vorschlag). Eine solche Dauer eines Stromausfalls setzt ein so gravierendes Ausmaß voraus, dass es als Szenario der Zivilverteidigung entsprechend dem Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz und der Notstandsgesetze verstanden werden muss. Mayer und Lauwe (2015) machen keine Angaben zur räumlichen Ausbreitung oder zur Anzahl der Betroffenen dieses Stromausfallsszenarios.

In den Jahren 2015 und 2004 wurden als Übungsszenarios der Länderübergreifenden Krisenmanagementübung (EXercise) (LÜKEX) langanhaltende und großflächige Stromausfälle angenommen. Der Zweck von LÜKEX ist, zu üben, wie Einrichtungen des Bundes und der Länder zusammenwirken. Hierfür bedarf es zwingend eines entsprechenden Ereignisses mit Bundesrelevanz<sup>3</sup>. Für die LÜKEX 2015 wurde durch eine

---

<sup>3</sup> Zum Begriff der Bundesrelevanz siehe Abschnitt 3.1.2

BBK-Expertengruppe das als plausibel bewertete Übungsszenario eines Stromausfalls beschrieben, bei dem nach drei Wochen immer noch mindestens 600 000 Betroffene nicht mit Strom versorgt werden (Szenario LÜKEX 2015) (vgl. Deutscher Bundestag, 2013a und b, 2014). Dieses Szenario wird von den Autoren als schwerwiegendster Fall eines Stromausfalls dargestellt, der vernünftigerweise anzunehmen ist (ebd.). Grundlage hierbei ist die Annahme einer großflächigen Infrastrukturzerstörung durch eine Sturmflut (ebd.). Weitere Sachgründe, die zu dieser Annahme führten, lassen sich in der Literatur nicht finden.

Dem Übungsszenario der LÜKEX 2004 lag eine winterliche Extremwetterlage zu Grunde, die mit einem rund zweiwöchigen Stromausfall einhergeht (vgl. BBK, 2015a). Das Szenario eines zweiwöchigen Ausfalls wird bei Petermann et al. (2010) als fiktiv, aber hinreichend plausibel bewertet, gleichwohl auch hier Sachgründe für diese Bewertung nicht angeführt werden. Die Folgen eines zweiwöchigen Stromausfalls wurden später auch durch den TAB-Bericht (ebd.) erörtert. Zeitgleich zu dieser Erörterung wurden die Erkenntnisse der LÜKEX 2004 im Krisenhandbuch Stromausfall (vgl. Hiete et al., 2010) mit umfangreichen Empfehlungen und Hintergrundinformationen zusammengefasst.

Eine zweiwöchig anhaltende Schadenslage wie ein Stromausfall, in der auch die Versorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln bedroht sein kann, dient als Grundlage der Empfehlungen zur Selbsthilfe des BBKs (vgl. BBK, 2009 und BBK, 2012). Mit der Veröffentlichung der novellierten Konzeption Zivile Verteidigung (vgl. BMI, 2016) wurde die Bevorratung seitens des Bundesinnenministeriums auf zehn Tage gesenkt (Szenario BBK Ratgeber). Das BBK hält jedoch weiterhin an den Empfehlungen für eine zweiwöchige Schadenslage fest.

Einige Rahmenempfehlungen zur Vorbereitung der Gefahrenabwehr auf Stromausfälle plädieren für abgestufte Ausfallszenarien. So werden im Krisenhandbuch Stromausfall (vgl. Hiete et al., 2010) drei Stromausfallszenarien zur Auslegung der Vorbereitung vorgeschlagen (Szenario A, B, C Krisenhandbuch) (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Abgestufte Szenarien im Krisenhandbuch Stromausfall (vgl. Hiete et al., 2010).

Szenario A	Szenario B	Szenario C
Weniger als acht Stunden	Stromausfalldauer acht bis 24 Stunden	Stromausfalldauer länger als 24 Stunden

Diese Aufteilung wurde gewählt, um die Relevanz rechtlicher Regelungen des Krisenmanagements in Deutschland und die möglichen Auswirkungen eines Stromausfalls zu analysieren. Differenzierte sachgrundbezogene und empirische Betrachtungen finden sich in der Quelle jedoch nicht.

Teilweise beziehen sich die landesspezifischen Empfehlungen zur Vorbereitung der Gefahrenabwehr auf Stromausfälle auf die Vorschläge im Krisenhandbuchs Stromausfall. Bezugnehmend darauf werden in den Rahmenempfehlungen des Hessischen Ministeriums des Innern und für Sport (HdMI, 2013) vier Szenarien unterschieden (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Abgestufte Szenarien in den hessischen Rahmenempfehlungen zur Vorbereitung auf Stromausfälle (vgl. HdMI, 2013).

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Stromausfalldauer bis zwei Stunden	Stromausfalldauer zwei bis acht Stunden	Stromausfalldauer acht bis 24 Stunden	Stromausfalldauer mehr als 24 Stunden

Der Musternotfallplan des Regierungspräsidiums Karlsruhe (vgl. Bahr et al., 2014) basiert im Wesentlichen auf dem Krisenhandbuch Stromausfall und verweist auf die dort vorgeschlagenen Szenarien. In den rheinland-pfälzischen Empfehlungen zur Planung von Einsatzmaßnahmen bei Stromausfall (vgl. MIS RLP, 2006) finden sich hingegen keine Verweise auf Szenarien. Weitere landesspezifische Empfehlungen sind nicht öffentlich verfügbar.

Bei der Analyse der Fachliteratur zeigt sich, dass unterschiedliche Fachmeinungen zur Festlegung von zu betrachtenden Stromausfallszenarien existieren. In jeder der analysierten Fachliteratur fehlen die Schlussfolgerungen, auf welchen Sachargumenten die Annahmen der Szenarien beruhen. So ist nicht nachvollziehbar, nach welchen Gesichtspunkten die Stromausfallszenarien gewählt wurden und ob die Festlegungen objektiv, reproduzierbar und empiriebasiert sind oder willkürlich gewählt wurden.

### 4.2.2 Szenarien anhand der empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeit

Stromnetzbetreiber sind nach § 52 EnWG verpflichtet, Zeitpunkt, Dauer, Ausmaß und Ursache von ungeplanten Unterbrechungen der Stromversorgung der Bundesnetzagentur zu melden. Nachdem ein Teil dieser Daten aus den Jahren 2008 bis 2013 durch die Bundesnetzagentur durch Dritte wie Dalheimer (2016) veröffentlicht wurde, werden mittlerweile die aktuellen Daten durch die Bundesnetzagentur auf ihren Internetseiten zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten lassen sich empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeiten berechnen, anhand derer im Nachfolgenden Stromausfallszenarien erörtert werden.

Die öffentlich verfügbaren Meldedaten beinhalten alle Stromausfälle im Zeitraum vom 01. Januar 2008 bis zum 31. Dezember 2018. Der Datensatz umfasst 544 617 ungeplante Stromausfälle ( $DocOutageNumb = 544617$ ). Darin enthalten sind auch ungeplante Unterbrechungen, die unter drei Minuten andauerten und deren Ursache in höherer Gewalt liegen. Für jedes Stromausfallereignis finden sich Informationen über Beginn, Dauer, Art, Anlass und die betroffene Netzebene. Darüber hinaus werden Kennzahlen zur unterbrochenen Wirkleistung und zur Unterbrechungsdauer für Ortsnetze und Letztverbraucher angegeben. Die Daten wurden anonymisiert veröffentlicht, so dass die meldenden Versorgungsunternehmen nicht nachvollziehbar sind. Aus den Angaben der Rohdaten zur Dauer der Ausfälle lässt sich darauf schließen, dass gerade bei kurzweiligen Ausfällen die exakte Dauer vermehrt auf eine halbe Stunde gerundet wurde (s. a. Dalheimer, 2016).

Basierend auf den zur Verfügung stehenden Rohdaten der Bundesnetzagentur wird anhand der statistischen Gesetzmäßigkeit auf die Dauer relevanter Stromausfälle in der Zukunft geschlossen. Als wesentliches Merkmal wird die empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit ermittelt, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit innerhalb des Untersuchungszeitraumes und -gebietes ein Stromausfall eine Dauer unterhalb einer bestimmten Ausfalldauer annimmt. Die empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit ist ein Wert zwischen Null und Eins und wird aus der empirischen Verteilfunktion bzw. der kumulierten relativen Häufigkeit aller Ausfalldauern der dokumentierten Stromausfälle hergeleitet. Hierzu werden die Stromausfallereignisse anhand ihrer jeweiligen empirischen Ausfalldauer in aufsteigender Reihenfolge mit  $ed = 1, \dots, DocOutageNumb$  sortiert und so gerankt, dass der kleinste Wert der Ausfalldauer den entsprechenden  $Rank_{ed}$  mit  $ed = 1$  und der größte Wert den  $ed = DocOutageNumb$  erhält.

Durch ihre Kumulation ergibt sich die kumulierte relative Häufigkeit, mit der sich die empirische Verteilfunktion und sodann die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{ed}$  einer jeweiligen Ausfalldauer und des Parameters  $\gamma$ , der zur Bestimmung der empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit herangezogen wird, bestimmen lässt:

$$P_{ed} = \frac{Rank_{ed} - \gamma}{DocOutageNumb + 1 - 2\gamma} \quad (4-1)$$

In der Ingenieurhydrologie wird die Berechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit kontrovers diskutiert (u. a. Bender, 2015). Es stehen verschiedene Formeln zur Bestimmung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit (vgl. Jensen, 1985) und der Parameterwerte für  $\gamma$  (u. a. Stedinger, Vogel und Foufoula-Georgiou, 1993) zur Verfügung. Als Quasistandard wird für den Parameterwert  $\gamma$  die biasfreie Schätzung nach Weibull mit  $\gamma = 0$  verwendet (u. a. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011). Diese findet auch in diesem Fall Anwendung.

Im Rahmen der Ingenieurhydrologie werden anhand der empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeit Wiederkehrintervalle (z. B. Jährlichkeiten) von Ereignissen bestimmt. Aus mehreren Gründen ist das im vorliegenden Fall nur bedingt möglich: Der Datensatz weist einen relativ kurzen Zeitraum von sieben Jahren auf und aktuelle Daten sind nicht berücksichtigt. Die Wiederkehr von Stromausfällen beruht zwar auf zufallsbasierten Eigenschaften, ob diesen jedoch eine natürliche Regelmäßigkeit wie bei wetterbedingten und hydrologischen Phänomenen unterstellt werden kann, ist fraglich. Im vorliegenden Fall handelt es sich zudem um ein soziotechnisches System, das aufgrund der Energiewende umfangreichen Veränderungen ausgesetzt ist. Die Änderungen betreffen sowohl das Versorgungssystem als auch die Rahmenbedingungen und das Nutzerverhalten. Der davon ausgehende Einfluss auf das Auftreten von zukünftigen Stromausfällen und deren Magnitude können durch die verfügbaren Daten nur bedingt untersucht werden. Ein weiteres Problem stellt die Regionalisierung dar. Aufgrund der Anonymisierung der Daten durch die Bundesnetzagentur sind keine örtlich-differenzierten Bezüge für bestimmte Netzgebiete möglich. Vielmehr repräsentieren die Stichproben die Grundgesamtheit aller Ausfälle aller Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze in Deutschland, durch die auf eine Gesetzmäßigkeit eines bestimmten örtlichen Netzes nicht geschlossen werden kann. Dadurch sind auch die Homogenität und die Unabhängigkeit der Daten zu hinterfragen. Darüber hinaus ist nicht nachvollziehbar, welche Messverfahren bei den einzelnen Netzbetreibern verwendet werden und ob einzelne Ereignisse mit demselben Ursachenkomplex zusammenhängen (z. B. flächendeckende Sturm- oder Hochwasserereignisse). Durch die anhaltende technische und organisatorische Veränderung des Versorgungssystems und der Nutzungsänderung besteht zudem keine Homogenität der Datenreihe.

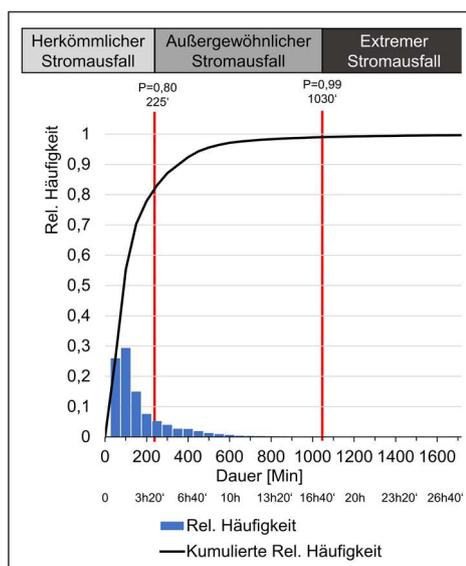


Abbildung 4.1: Klassifizierung der Ausfalldauer von Stromausfällen anhand der empirischen Verteilfunktion.

Unter diesen Gesichtspunkten erscheint zwar die Herleitung von Wiederkehrintervallen weder geeignet noch zielführend, trotzdem lässt sich in pragmatischer Weise die empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit zur retrospektiven Beurteilung der Magnituden vergangener Stromausfallszenarien heranziehen.

Entsprechend plausibel gewählter empirischer Unterschreitenswahrscheinlichkeiten wird anhand der Dauer vergangener Ausfälle zwischen

- herkömmlichen Stromausfällen unter 225 Minuten ( $P_{ed}^{Ordinary} < 0,8$ ),
- außerordentlichen Stromausfällen zwischen 225 und 1030 Minuten ( $0,8 < P_{ed}^{Exceptional} < 0,99$ ) und
- extremen Stromausfällen über 1030 Minuten ( $P_{ed}^{Severe} > 0,99$ )

unterschieden. Abbildung 4.1 zeigt die relative Häufigkeit von Ausfalldauern, ihre empirische Verteilfunktion (kumulierte relative Häufigkeit) und die gewählte Klassifizierung von Stromausfallereignissen.

#### 4.2.3 Szenarien anhand der Auswertung von Medieninhalten

Um ein Verständnis über den Verlauf von Stromausfällen zu gewinnen, wurden Medienartikel über stattgefundenen Stromausfälle in Deutschland systematisch gesammelt und ausgewertet. Ziel der Analyse ist es, empiriebasierte Erkenntnisse darüber zu erhalten, welche Magnitude eines Stromausfalls im Rahmen der Selbsthilfe beherrscht wird und ab wann es zu Einsätzen der Gefahrenabwehr kommt. Darüber hinaus ist von Interesse, bis zu welcher Ausfalldauer Netzumschaltungen eingesetzt werden. Mit einem Datensatz von Medienartikeln einiger Monate aus dem Jahre 2013 und 2014 wurde die Auswertung von Mediendaten im Rahmen einer Pilotstudie bereits erörtert (vgl. Münzberg, Wiens, Raskob, und Schultmann, 2015a und b). In der vorliegenden Arbeit wird ein vollständiger Datensatz für das Jahr 2014 verwendet.

Im Nachfolgenden wird zunächst die Herangehensweise zur systematischen Recherche, Aufarbeitung und Verwaltung der relevanten Medienartikel erläutert. Anhand von ausgewählten Parametern erfolgt eine statistische Auswertung. Auf dieser Basis werden Rückschlüsse über den Verlauf von Stromausfällen gezogen.

Die Analyse von Mediendaten nutzt das gesellschaftliche Interesse an aktuell stattgefundenen Stromausfallereignissen. Die Thematisierung von Stromausfällen in Medienartikeln zeigt deren Nachrichtenwert und deutet auf ihre gesellschaftliche Bedeutung hin. Anhand der öffentlichen Thematisierung lassen sich Stromausfälle in gesellschaftlich relevante und irrelevante Ereignisse trennen. Nichtsdestotrotz hat ein Ausfall häufig nur einen regionalen Nachrichtenwert, und das Interesse darüber zu berichten beschränkt sich auf die jeweils betroffene Region.

Journalisten berichten in Medienartikeln regelmäßig über aktuelle Stromausfälle und beschreiben Schlüsselfakten wie dessen Beginn, Ende und Dauer, die offensichtlich und zum Zeitpunkt des Geschehens erkannten Konsequenzen und die eingeleiteten Notfallmaßnahmen. Die Artikel werden üblicher Weise zeitnah veröffentlicht, teilweise sogar noch während eines laufenden Stromausfallereignisses. In dieser Phase stehen häufig nur vereinzelte Informationen zur Verfügung, die von den Autoren nicht immer ausreichend geprüft werden können. In diesem Fall sind die Interessen an einer raschen und gleichzeitig seriösen Berichterstattung auszubalancieren. Im Hinblick auf die journalistische Ausbildung von Reportern kann davon ausgegangen werden, dass publizistische Grundsätze (vgl. Deutscher Presserat, 2017) eingehalten werden. Dazu zählt insbesondere die den Umständen gebotene Sorgfalt bei der Prüfung und wahrheits-treuen Wiedergabe von Informationen. Daher kann weitestgehend unterstellt werden, dass die publizierten Schlüsselfakten über Stromausfälle hinreichend sorgfältig ermittelt und geprüft wurden, gleichwohl grundsätzlich Fehler, Unstimmigkeiten und Ungenauigkeiten je nach zeitlicher Nähe zum berichteten Stromausfall nicht gänzlich ausgeschlossen werden können.

Zur Analyse von Stromausfällen sind relevante Medienartikel über aktuell stattgefundenen Stromausfälle zu recherchieren. Relevant ist ein Medienartikel zu Stromausfällen dann, wenn dieser

- online im Internet kostenlos verfügbar ist,
- in deutscher Sprache verfasst ist,
- in einem Medium veröffentlicht wurde, welches mindestens täglich oder wöchentlich erscheint,
- die Eigenschaften eines aktuell stattgefundenen Stromausfalls in Deutschland aus der Retrospektive beschreibt und
- einen regionalen Fokus hinsichtlich der Beschreibung der Stromausfallwirkungen hat.

Um eine systematische Suche und Identifikation relevanter Medienartikel sicherzustellen, wurde die News-Crawler-Dienstleistung Google-Alerts eingesetzt. Google-Alerts ist ein sogenanntes Change Detection and Notification Tool (CND-Tool) und wird als webbasiertes Suchmaschinenwerkzeug zum automatisierten Auffinden von neuen oder geänderten Dokumenten, Artikeln, Webseiten und Nachrichten genutzt. Anhand vordefinierter Kriterien wird automatisiert nach geänderten oder neuen Beiträgen im Internet gesucht. Das Werkzeug wurde so verwendet, dass alle geänderten und neuen Beiträge mit dem Stichwort "Stromausfall" auffindig gemacht werden. Dieses Stichwort wird bei der Berichterstattung zu Stromausfällen im deutschen Sprachgebrauch vorherrschend genutzt, so dass weitestgehend alle neuen Beiträge über aktuell stattgefundenen und in Medien thematisierte Stromausfälle recherchiert werden

können und sich eine weitere Stichwortsuche erübrigt. Durch die Google-Alerts-Dienstleistung wurden alle Suchergebnisse zusammengefasst und periodisch zur Verfügung gestellt.

In dieser Weise wurden im Jahr 2014 weit über 1000 relevante Medienartikel recherchiert, von denen insgesamt 941 Artikel ausgewertet und archiviert wurden. Anhand dieser Artikel wurden 845 Stromausfallereignisse in diesem Jahr in Deutschland festgestellt und in einer Datenbank gespeichert.

Aufgrund der Informationen der Medienberichte wurden die Eigenschaften der Stromausfallereignisse analysiert. Durch den heterogenen Informationsgehalt war es nicht möglich, für alle Ereignisse umfangreiche Informationen zu erhalten. Soweit die Medienartikel Informationen darüber bereithielten, wurden in einer Datenbank die berichteten Notfallmaßnahmen archiviert. Typische Notfallmaßnahmen sind

- Besetzung von Feuer- und Rettungswachen durch Einheiten der (Freiwilligen) Feuerwehr, des Rettungsdienstes oder des Katastrophenschutzes, um Notrufe aus der unmittelbaren Nachbarschaft entgegenzunehmen,
- Einsatz von mobilen Notstromaggregaten oder Netzersatzanlagen,
- Medizinische Versorgung von z. B. älteren Personen oder Personen, die auf eine Dialyse angewiesen sind,
- Versorgung von KRITIS-Einrichtungen mit Treibstoff,
- (Notfall-)Versorgung der Bevölkerung mit Informationen, Nahrung und Getränken sowie
- Evakuierung z. B. von Krankenhäusern, Dialysekliniken oder Alten- und Pflegeheimen.

Einsätze, bei denen Menschen aus Fahrstühlen befreit werden mussten, wurden nicht als Notfallmaßnahme berücksichtigt, da hierbei keine erhebliche Gefahr unterstellt wird. Dokumentiert wurden darüber hinaus auch netztechnische Maßnahmen der Netzbetreiber wie z. B. das Umschalten oder das Nutzen von redundanten Netzkomponenten zur Wiederherstellung der Stromversorgung.

Soweit Informationen vorhanden waren, wurde für jedes Ereignis Ausfallbeginn, -ende, und -dauer sowie die Anzahl der vom Stromausfall Betroffenen dokumentiert. Die Angaben über Betroffene sind teilweise ungenau und erfolgten unter Verwendung verschiedener Maße wie die Anzahl der betroffenen Haushalte, Kunden oder Menschen. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, ist es notwendig, dass alle Angaben auf ein gleiches Maß umgerechnet werden. In diesem Fall erfolgte die Umrechnung auf die Anzahl der vom Stromausfall betroffenen Menschen.

Soweit auswertbar wurden die im Analysejahr 2014 recherchierten Stromausfälle danach klassifiziert, ob über (i) Einsätze der Feuerwehr bzw. des Katastrophenschutzes ( $n=66$ ), (ii) Umschaltungen bzw. zur Aktivierung des ( $n-1$ )-Prinzips ( $n=121$ ) oder (iii) weder über Einsätzen noch über Umschaltungen berichtet wurde ( $n=462$ ). Abbildung 4.2 zeigt die klassifizierten Stromausfälle nach Ausfalldauer und der Relation zwischen der Anzahl der Betroffenen und der Anzahl aller im betroffenen Landkreis oder kreisfreien Stadt lebenden Bewohner an. Zwar lassen sich signifikante statistische Zusammenhänge aufgrund der Stichprobe und des zu kurzen Analysezeitraumes nicht zuverlässig ableiten, jedoch wird deutlich, dass es schon nach kurzer Ausfalldauer zu Einsätzen von Feuerwehr und Katastrophenschutz kommt. Anhand dieser Daten stellt sich die Frage, ob konkrete Kennzahlen für die Szenariobildung abgeleitet werden können. Für diesen Zweck werden in Abbildung 4.3 die soweit auswertbaren klassifizierten Stromausfälle anhand der Ausfalldauer in einem Histogramm dargestellt.

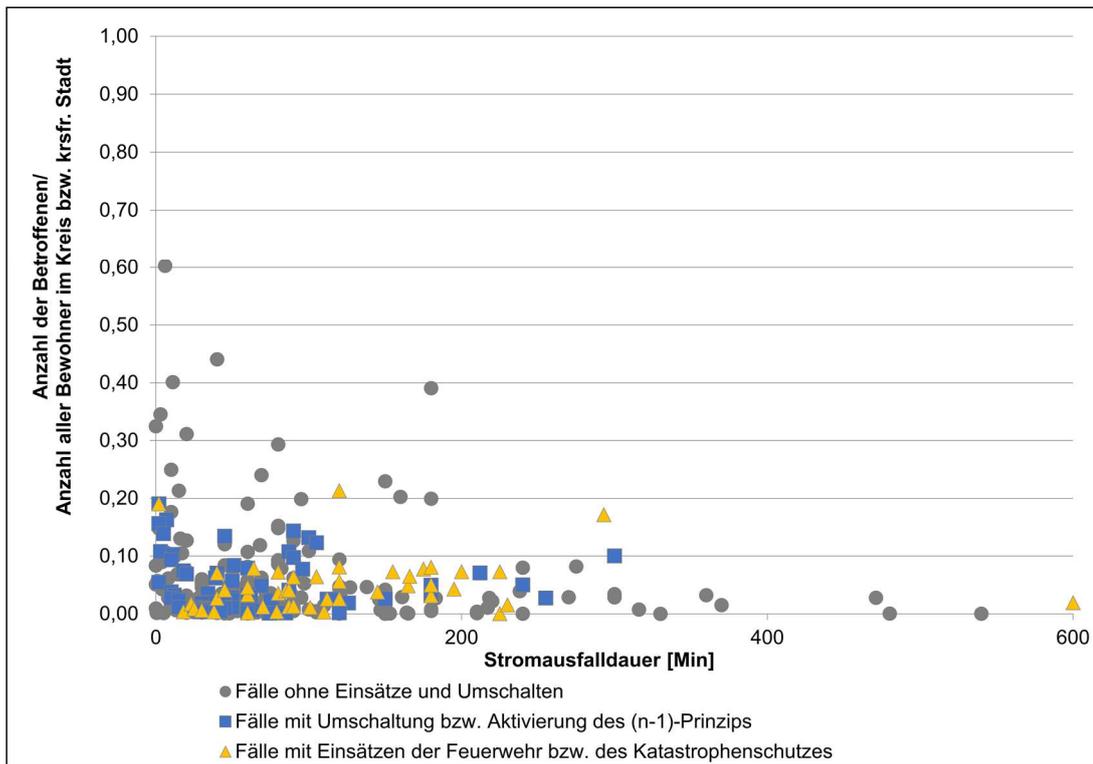


Abbildung 4.2: Klassifizierte Stromausfälle mit und ohne Umschaltungen oder Einsätzen nach Ausfalldauer und Betroffene.

Abbildung 4.4 zeigt die darauf aufbauende kumulierte relative Häufigkeit der klassifizierten Stromausfälle.

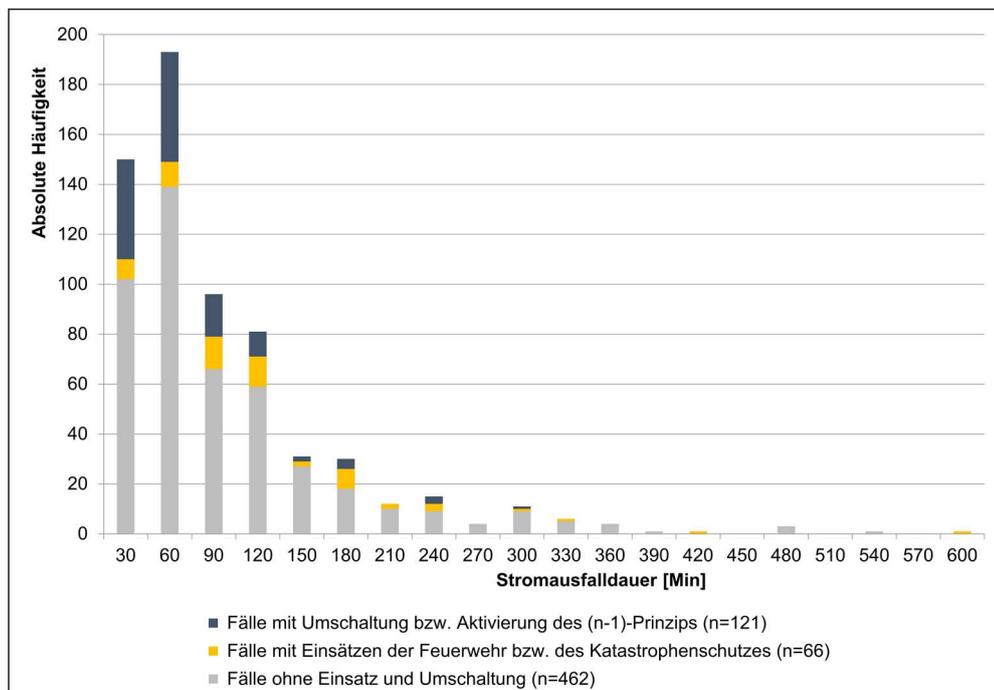


Abbildung 4.3: Histogramm der Ausfalldauer klassifizierter Stromausfälle.

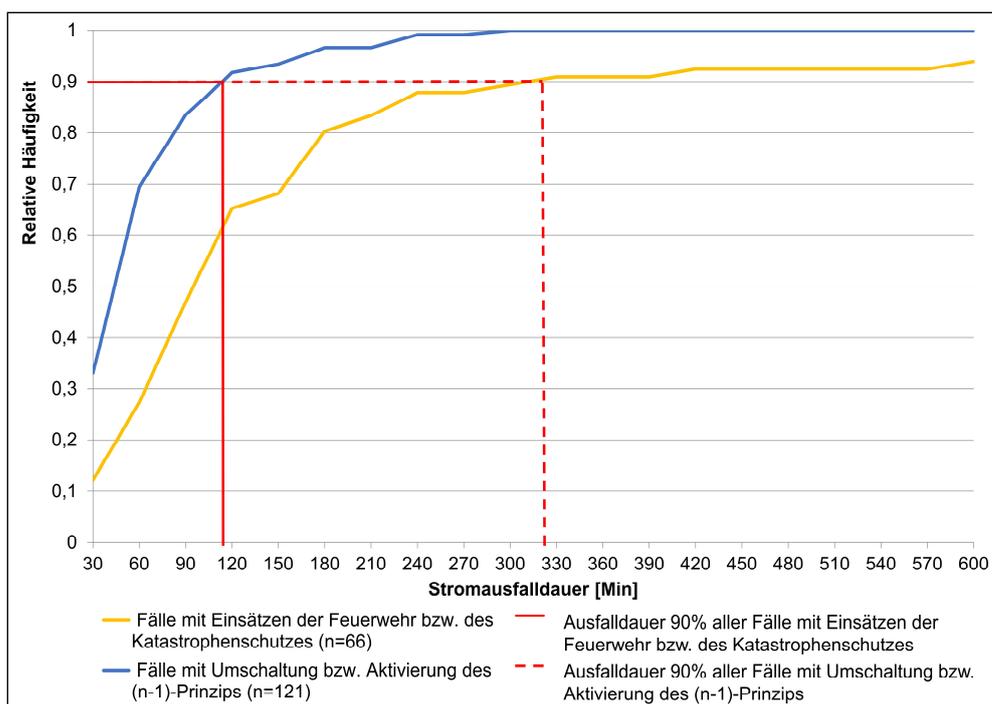


Abbildung 4.4: Relative Häufigkeit der Ausfalldauer der klassifizierten Stromausfälle und obere Dezile.

Um zu verdeutlichen, ab welcher Stromausfalldauer Einsätze der Gefahrenabwehr zu erwarten sind und bis wann netztechnische Maßnahmen Erfolg versprechen, werden die klassifizierten Stromausfälle nach ihrer relativen Häufigkeit der Stromausfalldauer in Abbildung 4.4 abgebildet. Die Anzahl der jeweiligen Ausfälle wird hierfür kumuliert und anhand der oberen Dezile werden jeweils Kennwerte abgeleitet.

Das obere Dezil aller Stromausfälle, in denen es zu Umschaltungen bzw. zur Aktivierung des (n-1)-Prinzips gekommen ist, verdeutlicht, bis zu welcher Magnitude eines Stromausfalls ein Erfolg netztechnischer Maßnahmen (noch) zu erwarten ist. Anhand der Stichprobe zeigt sich, dass in 90 Prozent dieser Fälle die Ausfalldauer unter 120 Minuten liegt. Diese Kennzahl charakterisiert das Szenario „Empirie 2014 (n-1)-Prinzip“.

Das obere Dezil aller Stromausfälle, in denen es zum Einsatz der Feuerwehr, des Rettungsdienstes oder des Katastrophenschutzes gekommen ist, verdeutlicht die Grenzen der Selbsthilfefähigkeit und die Tragweite des Gefahrenpotentials. Das obere Dezil liegt hierbei bei 330 Minuten. Die Mehrzahl der recherchierten Stromausfälle, bei denen es zu Einsätzen gekommen ist, haben eine Magnitude unterhalb dieser Kennzahl. Ab 330 Minuten ist mit einem derartigen Gefahrenpotential zu rechnen, welches durch die Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung nicht mehr beherrscht werden kann und den Einsatz der Gefahrenabwehr wahrscheinlich macht. Daher ist bei Stromausfällen ab dieser Dauer eine Relevanz für die Gefahrenabwehr zu unterstellen. Die Stromausfalldauer von 330 Minuten charakterisiert das Szenario „Empirie 2014 Einsätze“.

Trotz der hohen Anzahl der berücksichtigten Ausfälle ist der auf das Jahr 2014 reduzierte Betrachtungszeitraum zu klein, um signifikante Ergebnisse ableiten zu können. Aus methodischer Sicht ist zu kritisieren, dass die Medienberichte über Stromausfälle neben der Datenunschärfe häufig ein Datendefizit aufweisen, so dass es an Homogenität und Unabhängigkeit der Messdaten mangelt und sich nur bedingt statistisch

zuverlässige Auswertungen realisieren lassen. Es ist nicht nachvollziehbar, welche CND-Methodik durch Google-Alerts verwendet wird, welche Quellen durch den Dienst berücksichtigt werden und welche Qualität die Suche aufweist. Auch wird nicht über jeden Stromausfall in den Medien berichtet.

Ein ähnliches Vorgehen zur Ermittlung von Mediendaten über Stromausfälle wurde mit dem sogenannten Blackout Tracker verfolgt (vgl. EATON Germany, 2015). Ziel des Blackout Trackers ist es, anhand von Medieninhalten Rückschlüsse auf die Versorgungsqualität zu ziehen. Das Vorgehen wird nicht weiter methodisch beschrieben. Ein Vergleich zwischen den Daten des Blackout Trackers und der recherchierten Stromausfälle mit der CND-Methodik durch Google-Alerts zeigt, dass in 845 dokumentierten Stromausfällen im Blackout Tracker lediglich sieben Fälle durch die CND-Methodik mithilfe Google-Alerts nicht ermittelt wurden. Dem gegenüber wurden 368 Stromausfälle nicht im Blackout Tracker berücksichtigt, die wiederum durch die CND-Methodik mithilfe Google-Alerts erkannt wurden. Warum es zu diesen Mängeln des Blackout Tracker gekommen ist, ist aufgrund der fehlenden Transparenz nicht nachvollziehbar.

Die Verwendung der CND-Methodik von Google-Alerts bringt bereits heute bessere Ergebnisse als vergleichbare Vorgehen. Nichtsdestotrotz kann die Recherche von relevanten Medienartikeln z. B. durch die parallele Nutzung weiterer News Crawler sowie durch die Auswertung der Inhalte in sozialen Medien verbessert werden.

#### 4.2.4 Szenarien anhand der Zollenkopf-Kriterien I und II

Zur Sicherstellung der Systemsicherheit ist das (n-1)-Kriterium zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.1). Das (n-1)-Kriterium und die hierfür notwendigen Schalthandlungen lassen sich im Netzbetrieb durch manuelles oder automatisches Wiederfreischalten realisieren. Je nach Umsetzung, den damit verbundenen Prozessen der Fehlersuche und -behebung und deren technischen, organisatorischen und personellen Vorhaltungen kann es zu unterschiedlichen Ausfalldauern kommen.

Die konsequente Umsetzung des (n-1)-Kriteriums im Netzbetrieb führt jedoch zu inakzeptablen Kosten. Der Aufwand zur Umsetzung des (n-1)-Kriteriums und die bis zur Wiederherstellung der Stromversorgung unvermeidlich drohenden Stromausfallmagnituden müssen daher im Verhältnis stehen (vgl. Zollenkopf, 1968, zitiert nach Balzer und Schorn, 2015; Fickert, 2004). Die Umsetzung von Maßnahmen zur Sicherstellung des (n-1)-Kriterium wird daher regelmäßig an sogenannten Zollenkopf-Kriterien ausgerichtet, die eine tolerierbare Ausfalldauer je betroffener Netzebene als Bemessungsgrundlage angibt. Grundlegende Annahme der Zollenkopf-Kriterien ist es, dass längere Ausfalldauern akzeptiert werden, je kleiner die unterbrochene Leistung ist (vgl. Ziegeldorf et al., 2014). Gleichzeitig hat die Wiederherstellung der Stromversorgung schneller zu erfolgen, je höher die betroffene Leistung ist (ebd.).

In der Literatur finden sich verschiedene Zollenkopf-Kriterien. Das konservative Zollenkopf-Kriterium I wird anhand der beiden Werte eines 24-stündigen Ausfalls von 0,01 MWh und eines einminütigen Ausfalls von 100 MWh gebildet. Die beiden Werte werden anhand einer doppelt logarithmisch linearen Interpolation miteinander verbunden (vgl. Backes, 2013; Balzer und Schorn, 2015). Dadurch ergibt sich eine als Zollenkopf-Kriterium I benannte Gerade, anhand derer Grenzwerte zwischen einer zulässigen und einer unzulässigen Ausfalldauer der Stromversorgung gebildet werden. Diese Grenzwerte beschreiben die maximale tolerierte Ausfalldauer je nach Ausfalleistung (ebd.), anhand derer Maßnahmen zur Versorgungssicherheit dimensioniert werden.

Durch die Bemessung anhand des Zollenkopf-Kriteriums I kam es in der Vergangenheit jedoch zu Unter- und Überdimensionierung der Versorgungssicherheit, so dass es einer situationsangepassten Flexibilisierung bedurfte (vgl. Fickert, 2004). Durch Fickert (2004) erfolgte daher die Einführung von Jährlichkeiten auf Grundlage der Annahme, dass Netzkunden bei weniger häufigen Unterbrechungen eine längere Ausfalldauer tolerieren. Üblicherweise verwenden die Netzbetreiber mehrere Zollenkopf-Kriterien II als Bemessungsgrundlage, die eine einmalige Unterbrechung pro Jahr von 0,5 MWh und eine Unterbrechung alle zehn Jahre von 3-5 MWh kennzeichnen (vgl. Scheffler, 2016). Unabhängig von der Jährlichkeit wird die maximal akzeptierte Ausfalldauer aufgrund der maximal möglichen Ausfallzeit für Tiefkühlgeräte beschränkt auf zehn Stunden (vgl. Scheffler, 2016).

In Anlehnung an Scheffler (2016), Balzer und Schorn (2011) und CONSENTEC, EWI und RWTH (2008) zeigt die Abbildung 4.5 die Zollenkopf-Kriterien I und II samt skizzierter Netzebenen und den Maßnahmen zur Wiederherstellung.

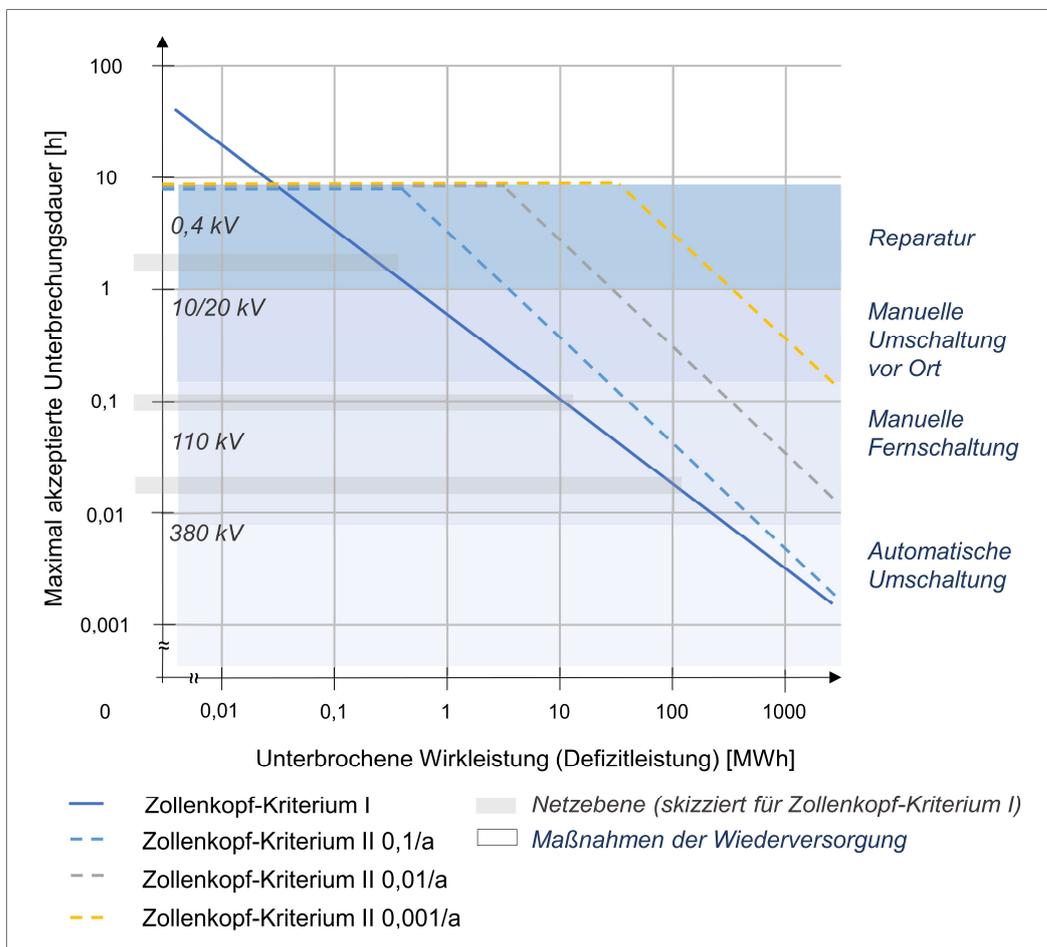


Abbildung 4.5: Zollenkopf-Kriterien I und II mit Darstellung der Netzebene und Maßnahmen der Wiederherstellung.

Die Verwendung des Zollenkopf-Kriteriums I und II stellt zwar den Stand der Technik dar, ist aber nicht verbindlich. Die Dimensionierung der Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemsicherheit und der damit einhergehenden Auslegung des Kriteriums obliegt schlussendlich den Netzbetreibern (vgl. Bosch und Partner GmbH und Forschungsgruppe Umweltpsychologie, 2015).

Die maximal akzeptierte Ausfalldauer bis zur Wiederherstellung der Stromversorgung und der Sicherung des (n-1)-Prinzips kann zur Festlegung eines Grenzszenarios angewendet werden, ab den Stromausfallmagnituden an Relevanz für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz gewinnen.

Ausgehend von einem flächendeckenden Stromausfall in einem gesamten Landkreis oder einer kreisfreien Stadt wird der Ausfall des betreffenden Verteilnetzes bzw. der Mittelspannungsebene angenommen. Dieses versorgt Netzkunden auf bzw. unterhalb der 110kV-Ebene. Anhand der Zollenkopf-Kriterien II lässt sich für die Jährlichkeit eines Ausfalls in zehn Jahren eine akzeptierte Ausfalldauer unter fünf Stunden ablesen. Die akzeptierte Ausfalldauer für einen Ausfall in 100 Jahren liegt bei unter zehn Stunden. Es lässt sich daher feststellen, dass Ausfälle bereits nach wenigen Stunden die Akzeptanzschwelle überschreiten. Ab einer Ausfalldauer von zehn Stunden hat ein Stromausfall eine erhöhte Relevanz für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz, da er sich offensichtlich nicht entsprechend der Auslegung der Netze, insbesondere durch die Auslegung am (n-1)-Kriterium, mithilfe netztechnischer Maßnahmen beherrschen werden.

Neben dem Alter der Zollenkopf-Kriterien I und II ist auch die Festlegung der einzelnen Werte zu kritisieren. Zwar wird darauf verwiesen, dass die Kriterien anhand von Erfahrungswerten festgelegt wurden, eine Transparenz und Nachvollziehbarkeit dieser Festlegung besteht jedoch nicht. Es ist anzunehmen, dass die Festlegungen auf plausiblen Annahmen beruhen, bisher jedoch nicht statistisch, empirisch oder in anderer wissenschaftlicher Form validiert wurden. Zudem wird nach dem Netzbau und der Etablierung von Smart Grids ein objekt- und kundenscharfes Schalten möglich sein, wodurch bisherige Zwänge zur Umsetzung des (n-1)-Prinzips entfallen und abzusehen ist, dass das Zollenkopf-Kriterium an Bedeutung verlieren wird.

### 4.2.5 Szenario des Netzinselbetriebs

Der Netzinselbetrieb ist eine Situation, die im Zusammenhang mit der Beherrschung von kritischen Netz- und Systemzuständen entstehen kann (vgl. Abschnitt 2.2). Da der Netzinselbetrieb mit der Gefahr von Stromausfällen einhergeht, ist er als ein Stromausfallszenario näher zu betrachten.

Soweit ausreichend Erzeugereinheiten zur Verfügung stehen, können Netzteile bei einem Zusammenbruch eines vorgelagerten und einspeisenden Netzes netztechnisch autonome und isolierte Netzinseln bilden. Für die Netzinselfähigkeit ist mindestens eine ausreichende Erzeugereinheit notwendig.

Netzinseln können daher auf allen Netzebenen gebildet werden. Kommt es zu kritischen Netz- und Systemsituationen ohne Zusammenbruch eines Übertragungsnetzes, können sich die Übertragungsnetze in nicht synchronisierte Inseln auftrennen. Soweit ausreichend Erzeugereinheiten verfügbar sind, können bei einem Netzzusammenbruch eines Übertragungsnetzes nachgelagerte Verteilnetze Netzinseln bilden. Fallen wiederum Verteilnetze in der Hoch- und Mittelspannungsebene aus, lassen sich kleine Netzteile als Netzinseln gestalten, soweit in diese ausreichend Erzeugereinheiten eingespeist werden. Auch Kraftwerke, die sich bei einem Netzzusammenbruch im Eigenbetrieb fangen, können als Insel betrachtet werden.

Für die Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren stellt die Inselbetriebsfähigkeit von Verteilnetzen eine Vermeidungsstrategie dar, durch die mithilfe der verfügbaren Erzeugereinheiten eine (Teil-)Versorgung von Netzkunden und insbesondere von Kritischen Infrastrukturen aufrechterhalten werden kann.

Häufig liegt in städtischen Verteilnetzen lediglich eine Kapazität der Erzeugungsleistung in Höhe von 50 Prozent des normalen Strombedarfes vor (vgl. Höser, 2015). Trotz Inselbetriebsfähigkeit von Verteilnetzen ist daher nicht auszuschließen, dass Verbraucher vom Netz getrennt werden und stromausfallbedingte Gefahren entstehen. Darüber hinaus ist die Inselbetriebsfähigkeit zeitlich begrenzt und nicht beliebig lange durchzuhalten. Aus netztechnischen, aber auch aus rechtlichen Gründen der Diskriminierungsfreiheit ist es heute zudem häufig technisch nicht möglich oder vorgesehen, Kritische Infrastrukturen prioritär zu versorgen. Diese für die Zwecke des Bevölkerungsschutzes begrenzenden Eigenschaften der Inselbetriebsfähigkeit könnten sich mit dem starken Anstieg der dezentralen Energieanlagen und den Möglichkeiten des objektscharfen Schaltens von Netzkunden durch Smart-Grid-Technologien (u. a. dena, 2008; e.dis AG et al., 2014; Becker et al. 2016) in Zukunft ändern.

### 4.2.6 Szenario der diskriminierungsfreien Lastreduzierung

Die diskriminierungsfreie Lastreduzierung (auch rollierende Abschaltung oder Graceful Degradation, teilweise auch als Brownout bezeichnet) ist ein Prozess, der im Zusammenhang mit der Beherrschung von kritischen Netz- und Systemzuständen aktiviert werden kann (s. a. Kapitel 2.2). Er führt zu einer besonderen Form von Stromausfällen und ist daher als ein Stromausfallszenario näher zu betrachten.

Lastreduzierungen sind netztechnische Notfallmaßnahmen, mit denen Netzbetreiber versuchen, einen Netzzusammenbruch zu verhindern. Ihr Einsatz ist in der operativen Kaskade der VDE-AR-N 4110 dann vorgesehen, wenn zur Beherrschung kritischer Netz- und Systemzustände vorrangige netzbezogene und marktbezogene Maßnahmen erfolglos sind (Abbildung 4.6).

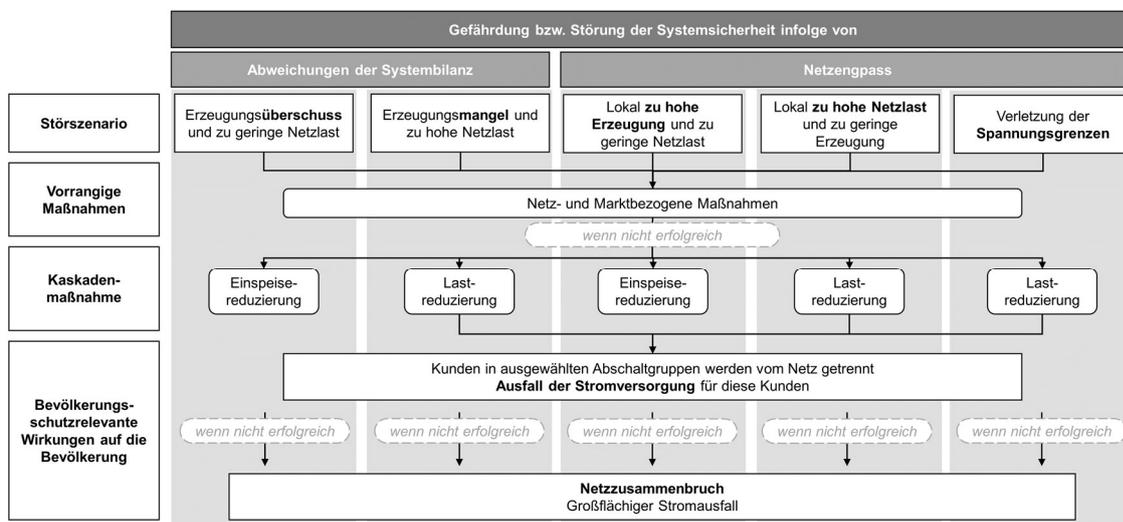


Abbildung 4.6: Grundprinzip der operativen Kaskade nach VDE-AR-N 4110 und deren bevölkerungsschutzrelevante Wirkungen.

Durch die Reduzierung von Verbrauchern (Last) vom Netz werden Zustände des Erzeugungsmangels und zu hoher Netzlast (Abweichung von der Systembilanz) bzw. lokal zu hoher Last und zu geringer Erzeugung (Netzengpass) bekämpft. Die durch eine Lastreduzierung getrennten Verbraucher sind unmittelbar von einem Stromausfall betroffen.

Im Hinblick auf die Konsequenzen für eine effektive Gefahrenabwehr kritisieren Münzberg, Ludäscher und Bach (2013), dass sich Netzbetreiber mit mehr als 100 000 Netzkunden bei der Vorbereitung und Umsetzung einer Lastreduzierung der im Netzbetrieb sicherzustellenden Diskriminierungsfreiheit nach § 13 Abs. 2 in Verbindung mit § 14 Abs. 1 und 1c EnWG verpflichten. Netzbetreiber unterteilen hierfür ihr Versorgungsgebiet in einzelne Abschaltgruppen. In einem Verteilnetz entspricht eine Abschaltgruppe z. B. einem Bezirk, welcher durch ein Umspannwerk mit Strom versorgt wird (Umspannwerkbezirk oder Ortsteilnetze). Um die Diskriminierungsfreiheit im Netzbetrieb bei einer Lastreduzierung sicherzustellen, schalten die Betreiber die Versorgungsgebiete nach einer vorgefertigten Planung ab (Abschaltreihenfolge in einem Anschlagkalender). In den Plänen sind die Gebiete aufgelistet, die je nach Last und Zeitpunkt des Abwurfes vom Netz zu trennen sind. Zur Sicherstellung der ‚Chancengleichheit‘ werden bei anhaltender Lastreduzierung Gebiete entsprechend der geplanten Reihenfolge rollierend abgeschaltet; vorhergehend abgeschaltete Gebiete gehen dafür wieder ans Netz.

Die Dauer solcher Lastabwürfe variiert je nach Betreiber zwischen 30 und 90 Minuten. Ob und welche Versorgungsgebiete in einem Verteilnetz abgeschaltet werden, ist bei einer solchen Planung einzig vom Zeitpunkt und vom Umfang der notwendigen Lastreduzierung abhängig. Die Wahrscheinlichkeit für einen Kunden, von einem Stromausfall durch eine Lastreduzierung betroffen zu sein, ist daher für alle Endverbraucher gleich groß. Ob, wie viele und welche Kritischen Infrastrukturen dann von einem Stromausfall betroffen werden, wird bei der Wahl der zu reduzierenden Abschaltgruppen nicht berücksichtigt. Münzberg, Ludäscher und Bach (2013) haben auf diese Problematik hingewiesen, worauf hin AGBF und DST (2015) ein entsprechendes Positionspapier formulierten und entsprechende Impulse in die innenpolitische Diskussion gelangten.

Die Problematik der priorisierten Versorgung von Kritischen Infrastrukturen durch eine diskriminierende Lastreduzierung kann aus technischer Sicht durch die Möglichkeiten des objektscharfen Schaltens von Netzkunden in einem (zukünftigen) Smart Grid gelöst werden. Hierzu bedarf es seitens des Gesetzgebers und hinsichtlich der Auslegung des bestehenden Rechts zusätzliche Anstrengungen. Aus entscheidungspraktischer Sicht fehlt es hierzu bisher jedoch an einem objektiven Maß, nachdem Netzkunden prioritär versorgt bzw. diskriminierend von der Lastreduzierung ausgenommen werden.

### 4.2.7 Szenarien zum Netzwiederaufbau

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist einer der schwerwiegendsten Verläufe eines Stromausfalls der vollständige Netzausfall einer oder mehrerer Übertragungsnetze. Für den Netzwiederaufbau (Versorgungsaufbau) nach einem Netzzusammenbruch gibt es unterschiedliche Konzepte, die der Inselbetriebsfähigkeit von Netzen und der Schwarzstartfähigkeit von Kraftwerken bedürfen.

Zum Netzwiederaufbau sind Kraftwerke notwendig, die sich entweder unmittelbar nach dem Zusammenbruch im Eigenbetrieb fangen oder schwarzstartfähig sind und so ohne externe Stromzufuhr ihren Betrieb aufnehmen und einspeisen können. Einzelne Netzteile können durch diese Kraftwerke wieder versorgt werden. Diese Netzteile und Netzinseln werden schrittweise synchronisiert, um schrittweise einen Netzbetrieb wiederherzustellen.

Die Dauer eines Netzwiederaufbaus (Versorgungsaufbau) nach einem Netzzusammenbruch ist nur für den Einzelfall und nicht allgemeingültig bestimmbar. Sie ist abhängig vom Umfang der Störung, vom Zustand, von der Verfügbarkeit und der Schaltbarkeit der zum Wiederaufbau notwendigen Erzeugungseinheiten

sowie vom Erfolg der Kommunikation zwischen vor- und nachgelagerten Netzbetreibern und den Betreibern der Erzeugungsanlagen. Da Verbraucher in absehbarer Zeit auch schaltbar sein werden, sind diese in zukünftige Wiederaufbaukonzepte ebenfalls einzubinden.

Für die Dauer des Netzwiederaufbaus lassen sich in der Literatur nur vereinzelte Mutmaßungen finden. Unter der Annahme kleinerer Ausfallszenarien und unter günstigen Laborbedingungen ergeben sich Netzwiederaufbauzeiten von vier bis fünf Stunden (Salek, 2001). Andere Autoren mutmaßen, dass ohne gravierende Zerstörungen der Infrastruktur und unter vorteilhaften Voraussetzungen der Netzwiederaufbau bis zu 12 Stunden lang andauern kann (Szenario Netzwiederaufbau) (vgl. HAW Landshut, 2013). Die Dauer des Netzwiederaufbaus kann sich bei Zerstörungen der Infrastruktur aufgrund der notwendig werdenden Instandsetzungen erheblich verlängern. So dauerte der vollständige Netzwiederaufbau nach dem Netzsammenbruch in Italien im Jahr 2003 18 Stunden und in den USA im August 2003 48 Stunden (dena, 2008). Fallabhängig sind daher auch Ausfalldauern von mehreren Tagen nicht kategorisch auszuschließen.

### 4.2.8 Kategorisierung der Stromausfallszenarien

In den vorhergehenden Abschnitten wurden plausible Szenarien anhand (i) der Angaben in der Fachliteratur, (ii) der empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit historischer Stromausfälle, (iii) der Auswertung von Mediendaten, (iv) der Zollenkopf-Kriterien, (v) des Netzinselbetriebes, (vi) der diskriminierungsfreien Lastreduzierung und (vii) des Netzwiederaufbaus diskutiert. In diesem Abschnitt sollen diese Szenarien kategorisiert werden.

Basierend auf den vorangegangenen Erläuterungen in diesem Kapitel findet sich in Abbildung 4.7 ein Überblick der diskutierten Stromausfallszenarien. Die Stromausfallszenarien sind anhand ihrer Magnituden chronologisch kategorisiert, gleichwohl die jeweiligen Abgrenzungen nur fließend skizziert werden kann. Parallel wurden die kategorisierten Szenarien entsprechenden Rechtsbezügen, empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeiten anhand historischer Stromausfälle und Eskalationsklassen schemenhaft zugeordnet. Obwohl jeder Stromausfall seine eigene Dynamik aufweist und hinsichtlich seiner erzeugten Gefahr nur für sich betrachtet werden kann, ermöglicht die Übersicht einen Vergleich der vorhergehend diskutierten Szenarien.

Organisatorische Trennung	Selbsthilfe		Gefahrenabwehr (Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienst)			Katastrophenschutz		Zivilschutz		
	Normative Grundlage		Ordnungsrecht, Polizeirecht, Brand- und Hilfeleistungsrecht			Katastrophenschutzrecht		Zivilschutzrecht und Notstandsgesetze		
Notlage	Alltäglicher Notfall		Großschadensereignis		Katastrophe		Katastrophe nationalen Ausmaßes		Spannungs-/Verteidigungsfall	
Führungsstufe DV 100	A		B		C		D			
Stromausfallszenario	Kurzzeitig	Grenze des (n-1)-Prinzips ab ca. 120 Min	Relevanzschwelle Einsätze ab spätestens ca. 330 Min	Weniger als 8 Stunden	8 bis 24 Stunden. Wiederaufbau einer Regelzone bis zu 12 Stunden	Mehr als 24 Stunden	10 Tage bis 2 Wochen	Mehrwöchig	3 Wochen mind. 600 000 Betroffene	6 Wochen
Bezeichnung	Alltags-szenario	Empirie 2014 (n-1)-Prinzip	Empirie 2014 Einsätze	Krisenhandbuch A	Krisenhandbuch B Netzwiederaufbau	Krisenhandbuch C	BBK Ratgeber	LÜKEX 2004 TAB-Bericht	LÜKEX 2015	BBK-Schutzziel
Empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit	$P_{120\text{Min}} = 0,599$	$P_{330\text{Min}} = 0,883$	$P_{480\text{Min}} = 0,949$	$P_{720\text{Min}} = 0,979$	$P_{1440\text{Min}} = 0,995$	$P_{14400\text{Min}} = 0,9997$				
Eskalationsklasse	Herkömmlicher Stromausfall, bis $P_{225\text{Min}} = 0,80$		Außerordentlicher Stromausfall, bis $P_{1030\text{Min}} = 0,99$			Extremer Stromausfall, ab $P_{1030\text{Min}} = 0,99$				

Abbildung 4.7: Kategorisierung von Stromausfallszenarien.

Die identifizierten Szenarien können anhand ihrer Ausfalldauer unterschiedlichen Notlagen zugeordnet werden. So lassen sich die Szenarien nach einem alltäglichen Notfall, einem Großschadensereignis unterhalb der Katastrophenschwelle, einer Katastrophe, einer Katastrophe nationalen Ausmaßes mit Bundesrelevanz und nach einem Spannungs- bzw. Verteidigungsfall kategorisieren. Davon leitet sich auch die jeweilige Zuordnung zu den normativen Grundlagen und der Gefahrenabwehr, dem Katastrophenschutz oder dem Zivilschutz ab.

Eine weitere Zuordnung findet nach den Führungsstufen der Dienstvorschrift 100 (DV 100) (SKK, 1999) statt. In der DV 100 werden die Führungsstufen „Führen ohne Führungseinheit“ (A), „Führen mit örtlichen Führungseinheiten“ (B), „Führen mit einer Führungsgruppe“ (C) und „Führen mit einer Führungsgruppe/Führungsstab“ (D) unterschieden. Je nach Dauer eines Stromausfalls und der einhergehenden Gefahr sind für deren Beherrschung entsprechende Führungssysteme zu etablieren. Die Stromausfallszenarien können entsprechend ihrer Magnitude den notwendig aufzubauenden Führungsstufen zugeordnet werden. Die Magnituden der meisten in Deutschland stattfindenden Stromausfälle sind kleineren Umfangs und befinden sich in der Regel unterhalb der Katastrophenschwelle (vgl. Abschnitt 4.1).

Die Kategorisierung der Szenarien anhand der vorangegangenen Erläuterungen in diesem Kapitel zeigen, dass Stromausfälle schon nach kurzer Dauer Situationen erzeugen, die Einsätze der Gefahrenabwehr und wenig später auch für den Katastrophenschutz notwendig machen. Zwar sind auch Stromausfälle vorstellbar, mit denen der Eintritt eines Verteidigungs- oder Spannungsfalls einhergeht, im Hinblick auf deren Umfang und Eintrittswahrscheinlichkeit ist eine Berücksichtigung für die Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung jedoch nicht gerechtfertigt. In den Mittelpunkt der Entscheidungsunterstützung sind daher plausible und relevante Magnituden von Stromausfällen zu stellen, die das Tätigwerden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes bedürfen. Dabei sind auch diskriminierende und diskriminierungsfreie Lastreduzierungen einzubeziehen.

### **4.3 Ausübung der Schutzpflichten zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren**

Tritt ein Stromausfall ein und sind Schutzgüter im Sinne der Schutzpflichten der körperlichen Unversehrtheit oder der sozialstaatlichen Leistungspflicht zur Sicherstellung der Daseinsvorsorge in Gefahr, bedarf es eines staatlichen Eingriffs. Soweit kein Verteidigungs- und Spannungsfall vorliegt und die Gefahren und Störungen der Elektrizitätsversorgung durch marktgerechte Maßnahmen bewältigt werden können, liegt entsprechend dem Dezentralisationsprinzip die primäre Verwaltungskompetenz zur operativen Abwehr der durch einen Stromausfall verursachten Gefahren bei den jeweiligen betroffenen Landkreisen und kreisfreien Städten (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die vor Ort potentiell (entstehenden) abstrakten, erheblichen und dringenden stromausfallbedingten Gefahren sind entsprechend lokal zu beherrschen und zu bewältigen.

Auch in Anbetracht der relevanten und plausiblen Stromausfallereignisse (vgl. Abschnitt 4.2) erscheint es daher notwendig, dass die Entscheidungsunterstützung so konzipiert wird, dass sie der Gefahrenabwehr und dem Katastrophenschutz eines Landkreises oder einer kreisfreien Stadt dienen. Entsprechend sind darin Analysen der raum-zeitlichen Gefahren eines potentiellen oder konkreten Stromausfalls unerlässlich. Demnach sind durch die Entscheidungsunterstützung die mit einem Geschehensablauf eines Stromausfalls zusammenhängenden Gefahren für die körperliche Unversehrtheit und die Sicherstellung der Daseinsvorsorge entsprechend der Amtsbereiche kleinräumlich aufzulösen. Obwohl Landkreise und

kreisfreie Städte vergleichbare Kritische Infrastrukturen aufweisen können, verfügen die einzelnen KRITIS-Einrichtungen über individuelle und lokalspezifische Eigenschaften. Daher bedarf es Einzelfallbetrachtungen, um diese ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Neben einer geeigneten räumlichen Aggregation der Gefahren bedarf es auch einer objektscharfen Analyse der jeweiligen zu berücksichtigenden lokalen KRITIS-Einrichtungen, so dass Ursachen, Rückschlüsse und andere Zusammenhänge der einzelnen Einrichtungen erkannt und ein Ortsbezug hergestellt werden kann.

Für die Zwecke der Entscheidungsunterstützung wird der Begriff der stromausfallbedingten Gefahr in Abschnitt 4.5 näher beleuchtet. In Abschnitt 4.5.2 findet eine tiefergehende Auseinandersetzung mit den aus den Schutzpflichten abzuleitenden Schutzgütern statt.

### **4.4 Selbsthilfe und Sicherheitspartnerschaften**

Entsprechend dem Selbsthilfeprinzip haben von einem Stromausfall Betroffene soweit eigenständig möglich zumutbare Maßnahmen zu ergreifen, um die Entstehung von stromausfallbedingten Gefahren zu vermeiden. Hinsichtlich der Sicherstellung von Leistungen der Daseinsvorsorge hat jeder Betreiber einer KRITIS-Einrichtung mindestens entsprechend der für ihn geltenden gesetzlichen Anforderungen zur Vermeidungspflicht seinen Betrieb geeignet und eigenverantwortlich vor stromausfallbedingten Schäden zu schützen (vgl. Abschnitt 3.1.5). Durch die anhaltende Privatisierung von Infrastrukturen hat sich die Verantwortung für die Sicherheit, die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Versorgungsleistungen der Daseinsvorsorge zunehmend auf Private verlagert (BMI, 2009). Staatliche Aufgaben und Verantwortungen beschränken sich verstärkt nur auf die Gewährleistung und Sicherstellung der Versorgung in Krisenzeiten, wenn die üblichen Marktmechanismen nicht mehr funktionieren (ebd.). Erst wenn Betroffene während eines Stromausfalls nicht mehr eigenständig Gefahren abwenden können oder das ihnen nicht mehr zumutbar ist, tritt ggf. eine staatliche Schutzpflicht ein. Die zur Wahrnehmung staatlicher Schutzpflichten ausgeübten Maßnahmen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes wirken dabei lediglich subsidiär. Sie unterstützen die Selbsthilfemaßnahmen. In welchen Formen die staatliche Unterstützung der Selbsthilfe für KRITIS-Betreiber bei Stromausfall erfolgen kann, wird in Abschnitt 4.8 beleuchtet.

Zur Vermeidungspflicht gehört auch, dass KRITIS-Einrichtungen Risikobetrachtungen auch für die Risiken durchführen, die nicht durch die gesetzlich geforderten Selbsthilfemaßnahmen beherrscht werden können. Soweit ein betriebswirtschaftliches Interesse besteht und die Verhältnismäßigkeit gewahrt bleibt, werden dabei regelmäßig auch Selbsthilfemaßnahmen etabliert, die über gesetzliche Anforderungen hinausgehen. Der Kontext derartiger Risikobetrachtungen wird jedoch regelmäßig begrenzt durch die jeweiligen Betriebsgrenzen. Beurteilungen des betrieblichen Risikos weichen daher zwangsläufig von systematischen und ganzheitlichen Risikobetrachtungen ab. Derartige Betrachtungen beleuchten die Rolle der KRITIS-Einrichtungen und die Tragweite ihres Ausfalls im System der Daseinsvorsorge. Zur Durchführung systemischer und ganzheitlicher Risikobetrachtungen fehlt es jedoch bisher an geeigneter Methodik zur Operationalisierung und damit an einem objektiven Maß, durch das Betreiber von KRITIS-Einrichtungen ihre Rolle im System der Daseinsvorsorge in einer kreisfreien Stadt oder in einem Landkreis wahrnehmen und die zeitabhängigen Konsequenzen ihrer Nicht-Verfügbarkeit während eines Stromausfalls auch im Bezug zum System aller Einrichtungen, die eine lebensnotwendige Versorgung sicherstellen, nachvollziehen können.

Für abschätzbare stromausfallbedingte Gefahren, die nicht mehr durch die Selbsthilfe der einzelnen Betroffenen abgewehrt werden können, sind zur Sicherstellung der Effektivität des Abwehrsystems entsprechende Vorbereitungs- und Bewältigungsstrategien unter Einbindung aller relevanten Beteiligten zu entwickeln (vgl. Abschnitt 3.1.3). Um einen effektiven Katastrophenschutz zu gewährleisten, sind dabei Gefahren für einzelne KRITIS-Einrichtungen, aber auch für die Gesamtheit der Einrichtungen der Daseinsvorsorge in einem Landkreis oder einer kreisfreien Stadt akteursübergreifend zu beurteilen sowie betriebsseitige und behördliche Maßnahmen gemeinsam abzuwägen. Dies bedarf zwingend der Kooperation zwischen KRITIS-Betreibern und den zuständigen Gefahrenabwehrbehörden (Kloepfer, 2015).

Die Mitwirkung von Einrichtungen im Gesundheitswesen im Katastrophenschutz ist in einigen Katastrophenschutzgesetzen verpflichtend (s. § 38 HessBKG, § 5 LKatSG B-W, § 20 BbgBKG, § 29 BremHilfeG, § 8 LKatSG M-V, § 22 LKatSG S-H, § 39 SächsBRKG, § 4 NsächsKatSG, § 36 ThürBKG und § 42 SaarLBKG). Um KRITIS-Betreiber auch aus anderen KRITIS-Sektoren einzubinden, verfolgt der Bund das Konzept von Sicherheitspartnerschaften. Seit der Neuausrichtung des Bevölkerungsschutzes im Jahr 2004 und mit der Strategie für den Schutz Kritischer Infrastrukturen wird eine organisierte Zusammenarbeit zwischen Staat und KRITIS-Betreibern institutionalisiert (BMI, 2009; BMI 2011c; Lauwe, 2012). Aus den einschlägigen Empfehlungen des BMI (BMI; 2009; BMI 2011b und c) und des BBKs (Lauwe, 2012) geht der Wille hervor, Sicherheitspartnerschaften als Gesprächskreise und Plattformen zwischen staatlichen Akteuren, Unternehmen und Verbänden auf allen administrativen Ebenen einzurichten. In den Sicherheitspartnerschaften sollen strategische und operative Fragestellungen diskutiert und Informationen sowohl bei drohenden Gefahrenlagen als auch bei akuten Gefahrenlagen ausgetauscht werden, um ein möglichst umfassendes Lagebild zu erhalten.

Zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren in Landkreisen und in kreisfreien Städten sind auf kommunaler Ebene idealerweise Sicherheitspartnerschaften aus den lokalen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, den Betreibern Lokaler Kritischer Infrastrukturen (wie Dialysekliniken, Krankenhäuser etc.) und ihren Interessenverbänden (Vertreter der kassenärztlichen Vereinigung, der Apothekenkammern etc.) zu bilden. Innerhalb dieser Sicherheitspartnerschaften werden objektspezifische Informationen zur Erstellung von KRITIS-Katastern ausgetauscht (vgl. Abschnitt 4.6.1), die betreiberspezifische Schutzkonzepte mit den Katastrophenschutz-, Einsatz- und Alarmplänen aufeinander abgestimmt, potentielle Gefahren erfasst und gemeinsam beurteilt sowie die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Versorgung und die hierzu notwendige Leistungsfähigkeit abgewogen. Durch derartige Kooperationen ist es erst möglich, ein ganzheitliches und einheitliches Verständnis über die lokalen stromausfallbedingten Wirkungen und Risiken zu bilden.

## 4.5 Stromausfallbedingte Gefahr und Kritische Infrastrukturen

Gefahren durch Stromausfälle entstehen insbesondere dann, wenn Kritische Infrastrukturen derart beeinträchtigt sind oder ausfallen, dass die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung nicht mehr sichergestellt werden kann. Zu Herleitung derartiger stromausfallbedingter Gefahren ist einerseits die Nachfrage nach Leistungen von Kritischen Infrastrukturen und andererseits das Verständnis von Kritischen Infrastrukturen als Schutzgüter zu spezifizieren.

### 4.5.1 Nachfrage nach Leistungen von Kritischen Infrastrukturen

Um die Nachfrage nach Leistungen von Kritischen Infrastrukturen zu beleuchten, sind zunächst die Begriffe „Bedürfnisse“, „Bedarf“ und „Nachfrage“ zu betrachten.

Im betriebswirtschaftlichen Sinne stehen die Begriffe „Bedürfnisse“, „Bedarf“ und „Nachfrage“ in einem inhaltlichen Zusammenhang (u. a. Koschnick, 1995; Opresnik und Rennhak, 2015; Jung, 2016; Wöhe et al.; 2016; Thommen et al., 2017). Bedürfnisse werden vorherrschend als unbegrenzte Wünsche, einen erkannten Mangel nach Gütern und Dienstleistungen zu beseitigen, verstanden. Nicht alle Bedürfnisse sind gleich dringlich. Durch einen Kaufwillen und das Verlangen, ein Bedürfnis zu befriedigen, entsteht ein Bedarf. Zur Befriedigung dienen Güter und Dienstleistungen. Mit der Kaufentscheidung und der Kaufkraft, mit der ein Bedürfnis am Markt tatsächlich befriedigt werden kann, entsteht eine Nachfrage. Die Nachfrage ist damit der Teil des Bedarfs, der am Markt wirksam wird (ebd.).

Bedürfnisse werden im allgemeinen betriebswirtschaftlichen Verständnis nach ihrer Dringlichkeit in Existenz-, Kultur- und Luxusbedürfnisse unterschieden (u. a. Jung, 2016; Koschnick, 1995). Existenzbedürfnisse leiten sich aus einem Grundbedarf zur Deckung existenzieller Lebensnotwendigkeiten ab. Das Verlangen, sie zu befriedigen, ist dringlich und bildet daher einen Kernbedarf. Kulturbedürfnisse stehen im Zusammenhang mit moralischen, sozialen und ästhetischen Zwängen. Luxusbedürfnisse entstehen durch das Bedürfnis nach Geltungsdrang und die Befriedigung der Annehmlichkeiten des Lebens (ebd.). Kulturbedürfnisse und Luxusbedürfnisse führen daher zu nachrangigen Bedarfen.

Während eines Stromausfalls kann sich aufgrund beeinträchtigter oder ausgefallener KRITIS-Einrichtungen ein Mangel an lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen einstellen. Sie sind als Existenzbedürfnisse zu erkennen. Besteht zur Abwehr von Gefahr die Notwendigkeit, derartige Existenzbedürfnisse zu befriedigen, liegt ein Verlangen und damit ein Bedarf an KRITIS-Leistungen vor.

Gerade in einer krisenhaften Mangelsituation und Knappheit an lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen kann der Fall eintreten, in dem ein überlebensbedingter Kaufwille besteht, jedoch nicht ausreichend Kaufkraft zur Verfügung steht, um marktüblich den Bedarf zu befriedigen. Das konservative betriebswirtschaftliche Grundverständnis der Nachfrage stößt in dieser Hinsicht an die Grenzen grundgesetzlicher Schutzpflichten, durch die bedarfsgerecht im Rahmen der Gefahrenabwehr das Verlangen nach lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen zu befriedigen sind (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 4.3), gleichwohl keine Bereitschaft, kein Wille oder keine Möglichkeit besteht, die entsprechend der Marktmechanismen notwendig werdende Kaufkraft aufzubringen. In derartigen Fällen werden Grenzen der zumutbaren Selbsthilfe überschritten, dass staatliche Schutzpflichten wirksam werden. Die Kaufkraft ist daher in derartigen Fällen eine untergeordnete Rolle beizumessen.

Da der Bedarf entsprechend dem Kaufwillen durch den Einsatz der Gefahrenabwehr auch ohne oder nur durch bedingt vorhandene Kaufkraft zu befriedigen ist, wird im Folgenden von der Entstehung einer Nachfrage während eines Stromausfalls ausgegangen, bei der die Kaufkraft unberücksichtigt bleibt.

### 4.5.2 Kritische Infrastruktur als Schutzgut

Als Eingriffsgrundlage der Gefahrenabwehr bzw. des Katastrophenschutzes bedarf es mindestens eines gefährdeten Schutzgutes (Kloepfer, 2015). Schutzgut bezeichnet das rechtlich geschützte Interesse einzelner Menschen und der Gesellschaft. Im Rahmen der Risikoanalyse des Bundes wird als Schutzgut all das verstanden, was „aufgrund seines ideellen oder materiellen Wertes vor einem Schaden bewahrt werden soll“ (BBK, 2010).

Es bestehen mehrere Ansätze, durch die Kritische Infrastrukturen als Schutzgut bestimmt werden können. Im Nachfolgenden werden die Schutzgüter

- der lebensnotwendigen Versorgung,
- der lebenswichtigen und verteidigungswichtigen Einrichtung,
- der betrieblichen Eigengefahr,
- der schutzwürdigen Nutzung,
- der Störfallbetriebe,
- des Bestandes und die Funktionsfähigkeit des Staates,
- der kollektiven Rechtsgüter bzw. der öffentlichen Güter und
- der Daseinsvorsorge

hergeleitet, durch die Kritische Infrastrukturen im engen, im weiten und weitesten Sinne als Schutzgut herausgestellt werden.

Im Kontext der bereits erörterten staatlichen Schutzpflichten benennen die landesspezifischen Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetze als Schutzgut das Leib und Leben von Menschen, Tieren, bedeutende Sachgüter (vgl. Kulturgüter nach Kloepfer, 2015, S. 32) und die Umwelt bzw. die natürliche Lebensgrundlage. Außer in Berlin, Hamburg und Rheinland-Pfalz wird des Weiteren die lebensnotwendige Versorgung (vgl. § 16 Abs. 1 SaarBKG, § 25 ThürBKG, § 1 Abs. 1 LKatSG S-H, § 1 Abs. 2 LKatSG M-V, § 1 Abs. 2 BHKG NRW, § 24 HessBKG, § 1 Abs. 2 BbgBKG, § 1 Abs. 2 LKatSG B-W) bzw. „lebenswichtige Versorgung“ (vgl. § 1 Abs. 2 KatSG-LSA, § 1 Abs. 2 NKatSG, § 37 Abs. 2 BremHilfeG), die „natürliche Lebensgrundlage“ (vgl. § 1 Abs. 2 BayKSG) und die „Versorgung mit lebensnotwendigen Gütern und Leistungen“ (vgl. § 2 Abs. 3 SächsBRKG) der Bevölkerung genannt. Die hierunter fallenden Einrichtungen sind als Kritische Infrastrukturen im engeren Sinne zu werten. Trotz der unterschiedlichen Wortwahl ist darunter synonym der kontinuierliche Betrieb von Kritischen Infrastrukturen bzw. die ausreichende Verfügbarkeit der durch sie produzierten und angebotenen Leistungen und Güter zu verstehen.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Im Nachfolgenden wird hierfür synonym der Begriff der „lebensnotwendigen Versorgung“ verwendet.

Was unter einer lebensnotwendigen Versorgung zu verstehen ist, konkretisieren die Landeskatastrophenschutzgesetze nicht, gleichwohl zumindest die „lebenswichtige Versorgung“ sich als Rechtsbegriff im Sabotageschutz des Sicherheitsüberprüfungsgesetzes (SÜG) wiederfindet. In § 1 Abs. 5 SÜG werden lebenswichtige Einrichtungen und verteidigungswichtige Einrichtungen definiert. Unter beiden Einrichtungen werden solche verstanden, „deren Beeinträchtigung auf Grund der ihnen anhaftenden betrieblichen Eigengefahr die Gesundheit oder das Leben großer Teile der Bevölkerung erheblich gefährden kann“. Als lebenswichtige Einrichtungen sind darüber hinaus solche Einrichtungen zu verstehen, die „für das Funktionieren des Gemeinwesens unverzichtbar sind und deren Beeinträchtigung erhebliche Unruhe in großen Teilen der Bevölkerung und somit Gefahren für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung entstehen lassen würde“. Als verteidigungswichtige Einrichtungen werden solche Einrichtungen verstanden, die für die Herstellung und den Erhalt der Verteidigungsbereitschaft nicht kurzfristig ersetzbar sind. Durch die Rechtsverordnung der Sicherheitsüberprüfungsfeststellungsverordnung (SÜFV) werden lebenswichtige Einrichtungen in den Zuständigkeitsbereich der Bundesministerien festgelegt. Die Länder können darüber hinaus entsprechende Landesverordnungen in Kraft setzen.

Betriebliche Eigengefahren haften einer Vielzahl an Einrichtungen an, deren erhöhtes Gefahrenpotential nur im lokalstrukturellen Zusammenhang zu erkennen ist. Diese sind insbesondere Einrichtungen, die im Zusammenhang mit Gefahrstoffen und -gütern und Kontaminationsgefahren (wie bei Gefahrguttransporten und -lagerung, Anlagen zur Kontrolle und Reinigung von Altlasten und Schadenstoffen), Infektionsgefahren (wie bei Krematorien oder Tierkörperbeseitigungsanstalten), Ausfall von Brandschutz- und raumlufttechnischen Anlagen (wie in Tunneln, Bergwerken und Sonderbauten wie Versammlungsstätten), Hochwassergefahren (wie bei Hochwasserschutzanlagen und der Steuerung der Wasserhaltung bei Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren) und Flutungsgefahren (wie bei Schöpf-, Sielbau-, Bach-, Fluss- und Seepumpwerken, Schleusen, Grubenwasserpumpen und Anlagen zur Grundwasserabsenkung) stehen.

Darüber hinaus haften Eigengefahren insbesondere Störfallbetrieben an, für die entsprechend der Störfall-Verordnung in der jeweils geltenden Fassung ein Sicherheitsbericht zu erstellen ist (vgl. Abschnitt 3.3.1). Bei Planungsentscheidungen als auch bei Genehmigungsentscheidungen sieht das Störfallrecht nach Art. 13 Seveso-III-Richtlinie angemessene Abstände zwischen Störfallbetrieben und sogenannten schutzwürdigen Nutzungen vor (störfallrechtliches Abstandsgebot). Angemessene Abstände sind von Störfallbetrieben in der Bauleitplanung im Rahmen des § 50 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) zu berücksichtigen. Durch die Wahrung angemessener Abstände soll der Schaden an schutzwürdigen Nutzungen bzw. Objekten bei Dennoch-Störfällen begrenzt werden. Im Hinblick auf die betriebliche Eigengefahr von Störfallbetrieben sind diese daher im weiteren Sinne als Kritische Infrastrukturen zu verstehen. Ebenso sind die Einrichtungen als Kritische Infrastrukturen im weiteren Sinne zu verstehen, denen im Rahmen des Störfallrechts eine schutzwürdige Nutzung ausgestellt wird und die vor den betrieblichen Eigengefahren von Störfallbetrieben zu schützen sind.

Die Seveso-III-Richtlinie als auch das BImSchG gehen nicht abschließend darauf ein, welche Einrichtungen unter den Begriff der schutzwürdigen Nutzungen fallen. In der Umsetzung und Auslegung des Störfallrechts finden sich einige nicht abschließende Einrichtungslisten. Es werden in der Regel Wohngebiete, sensible Einrichtungen und wichtige Verkehrswege unterschieden (u. a. Störfall-Kommission, 1994; KAS, 2010; Fachkommission Städtebau der Bauministerkonferenz, 2015). Unter sensiblen Einrichtungen werden Anlagen für soziale, kirchliche, kulturelle, sportliche oder gesundheitliche Zwecke verstanden (u. a. Neuhalfen, 2015; KAS, 2010; Fachkommission Städtebau der Bauministerkonferenz, 2015). Konkret wer-

den Schulen, Kindergärten, Altenpflegeheime und Krankenhäuser genannt (ebd.). Darüber hinaus bestehen landesspezifische bauaufsichtliche Auslegungen, unter denen weitere Einrichtungen wie Beherbergungsstätten mit über 60 Gästebetten, Tageseinrichtungen für behinderte Menschen oder Heime und sonstige Einrichtungen zur Pflege und Unterbringung von Personen spezifiziert werden (BPD, 2013).

Nicht in allen Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetzen wird die lebensnotwendige Versorgung im engeren Sinne als Schutzgut ausgezeichnet. In diesen Fällen kann jedoch aufgrund der Einordnung der jeweiligen Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetze in das besondere Ordnungsrecht auf die jeweiligen Ordnungs- bzw. Sicherheitsbehördengesetze zurückzugriffen werden (Walus, 2012, S. 92), da die ordnungsrechtliche Generalklausel ebenfalls das Schutzgut der lebensnotwendigen Versorgung im weitesten Sinne im Schutzgut der öffentlichen Sicherheit und Ordnung inkludiert. Nach einem Urteil des Bundesverfassungsgerichtes (BVerfG NVwZ 2004, 90, 91) werden als die öffentliche Ordnung alle „ungeschriebenen Regeln verstanden, deren Befolgung nach den jeweils herrschenden und mit dem Wertgehalt des Grundgesetzes zu vereinbarenden sozialen und ethischen Anschauungen als unerlässliche Voraussetzung eines geordneten menschlichen Zusammenlebens innerhalb eines Gebietes angesehen wird“. Entsprechend dem allgemeinen Schrifttum zum Begriff der öffentlichen Sicherheit (vgl. Pieper, 2013) werden die Schutzdimensionen

- der Gesamtheit der objektiven Rechtsordnung,
- der Individualrechte und -rechtsgüter (Individualrechtsgüter des Bürgers) und
- des Bestandes und die Funktionsfähigkeit des Staates und seiner Einrichtungen sowie sonstiger kollektiver Rechtsgüter (bzw. Kollektivrechtsgüter, Universalrechtsgüter oder kollektiver Schutzgüter)

unterschieden.

Zur Gesamtheit der objektiven Rechtsordnung gehören alle öffentlich-rechtlichen Normen, aus denen sich Verhaltenspflichten ergeben (ebd.). Individualrechtsgüter sind alle Freiheitsrechte, insbesondere auf Leben, Gesundheit, Eigentum, Freiheit der Fortbewegung sowie vermögenswerte Rechte (wie privatrechtliches Eigentum, privatrechtliche Ansprüche oder geistiges Eigentum) (ebd.). Zum Bestand und zur Funktionsfähigkeit des Staates und seiner Einrichtungen zählen alle Rechtssubjekte des öffentlichen Rechts (Bund, Länder, Selbstverwaltungskörperschaften, Universitäten etc.), ihre Behörden und Organe (z. B. Parlamente, Gerichte, Polizei- und Ordnungsbehörden), öffentliche Anstalten (z. B. Schulen, Obdachlosenunterkünfte, Rundfunkanstalten), die ihnen zugeordneten Einrichtungen (z. B. Theater, Museen<sup>5</sup>, Kassen) und von ihnen abgehaltene Veranstaltungen (z. B. Staatsbesuche) (ebd.).

Kollektive Rechtsgüter betreffen Gegebenheiten der Allgemeinheit, deren Schutz insbesondere in Bezug auf das Leben in der staatlich organisierten Gemeinschaft geboten ist und von dem niemand ausgeschlossen werden kann (Nicht-Anwendbarkeit des Ausschlussprinzips). Demnach erscheint es zulässig, öffentliche Güter im Sinne des allgemeinen Verständnisses in den Wirtschaftswissenschaften (s. a. Fritsch, Wein, Ewers, 2018, 80ff) mit kollektiven Rechtsgütern (bzw. Kollektivrechtsgüter, Universalrechtsgüter oder kollektiver Schutzgüter) im weitesten Sinne gleichzusetzen. Kollektivrechtsgüter bedürfen keiner bestimm-

---

<sup>5</sup> In diesem Zusammenhang sind u.a. Kulturschutzgüter im Sinne der Haager Konvention zum Schutz von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten, nach Bestimmungen durch die United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) und nach der Festlegungen durch das Gesetz zum Schutz von Kulturgut herauszustellen.

ten Anzahl von Nutzern. Ihre Nutzung ist unabhängig von einer Entgeltzahlung. Im allgemeinen Verständnis zählen zu Kollektivrechtsgütern insbesondere Gesundheit („Volksgesundheit“) und öffentliche Gesundheitsversorgung (s. a. Klas, 2000, S. 152; Möhle, 2001, S.217 ff.; Musil, 2003, S. 53; Oberender und Zerth, 2005), saubere Luft, sauberes Wasser, öffentliche Wasserversorgung, Natur, Landschaft, Umwelt, Lebensmittelhygiene, Infektionsschutz, Leichtigkeit des Straßenverkehrs und Sicherheit des Geldverkehrs. Das Gemeinwohl wird hingegen aufgrund mangelnder Bestimmtheit nicht als Kollektivrechtsgut erkannt (OVG Hamburg, NVwZ-RR 2009, 878, 881 nach Schenke, 2011). Im weiten Umfang ist der Schutz der Einrichtungen des Staates und der Kollektivgüter bereits Inhalt und Zweck von einschlägigen Rechtsvorschriften (Schenke, 2011, S. 31).

Bei der Rechtsauslegung des Schutzgutes der öffentlichen Sicherheit sind Parallelen zum Begriff der Kritischen Infrastrukturen und zur lebensnotwendigen Versorgung der Bevölkerung nicht zu verkennen. Es lässt sich feststellen, dass die polizei- und ordnungsrechtliche Generalklausel durch das Schutzgut der öffentlichen Sicherheit und insbesondere die darunter verstandenen Kollektivrechtsgüter das Schutzgut der lebensnotwendigen Versorgung implizit adressiert. Der teils explizite Verweis auf das Schutzgut der lebensnotwendigen Versorgung in den Brand-, Hilfeleistungs- und Katastrophenschutzgesetzen kann daher als Dopplung verstanden werden.

Die durch Murswiek (2009, Art. 2 Rn. 213) argumentierte Schutzpflicht zur Daseinsvorsorge, die sich aus dem Sozialstaatsprinzip herleitet, verpflichtet auch die dafür notwendigen Einrichtungen gegenüber drohenden Gefahren zu schützen und bei Verwirklichung von Gefahren einen sozialstaatlichen Mindeststandard sicherzustellen. In diesem Zusammenhang ist die Sicherstellung der Daseinsvorsorge auch während eines Notstandes als Schutzgut zu verstehen.

Die Deutung des Begriffs der Daseinsvorsorge als Rechtsbegriff und die damit zusammenhängenden Aufgaben sind Teil tiefgreifender soziologischer und verwaltungsrechtswissenschaftlicher Debatten, die häufig einzelfallabhängig und bisher zu keinem einheitlichen Verständnis geführt haben. An dieser Stelle soll daher nur grundlegend und derart in das Thema eingeleitet werden, soweit es für die Bestimmung von Kritischen Infrastrukturen und für die Herleitung von Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung notwendig ist.

In der rechtswissenschaftlichen Literatur wird als Urheber des Begriffs der Daseinsvorsorge in der verwaltungsrechtlichen Diskussion Forsthoff (1956) angeführt (u. a. Krajewski, 2011, Franz, 2005, Kingreen, 2003). Forsthoff assoziierte den Begriff in Anlehnung an Max Weber mit dem Appropriationsbedürfnis, sich lebensnotwendige Güter und Dienstleistungen aus nicht eigenen Quellen zu beschaffen (Krajewski, 2011). Mit der Daseinsvorsorge verbindet Forsthoff alle „Veranstaltungen, welche zur Befriedigung des Appropriationsbedürfnisses getroffen werden“ (Forsthoff, 1956). Die Befriedigung des Appropriationsbedürfnisses sei Aufgabe der Daseinsvorsorge. In der modernen Rechtsliteratur wird unter Daseinsvorsorge die staatliche Sorge für die sozialen Existenzbedingungen verstanden (Franz, 2005). Mit der Daseinsvorsorge ist die Bereitstellung bestimmter notwendiger Güter durch das Gemeinwesen und Leistungen mit einem besonderen öffentlichen Interesse verknüpft (vgl. Krajewski, 2011).

Durch die mit der Daseinsvorsorge einhergehende staatliche Schutzverpflichtung (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 3.2) sind die Mindestvoraussetzungen für ein menschenwürdiges Dasein zu sichern (Franz, 2005). Bezugnehmend auf das Sozialstaatsprinzip wird die Sicherung eines menschenwürdigen Existenzminimums bzw. die Gewährleistung eines Mindestmaßes an Daseinsvorsorge als Schutzgut erkannt. Unklar und vom Einzelfall abhängig erscheint die Frage, ob während eines (vorübergehenden) Notstandes und in Abhängigkeit von dessen Intensität welches Maß an Abweichung von den zivilisatorischen Anforderungen

an die sozialen Existenzbedingungen zulässig ist. Konkret ist zu diskutieren, ob eine temporäre Verkürzung auf ein Mindestmaß an das menschenwürdige Existenzminimum für ein Überleben zulässig ist.

In dieser Hinsicht stellt sich die Frage, welche konkreten Leistungen und damit notwendigen Einrichtungen zur Sicherung einer menschenwürdigen Existenz heranzuziehen sind. In Abschnitt 4.6.1 wird dies im Detail beleuchtet.

Es zeigt sich, dass im Rahmen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes die Schutzgüter

- von Leib und Leben von Menschen, Tieren, bedeutenden Sachgütern und natürlicher Lebensgrundlage,
- die Sicherung der lebensnotwendigen Versorgung,
- die öffentliche Sicherheit und
- die Daseinsvorsorge

im Mittelpunkt stehen. Trotz ihrer unterschiedlichen Herleitung anhand rechtswissenschaftlicher Auslegungen bestehen inhaltliche Überschneidungen bei der Schutzgutbetrachtung.

### 4.5.3 Die stromausfallbedingte Gefahr

In der in Abschnitt 1.2 aufgezeigten Literatur sind die Folgen vergangener Stromausfälle ausgewertet worden, und es liegen von fachkundiger Stelle Erkenntnisse über die allgemein anzunehmenden Folgen von Stromausfällen vor, durch die nach allgemeiner Lebenserfahrung und in Abhängigkeit vom Ausmaß eines Stromausfalls eine gewisse Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann, dass es bei ungehindertem Ablauf eines Stromausfalls zu Verletzungen der im Abschnitt 4.5.2 hergeleiteten Schutzgüter

- von Leib und Leben von Menschen, Tieren, bedeutenden Sachgütern und natürlicher Lebensgrundlage,
- der lebensnotwendigen Versorgung,
- der öffentlichen Sicherheit oder
- der Daseinsvorsorge

kommt. Allein durch die allgemeine Mutmaßung lässt sich jedoch noch kein konkreter Handlungsbedarf ableiten, so dass nach diesen subjektiven Maßstäben nur von einer abstrakten Gefahr durch Stromausfälle auszugehen ist.

Schäden können einerseits auf die durch einen Stromausfall verursachten Folgeerscheinungen oder andererseits auf die mit einem Stromausfall verbundene Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit einer oder mehrerer KRITIS-Einrichtungen zurückgeführt werden. In beiden Fällen sind Schutzgüter von einem Schaden bedroht

Im ersten Fall haftet betroffenen Einrichtungen eine betriebliche Eigengefahr an. Hierbei kommt es aufgrund des Stromausfalls zu Geschehensabläufen (wie Gefahrstoffaustritt, Verbreitung von Infektions-

krankheiten, biologische, chemische und radiologische Kontaminationen, Überflutungen, Wasserspiegelabsenkungen, Explosionen, Brände etc.), die zu Schäden an Leib und Leben von Menschen und Tieren, an bedeutenden Sachgütern und an der natürlichen Lebensgrundlage führen (Verletzung von Individualrechtsgütern).

Im zweiten Fall entsteht die Gefahr erst durch die durch einen Stromausfall ausgelöste Funktionsbeeinträchtigung einer Einrichtung. Hierdurch kommt es

- zum Schaden am Bestand und an der Funktionsfähigkeit des Staates und seinen Einrichtungen,
- zum Schaden an Kollektivrechtsgütern oder
- zur Unterversorgung mit lebensnotwendigen Gütern bzw. es entstehen Versorgungszustände, die unterhalb eines menschwürdigen Existenzminimums liegen (Daseinsvorsorge) oder die nicht mit einem Überleben einhergehen (lebensnotwendige Versorgung).

Sowohl für die Vorbereitung als auch bei der akuten Bewältigung von Stromausfällen sind Gefahrenprognosen durchzuführen (s. Kapitel 3.2), anhand derer die Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts bei ungehindertem Geschehensablauf beurteilt wird. Bei der Prognose von stromausfallbedingten Gefahren sind neben der eigentlichen Bedeutung eines Schutzgutes insbesondere die bei einem Schutzgut vorbereitenden Bewältigungsmaßnahmen für einen Stromausfall und die sich daraus abbildenden Schadenswirkungen als Gefahren- und Gegenindizien abzuwägen.

Dahingehend liegt die Gefahr nicht im eigentlichen Verlust der Elektrizitätsversorgung, sondern im Mangel adäquater Vorsorgemaßnahmen bei den Schutzgütern (vgl. dazu auch Kloepfer, 2010a, S. 396). Es sind Einzelfallbetrachtungen notwendig, in denen das zu berücksichtigende Stromausfallszenario und die konkreten Zusammenhänge zu Schäden an (potentiell) betroffenen Schutzgütern zu analysieren sind. Lokalspezifische Gegebenheiten, wie die Bedeutung des Schutzgutes im zeitlichen und örtlichen Kontext und die Eigenschaften der mit einem Schutzgut in Verbindung gebrachten Einrichtungen (Größe, Produktionszyklen, Vorbereitungsgrad etc.), sind zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2). Es gilt zu prognostizieren, ob und in welcher Form eine Gefahr vorliegt. Kann anhand objektiver ex ante Maßstäbe bei einem eingetretenen Stromausfall ein Schaden mit hinreichender Wahrscheinlichkeit prognostiziert werden, liegt eine konkrete (drohende) Gefahr vor, die sich nicht unbedingt bereits verwirklicht haben muss. Hält der Geschehensablauf an, so dass ein Schaden eintritt und weiterer Schaden droht, liegt eine Störung vor.

Oft schützen vorhandene Bewältigungsressourcen Schutzgüter davor, dass es zum Schaden kommt. Bewältigungsressourcen sind aber in der Regel nicht unendlich verfügbar und werden beim ungehinderten Geschehensablauf eines anhaltenden Stromausfalls aufgebraucht. Mit Beginn des Stromausfalls und mit Beginn des Verzehrs der Bewältigungskapazitäten liegt daher eine drohende konkrete Gefahr vor. Mit der zeitlichen Nähe zu dem Zeitpunkt, an dem die Bewältigungskapazität vollständig aufgebraucht und mit einem Schadenseintritt mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zu rechnen ist, wird die drohende zur gegenwärtigen (unmittelbar bevorstehenden) Gefahr. Bei besonders hoher Bedeutung des gefährdeten Schutzgutes liegt zudem eine erhebliche Gefahr vor. Anhand der prognostizierten Form der Gefahr sind die Höhe und die Reichweite des Eingreifens der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes zu bemessen, welche die Grundlage für ein rechtmäßiges und sachgerechtes Tätigwerden der Behörden bilden.

Da bei der Feststellung einer Gefahr von einem ungehinderten Geschehensablauf auszugehen ist und die Wirkungen der im Geschehensablauf erwogenen Eingriffe der Gefahrenabwehr oder des Katastrophenschutzes unberücksichtigt bleiben, ist im Rahmen der Entscheidungsunterstützung zunächst ein so genanntes Baseline-Szenario zu betrachten, bei dem die Auswahl und die Durchführung von Maßnahmen nicht von Relevanz ist. Gleichwohl sind im weiteren Verfahren die Wirkungen von Maßnahmen zu quantifizieren, für die es ebenso einer Entscheidungsunterstützung bedarf.

Nicht bei jedem Stromausfall treten stromausfallbedingte Gefahren ein, die ein Tätigwerden der Gefahrenabwehr oder des Katastrophenschutzes nach sich ziehen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen solchen Ausfall ist gering (vgl. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3). Jedoch zeigt die Lebenserfahrung, dass mit einem Stromausfall jederzeit zu rechnen ist. Gerichtsentscheidungen zur geringen Wahrscheinlichkeit von Schadensereignissen betonen daher (vgl. VG Gelsenkirchen 5K 101/85 vom 14.11.1985; OVG Münster 10 A 363/86 vom 11.12.1987), dass geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht beweisen, dass keine Gefahr besteht. Sie stellen bei bisheriger Schonung lediglich Glücksfälle dar, mit dessen Ende jederzeit gerechnet werden muss.

## 4.6 Bestimmung Kritischer Infrastrukturen

In den Abschnitten 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3 wurde der Zusammenhang zwischen stromausfallbedingten Gefahren und Kritischen Infrastrukturen hergestellt, ohne Einrichtungen für die Durchführung von spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalysen zu objektscharf zu konkretisieren. Um die im Sinne der Betrachtung stromausfallbedingter Gefahren zu berücksichtigenden Einrichtungen festzulegen und einzugrenzen, wird nachfolgend zunächst auch bezugnehmend auf die vorhergehenden Ausführungen in den Abschnitten 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3 in die Definition von Kritischen Infrastrukturen eingeführt. Um den Anforderungen an die dezentrale und lokale Ausrichtung des operativen Krisenmanagements in Deutschland gerecht zu werden, erfolgt anschließend die Bestimmung von Typen Lokaler KRITIS-Einrichtungen.

### 4.6.1 Definitionen Kritischer Infrastrukturen

Der Begriff „Kritische Infrastrukturen“ hat sich in Deutschland nach der Jahrtausendwende mit den internationalen Entwicklungen im Infrastrukturschutz etabliert. Erste Ursprünge des Begriffs finden sich im Bericht der US-Amerikanischen President's Commission on Critical Infrastructure Protection (PCIIP, 1997). Durch dessen Bericht fand in den Vereinigten Staaten erstmals eine systematische Auseinandersetzung mit den Gefahren des Internets und der einhergehenden Vernetzung für lebensnotwendige Einrichtungen statt. Der Begriff der Kritischen Infrastrukturen wird im Bericht nicht deutlich definitorisch abgegrenzt, jedoch werden sie als „Lebenserhaltungssysteme“ bezeichnet. Ausgehend von den amerikanischen Aktivitäten entwickelten sich global nationale Strategien zum Schutz von Kritischen Infrastrukturen. Aus Studien wie OECD (2008), Brunner und Suter (2009), Singha, Gupta und Ojha (2014) und Pescaroli und Alexander (2016), die diese Strategien verglichen haben, wird deutlich, dass sich die Definitionen im Wesentlichen gleichen und es nur marginale Unterschiede in der nationalen Auslegung gibt. Wiederkehrend werden als Kritische Infrastrukturen essentielle Einrichtungen der Wirtschaft, der Wohlfahrt, der öffentlichen Sicherheit und der Funktionalität der Verwaltung und des Staates verstanden (ebd.). In den nationalen Strategien werden regelmäßig Sektoren festgelegt, die als Kritische Infrastrukturen verstanden werden.

Die derartige Identifikation von Kritischen Infrastrukturen unterscheidet sich, gleichwohl sich als Kernsektoren

- die Energieversorgung (im Besonderen die Stromversorgung),
- die Ernährung,
- die Wasserversorgung,
- die Banken und Finanzdienstleister,
- die Regierungs- und Verwaltungsfunktionen,
- die Informations- und Telekommunikation,
- das Notfall- und Rettungssystem,
- die Gesundheitsversorgung und
- der Transport und die Logistik

feststellen lassen (ebd.).

Für die deutsche Definition von Kritischen Infrastrukturen sind die auf europäischer Ebene bestehenden Vorgaben von Bedeutung. Im Rahmen des Schutzes Europäischer Kritischer Infrastrukturen werden in der EU Richtlinie 2008/114/EC Kritische Infrastrukturen definiert als Anlagen, Systeme oder Teilkomponenten, die in einem EU-Mitgliedsstaat verortet sind und von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung lebensnotwendiger gesellschaftlicher Funktionen, die Gesundheit, die Sicherheit und das wirtschaftliche oder soziale Wohlergehens der Bevölkerung sind, und bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung es zu signifikanten Störungen oder Zerstörung in einem Mitgliedsstaat kommen kann (Der Rat der Europäischen Union, 2008). Als Europäische Kritische Infrastruktur (EKI) werden Einrichtungen definiert, deren Störung oder Zerstörung darüber hinaus zu erheblichen Auswirkungen in mindestens zwei Mitgliedstaaten hätte. Mit der Richtlinie werden alle EU-Mitgliedstaaten angehalten, entsprechende Aktivitäten zum Schutz dieser Einrichtungen im Rahmen ihrer örtlichen Zuständigkeit zu unternehmen. In der Richtlinie werden des Weiteren auch Sektoren benannt, die als Europäische Kritische Infrastrukturen (ECIs) verstanden werden. Diese sind

- Elektrizität,
- Mineralöl,
- Gas,
- Straßenverkehr,
- Schienenverkehr,

- Luftverkehr,
- Binnenschiffverkehr und
- Seeschifffahrt, Kurzstreckenseefahrt sowie Seehäfen.

Die heute in Deutschland vorherrschend verwendete Definition „Kritische Infrastruktur“ basiert auf einem Beschluss des Arbeitskreises Kritische Infrastruktur beim Bundesministerium des Innern vom 17. November 2003. Innerhalb der Innenministerkonferenz gilt sie als Konsensdefinition zwischen dem Bund und den Ländern. Sie wird insbesondere durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik forciert und lautet: „Kritische Infrastrukturen sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“ (BMI, 2011a).

Erst mit der Novellierung des Raumordnungsgesetzes (ROG) im Jahr 2008 treten „Kritische Infrastrukturen“ als Rechtsbegriff auf (Kloepfer, 2010b). Er wird im Zusammenhang mit dem im § 2 Abs. 2 Nr. 3 ROG festgelegten Grundsatz der Raumordnung das Zentrale-Orte-Konzept genannt. Das Zentrale-Orte-Konzept geht auf die Theorie von Walter Christaller zurück, wonach sich zentrale Orte nach ihrer Bedeutung für das Umland unterscheiden und anhand der zumutbaren Erreichbarkeiten entsprechenden Versorgungsstufen zuordnen lassen. Für die Zwecke der bedarfsgerechten Förderung der Raumplanung und -entwicklung werden Städte und Gemeinden daher geowirtschaftlich entsprechend ihrer Infrastruktur- und Dienstleistungsangebote, ihrer Verflechtungsbereiche und Verdichtungsräume unterschieden. Nach § 2 Abs. 2 Nr. 3 ROG ist dem Schutz Kritischer Infrastrukturen in diesem Kontext „Rechnung zu tragen“. Der Schutz Kritischer Infrastrukturen wird dabei in Bezug gesetzt mit der Chancengerechtigkeit und der Sicherstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse (Deutscher Bundestag, 2008). In der Gesetzesbegründung des Raumordnungsgesetzes (ebd.) heißt es, dass hinsichtlich der Entwicklung und der Gewährleistung der Infrastruktur Aspekte des Schutzes Kritischer Infrastrukturen „sorgfältig zu prüfen“ sind. In diesem Zusammenhang werden Kritische Infrastrukturen gleichlautend wie im Arbeitskreis des Bundesinnenministeriums definiert.

Die Unterscheidung der Verflechtungsbereiche und Verdichtungsräume zentraler Orte ist landesspezifisch, findet aber in aller Regel nach den Versorgungsstufen des Grundbedarfs, des periodischen Bedarfs und des spezifischen Bedarfs statt. Nach vorherrschender Fachmeinungen wie BBSR (2011), Einig (2015), BBSR (2016) und MKRO (2016) wird der Grundbedarf durch Einrichtungen wie Grund- und Hauptschulen, Sportanlagen, Arztpraxen, Gemeindeverwaltungen, Filialen der Post und der Banken, Apotheken, Altenpflegeheime, Supermärkte, Tankstellen und Feuerwehr gedeckt. Der periodische Bedarf wird erfüllt durch Einrichtungen wie weiterführende Schulen und Berufsschulen, Krankenhäuser, Fachärzte, Notare, Rechtsanwälte, Steuerberater, Kinos, kulturelle Angebote, Kaufhäuser, Schwimmbäder. Dem spezifischen Bedarf kommen Einrichtungen wie Warenhäuser, Spezialgeschäfte, Fachkliniken, Theater, Museen, Fach- und Hochschulen, Regionalbehörden nach.

Entsprechend der Versorgungsstufen werden Planungsregionen als Ober-, Mittel-, Unter- und Grundzentren gebildet. Die Zuordnung der Versorgungsstufen nach Planungsregionen unterscheidet sich je nach Landesraum und -entwicklungsplan. Verallgemeinert kann festgestellt werden, dass sich in Grundzentren nur vereinzelte Leistungen der Grundversorgung finden, wohingegen sich in Unterzentren Leistungen der

Grundversorgung finden lassen. Mittelzentren bieten neben der Grundversorgung noch Versorgungseinrichtungen des periodischen Bedarfs. Darüber hinaus bieten Oberzentren zusätzlich noch Einrichtungen des speziellen Bedarfs.

Neben dem ROG verweist auch die sozialstaatliche Schutzverpflichtung zur Sicherung der Mindestvoraussetzungen für ein menschenwürdiges Dasein (vgl. Abschnitt 4.5.2) auf Einrichtungen der Daseinsvorsorge. Wie bereits in Abschnitt 4.5.2 erwähnt, wird der Begriff der Daseinsvorsorge sehr weit gefasst. Eine vorherrschende systematisierende Betrachtung hat sich bisher nicht durchgesetzt, weshalb eine Zuordnung von Einrichtungen nicht in jedem Fall eindeutig ist. Zudem sind die damit verknüpften Anforderungen an eine menschenwürdige Existenz dem Wandel der Zeit unterworfen. Durch die Schwankungen im Laufe der Zeit ist bei der Bestimmung Einrichtungen der Daseinsvorsorge das bestehende allgemeine zivilisatorische Niveau zu berücksichtigen (Ruder und Bätge, 2008).

In der Rechtsliteratur (u. a. Franz, 2005; Krajewski, 2011) wird für eine Reihe von Einrichtungen diskutiert, inwieweit diese als Einrichtungen der Daseinsvorsorge anzuerkennen sind. Einigkeit besteht darin, dass die Trinkwasserversorgung und die Energieversorgung als grundsätzlicher Bedarf für eine menschenwürdige Existenz anzusehen sind. Sie werden als Basisleistungen für ein Überleben und als klassische Anwendungsfelder der Daseinsvorsorge verstanden. Bei der Trinkwasserversorgung umfasst das die Gewinnung in Wasserwerken, der Transport durch Fernleitungen als auch die Verteilung des Trinkwassers. Unter Energieversorgung wird insbesondere die Versorgung mit Elektrizität als Basisleistung erkannt. Zur Sicherung eines menschenwürdigen Daseins bedarf es ebenso der Daseinsvorsorge zur Abfall- und Abwasserbeseitigung.

Nicht zweifelsfrei, kontrovers, als Sonderproblem und vom Einzelfall abhängig diskutiert werden weitere Leistungen, denen lediglich eine grundlegende Daseins-Bedeutung beigemessen werden und die als Formen der kommunalen Daseinsvorsorge im weitesten Sinne verstanden werden (ebd.). Zu diesen gehören nicht abschließend

- die Teilhabe an der Gasversorgung und Fernwärme,
- die Teilhabe am öffentlichen Personennahverkehr,
- die Versorgung mit Lebensmitteln und Obdach,
- die Post- und Telekommunikationsleistungen,
- die Einrichtungen der Tierkörperentsorgung,
- der Brandschutz,
- der Rettungsdienst,
- die Veranstaltung von Märkten,
- die Leistungen des Verkehrs (Errichtung und Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen, Erbringung von Verkehrsdienstleistungen, Widmung öffentlicher Straßen, Sicherheit der öffentlichen Wege und Straßen, Straßenbeleuchtung, Straßenreinigung, Betrieb öffentlichen Parkplatzes)
- der Betrieb von Flughäfen,
- die Friedhöfe,

- die Gesundheits- und Bildungsleistungen sozialer Dienstleistungen, die Errichtung von Krankenhäusern, die Aufgaben der Krankenkassen, die Tätigkeiten eines Vertragsarztes, die Errichtung von Alten- und Pflegeheimen,
- die Errichtung öffentlicher Schulen und Kindergärten,
- die Sparkassen und Landesbanken,
- die kommunale Wohnungswirtschaft bzw. der Wohnraum für einkommensschwache Bevölkerungsgruppen,
- die Rundfunkversorgung,
- die kulturellen Einrichtungen, Wochenmärkte, die traditionellen und traditionsbildenden Volksfeste und Jahres- und Weihnachtsmärkte und
- die Sport- und Kultureinrichtungen wie Sportplätze, Schwimm- und Heilbäder, Stadthallen und Theaterbetriebe.

Gleichwohl diesen Einrichtungen lediglich eine Daseins-Bedeutung eingeräumt wird, können sie im Einzelfall durchaus als Lokale Kritische Infrastrukturen im weiteren Sinne verstanden werden.

Im Jahr 2009, ein Jahr nach dem Inkrafttreten des ROG, findet sich mit dem Inkrafttreten des Gesetzes über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSIG) der vom Arbeitskreis Kritische Infrastruktur vorgeschlagene Wortlaut für Kritische Infrastrukturen als gesetzliche Definition weitestgehend wieder. In § 3 Abs. 10 Satz 2 BSIG werden Kritische Infrastrukturen definiert als „Einrichtungen, Anlagen oder Teile davon, die [...] von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind, weil durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit eintreten würden“. In § 3 Abs. 10 Satz 1 BSIG werden die Sektoren

- Energie,
- Informationstechnik und Telekommunikation,
- Transport und Verkehr,
- Gesundheit,
- Wasser,
- Ernährung und
- Finanz- und Versicherungswesen

als Kritische Infrastrukturen ausgewiesen. Bezugnehmend auf § 3 Abs. 10 BSIG werden Kritische Infrastrukturen dieser Sektoren durch die Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-KritisV) im Kontext der Sicherheit informationstechnischer Systeme näher bestimmt. Im Rahmen dessen liegen auch umfangreiche qualitative Sektorenstudien über die Leistungsstrukturen und deren Zusammenhänge vor (vgl. BSI, 2015a, b, c, d, e; BSI, 2016a, b).

Tabelle 4: Sektoren- und Brancheneinteilung in Deutschland (vgl. BMI, 2011a)

<b>Sektoren</b>	<b>Branchen</b>
Energie	Elektrizität, Gas, Mineralöl
Informationstechnik und Telekommunikation	Telekommunikation, Informationstechnik
Transport und Verkehr	Luftfahrt, Seeschifffahrt, Binnenschifffahrt, Schienenverkehr, Straßenverkehr, Logistik
Gesundheit	Medizinische Versorgung, Arzneimittel und Impfstoffe, Labore
Wasser	Öffentliche Wasserversorgung, Öffentliche Abwasserbeseitigung
Ernährung	Ernährungswirtschaft, Lebensmittelhandel
Finanz- und Versicherungswesen	Banken, Börsen, Versicherungen, Finanzdienstleister
Staat und Verwaltung	Regierung und Verwaltung, Parlament, Justizeinrichtungen, Notfall-/ Rettungswesen einschließlich Katastrophenschutz
Medien und Kultur	Rundfunk (Fernsehen und Radio), gedruckte und elektronische Presse, Kulturgut, symbolträchtige Bauwerke

Im Jahr 2011 hat das Bundesministerium des Innern eine (weitere) Sektoren- und Brancheneinteilung Kritischer Infrastrukturen veröffentlicht (BMI, 2011a), in der zusätzlich die beiden Sektoren „Staat und Verwaltung“ sowie „Medien und Kultur“ aufgenommen wurden (s.

Tabelle 4). Für diese beiden Sektoren findet das BISG und die BSI-KritisV keine Anwendung, gleichwohl werden sie vorherrschend im Rahmen des Bevölkerungsschutzes als Kritische Infrastrukturen erkannt.

Die Festlegung von Sektoren hat sich in Deutschland im Laufe der Zeit gewandelt. In früheren Schriften wie Schulze (2006) und BMI (2007) wurden in der Aufzählung z. B. auch Gefahrstoffe, die Rüstungsindustrie und Großforschungseinrichtungen sowie das Postwesen genannt. Eine Herleitung oder Kommentierung, wie es zu den Änderungen der Auflistung gekommen ist, ist öffentlich nicht bekannt, zeigt aber, dass sich das Bewusstsein über Kritische Infrastrukturen wandelt und einem gesellschaftspolitischen Einfluss ausgesetzt ist. Die Festlegungen sind daher nicht abschließend. Um Verwirrungen bei der Bestimmung

von Einrichtung als Kritische Infrastruktur zu vermeiden, ist diese stets in Bezug zu setzen entweder mit der Sicherheit informationstechnischer Systeme oder mit der Abwehr von Gefahren.

Für die Zwecke der Gefahrenprognose in der Gefahrenabwehr und des Zivil- und Katastrophenschutzes ist die vorherrschend verwendete Definition für Kritische Infrastrukturen in Deutschland zu unbestimmt, weitestgehend abstrakt und bedarf Einzelfallbetrachtungen, in der die örtlich vorzufindenden Strukturen zu berücksichtigen sind. Auch die Festlegung von Sektoren- und Branchen ist gerade hinsichtlich der individuell zu beleuchtenden lokalen Strukturen auf der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zu ungenau und nicht zielführend. Auch die für die Sicherheit informationstechnischer Systeme durchgeführten Sektorenstudien (vgl. BSI, 2015a, b, c, d, e; BSI, 2016a, b) ergeben im Kontext der Abwehr von Gefahren keinen signifikanten Mehrertrag. Durch die Sektoren- und Brancheneinteilung lassen sich keine objektiven Sachverhaltselemente für die Gefahrenprognose feststellen. Hierdurch ergibt sich auch kein bundes einheitliches Verständnis über die zu berücksichtigenden Produktions- und Dienstleistungsstätten. Vielmehr besteht sogar die Gefahr, dass zwingend zu berücksichtigende Schutzgüter nicht erkannt und in der Gefahrenprognose kategorisch und schlimmstenfalls unrechtmäßig unberücksichtigt bleiben.

Mit der BSI-KritisV findet für die Sicherheit informationstechnischer Systeme eine starke Orientierung auf die durch eine Kritische Infrastruktur zu erbringende kritische Dienstleistung statt. Nach § 1 Pkt. 3 BSI-KritisV ist eine kritische Dienstleistung definiert als eine Dienstleistung „zur Versorgung der Allgemeinheit [...], deren Ausfall oder Beeinträchtigung zu erheblichen Versorgungsengpässen oder zu Gefährdungen der öffentlichen Sicherheit führen würde“. Mit dieser Orientierung kann eine objektspezifische, auf physikalische Strukturen fixierte Fokussierung hergestellt werden, die auch den Zwecken der Abwehr von Gefahren genügt. Die Notwendigkeit dieser objektspezifischen und auf physikalische Strukturen adressierende Fokussierung begründet sich in der schutzgutorientierten Ausrichtung der Gefahrenprognosen und der örtlichen Zuständigkeit der Gefahrenabwehr- und Katastrophenschutzbehörden.

Der Fokus auf örtliche Strukturen deckt sich auch mit dem oft synonym verwendeten Begriff der kritischen Einrichtung (vgl. Pescaroli und Alexander, 2016). Innerhalb der Internationalen Strategie zur Reduzierung von Katastrophen der Vereinten Nationen (UNISDR) werden unter kritischen Einrichtungen in erster Linie physikalische Strukturen, technische Anlagen und Systeme verstanden, die sowohl unter Normalumständen als auch während Krisenzeiten das essentielle gesellschaftliche, wirtschaftliche und betriebliche Funktionieren einer Gesellschaft erfüllen (vgl. UNISDR, 2009). Mit einer Abgrenzung von Kritischen Infrastrukturen und Kritischen Einrichtungen erscheint es möglich, materielle als auch immaterielle Leistungen objektspezifisch auf bestimmte Einrichtungen zu beziehen und so auch Maßnahmen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes hinsichtlich der internen Zusammenhänge in einem Sektor zu konkretisieren. Hierbei erscheinen auch sektorale Gefahrenprognosen sinnvoll.

Im Rahmen der Sicherheit informationstechnischer Systeme werden in der BSI-KritisV sektorenspezifische Schwellenwerte für Anlagen mit kritischen Dienstleistungen bestimmt, die sich am Regelschwellenwert von 500.000 versorgten Personen im Jahr orientiert (BMI, 2017). Den anhand dessen festgestellten Anlagen wird eine Bundesrelevanz beigemessen. Sie werden als Kritische Infrastrukturen mit Bundesrelevanz bezeichnet und haben aufgrund dessen auch Bedeutung für den Zivilschutz (vgl. Abschnitte 4.2.1). Die Eingriffsschwelle der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes liegt jedoch weit unterhalb dieses Ausmaßes (vgl. Abschnitte 4.2.1), weshalb die Verwendung des Regelschwellenwertes für die Sicherheit informationstechnischer Systeme nicht übertragbar ist. Sie ist daher für die Zwecke der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes ungeeignet. Schwellenwerte für die Festlegung von Anlagen mit kritischen Dienstleistungen für die Zwecke der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes liegen bisher nicht vor.

Im Hinblick auf die Schutzgutorientierung und der lokalen Zuständigkeit der operativen Krisenbewältigung und der damit notwendigen örtlichen raum-zeitlichen Orientierung der Gefahrenprognose bedarf es einer Ausrichtung an lokalen Einrichtungen Kritischer Infrastrukturen. Derartige Lokale KRITIS-Einrichtungen sind im Sinne der Gefahrenabwehr und des Zivil- und Katastrophenschutzes als objektspezifische Produktions- und Dienstleistungsstätten verstanden, die entsprechend grundgesetzlicher Pflichten schützenswürdige kritische Dienstleistungen erbringen und die in der Regel in jeder kreisfreien Stadt und in jedem Landkreis in unterschiedlicher Anzahl und Größe zu finden sind. Mit der örtlichen Ausrichtung adressiert diese Definition insbesondere die Anforderungen der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes, schließt in ihrer Betrachtung aber gleichzeitig die in den Kommunen verorteten Kritischen Infrastrukturen mit Bundesrelevanz als auch die Europäischen Infrastrukturen nicht aus.

In der internationalen wissenschaftlichen Literatur finden sich weitere Definitions- und Kategorisierungsansätze für Kritische Infrastrukturen. So wird beispielsweise in jüngster Zeit im Rahmen der Entwicklung urbaner Resilienz der Begriff der Kritischen Infrastruktur ebenso weiter gefasst und zweckentsprechend anderweitig kategorisiert. So finden sich nach Rome, Voß, Connelly, Carter und Handley (2015) in der Literatur auch Ansätze, die nach Sozialer, Grauer, Blauer und Grüner Kritischer Infrastrukturen unterscheiden. Als Soziale Kritische Infrastrukturen werden institutionelle Abmachungen und gesellschaftskonventionelle Richtlinien erkannt. Als Graue Kritische Infrastrukturen werden gesellschaftswichtige Bauwerke wie Straßen, Brücken und Abwassersysteme bezeichnet. Blaue Kritische Infrastrukturen können als Teil Grüner Kritischer Infrastrukturen angesehen werden, die die besondere Bedeutung von Wasser herausstellen (Wasserspeicher, Trinkwasserseen, Rückhaltebecken, Talsperren, etc.). Als Grüne Kritische Infrastrukturen werden natürliche und angelegte Garten-, Landschafts- und Grünflächen in und um bebauten Gebieten bezeichnet (Deichlinien, Naturparks, Naturschutzgebiete, Stadtgrün und -wälder, Dauergrünland, etc.). Die Europäische Union (2013) erkennt Grüne Kritische Infrastrukturen als natürliche und seminaturliche Gebiete mit besonderen ökologischen Merkmalen an, die einen wesentlichen Beitrag zum Ökosystem und damit zum Erhalt der natürlichen Lebensgrundlage leisten sowie die Biodiversität in urbanen und ländlichen Gebieten schützen. Aufgrund aktueller Katastrophen wird zunehmend Grünen Infrastrukturen ebenso eine Kritikalität zugesprochen, da sie bei der Anpassung an den Klimawandel als auch beim Hochwasserschutz von Bedeutung sind. Da diese Verständnisansätze in weiten Teilen komplementär sind mit den bereits diskutierten Ansätzen oder für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz nachrangig bedeutend sind, werden sie in dieser Arbeit nicht tiefgreifender beleuchtet.

### 4.6.2 Bestimmung der Typen Lokaler Kritischer Infrastrukturen

In der definitorischen Auseinandersetzung mit dem Begriff der „Kritischen Infrastrukturen“ im Abschnitt 4.6.1 wurde zwar das generelle Verständnis deutlich, es fehlt jedoch an einer Bestimmung derartiger Einrichtungen, die einschlägige Bezüge zur Schutzgutbetrachtung herstellen und einen zweifelsfreien Rückschluss auf konkrete Einrichtungen in der Art und Weise zulässt, wie es zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren mit der örtlichen Orientierung der operativen Gefahren- und Katastrophenabwehr im deutschen Krisenmanagementsystem notwendig ist. Daher erscheint es für Abwehr von Gefahren angezeigt, eine Bestimmung von Kritischen Infrastrukturen für die Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte herzuleiten, aus der eine Typliste für so genannte Lokale Kritische Infrastrukturen für die Zwecke der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes erstellen werden kann. Eine solche Bestimmung einer Lokalen Kritischen Infrastruktur ist anhand der in den Abschnitten 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3 hergeleiteten Schutzgutbetrachtungen und der im Abschnitt 4.6.1 aufgezeigten Definitionen Kritischer Infrastrukturen vorzunehmen. So lassen sich Lokale Kritische Infrastrukturen bestimmen anhand

- einer anhaftenden betrieblichen Eigengefahr im Sinne des SÜG, des BImSchG und im Sinne des Schutzes von Leib und Leben von Menschen, Tieren, bedeutenden Sachgütern und die natürliche Lebensgrundlage nach Art. 2 GG (vgl. Abschnitt 4.5.2),
- ihrer schutzwürdigen Nutzung und Festlegung als sensible Einrichtungen im Sinne Art. 13 Seveso-III-Richtlinie und § 50 BImSchG (vgl. Abschnitt 4.5.2),
- ihrer Funktion zur Sicherstellung der lebensnotwendigen Versorgung im Sinne der Landeskatastrophenschutzgesetze (vgl. Abschnitt 4.5.2),
- ihrer Funktion zum Schutz des Bestandes und die Funktionsfähigkeit des Staates, seiner Einrichtungen und sonstige kollektive Rechtsgüter im Sinne der polizei- und ordnungsrechtlichen Generalklausel (vgl. Abschnitt 4.5.2),
- ihrer Funktion zur Sicherstellung von Leistungen der Daseinsvorsorge (vgl. Abschnitt 4.6.1),
- ihrer Funktion zur Sicherstellung von Leistungen nach den Sicherstellungs- und Vorsorgegesetzen (vgl. Abschnitt 3.1.2),
- ihrer Festlegung als Europäische Kritische Infrastruktur im Sinne EU-Richtlinie 2008/114/EC (vgl. Abschnitt 4.6.1),
- ihrer Festlegung als Kritische Infrastruktur mit Bundesrelevanz im Sinne des BStG und der KritisV (vgl. Abschnitt 4.6.1),
- ihrer Festlegung als lebenswichtige Einrichtungen und verteidigungswichtige Einrichtungen im Sinne des SÜG (vgl. Abschnitt 4.5.2) und
- ihrer Funktion zur Sicherstellung der Leistungen der Grundversorgung in Klein- und Unterzentren im Sinne des ROG (vgl. Abschnitt 4.6.1).

Mithilfe dieser Merkmale lässt sich eine nicht abschließende Liste von Typen Lokaler Kritischer Infrastrukturen ableiten (s. Anhang).

Eine derartige bundeseinheitliche und etablierte Typliste von Lokalen KRITIS-Einrichtungen existiert in Deutschland bisher nicht. Nichtsdestotrotz haben viele Untere Katastrophenschutzbehörden für Ihren Zuständigkeitsbereich mittlerweile so genannte KRITIS-Kataster („Local CI Cadaster“ oder „Land Register“, s. a. Münzberg, Wiens und Schultmann, 2017; Münzberg, Müller und Raskob, 2017a) mit Daten über die in ihrem Bereich verorteten Einrichtungen erarbeitet. Anhand der Typliste Lokaler Kritischer Infrastrukturen lassen sich die in einer Gefahrenprognose zu berücksichtigenden lokalen KRITIS-Einrichtungen bestimmen, so dass KRITIS-Kataster auf Basis einheitlicher Standards erarbeitet werden können. Die Identifikation von in einer Gefahrenprognose zu berücksichtigenden Einrichtungen anhand dieser Typliste führt zu einer eher zu weiten als zu eng gefassten Liste von schutzwürdigen Einrichtungen. Aufgrund der damit verbundenen objekt- und einrichtungsspezifischen Schutzgutbetrachtung werden die Anforderungen an eine kleinräumige Auflösung der Prognose stromausfallbedingter Gefahren erfüllt. Die schlussendliche Wahl der in KRITIS-Kataster aufzulistenden Einrichtungen obliegt entsprechend der örtlichen Zuständigkeit den Gefahrenabwehr- und Unteren Katastrophenschutzbehörden.

Für die Beherrschung stromausfallbedingter Gefahren sollte ein KRITIS-Kataster einrichtungsbezogene Daten aus eigenen Quellen und aus von den Behörden durchgeführten Recherchen und Abfragen enthalten über wichtige Kontaktpersonen, Standort, Größe, gefahrenträchtige Eigenschaft, Notstrom- und Ersatzstromkapazitäten (Tankvolumen) und Möglichkeiten zur externen Stromeinspeisung und weiteren Besonderheiten.

Anhand der von den genannten Ansätzen abgeleiteten Typen können Lokale Kritische Infrastrukturen im engeren, im weiteren und im weitesten Sinne unterschieden werden. Lokale Kritische Infrastrukturen im engeren Sinne zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Regel in allen Landkreisen und kreisfreien Städten anzufinden sind und in Zusammenhang mit unmittelbaren stromausfallbedingten Gefahren stehen. Die unmittelbare Gefahr ergibt sich dabei aus der ihr anhaftenden Eigengefahr oder aus der drohenden Unterversorgung des durch sie bedienten alltäglichen Bedarfs. Lokale Kritische Infrastrukturen im weiteren Sinne sind dagegen vereinzelt in den Landkreisen und kreisfreien Städten anzutreffen und weisen teilweise eine bedingte, zeitverzögerte Gefahrendringlichkeit auf. Lokale Kritische Infrastrukturen im weitesten Sinne existieren bundesweit nur vereinzelt, weisen ein beschränktes Gefahrenpotential auf und sind nicht in jedem Fall zu berücksichtigen.

### **4.7 Vorbereitung der Abwehr stromausfallbedingter Gefahren**

Da bereits im Allgemeinen fundierte fachliche Auseinandersetzungen über die Durchführung von Bedarfsplanungen, -analysen und der Festlegung und Formulierung von Schutzzielen im Katastrophenschutz fehlen, lassen sich in der Fachliteratur nur wenige Anknüpfungspunkte zur Entwicklung vorbereitender Maßnahmen auf Stromausfälle finden. Im Nachfolgenden wird die Notwendigkeit und Erforderlichkeit von vorzubereitenden Maßnahmen und ihre Bemessung für die Bewältigung von Stromausfällen diskutiert und die Beschaffenheit von Schutzniveaus für die Bemessung des Katastrophenschutzes in Landkreisen und kreisfreien Städten erörtert. Dieser Diskurs bildet im weiteren Verlauf die Grundlage zur Durchführung von Analysen zur bedarfsgerechten Vorbereitung auf Stromausfälle.

#### **4.7.1 Planung von vorbereitenden Maßnahmen für Stromausfälle**

Nach allgemeiner Fachmeinung kann einem Stromausfall je nach Ausmaß ein hohes Gefahrenpotential einer Unterversorgung mit lebenswichtigen Leistungen anhaften (vgl. Abschnitt 1.2). Unter normalen Umständen ist davon auszugehen, dass sich die Nachfrage und das Angebot an lebenswichtigen Leistungen im Gleichgewicht befinden (für Gleichgewichtstheorien im Rahmen urbaner Resilienz s. a. Holling, 1996; Meerow et al., 2016). Stromausfälle führen jedoch zu Beeinträchtigungen oder gar zum Ausfall von KRITIS-Einrichtungen, so dass die übliche Versorgung bedroht ist oder nicht aufrechterhalten werden kann. Auch wenn sich nach einiger Zeit die Nachfrage im äußerst begrenzten Umfang einem gewissen Leistungseinbruch anpassen kann, droht bei außergewöhnlichen Abweichungen ein Kippen des Gleichgewichts. Um Gefahren während eines Stromausfalls auszuschließen, muss die Bevölkerung in solchen Situationen ausreichend mit lebenswichtigen Leistungen versorgt sein. Je nach Schadensumfang und Ereignisdauer ist es wahrscheinlich, dass ein gewohnter (Voll-)Betrieb von KRITIS-Einrichtungen nicht mehr möglich ist. In diesem Fall droht eine Situation, in der der Bedarf an lebenswichtigen Leistungen im Umfang des Normalzustandes nicht mehr vollumfänglich bedient werden kann.

Um die möglichen Konsequenzen eines Stromausfalls für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz zu beurteilen, bedarf es einer differenzierten Auseinandersetzung mit den komplexen Wirkzusammenhängen und möglichen Gefahren einer Unterversorgung. Diese Auseinandersetzung muss systematisch und raum-zeitlich differenziert erfolgen, da durch die speziellen Bebauungsstrukturen jede Gebietskörperschaft somit der in ihr verorteten KRITIS-Einrichtungen örtlich spezifisch sind und individuelle Eigenschaften aufweisen. Aus fachlicher Sicht kann dies nur innerhalb einer örtlichen Risikoanalyse für eine Gebietskörperschaft erfolgen.

Mit der Untersuchung der raum-zeitlichen Wirkungen eines Stromausfalls ist zunächst ein grundlegendes Verständnis über die möglichen Folgen eines Stromausfalls zu gewinnen. Hierbei spielt nicht nur die Verortung der KRITIS-Einrichtungen eine wichtige Rolle, sondern auch der Grad der betreiberseitigen Vorbereitung und die daraus resultierende Fähigkeit eines kontinuierlichen Betriebes während eines Stromausfalls. Zu analysieren ist, welcher Leistungseinbruch wann und wo zu erwarten ist. Aus der raum-zeitlichen Analyse sind die Konsequenzen abzuleiten, die je nach Tageszeit drohen, wenn bestimmte Teilgebiete einer Gebietskörperschaft für eine gewisse Ausfalldauer betroffen sind.

Auf dieser Wissensbasis können Einsatzschwerpunkte identifiziert werden, die sowohl für die Vorbereitung als auch bei der Bewältigung von Stromausfällen mit erhöhter Aufmerksamkeit zu begegnen sind. Im Rahmen der Vorbereitung auf Stromausfälle ist auf eine ausreichende Selbsthilfe der KRITIS-Einrichtungen, die eine identifizierte Schwachstelle darstellen, hinzuwirken. Während der Bewältigung ermöglichen die Ergebnisse einer raum-zeitlichen Analyse, die beschränkt verfügbaren vorgehaltenen bzw. nachgeforderten Ressourcen wie Netzersatzanlagen und Treibstoff wirkungsvoll und verhältnismäßig einzusetzen.

Die Erkenntnisse dienen entsprechend den Anforderungen der Katastrophenschutzgesetze der sachgrundbezogenen Vorsorge zur Sicherstellung einer wirksamen Katastrophenabwehr und der Vorbereitung erforderlicher Maßnahmen. Durch die Maßnahmen wird die Gefahr ausgeschlossen, gesenkt oder verzögert. Maßnahmen sind in Vorsorge- und Bewältigungsstrategien zu bündeln. Wenn Maßnahmen geeigneter Strategien im Rahmen der Katastrophenvorsorge umgesetzt werden, sind diese in die Katastrophenschutz-, Alarm- und Einsatzpläne zu integrieren (vgl. Quarentelli, 1997). Im Rahmen der akuten Krisenbewältigung sind sie im Ereignisfall zeitnah umzusetzen.

Da Katastrophenschutz, Risikomanagement und im Besonderen die Aufrechterhaltung der lebenswichtigen Versorgung im Krisenfall eine verwaltungstechnische Queraufgabe darstellt, die verschiedene Ressorts tangiert, ist hinsichtlich der Verwaltungseffizienz eine Verzahnung mit weiteren Strategien wie die zur langfristigen städtebaulichen Entwicklung, Quartiersplanung, Metropolentwicklung sowie den Planungen zur Landes- und Kreisentwicklung, der Klimaanpassung und den Strategien zur Landes- und Raumplanung angezeigt.

Zur Bewertung, ob Vorbereitungen auf Ausfälle der lebensnotwendigen Versorgung durch einen Stromausfall ausreichend sind, existieren bisher nur Ansätze einer Bedarfsplanung. Es fehlen ingenieurwissenschaftliche methodische Grundlagen für die Prüfung von Vorsorge- und Bewältigungsstrategien. Das bisherige Fehlen von derartigen Bedarfsplänen liegt einerseits darin begründet, dass die Aufrechterhaltung lebensnotwendiger Versorgung nicht allein durch die Gefahrenabwehrbehörden gestaltet werden kann (vgl. Abschnitt 3.1.3). Die Zuständigkeiten und Verantwortungen liegen bei den einzelnen Betreibern. Entscheidungsrelevante Daten und Kenntnisse über Zusammenhänge liegen nicht gebündelt vor. Zur Beurteilung, ob Planungen ausreichend sind, bedarf es daher der Mitwirkung der Betreiber der KRITIS-Einrichtungen und der Bevölkerung. Gerade die Festlegung von verbindlichen Referenz- oder Bezugsmetriken als

Bemessungsgrundlage ausreichender Vorbereitung gestaltet sich als ausgesprochen komplex. Bisher bestehen hierfür keine Festlegungen in Deutschland.

### **4.7.2 Bedarfsplanung für die Vorbereitung auf Stromausfälle**

In einer Bedarfsanalyse für die Vorbereitung auf Stromausfälle ist zu beurteilen, inwieweit durch die vorbereitenden Maßnahmen wenigstens ein Zustand erreicht wird, in dem eine ausreichende und bedarfsgerechte Versorgung der Bevölkerung mit lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen vorliegt.

Dabei ist einerseits zu beachten, dass Bedarfe gegenüber der Normalsituation bedingt reduziert werden können, ohne dass eine Gefährdung eintritt. So lange die noch verfügbare Leistung durch KRITIS-Einrichtungen diesen angepassten Bedarf bedienen kann, liegt keine Gefährdung vor. Ideal ist daher wenigstens die Bildung eines Gleichgewichts, bei dem zwar nicht vollumfänglich alle Bedarfe wie unter Normalumständen bedient werden können, bei dem jedoch noch ausreichend Leistungsangebote verfügbar sind um eine Gefährdung auszuschließen. Hierbei sind die Prozessflexibilität als auch vorbereitete Maßnahmen wie eine Ersatzstromversorgung von wesentlicher Bedeutung, da durch sie in begrenztem Umfang Schäden an Schutzgütern gemindert, verzögert oder verhindert werden. Innerhalb der Bedarfsanalysen für Gebietskörperschaften sind daher alle technischen, baulichen und organisatorischen Maßnahmen der Betreiber der KRITIS-Einrichtungen, der Bevölkerung und der Gefahrenabwehrbehörden zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Zivilschutzes bemüht sich das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) für die Bemessung von Maßnahmen entsprechende Methoden zu entwickeln. Die Bemühungen zielen insbesondere auf die Entwicklung von Methoden zur Festlegung und auf die Formulierung von konkreten Schutzziele ab (vgl. BBK, 2012, BMI, 2011c). Entsprechend der gesetzlichen Zuständigkeit des BBKs für den Zivilschutz liegt dabei das Verständnis über Kritische Infrastrukturen auf Einrichtungen, die eine nationale Bedeutung aufweisen und deren Ausfall eine entsprechende Bundesrelevanz innewohnt. Gleiches gilt für die zu Grunde zu legenden Stromausfallszenarien. Die Arbeiten des BBKs sind vor diesem Hintergrund nur bedingt für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes geeignet.

Die durch das BBK (2012) vorgeschlagene Durchführung von Bedarfsanalysen sieht vor, Soll-Ist-Abgleiche anhand der Ergebnisse einer Risikoanalyse für Einwirkungsszenarien und vordefinierten Schutzziele zu erstellen (Abbildung 4.8).

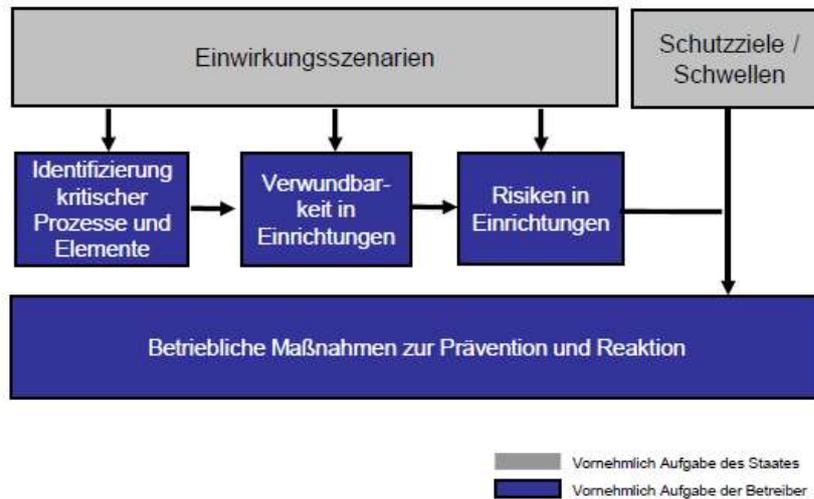


Abbildung 4.8: Vorschlag zur Bemessung vorbereitender Maßnahmen durch das BBK (BBK, 2012).

Neben den zu definierenden Einwirkungsszenarien sind als wesentliche Aspekte einer Risikoanalyse kritische Prozesse zu identifizieren und verwundbare Einrichtungen und Risiken in den Einrichtungen zu untersuchen. Anhand eines anschließenden Soll-Ist-Abgleichs wird unter Verwendung der definierten Schutzziele der Bedarf bemessen. Das BBK erkennt für sich die Aufgabe, Einwirkungsszenarien und Schutzziele für die Zwecke des Zivilschutzes vorzugeben (ebd.). Die Sicherstellung einer bedarfsgerechten Vorbereitung liegt hingegen in der Aufgabenwahrnehmung der Betreiber der KRITIS-Einrichtung (ebd.).

Grundsätzlich ließe sich dieses Vorgehen der Bedarfsplanung aufgrund der flexiblen Definition von Einwirkungsszenarien und der Schutzziele sowohl für großflächige nationale KRITIS-Einrichtungen für die Zwecke des Zivilschutzes als auch auf Lokale KRITIS für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes anwenden. Für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der viel häufigeren kleineren und kurzzeitigeren und räumlich begrenzten Stromausfallereignisse und aufgrund der örtlichen Zuständigkeit der Unteren Katastrophenschutzbehörden insbesondere Lokale KRITIS-Einrichtungen in den Mittelpunkt der Planungen zu stellen sind. Ziel der Planung muss mindestens ein gemeindeübergreifender Grundschutz durch eine ausreichende Versorgung mit lebenswichtigen Dienstleistungen im betreffenden Landkreis, einer kreisfreien Stadt oder eines geographischen Gebietes sein. Die entsprechenden Einwirkungsszenarien und Schutzziele liegen zwangsläufig unterhalb der Grenzen einer Bundesrelevanz. Bisher fehlt es an verbindlichen Referenz- oder Bezugsmetriken zur Bemessung von Schutz- und Bewältigungsmaßnahmen für die kommunale Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz. So sind weder einheitliche Ausmaße eines Stromausfalls bekannt, auf die sich Landkreise oder kreisfreie Städte vorzubereiten haben, noch sind die zu erbringenden Leistungserwartungen an KRITIS-Einrichtungen während eines Stromausfalls bis zur Wiederherstellung gesellschaftlich, fachwissenschaftlich und politisch ausreichend diskutiert oder festgelegt.

Zur Sicherstellung eines bundeseinheitlichen Schutzniveaus zum Zwecke der Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse im Sinne Art. 72 GG und § 1 ROG sowie einer ausreichenden Verzahnung mit den Vorbereitungen des Zivilschutzes erscheint eine einheitliche Festlegung von Szenarien und Schutzzielen durch

die Länder in Einvernehmen mit dem Bund zielführend, die fachwissenschaftlich zu begleiten ist und gesellschaftliche Anerkennung zu erfahren hat. Schlussendlich kann ein Grundschutz und erweiterter Schutz durch die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Verhältnisse Lokaler Kritischer Infrastrukturen und damit ortsbezogen erfolgen. Die final auf kommunaler Ebene verwendeten Einwirkungsszenarien und Schutzziele sind deswegen auch entsprechend des Ordnungsrechts, der damit verbundenen örtlichen Zuständigkeit und aufgrund des Wissens um lokale Gefahren einer Unterversorgung durch die zuständige örtliche Gefahrenabwehrbehörde festzulegen. Soweit bundeseinheitliche Einwirkungsszenarien und Schutzziele vorliegen, könnten diese bei der Bedarfsplanung für die örtliche Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz herangezogen werden. Nichtsdestotrotz bleibt diese Aufgabe in der kommunalen Selbstverwaltung, in der zur Sicherstellung einer wirksamen Katastrophenabwehr den zuständigen Behörden freizustellen ist, die fachwissenschaftlich vorgeschlagenen Einwirkungsszenarien und Schutzziele zu adaptieren oder sie den örtlichen Gegebenheiten sachgrundbezogen anzupassen. Darüber hinaus stellt die Bedarfsplanung auf Stromausfälle immer eine Querschnittsaufgabe dar, in der die Abstimmung und das Einvernehmen mit anderen Ressorts auf der Ebene des betreffenden Landkreises oder der kreisfreien Stadt (insbesondere Polizei, Gesundheitsamt, Katasteramt, Schulamt, Veterinäramt und Umweltamt) sowie den jeweils aufsichtspflichtigen vorgelagerten Mittel- und Landesbehörden zur Sicherstellung eines integrierten Hilfeleistungssystems notwendig erscheint.

Das zu analysierende Gebiet kann wie bei rettungsdienstlichen und brandschutztechnischen Bedarfsplanungen beschränkt sein auf die administrativ-politischen Grenzen eines Landkreises oder einer kreisfreien Stadt. Aufgrund überregionaler Versorgungsnetzungen erscheinen jedoch auch überörtliche Analysen indiziert, in der die Bedeutung von KRITIS-Einrichtungen und ihrer Verortung in geowirtschaftlich vernetzten Räumen von Ober-, Mittel- und Unterzentren betrachtet werden.

### 4.7.3 Stand der Schutzziel festlegung für die Vorbereitung auf Stromausfälle

Häufig finden sich bei der Festlegungen von Schutzzielen vorgeschaltete probabilistisch- oder empiriebasierte Analysen. Im vorliegenden Fall fehlt es jedoch an einer für solche Analysen ausreichend umfangreichen empirischen Datengrundlage. Darüber hinaus betreffen Schutzziele in der Regel eine Vielzahl von Akteuren, so dass ihre Festlegung in verschiedenen praktischen Bezügen eine Anwendung finden muss. Ihre Festlegung hat daher zwangsläufig in einem offenen akteursübergreifenden Diskurs zu erfolgen.

Gegenüber den in Abschnitt 3.3.4 dargestellten Formen der Schutzziel formulierung findet sich im Diskurs zum Schutz Kritischer Infrastrukturen vorherrschend und derzeit favorisiert die Festlegung von durch den Staat vorgegebene numerische Schutzniveaus (vgl. u. a. BMI, 2009, 2011c, BBK, 2012, 2014, Fekete, 2012, Mayer und Lauwe, 2015). Das insbesondere durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) favorisierte Konzept der Schutzziel festlegung beim Schutz Kritischer Infrastrukturen entspricht dem Prinzip des „Management-by-Objectives“ (MBO). Beim MBO-Prinzip werden Schutzleistungen in Bezug gesetzt zu vordefinierten Zielstellungen. Die Bewertung basiert auf der Zielerreichung, wobei das Risiko definiert wird als Abweichung zwischen der Zielsetzung und der erbrachten Leistung (vgl. Aven und Krohn, 2014).

Bei der Festlegung von Schutzzielen wird zwischen strategischen und operativen Schutzzielen unterschieden (vgl. BMI, 2009, 2011c, BBK, 2012, Mayer und Lauwe, 2015). Üblicherweise adressieren strategische Schutzziele langfristige Entwicklungen und beinhalten Visionen und Leitgedanken der Vorbereitung. Damit werden Anforderungen formuliert, die in einer bestimmten Zukunft auf der Durchführungsebene durch operative Schutzziele zu konkretisieren sind. Durch operative Schutzziele werden Anforderungen

an die Leistungsfähigkeit einer lebenswichtigen Versorgung mit einem zeitlichen Bezug zum Ausfallgeschehen beschrieben.

Im Bezug zu Stromausfällen adressieren bisherige Arbeiten zur Festlegung von Schutzniveaus lediglich nationale Kritische Infrastrukturen im Lichte des Zivilschutzes. Das BBK setzt dabei auf unverbindliche Verbandslösungen und interne Regelwerke (vgl. Stolzenburg, 2011), die mit dem Status der Selbstverpflichtungserklärung keine normative Bindung haben und auf Freiwilligkeit beruhen.

Für die Festlegung von Schutzniveaus für nationale KRITIS-Einrichtungen wurden durch Mayer und Lauwe (2015) erste Schutzziele vorgeschlagen (s. Tabelle 5). Dieser Vorschlag diene als Diskussionsgrundlage eines nicht näher definierten Findungsprozesses. Der Vorschlag beinhaltet kein konkretes Einwirkungsszenarium, vielmehr finden sich Angaben über einen Stromausfall, der wahlweise mehr als drei Tage bzw. mehrere Wochen anhält und mehr als 500.000 Menschen betrifft, so dass eine entsprechende Bundesrelevanz vorliegt und die Instrumente des Katastrophenschutzes nicht ausreichen würden.

Tabelle 5: Vorgeschlagene Schutzziele des BBKs nach Mayer und Lauwe (2015).

Zweck	Vorschlag der Schutzzieleformulierung nach Mayer und Lauwe (2015)
Strategisches Schutzziel	„Die Bevölkerung ist vor Versorgungsausfällen aufgrund von Beeinträchtigungen Kritischer Infrastrukturen zu schützen“
Schutzziel im Bereich der Prävention und der Branche Strom	„Bereiche in den Übertragungsnetzen, deren Beeinträchtigung zu einem Stromausfall für mehr als 500.000 Menschen über mehr als drei Tage führen würde, sollen mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen unter Beibehaltung der Verhältnismäßigkeit der Mittel geschützt werden. Die Schutzmaßnahmen beziehen sich auf vorgegebene Einwirkungsszenarien.“
Schutzziel als Zielsetzung der Notfallplanung für die staatliche Notfallvorsorge (Feuerwehr, THW, Polizei)	„Für mindestens sechs Wochen sollte eine Minimalversorgung der Bevölkerung (Versorgung mit lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen) gewährleistet sein.“
Schutzziel im Bereich der Notfallplanung für die Eigenvorsorge der Bevölkerung	„Die Bevölkerung sollte sich zwei Wochen mit Wasser, Lebens- und Arzneimitteln sowie Hilfsmitteln selbst versorgen können.“

Neben fehlender Realitätsnähe und Praktikabilität des Vorschlages ist auch kritisch zu bewerten, dass die vorgeschlagenen Schutzziele kaum messbar gemacht werden können. Es fehlt an Messwerkzeugen und Stresstests, um z. B. die Notfallplanungen hinsichtlich des Erfüllens der Vorgaben zu bewerten. Ohne eine hinreichende Messbarkeit können weder die Zielerreichung noch konkrete Maßnahmen abgeleitet werden.

Im Moment befindet sich in der politischen Diskussion, im Besonderen zur Umsetzung der KZV, eine sogenannte Mindestversorgung der Bevölkerung mit lebenswichtigen Leistungen und Gütern. Die davon

abzuleitenden Mindestversorgungskonzepte oder auch „Minimalkonzepte“<sup>6</sup> wurden erstmals mit der Bearbeitung der Studie KRITISKapa<sup>7</sup> diskutiert (vgl. Brenig, Münzberg, Voß et al., 2011) und sind weiterhin in verschiedenen Forschungsaktivitäten von Interesse (vgl. Mayer und Lauwe, 2015, Stolzenburg, 2011).

Mindestversorgungskonzepte (MVK) können synonym verstanden werden als Bedarfsplanungen, die eine strategische Koordination ermöglichen, um Mindestversorgungspläne (MVP) zu entwickeln, umzusetzen und fortzuschreiben. Ein MVP eines Landkreises, einer kreisfreien Stadt oder einer geowirtschaftlichen Gliederung fasst alle organisatorischen, technischen und baulichen Maßnahmen der lokalen KRITIS-Betreiber und des Bevölkerungsschutzes zusammen, durch die ein Ausfall oder eine Beeinträchtigung einer oder mehrerer lebensnotwendigen Versorgung beherrscht werden soll.

Neben dem Mindestversorgungsniveau, was auf die Gesamtheit der Versorgung aller KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft abzielt, sind auch die einzelnen KRITIS-Einrichtungen isoliert zu betrachten. Auch sie können bedingt ihren Bedarf reduzieren, ohne dass es zu Beeinträchtigungen oder zum Ausfall der Einrichtung kommt. Sie stellen hierdurch eine einrichtungsindividuelle Minimalversorgung sicher.

Weder bei der Definition von Fachbegriffen noch bei der Festlegung der methodischen Bestimmung von Schutzziele haben sich bisher vorherrschend anerkannte Standards herausgestellt, so dass die wissenschaftliche Debatte als auch der politische Diskurs nach wie vor nicht abgeschlossen sind.

### 4.7.4 Schutzzielefestlegung für die Vorbereitung auf Stromausfälle

Wie bereits erörtert, lassen sich strategische und operative Schutzziele bilden. In Anlehnung an die Zieldefinition nach dem SMART-Prinzip im Projektmanagement sind Schutzziele spezifisch, messbar, erreichbar, realistisch und terminiert zu formulieren (zur Schutzzieleformulierung nach dem SMART-Prinzip im Bevölkerungsschutz s. a. Schweer, 2011). So könnten strategische Schutzziele langfristige Grundsatzentscheidungen der Vorbereitung adressieren und so z. B. wie folgt formuliert sein:

„Ziel ist es, den Selbstschutz lebensnotwendiger Versorgungseinrichtungen in [Name der Gebietsverwaltung] bis [Referenzjahr] auf einen Stromausfall, der [das Referenzgebiet] und darüber hinaus eine derart große Fläche betrifft, dass auswärtige Hilfe nur im äußerst beschränkten Maße oder gar nicht mehr möglich ist, so zu stärken, dass durch sie in der initialen Phase eines Bemessungsstromausfalls mit einer Dauer von [Referenzdauer] eine ausreichende Versorgung ohne gravierende Schäden oder Gefährdungen von Schutzgütern sichergestellt ist.“

Diese strategische Zielsetzung verdeutlicht das übergeordnete Gesamtziel einer ausreichenden Versorgung, aus denen sich operationalisierte Schutzziele als Teilziele ableiten.

Die ausreichende Versorgung stellt einen Gleichgewichtszustand dar, der die Schwelle zur nicht ausreichenden Versorgung kennzeichnet. Sie ist von besonderer Bedeutung für die Bedarfsplanung, da sie den

---

6 Der Begriff „Minimalkonzept“ wird im Rahmen des BMI-geförderten Ressortforschungsprojektes KritisNOTSTROM, der Begriff der „Minimalversorgung“ wird in der KZV verwendet. Bei beiden besteht durch die homophone Ähnlichkeit mit dem ökonomischen Minimalprinzip, dem Erreichen eines vorgegebenen Ziels mit möglichst wenigen Mitteln, ein irreführendes Verwechslungspotential. Zur Vermeidung dessen wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff „Mindestversorgungskonzept“ (MVK) verwendet.

7 Die Studie „Grundlagenermittlung zur Festlegung von Schutzziele auf der Basis von Kapazitäten von Betreibern, staatlichem Krisenmanagement und der Bevölkerung“ (KRITISKapa) wurde durch das Bundesministerium des Innern im Jahr 2011 im Rahmen der Ressortforschung gefördert.

Umschlagspunkt zwischen einer Gefährdung und eines sicheren Zustandes markiert. Innerhalb der zu analysierenden Gebietskörperschaft wird dieser Umschlagspunkt im Rahmen dieser Arbeit als das Mindestversorgungsniveau verstanden. Das Mindestversorgungsniveau ist somit der vernünftigerweise mindeste Versorgungsumfang, der während eines Stromausfalls sicherzustellen ist, um nicht akzeptierte Versorgungsengepässe und andere dramatische Folgen auszuschließen.

Operationalisiert wird das Mindestversorgungsniveau durch Teilziele. So werden entsprechend des MBO-Prinzips Grenz- und Schwellenwerte für Systemkomponenten und Teilprozesse eingeführt werden, die jeweils die zu erfüllende Leistungsfähigkeit an die betriebliche Kontinuität der lebensnotwendigen Versorgung während eines Stromausfalls festschreibt. Die Zielerreichung zeigt den Erfolg der Vorbereitungs- und Bewältigungsmaßnahmen auf. Der Zeitpunkt und die Höhe der Abweichungen von vorgegebenen Schutzziele kennzeichnen konkrete Gefährdungen hinsichtlich ihrer Gegenwärtigkeit und Erheblichkeit. Das Erfüllen der Teilziele impliziert das Erfüllen des übergeordneten Gesamtziels.

Bei der Festlegung eines Mindestversorgungsniveaus sind Fähigkeiten der abhängigen Nutzer, der jeweilig betrachteten Einrichtung, der Branche, des Systems aller Einrichtungen des selben KRITIS-Typs und ggf. der Gefahrenabwehr unter den örtlichen Gegebenheiten und der Ausfalldauer zu berücksichtigen. Im Mittelpunkt steht dabei die von der Leistung der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes unabhängige Selbsthilfe der Bürger und KRITIS-Betreiber in ihrem gewohnten Markt- und Wettbewerbsumfeld. Unterstützende Hilfen durch die Gefahrenabwehrbehörden sind lediglich dann zu berücksichtigen, wenn vertragliche Regelungen der (behördlichen) Hilfe zur Aufrechterhaltung bestehen, diese auf Praktikabilität geprüft und regelmäßig durch verschiedene Formen in Übungen getestet wurden. Da die Fähigkeiten der Gefahrenabwehrbehörden zunächst nicht integriert wird, ist sichergestellt, dass den Gefahrenabwehrbehörden die notwendige Flexibilität erhalten bleibt, um unmittelbar auf nicht konzeptuell vorhersehbare Gefahrensituationen während eines Stromausfalls reagieren zu können.

Teilziele lassen sich somit zeitlich differenziert je nach Zweck, Praktikabilität und Sachgerechtigkeit für einen gesamten KRITIS-Sektor, eine Branche, eine bestimmte Lokale KRITIS-Einrichtung, einzelne Teilkomponenten oder für die Gesamtheit aller Einrichtungen eines KRITIS-Typs formulieren.

## **4.8 Akute Abwehr stromausfallbedingter Gefahren**

Aufgrund des Effektivitätsgebotes sind von staatlicher Seite wirksame Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren und damit zur Erfüllung der Schutzverpflichtung durch die kommunalen Gefahren- und Katastrophenschutzbehörden zu ergreifen (zum Effektivitätsgebot vgl. Abschnitt 3.3.2). Dabei besteht Ermessen sowohl beim Entschluss des Eingriffs (zum Erschließungsermessen vgl. Abschnitt 3.3.2) als auch bei der Wahl der Maßnahmen des Eingreifens (zur Auswahlermessen vgl. Abschnitt 3.3.2). Das Auswahlermessen beinhaltet auch, dass die erwogenen Maßnahmen einer Verhältnismäßigkeitsprüfung unterzogen werden (vgl. Abschnitt 3.1.1). Eine Maßnahme zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren muss sich daher aus dem legitimen Zweck der Schutzzielerreichung begründen und geeignet sein, das anvisierte Schutzziel zu erreichen oder wenigsten die Erreichung zu fördern (Geeignetheit). Erforderlich ist die Maßnahme, wenn kein milderer Mittel, was ebenfalls geeignet wäre, zur Schutzzielerreichung zur Verfügung steht (Erforderlichkeit). In Angesicht der Erheblichkeit und der Dringlichkeit der Gefahr für die bedrohten Schutzgüter hat die Maßnahme nicht außer Relation zu stehen mit den durch sie einhergehenden negativen Auswirkungen (Angemessenheit).

Für das fehlerfreie Erschließungs- und Auswalmessen bedarf es eines objektiven Maßstabs, der mithilfe einer Gefahrenprognose (Abschnitt 3.2) hergestellt wird und mithilfe dessen zu ermitteln ist,

- wie sich die Gefahren raum-zeitlich auswirken,
- welche Schutzgüter wie stark betroffen sind,
- welche Wertigkeit die bedrohten Schutzgüter aufweisen und
- inwieweit es wann zu welchen Abweichungen bei der Schutzzielerreichung kommt.

Vom Ergebnis der Gefahrenprognose sind Maßnahmen oder Maßnahmenbündel abzuleiten. Für die schlussendliche Entscheidung zur Durchführung von Maßnahmen ist deren Wirksamkeit hinsichtlich der Schutzzielerreichung im Sinne der Verhältnismäßigkeitsprüfung zu untersuchen. Das schlussendlich gewählte Maßnahmenbündel bildet einen Aktionsplan. Werden im Rahmen der Vorbereitung auf stromausfallbedingte Gefahren Aktionspläne erstellt, lassen sich diese in Katastrophenschutzplänen abbilden. Die Erstellung eines Aktionsplanes ist vom Einzelfall des eigentlichen Stromausfallszenarios, den betroffenen Schutzgütern, deren Vorbereitung und Fähigkeiten und den im Rahmen des Stromausfallszenarios zur Verfügung stehenden Maßnahmen abhängig.

Gleichwohl am eigentlichen staatlichen Eingriff zur Gefahrenabwehr im Ereignisfall umfangreiche Anforderungen geknüpft sind, stehen nur wenige Maßnahmen zur Verfügung, die unabhängig von der Vermeidungspraxis von Betreibern von Kritischen Infrastrukturen und den Netzbetreibern zur Verfügung stehen (zur Vermeidung im weiteren Sinne vgl. Abschnitt 4.1) und die allein durch das Tätigwerden der Gefahren- und Katastrophenschutzbehörden umsetzbar sind. Im Sinne des Kooperationsprinzips (vgl. Abschnitt 3.1.3) und der etablierten Sicherheitspartnerschaften (vgl. Abschnitt 4.4) sind Maßnahmen in der Regel nur in Zusammenschluss mit den Netzbetreibern, den Betreibern Kritischer Infrastrukturen und den Gefahren- und Katastrophenschutzbehörden zu erarbeiten und umzusetzen.

Maßnahmen zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren sind abzugrenzen von Maßnahmen, die zur Wiederherstellung der originären Stromversorgung führen. Zwar kommt es dadurch durchaus auch zum Wegfall stromausfallbedingter Gefahren, derartige Maßnahmen obliegen jedoch regelmäßig den Energieversorgungsunternehmen und können durch behördliches Handeln lediglich indirekt unterstützt werden.

Typische, aber nicht darauf beschränkte Maßnahmen, die regelmäßig zur Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren durch die Gefahren- und Katastrophenschutzbehörden in Erwägung gezogen werden, sind

- die Evakuierung von Betroffenen,
- der objektspezifische Einsatz von mobilen Netzersatzanlagen oder Notstromaggregate,
- die Einspeisung in Umspannwerkbezirken zur Versorgung von Netzsinseln,
- die priorisierte Versorgung von Netzkunden und Netzsinseln,
- die priorisierte Wiederherstellung von Netzkunden und Netzsinseln und
- die Verteilung von Treibstoffen.

Durch die Evakuierung von z. B. Dialysepatienten und Bewohnern von Altenpflegeheimen in nicht vom Stromausfall betroffene Gebiete werden Betroffene der stromausfallbedingten Gefahr entzogen. Die Fähigkeiten von Landkreisen und kreisfreien Städten zur Evakuierung sind jedoch auch trotz Amtshilfe derart beschränkt, dass nur einzelne Einrichtungen parallel evakuiert werden können.

Durch den Einsatz von mobilen Netzersatzanlagen oder Notstromaggregaten an Lokalen Kritischen Infrastrukturen kann versucht werden, deren Betrieb derart aufrechtzuerhalten, dass der Eintritt von stromausfallbedingten Gefahren vermieden wird. Gleiches kann realisiert werden durch die Einspeisung in Umspannwerkbezirke und durch die Bildung von Netzsinseln. In diesem Fall werden entweder alle Netzkunden oder je nach Schaltung angeschlossene Lokale KRITIS-Einrichtungen mit Elektrizität versorgt, wodurch drohende stromausfallbedingte Gefahren vermieden werden sollen.

Je nach Stromausfallmagnitudo ist jedoch davon auszugehen, dass es zu einem Mangel an mobilen Netzersatzanlagen, Notstromaggregate und Treibstoffen kommt. Zwar können fehlende mobile Notstromaggregate und Netzersatzanlagen durch die Amtshilfe bei anderen Einheiten der Feuerwehren, des Katastrophenschutzes und der Bundesanstalt Technisches Hilfswerk sowie bei Privaten angefragt werden, vergangene Ereignisse haben jedoch gezeigt, dass für eine ausreichende Versorgung die zur Verfügung stehenden Netzersatzanlagen und Notstromaggregate - auch europaweit - nicht ausreichen.

In Fällen wie der Lastreduzierung sind einige Netzkunden vom Netz zu trennen (s.a. Abschnitt 4.2.6). Je nach Schaltbarkeit kann eine priorisierte Versorgung von KRITIS-Einrichtungen oder Netzsinseln bzw. Abschaltgruppen dazu führen, dass die Ausmaße der Lastreduzierung begrenzt werden und eine (Teil-)Versorgung mit lebenswichtigen Leistungen aufrechterhalten bleiben. Bei diesem Vorgehen kommt es zu einem diskriminierenden Netzbetrieb, bei dem Lokale KRITIS-Einrichtungen in der Stromversorgung bevorteilt werden. Hinsichtlich der Wiederherstellung kann eine priorisierte Wiederherstellung ebenfalls in Erwägung gezogen werden, um stromausfallbedingte Gefahren abzuwehren.

## 4.9 Fazit

Das Krisenmanagement von stromausfallbedingten Gefahren folgt den Grundprinzipien und normativen Rahmenbedingungen, an denen auch die anvisierte Entscheidungsunterstützung auszurichten ist. Durch die Definitionen von Begriffen wurden in diesem Kapitel Grundlagen und Anforderungen einer Entscheidungsunterstützung beleuchtet.

Auf Grundlage der Reflektion von Szenarien sind demnach insbesondere Ausfälle von wenigen Stunden und somit der initiale Verlauf von Stromausfällen für das Krisenmanagement von besonderer Bedeutung. Die Zuständigkeit des operativen Krisenmanagements liegt bei den kommunalen Gefahrenabwehr- und Katastrophenschutzbehörden, wobei in jedem Fall die Maßnahmen des Selbstschutzes der KRITIS-Betreiber lediglich unterstützt werden. Deutlich wurde, dass etablierte Sicherheitspartnerschaften, innerhalb derer Absprachen, Risikowahrnehmungen und -analyse sowie der Austausch von Informationen erfolgen, Grundlage einer effektiven Vorbereitung auf Stromausfälle sind.

Wesentliche Grundlage zum behördlichen Eingreifen stellt die Feststellung von stromausfallbedingten Gefahren dar. Die Eigenschaften stromausfallbedingter Gefahren und deren Zusammenhang zu Kritischen Infrastrukturen wurden hergeleitet. Ebenso wurde der Begriff der Kritischen Infrastrukturen kritisch re-

flektiert. Für die Zwecke der Entscheidungsunterstützung der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes wurde der Begriff der Kritischen Infrastrukturen zum einen hinsichtlich der notwendigen lokalen Ausrichtung spezifiziert und zum anderen in einem weiteren Sinne gefasst.

Abgerundet wurde das Kapitel durch die Betrachtungen der Anforderungen an die Vorbereitung auf und der akuten Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren. Dabei wurde sowohl auf die Bedarfsplanung als auch auf die Planungen zur akuten Krisenbewältigung sowie den damit zusammenhängenden Schutzziele eingegangen.

# 5 Theorien der Katastrophenvorsorge

In diesem Kapitel werden Theorien der Katastrophenvorsorge thematisiert, die hinsichtlich der Beurteilung von Stromausfallfolgen und zur Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung von Relevanz sind.

Zunächst werden dabei auf die konzeptionellen Ansätze der Vulnerabilität und der Resilienz eingegangen, die in den letzten drei Dekaden erheblich an Popularität gewonnen haben. Mit ihnen werden regelmäßig die Begriffe der Bewältigungskapazität und der Kritikalität in Zusammenhang gebracht. Da diese Ansätze und Begriffe bei der Beurteilung von Stromausfallfolgen von Bedeutung sind, werden sie nachfolgend definiert und voneinander abgegrenzt. Für diese Begriffe haben sich in der Katastrophenvorsorge bisher keine Standarddefinitionen durchgesetzt, weshalb auch jeweils kein standardisiertes, vorherrschend verwendetes Verfahren zur Operationalisierung existiert. Vielmehr besteht eine Vielzahl individueller, kontextabhängiger und auf den Einzelfall ausgelegter Theorien, aus denen entsprechende Abweichungen und Variationen im Begriffsverständnis und in der Begriffsverwendung erwachsen. Im Nachfolgenden wird daher trotz der bestehenden definitorischen Heterogenität der weitestgehend einheitliche Verständniskonsens erläutert. Für tiefgreifende Auseinandersetzungen, die über die Zwecke der vorliegenden Arbeit hinausgehen, wird auf die angegebene weiterführende Literatur verwiesen.

Neben der Vulnerabilität und der Resilienz werden zwei weitere Theorien mit Bezügen zur Beurteilung von Stromausfallgefahren erörtert. Zum einen wird auf den in der energiewirtschaftlichen Forschung etablierten Value-of-Lost-Load eingegangen, mithilfe dessen monetäre Folgen einer Elektrizitätsunterbrechung analysiert werden. Zum anderen werden bestehende Interdependenzanalysen reflektiert, durch die die Ausfallwirkungen vernetzter Kritischer Infrastrukturen beurteilt werden. In beiden Fällen werden der Stand der Wissenschaft sowie die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Verwendung zur Entscheidungsunterstützung für das Krisenmanagement von Stromausfällen diskutiert.

## 5.1 Vulnerabilität

Konservative Risikobeurteilungsansätze beschränken sich häufig auf die Analyse der Wiederkehrwahrscheinlichkeit und der potentiellen Schäden eines Schadensereignisses. Diese konservative Herangehensweise der Risikoanalyse konzentriert sich ausschließlich auf den jeweiligen Gefahrencharakter. Mit der Jahrtausendwende wurde die Kritik stärker, dass durch die alleinige Aufmerksamkeit auf Eintrittswahrscheinlichkeiten und Ausmaße die Fähigkeiten Betroffener vernachlässigt werden (vgl. Wisner, Blaikie, Cannon und Davis, 2004). Betroffene würden hierdurch auf die Rolle der „hilflosen Opfer“ reduziert, ohne dass die verfügbaren Stärken und Ressourcen, die das Ausmaß und der Verlauf eines sich verwirklichenden Risikos wesentlich beeinflussen, ausreichend in der Risikobeurteilung berücksichtigt werden (vgl. Bohle, 2001; Gaillard, 2010).

Mit der Berücksichtigung der Fähigkeiten zur Bewältigung und zur Wiederherstellung findet eine ganzheitliche und zyklische Betrachtung des Risikos statt, die in systematischer Weise in der Katastrophenvorsorge erst mit dem Durchbruch der Vulnerabilitäts- und Resilienztheorien und entsprechender Rahmenwerke aufkam.

Mit der Bewältigungsfähigkeit werden die Fertigkeiten betrachtet, die darstellen, wie gut und wie lange Gefahren während der Akutphase ihres Wirkens abgewehrt werden können. Als Wiederherstellungsfähigkeit werden die Fertigkeiten bezeichnet, durch die eingetretene Schäden behoben werden. Bezieht sich die Vulnerabilität im Allgemeinen auf ein Schadensereignis und dessen Schadensträchtigkeit, liegt der Fokus in der Theorie der Resilienz auf den Fähigkeiten zur Bewältigung und Beherrschung bei Schadenseintritt (Moret, 2014).

In der Katastrophenvorsorge sind Vulnerabilitätsanalysen weit verbreitet. Sie beleuchten entweder (i) eine einzelne Gefahr- bzw. Gefahrenkomplexe (wie Erdbeben, Sturm, Hochwasser) oder zielen auf (ii) alle bestehenden Gefahren einer Bezugsregion ab (All-Gefahrenansatz). Vulnerabilitätsanalysen werden eingesetzt, um drohende Schäden abzuschätzen, Schwachstellen in der Vorbereitung und Bewältigung von Katastrophen zu identifizieren, die Fähigkeiten, Katastrophen zu beherrschen, zu beurteilen, Vergleiche anzustellen oder auf drohende Schäden aufmerksam zu machen (Frühwarnung). Sie sind zukunftsgerichtet, problemstrukturierend und werden als Werkzeuge einer vorausschauenden Risikosteuerung eingesetzt, durch die eine systematische, nachvollziehbare und objektive Auseinandersetzung mit Risiken möglich wird. Diese Zweckausrichtung entspricht prinzipiell den Anforderungen an die Gefahrenprognose (s. a. Kapitel 3.2, 4.5.3 und 4.8). In der Literatur finden sich mehrere Rezensionen, die Vulnerabilitätsanalysen in der Katastrophenvorsorge näher beleuchten (u. a. Friggens et al. 2013; Soares, Gagnon und Doherty, 2012; Jurgilevich et al. 2017; De Lange et al. 2010; Villagrán de León, 2006).

Je nach Analyseziel und theoretischem Konzept wird der Begriff der Vulnerabilität unterschiedlich definiert. Im Allgemeinen wird unter Vulnerabilität eine nicht direkt messbare oder beobachtbare, inhärente Eigenschaft eines Untersuchungsgegenstandes verstanden (u. a. Moss et al., 2001; Patt et al., 2008; Thywissen, 2006; Cardona, 1999; Birkmann und Wisner, 2006). Je nach Auslegung finden sich auch Ansätze, die die Vulnerabilität als ein Teil des Risikos ansehen (u. a. Jurgilevich et al. 2017). Tiefgreifende Auseinandersetzungen mit dem Vulnerabilitätsbegriff finden sich u. a. bei Turner et al. (2003), Bogardi (2004), Brooks (2003), Gaillard (2010), Few (2003), Thywissen (2006), Manyena (2006) und Hufschmidt (2011), Moret (2014), Giupponi and Biscaro (2015), McDowell et al. (2016), Räsänen et al. (2016) und Jurgilevich et al. (2017). Weitläufig findet sich der Ansatz, Vulnerabilität als ein Maß zu verstehen, das angibt, wie stark ein Untersuchungsgegenstand unter den nachteiligen Folgen eines einwirkenden Ereignisses leidet (u. a. Thywissen, 2006; Cardona, 1999; Birkmann und Wisner, 2006). Untersuchungsgegenstände leiten sich aus der Zielsetzung der jeweiligen Analyse ab und stellen einzelne Objekte, Teilsysteme oder Systeme dar.

Zur Operationalisierung der Vulnerabilität werden in Abhängigkeit vom angewendeten theoretischen Konzept, dem spezifischen Anwendungskontext, der wissenschaftlichen Disziplin, der betrachteten Gefahr und dem Analyseziel verschiedene Dimensionen der Vulnerabilität betrachtet. In der Literatur lassen sich unterschiedliche Variationen finden, wie diese Dimensionen zur Messung der Vulnerabilität kombiniert und ausgelegt werden. Häufig finden sich die Dimensionen der Exposition, der Gefahrwirkung, der Kritikalität bzw. Sensitivität oder Sensibilität, Anfälligkeit oder Empfänglichkeit sowie der Bewältigungs- bzw. Anpassungskapazität (u. a. Birkmann, 2006; Villagrán de León, 2006; Smit et al. 1999). Im Allgemeinen kennzeichnet die Exposition („exposition“) wie stark ein schutzwürdiges Objekt einer Gefahr ausgesetzt ist. Die Gefahrwirkung („threats“) bildet die Intensität des Gefahrenereignisses ab. Mit der Kritikalität („criticality“) bzw. Sensitivität („sensitivity“), Anfälligkeit („fragility“) oder Empfänglichkeit („susceptibility“) werden Systemeigenschaften gekennzeichnet, die den Grad des negativen Einflusses auf den Untersuchungsgegenstand aufgrund einer Gefahrenexposition beschreiben. Je nach theoretischer

Einbettung und Verknüpfungen variieren die jeweiligen Definitionen. Teilweise finden sich auch synonyme Verwendungen. Differenzierte Auseinandersetzungen zur Verwendung dieser Begriffe finden sich u. a. bei Nassopoulos et al. (2015), Bosetti, Ivanovic und Munshey (2016), Katina et al. (2014) oder Füssel (2009). Basierend auf deren Ausführungen könnte ein weit gefasster Definitionsansatz für diese Begriffe lauten, dass sie die Veranlagung eines Systems, unter einer bestimmten Wirkung einen Schaden zu leiden, darstellen.

Da die Kritikalität und die Bewältigungskapazität in der anvisierten Entscheidungsunterstützung einer besonderen Aufmerksamkeit zuteilwird, werden bestehende Definitionsansätze in den nachfolgenden Abschnitten 5.3 und 5.4 gesondert betrachtet.

Um anhand der Messergebnisse der gewählten Dimensionen einen Vulnerabilitätswert zu berechnen, finden sich in der Literatur häufig indikatorenbasierte Ansätze. Die Berechnung der Vulnerabilität anhand von Indikatoren bietet ein prozessorientiertes, systematisches und quantitatives Vorgehen, was problemstrukturierend, komplexitätsreduzierend und transparentschaffend wirkt. Durch Indikatoren und ihren methodischen Verknüpfungen in Form von Aggregationen in Indikatorrahmenwerken, -modellen oder -systemen (sogenannte zusammengesetzte Indikatoren, Indizes) werden offensichtliche und objektiv messbare Tatsachen genutzt, um in indirekter Weise auf Sachverhalte der Vulnerabilität zu schließen (u. a. Merz, 2011; Birkmann, 2006; Kasperson, Kasperson und Turner, 1995; Brooks, 2003; Adger, 2006). Neben der Vulnerabilitätsanalyse kommen Indikatoren stellenweise auch für die Operationalisierung von Risiken, Kritikalität und Resilienz eines Betrachtungsgegenstandes zum Einsatz.

Rezensionen über bestehende Vulnerabilitätsanalysen finden sich u. a. bei Moret (2014), Beccari (2016), Birkmann (2007), Hufschmidt (2011), Nardo et al. (2005), Ellis (2014), Power et al. (2015) und Contrera und Kienberger (2011). Die Rezensionen zeigen, dass Kritische Infrastrukturen zwar im Sinne der lebensnotwendigen Versorgung der Bevölkerung als Teilaspekte weiterführender Vulnerabilitätsbetrachtungen berücksichtigt werden, eine ausschließliche und differenzierte Betrachtung stromausfallbedingter Gefahren existiert jedoch bisher nicht. Trotz der Vielzahl existierender Vulnerabilitätsanalysen und -rahmenwerke existiert bisher kein geeigneter Ansatz, dessen Ergebnisse die Anforderungen an einer Gefahrenprognose hinsichtlich der Orientierung an Schutzpflichten und der geeigneten raum-zeitlichen Auflösung in diesem Zusammenhang erfüllt.

Empfehlungen, wie Indikatoren und Indikatorensysteme zu entwickeln und zu nutzen sind, finden sich u. a. bei Nardo et al. (2008), Contrera und Kienberger (2011), Fritzsche, et al. 2014, Viavattene et al. 2015 und USAID (2014). Demnach ist bei der Entwicklung insbesondere auf

- die Wahl geeigneter Indikatoren,
- die Wahl der methodischen Verknüpfung,
- die Einbindung der Endnutzer,
- die Berücksichtigung von Unsicherheiten und
- die Validierung

zu achten. Die Indikatoren sind so zu wählen, dass sie dem Analysezweck entsprechen und sie auf die zu analysierende Tatsache nachweisbar und reproduzierbar hindeuten. Ein wiederkehrender Mangel findet sich darin, dass der Rückschluss auf die zu analysierende Tatsache nicht hinreichend direkt möglich ist.

Daher ist stets kritisch zu hinterfragen, inwieweit ein Indikator Aufschluss über welchen Einfluss gibt. Die Anzahl der Indikatoren eines Indikatorensystems ist daher weniger entscheidend als die qualitative und zuverlässige Aussagekraft der gewählten Indikatoren. Eine höhere Anzahl von Indikatoren führt regelmäßig zu keinem relevanten gesteigerten Verständnisgewinn. Gleiches gilt für die Aussagezuverlässigkeit. Zu beachten ist auch, dass die zur Operationalisierung notwendigen Daten mit verhältnismäßigem Aufwand zu ermitteln sein müssen. Die USAID (2013) empfiehlt daher, die Wahl der Indikatoren nach Zuverlässigkeit, Durchführbarkeit und Praktikabilität vorzunehmen.

Eine methodische Verknüpfung einzelner Indikatoren zu einem Indikatorensystem erfolgt in der Regel durch eine Aggregation. Der Mehrwert von Aggregationen gegenüber der Verwendung einzelner Indikatoren zur Entscheidungsunterstützung wird kontrovers diskutiert (u. a. Doorn, 2017; Beccari et al., 2016; Saltelli, 2007; Nardo et al. 2008; Saisana, Saltelli und Tarantola, 2005). Es existiert eine Vielzahl von Aggregationsvarianten, die im Einzelnen je nach Umsetzung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Regelmäßig erfolgt die methodische Verknüpfung bzw. die Aggregation unter Verwendung multikriterieller Methoden.

Durch eine Aggregation können im Ergebnis teilweise wichtige Informationen der einzelnen Indikatoren verloren gehen, weshalb in bestimmten Fällen die Darstellung einzelner Indikatorenwerte einen höheren Mehrwert in der Entscheidungsunterstützung bieten kann. Gerade in der Aggregation ergibt sich jedoch auch der Vorteil, dass absolute Werte für bestimmte Sachverhalte nicht zwingend vorliegen müssen. Soweit die Berechnungen konsistent sind, die Aggregation ihrem Zweck dient und die Ergebniserstellung auf die Akzeptanz der Entscheidungsträger trifft, erscheint eine Aggregation von Indikatorenwerten gerechtfertigt (Doorn, 2017; Saltelli, 2007).

Indikatorenbasierte Analysen sind so zu gestalten, dass Entscheidungsträger sie zweckentsprechend nutzen können. Zweckdienlich kann es sein, dass Nutzer eigene Präferenzen und Bewertungen in die Analyse einfließen lassen oder dass eigene Datensätze berücksichtigt werden. Wichtige Ziele hinsichtlich der Einbindung der Endnutzer sind das Ergebnisverständnis und die Akzeptanz der Ergebnisse. Um beides zu erreichen, sind die Analysen nachvollziehbar und deren Ergebnisse interpretierbar zu gestalten. Zu komplizierte, intransparente und kaum reproduzierbare methodische Verknüpfungen sowie eine zu hohe Anzahl an Indikatoren sind zu vermeiden.

In einer Reihe von Indikatorensystemen fehlen Sensitivitäts- oder Unsicherheitsanalysen, wodurch mit dem Ergebnis eine nicht vorhandene Genauigkeit und Gewissheit suggeriert wird (vgl. Beccari, 2016). Mit der Verdeutlichung und der Diskussion von Ergebnisabweichungen findet durch Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen eine wesentliche Entscheidungsunterstützung hinsichtlich potentieller Ergebnisabweichungen statt.

## 5.2 Resilienz

In den vergangenen zwei Dekaden hat sich die Resilienz-Theorie zu einem fest etablierten Konzept in der Katastrophenvorsorge entwickelt. In der Literatur finden sich vielzählige Ansätze und Rezensionen über den Begriff der Resilienz in der Katastrophenvorsorge (u. a. Meerow et al. 2016; Leichenko, 2011; Chelleri, 2012; Bhamra et al. 2011; Gilbert, 2010; Hosseini, Barker und Ramirez-Marquez, 2016; Kuhlicke, 2013; Zhou et al. 2009; Walker et al. 2006; CARRI, 2013; Patel et al. 2017; Omer, 2013; Vollmer et al. 2016;

Nassopoulos et al. 2015), deren Auslegung sich nicht nur im Verständnis, sondern auch in deren konzeptionellen Bedeutung unterscheiden. Teilweise werden Vulnerabilitäts- und Resilienztheorien getrennt voneinander betrachtet oder auch miteinander verknüpft (u. a. Manyena, 2006; Doorn, 2017).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Begriffe der (i) urbanen Resilienz („urban resilience“) und der (ii) gesellschaftlichen Resilienz („community resilience“) von Bedeutung.

Eine universelle und flexibel anzuwendende Definition des Begriffs urbaner Resilienz findet sich bei Meerow et al. (2016), die darunter eine Fähigkeit eines urbanen Systems verstehen, eine gewünschte Funktion während einer Störung zu erhalten oder wiederherzustellen sowie sich an einer Störung anzupassen und hinsichtlich zukünftiger Störeinflüsse angemessen zu verändern und fortzuentwickeln.

Eine in der Praxis vorherrschend verwendete Definition gesellschaftlicher Resilienz findet sich im Kontext der Hyogo und Sendai Rahmenwerke der Vereinten Nationen (UN) zur Reduzierung von Katastrophenrisiken. Die UN versteht unter gesellschaftlicher Resilienz die Fähigkeit, negativen Einwirkungen zu widerstehen (Widerstandsfähigkeit), sie zu absorbieren und sich daran zeitgerecht und wirkungsvoll anzupassen und davon zu erholen, insbesondere durch die Erhaltung und Wiederherstellung von essentiellen Grundstrukturen und Funktionen (vgl. UNISDR, 2009).

Als eines der strategischen Ziele wird im aktuellen UNISDR-Sendai-Rahmenwerk zur Katastrophenreduzierung die Reduzierung von Ausfällen essentieller Grundstrukturen und Funktionen sowie die Stärkung der gesellschaftlichen Resilienz in Anbetracht derartiger Ausfälle herausgestellt (vgl. UNISDR, 2015). Um dies zu erreichen, werden u. a. ein verbessertes Verständnis der Katastrophengefahren (Priority 1) und eine Stärkung der Katastrophenvorsorgesteuerung propagiert (Priority 2). Diese Ziele werden auch in dieser Arbeit anvisiert.

Als wesentliche Treiber der gesellschaftlichen Resilienz stellen sich nach Patel et al. 2017 in der bestehenden Literatur

- das Nutzen von lokalem Wissen,
- das Nutzen von gesellschaftlichen Netzwerken und Beziehungen,
- eine geeignete Governance,
- ausreichend Ressourcen und Investitionen,
- eine adäquate Vorbereitung und
- die mentale Einstellung

dar. Demnach ist der Umgang einer Gesellschaft mit Risiken wesentlich abhängig davon, wie sie lokales Wissen nutzt. Diese Fähigkeit kann gestärkt werden durch Faktenwissen, Training und Bildung sowie die Wirkungskraft kollektiver Durchsetzungsmacht („empowerment“). Durch eine effektive Risiko- und Krisenkommunikation kann innerhalb bestehender Netzwerke und Beziehungen ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um Risiken besser zu artikulieren, wahrzunehmen und zu verstehen. Wiederkehrend wird dabei dem Gesundheitswesen eine besondere Rolle zugetragen, da es in Katastrophen an damit zusammenhängenden medizinischen, pflegerischen und präventiven Fähigkeiten oft mangelt und es schwierig ist, derartige Leistungen zu ersetzen. Geeignete Governance-Ansätze zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass die Rollen gerade auf lokaler Ebene klar geregelt sind und hierdurch nach einem Schadenseintritt

kurz- und mittelfristig eine faire Verteilung von Ressourcen und langfristige Investitionen sichergestellt werden. Auch der mentalen Einstellung wird eine wesentliche Bedeutung gesellschaftlicher Resilienz beigemessen.

Um die Resilienz eines Systems quantitativ zu analysieren, wird sie häufig von einer Zeitfunktion, die den Zustand des betrachteten Systems beschreibt, operationalisiert (vgl. Perales, 2016; Adams, Bekkem, Toledo-Durán, 2012; Sahebjamniaa, Torabia und Mansourib, 2015; Yodo und Wang, 2016; Duan et al. 2016). Für die Zeitfunktion finden sich verschiedene Bezugseigenschaften, die die Maße des Systemstatus' darstellen wie u. a. als Performanz (u. a. Perales, 2016; Moteff, 2012), Qualität der Infrastruktur (u. a. Bruneau et al. 2003), Kapazität (u. a. Todorovic et al. 2017) oder Funktionsniveau bzw. Funktionalität (u. a. Caverzan und Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010) eines betrachteten Systems.

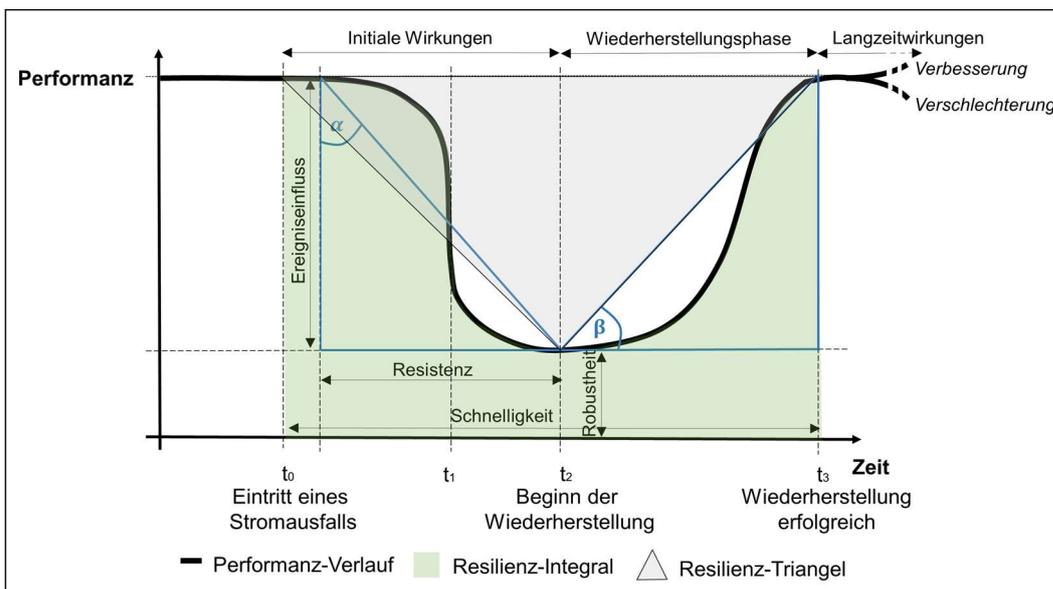


Abbildung 5.1: Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Resilienz samt Resilienz-Integral und Resilienz-Triangel.

Von dieser Funktion ausgehend finden sich vielfältige Ansätze, Eigenschaften der Resilienz abzuleiten. Häufig werden hierbei der Ereigniseinfluss, die Resistenz, die Schnelligkeit, die Robustheit sowie die Dauer der initialen Wirkungen und der Wiederherstellungsdauer genannt (Abbildung 5.1). Die Bezeichnung und deren Deutung weichen je nach Autor von der abgebildeten Darstellung ab.

Das in Abbildung 5.1 grau gezeichnete Dreieck bildet mit den zeitpunktabhängigen Werten des Performanz-Verlaufes  $Course(t)$  zum Ereigniseintritt  $t_0$ , Beginn der Wiederherstellung  $t_2$ , und der erfolgreichen Wiederherstellung  $t_3$ , eine Fläche, welche nach Bruneau et al. (2003) weitläufig als Resilienz-Triangel bezeichnet wird (u. a. Adams, Bekkem und Toledo-Durán, 2012; Yodo und Wang, 2016; Duan et al. 2016). Bei Bruneau et al. (2003) findet sich der Ansatz, die *Resilience* anhand des Integrals unterhalb des Performanz-Verlaufes  $Course(t)$  im Integrationsbereich vom Beginn des Schadenseintritts  $t_0$  bis zur erfolgreichen Wiederherstellung  $t_3$  zu operationalisieren:

$$Resilience = \int_{t_0}^{t_3} [100 - Course(t)] dt \quad (5-1)$$

Diese Variante ist insbesondere bei der Resilienzbewertung von Infrastrukturausfällen verbreitet (u. a. Zobel und Khansa, 2014; Pant, Barker und Zobel, 2014; Platt, Hughes und Brown, 2015; Adams, Bekkem, Toledo-Durán, 2012; Sahebjamniaa, Torabia und Mansourib, 2015; Yodo und Wang, 2016; Duan, Wu, Dong und Zhang, 2016; Zobel and Khansa, 2014; Pant, Barker, and Zobel, 2014).

Anhand des sich veränderten Systemzustandes und dessen Verlaufes lässt sich auch ein Zusammenhang zwischen der Resilienz und der Vulnerabilität herstellen. Hierbei ist die Vulnerabilität eines Systems als abhängig vom Systemstatus zu verstehen. Da der Systemstatus zeitlich variiert, verändert sich auch die Vulnerabilität über die Zeit. Daher lässt sich das Resilienz-Integral nicht nur anhand des zeitlichen Verlaufes des Systemstatus, sondern auch beim Verlauf der temporalen Vulnerabilität zeigen (Abbildung 5.2).

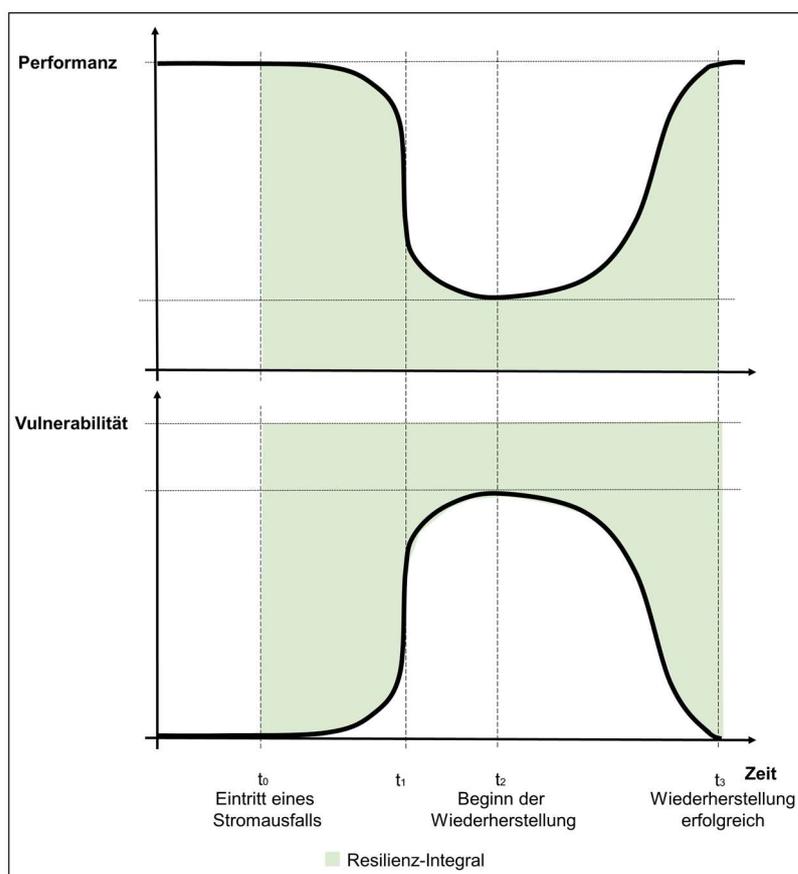


Abbildung 5.2: Zusammenhang zwischen Resilienz und Vulnerabilität bei zeitlicher Variabilität des Systemzustandes.

Zwischen der Operationalisierung der Resilienz anhand des Verlaufes des Systemzustandes und der Bestimmung von Kenngrößen innerhalb des betrieblichen Kontinuitätsmanagement gem. ISO 22300f finden sich Parallelen. Neben den Anforderungen an das Kontinuitätsmanagement beschreiben die ISO 22300f auch relevante Kennzahlen für Geschäftsprozesse, die im Rahmen einer Geschäftsauswirkungsanalyse („business impact analysis“) zu erheben sind. Die Kenngrößen

- der maximal tolerierbaren Ausfallzeit („Maximum Tolerable Period of Disruption“, MTPD) bzw.
- der maximal akzeptierbaren Ausfalldauer („Maximum Acceptable Outage“, MAO),

- die Wiederanlaufzeit ('Recovery Time Objective', RTO) und
- die Mindestzielsetzung für die Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit ('Minimum Business Continuity Objective', MBCO)

beziehen sich auf den zeitlichen Verlauf eines unterbrochenen Geschäftsprozesses (vgl. u. a. Müller, 2015; Königs, 2013). Die Kennzahlen werden in der ISO 22301:2012 definiert. Innerhalb der ISO 22301:2012 wird die MTPD die Dauer definiert, bis zu dem ein Geschäftsprozess ausfallen darf, ohne dass ein Unternehmen inakzeptable Verluste erleidet. Synonym zum MTPD findet sich der Begriff der MAO. Beides stellen eine Zielgröße dar, bis wann eine Wiederherstellung abgeschlossen sein muss. Die RTO gibt an, bis wann die Geschäftstätigkeit planmäßig wieder aufgenommen werden soll. Diese Dauer liegt unterhalb des MTPD bzw. des MAO. Die MBCO beschreibt die Dienstleistungen und Produkte, die während einer Unterbrechung mindestens erforderlich sind, um definierte Geschäftsziele zu erreichen (vgl. ISO 22301:2012), und bildet damit eine Analogie zum Mindestversorgungskonzept (vgl. Abschnitt 4.7). Die Kontinuitätskenngrößen lassen sich in einem Performanz-Verlauf während einer Unterbrechung darstellen (Abbildung 5.3). Der in Abbildung 5.3 dargestellte Verlauf symbolisiert den annehmbar schwerwiegendsten, jedoch im Hinblick auf die festgelegten betrieblichen Kontinuitätskenngrößen noch akzeptablen Verlauf einer Unterbrechung.

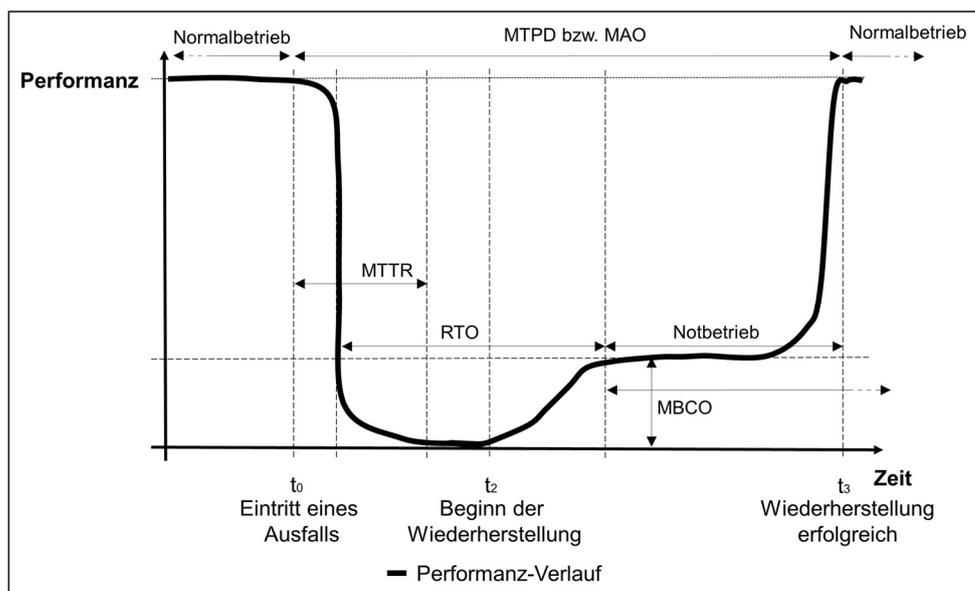


Abbildung 5.3: Darstellung von Kontinuitätskenngrößen im Performanz-Verlauf während einer Unterbrechung.

Aus der Instandsetzung und Wartung sind weitere Zuverlässigkeitskenngrößen von Produkten, Systemen und Anlagen bekannt (vgl. u. a. Birolini, 1997). Die Kenngrößen beziehen sich jedoch generell auf Zustände unter einer normalen Inanspruchnahme und nicht auf Krisenereignisse. Wenn auch nur mit geringer Bedeutung für die Katastrophenvorsorge ist die Kenngröße der mittleren Reparaturdauer („Mean Time To Repair“, MTTR) für das betriebliche Kontinuitätsmanagement von Interesse. Die MTTR gibt die durchschnittliche empirische Dauer an, bis ein Produkt, ein System oder eine Anlage nach einer Störung wieder betriebsbereit ist (vgl. u. a. Müller, 2015; Königs, 2013). Idealerweise sollte sie weit unterhalb der MTPD bzw. der MAO liegen.

## 5.3 Kritikalität

Im Rahmen des betrieblichen Kontinuitätsmanagements wird ‚kritisch‘ in der ISO 22300:2016 definiert als „von wesentlicher Bedeutung hinsichtlich der Zielsetzungen oder Ergebnisse“. Der Begriff Kritikalität wird in der ISO 18788:2015 im Rahmen der Kritikalitätsanalyse bestimmt. In diesem Zusammenhang wird Kritikalität als ein Maß verstanden, das einerseits die Bedeutung eines Guts einer Organisation für ihre Mission oder Funktion bzw. für die Menschen, die von einem Risiko ausgesetzt sind, abbildet. Andererseits kann es als Maß dienen für den Einfluss eines unerwünschten oder zerstörerischen Ereignisses, das Einfluss nimmt auf die organisatorische Fähigkeit bestehende Erwartungen zu befriedigen.

Im Kontext der informationstechnischen Sicherheit wird die Kritikalität für Geschäftsprozesse bestimmt, um den Wiederanlauf nach einem Schadensereignis zu planen (u. a. BSI, 2008). Die Geschäftsprozesse werden dabei anhand ihrer Kritikalität kategorisiert und dadurch für den Wiederanlauf priorisiert. Die Einordnung in Kritikalitätskategorien leitet sich u. a. anhand der Anforderungen zum Wiederanlauf oder der Ausfalldauer des zu erwartenden Schadens her. Die Kritikalität von Geschäftsprozessen dient dabei als skalierbares Maß, um die Bedeutung eines Geschäftsprozesses für die Wertschöpfung einer Institution festzulegen und im Schadensfall die zur Verfügung stehenden Ressourcen entsprechend der Priorisierung zu verteilen (ebd.).

Im Bevölkerungsschutz und beim Schutz Kritischer Infrastrukturen wird der Begriff der Kritikalität als Eigenschaft von Kritischen Infrastrukturen verstanden, anhand derer die Bedeutsamkeit bzw. die Relevanz für ein System beschrieben wird. Vorherrschend wird dabei in der Literatur die Kritikalität als Auswahlattribut für den Zweck der Identifizierung von Kritischen Infrastrukturen diskutiert (u. a. Rome et al. 2015; Di Mauro et al. 2010; Riedman, 2016). Hierdurch kann zwischen unbedeutenden und bedeutenden Einrichtungen unterschieden werden, womit sich die Anzahl der in der Katastrophenvorsorge zu berücksichtigenden KRITIS-Einrichtungen reduziert (Riedman, 2016).

Wie auch in der informationstechnischen Sicherheit wird in der entscheidungspraktischen Auslegung die Kritikalität auch als Einstufungsattribut zur Priorisierung von Kritischen Infrastrukturen verstanden (u. a. Theoharidou, Kotzanikolaou und Gritzalis, 2009; Fekete, 2011; Katina und Hester, 2013; Giovinazzi et al. 2016; Riegel, 2015a und b), was der effektiven Verteilung beschränkter Ressourcen dient (vgl. Katina und Hester, 2013). Grundannahme dieses Ansatzes ist, dass die Relevanz der einzelnen Kritischen Infrastrukturen bzw. der KRITIS-Sektoren nicht als gleich zu bewerten ist (vgl. Deutscher Bundestag, 2011a, 2013a und b). Gerade deshalb bedarf es einer systematischen Betrachtung Kritischer Infrastrukturen, an der es nach wie vor mangelt (Katina und Hester, 2013; Birkmann et al. 2016).

Auch in den nationalen Programmen zum Schutz Kritischer Infrastrukturen findet sich das Verständnis wieder, dass Kritikalität der Priorisierung von Kritischen Infrastrukturen dient. In der Schweiz wird die Kritikalität definiert als ein Maß für die relative Bedeutung eines Versorgungssektors „bezüglich Bevölkerung, Wirtschaft und Abhängigkeiten“ (BABS, 2015). Ähnlich lautet auch die in den deutschen Programmen verwendete Definition, nach der die Kritikalität ein relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen ist, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat (u. a. Geier, 2006; BMI, 2009; Lenz, 2009; Riegel, 2007).

In der Literatur finden sich bisher nur Ansätze, die die Festlegung und Messung der Kritikalität zur Priorisierung von zumeist Sektoren Kritischer Infrastrukturen beleuchten. So leiten Theoharidou, Kotzanikolaou und Gritzalis (2009) aus ausgewählten nationalen Programmen zum Schutz Kritischer Infrastruktur so genannte Kritikalitätsfaktoren ab. Die Kritikalität einer Kritischen Infrastruktur ist demnach festzumachen an (i) der potentiellen räumlichen Reichweite der Auswirkungen eines Versorgungsausfalls, (ii) der Stärke der Ausfallkonsequenzen (Schweregrad, Intensität oder Magnitude) und (iii) den zeitabhängigen Auswirkungen. Theoharidou, Kotzanikolaou und Gritzalis (2009) stellen darüber hinaus eine Kritikalitätsanalyse vor, die auf einen gesellschaftsorientierten Risikoanalyseprozess basiert und zur Bewertung überregionaler Infrastruktursysteme anzuwenden ist.

Die Kritikalität einer Kritischen Infrastruktur ist nach Fekete (2011) im Wesentlichen festzumachen anhand von Größenverhältnissen, des Zeitkontextes und der Qualität. Eine konkrete Methodik zur Festlegung wird nicht benannt. Katina und Hester (2013) diskutieren eine Reihe von Arbeiten, die Kriterien für sektorspezifische Kritikalität betrachten. Aus diesen leiten sie 40 generische, übergeordnete Kritikalitätskriterien her, die sich in das Quadrupel des Levels der Resilienz, Levels der Interdependenz, Levels der Dependenz und der Infrastrukturrisiken kategorisieren lassen. Giovinazzi et al. (2016) schlagen eine umfangreiche Methodik zur Bemessung der Kritikalität von Sektoren vor. Diese beruht auf der Messung der Infrastrukturabhängigkeiten und einer Funktion, die hinsichtlich der Ausfalldauer und Infrastrukturelevanz den Einfluss auf die Organisation darstellt. Riegel (2015a und b) beleuchtet die räumliche Kritikalität einer Region für die Zwecke der Raumplanung, die anhand der Dichte von KRITIS-Einrichtungen und ihrer übersektoralen und akkumulierten Relevanz abgeleitet wird.

### 5.4 Bewältigungskapazität

In einer Vielzahl von Vulnerabilitäts- und Resilienztheorien wird ein Maß für die Bewältigungskapazität in die Funktion der Resilienz oder der Vulnerabilität integriert. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsfelder unterscheiden sich die Begriffsdefinitionen für die Bewältigungskapazität auch in diesem Fall. Im Gegensatz zum vorherrschenden Verständnis in den Wirtschaftswissenschaften, in der die Kapazität als ein Merkmal des maximal möglichen Nutzungspotentials für eine Bezugsperiode betrachtet wird (vgl. Alisch, Winter und Arentzen, 2005), wird die Bewältigungskapazität in den Geo-, Risiko- und Ingenieurwissenschaften mit den Fähigkeiten und den Ressourcen des jeweiligen Untersuchungsgegenstandes assoziiert.

Im ingenieurwissenschaftlichen Kontext ist die Bewältigungskapazität definiert in der ISO 18788:2015 als die verfügbare Stärke und die Ressourcen einer Organisation oder Gemeinschaft, durch die das Risiko oder die Wirkungen von Krisen reduziert werden. Unter Kapazität werden alle physikalischen, institutionellen, sozialen und wirtschaftlichen Mittel als auch Qualifikationen und persönliche Eigenschaften wie Koordination- und Führungsfähigkeit zusammengefasst.

Die in diesem Kontext vorherrschend in der Literatur auffindbare Definition der Bewältigungskapazität hat ihren Ursprung innerhalb der UN. Die UN definiert die Bewältigungskapazität als eine Fähigkeit von Menschen, Organisationen oder Systemen, verfügbare Fertigkeiten und Ressourcen zur Beherrschung von Krisen und Katastrophen einzusetzen (UNISDR, 2009). Dies erfordert kontinuierliche Sensibilität, Ressourcen und effektives Management (ebd.).

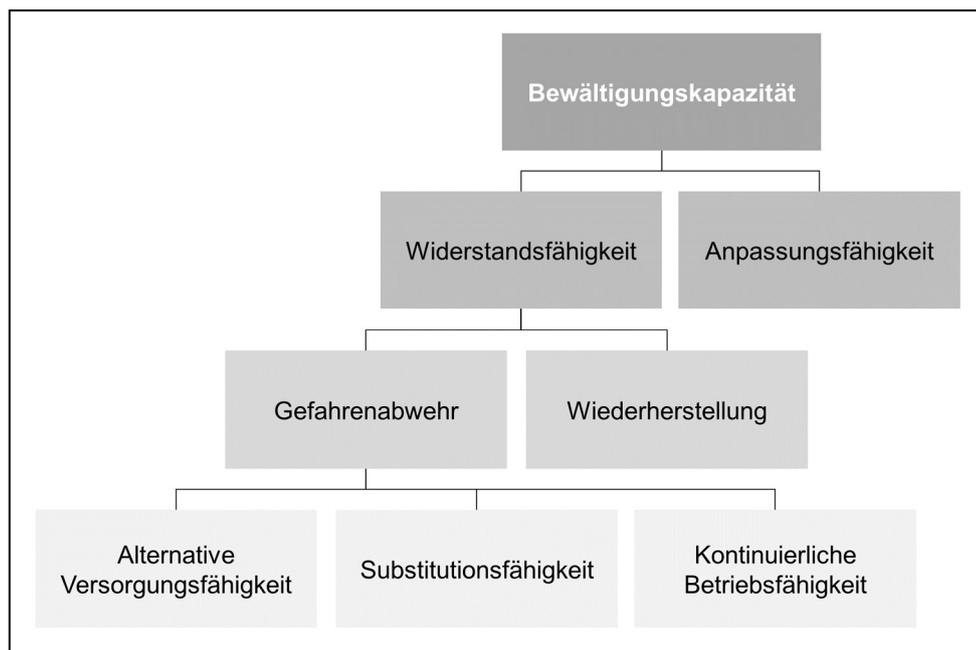


Abbildung 5.4: Zusammensetzung des Begriffs Bewältigungskapazität.

In der Anwendung dieses Verständnisses der Bewältigungskapazität ist hinsichtlich des zeitlichen Analysehorizonts zwischen der Widerstandsfähigkeit („resistance capacity“) und der Anpassungsfähigkeit („adaptive capacity“) zu differenzieren. Die Widerstandsfähigkeit zielt auf die Akutphase eines Schadensereignisses ab. Saldaña-Zorrilla (2007) versteht darunter ex-post-Aktivitäten, mit denen auf zu erwartende Gefahren zeitnah reagiert und somit die negativen Wirkungen eines stattfindenden Schadensereignisses reduziert werden können. Die Anpassungsfähigkeit hingegen zielt auf eine strategische Entwicklung im Sinne eines langwierigen Wandlungsprozesses ab (u. a. Cardona et al. 2012). Saldaña-Zorrilla (2007) versteht darunter ex-ante-Aktivitäten, durch die ein System über eine lange Dauer so transformiert wird, dass es besser zukünftige und potentielle Gefahren antizipieren und überstehen kann. Dabei erfolgt eine Anpassung an langfristige Änderungen der System- und Rahmenbedingungen (z. B. Klimawandel, Bevölkerungsanstieg, Migrationsentwicklung, demografischer Wandel, Landnutzungsänderungen, Technikentwicklung etc.), durch die sich über einen langen Zeitraum aktuelle Gefahren auslöchen oder verstärken sowie neuartige Gefahren entstehen oder Gefahren an Bedeutung gewinnen bzw. verlieren können. Durch die unterschiedlichen zeitlichen Analysehorizonte werden in der englischsprachigen Literatur zunehmend weitere Differenzierungen in „coping capacity“ bzw. ‘capacity to absorb’ (Cutter und Finch, 2008) oder auch „adaptive capacity“ bzw. „capacity to change and adjust“ (Nelson and Finan, 2009) vorgenommen (Cardona et al. 2012).

Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit werden in der Regel als getrennte Dimensionen betrachtet, zwischen denen kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. So ist z. B. eine geringe Widerstandsfähigkeit nicht gleichbedeutend für eine geringe Anpassungsfähigkeit (vgl. Cardona et al. 2012; Alwang, Siegel und Jorgensen, 2001). Eine Widerstandsfähigkeit kann langfristig verloren gehen, unwirksam werden oder bei entsprechender Anpassungsfähigkeit langfristig gefahrenadäquat auf- oder abgebaut werden. In den weit verbreiteten Rahmenwerken zur Vulnerabilitätsanalyse wie Lavell et al. (2012), Birkmann et al. (2010), Nelson und Finan (2009) oder Cutter und Finch (2008) werden Widerstandsfähigkeit und Anpas-

sungsfähigkeit zusammengefasst als Bewältigungskapazität. In anderen Theorien wird die Widerstandsfähigkeit jedoch auch als ein Teil der Anpassungsfähigkeit verstanden (vgl. Cardona et al., 2012). Je nach Kontext und Zielstellung existieren auch Analyseverfahren, die allein die Widerstandsfähigkeit (u. a. Lenz, 2009; BBK, 2012) oder nur die Anpassungsfähigkeit (u. a. Balica, Wright und van der Meulen, 2012) betrachten.

Je nach Risikobeurteilung kann die Widerstandsfähigkeit differenziert werden in die Fähigkeiten der Gefahrenabwehr in der Akutphase eines andauernden Schadensereignisses und der Fähigkeit zur Wiederherstellung des Normalzustandes, nachdem ein Schadensereignis beendet ist. So fassen z. B. sowohl Lenz (2009) als auch das BBK (BBK, 2012) alle Fähigkeiten zur Gefahrenabwehr und zur Wiederherstellung im Begriff der Bewältigungskapazität zusammen. Konkret versteht Lenz (2009) unter dem Begriff der Bewältigungskapazität „alle Maßnahmen und Ressourcen, die vor, während und nach Eintritt eines Ereignisses ergriffen werden können, um negative Auswirkungen zu begrenzen und den Normalzustand wiederherzustellen“ (Lenz, 2009). Das BBK definiert Bewältigungskapazität als ein „Maß für die Fähigkeit, den durch eine Gefahr drohenden Schaden im Falle eines Ereignisses durch Maßnahmen und Ressourcen zu minimieren bzw. zu beheben“ (BBK, 2012). In beiden Definitionen wird das Verständnis der Anpassungsfähigkeit nicht adressiert und allein auf die Widerstandsfähigkeit abgestellt. In der bereits erwähnten vorherrschend verwendeten Definition der Bewältigungskapazität der UN wird nicht eindeutig zwischen den Fähigkeiten zur Gefahrenabwehr und zur Wiederherstellung unterschieden. In einigen Risikobeurteilungen bleibt die Wiederherstellungsfähigkeit auch gänzlich unberücksichtigt. So verstehen das Bündnis Entwicklung Hilft und die Universität der Vereinten Nationen (UNU-EHS) im Rahmen des WeltRisikoIndex unter der Bewältigungskapazität alle Maßnahmen und Fähigkeiten, „die unmittelbar während eines Ereignisses zur Schadensreduzierung zur Verfügung stehen“ (Bündnis Entwicklung Hilft und United Nations University, 2015) und mit der die direkten negativen Wirkungen minimiert werden.

Im Zusammenhang mit der Anpassungsfähigkeit ist auch die seit langem in der Klimaanpassungsforschung diskutierte Bewältigungsbandbreite („coping range“) zu nennen (vgl. Hewitt und Burton, 1971; Yohe und Tol, 2002; Willows und Connell, 2003). Die Bewältigungsbandbreite bezieht sich auf die unterschiedlich stark ausfallenden jährlichen Folgen des Klimawandels für ein betrachtetes System. So lange sich die Intensität der Folgen in der Bewältigungsbandbreite befinden, können diese beherrscht bzw. toleriert werden. Liegen die Folgen oberhalb der Bewältigungsbreite, sind die Folgen nicht länger beherrschbar und es kommt zu Schäden. Die Anpassungsfähigkeit an derartigen langfristigen Änderungen wird stellenweise ebenfalls als Resilienz bezeichnet.

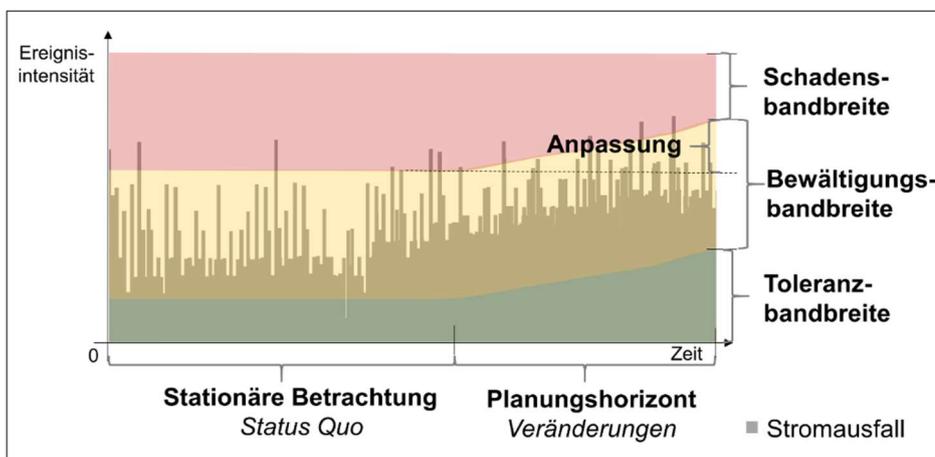


Abbildung 5.5: Bewältigungsbandbreite bei stationärer Betrachtung und in Anbetracht des Planungshorizonts.

Diese Betrachtungsweise lässt sich auch auf die Bewältigung und Toleranz von Stromausfallintensitäten übertragen. Die Abbildung 5.5 zeigt die Intensität unterschiedlicher Stromausfälle im Laufe eines Untersuchungszeitraumes. Innerhalb des Zeitraums ändert sich die Bewältigungsbandbreite im Laufe des Planungshorizonts. Anhand der Änderungen der Bewältigungsbandbreite zur stationären Betrachtung sind Anpassungen der Toleranz-, Bewältigungs- und Schadensbandbreite zu erkennen.

## 5.5 Value-of-Lost-Load

Eine verbreitete Herangehensweise zur Abschätzung von Stromausfallfolgen ist die Berechnung der Kosten für eine nicht bediente aber benötigte, Netzlast, was in der englischsprachigen Literatur als der so genannte ‚Value of Lost Load‘ (VoLL) bezeichnet wird. Der VoLL gibt einen monetären Wert für eine verlorene Kilowattstunde elektrischer Energie an (EUR/kWh), den ein Netzkunde bereit ist zu zahlen, um nicht von einem Stromausfall betroffen zu sein. Die Grundlagen zur Berechnung eines VoLL sind in vielen Artikeln aufgearbeitet worden (u. a. Billinton, 2001; Billinton, Tollefson und Wacker, 1993; Ajodhia, van Gemert und Hakvoort, 2002).

Für die Abschätzung eines VoLL werden verschiedene Berechnungsmethoden verwendet. Die populärsten Ansätze beziehen sich auf die Zahlungs- und Akzeptanzbereitschaft der Kunden. Die Zahlungsbereitschaft, in der englischsprachigen Literatur bekannt als ‚willingness to pay‘ (WTP), wird durch einen monetären Wert bemessen, den ein Kunde bereit ist zu zahlen, um nicht von einem Stromausfall einer bestimmten Dauer betroffen zu sein. Die Akzeptanzbereitschaft wird in der englischsprachigen Literatur als ‚willingness to accept‘ (WTA) bezeichnet und bemisst, inwieweit ein Kunde bereit ist, eine bestimmte Dauer eines Stromausfalls zu akzeptieren. Neben diesen Kunden- und Präferenzabfragen (u. a. Beenstock, Goldin und Haitovsky, 1998; Schubert et al. 2013) und Analysen von Präferenzverhalten (u. a. Beenstock, 1991) bestehen nach Reckon (2012) darüber hinaus noch methodische Möglichkeiten, über Kostenabschätzungen auf der Grundlage historischer Stromausfälle (u. a. Corwin und Miles 1978; Serra und Fierro, 1997) und Abschätzungen auf Basis von Produktions-, Nachfragefunktionen oder anderen modellbasierten Abschätzungen (u. a. de Nooij, Koopmans und Bijvoet, 2007; Tol, 2007; Elxon, 2013; Bliem, 2005) einen VoLL zu ermitteln.

Für Deutschland existieren einige Studien, in der ein VoLL berechnet wurde. Auf der Grundlage des Jahresgesamtverbrauchs und dem Bruttoinlandsprodukt haben Fischer et al. (2011) in einer Meta-Studie den VoLL für einzelne Bundesländer bestimmt. Auch wenn ein VoLL nicht die Gesamtkosten eines Ausfalls repräsentiert, schätzen Fischer et al. (2011) die Kosten eines einstündigen deutschlandweiten Stromausfalls auf 791,87 Millionen Euro. Die Ergebnisse demonstrieren zwar, dass die wirtschaftlichen Schäden eines einstündigen Stromausfalls dramatisch sein können, ihre Darstellung ist jedoch aufgrund der nicht näher regionalisierbaren Auflösung in keiner Weise aussagekräftig, um als objektiver Maßstab in der Gefahrenabwehr und dem Katastrophenschutz genutzt zu werden.

Eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung hat die VoLL-Berechnungen von Piaszeck et al. (2013). Grundlage dieser VoLL-Berechnungen sind Industriesektoren und deren Jahresgesamtverbräuche. Die räumliche Auflösung erfolgt auf der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte. Basis der Berechnung ist die Verortung von Industrieanlagen bestimmter Industriesektoren in den Landkreisen und kreisfreien Städten. Darüber hinaus erfolgt eine stündliche Auflösung, in dem die Kosten einer Ausfallstunde zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines Tages anhand tagesstypischer Lastprofile der Industriesektoren berech-

net werden. Piaszeck et al. (2013) schätzen, dass der höchste erzielbare VoLL eines einstündigen Stromausfalls in Berlin erreicht wird, wenn dieser um 12 Uhr beginnt. In diesem Fall würde ein Schaden in Höhe von 22,74 Millionen Euro entstehen.

Die monetären Folgen von Stromausfällen in Deutschland in einzelnen Industriesektoren betrachtete Praktiknjo (2016). Er untersuchte den VoLL von 51 Industriesektoren im Kontext von Lastreduzierungen. Für die Abschätzung des VoLL verwendete er zwei Input-Output-Modelle, wodurch sich allgemeine Aussagen über die Ausfallkosten in bestimmten Industriesektoren ableiten lassen.

Häufig werden Stromlastprofile (auch Lastgangsprofile genannt) verwendet, um den VoLL als eine Funktion der Zeit darzustellen (u. a. de Nooij, Lieshout und Koopmans, 2009; Leahy und Tol, 2011; Piaszeck, Wenzel und Wolf, 2013; Growitsch et al. 2013). Stromlastprofile dienen ursprünglich der Steuerung des Netzbetriebs und stellen die Abnahme von Strom eines Letztverbrauchers in einer Lastganglinie für 15-minütige Bezugsperioden dar (vgl. Abschnitt 9.4.2). Im Netzbetrieb werden durch sie die netztechnischen Systemparameter und -kapazitäten abgestimmt (Fischer et al. 2015; Piwko et al. 2005).

Der VoLL wird in der Regel durch die Verwendung von Lastprofilen stündlich aufgelöst. Eine derartig dynamisierter VoLL dient üblicherweise der Abschätzung der monetären Schäden von Lastreduzierungen (u. a. Praktiknjo, 2016; Conejo, Carrión und Morales, 2010). Durch die 15-minütige Auflösung der Lastprofile sind neben einer einstündigen auch höhere zeitliche Auflösungen des VoLL möglich, die hinsichtlich einer plausiblen Ausfalldauer von mehreren Stunden (vgl. Abschnitt 4.2) den Anforderungen hinsichtlich der zeitlichen Betrachtung an die Gefahrenprognose bei Stromausfällen genügen.

Obwohl durch den VoLL auch zeitliche Veränderungen von Stromausfallfolgen dargestellt und vergleichbar gemacht werden können, gibt es mehrere Gründe, warum dessen Verwendung in der Gefahrenabwehr und im Katastrophenschutz nur bedingt zielführend ist. Diese Gründe liegen im Wesentlichen in der ausschließlichen Operationalisierung eines monetären Wertes, in der ausschließlichen Betrachtung einzelner Einrichtungen, Haushalte oder Industriesektoren und in der ungenügenden räumlichen und zeitlichen Auflösung.

Die Darstellung der Stromausfallfolgen in einem monetären Wert stellt zwar ein objektives Maß dar, immaterielle, soziale und weitere nicht in einem monetären Wert zusammenfassbare potentielle Schäden eines Stromausfalls werden jedoch nicht hinreichend dargestellt. Ein VoLL kann daher nur als ein Gefahrenindiz herangezogen werden, das die Schadensträchtigkeit in nicht genügender Umfänglichkeit widerspiegelt, da nicht alle relevanten Schutzgüter ausreichend berücksichtigt werden.

Darüber hinaus betrachten bisherige VoLL-Analysen lediglich einzelne Industrie- oder Wirtschaftssektoren und Haushalte. Für die Zwecke des Krisenmanagements bedarf es Analysen für einzelne KRITIS-Sektoren durch die Analyse einzelner Lokaler KRITIS-Einrichtungen, welche in dieser Form heute nicht für einen gesamten Landkreis oder eine kreisfreie Stadt vorliegen.

Des Weiteren geben bisherige VoLL-Analysen nur Ergebnisse in relativ niedrigen räumlichen, makroskopischen Auflösungen bis auf die Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte wieder. Mikroskopische Auflösungen unterhalb der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte sind nur für einzelne Einrichtungen in individuell zu betrachtenden VoLL-Analysen verfügbar. Für die Zwecke des Krisenmanagements sind flächendeckend hohe räumliche Auflösungen für Stadtteile oder Gemeinden eines ganzen Landkreises oder einer kreisfreien Stadt notwendig.

Die Dynamisierung des VoLL durch die Verwendung von Lastprofilen berücksichtigt elektrizitätswirtschaftliche Aspekte. Durch den Vergleich mit Umständen unter normalen Bedingungen können zwar die eintretenden Opportunitätskosten beleuchtet werden, wohlfahrtsökonomische Aspekte bleiben davon jedoch unberührt. Weitere Schadenskosten, die mit anhaltender Dauer eines Stromausfalls und dessen Dynamik eintreten, fließen ebenso wenig ein wie schadensminimierende Effekte u. a. durch Vorwarnungen (Vorlaufzeiten), getroffene Vorbereitungen oder anderen Anpassungsmaßnahmen. Daher stellen die bisherigen Ansätze, einen VoLL als zeitliche Funktion auszulegen, nur bedingt eine für das Krisenmanagement geeignete dynamische Darstellung dar, die kaum den Anforderungen an die Gefahrenprognose entspricht.

Gründe für die dargestellte beschränkte Verwendbarkeit eines VoLL in der Gefahrenabwehr und im Katastrophenschutz liegen weitestgehend im Mangel an der Verfügbarkeit geeigneter Daten zur VoLL-Berechnung. Der hohe zeitliche Aufwand, geeignete und umfassende Daten eines zu analysierenden Landkreises oder einer kreisfreien Stadt zu sammeln, die begrenzte Darstellung dynamischer Effekte und den bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigenden Bedingung, dass die Gefahrenträchtigkeit nicht für alle relevanten Schutzgüter dargestellt werden, führt dazu, dass die alleinige Verwendung des VoLL in der Gefahrenprognose nur bedingt geeignet ist. Gleichwohl bisherige VoLL-Analyse und die aus ihnen abgeleiteten Erkenntnisse nur einen geringen Mehrwert bei der Beurteilung von stromausfallbedingten Gefahren bilden, ist die Nutzung des VoLL als ein Gefahrenindiz jedoch nicht grundsätzlich auszuschließen.

## 5.6 Interdependenzanalysen und Simulation

Aufgrund der starken Vernetzung und gegenseitigen Abhängigkeiten von KRITIS-Einrichtungen drohen bei anhaltender Dauer eines Stromausfalls weitere Kritische Infrastrukturen auszufallen (Luijff, Nieuwenhuijs, Klaver, van Eeten und Cruz, 2008; Van Eeten, Nieuwenhuijs, Luijff, Klaver and Cruz, 2011; Kadri, Birregah und Châtelet, 2014; Pescaroli and Alexander, 2016). Dieses auch als Domino-Theorie bezeichnete Phänomen beschreibt einen initialen Ausfall einer Kritischen Infrastruktur als Auslöser für weitere KRITIS-Ausfälle auch über verschiedene Eskalationsebenen hinweg und wird seit der Jahrtausendwende große Bedeutung beigemessen.

Interdependenzen werden nach Rinaldi, Peerenboom und Kelly (2001) unterschieden in (i) physikalische Abhängigkeiten, (ii) Cyber-Abhängigkeiten, (iii) geographische Abhängigkeiten und (iv) logische Abhängigkeiten. Demnach liegt eine physikalische Abhängigkeit vor, wenn mindestens zwei KRITIS-Einrichtungen sich eine Ressourcenquelle teilen oder KRITIS-Einrichtungen von anderen KRITIS-Versorgungsleistungen abhängig sind. Cyber-Abhängigkeiten sind netzwerkbasierend und bestehen durch die Vernetzung von IT-Systemen. Geographische Abhängigkeiten sind distanz- und raumabhängig und liegen dann vor, wenn aufgrund der räumlichen Nähe ein KRITIS-Ausfall in einer Einrichtung auch Einfluss auf benachbarte Einrichtungen hat. Logische Abhängigkeiten sind indirekte Abhängigkeiten, durch die z. B. finanzielle Schäden oder negative Einflüsse für eine KRITIS-Einrichtung durch den Ausfall einer anderen Einrichtung hervorgerufen werden kann, obwohl kein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Einrichtungen besteht.

Die alleinige Abhängigkeit impliziert jedoch nicht, dass es unmittelbar zu Folgeausfällen kommt und bietet daher keine ausreichende Aussage für eine an objektiven Tatsachen orientierte Gefahrenprognose. Bezüglich der Beschreibung von Kaskadeneffekten finden sich in der Literatur deswegen vermehrt Ansätze, die ereignisspezifischer sind und betont auf die unerwünschten Folgen abzielen. So unterscheiden Kadri, Birregah und Châtelet (2014) verschiedene Eskalationsebenen von Kaskadeneffekte und kategorisieren

nach primären, sekundären und tertiären Ereignissen. Differenzierter geht Luijff et al. (2008) vor, der zwischen initiiierenden und resultierenden Kaskadenereignissen unterscheidet. Initiierende Kaskadenereignisse lösen einen KRITIS-Ausfall aus. Resultierende Kaskadenereignisse bezeichnen bereits stattgefundenene KRITIS-Ausfälle, die weitere KRITIS-Ereignisse bewirken.

In der Literatur lässt sich eine Vielzahl von Interdependenzmodellen, -simulationen und Methoden zur Interdependenzanalyse finden. Die bekanntesten Modelle und Simulationen wurden in einer Reihe von Projekten wie DIESIS (Rome et al. 2009; Usov et al. 2010), I2Sim (Marti et al. 2008), IRRIS (Klein et al. 2008), CIPS/DSS (Bush et al. 2005) und CARVER2 entwickelt. Aus methodischer Sicht finden sich vorherrschend Agenten-basierte Modelle (u. a. Casalicchio, Galli und Tucci, 2008, 2010; Bagheri, Baghi und Ghorbani, 2007), System-Dynamics-Ansätze (u. a. Min et al. 2007; Cavallini et al. 2014; Laugé, Hernantes, and Sarriegi, 2015), Bayessche Netzwerke (u. a. Di Giorgio und Liberati, 2012; Jha, und Keel, 2012) und Input-Output Modelle (u. a. Haimes et al. 2005; Oliva, Panzieri, Setola, 2011; Setola, Oliva und Conte, 2013). Verschiedene Überblicke und Vergleiche der Herangehensweisen der Interdependenzmethoden, -modelle und -simulationen finden sich u. a. bei Ouyang (2014), Pederson et al. (2006), Yusta, Correa und Lacal-Arántegui (2011), Theoharidou, Kotzanikolaou und Gritzalis (2011) Eusgeld, Henzi und Kröger (2008) und Giannopoulos, Filippini, und Schimmer (2012).

Dass die seit langem bekannten Interdependenzmodelle und -simulationen sich bisher nicht in der Praxis der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes durchgesetzt haben, deutet auf tiefsitzende Vorbehalte gegenüber deren Mehrwert und Praktikabilität hin. Fast alle populären Interdependenzmodelle und -simulationen wurden für große, überregionale Netzwerke von Kritischen Infrastrukturen entwickelt und adressieren höhere Management-Ebenen. Die Modelle und Simulationen dienen in der Regel ausschließlich der Stärkung der Netzwerkzuverlässigkeit und deren Resilienz, sollen Ausfälle bestimmter KRITIS-Einrichtungen, eines oder mehrerer KRITIS-Sektoren oder eines Systems an KRITIS-Einrichtungen verhindern oder deren Tragweite reduzieren oder Wissenschaftlern bei der Entwicklung von strategischen Management-Empfehlungen unterstützen. Aufgrund ihres ursprünglichen Zweckes entsprechen sie daher nicht den Anforderungen an die praxisrelevante operative Entscheidungsfindung der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes und berücksichtigen insbesondere nur unzureichend die Belange Lokaler Kritischer Infrastrukturen.

Um die bestehenden Modelle und Simulationen anzuwenden, sind weitreichende Daten notwendig (eine weiterführende Diskussion findet sich u. a. bei Kozik et al. 2015; Rome, Voß, Connelly, Carter und Handley, 2015). Das Sammeln der notwendigen Daten ist zeitaufwendig. Der Umfang der Daten geht dabei bei weitem über die im KRITIS-Kataster vorhandenen Informationen hinaus. Probleme bereiten hierbei häufig der Datenschutz, das Wettbewerbsrecht und das ständig notwendig werdende Aktualisieren der Daten. In der Praxis finden sich die notwendigen Informationen, wenn überhaupt, bei den einzelnen KRITIS-Betreibern und sind zentral zusammenzufassen. Auch die Informationen über die eigentlichen Abhängigkeiten sind beschränkt zugänglich und teilweise nicht bekannt. Regelmäßig werden daher empirische und historische Daten in Verbindung mit Expertenbefragungen zur Modellierung verwendet (vgl. Stergiopoulos et al. 2016). Durch dieses Vorgehen können jedoch lediglich offensichtliche und bekannte Abhängigkeiten deutlich gemacht werden. In Anbetracht des Erkenntnisgewinnes erscheint der Aufwand sowohl zur Gewinnung einrichtungsspezifischer Detailinformationen als auch für die notwendig werdende individuelle Mikromodellierung für Interdependenzanalysen nicht im Verhältnis zu stehen.

Darüber hinaus sind bestehende Interdependenzmodelle und -simulationen häufig äußerst komplex, dass deren Ergebnisse zu abstrakt, generisch und vage sind sowie nur unzureichend die für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz notwendige räumliche und zeitliche Auflösung aufweisen. Die Modellergebnisse sind zudem regelmäßig derart kompliziert, dass sie nur schwer durch die Entscheider allein interpretiert werden können und hierbei die Unterstützung der Modellierer notwendig ist.

Mit der Interdependenz, den verschiedenartigen Zwecken von Interdependenzanalysen und der Heterogenität von Kritischen Infrastrukturen ist eine derartige Komplexität verbunden, dass ein einzelner Ansatz eines Interdependenzmodells oder einer Simulation keine „silver bullet“ darstellen kann (Kröger und Nan, 2014; Kröger, 2008) und stets verschiedene Ansätze anzuwenden sind. Trotz der bestehenden Ansätze bedarf es für die Zwecke des Krisenmanagements weiterhin geeignete Instrumente, die die Vorhersagefähigkeit stärken und die Anforderungen einer Gefahrenprognose hinreichend berücksichtigt (Kozik et al. 2015; Pescaroli and Alexander, 2016).

Eine Vielzahl theoretischer Analysen (u. a. Laugé, Hernantes, and Sarriegi, 2015; Stergiopoulos et al. 2016; Buldyrev et al. 2010; Setola, De Porcellinis und Sforna, 2009) und empirischer Analysen (u. a. Kunz et al. 2013; Luijff et al. 2008; Van Eeten et al., 2011; Blake et al. 2013) zeigen, dass im Besonderen die Funktionsfähigkeit von KRITIS-Einrichtungen von der Stromversorgung und von der IT-Infrastruktur abhängig ist. Die Ergebnisse der empirischen Erhebungen lassen sogar den Schluss zu, dass sich Kaskadeneffekte im äußerst überwiegenden Maß auf die Abhängigkeit von Strom und der IT-Infrastruktur beschränken und Kaskadeneffekte über mehrere Eskalationsebenen, wie sie durch die Domino-Theorie und den Interdependenzmodellen und -simulationen unterstellt werden, in der Regel ausbleiben (Luijff et al., 2008; Van Eeten et al., 2011). So ergaben sich im von Luijff et al. (2008) analysierten Datensatz von über 1700 KRITIS-Ausfällen in lediglich 4 Prozent der Kaskadenereignisse weitere sekundäre KRITIS-Ausfälle. Bei lediglich 0,22 Prozent aller Kaskadenereignisse entstanden durch diese neuen Ausfälle noch weitere tertiäre KRITIS-Ausfälle. Auch andere empirische Untersuchungen wie die von Van Eeten et al. (2011) zeigen, dass die Häufigkeit der Kaskadenereignisse mit steigenden Eskalationsebenen erheblich abnimmt. Da die Studien auf beschränkt aussagekräftigen Medienberichten beruhen, bleibt unklar, inwieweit bestimmte Maßnahmen zur Vermeidung von Kaskadeneffekten beitragen oder inwieweit die Berichterstattung in den genutzten Medien Einfluss auf die Ergebnisse haben (ebd.). Die empirischen Erkenntnisse stehen im Kontrast zu den Grundannahmen theoretisch-analytischer Verfahren und der oft unterstellten dramatisierten Tragweite der Domino-Theorie. Die Domino-Theorie als auch die bestehenden Interdependenzen von Kritischen Infrastrukturen samt dem Risiko mehrstufiger Kaskadeneffekte sind daher nicht über zu bewerten.

Der Entstehung eines Stromausfalls liegen häufig derart komplexe Zusammenhänge zu Grunde, dass diese weder vorhersehbar noch in jedem Fall im Vorhinein erkannt, modelliert und simuliert werden können. Dadurch und durch die bereits genannten Herausforderungen bei der Anwendung von Interdependenzmodellen und -simulationen besteht für die Zwecke des Katastrophenschutzes kein erhöhtes Interesse an Kenntnissen über die Entstehung von Stromausfällen sowie der detailtreuen Simulation ihrer Ursachen-Wirk-Komplexen. Pescaroli und Alexander (2016) empfehlen die Aufmerksamkeit weniger auf gefahrenspezifischen Risikoszenarien, sondern vielmehr auf Vulnerabilitätsszenarien, den potentiellen Eskalationsmechanismen („paths for cascading events“) und den schadensverursachenden Verstärkungseffekten zu legen. Aufgrund von Bewältigungskapazitäten und der dadurch beschränkt möglichen Sicherstellung eines kontinuierlichen Betriebs treten mehrstufige Kaskadeneffekte erst bei anhaltender Dauer von Stromausfällen auf. Anstatt sich auf die detaillierte Modellierung von mehrstufigen Interdependenzen zu konzentrieren, sollte die Aufmerksamkeit daher besser auf die durch einen Stromausfall initial ausgelösten sekundären Kaskadenereignisse und deren Umschlagpunkte liegen.

### 5.7 Fazit

Theorien der Vulnerabilität und der Resilienz haben sich in der Katastrophenvorsorge etabliert. Es gibt vielzählige Ansätze, die entweder auf einzelne Gefahren- bzw. Gefahrenkomplexe oder auf einen All-Gefahren-Ansatz abzielen. Gleichwohl findet sich in der Literatur bisher kein geeigneter Ansatz, der sich für die Zwecke der Entscheidungsfindung in der Gefahrenabwehr oder im Katastrophenschutz zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren anwenden lässt.

Die Ansätze der Vulnerabilitätstheorie erfüllen mehrere Anforderungen einer Gefahrenprognose. Für die Zwecke der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes bedarf es jedoch einer zweckmäßigen Anpassung der bestehenden Theorieansätze. Wichtige Elemente zur Bewertung von Stromausfallfolgen können dabei die Bewältigungskapazität und die Kritikalität sowie die Operationalisierung der Resilienz sein.

Mit dem VoLL und den bestehenden Interdependenzanalysen existieren Ansätze, mit denen die Folgen eines Stromausfalls quantifiziert werden können. Diese VoLL-Ansätze dienen jedoch ausschließlich energiewirtschaftlichen Analysen. Hierdurch werden die Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung in der Katastrophenvorsorge nicht hinreichend berücksichtigt. In Anbetracht empirischer Auswertungen erscheint eine ausschweifende Berücksichtigung von Kaskaden- und Dominogefahren wie in Form von Interdependenzanalysen zumindest für die Gefahrenprognose tendenziell überbewertet. In Anbetracht dessen erscheint eine Konzentration auf Eskalationsmechanismen und Verstärkungseffekten eines Stromausfalls als eine wesentliche Ursache sekundärer KRITIS-Ausfälle angezeigt.

## 6 Methodische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen für die Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse erläutert. Zunächst wird in die Grundlagen der Entscheidungstheorie, der Entscheidungsmodelle und der Rationalität eingeführt. Im Anschluss erfolgt eine Einführung in multikriterielle Analysemethoden. Im Hinblick auf die anvisierte Vulnerabilitätsanalyse sind multiattributive Ansätze und die Zielprogrammierung von besonderer Bedeutung. Indikatorenbasierte Analysen folgen vorwiegend multiattributiven Ansätzen. Im Bezug zur anvisierten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse werden daher Gewichtungsverfahren, Gruppenentscheide, spatial-temporale Analysen und Unschärfe näher betrachtet. Die Zielprogrammierung ist von Interesse bei der Bewertung, wie gut vorbereitete Maßnahmen für die Beherrschung eines Stromausfalls greifen und dabei Schutzziele erreichen. Daher wird ebenfalls auf die Funktionsweise der Zielprogrammierung eingegangen.

Eine erste Auseinandersetzung mit der Dynamisierung multikriterieller Analyse fand mit der Publikation Münzberg, Wiens und Schultmann (2014a) statt, die die Grundlage des Abschnitts 6.2.5 bildet.

### 6.1 Entscheidungstheorie und -modelle

#### 6.1.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Die Entscheidungstheorie ist ein interdisziplinäres Wissenschaftsgebiet mit dem Ziel, reale Entscheidungssituationen nachzuvollziehen und Hilfestellung in der Entscheidungsfindung zu geben. Je nach Forschungszweck wird zwischen deskriptiver und präskriptiver Entscheidungstheorie unterschieden (u. a. Rommelfanger und Eickemeier, 2002; Laux, Gillenkirch und Schenk-Mathes, 2012; Eisenführ, Weber und Langer, 2010).

Die präskriptive (normative) Entscheidungstheorie zielt auf die Entscheidungslogik und damit auf die Beschreibung von Verfahren einer rationalen Entscheidungsfindung ab. So werden in Entscheidungsanalysen geeignete entscheidungslogische Verfahren in Form von Strategien, Methoden, Modellen oder Software für eine rationale Entscheidungsfindung entwickelt und beschrieben. Durch die Entscheidungsanalyse wird das Entscheidungsproblem in geeigneter Weise strukturiert. Mit der Anwendung entscheidungslogischer Verfahren und unter der Annahme eines Rationalverhaltens des Entscheiders lassen sich für die verschiedensten idealtypischen Problemsituationen Lösungsalgorithmen erarbeiten, wodurch die Verhaltensweise von Entscheidungsträgern verbessert und die Entscheidungsfindung unterstützt wird (vgl. 6.1.3) (ebd.).

Die deskriptive (empirisch-kognitive) Entscheidungstheorie beleuchtet die tatsächlich beobachtete Art und Weise der Entscheidungsfindung. Dabei adressiert sie die regelmäßig in der Realität zu beobachtende Verletzung des Rationalitätspostulats der normativen Entscheidungstheorie durch Entscheidungsträger. Neben der begrenzten Informationsaufnahme- und Informationsverarbeitungskapazität von Menschen spielt dabei auch die Überforderung mit komplexen Entscheidungen unter Unsicherheit eine Rolle. Von Interesse ist daher, wie Entscheidungsträger Entscheidungen in der Realität treffen. Mit Beobachtungen, Befragungen und Experimenten wird das tatsächliche Entscheidungsverhalten analysiert. Basierend auf dieser Empirie werden induktiv deskriptive Entscheidungstheorien abgeleitet (ebd.).

### 6.1.2 Grundlagen der Entscheidungsmodelle

Entscheidungsmodelle sind entscheidungslogische Verfahren im Rahmen der präskriptiven (normativen) Entscheidungstheorie. Sie stellen eine Entscheidungssituation in abstrakter Form und formalisierter Sprache dar, damit daraus eine Lösung logisch entwickelt werden kann. Obwohl mit einem Modell versucht wird, eine reale und komplexe Entscheidungssituation hinsichtlich aller entscheidungsrelevanten Aspekte strukturtreu oder strukturähnlich abzubilden, bleibt ein Modell eine Abstraktion der Wirklichkeit. Aufgrund der Strukturgleichheit ist es möglich, dass Erkenntnisse aus einem Entscheidungsmodell auf die Wirklichkeit übertragen werden können. Jedes Entscheidungsmodell besteht grundlegend aus einem Entscheidungsfeld und einem Zielsystem.

Das Entscheidungsfeld beinhaltet den Aktionsraum, den Zustandsraum und die Ergebnisfunktion. Innerhalb des Aktionsraumes liegen dem Entscheider eine Menge auszuwählender Handlungsalternativen vor. Unter der Berücksichtigung des Ergebnisses einer Entscheidung sind die Handlungsalternativen nach den Präferenzen der Entscheider zu wählen. Restriktionen sind Bestandteil des Entscheidungsfeldes. Sie beschränken die Menge der Handlungsalternativen. Darüber hinaus beeinflussen exogene Größen ebenfalls die Ergebnisse einer möglichen Handlungsalternative. Auch wenn derartige Umweltzustände außerhalb des Einflussbereiches der Entscheidungsträger liegen, ist ihre Menge im Zustandsraum zu berücksichtigen. Die Kombination einer Handlungsalternative und eines Umweltzustandes führt zu einer Konsequenz, die in einer Ergebnisfunktion dargestellt wird.

Das Zielsystem bildet mithilfe von Zielfunktionen die Zielvorstellung eines Entscheiders ab. Zielfunktionen stellen Präferenzen und Entscheidungsregeln formal dar. Innerhalb des Entscheidungsmodells erfolgt die Entscheidung nach logischer mathematischer Vorschrift als Wahl einer Handlungsalternative.

Tabelle 6: Klassifikation von Entscheidungsmodellen anhand eines morphologischen Kastens in Anlehnung an Götzte und Bloech (1995).

Kriterium	Ausprägungen			
<b>(Un)Sicherheit</b>	Sicherheit (Gewissheit)	Unsicherheit		
		Ungewissheit	Risiko	Unschärfe
<b>Handlungsalternativen</b>	Diskreter Lösungsraum	Stetiger Lösungsraum		
<b>Ziele</b>	Ein Ziel	Mehrere Ziele		
<b>Zeit</b>	Statisch	dynamisch		
		Einstufig	Mehrstufig	
			Starr	Flexibel

Entscheidungsmodelle lassen sich u. a. hinsichtlich der Sicherheit der von ihnen genutzten Information, des Lösungsraums der Handlungsalternativen, der Anzahl der anvisierten Ziele und der Berücksichtigung der Zeit differenzieren (s. Tabelle 6).

### 6.1.3 Rationalität in der präskriptiven Entscheidungstheorie

Da im Rahmen der präskriptiven Entscheidungstheorie die Entscheidungsfindung an das Rationalitätspostulat der Entscheider geknüpft ist, sind entsprechende Axiome rationalen Entscheidens zu erfüllen. Nach vorherrschender Meinung sind für ein rationales Entscheiden im Wesentlichen das Ordnungs- und das Transitivitätsaxiom zu erfüllen (Laux, Gillenkirch und Schenk-Mathes, 2012). Das Ordnungsaxiom bezieht sich auf die Handlungsalternativen, die einerseits für die Entscheidungsträger vollständig vergleichbar sein müssen. Andererseits müssen die Handlungsalternativen so beschaffen sein, dass die Entscheidungsträger sie nach ihrer jeweiligen Präferenz ordnen können. Mit dem Transitivitätsaxiom wird gefordert, dass diese Ordnung konsequent widerspruchsfrei sein muss.

Darüber hinaus bestehen weitere Axiome wie die der Objektivität, der Stetigkeit, der Beschränkung, der Unabhängigkeit, der Dominanz und der Substituierbarkeit, die jedoch je nach Auslegung unterschiedliche Bindungskraft haben. So besteht z. B. Kontroversität darüber, ob ausschließlich nur objektiv messbare Größen herangezogen werden dürfen (Objektivitätsaxiom). Zwar führt die Nutzung subjektiver Präferenzen häufig zu einer realistischeren Darstellung des Entscheidungsproblems, diese sind jedoch empirisch schwerer überprüfbar als die ausschließliche Nutzung objektiver Präferenzen.

Ein Rationalverhalten der Entscheider ist auch bei der Informationsbeschaffung und -verarbeitung zu unterstellen. Das beinhaltet, dass Entscheider mögliche Probleme bei der Beschaffung und Verarbeitung entscheidungsrelevanter Informationen erkennen und rationale Lösungen hierfür finden und nutzen.

## 6.2 Multikriterielle Analysemethoden

### 6.2.1 Ansätze multikriterieller Analysemethoden

Multikriterielle Analysemethoden sind entscheidungslogische Verfahren, mit denen Entscheidungssituationen strukturiert und Entscheidungsanalysen durchgeführt und in denen mehrere und teilweise konkurrierende Zielvorstellungen verfolgt werden. Typischerweise werden in multikriteriellen Verfahren systematisch Ziele, Handlungsalternativen und die Kriterien für die Bewertung der Handlungsalternativen definiert und operationalisiert. Als Kriterien werden Eigenschaften, Attribute, Faktoren, Indikatoren, Objektdimensionierungen oder auch Charakteristika von Handlungsalternativen beschrieben. Diese Begriffe werden je nach Zweck, Zielstellung und methodischer Umsetzung auch Synonym für die Begrifflichkeit des Kriteriums verwendet (u. a. Steiner 2011). In einem Entscheidungsmodell werden anhand der Ziele, der Handlungsalternativen und der Kriterien reale Entscheidungssituationen abstrahiert. Mithilfe eines solchen Entscheidungsmodells werden die Handlungsalternativen entsprechend der Zielvorstellung der Entscheidungsträger und mithilfe der Kriterienwerte multikriteriell bewertet. Die Ergebnisse unterstützen Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung.

In der Literatur werden multikriterielle Analysemethoden in Mehrzieloptimierungsmodelle (Multi-Objective Decision Making (MODM)) und multi-attributive Entscheidungsmodellen (Multi-Attribute Decision Making (MADM)) unterschieden (u. a. Geldermann und Lerche, 2014, Katz, 2010, und Velasquez und Hester, 2013). Entsprechend und in Anlehnung an diese Literatur lassen sich jeweils verschiedene Beispiele aufzählen (Abbildung 6.1).

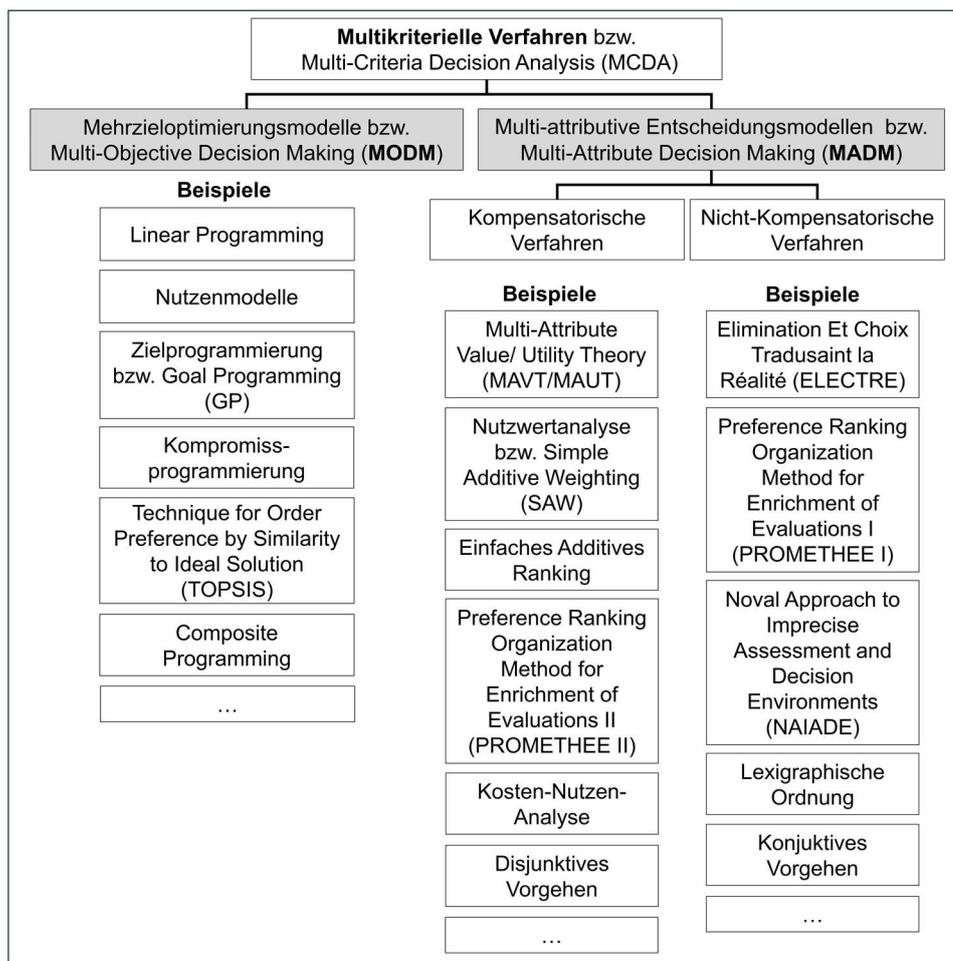


Abbildung 6.1: Klassifikation von multikriteriellen Verfahren mit Beispielen.

Mithilfe von Mehrzieloptimierungsmodellen werden Optimierungsprobleme gelöst, bei denen gleichzeitig mehrere Zielfunktionen zu optimieren sind. Ziel ist es, unter Berücksichtigung einer Menge an Zielfunktionen eine optimale Lösung zu finden. Der Aktionsraum, in denen sich die Handlungsalternativen befinden, ist stetig und damit unbegrenzt. Bei MODM-Verfahren kommen insbesondere Vektoroptimierungsmodelle und abstandsorientierte Verfahren zum Einsatz.

Mithilfe multi-attributiver Entscheidungsmodelle wird eine Menge von Handlungsalternativen hinsichtlich einer vordefinierten Zielstellung in eine Ordnung gebracht. MADM-Verfahren lassen sich in kompensatorische und in nicht-kompensatorische Verfahren unterscheiden (vgl. Geldermann und Lerche, 2014). Bei kompensatorischen Verfahren werden die Ausprägungen eines Attributs in unterschiedlicher Weise mit der Ausprägung eines anderen Attributs ausgeglichen.

Sowohl für Mehrzieloptimierungsmodelle als auch für multi-attributive Entscheidungsmodelle lassen sich eine Reihe klassischer Beispiele finden (Abbildung 6.1). Über die jeweiligen methodischen Umsetzungsdetails, Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgebiete der Verfahren finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Abhandlungen (u. a. De Montis, De Toro, Droste-Franke, Omann und Stagl, 2005; Velasquez und Hester, 2013; Zardari, Ahmed, Shirazi und Yusop 2015; Kim, Kim, Park, Liew und Rhee, 2017; Basilio,

Pereira und Costa, 2017; Cegan, Filion, Keisler und Linkov, 2017; Marttunen, Lienert und Belton 2017; Esmail und Geneletti, 2018), so dass an dieser Stelle auf eine tiefgreifende und vergleichende Erklärung verzichtet wird. Gleichwohl eine Vielzahl an unterschiedlichen Varianten multikriterieller Analysemethoden bekannt ist und entsprechende Softwarelösungen existieren, findet sich keine universell einsetzbare Methodik (Hyde, 2006). Vielmehr sind entsprechende methodische Ansätze zweckorientiert auf das individuelle Entscheidungsproblem anzupassen.

## 6.2.2 Multi-attributive Entscheidungsverfahren

Aufgrund der in dieser Arbeit angestrebten raumzeitlichen Analyse des Potentials von stromausfallbedingten Gefahren, bei dem sich die Handlungsalternativen der Raumordnung innerhalb der Untersuchungszeit nicht ändert und diese entsprechend dem Gefahrenpotential zu ordnen sind (vgl. Abschnitt 4.5), bietet sich für die Vulnerabilitätsanalyse ein multi-attributives Entscheidungsverfahren an. Aufgrund dessen werden Grundlagen multi-attributiver Entscheidungsverfahren erläutert.

Häufig werden bei multi-attributiven Entscheidungsverfahren lineare Präferenzfunktionen verwendet, bei denen der Gesamtwert einer Alternative aus den gewichteten Einzelwerten der Attribute bestimmt werden (u. a. Zardari, Ahmed, Shirazi und Yusop 2015). Je nach Analysezweck und methodischer Umsetzung variieren die Verfahren in der Konstruktion der multiattributiven Wertefunktion, der Aggregation, der Bildung von Gewichten, der Normalisierung von Attributausprägungen und der Ableitung von Zielgewichten.

Regelmäßig werden für die berücksichtigten Handlungsalternativen  $Alt_{AltNumb}$  mit  $AltNumb = 1, \dots, LastAltNumb$  entsprechende Nutzwerte  $AltValue_{AltNumb}$  berechnet (ebd.). Die Berechnung basiert auf einer gewichteten Summe der jeweiligen Attributausprägungen einer Handlungsalternative  $AttributeValue_{AttributeNumb}(Alt_{AltNumb})$  mit  $AttributeNumb = 1, \dots, LastAttributeNumb$  und den jeweiligen Präferenzgewichten  $Weight_{AttributeNumb}$  (ebd.):

$$AltValue_{(Alt_{AltNumb})} = \sum_{AttributeNumb=1}^{LastAttributeNumb} Weight_{AttributeNumb} * AttributeValue_{AttributeNumb}(Alt_{AltNumb}) \quad (6-1)$$

Für die Gewichtswerte gilt  $Weight_{AttributeNumb} > 0$  und  $\sum_{AttributeNumb=1}^{LastAttributeNumb} Weight_{AttributeNumb} = 1$ . Die Attributausprägungen sind zuvor auf das Intervall  $[0,1]$  zu normieren.

Typischerweise besteht ein multiattributives Verfahren aus den Phasen (i) der Problemstrukturierung, (ii) der Präferenzbildung, (iii) der Aggregation und (iv) der Sensitivitätsanalyse (Abbildung 6.2) (u. a. Hiete, Bertsch, Comes, Schultmann und Raskob, 2010; Belton und Stewart, 2002).

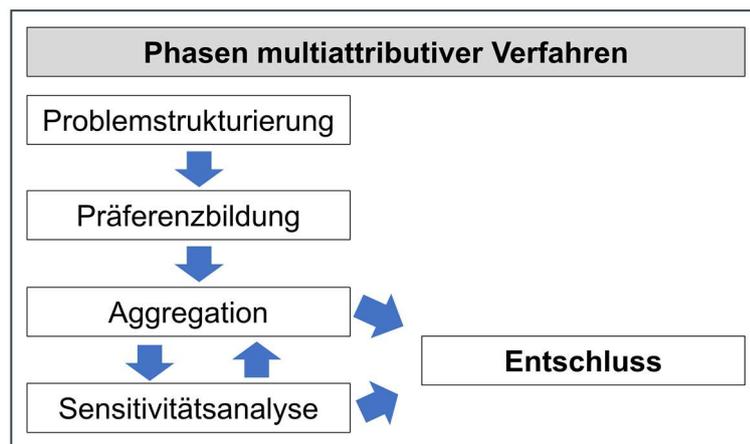


Abbildung 6.2: Phasen eines typischen multiattributiven Verfahrens.

In der (i) Problemstrukturierung wird das Entscheidungsproblem durch die Bildung einer Kriterienhierarchie (Kriterienbaum) in Ober- und Unterkriterien strukturiert. Zusätzlich werden die zu analysierenden Alternativen festgelegt und das Zielsystem konkretisiert. Die Attribute werden operationalisiert. Die (ii) Präferenzen der Entscheidungsträger werden durch Gewichte der Kriterien und Attribute berücksichtigt. In (iii) der Aggregation werden die Gewichte und die Attributwerte in geeigneter Weise methodisch verknüpft, so dass sich eine Bewertung der Alternative hinsichtlich des festgelegten Zielsystems ergibt. Die Ergebnisse werden in (iv) einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Einflüsse von Parameteränderungen bewertet. Die schlussendliche Entscheidung oder Empfehlung basiert sowohl auf dem Ergebnis der Aggregation als auch auf der der Sensitivitätsanalyse.

### 6.2.3 Gewichtung innerhalb multiattributiver Analysen

Gewichte sind ein wesentlicher Baustein multiattributiver Analysen, mit denen je nach Zielsetzung und Umsetzung die Präferenzen von Entscheidern bzw. die Bedeutung von Attributen für das Gesamtproblem ausgedrückt werden. Die Wahl des Gewichtungsverfahrens ist von grundlegender Bedeutung für das Entscheidungsmodell, da die Gewichte erheblichen Einfluss auf das finale Ergebnis haben. Zur Ermittlung der Gewichte können unterschiedliche Verfahren angewendet werden, deren Wahl abhängig vom Zweck und zu analysierenden Problem ist. Die Gewichtung wird oft als der schwierigste Vorgang bei der Entwicklung eines multiattributiven Entscheidungsmodells angesehen.

Eines der einfachsten Verfahren einer Gewichtung ist die Gleichgewichtung aller Attribute. Sie kann angewendet werden, wenn der jeweilige Einfluss der Attribute auf das Gesamtergebnis gleich ist. Oftmals messen Entscheidungsträger den gewählten Attributen jedoch unterschiedliche Bedeutungen bei, so dass diese unterschiedlich zu gewichten sind. Gewichtswerte lassen sich entweder anhand objektiver oder subjektiver Beurteilungen herleiten (vgl. Tzeng, Chen und Wang, 1998). Grundlage objektiver Beurteilungen sind zweckspezifische Fakten oder Daten. Subjektive Beurteilungen stellen in der Regel Beurteilungen der Entscheidungsträger dar. In der Literatur findet sich eine Reihe von Ermittlungsverfahren, um subjektive Beurteilungen von Entscheidungsträgern zu operationalisieren. Ein genereller Überblick und entsprechende Bewertungen finden sich u. a. bei Zardari, Ahmed, Shirazi und Yusop 2015, Van Til, Groothuis-

Oudshoorn, Lieferink, Dolan und Goetghebeur 2014, Roszkowska, 2013, Riabacke, Danielson und Ekenberg, 2012, Hämäläinen und Alaja, 2006, Pöyhönen und Hämäläinen, 2001, sowie Choo, Schoner und Wedley, 1999.

Zu den bekanntesten Verfahren<sup>1</sup> gehören die Direct Rating/Weighting Method (u. a. Hobbs und Meier 2000), die Direct Point Allocation (u. a. Pöyhönen und Hämäläinen 2001), die Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) (u. a. Edwards und Barron, 1994; Edwards, 1977; von Winterfeldt und Edwards, 1986), das SWING Weighting (u. a. von Winterfeldt und Edwards, 1986), das Revised Simos Card Playing Procedure (u. a. Figueira, und Roy, 2002), das Tradeoff Weighting (u. a. Watson and Buede, 1987; Keeney und Raiffa, 1976), die Delphi Technique (u. a. Dalkey und Helmer, 1963), der paarweise Vergleich mithilfe des Analytic Hierarchy Process (AHP) (u. a. Saaty, 1980), die Rank-Order Centroid Techniques (u. a. Sureeyatanapas, 2016, Buede, 2000), das Preference Programming (u. a. Salo und Hämäläinen, 1995) und die Pricing Out Method (u. a. Keeney und Raiffa, 1993).

Da die Wahl eines Gewichtungsverfahrens nur im Zusammenhang mit der jeweiligen Entscheidungssituation beurteilt werden kann, kann kein Verfahren pauschal als das beste herausgestellt werden. Einige Untersuchungen wie die von Pöyhönen und Hämäläinen 2001 legen sogar nahe, dass sich trotz der Nutzung unterschiedlicher Gewichtungsverfahren keine grundsätzlichen Unterschiede im Analyseergebnis ergeben. Jedoch kann es zu unerwünschten Missverständnissen in der Interpretation der Analyseergebnisse kommen (vgl. Choo, Schoner und Wedley, 1999). Choo et al. (1999) betonen deswegen, dass das gewählte Gewichtungsverfahren und die so ermittelten Gewichte den jeweiligen Entscheidungsträgern genau zu erläutern und der Einfluss des Verfahrens auf das Analyseergebnis transparent zu machen ist.

#### 6.2.4 Gruppenentscheid in multikriteriellen Analysen

Neben dem eigentlichen Problem der Gewichtsbestimmung besteht bei Entscheidungen in Gruppen die zusätzliche Herausforderung, dass eine Gruppenpräferenz zu bestimmen ist. Eine Gruppenpräferenz stellt innerhalb eines Gruppenentscheids einen Kompromiss dar, der einvernehmlich und gemeinschaftlich getragen wird. Bei der Bildung der Gruppenpräferenz sind die jeweiligen Präferenzen der einzelnen Entscheidungsträger, die sich aus den individuellen persönlichen wie fachlichen Eigenschaften und die unterschiedlichen Kenntnisse, Qualifikationen und Erfahrungen der Entscheidungsträger ergeben können, zu berücksichtigen. Je größer die Gruppe der Entscheider jedoch ist, desto schwieriger wird die Festlegung eines Konsenses in einem Gruppenentscheid.

In der Literatur finden sich unter dem Begriff der Multiple Attribute Group Decision Making (MAGDM) eine Reihe von Ansätzen um, die Gewichtsbestimmung in multiattributive Entscheidungen in Gruppen vorzunehmen. Ein Überblick über diese Ansätze findet sich u. a. bei Kabak und Ervural (2017), Riabacke, Danielson und Ekenberg (2012), Yue (2011), Pan und Zhang (2009) und Huang, Liao und Lin (2009). Vorherrschend werden dabei fuzzy-basierte Ansätze (u. a. Wie und Zhao, 2012; Wie, 2010), Monte-Carlo-basierte Ansätze (wie u. a. Mateos, Jiménez-Martín und Ríos-Insua, 2006), Ansätze der Präferenzrelation (u. a. Yang, Kuo, Parker und Chen, 2015) und Delphi-Verfahren (u. a. Poompipatpong und Kengpol, 2013) verwendet.

<sup>1</sup> Es handelt sich nachfolgend um in der Literatur feststehende Bezeichnungen, deren Übersetzung ins Deutsche sinnverzerrende Wirkung hätte und einer zweckorientierten Auflistung nicht dienlich sein würde. Detaillierte Erläuterungen zur methodischen Umsetzung der Verfahren finden sich in der jeweils aufgezeigten Literatur.

### 6.2.5 Multiattributive Verfahren für spatial-temporale Vulnerabilitätsanalysen

Die Verwendung multiattributiver Verfahren für spatial-temporale Analysen ist in den Geowissenschaften eine etablierte Methode, die sich auch unter den Begriffen der Geospatial Information Utility und der GIS-basierten MAUT findet. In der Gefahrenkartierung und der Geogefahrenforschung lassen sich Beispiele finden, bei denen Gefahren im Zusammenhang mit Hochwasser (u. a. Meyer, Haase und Scheuer, 2007), Tiefwasserbohrungen (u. a. Haneberg, Kelly, Graves und Dan, 2015) und Konservierung (u. a. Geneletti und van Duren, 2008) analysiert werden.

Ebenso werden für Analysen dynamischer oder temporaler Vulnerabilität multiattributive Verfahren angewendet. Die dynamische Betrachtung der Vulnerabilität ermöglicht den Entscheidungsträgern, Änderungen der Vulnerabilität über die Zeit nachzuvollziehen. Dynamische Vulnerabilitätsanalysen werden insbesondere verwendet bei der Analyse von Anpassungen an langfristige Änderungen der Umwelt, der Gesellschaft oder der Politik (vgl. Bankoff, Frerks und Hilhorst, 2004; Kienberger, Blaschke und Zaidi, 2013). Wisner, Blaikie, Cannon und Davis (2004) unterscheiden bei den Gründen für Vulnerabilitätsänderungen (i) Hauptursachen, (ii) dynamischen Veränderungsdruck und (iii) unsichere Bedingungen. Hauptursachen entstehen regelmäßig durch wirtschaftliche, demographische oder politische Prozesse. Der dynamische Veränderungsdruck entsteht z. B. durch den Anstieg der Bevölkerung, Urbanisierung oder fehlender Selbsthilfefähigkeit. Unsichere Bedingungen rühren z. B. her aus mangelnder lokaler Wirtschaftskraft, Mängeln in der Katastrophenvorsorge und -planung oder einer unsicheren politischen Lage.

Dynamische Änderungen der Vulnerabilität lassen sich methodisch in multi-attributiven Analysen in unterschiedlicher Weise umsetzen. Zur Dynamisierung von multikriteriellen Analysen ist es vorstellbar, dass sich (i) die Gewichte (u. a. Tiago, Ribeiro und Pais, 2009, Khanmohammadi, Ribeiro und Jassibi, 2003, Kornbluth, 1992; Benítez, Delgado-Galván, Izquierdo und Pérez-García, 2012), (ii) die Attributwerte (u. a. Tiago, Ribeiro und Pais, 2009) bzw. deren Input-Daten (u. a. Chen, Li und Shawei, 2010) oder (iii) die Alternativen (u. a. Campanella und Ribeiro, 2011) innerhalb des betrachteten Analysezeitraums ändern. Darüber hinaus werden für temporale Analysen auch multikriterielle Verfahren mit anderen Methoden zu (iv) Hybridmodellen kombiniert.

Es lassen sich verschiedene Beispiele finden, wie multiattributive Verfahren für spatial-temporale Vulnerabilitätsanalysen eingesetzt werden. Typische Anwendungsfelder stehen z. B. im Zusammenhang mit

- den Folgen der Klimaveränderung (u. a. Metzger und Schröter, 2006; Aubrecht, Steinnocher, Köstl, Züger und Loibl, 2013; Gaillard, 2010),
- dem Anstieg des Meeresspiegels (u. a. Sahin und Mohamed, 2010; Sahin, 2011; Sobiech, 2013),
- zeitpunktspezifischen Änderungen der Vulnerabilität in Erdbebenrisikogebieten (u. a. Debnath, 2013),
- Hochwassergefahren (u. a. Rodríguez-Gaviria und Botero-Fernández, 2013; Giupponi, Giove, und Giannini, 2013; Chen und Chen, 2012),
- Kontamination von Grundwasser (u. a. Albuquerque, Sanz, Oliveira, Martínez-Alegría und Antunes, 2013) und Wassernutzung (u. a. Wu, Li, Ahmad, Chen und Pan, 2013) oder
- industriellen Risiken (u. a. Belliveau, Smit und Bradshaw, 2006).

Eine Anwendung in einer Vulnerabilitätsanalyse für die Zwecke des Risiko- und Krisenmanagements im Zusammenhang mit der Beherrschung von Stromausfallfolgen ist nicht bekannt.

### 6.2.6 Unschärfe in multikriteriellen Analysen

Die Operationalisierung von Eingangswerten einer multikriteriellen Analyse ist häufig von Unschärfe geprägt. Gerade wenn Daten aus einer Empirie, einer Modellsimulation oder von Expertenbeurteilungen stammen, bestehen Unschärfen in den zu verwendeten Daten. In der Literatur finden sich für die Durchführung von Risiko- und Gefahrenanalysen eine Vielzahl methodischer Ansätze, die mit dieser Form der Unsicherheit umgehen. Regelmäßig basieren diese Ansätze auf Fuzzy-Logik (u. a. Rocco Sanseverino and Ramirez-Marquez, 2011; Akgun, Kandakoglu und Ozok, 2010), Monte-Carlo-Simulationen (u. a. Perdikaris, Gharabaghi und McBean, 2011), probabilistischen Ansätzen (z. B. Blauhut, Stahl und Vogt, 2015) oder Delphi-Befragungen (u. a. Bañuls, Turoff und Hiltz, 2013; Lee, Jun und Chung, 2013).

## 6.3 Zielprogrammierung

Zielprogrammierung (engl. „Goal Programming“) ist eine der am häufigsten genutzten Form der multikriteriellen Mehrzieloptimierung. Mit der Anwendung einer Zielprogrammierung werden Abweichungen von vordefinierten Zielvorgaben minimiert. Je nach Zweck werden verschiedenartige Abweichungsmessungen und Zielerreichungsfunktionen verwendet.

Nach herrschender Meinung (vgl. u. a. Tamiz, Jones und El-Darzi, 1995; Tamiz, Jones und Romero, 1998; Jones und Tamiz, 2010, 2016) leitet sich die Zielprogrammierung aus den Arbeiten von Simon (1957) her. Demnach steht bei Entscheidungen weniger eine Optimierung als das Erreichen vorgegebener Ziele im Mittelpunkt. Anstatt eine oder mehrere Zielfunktionen zu minimieren oder zu maximieren, wird der Abstand zu einem vordefinierten Anspruchsniveau minimiert. Durch diese Orientierung an einer bestmöglichen Zielerreichung unterscheidet sich die Zielprogrammierung wesentlich von anderen Optimierungsansätzen. Die methodischen Ursprünge der Zielprogrammierung finden sich bereits in den 60er Jahren. Charnes et al. (1955) haben als Ersatzzielfunktion eine Abstandsfunktion verwendet und diese minimiert. Zielprogrammierung wurde erstmals explizit von Charnes und Cooper (1961) verwendet. Ein Überblick über Varianten und Modifikationen der Zielprogrammierung findet sich jeweils bei Jones und Tamiz (2016), Tamiz, Jones und Romero (1998), Tamiz et al. (1995), Schniederjans (1995), Romero (1986, 1991) und Ignizio (1976).

Die Zielprogrammierung werden im Allgemeinen klassifiziert in distanzmetrischen Varianten und von Entscheidungsvariablen abhängige und zielbasierte Varianten (Jones und Tamiz, 2016). Die bekanntesten distanzmetrischen Varianten sind

- lexigraphisches Zielprogrammieren („Lexicographic Goal Programming“),
- gewichtetes Zielprogrammieren („Weighted Goal Programming“) und
- die Zielprogrammierung nach Chebyshev („Chebyshev Goal Programming“).

Populäre Varianten der von Entscheidungsvariablen abhängigen und zielbasierten Zielprogrammierung sind u. a.

- fuzzy-basierte („Fuzzy Goal Programming“),
- Integer und binäre (“Integer and Binary Goal Programming“) oder
- Nicht-lineare Zielprogrammierung („Non-linear and fractional Goal Programming“).

Je nach Entscheidungsproblem lassen sich angepasste und modifizierte Varianten der Zielprogrammierung finden.

Die generische Form der Zielprogrammierung (vgl. Jones und Tamiz, 2016) setzt sich aus Entscheidungsvariablen  $DecVar_1, \dots, DecVar_{NumbGoal}$  und Zielniveaus  $Goal_1, \dots, Goal_{NumbGoal}$  mit  $NumbGoal$  Anzahl der Zielniveaus und  $NumbGoal \in \mathbb{N}$  zusammen.  $Goal_{SelGoalNumb}$  ist ein Zielanspruch für die Entscheidungsvariable  $DecVar_{SelGoalNumb}$  mit  $SelGoalNumb = 1, \dots, NumbGoal$ .

Die Zielansprüche werden durch die Entscheidungsträger vorbestimmt. Die zur Wahl stehenden Alternativen werden entsprechend ihrer Zielerreichung bzw. -abweichung beurteilt. Mit  $NumbAlt$  Anzahl der Alternativen und der ausgewählten Alternative  $SelAlt$  mit  $SelAlt = 1, \dots, NumbAlt$  wird für jede Alternative eine Zielerreichung  $Suff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb})$  für ein Zielanspruch  $DecVar_{SelGoalNumb}$  bestimmt. Hierfür sind die negativen Abweichungen  $neg_{NumbGoal}^{SelAlt}$  bzw. positiven Abweichungen  $pos_{NumbGoal}^{SelAlt}$  der Entscheidungsvariablen einer Strategie  $DecVar_{NumbGoal}^{SelAlt}$  vom Zielanspruch  $Goal_{NumbGoal}$  zu bilden. Eine negative Abweichung  $neg_{NumbGoal}^{SelAlt}$  berechnet sich wie folgt:

$$neg_{SelGoalNumb}^{SelAlt} = \begin{cases} Goal_{SelGoalNumb} - Suff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb}^{SelAlt}), & \text{wenn } Goal_{SelGoalNumb} > Suff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb}^{SelAlt}) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6-2)$$

Eine positive Abweichung  $pos_{NumbGoal}^{SelAlt}$  berechnet sich aus:

$$pos_{SelGoalNumb}^{SelAlt} = \begin{cases} Suff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb}^{SelAlt}) - Goal_{SelGoalNumb}, & \text{wenn } Suff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb}^{SelAlt}) > Goal_{SelGoalNumb} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6-3)$$

mit  $pos_{SelGoalNumb}^{SelAlt}, neg_{SelGoalNumb}^{SelAlt} \geq 0$  und  $SelGoalNumb = 1, \dots, GoalNumb$ .

Die generische Zielprogrammierung lautet:

$$Goal_{SelGoalNumb} = AltSuff_{SelAlt}(DecVar_{SelGoalNumb}^{SelAlt}) + neg_{SelGoalNumb}^{SelAlt} - pos_{SelGoalNumb}^{SelAlt} \quad (6-4)$$

Auf Basis dieser generischen Form der Zielprogrammierung wird eine Optimierungsfunktion  $Optfunc(pos_{SelGoalNumb}^{SelAlt}, neg_{SelGoalNumb}^{SelAlt})$  gebildet, durch die eine Minimierung der Abweichungen vorgenommen wird. Die beste Alternative ist dabei die, die die niedrigsten Abweichungen von den Schutzansprüchen aufweist. Die Wahl der Optimierungsfunktion ist abhängig vom Zweck der Zielprogrammierung.

Haben positive und negative Abweichungen unterschiedlichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung, können diese im Rahmen einer gewichteten Zielprogrammierung („Weighted Goal Programming“) gewichtet werden. Mit dem Gewicht  $w_{pos}$  für die Gewichtung positiver Abweichungen und dem Gewicht  $w_{neg}$  für die Gewichtung negativer Abweichungen und der Bedingung  $w_{pos} + w_{neg} = 1$  lautet die Optimierungsfunktion:

$$\min Optfunc = \sum_{SelGoalNumb=1}^{GoalNumb} (w^{pos} * pos_{SelGoalNumb}^{SelAlt} + w^{neg} * neg_{SelGoalNumb}^{SelAlt}) \quad (6-5)$$

Für dynamische Problemstellungen von spatial-temporalen Analysen finden sich verschiedene Ansätze der dynamischen Zielprogrammierung („Dynamic Goal Programming“). Je nachdem welcher Bestandteil einer üblichen Zielprogrammierung temporal veränderlich ist, werden problemspezifische Modifikationen des üblichen Algorithmus der Zielprogrammierung vorgenommen. Nach Caballero et al. (1998) und Hämmäläinen und Mäntysaari (2001) lassen sich erste Ansätze der dynamischen Zielprogrammierung in den Arbeiten von Levary (1984, 1986), Trzaskalik (1992, 1997) und Caballero und Gonzalez (1993, zitiert nach Ruiz, Caballero, Núñez, Lozano und Rey, 1998) finden. Levary (1984, 1986) führte eine lineare diskrete Mehrzieloptimierung an, wodurch die Zielerreichung multi-periodisch berücksichtigt wird. Trzaskalik (1992, 2003) gibt den Zielansprüchen eine Prioritätenfolge und löst so dynamische multikriterielle Probleme. Zur Berücksichtigung dynamischer Zielansprüche nutzen Caballero et al. (1998) eine Prioritätenfolge der Zielansprüche und stellen einen lexigraphischen Algorithmus zur Lösung vor. In der aktuellen Literatur, in dem dynamische Zielprogrammierungen verwendet werden, werden Algorithmen individuell auf das vorliegende Problem angepasst und mit weiteren Methoden der Operation Research kombiniert. Beispiele hierfür finden sich in Jolaia, Yazdianb, Shahanaghieb und Khojastehc (2011) sowie bei Demirtas und Ustun (2009). Ein vorherrschend verwendeter Ansatz oder eine Klassifizierung der Ansätze erscheint aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Modifikation nicht möglich.

In der Katastrophenvorsorge und -bewältigung finden sich insbesondere in der humanitären Logistik Anwendungen der Zielprogrammierung (u. a. Ransikarbuma und Masona, 2016; Ortuño, Tirado und Vitoriano, 2011; Xie und Tang, 2011). Eine explizite Anwendung einer Zielprogrammierung unter Verwendung der Ergebnisse einer Vulnerabilitätsanalyse und vordefinierter Schutzziele ist bisher nicht bekannt (vgl. Abschnitte 4.7.3 und 4.7.4).

## 6.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde in die Grundlagen der Entscheidungstheorie und -modelle eingeführt und die Funktionsweise von multiattributiven Ansätzen und von einer Zielprogrammierung als besonderer Form der multikriteriellen Analysen erläutert. Beide bilden die methodischen Grundlagen für die Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse.

## 7 Entscheidungspraktische und methodische Implikationen

Zur Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse sind aus den vorhergehenden Kapiteln entscheidungspraktische und methodische Implikationen abzuleiten. Diese beziehen sich insbesondere auf das durch die Entscheidungsunterstützung zu adressierende Entscheidungsproblem, die Feststellung der Entscheidungsträger, des Entscheidungsfeldes, des Zielsystems sowie deren methodischen Lösungsansätze.

### 7.1 Entscheidungsproblem

Kommt es zu einem Stromausfall, sind Ressourcen, mit denen den negativen Wirkungen eines Stromausfalls entgegengewirkt und ggf. ein zeitlich beschränkter kontinuierlicher Betrieb Lokaler Kritischer Infrastrukturen aufrechterhalten werden kann, beschränkt verfügbar. Grundlage der Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren ist sowohl in der Vorbereitung als auch in der akuten Krisenbewältigung von Stromausfällen die sogenannte Gefahrenprognose (vgl. Abschnitt 3.2). Anhand der Gefahrenprognose sind die beschränkt zur Verfügung stehenden Ressourcen so einzusetzen, dass stromausfallbedingte Gefahren (vgl. Abschnitte 4.1 und 4.5) vermieden, beherrscht oder bewältigt werden. Unter Ressourcen sind insbesondere Notstromaggregate und Netzersatzanlagen, Treibstoff, aber auch die Kräfte und Transportmittel für Evakuierungen und ggf. die wenige noch verfügbare elektrische Energie bei Strommangellagen zu verstehen (vgl. Abschnitte 3.1.3, 4.2.3 und 4.8).

Um eine effektive Katastrophenabwehr sicherzustellen, sind entsprechende Pläne (Vorbereitung, Vorsorge, Absprachen, Bedarfspläne, Gefahrenabwehrplanung) zu erstellen (vgl. Abschnitt 3.3), Schwachstellen und Stärken im Sinne einer Gefahrenprognose zu analysieren und im Falle einer nicht bedarfsdeckenden und schutzzielgerechten Versorgung (vgl. Abschnitte 3.3.3 und 3.3.4) prioritäre Schaltungen von Stadtteilen, Gemeinden oder einzelnen bzw. Gruppen von Lokalen Kritischen Infrastrukturen, Netzinselbetriebe (vgl. Abschnitt 4.2.5) oder diskriminierende Lastabwürfe (vgl. Abschnitt 4.2.6) vorzunehmen, um Schäden an Schutzgütern zu minimieren (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 4.3) bzw. ein Mindestversorgungsniveau aufrechtzuerhalten (vgl. Abschnitt 4.7.3).

Im klassischen entscheidungstheoretischen Sinne könnte daher ein Ressourcenallokationsproblem erkannt werden, das die Verteilung knapper Ressourcen mit dem Ziel beleuchtet und auf ein Ranking hinausläuft, pareto-effiziente Allokationen der Ressourcen herzustellen. Aufgrund der Ausgangslage der Entscheidungssituation ist jedoch eine reine ökonomisch-effiziente Allokation nicht zielführend, da Lösungen von Allokationsproblemen nicht zwingend zu gesellschaftlich erwünschten Verteilungen führen (u. a. Von Twickel, 2002; Martini, 2008). Pessimistischer Weise ist davon auszugehen, dass jegliche Allokationsentscheidung je nach Krisencharakter der Ausgangssituation und aufgrund der in der Regel per se unvermeidbaren Schutzzielabweichung zu einem Dilemma führt, für das es keine pareto-effiziente Allokation gibt. In Bezug zu Kollektivrechtsgütern handelt es sich darüber hinaus sowohl beim Zweck der Verteilung der Ressourcen als auch bei den zu verteilenden Ressourcen selbst um öffentliche Güter (vgl. Abschnitt 4.5.2), bei deren Verteilung weniger die Effizienz als eine schutzgutorientierte und bedarfsgerechte Verteilung im Sinne der Erfüllung staatlicher Schutzpflichten (vgl. Abschnitt 4.3) im Vordergrund steht.

Aus diesen Gründen besteht vielmehr ein von Allokationsproblemen zu unterscheidendes Distributionsproblem. Bei diesem Distributionsproblem sind neben den ökonomischen die in den Kapiteln 2, 3, und 5 erörterten normativen und gesellschaftlichen Aspekte zu berücksichtigen. Die Lösung eines solchen Distributionsproblem hat zum Ziel, eine schutzgutorientierte und bedarfsgerechte Verteilung zu realisieren. Die damit bezweckte Verteilungsgerechtigkeit kann durch das grundlegende krisencharakterisierende Dilemma nicht unbedingt gelöst werden, eine Entscheidungsunterstützung soll jedoch zur Lösung des Distributionsproblems wesentlich beitragen. Hierzu bedarf es dementsprechend einer gewissen Vorhersage und Beurteilung der Stromausfallfolgen.

Die Entscheidungsunterstützung hat sowohl die Belange vor (Vorbereitung im Sinne der Bedarfs- oder Gefahrenabwehrplanung) als auch während eines Stromausfalls (akute Krisenbewältigung) zu betrachten. Hierfür ist sie in geeigneter Weise in bestehende Theorien der Katastrophenvorsorge einzubetten (s. a. Kapitel 5).

## 7.2 Entscheidungsträger

Aufgrund des Dezentralisierungsprinzips der operativen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes (s. Kapitel 3.1.2) sind als Entscheidungsträger in erster Linie die für das Risiko- und Krisenmanagement benannten natürlichen Personen der örtlich zuständigen Unteren Katastrophenschutzbehörden, die ebenso Mitglieder des jeweiligen Verwaltungs- oder Führungsstabes sind, zu erkennen.

Stromausfallbedingte Gefahren sind jedoch wesentlich geprägt durch ihren Bezug zu den Lokalen Kritischen Infrastrukturen, die sich im jeweiligen Untersuchungsgebiet befinden (vgl. Abschnitt 4.5). Deren Betreiber sind im Hinblick auf das Kooperationsprinzip (vgl. Abschnitt 3.1.3) in die Entscheidungsfindung einzubinden. Auch im Hinblick des Selbsthilfepinzips (vgl. Abschnitte 3.1.5 und 4.4) sind Betreiber Lokaler Kritischer Infrastrukturen daher als Entscheidungsträger zu erkennen. Durch die Zusammenarbeit der Unteren Katastrophenschutzbehörden und der Betreiber Lokaler Kritischer Infrastrukturen in Sicherheitspartnerschaften findet in der Regel bereits eine intensive Zusammenarbeit statt (vgl. Abschnitt 4.4). Im Rahmen der akuten Krisenbewältigung werden Betreiber auch in den jeweiligen Verwaltungs- und Führungsstäben als Fachberater integriert.

Hinsichtlich der Anforderungen an eine Gefahrenprognose ist beim Entscheider von einem rational handelnden Entscheider auszugehen, der nach Einhaltung der normativen Grundlagen und der Erfüllung staatlicher Schutzpflichten strebt und der nach objektivem Maß handelt (vgl. Abschnitt 3.2). Das Handeln nach objektivem Maß bemisst sich danach, wie ein typischer Durchschnittsentscheider unter Berücksichtigung der Umstände der konkreten Entscheidungssituation das Potential eines Schadenseintritts beurteilt (vgl. Abschnitt 3.2). Die anvisierte Entscheidungsunterstützung soll ihm helfen, die Anforderungen an die Gefahrenprognose zu erfüllen.

Die Entscheidung ist durch die zu beteiligenden Akteure (u. a. Gefahrenabwehr, Katastrophenschutz, Betreiber Lokaler Kritischer Infrastrukturen) in einem Landkreis oder einer kreisfreien Stadt idealerweise in einem Konsens zu treffen. Bei einer solchen Gruppenentscheidung sind die divergierenden Ansichten auch unter Berücksichtigung des lokalen Wissens (vgl. Abschnitte 4.7.2 und 5.2) zu würdigen.

Als Entscheidungsträger werden hauptamtliche und ehrenamtliche Funktionsträger der Gefahrenabwehr bzw. des Katastrophenschutzes einer Gebietskörperschaft verstanden, die entsprechend der geltenden Brand-, Rettungsdienst- und Landeskatastrophenschutzgesetze für Tätigkeiten der Gefahrenabwehr benannt, bestellt oder angestellt sind. Dies schließt bei entsprechender Qualifikation und Funktion solche Entscheidungsträger ein, die Tätigkeiten in einem Führungs- und/oder Leitungsstab oder unterstützende Koordinierungs- und Leitungsaufgaben zur Führung im Sinne der DV 100 (SKK, 1999) (z. B. Leitungs- und Koordinierungsgruppe sowie Fachberater, also auch Betreiber von Kritischen Infrastrukturen) und zur Vorbereitung von Schadenslagen wie die Erstellung von Gefahrenabwehr-, Bedarfs- und Katastrophenschutzplänen wahrnehmen (z. B. entsprechende kommunale Arbeitskreise und Projektgruppen).

Die federführende Durchführung der Vulnerabilitätsanalyse kann durch die Entscheidungsträger selbst oder durch sie beauftragte Analysten erfolgen. So dient die Vulnerabilitätsanalyse auch als Planungsinstrument für beratende Ingenieure, für nach der VdS Richtlinie 3104 zertifizierte Fachplaner Gefahrenabwehr oder für Stadtplaner, die sie für ihre freiberuflichen und unabhängigen Beratungsdienstleistungen für Gebietskörperschaften einsetzen.

### 7.3 Lösungsmethode

Als Lösung soll eine spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse als ein entscheidungslogisches Verfahren dienen, durch deren Ergebnisse die Entscheider in der initialen Krisenbewältigung von Stromausfällen unterstützt werden.

Die Vulnerabilitätsanalyse soll dabei auf einem Entscheidungsmodell basieren, das die Entscheidungssituation auf die entscheidungsrelevanten Aspekte abstrahiert und strukturtreu abbildet (vgl. Abschnitt 6.1.2). Um die Anforderungen an eine Gefahrenprognose (vgl. Abschnitt 3.2) zu adressieren, ist ein Bewertungsmaßstab für das Gefahrenpotential zu entwickeln, mit dem

- die raum-zeitlichen Gefahren,
- die Betroffenheit von Schutzgütern,
- die Wertigkeit bedrohter Schutzgüter und
- das Abweichen von Schutzzielen

beurteilt werden kann (vgl. Abschnitt 4.8). Zur Umsetzung braucht es eine nachvollziehbare, effektive und praktikable Methodik. Eine Modifizierung des multiattributiven Verfahrens erscheint daher als zielführend.

Um eine ganzheitliche Betrachtungsweise des spatial-temporalen Gefahrenpotentials in der Vulnerabilitätsanalyse abzubilden, sind unterschiedliche Umweltzustände zu berücksichtigen. Umweltzustände wie Jahreszeit und Uhrzeit werden vom Zeitpunkt des Ausfallbeginns, betroffene Stadtgebiete von den Ausmaßen eines betrachteten Stromausfallszenarios definiert. Die Handlungsalternativen stellen die betrachteten Raumordnungen dar, die hinsichtlich ihres Gefahrenpotentials bewertet werden. Innerhalb der Vulnerabilitätsanalyse werden diese als Alternativen verstanden, die hinsichtlich ihres Gefahrenpotentials differenziert werden.

Interdependenzen und Kaskadeneffekte werden berücksichtigt, indem die von einem Stromausfall resultierenden sekundären Kaskadenereignisse basierend auf der physikalischen Dependenz der betrachteten KRITIS-Einrichtung von der Elektrizitätsversorgung analysiert und bewertet werden. Das Interesse liegt dabei auf der Identifizierung von Umschlagspunkten, potentiellen Eskalationsmechanismen und damit den ortsspezifischen Vulnerabilitätsszenarien, die durch den Ausfall der Stromversorgung als die höchst relevanteste Dependenz von Kritischen Infrastrukturen verursacht wird.

Einige entscheidungsrelevante Informationen sind hinsichtlich der öffentlichen Sicherheit und betrieblicher Unternehmerinteressen sensibel. Entsprechend eingeschränkt und aufwendig ist der Zugang zu diesen Informationen. Gleichwohl den Entscheidern auch bei der Informationsbeschaffung und -verarbeitung ein rationales Verhalten unterstellt wird (s. a. Kapitel 6), ist ihnen lediglich zuzumuten, dass Informationen in der Vulnerabilitätsanalyse verwendet werden, die mit angemessenem Aufwand von ihnen ermittelt und genutzt werden können.

Die Vulnerabilitätsanalyse bedarf entsprechend des Krisenmanagements in Deutschland (vgl. Abschnitt 4.4) eines Entscheidungsmodells, in dem Gruppenbeurteilungen eingebunden werden. Da mit einer Gruppenbeurteilung durchaus eine auf Subjektivität beruhende Streuung von Bewertungen einhergeht, sind ebenfalls unscharfe Informationen zu berücksichtigen. Die spatiale Bewertung der Vulnerabilitätsanalyse bezieht sich auf bestehende Raumordnungen eines Untersuchungsgebietes, die sich während der Untersuchung nicht ändert. Die betrachteten Alternativen entsprechen daher einem diskreten Lösungsraum. Des Weiteren wird mit der Analyse des Gefahrenpotentials eine einzelne Zielvorstellung anvisiert. Das Gefahrenpotential ist entsprechend dem Gefahrenverständnis (vgl. Abschnitt 3.2) in seiner Erheblichkeit und seiner Dringlichkeit zu differenzieren.

## 7.4 Zielsystem

Das Zielsystem der Entscheidungsunterstützung bildet in erster Linie die Erfüllung der staatlichen Schutzpflicht (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 4.3). Die für die Erfüllung der Schutzpflichten zur Verfügung stehenden Ressourcen sind aber häufig beschränkt, so dass nicht immer alle Schutzgüter gleichermaßen vor einem Schadenseintritt geschützt werden können. Hierfür sind einzelne Schutzgüter prioritär zu behandeln mit der Konsequenz, dass andere Schutzgüter einen Schaden erleiden könnten. In dieser Hinsicht sind zwar die Schutzziele konfliktär, die Verwendung eines einheitlichen Maßstabes basiert jedoch auf einer einzelnen Bewertungsfunktion (Zielfunktion) und erscheint als Entscheidungsunterstützung ausreichend. Die Bewertungsfunktion hat zeitpunktabhängig einerseits die aus Schutzpflichten abzuleitenden Schutzziele (vgl. Abschnitte 3.3.2, 3.3.4 und 4.7) und andererseits die Bewertung von Gefahrenpotentialen (vgl. Abschnitte 3.2, 4.6.2 und 4.7) zu adressieren. Hierzu sind operationalisierbare, entscheidungsrelevante Kriterien zur Bemessung der Stromausfallfolgen und der Schutzzielerreichung heranzuziehen.

Eine Entscheidungsunterstützung muss dahingehend Aufschluss geben, bis wann Einrichtungen im Rahmen der Selbsthilfe stromausfallbedingte Gefahren effektiv abwehren können, und ab wann Gefahren eintreten, die der staatlichen Intervention bedürfen. In diesem Sinne sind die Grenzen der Selbsthilfe als auch die Dringlichkeit und Erheblichkeit drohender Verletzungen von Schutzpflichten durch stromausfallbedingte Gefahren darzustellen.

## 7.5 Entscheidungsfeld

Im Hinblick auf das Dezentralisierungsprinzips der operativen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes (s. Kapitel 3.1.2) sind als Untersuchungsgebiete zuvorderst die einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte zu erkennen (vgl. Abschnitte 3.1.2, 3.3.2 und Abschnitt 4.3). Gleichwohl können für die Zwecke der überörtlichen und im Sinne einer kooperativ abgestimmten Katastrophenschutzplanung (vgl. Abschnitte 3.1.2, 3.1.3, 3.3.1, 3.3.2 und 4.7.2) und der Raumplanung (vgl. Abschnitte 4.6.1, 4.7.1 und Abschnitt 5.3) auch großflächigere Gebiete betrachtet werden.

Der Eintritt, die Dauer und der Verlauf eines Stromausfalls sowie die davon betroffenen Gebiete bzw. die betroffenen Lokalen Kritischen Infrastrukturen sind ex ante nicht vorhersehbar. Verschiedene Szenarien eines Stromausfalls sind denkbar. Im Rahmen der akuten Krisenbewältigung kann ein bereits eingetretener Ausfall, bei dem Ausfallbeginn und betroffene Fläche bzw. Kritische Infrastrukturen bekannt sind, analysiert werden. Im Rahmen der Vorbereitung ist für diesen Zweck ein plausibles Stromausfallszenario festzulegen. Im Hinblick auf die Empirie (vgl. Abschnitte 4.2) und die Vorhersagbarkeit erscheint der Fokus auf initiale Stromausfallwirkungen sachgerecht.

Das Unwissen um das konkrete Stromausfallszenario bedingt ein Unwissen über die möglichen Handlungsoptionen zur Erfüllung der Schutzpflichten. Die zur Verfügung stehenden Maßnahmen ergeben sich erst aus der individuell vorliegenden Situation und deren Randbedingungen, die ex ante nicht vorhersehbar sind und sich erst mit der Entscheidungsfindung darstellen. Sie sind nicht unbedingt beschränkt und können in unterschiedlicher Weise zu Handlungsoptionen kombiniert werden. Aufgrund dieses Unwissens steht für die anvisierte Entscheidungsunterstützung weniger die Wahl einer Handlungsoption aus einer Menge an Handlungsoptionen oder eine optimale Kombinatorik als vielmehr eine Entscheidungsunterstützung zur Förderung der Bildung geeigneter Vorbereitungs- und Bewältigungsstrategien und zur Beurteilung der Effektivität möglicher Handlungsoptionen im Vordergrund.

Sowohl in der akuten Krisenbewältigung als auch in der Vorbereitung bedarf es eines einheitlichen, zeitabhängigem Beurteilungsmaßes, mit der das Gefahrenpotential von einzelnen Lokalen Kritischen Infrastrukturen, Gruppen von Einrichtungen eines bestimmten Typs oder von Einrichtungen eines bestimmten Gebietes im Sinne einer Gefahrenprognose bemessen wird (vgl. Abschnitt 3.2).

Das Untersuchungsgebiet und die Anzahl der zu berücksichtigenden Lokalen Kritischen Infrastrukturen ändern sich im Untersuchungszeitraum nicht. Gleichwohl verändern sie jedoch Eigenschaften der Lokalen Kritischen Infrastrukturen, die im Hinblick auf die Durchhaltefähigkeit während eines Stromausfalls von Relevanz sind. Diese und die Heterogenität Lokaler Kritischer Infrastrukturen sowie deren Einfluss auf die Schutzwürdigkeit sind zu berücksichtigen. Nicht nur die Folgen für einzelne Einrichtungen sind darzustellen, sondern auch die Folgen der Nicht-Verfügbarkeit einzelner Einrichtungen im Gesamtsystem der Daseinsvorsorge.

Die Entscheidungsunterstützung ist in Sicherheitspartnerschaften einzubetten und hat diese zu unterstützen (vgl. Abschnitt 3.1.3). Ziel dieser Einbettung ist es, gemeinsame Beurteilungen zu ermöglichen und ein einheitliches Verständnis über die Wirkungen eines Stromausfalls zu generieren. Im Hinblick auf mögliche divergierende Beurteilungen im Entscheidungsgremium sind Unschärfen bei der Beurteilung der Betroffenheit und Wertigkeit von Schutzgütern aufzuzeigen und die Bildung eines Konsenses und eines einheitlichen Gefahrenverständnisses innerhalb von Sicherheitspartnerschaften zu fördern. Der zu entwickelnde Maßstab zur Gefahrenprognose dient dazu, mögliche Maßnahmen(-bündel) hinsichtlich ihrer Effektivität zu bewerten.

In Anbetracht dessen, dass zu wenig geeignete und zentral verfügbare Daten über objektspezifische und individuelle Eigenschaften Kritischer Infrastrukturen zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitte 4.6, 5.5 und 5.6), sind die innerhalb der Sicherheitspartnerschaft verfügbaren Daten der KRITIS-Einrichtungen so zu nutzen, dass nur ein verhältnismäßig geringer Aufwand zur Datengewinnung (vgl. Abschnitt 5.1) und zur Entwicklung von KRITIS-Katastern entsteht (vgl. Abschnitt 4.6.2). Dies sichert zudem die Praktikabilität der anvisierten Entscheidungsunterstützung.

Die Beherrschung der initialen Folgen eines Stromausfalls für die KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft wird als der bedeutendste Hebel für die Stärkung der gesellschaftlichen Resilienz verstanden (vgl. Abschnitt 5.6). Die Resilienz schließt neben den Fähigkeiten der Vorbereitung und der Absorbierung auch die Wiederherstellung des Normalzustandes ein. Da in dieser Arbeit die durch stromausfallbedingten Gefahren hervorgerufenen Schäden für die Versorgung mit lebenswichtigen Dienstleistungen im Vordergrund stehen, wird die Resilienz in dieser Arbeit auf die Vorbereitung und auf die akute Bewältigung beschränkt. Damit besteht auch keine Notwendigkeit, weitgehende Interdependenzen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitte 5.6)

## **7.6 Fazit**

In diesem Kapitel wurden bezugnehmend auf die vorangegangenen Kapitel entscheidungspraktische und methodische Implikationen für die Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse zusammengefasst. Dabei wurde das Entscheidungsproblem, die Entscheidungsträger, die Lösungsmethode, das Zielsystem und das Entscheidungsumfeld konkretisiert.

# 8 Einführung in die Entwicklung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse

Zur Vorbereitung der Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wird in diesem Kapitel die Stellung der Vulnerabilitätsanalyse innerhalb der adressierten Entscheidungsfindungsprozesse der Vorbereitung (Bedarfs- oder Gefahrenabwehrplanung) und der akuten Krisenbewältigung erläutert. Ziel ist es, die Rolle der Vulnerabilitätsanalyse mit dem Entscheidungsablauf, den Entscheidungsträgern und den normativen Anforderungen in Bezug zu setzen. Des Weiteren wird die grundlegende Struktur der Entscheidungsunterstützung dargestellt. In Bezug auf die normativen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 4) wird die Einbettung der Vulnerabilitätsanalyse in die relevanten Entscheidungsprozesse erläutert (vgl. Abschnitte 8.1 und 8.2).

In der Vulnerabilitätsanalyse müssen sich auch die Theorien der Katastrophenvorsorge (vgl. Kapitel 5) wiederfinden. Daher wird die Einbettung in die Theorien der Katastrophenvorsorge im Abschnitt 8.4 vorgenommen. Abschließend werden die grundlegende Struktur und das Verfahren der Vulnerabilitätsanalyse in Abschnitt 8.4 erläutert.

## 8.1 Einbettung in die Entscheidungsprozesse der Vorbereitung

Die bedarfsorientierte Vorbereitung zur Bewältigung stromausfallbedingter Gefahren (Bedarfs- oder auch Gefahrenabwehrplanung) lehnt sich an den standardisierten Risikomanagementprozess der ISO 31 000 an (Abbildung 8.1). Zunächst wird hierfür mit der Festlegung des Untersuchungsgebietes der Kontext der Bedarfsplanung festgesetzt. Für die eigentliche Risikobewertung ist ein KRITIS-Kataster zu erstellen. Dieses dient der Identifikation der zu berücksichtigenden Schutzgüter und stellt im Sinne der ISO 31 000 die Risikoidentifikation im Risikomanagementprozess dar. Im KRITIS-Kataster werden relevante Eigenschaften der zu berücksichtigenden Einrichtungen Kritischer Infrastrukturen im Untersuchungsgebiet aufgelistet (vgl. Abschnitt 4.6.2). Auf dieser Basis baut die Gefährdungsanalyse bzw. Risikoanalyse auf, in der das Bemessungsszenario (vgl. Abschnitte 4.2 und 4.7.4) und operative Schutzziele (vgl. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.4) festgelegt werden. Anhand eines definierten Bemessungsstromausfalls erfolgt innerhalb der Gefährdungsanalyse die Durchführung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse. In ihr werden die Wirkungen eines Bemessungsstromausfalls auf die festgelegten Schutzgüter schutzzielorientiert und raumzeitlich im Sinne einer Gefahrenprognose (vgl. Abschnitt 3.2) analysiert.

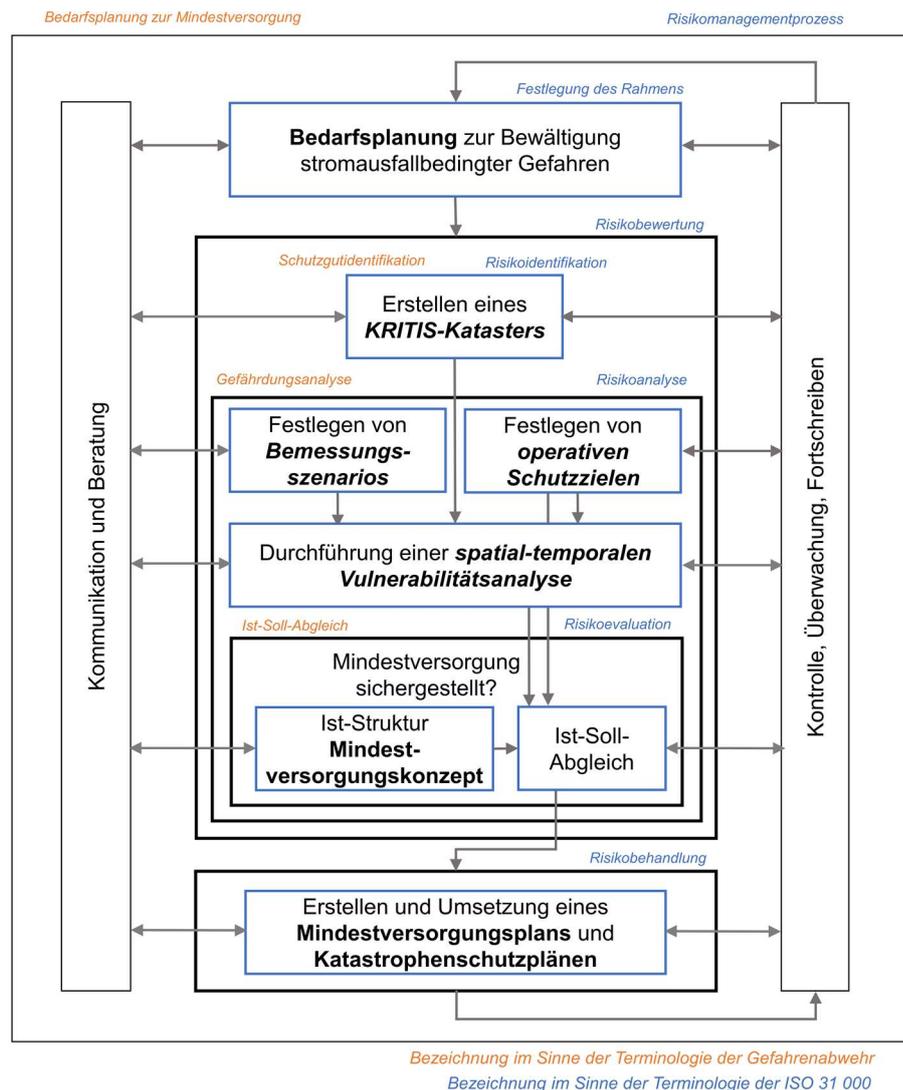


Abbildung 8.1: Prozess der Bedarfsplanung zur Vorbereitung auf stromausfallbedingte Gefahren mit Verweis zum Risikomanagementprozess.

Mithilfe der Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse schließt sich die Risikoevaluation an, in der die Sicherstellung einer Mindestversorgung (vgl. Abschnitt 4.7.3) überprüft wird. Durch diesen Ist-Soll-Abgleich sind konkrete Handlungsnotwendigkeiten abzuleiten. Entsprechend effektive Maßnahmen, die der Befriedigung dieser Notwendigkeiten dienen, werden in die umzusetzenden Mindestversorgungsplänen (vgl. Abschnitt 4.7.3) und Katastrophenschutzplänen (vgl. Abschnitt 3.3) aufgeführt (Risikobehandlung).

Die Zwischenergebnisse der Bedarfsplanung sind mit allen relevanten Entscheidungsträgern abzusprechen und zu beraten. Darüber hinaus stellt die Durchführung der Bedarfsplanung kein einmaliger Vorgang dar, sondern ist nach entsprechender Kontrolle und Überwachung seiner Wirksamkeit sowie entsprechend gemachter Veränderungen periodisch zu wiederholen und fortzuschreiben.

## 8.2 Einbettung in die die Entscheidungsprozesse der akuten Krisenbewältigung

Die Entscheidungsfindungsprozesse der akuten Krisenbewältigung, in der sich die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse einbettet, orientiert sich ebenso an den Standards des Risikomanagementprozesses der ISO 31 000 (Abbildung 8.2).

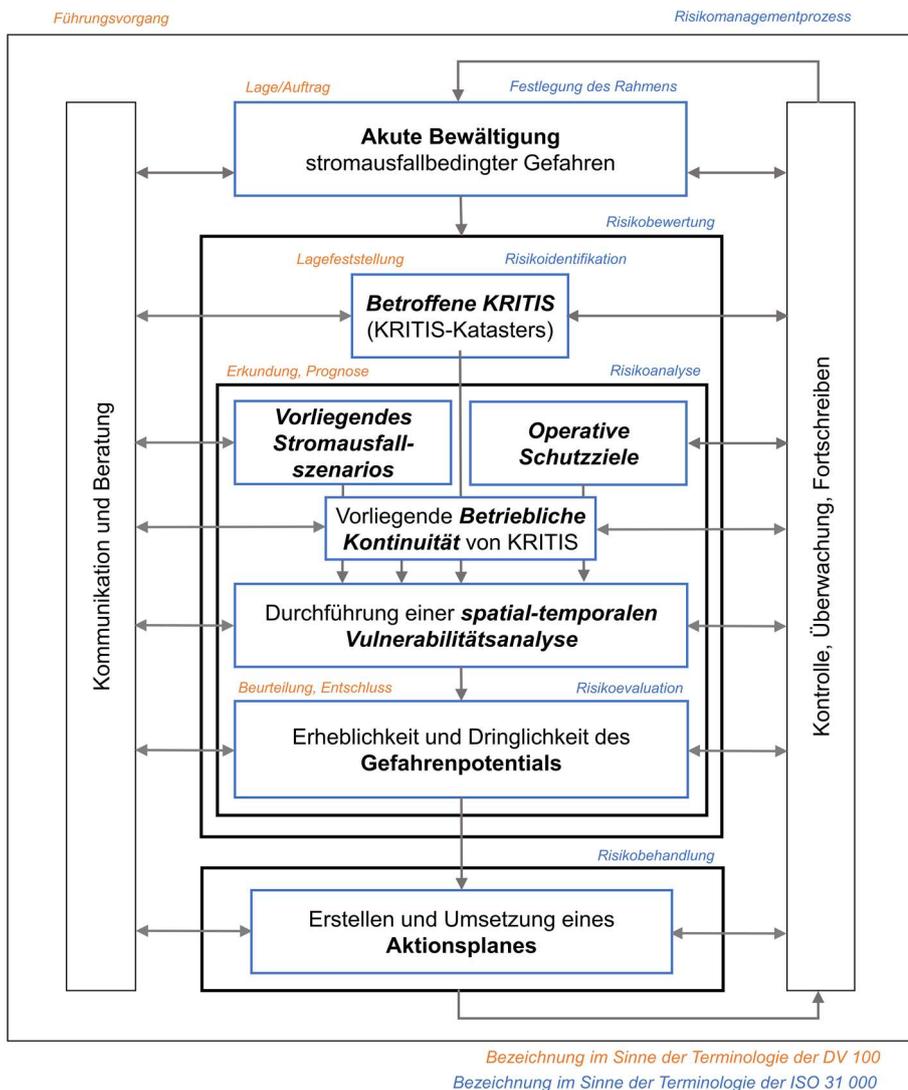


Abbildung 8.2: Prozess der akuten Krisenbewältigung von stromausfallbedingten Gefahren mit Verweisen zum Risikomanagementprozess.

Der Entscheidungsfindungsprozess der akuten Krisenbewältigung bildet aufgrund der akuten Entscheidungsfindung ein Führungsvorgang gemäß der Dienstvorschrift 100 ab, dessen Anforderungen entsprechend zu erfüllen sind. Nichtsdestotrotz weicht er vom Vorgehen zur Bedarfsplanung in der Vorbereitung auf Stromausfälle in einigen Punkten ab. Zunächst ist ebenso zur Bildung des Kontextes das Untersuchungsgebiet festzulegen (vgl. Abschnitt 4.6.2). Dieses ergibt sich aus dem Gebiet, das von einem statt-

findenden und fortwährenden Stromausfall betroffen ist. Auch die Risikobewertung basiert auf dem KRITIS-Kataster. Im Rahmen der Lagefeststellung ist zu ermitteln, welche Kritischen Infrastrukturen im Untersuchungsgebiet von stromausfallbedingten Gefahren bedroht sind (Risikoidentifikation).

Anhand des vorliegenden Stromausfallszenarios kann eine Risikoanalyse erfolgen, in der mit festgelegten operativen Schutzziele (vgl. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.4) und der vorliegenden betrieblichen Kontinuität der betroffenen Kritischen Infrastrukturen eine spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt wird. Mithilfe deren Ergebnissen wird die Dringlichkeit und Erheblichkeit des Gefahrenpotentials auch hinsichtlich der Sicherstellung einer Mindestversorgung beurteilt (Risikoevaluation).

Davon werden wiederum Handlungsnotwendigkeiten abgeleitet, für die kurzfristig effektive Maßnahmen herzuleiten sind. Diese dienen der Erstellung eines umzusetzenden Aktionsplanes, mit dem stromausfallbedingte Gefahren bewältigt werden (Risikobehandlung).

Auch in der akuten Krisenbewältigung sind lageabhängig die Zwischenergebnisse des Risikomanagementprozesses im Sinne des Führungssystems gemäß der Dienstvorschrift 100 mit allen relevanten Entscheidungsträgern abzusprechen und zu beraten. Darüber hinaus stellt sich die Beherrschung nicht durch den einmaligen Durchlauf eines Führungsvorganges dar. Er ist während des anhaltenden Stromausfalls vielmehr nach entsprechender Kontrolle und Überwachung der Wirksamkeit des bestehenden Aktionsplanes periodisch zu wiederholen.

### **8.3 Einbettung in Theorien der Katastrophenvorsorge**

Bestehende Theorien der Katastrophenvorsorge sind in den Rahmen der vorliegenden Arbeit einzubetten. Ohne in den nachfolgenden Kapiteln tiefergreifenden methodischen Auseinandersetzungen vorzugreifen, werden nachfolgend die Begriffe der Vulnerabilität, der Kritikalität, der Bewältigungskapazität und der Resilienz im Sinne des Kontextes des Ausfalls Kritischer Infrastrukturen und der Abwehr stromausfallbedingter Gefahren für die Zwecke dieser Arbeit definiert.

Die Vulnerabilität wird als grundlegendes theoretisches Konzept für die Gefahrenprognose verwendet. Vulnerabilität wird dabei als Maß verstanden, das ein konkretes, gegenwärtiges und erhebliches Gefahrenpotential eines Untersuchungsgegenstandes (Einrichtung Kritischer Infrastruktur, Gruppen von Einrichtungen eines bestimmten Typs, Gemeinden oder Stadtteile) darstellt. Als Gefahren werden die Folgen eines Stromausfalles und die daraus resultierenden Leiden bzw. Schäden erkannt, die sich aus Störungen bei der Versorgung mit lebensnotwendigen Dienstleistungen und Gütern erwachsen.

Die Vulnerabilitätsanalyse bildet eine inhärente nicht direkt messbare Eigenschaft des jeweiligen Untersuchungsgegenstandes ab, die sich wiederum aus der Vulnerabilität der jeweiligen Schutzgüter herleitet. Die Vulnerabilität berücksichtigt die Kritikalität und die Bewältigungskapazität einzelner Einrichtungen und hat raum-zeitliche Dimension, durch die das Potential stromausfallbedingter Gefahren hinsichtlich ihrer Gegenwärtigkeit und Tragweite für aus Schutzpflichten herzuleitende Schutzgüter im Untersuchungsgebiet operationalisiert werden. In dieser Hinsicht stellt die Vulnerabilität ein objektives Maß dar, durch die Tatsachen, die Gefahrindiz oder Gegenindiz darstellen, derart gegeneinander abgewogen werden, dass das Gefahrenpotential für den Untersuchungsgegenstand offenkundig wird.

Als Kritikalität wird in der vorliegenden Arbeit die Bedeutsamkeit einer einzelnen Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die ihre Störung oder ihr Funktionsausfall durch eine verwirklichte stromausfallbedingte Gefahr auf die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen im Sinne der Sicherstellung von staatlichen Schutzpflichten hat. Es ist ein relatives, zeitabhängiges Maß, welches den Einfluss einer Einrichtung auf die lebensnotwendige Versorgung der Gesellschaft darstellt, wenn diese eine Störung oder ein Funktionsausfall erleiden würde. Hierbei ist nicht nur die Größe der jeweiligen Einrichtung im Vergleich zu anderen vergleichbaren Einrichtungen zu berücksichtigen, sondern auch ihre Substituierbarkeit durch vergleichbare und vorhandene Einrichtungen und ihre Relevanz hinsichtlich der Sicherstellung von Schutzpflichten im Untersuchungsgebiet.

Der Begriff der Bewältigungskapazität bezieht sich in der vorliegenden Arbeit insbesondere auf die initiale Phase eines potentiellen bzw. akuten Stromausfalls. Aufgrund dessen werden unter Bewältigungskapazität alle Fertigkeiten und Ressourcen verstanden, die bei einer KRITIS-Einrichtung während eines Stromausfalls verfügbar sind und es ihr ermöglichen, die direkten negativen Folgen eines Stromausfalls zu beherrschen, ohne dass sich stromausfallbedingte Gefahren zu Schäden verwirklichen. Die Bewältigungskapazität bezieht sich auf die kontinuierliche Aufrechterhaltung der jeweils lebenswichtigen Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung, die akut oder potentiell von einem Stromausfall betroffen ist.

Sobald eine Stromversorgung wieder vollumfänglich hergestellt ist, endet der Betrachtungszeitraum der Analyse. Daher ist ausschließlich die Widerstandsfähigkeit der KRITIS-Einrichtungen, die während eines Stromausfalls potentiell betroffen sind, von Interesse. Fähigkeiten zur Wiederherstellung des Normalzustandes nach dem Schadensereignis bleiben unberücksichtigt, könnten jedoch durch entsprechende methodische Erweiterungen integriert werden. Die so festgelegte Bewältigungskapazität stellt ausschließlich die Gefahrenabwehr in den Mittelpunkt und schließt Fähigkeiten zur Wiederherstellung und Anpassung aus.

Da lediglich die Akutphase berücksichtigt wird, bleibt auch die Anpassungsfähigkeit unberührt. Nichtsdestotrotz unterliegen aus langfristiger Sicht auch Widerstandsfähigkeiten der KRITIS-Einrichtungen einem stetigen Wandlungsprozess (vgl. Cardona et al., 2012). Durch What-if-Analysen ist es möglich, die Veränderungen zukünftiger Entwicklungsschritte zu bewerten und so eine adäquate Anpassung an stromausfallbedingte Gefahren sicherzustellen. Somit verkörpert das Analyseverfahren selbst eine Fähigkeit zur Anpassung.

Die Resilienz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Maß zur Bewertung der Effektivität von Maßnahmen und des Gefahrenpotentials genutzt. Dabei wird Resilienz als ein Maß der Fähigkeit eines Untersuchungsgegenstandes verstanden, die nachteiligen Wirkungen eines Stromausfalls zu absorbieren und eine Kontinuität der Versorgung mit lebensnotwendigen Dienstleistungen und Gütern sicherzustellen.

### **8.4 Struktur und Verfahren der Vulnerabilitätsanalyse**

Methodisch basiert die Vulnerabilitätsanalyse auf der Funktionsweise einer multiattributiven Analyse (vgl. Abschnitt 6.2.2). Angelehnt an die Funktionsweise einer multiattributiven Analyse besteht die Vulnerabilitätsanalyse aus den Analysekomponenten eines Gewichts und Indikatoren, die durch eine modifizierte gewichtete Summe aggregiert werden. Um den Anforderungen einer raum-zeitlichen Analyse von Stromausfallwirkungen gerecht zu werden, wird die Funktionsweise in vielerlei Hinsicht modifiziert.

Hierzu werden

- ein indikatorbasierter Ansatz gewählt,
- ein modifizierter Indikatorenbaum gebildet,
- einzelne Indikatoren dynamisiert,
- von der Gewichtung einzelner Indikatoren abgewichen,
- Methoden zur Bemessung der Analysekomponenten und zur Einbindung von Gruppenbeurteilungen angewendet sowie
- verschiedene Vulnerabilitätsaggregationen und Bewertungen für Gefahrenpotentiale entwickelt.

Wie bereits in Kapitel 4 diskutiert, ist es nur in beschränktem Maße möglich, die Folgen eines Stromausfalls direkt messbar zu machen. Deswegen wird das Konstrukt der Vulnerabilität von KRITIS-Einrichtungen bemüht, welche eine indirekte Messung mithilfe von Indikatoren zulässt. Die Indikatoren werden wiederum genutzt, um Eigenschaften der Kritikalität und der Bewältigungskapazität zu messen. Da die Vulnerabilitätsanalyse auf die Bewertung von Gefahrenpotentialen abzielt, stellt sich die Messbarmachung mithilfe von Indikatoren weniger als ein objektives Messen eines Sachverhaltes dar als vielmehr ein sachgerechtes Beurteilen.

Indikatoren werden als indirektes Instrument für die Messung von Stromausfallfolgen bei KRITIS-Einrichtungen genutzt. Die Wahl der Indikatoren beeinflusst wesentlich das Analyseergebnis. Durch die Wahl aussagekräftiger und geeigneter Indikatoren wird das Analyseergebnis verständlich, nachvollziehbar und interpretationsfähig. Für ein hinreichend genaues Analyseergebnis reicht es in der Regel aus, dass eine geringe Anzahl aussagekräftiger Indikatoren genutzt wird, wobei der Aufwand für die notwendige Datenerhebung im Verhältnis zum Erkenntnisgewinn steht. Eine zu hohe Anzahl an Indikatoren kann zwar einerseits die Analysegenauigkeit erhöhen, es erschwert jedoch andererseits das Verständnis, die Nachvollziehbarkeit und Interpretationsfähigkeit des Analyseergebnisses. Darüber hinaus steigt mit größer werdender Anzahl von Indikatoren auch der Aufwand der Datenerhebung und -beurteilung. In den meisten Fällen führt der erhöhte Aufwand zu keinem wesentlichen entscheidungsrelevanten Unterschied. Gerade im Hinblick auf die Interpretierbarkeit der Ergebnisse kann eine zu hohe Anzahl an Indikatoren die Akzeptanz der Analyseergebnisse durch die Entscheidungsträger gefährden.

In der in dieser Arbeit gewählten Konfiguration besteht die Vulnerabilitätsanalyse aus einem Gewicht und drei ungewichteten und sich kompensierenden Indikatoren (Abbildung 8.3). Damit wird die kleinstgeeignete Anzahl von drei Indikatoren gewählt, gleichwohl die entwickelte Methodik die Integration von weiteren Indikatoren offenlässt.

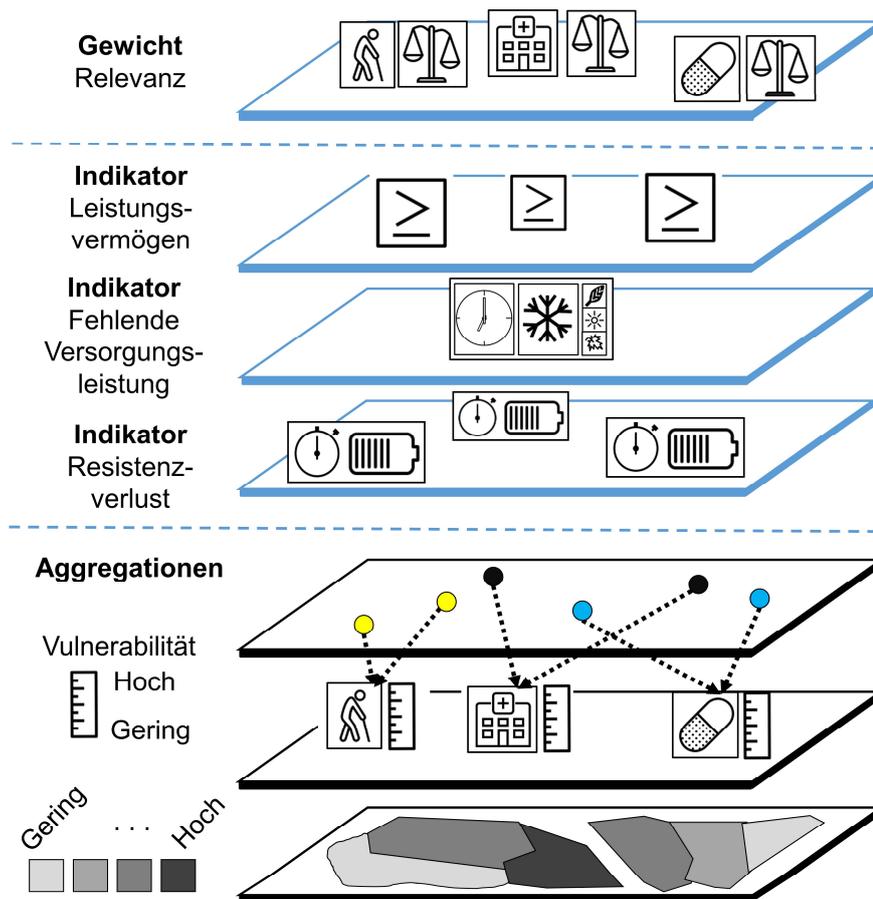


Abbildung 8.3: Analysekomponenten der Vulnerabilitätsanalyse.

Die gewählten Indikatoren werden in einem Indikatorenbaum zusammengefasst (Abbildung 8.4).

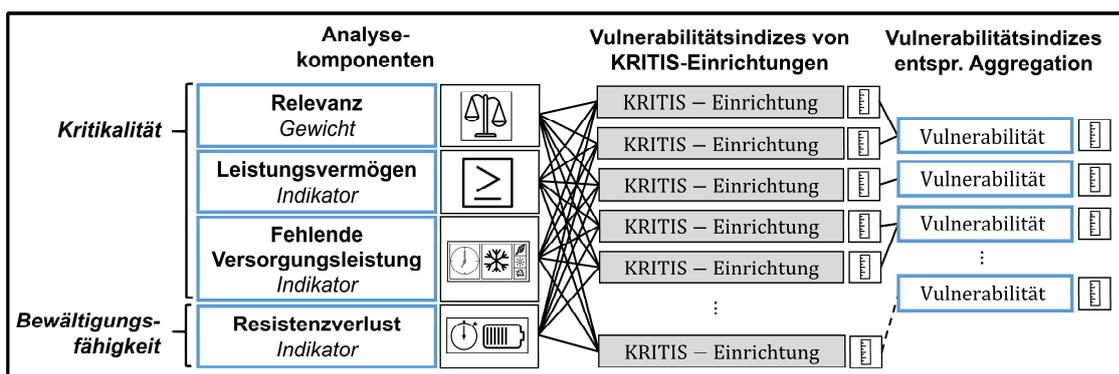


Abbildung 8.4: Modifizierter Indikatorenbaum der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse.

Die Indikatoren als auch das Gewicht geben Eigenschaften einer KRITIS-Einrichtung wieder, mit der die objektspezifischen Stromausfallfolgen messbar gemacht werden. Das dem KRITIS-Typ entsprechende Relevanzgewicht und die beiden Indikatoren des Leistungsvermögens und der Versorgungsleistung dienen

der Beurteilung der Kritikalität einer KRITIS-Einrichtung. Der Indikator des Resistenzverlustes dient der Messung der Bewältigungsfähigkeit einer KRITIS-Einrichtung.

Um die zeitlichen Folgen eines Stromausfalls darzustellen, werden die Indikatoren für die fehlende Versorgungsleistung und den Resistenzverlust dynamisiert. Hierdurch werden zeitpunktspezifische (Wochentag, Saison und Uhrzeit) als auch von der Ausfalldauer abhängige (Verbrauch von Bewältigungsressourcen) Vulnerabilitätseigenschaften von KRITIS-Einrichtungen berücksichtigt.

Für die Operationalisierung der Analysekomponenten stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. In Kapitel 9 wird auf geeignete Operationalisierungsoptionen der einzelnen Analysekomponenten eingegangen.

Abweichend von der üblichen Vorgehensweise bei indikatorbasierten Ansätzen mit multiattributiver Analyse werden die Indikatoren nicht nach ihrer Bedeutung gewichtet. Durch Relevanzgewichte werden lediglich KRITIS-Einrichtungen entsprechend ihres Typs gewichtet. Durch die Multiplikation der Indikatorenwerte einer KRITIS-Einrichtung entsteht zunächst ein einrichtungsspezifischer Indexwert. Durch die multiplikative Verknüpfung kompensieren sich die Indikatorenwerte. Der für eine KRITIS-Einrichtung ermittelte Indexwert wird mithilfe eines KRITIS-Typ-spezifischen Relevanzgewichtes zu einem KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindexwert aggregiert. Dieser Wert zeigt die zeitspezifische Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung an. Bei der Bildung des KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindexwertes können je nach Analysezweck ausgewählte oder alle verwendeten Analysekomponenten berücksichtigt werden.

Für darüberhinausgehende raum-zeitliche Analysen sind jedoch weitere Aggregationsebenen bzw. Vulnerabilitätsindizes notwendig. Sie basieren je nach Analysezweck auf geeigneten KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes und ermöglichen vergleichende Darstellungen. So lassen sich Bezüge herstellen zur Gesamtheit aller KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs oder zur Gesamtheit aller KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft. Darüber hinaus lassen sich weitergehende raum-zeitliche Beurteilungen des Gefahrenpotentials je nach Perspektive und Analysezweck vollziehen. Eine detaillierte Diskussion über Vulnerabilitätsaggregationen erfolgt in Kapitel 11.

Die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse ist eingebettet in das jeweilige Entscheidungsfindungsverfahren, in dem die Schnittstellen zum KRITIS-Kataster und die Interaktionen der Entscheidungsträger zu strukturieren sind. Abbildung 8.5 stellt in schematischer Weise die wesentlichen Schnittstellen dar.

Das Verfahren orientiert sich an der Interaktion mit den Entscheidungsträgern, da diese wesentlich zur Durchführung der Analyse beitragen und sie Rückschlüsse und Handlungen aus den Analyseergebnissen ableiten.

Je nach Zweck der Analyse ist von den Entscheidungsträgern festzulegen, welche KRITIS-Typen bzw. welche KRITIS-Einrichtungen in einer Gebietskörperschaft und welches Stromausfallszenario in der Vulnerabilitätsanalyse zu berücksichtigen sind. Bei der Wahl der zu berücksichtigenden KRITIS-Typen ist darauf zu achten, dass möglichst alle dem gewählten KRITIS-Typ entsprechenden KRITIS-Einrichtungen im KRITIS-Kataster erfasst sind. Darüber hinaus sind im KRITIS-Kataster weitere städtebauliche Informationen über räumliche Begrenzungen von Stadtgliederungen enthalten, die für eine räumliche Analyse der Stromausfallwirkungen geeignet sind. Wie in Abschnitt 4.6.2 diskutiert, sind entscheidungsrelevante Eigenschaften der gewählten KRITIS-Einrichtungen mithilfe der Betreiber der KRITIS-Einrichtungen zu recherchieren und

im KRITIS-Kataster zu dokumentieren. Da, wie bereits diskutiert, die Erstellung von KRITIS-Katastern als Quasistandard etabliert ist, kann ein bereits vorhandenes Kataster genutzt werden.

Zur Operationalisierung der Indikatoren werden die in KRITIS-Katastern dokumentierten Eigenschaften der KRITIS-Einrichtungen verwendet. Neben dieser Operationalisierung fließen in die Indikatorenwerte auch subjektive Beurteilungen der Entscheidungsträger über die Kritikalität und die Bewältigungskapazität von KRITIS-Einrichtungen ein. Hierfür sind entsprechende Eingangswerte zu ermitteln, was im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 10 vorgenommen wird.

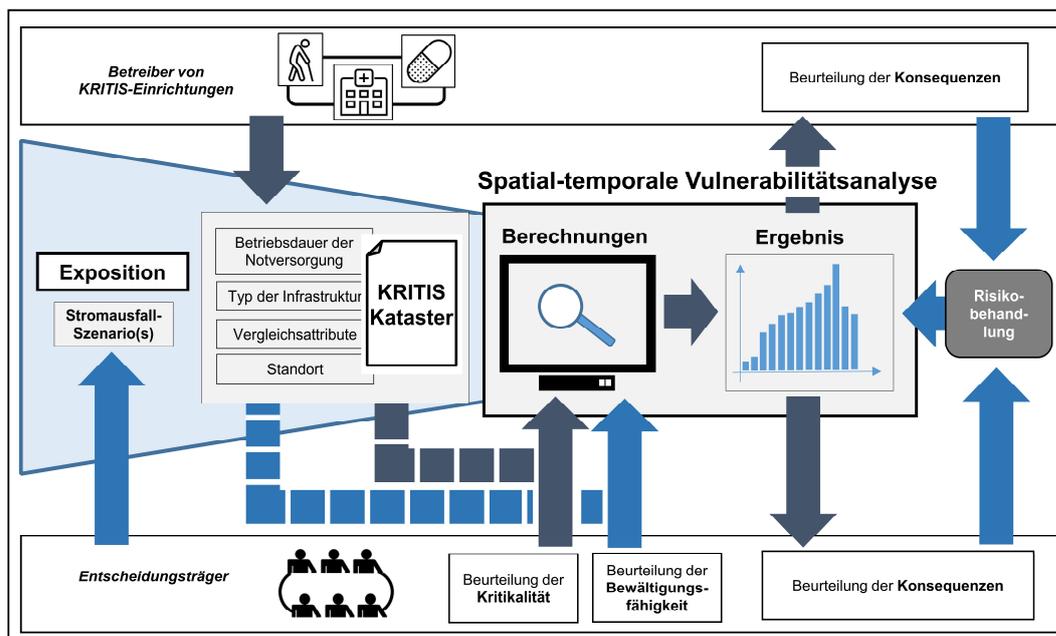


Abbildung 8.5: Schematische Darstellung des Verfahrens zur spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse.

Das von den Entscheidungsträgern festzulegende Stromausfallszenario beschreibt räumliche und zeitliche Eigenschaften eines zu analysierenden Stromausfalls. Durch die Entscheidungsträger sind der Zeitpunkt (Datum und Uhrzeit), an dem ein Stromausfall beginnt, und die Ausfalldauer festzulegen. Des Weiteren können Stromausfallszenarien sich in der räumlichen Exposition unterscheiden. Mit der Festlegung, welche Gebiete einer Gebietskörperschaft von einem Stromausfall betroffen sind, werden gleichzeitig die vom Stromausfall exponierten KRITIS-Einrichtungen definiert.

Durch Stromausfallszenarien können reale und fiktive Stromausfälle analysiert werden. Reale Ausfallszenarien entsprechen tatsächlich stattgefundenen oder gerade stattfindenden Stromausfällen. Ihre Analyse dient insbesondere der Entscheidungsunterstützung in einer akuten Krisensituation. Demgegenüber dienen fiktive Ausfallszenarien dem generellen Verständnissgewinn über potentielle Stromausfallwirkungen. Sie werden daher in der Bedarfsplanung bei der Entwicklung von Gefahrenabwehrplanungen und Katastrophenschutzkonzepten, zur Fort- und Weiterbildung der Entscheidungsträger und zur Sensibilisierung der Entscheidungsträger, der Betreiber von KRITIS-Einrichtungen und der Bevölkerung verwendet (vgl. Abschnitt 4.7.2).

Die bereits in Abschnitt 4.2 diskutierten plausiblen Szenarios dienen der Grundlage zur Festlegung eines Bemessungsstromausfall. Durch die einheitliche Verwendung eines solchen standardisierten fiktiven Stromausfallszenario ist in bedingter Weise auch einen Vergleich der Stromausfallwirkungen zwischen verschiedenen Gebietskörperschaften möglich.

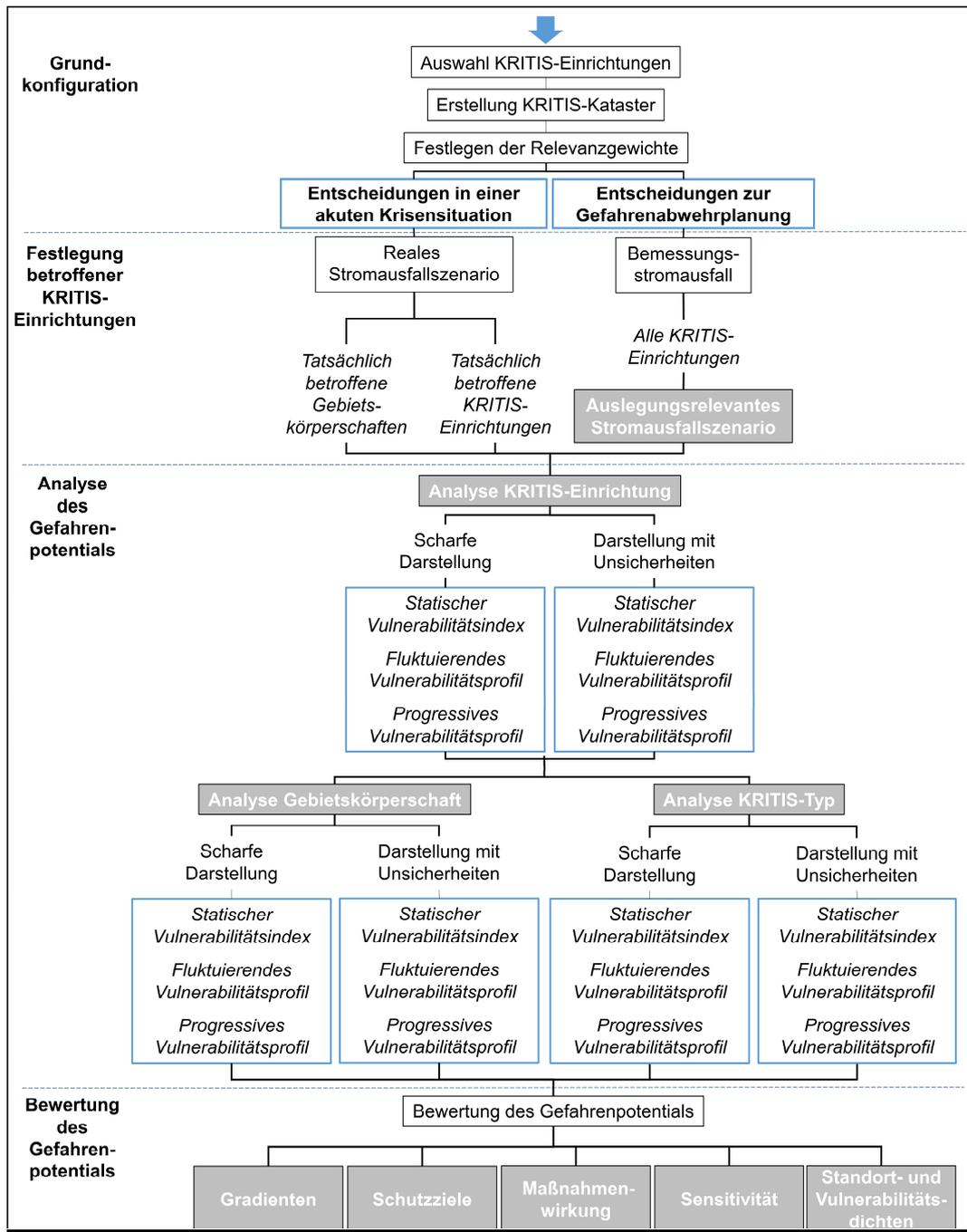


Abbildung 8.6: Übersicht über die Darstellung der Ergebnisse einer Vulnerabilitätsanalyse.

Die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse sind von den Entscheidungsträgern zu beurteilen. Dabei werden verschiedene Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Zum einen werden verschiedene Aggregationsverfahren verwendet, durch die eine Analyse des Gefahrenpotentials möglich wird. Hierdurch steigt das grundsätzliche Verständnis über die raum-zeitlichen Wirkungen. Je nach Grundkonfiguration können scharfe Werte oder Unschärfe im Ergebnis dargestellt werden. Die einzelnen Vulnerabilitätsaggregationen werden in Kapitel 11 erläutert. Zum anderen werden Verfahren zur Beurteilung der Gefahrenpotentiale angeboten, wodurch Gefahrenpotentiale identifiziert und evaluiert werden.

Ein Überblick über die Darstellung der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse findet sich in Abbildung 8.6. Die Verfahren zur Beurteilung der Gefahrenpotentiale werden in Kapitel 12 erläutert.

Je nach Analyseziel sind Rückschlüsse über raum-zeitliche Wirkungen abzuleiten, die zur Festlegung neuer Strategien der Vorbereitung von potentiellen oder der Bewältigung von akuten Stromausfällen dient. Durch die strategiebedingten Änderungen der raum-zeitlichen Wirkungen verändern sich die Eingangswerte mit jedem weiteren iterativ durchgeführten Simulationsdurchlauf. Durch die Ergebnisse wird die Effektivität der Strategien vergleichbar und so eine Wahl geeigneter Strategien unterstützt.

### **8.5 Fazit**

Zur Einführung in die Entwicklung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wurde die Stellung der Vulnerabilitätsanalyse in den Entscheidungsprozessen der Vorbereitung und im akuten Krisenmanagement erläutert. Mit dem Ablauf der Entscheidungsfindung, der Grundstruktur der Vulnerabilitätsanalyse und der Verzahnung mit den Entscheidungsträgern wurden Grundsätze des Verfahrens beleuchtet.

## 9 Analysekomponenten

In diesem Kapitel werden die Analysekomponenten der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse erläutert. Ziel ist es, das grundlegende Verfahren zur Analyse, ihre einzelnen Analysekomponenten, deren Bedeutung und Funktionsweise, transparent zu machen und mögliche Umsetzungsoptionen aufzuzeigen.

Hierzu werden zunächst in Abschnitt 9.1 wesentliche Notationen festgelegt. Die einzelnen Analysekomponenten werden anschließend in den Abschnitten 9.2 bis 9.5 im Detail erläutert, indem Begriffe abgestimmt, Operationalisierungsoptionen diskutiert und die in dieser Arbeit verwendete mathematische Beschreibung festgelegt wird.

Grundlagen der entwickelten Analysekomponenten wurden in Münzberg, Wiens und Schultmann (2017) diskutiert. Die methodische Herangehensweise zur Operationalisierung des Resistenzwertes basiert auf den Vorarbeiten Münzberg, Wiens und Schultmann (2015; 2016).

### 9.1 Notation und Mengen von KRITIS-Einrichtungen

Zur eindeutigen Identifikation wird jeder KRITIS-Einrichtung eine individuelle Indexnummer  $Infra_i$  mit  $i \in \{1, 2, \dots, l\}$  mit  $l$  Anzahl der im Analyseverfahren berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen zugeordnet.

Entsprechend der Art der Versorgung der Bevölkerung mit lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern wird jede KRITIS-Einrichtung einem KRITIS-Typ  $Typ_u$  zugeordnet mit  $u \in \{1, 2, \dots, h\}$  und  $h$  Anzahl der im Analyseverfahren zu berücksichtigenden KRITIS-Typen. So werden z. B. alle Apotheken dem KRITIS-Typ „Apotheken“ und alle Krankenhäuser dem KRITIS-Typ „Krankenhäuser“ zugeordnet. Die Anzahl der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs wird mit  $k_u$  angegeben.

Zur Durchführung räumlicher Analysen befinden sich KRITIS-Einrichtungen in unterschiedlichen räumlichen Bezugseinheiten entsprechend der gewählten räumlichen Auflösung. Die einzelnen KRITIS-Einrichtungen werden entsprechend ihrem Standort in die jeweilige räumliche Bezugseinheit  $District_r$  zugeordnet mit  $r \in \{1, 2, \dots, g\}$  und  $g$  Anzahl der im Analyseverfahren berücksichtigten räumlichen Bezugseinheiten.

Jede der berücksichtigten KRITIS-Einrichtung kann so eindeutig durch  $CI_{Infra_i}^{District_r, Typ_u}$  bzw.  $CI_i^{r, u}$  anhand ihrer individuellen Indexnummer  $i$ , ihrer Zuordnung zu einem KRITIS-Typ  $u$  und ihrem Standort und der entsprechenden räumlichen Bezugseinheit  $r$  beschrieben werden.

Die berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen bilden eine Obermenge  $Set_{AUCI} = \{CI_{Infra_1}^{District_r, Typ_u}, CI_{Infra_2}^{District_r, Typ_u}, \dots, CI_{Infra_l}^{District_r, Typ_u}\}$ . KRITIS-Einrichtungen können mehreren Teilmengen zugeordnet werden. Die KRITIS-Einrichtungen, die demselben KRITIS-Typ zugeordnet sind, bilden die Teilmenge  $Set_{Typ_v} = \{Set_{AUCI}: u = v\}$ . KRITIS-Einrichtungen, die sich in derselben räumlichen Bezugseinheit befinden, bilden die Teilmenge  $Set_{District_z} = \{Set_{AUCI}: r = z\}$ .

## 9.2 Relevanzgewichte

### 9.2.1 Begriffsbestimmung des Relevanzgewichts

In einer multiattributiven Analyse geben Gewichte Präferenzen der Entscheidungsträger wieder (vgl. Abschnitt 6.2.3). Sie beziehen sich auf die Präferenz der Attribute.

In der vorliegenden Vulnerabilitätsanalyse werden Gewichte verwendet, um die Wertigkeit eines betrachteten Schutzgutes gegenüber anderen berücksichtigten Schutzgütern während eines Stromausfalls zum Ausdruck zu bringen. So wird in Anbetracht eines Stromausfalls üblicherweise Krankenhäusern eine höhere Wertigkeit für die Bevölkerung beigemessen als Apotheken oder Hausärzten. Diese Wertigkeit leitet sich aus der Relevanz eines Schadenseintritts am betrachteten Schutzgut her, wenn sich diese durch eine stromausfallbedingte Gefahr verwirklicht. Die Relevanz eines Schadenseintritts an einem Schutzgut bezieht sich auf dessen kontinuierliche Versorgung mit lebenswichtigen Gütern und Dienstleistungen, unbeachtet des individuellen Leistungsumfangs, der Bewältigungsfähigkeit oder der Versorgungsleistung der betrachteten KRITIS-Einrichtung. Um dem Ordnungs- und Transitivitätsaxiom gerecht zu werden (vgl. Kapitel 6), ist bei gleichartigen KRITIS-Einrichtungen dieselbe Wertigkeit heranzuziehen. Die Wertigkeit bezieht sich daher auf KRITIS-Typen.

Entsprechend den Anforderung an die Gefahrenprognose (vgl. Abschnitt 3.2), ist die Beurteilung der Relevanz des Schadenseintritts ex ante und von einem gut ausgebildeten, gewissenhaften, besonnenen und sachkundigen Durchschnittsentscheider vorzunehmen. Da dabei die konkrete Situation und das Tatsachenwissen zu Grunde zu legen ist, das im Augenblick der Bewertung im Erkenntnishorizont des Entscheiders liegt, ist die Relevanzgewichtung entsprechend flexibel zu gestalten. Zu berücksichtigen sind insbesondere Kenntnisse über ortsspezifische Umstände und weitere lokale Kenntnisse, die die Relevanz von Schäden bei bestimmten Einrichtungen betreffen. Da die Entscheidungsunterstützung ein Ausmaß eines Stromausfalls beleuchtet, bei dem Stäbe als Entscheidergruppen unterstützt werden, ist eine Beurteilung als Gruppenentscheid vorzunehmen.

Die Relevanz von KRITIS-Typen hinsichtlich der unterschiedlichen Bedeutung für die Versorgung der Bevölkerung mit lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern charakterisiert eine Dimension der Kritikalität von KRITIS-Einrichtungen. Sie unterscheidet sich je nach der Art der Versorgung durch den jeweiligen KRITIS-Typ und stellt eine Inter-Kritikalität zwischen typverschiedenen KRITIS-Einrichtungen dar. Das Relevanzgewicht gibt somit ein Maß der Kritikalität an, wie bedeutsam ein KRITIS-Typ für die Versorgung der Bevölkerung mit lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern im Vergleich zu anderen KRITIS-Typen ist. Die Relevanzgewichtung ist das Verfahren, mit dem Relevanzgewichte bestimmt werden.

### 9.2.2 Operationalisierung des Relevanzgewichts

Für die Festlegung der Relevanzgewichte von KRITIS-Typen stehen die in Abschnitt 6.2.3 dargestellten Gewichtungsverfahren zur Verfügung. Gleichwohl erfüllen deren unreflektierte Anwendung nicht zielgerichtet die Anforderungen an die Entscheidungsfindung (vgl. Abschnitte 4.5, 4.7 und 4.8). Hierfür sind Gewichtungsverfahren geeignet anzupassen und zu modifizieren.

Damit in der Gefahrenprognose (vgl. Abschnitt 3.2) explizit die Beurteilung von Entscheidern gefordert wird, können nur subjektive Gewichtungsverfahren zur Anwendung kommen. Das spiegelt sich auch darin

wider, dass sich für diesen Zweck in der Literatur trotz intensiver Recherchen keine Ansätze finden, wie eine Gewichtung anhand objektiver Präferenzen vorgenommen werden kann.

Die Wahl eines subjektiven Gewichtungsverfahrens ist abhängig von der Anzahl der berücksichtigten KRITIS-Typen. Des Weiteren ist die Komplexität und der Aufwand der Gewichtungsmethode an die Erfahrungen der Entscheidungsträger mit Gewichtungsmethoden anzupassen.

Um Gewichte für KRITIS-Typen von Durchschnittsentscheidern zu bestimmen, erscheint es hilfreich, zunächst unabhängig von einer konkreten Situation und Tatsachenwissen Beurteilungen von einer repräsentativ großen Anzahl von Entscheidern vorzunehmen. Durch Entkopplung von örtlichen Bezügen können Entscheider aus verschiedenen Kreisen und kreisfreien Städten befragt werden und dadurch ein repräsentatives Gewichtungsergebnis durch Durchschnittsentscheider erstellt werden.

Dieses Zwischenergebnis dient der Entscheidungsunterstützung der örtlich zuständigen Entscheider, die weitere Anpassungen entsprechend ihrer örtlichen Kenntnisse und weiteren Tatsachenwissen vornehmen können. Durch dieses Vorgehen ist bei der Gewichtung eine ausreichende Flexibilität gewahrt.

Zur Festlegung von Gewichten innerhalb einer Gruppe sind entsprechende Gruppengewichtungsverfahren anzuwenden (vgl. Abschnitt 6.2.3). Da hierbei auch die abweichenden Beurteilungen von Interesse sind, sollten die dahingehende Unschärfe sich ebenfalls in der Wahl der Gewichtungsmethode wiederfinden.

### 9.2.3 Mathematische Beschreibung der Relevanzgewichte

Die Kritikalität eines KRITIS-Typs  $u$  wird durch das spezifische Relevanzgewicht  $w_u^{Relev}$  dargestellt. Die Relevanzgewichte liegen auf einer Skala zwischen Null und Eins. Für jeden ausgewählten KRITIS-Typ ist ein Gewichtswert zu ermitteln, der für die weitere multiattributive Analyse die Bedingung erfüllt, dass die Summe aller Relevanzgewichte Eins ergibt ( $\sum_{i=1}^h w_{Typ_u}^{Relev} = 1$ ).

## 9.3 Kritikalitätsindikator Leistungsvermögen

### 9.3.1 Begriffsbestimmung des Leistungsvermögens

KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs unterscheiden sich üblicherweise bei der Versorgung der Bevölkerung mit lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern in ihrem Leistungsvermögen<sup>2</sup>. Das absolute Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung gibt das Maximalnutzungspotential bzw. das größtmögliche Produktionsvermögen je definierter Bezugsperiode einer KRITIS-Einrichtung wieder (vgl. zu Leistungsvermögen u. a. Winter, 2013).

<sup>2</sup> Im betriebswirtschaftlichen Sinne wird für „Leistungsvermögen“ vorrangig der Begriff der „Kapazität“ bemüht. Um Missverständnissen im Zusammenhang mit dem bereits diskutierten Begriff der Bewältigungskapazität vorzubeugen, wird an dieser Stelle der Begriff des Leistungsvermögens synonym zum in der Betriebswirtschaft üblichen Begriff der „Kapazität“ verwendet.

Je größer das Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung im Verhältnis zu den Leistungsvermögen der anderen KRITIS-Einrichtungen desselben Typs ist, desto höher ist ihre Bedeutung für die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung. Das Leistungsvermögen kann langfristig durch entsprechende Investitionen gesteigert oder durch Abbau gesenkt werden. Um während des Analysezeitraumes stets von einem unveränderlichen und zeitpunktunabhängigen Leistungsvermögen auszugehen, ist eine ausreichend lange Bezugsperiode von mindestens mehreren Wochen zu wählen, in denen sich das Leistungsvermögen nicht ändert.

Durch das relative Leistungsvermögen wird das absolute Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung in Beziehung gesetzt mit dem Leistungsvermögen aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs. Es stellt damit ein Maß für die Kritikalität von KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs dar (Intra-Kritikalität).

### 9.3.2 Operationalisierung des Leistungsvermögens

Innerhalb der Vulnerabilitätsanalyse ist das Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung in Bezug zu setzen mit dem Leistungsvermögen von allen KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs. Um dabei eine Vergleichbarkeit und Operationalisierung des Leistungsvermögens von KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs herzustellen, werden KRITIS-Typ-spezifische Vergleichsattribute definiert. Die Wahl und Anzahl der Attribute obliegt den Entscheidungsträgern, wobei zur Erfüllung des Rationalitätspostulats (vgl. Kapitel 6) zu beachten ist, dass

- für die jeweiligen KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs die gleichen Vergleichsattribute angewendet werden,
- für alle KRITIS-Einrichtungen die jeweils gewählten Vergleichsattribute operationalisierbar sind,
- mindestens ein Vergleichsattribut verhältnisskaliert ist und
- der Aufwand bei der Datengewinnung und -verarbeitung im Verhältnis zum inhaltlichen Mehrge-  
winn des Analyseergebnisses steht.

So kann für alle berücksichtigten Krankenhäuser das Vergleichsattribut Krankenhausbetten herangezogen werden, um das unterschiedliche Leistungsvermögen der Krankenhäuser zu differenzieren. Die Wahl von mehreren Vergleichsattributen für einen KRITIS-Typ kann einen höheren Differenzierungsgrad des Leistungsvermögens erzielen. Ein weiteres Vergleichsattribut für Krankenhäuser ist z. B. die Anzahl an Operationssälen. Gleichzeitig erhöht sich bei der Verwendung mehrerer Vergleichsattribute der Umfang der Berechnungen. Der Aufwand der damit zusammenhängenden Datenrecherche und -aufbereitung vergrößert sich häufig dadurch unverhältnismäßig. Auch ist zu beachten, dass bei höherer Anzahl von KRITIS-Typen und KRITIS-Einrichtungen der Einfluss der einzelnen Vergleichsattribute auf das Ergebnis entsprechend sinkt. Die Nutzung von mehreren Attributen je KRITIS-Typ führt dann in der Regel zu keinem bemerkenswerten Unterschied im Analyseergebnis. In den meisten Fällen kann deshalb die Verwendung eines einzigen aussagekräftigen Vergleichsattributs je KRITIS-Typ als hinreichend geeignet angesehen werden.

Nicht in allen Fällen liegt ein signifikanter Unterschied im Leistungsvermögen von KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs vor. Dies zeigt sich z. B. bei Apotheken, die insbesondere durch Regulierungen wie die der Apothekenbetriebsverordnung über quasi-identisches Produktsortiment, Größe und Räumlichkeiten aufweisen (Horvath, 2010). In derartigen Fällen erscheint es nicht notwendig, das Leistungsvermögen dieser KRITIS-Einrichtungen zu differenzieren und es erscheint ausreichend, allein die Anzahl der Einrichtungen an einem Standort zu berücksichtigen und dies als Vergleichsattribut für das Leistungsvermögen zu verwenden.

Zur Operationalisierung der Vergleichsattribute können deskriptive Daten aus Statistiken und Erhebungen, die z. B. bei den Ämtern für Brand- und Katastrophenschutz, für Statistik oder anderen Einrichtungen öffentlich zugänglich sind oder durch einen zumutbaren Rechercheaufwand ermittelt werden können, als Quellen verwendet werden.

### 9.3.3 Mathematische Beschreibung des Leistungsvermögens

Für jeden KRITIS-Typ  $u$  können mehrere Vergleichsattribute definiert werden. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit und zur Erfüllung des Ordnungsaxioms (vgl. Kapitel 6) sind für jeden KRITIS-Typ dieselben Vergleichsattribute anzuwenden. Entsprechend des KRITIS-Typs einer KRITIS-Einrichtung  $i$  wird das absolute Leistungsvermögen durch ein oder mehrere Vergleichsattribute  $comp_{u_i}^q$  mit  $q$  Nummer des Vergleichsattributs innerhalb eines KRITIS-Typs  $u$  und  $q \in \{1, 2, \dots, e\}$  operationalisiert.

Anhand eines Beispiels zur Differenzierung des Leistungsvermögens von drei Krankenhäusern  $CI_1^{Krankenhaus, r}$ ,  $CI_2^{Krankenhaus, r}$  und  $CI_3^{Krankenhaus, r}$  soll dies verdeutlicht werden. Es wird zunächst ein einzelnes Vergleichsattribut für die Operationalisierung des Leistungsvermögens der Krankenhäuser gewählt. Dieses kann die Anzahl der Krankenhausbetten  $comp_{Infr_i}^{Krankenhaus, 1}$  sein. Für die Krankenhäuser lassen sich folgende Vergleichsattributswerte operationalisieren:

- $comp_{Krankenhaus_1}^1 = 250$  Krankenhausbetten,
- $comp_{Krankenhaus_2}^1 = 350$  Krankenhausbetten und
- $comp_{Krankenhaus_3}^1 = 100$  Krankenhausbetten.

Reicht dieses einzelne Vergleichsattribut nicht aus, können weitere Vergleichsattribute definiert werden. In diesem Fall wird die Anzahl an Operationssälen als weiteres Vergleichsattribut  $comp_{Krankenhaus_i}^2$  definiert. Das Vergleichsattribut kann bei den einzelnen Krankenhäusern folgende Werte annehmen:

- $comp_{Krankenhaus_1}^2 = 3$  Operationssäle,
- $comp_{Krankenhaus_2}^2 = 2$  Operationssäle und
- $comp_{Krankenhaus_3}^2 = 2$  Operationssäle.

Die Werte der Vergleichsattribute bilden das absolute Leistungsvermögen ab (Abbildung 9.1).

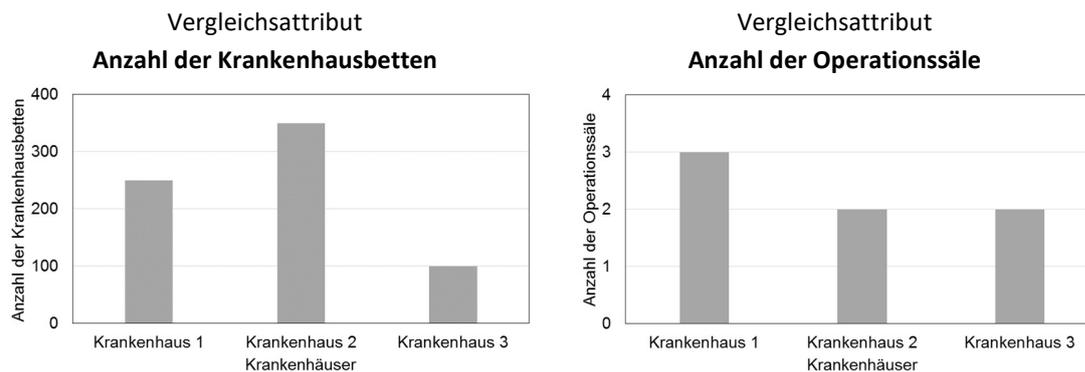


Abbildung 9.1: Darstellung des absoluten Leistungsvermögens von Krankenhäusern.

Um Verzerrungen bei der Gegenüberstellung von KRITIS-Einrichtungen verschiedener KRITIS-Typen zu vermeiden, müssen die Werte des absoluten Leistungsvermögens auf einer Skala zwischen null und eins normalisiert werden. Für eine KRITIS-Einrichtung  $i$  wird hierfür mithilfe ihrer Vergleichsattribute des absoluten Leistungsvermögens  $\text{comp}_{u_i}^q$  ihr relatives Leistungsvermögen  $\text{Perform}_{\text{Infra}_i}^{\text{Typ}_u}$  bzw.  $\text{Perform}_i^u$  berechnet. Grundlage dieser Berechnung ist eine Normalisierung, mit der die Vergleichsattributwerte der KRITIS-Einrichtung in Bezug zu den Vergleichsattributwerten aller im Analyseverfahren berücksichtigten KRITIS-Einrichtung desselben KRITIS-Typs gesetzt werden. Das relative Leistungsvermögen dient als Indikator für das Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung.

Neben einer linearen Normalisierung sind hierfür auch andere Normalisierungsfunktionen vorstellbar, wobei ihre Wahl das Ergebnis und seine Interpretationsfähigkeit maßgeblich beeinflussen und mit Bedacht zu wählen sind. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Vergleichsattribute unterschiedliche Skalenniveaus aufweisen können. Wie bereits eingangs gefordert, muss zur Erfüllung des Ordnungsaxioms wenigstens ein Vergleichsattributwert eines KRITIS-Typs verhältnisskaliert sein. Werden mehrere Vergleichsattribute für KRITIS-Einrichtungen eines KRITIS-Typs gewählt und bilden diese das Leistungsvermögen nicht gleichwertig ab, muss sich dies auch in der Berechnung des relativen Leistungsvermögens widerspiegeln. Schlussendlich muss die Summe aller relativen Leistungsvermögen von KRITIS-Einrichtungen eines KRITIS-Typs eins ergeben:

$$\sum_{i=1}^l \text{Perform}_{\text{Infra}_i}^{\text{Typ}_v} = 1, \forall \text{Infra}_i \in \text{Set}_{\text{Typ}_v} \quad (9-1)$$

Gerade bei einer hohen Anzahl von KRITIS-Einrichtungen und KRITIS-Typen erscheint eine lineare Normalisierungsfunktion, insbesondere zur Sicherstellung der Interpretationsfähigkeit der Ergebnisse als die geeignete Wahl. Durch eine lineare Normalisierungsfunktion können die Vergleichsattributwerte einer KRITIS-Einrichtung entweder in Bezug (1) zu den *minimalen und maximalen Ausprägungen* oder (2) zur *Summe aller Ausprägungen* eines Vergleichsattributs gesetzt werden.

Werden *minimale und maximale Ausprägungen* der Vergleichsattribute als Bezugsreferenz in einer linearen Normalisierung verwendet, berechnet sich das relative Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung  $i$  durch:

$$\begin{aligned} Perform_i^u = & \frac{comp_{u_i}^1 - comp_{u_i}^{1\ min}}{e \times (comp_{u_i}^{1\ max} - comp_{u_i}^{1\ min})} + \frac{comp_{u_i}^2 - comp_{u_i}^{2\ min}}{e \times (comp_{u_i}^{2\ max} - comp_{u_i}^{2\ min})} \\ & + \dots + \frac{comp_{u_i}^e - comp_{u_i}^{e\ min}}{e \times (comp_{u_i}^{e\ max} - comp_{u_i}^{e\ min})}, \forall Infra_i \in Set_{Typv} \end{aligned} \quad (9-2)$$

Die Wahl dieser Normalisierungsfunktion führt jedoch insbesondere bei solchen KRITIS-Einrichtungen zu unbefriedigenden Ergebnissen, deren Vergleichsattribute die minimalen Ausprägungen aufweisen. In diesen Fällen ergibt sich für den betreffenden Summanden der Normalisierungsfunktion ein undefiniertes Ergebnis. Da gleichwohl von der KRITIS-Einrichtung lebenswichtige Versorgungsleistungen erbracht werden, spiegelt das berechnete Leistungsvermögen ein unzutreffendes Ergebnis wider. Das Leistungsvermögen wird hierdurch nicht sachgerecht in Bezug gesetzt mit den Leistungsvermögen der anderen KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs.

Wird hingegen eine lineare Normalisierungsfunktion verwendet, welche die *Summe aller Ausprägungen eines Vergleichsattributs als* Bezugsreferenz verwendet, berechnet sich das relative Leistungsvermögen einer KRITIS-Einrichtung  $i$  mit:

$$\begin{aligned} Perform_i^u = & \frac{comp_{u_i}^1}{e \times \sum_{i=1}^l comp_{u_i}^1} + \frac{comp_{u_i}^2}{e \times \sum_{i=1}^l comp_{u_i}^2} + \dots \\ & + \frac{comp_{u_i}^e}{e \times \sum_{i=1}^l comp_{u_i}^e}, \forall Infra_i \in Set_{Typv} \end{aligned} \quad (9-3)$$

Durch diese Form der linearen Normalisierung führen auch minimale und geringe Ausprägungen von Vergleichsattributen zu adäquaten Darstellungen eines Leistungsvermögens. Diese Form wird daher zur Berechnung des relativen Leistungsvermögens favorisiert.

In der Diskussion der geeigneten linearen Normalisierung wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Vergleichsattribute einen gleichwertigen Einfluss auf die Differenzierung des Leistungsvermögens haben. Ist dies nicht der Fall, können in beiden Normalisierungsfunktionen die unterschiedlichen Einflüsse durch entsprechende Gewichte verwendet werden.

Im Hinblick auf das Beispiel der drei Krankenhäuser und der Verwendung eines einzelnen Vergleichsattributs ( $e = 1$ ) ergeben sich mithilfe der linearen Normalisierungsfunktion folgende relative Leistungsvermögen:

- $Perform_1^{Krankenhaus} = 0,357,$
- $Perform_2^{Krankenhaus} = 0,500$  und
- $Perform_3^{Krankenhaus} = 0,143.$

Werden hingegen zwei Vergleichsattribute zur Berechnung des relativen Leistungsvermögens verwendet ( $e = 1$ ), ergeben sich für die Krankenhäuser folgende relative Leistungsvermögen:

- $Perform_1^{Krankenhaus} = 0,393$ ,
- $Perform_2^{Krankenhaus} = 0,393$  und
- $Perform_3^{Krankenhaus} = 0,214$ .

In Abbildung 9.2 werden die Ergebnisse des Beispiels für die Berechnung mit einem und zwei Vergleichsattributen gegenübergestellt.

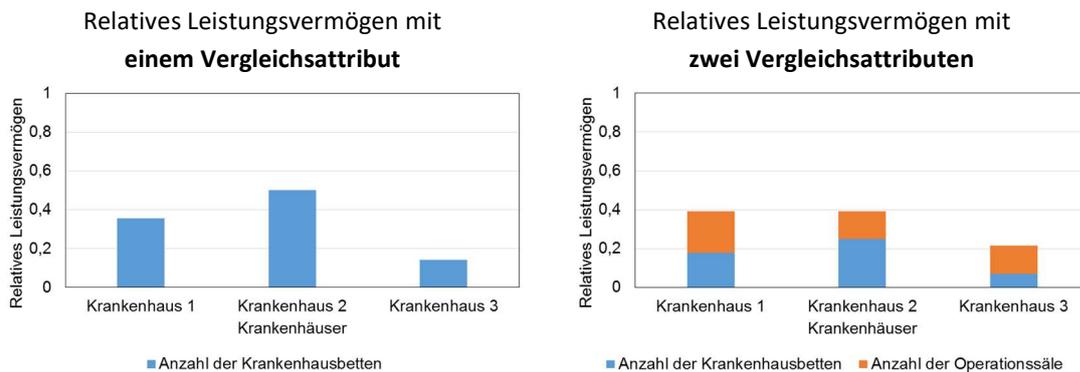


Abbildung 9.2: Darstellung des relativen Leistungsvermögens von Krankenhäusern.

Anhand der Ergebnisse lassen sich die Krankenhäuser hinsichtlich ihrer Leistungsvermögen vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit höherer Anzahl der Vergleichsattribute die Aussagen zum Leistungsvermögen differenzierter und je nach Aussagekraft der gewählten Vergleichsattribute auch genauer sind.

## 9.4 Kritikalitätsindikator fehlende Versorgungsleistung

### 9.4.1 Begriffsbestimmung der fehlenden Versorgungsleistung

Üblicherweise schwankt die Höhe der Nachfrage nach lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern im Tagesverlauf. Diese Schwankungen können z. B. begründet sein durch Öffnungszeiten (wie die von Apotheken), Schichtbetrieb (wie beim OP-Betrieb von Krankenhäusern), den circadianen Rhythmus (wie dem Schlaf-Wach-Rhythmus) oder den Gewohnheiten und Bevorzungen des Menschen. Kommt es zum Stromausfall, sind die Konsequenzen entsprechend abhängig vom Tageszeitpunkt, an dem der Ausfall wirkt. Diese zeitpunktabhängige Dimension der Kritikalität wird durch die fehlende Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung abgebildet (Abbildung 9.3). Sie ist unabhängig vom Leistungsvermögen und vom Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung.

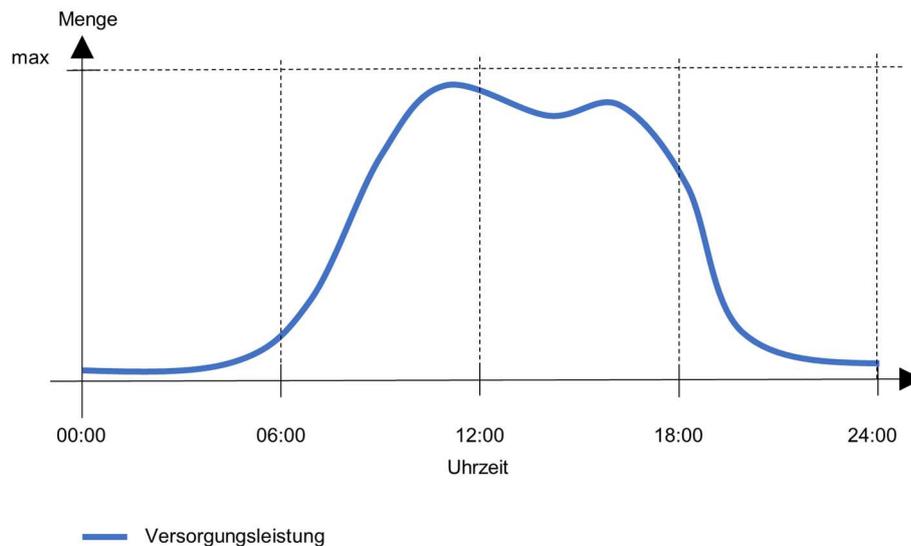


Abbildung 9.3: Übliche Schwankungen der Versorgungsleistung an einem Werktag ohne Stromausfall.

Die fehlende Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung stellt ein zeitpunktspezifisches Maß für die potentiell fehlende Bereitstellung von lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen für die Bevölkerung für die jeweils betrachtete Zeitperiode dar. Für die Darstellung der Versorgungsleistung sind Zeitperioden zu wählen, die es ermöglichen, den Verlauf eines Tages abzubilden.

Die fehlende Versorgungsleistung entspricht der üblichen Versorgungsleistung, die unter normalen Umständen zu erwarten wäre. Unter den üblichen Umständen, in denen kein Stromausfall zu verzeichnen ist, wird die Nachfrage durch die Versorgungsleistung gedeckt. Nachfrage und Versorgungsleistung befinden sich in einem Gleichgewicht. Kommt es zu einem unangekündigten Stromausfall und kann durch die betrachtete KRITIS-Einrichtung die gewohnte Versorgungsleistung nicht durch den Einsatz von Bewältigungsressourcen bereitgestellt werden, fehlt die von ihr für gewöhnlich bereitgestellte Versorgungsleistung im System in der Höhe, die im Vergleich zum betrachteten Zeitpunkt unter normalen Umständen von ihr erwartet und geleistet wird. Die übliche Versorgungsleistung bildet damit einen Erwartungswert (vgl. Abschnitt 4.5.1).

Durch den Stromausfall können KRITIS-Einrichtungen nur bedingt die übliche Versorgungsleistung sicherstellen. Das sich aufgrund mangelnder Bereitstellung von lebenswichtigen Dienstleistungen und Gütern bildende Ungleichgewicht stellt ein Gefahrenpotential dar. Da die fehlende Versorgungsleistung unabhängig von der Bewältigungskapazität bzw. dem Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung ist, stellt sie ein Maß für die nicht bediente Nachfrage und der somit nicht befriedigten Bedürfnisse dar.

Das Verhalten der Bevölkerung kann nicht zuverlässig vorhergesagt werden. In der initialen Phase eines Stromausfalls ist zum heutigen Zeitpunkt anzunehmen, dass sich das Verhalten der deutschen Bevölkerung im Vergleich zum Normalzustand nicht oder nicht wesentlich ändert. Grund dieser Mutmaßung ist, dass die deutsche Bevölkerung bisher weitestgehend über keine Erfahrungen im Umgang mit großflächigeren Stromausfällen über längere Zeiträume verfügt. Ein solches Ereignis trafe die Bevölkerung daher derart unvorhergesehen und unmittelbar, dass sich das Verhalten während eines solchen Ereignisses nur

schleppend änderte. Bei gleichbleibenden Bedürfnissen würden die Bedarfe der Bevölkerung an die veränderte Versorgungssituation wahrscheinlich nur zögerlich angepasst. Begründet in einer pessimistischen Bemessungshaltung erscheint es angezeigt, so lange von einer fast gleichbleibenden Bedürfnis- und Nachfragelage wie unter Normalumständen in der initialen Phase eines Stromausfalls auszugehen, bis gegenteilige Erkenntnisse bekannt werden. So ist erst im weiteren anhaltenden Krisenverlauf zu erwarten, dass durch schwindende Selbstschutzzfähigkeiten und der dauerhaften Knappheit von lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen reduzierte Existenzbedürfnisse vorrangiger und dringlicher bewertet werden als andere Bedürfnisse. Deren Bedürfnisbefriedigung ist mit höheren Aufwendungen verbunden. Dies kann dazu führen, dass trotz überlebensmotivierten Kaufwillens die zur Bedürfnisbefriedigung notwendige Kaufkraft nicht aufgebracht werden kann. Eine solche Situation ist durch marktübliche Maßnahmen nicht mehr zu beherrschen. Zur Sicherstellung der Nachfrage werden daher Maßnahmen der Gefahrenabwehr notwendig. Bei angekündigten Stromausfällen, bei häufigeren Stromausfallerfahrungen und je länger ein Stromausfall anhält, ist von einer zügigeren Änderung der Bedürfnislage auszugehen.

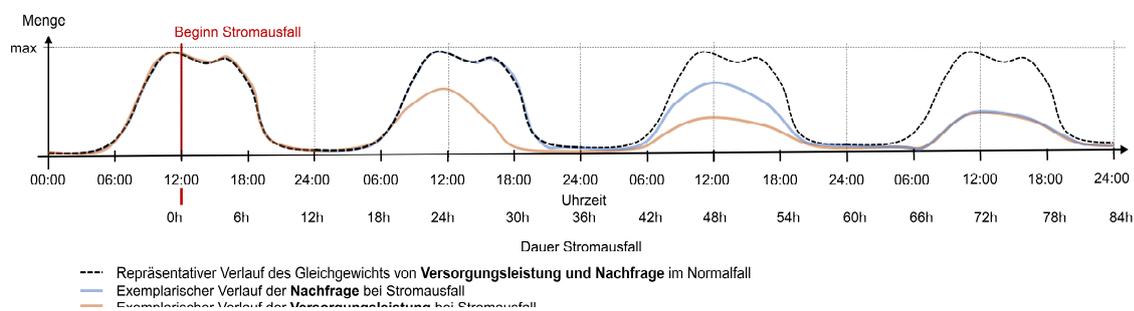


Abbildung 9.4: Mutmaßlicher Verlauf von Versorgungsleistung und Nachfrage.

Dieser mutmaßlich zu erwartende Verlauf ist schematisch in Abbildung 9.4 abgebildet. Bei einem angenommenen Stromausfallbeginn um 12:00 Uhr an einem Montag entspricht zunächst die vorliegende Versorgungsleistung und Nachfrage nach lebenswichtigen Gütern und Dienstleistungen dem repräsentativen Verlauf, in dem sich Versorgungsleistung und Nachfrage unter normalen Umständen im Gleichgewicht befinden. Durch den Stromausfall verschiebt sich dieses Gleichgewicht. In der initialen Phase folgt die Nachfrage zunächst dem üblichen Verlauf unter normalen Umständen, die jedoch aufgrund der Wirkungen des Stromausfalls auf die betrachteten KRITIS-Einrichtungen nur bedingt durch die Versorgungsleistung befriedigt werden kann. Entsprechend der Diskussion in Abschnitt 4.2 ist plausibler Weise anzunehmen, dass sich nach 36 Stunden eines Ausfalls das Nachfrageverhalten der Knappheitssituation anpasst und erste Verhaltensänderungen eintreten, da die Befriedigung von Existenzbedürfnissen vorrangig und dringlich wird.

Aufgrund der Dauer eines Ausfalls oder aufgrund von Vorwarn- und Vorbereitungszeiten ist zu erwarten, dass sich das Verhalten der Bevölkerung an Knappheitssituation anpassen kann. Bedürfnisse reduzieren sich dann auf Existenzbedürfnisse. Mithilfe greifender Maßnahmen der Selbsthilfe (wie Selbstevakuierung, Einrichtung von Kochstellen), der KRITIS-Betreiber (wie alternative Versorgungswege, Aufrechterhaltung einer rationierten Notversorgung) und der Behörden (wie die Einrichtung zentraler Versorgungsstellen, Wirkung der Krisenkommunikation) kann es bedingt möglich sein, ein neues Gleichgewicht herzustellen, in dem Existenzbedürfnisse befriedigt werden. In Abbildung 9.4 ist dies beispielhaft ab einer Ausfalldauer von 36 Stunden mit der Bildung eines neuen Gleichgewichts dargestellt.

Verhaltensänderungen und die Einstellung eines neuen Gleichgewichts sind abhängig von einer Vielzahl weicher Einflüsse, die zwar qualitativ abgeschätzt, aber aufgrund der nahezu nicht vorhandenen Empirie nur schwer hinreichend sicher quantitativ modellier- und prognostizierbar sind (mehr zu dieser Problematik s. Münzberg, Wiens und Schultmann, 2017). Je länger ein Stromausfall andauert, desto wahrscheinlicher ist davon auszugehen, dass das Gleichgewicht von Nachfrage und Versorgungsleistung gestört ist und dass sich durch geändertes Verhalten neue krisenbedingte Gleichgewichte einstellen. Aufgrund dessen bezieht sich die fehlende Versorgungsleistung im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf unangekündigte Stromausfälle und dessen initiale Wirkungen.

### 9.4.2 Operationalisierung fehlender Versorgungsleistung

Die Schwankungen der Nachfrage und der Versorgungsleistung über den Tag folgt einer Periodik. Diese Periodik könnte in direkter Weise unter Berücksichtigung der innerbetrieblichen Prozesse und Funktionen der einzelnen Organisationseinheiten und ihrer Vernetzungen einer KRITIS-Einrichtung durch etwaige Mikromodellierungen simuliert werden. Entsprechende Ansätze wurden in Abschnitt 5.6 diskutiert. Da hierfür umfangreiche Daten der individuellen Einrichtungen eines Landkreises bzw. einer kreisfreien Stadt zu sammeln und Modelle zu entwickeln sind, ist der Aufwand für derartige Mikrosimulationen unverhältnismäßig hoch. Zur Operationalisierung der fehlenden Versorgungsleistung wird daher ein indirektes Verfahren anhand von *Stromlastprofilen* oder *Nutzungsdaten* vorgeschlagen. Hierdurch lassen sich repräsentative und zu erwartende Verläufe der Nachfrage und der Versorgungsleistung von KRITIS-Einrichtungen prognostizieren. Beides wird im nachfolgenden diskutiert.

*Stromlastprofile* (auch Lastgangsprofile) stellen die Abnahme von Strom eines Letztverbrauchers in einer Lastganglinie für 15-minütige Bezugsperioden dar (vgl. Abschnitt 5.5). Die Operationalisierung der fehlenden Versorgungsleistung durch Stromlastprofile basiert auf der Annahme, dass die notwendigen Prozesse zur Bereitstellung von Versorgungsleistungen Strom verbrauchen und sich daher ein Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und Versorgungsleistung ergibt. Der Stromverbrauch einer KRITIS-Einrichtung ist abhängig von der Nachfrage nach der Versorgungsleistung der KRITIS-Einrichtung und der damit zusammenhängenden Prozesse. Schwankungen der Nachfrage führen so zu Schwankungen im Stromverbrauch, die sich in Stromlastprofilen widerspiegeln. Hierdurch lässt sich der übliche Tagesverlauf der Versorgungsleistung durch Stromlastprofile operationalisieren. Dabei ist unbedeutend, welche Prozesse und Organisationseinheiten einer KRITIS-Einrichtung wieviel Strom verbrauchen. Deren Leistungsvermögen kann zwar unterschiedlich stark von einer funktionierenden Elektrizitätsversorgung abhängen und in unterschiedlicher Weise zur Versorgung mit lebensnotwendigen Dienstleistungen und Gütern durch die betrachtete Einrichtung beitragen, durch ihre innere Vernetzung und Abhängigkeit kommt es jedoch bei einem Ausfall der Stromversorgung zwangsläufig zum Verlust ihrer jeweiligen Funktionsfähigkeiten, der sich auf die gesamte KRITIS-Einrichtung auswirkt. Da die Versorgungsleistung unabhängig vom Resistenzverlust ist, wird eine vorhandene Bewältigungskapazität, die z. B. für die Sicherstellung von Teilprozessen vorhanden ist, nicht berücksichtigt. Die einzelnen Einflüsse von Prozessen und Organisationseinheiten einer KRITIS-Einrichtung auf deren Versorgungsleistung müssen daher nicht zwingend betrachtet werden.

Letztverbraucher mit einer jährlichen Entnahme von mehr 100 MWh elektrischer Energie müssen gemäß der Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) und den technischen Anforderungen der Netzbetreiber und der Elektrotechnik über eine registrierende Leistungsmessung verfügen. Hierfür sind Lastgangszähler zu installieren, durch die objektscharf der Leistungsmittelwert je viertelstündiger Bezugsperiode dokumentiert wird. Die messtechnische Erfassung der viertelstündlichen Stromverbräuche der vorhandenen

empirischen Stromlastprofile können statistisch ausgewertet werden und ermöglichen so eine repräsentative objektscharfe Prognose von Lastverläufen. Mit dieser Prognose kann ein repräsentativer Verlauf der Versorgungsleistung für eine konkrete Einrichtung operationalisiert werden.

Bisher ist die Verwendung von Lastgangszählern nur für Letztverbraucher mit einer jährlichen Entnahme von mehr 100 MWh vorgeschrieben. Im Hinblick auf die Umsetzung der europäischen Binnenmarktrichtlinien Strom und Gas 2009/72/EG und 2009/73/EG ist mit zunehmenden gesetzlichen Verpflichtungen zum Einbau intelligenter Messsysteme und Stromzähler (Smart Meters) zu rechnen. Hierdurch könnten in Zukunft objektscharfe Stromlastprofile auch für Letztverbraucher und damit KRITIS-Betreibern mit geringeren Entnahmen vorliegen. Bereits mit dem Energiewirtschaftsgesetz aus dem Jahr 2011 und nun mit dem Inkrafttreten des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) mit dem § 29 Abs. 1 MsbG im Jahr 2016 liegt eine Einbauverpflichtung von Smart Metern für Letztverbraucher mit einer jährlichen Entnahme von mehr als 6 MWh vor. Ob darüber hinaus im Rahmen weiterer Gesetzesnovellen auch Verbraucher mit geringeren Entnahmen zum Einbau von Smart Metern verpflichtet werden, und inwieweit überhaupt ein Zugriff auf die von Smart Metern ermittelten Daten für die Zwecke des Bevölkerungsschutzes möglich ist, bleibt abzuwarten.

Um Letztverbraucher im Netzbetrieb zu berücksichtigen, deren Stromabnahmen nicht durch Lastgangszähler erfasst werden, schätzen Netzbetreiber die Stromabnahme dieser Verbraucher bisher mithilfe von Lastprofilverfahren ab. Verschiedene Lastprofilverfahren stehen zur Verfügung, wobei häufig historische Daten oder synthetisch hergestellte Daten verwendet und statistisch ausgewertet werden. Es können u. a. standardisierte, analytische, synthetische sowie parametrische Lastprofilverfahren unterschieden werden. Vertiefende Ein- und Überblicke über Lastprofilverfahren geben u. a. Hippert et al. (2001), Alfares und Nazeeruddin (2002), Taylor und McSharry (2008) und Singha et al. (2012).

In Deutschland findet das Standardlastprofilverfahren eine vorherrschende Anwendung. Dabei werden Standardlastprofile (SLP) verwendet, welche einen errechneten Stromverbrauch für Letztverbraucher einer bestimmten Kundengruppe darstellen, die ein ähnliches Abnahmeverhalten aufweisen. Je nach Kundengruppe werden spezifische Profiltypen zur Verfügung gestellt. Ein Überblick über gängige Profiltypen findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Gängige Bezeichnung von Profiltypen und ihre Zuordnung zu Kundengruppen.

Bezeichnung des Profiltyps	Beschreibung der Kundengruppe
H0	Haushalt, Privatverbrauch, ggf. geringfügig gewerblicher Bedarf
G0	Gewerbe allgemein
G1	Gewerbe, werktags 8:00-18:00 Uhr
G2	Gewerbe, überwiegender Verbrauch in den Abendstunden
G3	Gewerbe durchlaufend
G4	Gewerbe, Läden aller Art
G5	Gewerbe, Bäckerei mit Backstube
G6	Gewerbe, Wochenendbetrieb
L0	Landwirtschaft allgemein

SLP basieren auf der Auswertung historischer Daten von typischen Verbrauchern und sind hinreichend genaue Prognosen. Sie werden durch Netzbetreiber (sogenannte netzbetreiberspezifische Standardlastprofile) oder durch Verbände wie der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (sogenannte BDEW SLP, s. VDN, 2007c) normalisiert auf 1 GWh/a zur Verfügung gestellt. Für die Netzplanung werden SLP mithilfe eines prognostizierten Jahresverbrauchs skaliert, wodurch absolute Werte über eine Abnahmemenge berechnet werden. Für die Operationalisierung fehlender Versorgungsleistung ist bereits die Verwendung der normalisierten SLP hinreichend.

Werden tagesparameterunabhängige SLP für die Operationalisierung verwendet, bilden sie ein typisches, repräsentatives Verhalten von KRITIS-Einrichtungen ab. Da die SLP KRITIS-Typ-spezifisch sind, werden allen KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs ein gleichartiges Verhalten unterstellt. Baulich individuelle und ortsspezifische Besonderheiten einzelner KRITIS-Einrichtungen werden durch diese Form der Operationalisierung nicht berücksichtigt.

Die Verwendung von SLPs im Netzbetrieb wird durch einige Autoren als nicht mehr zeitgemäß kritisiert. Durch die fundamentalen Veränderungen der Elektrizitätsnutzung, verändertes Konsumverhalten sowie durch die steigende Eigenstromversorgung wird die Repräsentativität von SLP zunehmend in Frage gestellt (Hayn et al. 2014). Gleichwohl werden sie weiterhin im Netzbetrieb eingesetzt und bilden gerade aufgrund der Änderungen eine plausible Basis zur Operationalisierung fehlender Versorgungsleistung.

Unabhängig davon, wie ein *Stromlastprofil* erstellt und zur Operationalisierung der Versorgungsleistung genutzt wird, stellt es neben den Schwankungen innerhalb eines Tages auch Schwankungen der verschiedenen Saisons (Frühling, Sommer, Herbst, Winter) dar. Letztgenannte haben jedoch für die Betrachtungen von Stromausfallwirkungen eine untergeordnete Bedeutung, da Stromausfälle, die über mehrere Saisons anhalten, nicht bekannt sind.

Durch die Verwendung von *Nutzungsdaten* aus Applikationen für Mobilfunkgeräte besteht eine weitere Option der Operationalisierung der Versorgungsleistung. So bietet z. B. seit September 2015 Google Inc. mit der Dienstleistung Google My Business und der Funktion „Beliebte Zeiten“ besuchsrelevante Informationen von Einrichtungen öffentlich verfügbar an. Diese Informationen basieren auf einer Auswertung anonymisierter GPS Daten von Nutzern, die einen Google-Account für ihre Mobilfunkgeräte verwenden und die Standortfreigabe für Google Now aktiviert haben. Die hierdurch verfügbaren historischen georeferenzierten Bewegungsdaten ermöglichen eine statistische Auswertung des tageszeitspezifischen Nachfrageverhaltens für bestimmte Einrichtungen.

Auf dieser Basis kann ein künftiges Nutzungsverhalten und damit eine objektscharfe und zeitpunktspezifische Nachfrage prognostiziert werden. Aus dieser lässt sich die Versorgungsleistung ableiten. Absolute Nutzungsdaten werden nicht zur Verfügung gestellt, weshalb kein direkter Rückschluss auf die Geschäftstätigkeit der einzelnen Einrichtung möglich ist.

Die Verwendung von Nutzungsdaten ist derzeit nicht ausgereift und hinsichtlich der Repräsentativität der Daten und der Abhängigkeit von Dritten kritisch zu hinterfragen. Die Daten werden durch Dritte gesammelt, ausgewertet und veröffentlicht. Es besteht kein freier Zugang zu den ursprünglichen Rohdaten, so dass keine zweifelsfreie Manipulationsfreiheit gegeben ist. Mit welcher Methodik die Daten ausgewertet werden, ist nicht transparent und lässt sich nicht nachvollziehen. Des Weiteren steht heute die Auswertung noch nicht bei allen Einrichtungen zur Verfügung. Es ist anzunehmen, dass die Auswertung von Nutzungsdaten in Zukunft durch die anhaltende Durchflechtung digitaler Medien in den Lebensalltag flächendeckend möglich sein wird. Des Weiteren kann es zu statistischen Verzerrungen durch Nutzer kommen,

die Google Now nicht verwenden, die Standortfreigabe nicht aktiviert haben oder über kein Mobilfunkgerät verfügen. Darüber hinaus sind Datenunsicherheiten vorhanden, wie z. B. die eindeutige Zuordnung des Nutzungsverhaltens zu Einrichtungen bei gleicher oder ähnlicher Georeferenz, wie es z. B. in großen Einkaufspassagen vorkommen kann. Es ist zu erwarten, dass sich diese Defizite durch die anhaltende Nutzung digitaler Medien und die damit verbundene Anhäufung von Daten mindern lassen.

### 9.4.3 Mathematische Beschreibung fehlender Versorgungsleistung

Entsprechend ihrer Operationalisierung liegen absolute Werte für die prognostizierte übliche Versorgungsleistung vor. Im Fall eines Stromausfalls indizieren sie die fehlende Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung. Die absolute fehlende Versorgungsleistung  $Service_u^{Season, Day}(t_{out})$  ist spezifisch für einen KRITIS-Typ  $u$  und abhängig von der Saison mit  $Season = \{Frühling, Sommer, Herbst, Winter\}$ , vom Typtag mit  $Day = \{Werktag, Samstag, Sonntag\}$  und von der betrachteten Uhrzeit während eines Ausfalls  $t_{out}$ .

Für die Zwecke der multikriteriellen Analyse sind die absoluten Werte der Versorgungsleistung zu einem relativen Wert zu normalisieren. Zur Sicherung der Nachvollziehbarkeit wird eine lineare Normalisierung favorisiert, so dass die normalisierte Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung  $Service_u^{Season, Day}(t_{out})'$  entsprechend ihres KRITIS-Typs, der Saison, Typtag und der betrachteten Uhrzeit im Wertebereich zwischen null und eins liegt. Zur Normalisierung wird die maximale Ausprägung aller absoluten Versorgungsleistungen  $max Service_u^{Season, Day}(\{t_0, t_{15}, \dots, t_{end}\})$  in den Bezugsperioden innerhalb des Betrachtungszeitraums des Bemessungsstromausfalls verwendet. Die normalisierte Versorgungsleistung berechnet sich demnach aus:

$$Service_u^{Season, Day}(t_{out})' = \frac{Service_u^{Season, Day}(t_{out})}{max Service_u^{Season, Day}(\{t_0, t_{15}, \dots, t_{end}\})} \quad (9-4)$$

## 9.5 Bewältigungsindikator Resistenzverlust

### 9.5.1 Begriffsbestimmung des Resistenzverlustes

Mit dem Resistenzverlust wird der Einfluss der Fähigkeit einer KRITIS-Einrichtung, eine kontinuierliche Versorgung während eines Stromausfalls aufrechtzuerhalten, auf die Vulnerabilität der betrachteten KRITIS-Einrichtung bewertet. In diesem Zusammenhang wird die Vulnerabilität im Allgemeinen nach Cardona et al. (2012) sowohl als Ergebnis eines Mangels an Resistenzfähigkeit als auch als das Gegenteil der Resistenzfähigkeit verstanden werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der während eines Stromausfalls zeitlich veränderliche Mangel an Bewältigungskapazität als ursächlich für einen Resistenzverlust und somit für einen Vulnerabilitätsanstieg verstanden. Mit dem Mangel geht ein Unvermögen einher, einen kontinuierlichen Betrieb während eines Stromausfalls im Sinne einer Notversorgung aufrechtzuerhalten. Mit steigender Nähe zum Zeitpunkt, an dem das Unvermögen beginnt, steigt auch die Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung.

Für die Operationalisierung des Resistenzverlustes ist das Verständnis über Bewältigungskapazität einer KRITIS-Einrichtung im Kontext von Stromausfallwirkungen und die Bewertung des Einflusses der Bewältigungskapazität auf die Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung von zentraler Bedeutung. Hierzu werden im Nachfolgenden die Zusammenhänge zwischen der Bewältigungskapazität und der Notversorgung einer KRITIS-Einrichtung sowie zwischen Verbrauch von Bewältigungsressourcen, Resistenzverlust und Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung erläutert.

Hinsichtlich des kontinuierlichen Betriebs von KRITIS-Einrichtungen während eines Stromausfalls stellen Bewältigungskapazitäten solche Fertigkeiten und Ressourcen dar, mit denen eine Notversorgung sichergestellt werden kann. Eine Notversorgung einer KRITIS-Einrichtung ermöglicht ihren Betreibern, in beschränktem Umfang und in zeitlich begrenztem Rahmen einen kontinuierlichen Betrieb während eines Stromausfalls sicherzustellen. Solange eine Notversorgung aufrechterhalten werden kann, verzögern sich negative Wirkungen eines Stromausfalls. Während dieser Verzögerung können Maßnahmen zur Planung und Entscheidungsfindung, zum Auffüllen von verbrauchten Ressourcen, zum Einrichten eines sicheren Zustandes, zur Abwehr von Gefahren oder zur Kommunikation mit Kunden, Partnern, Konkurrenten oder Behörden durchgeführt werden. Hierdurch wird die Handlungsfähigkeit der KRITIS-Einrichtung sichergestellt.

Eine Notversorgung kann u. a. durch eine *alternative Versorgung* oder durch *Substitution* fehlender Prozessprodukte erreicht werden. Wie ein Notbetrieb mithilfe *alternativer Versorgung* und *Substitution* erreicht werden kann, wird im Nachfolgenden erläutert.

Der Ausfall der externen Stromversorgung kann mithilfe einer Notstromversorgung als *alternative Versorgung* kompensiert werden. Nach LANUV (2012), AMEV (2006) und dem BBK (2015b) kann eine Notstromversorgung z. B. realisiert werden durch

- Notstromaggregate,
- wieder und nicht wieder aufladbare Speicher für elektrische Energie (Akkumulatoren),
- separate Einspeisung aus einem unabhängigen Versorgungsnetz,
- für den Inselbetrieb geeignete Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen,
- durch Wärmkraftmaschinen angetriebene Generatoren (z. B. Blockheizkraftwerke<sup>3</sup>) oder
- Netzersatzanlagen.

Je nach bauordnungs- und arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen, elektrotechnischen Regeln sowie Geräte- und Prüfnormen wird die Notstromversorgung unterschieden in eine *Sicherheits-* und einer *Ersatzstromversorgung* (mehr hierzu u. a. in Obst und Wenige, 2006; Rosa, 2013; Geburtig, 2014).

Eine *Sicherheitsstromversorgung* hat das Ziel, bei Ausfall der externen Stromversorgung den weiteren Betrieb sicherheitsrelevanter Verbraucher wie Flucht- und Rettungswegbeleuchtungen, Notbeleuchtungen an gefährlichen Arbeitsplätzen, Gefahrenmeldeanlagen, Brandbekämpfungseinrichtungen und Fahrstuhlnotbetriebsanlagen aufrechtzuerhalten. Damit wird sichergestellt, dass während eines Stromausfalls ein

---

<sup>3</sup> Zutreffend soweit die Anforderungen der DIN 6280-14 (08/1997) erfüllt werden (vgl. LANUV, 2012).

gefahrloser Zustand einer Einrichtung erreicht wird und Flucht und Evakuierung insbesondere im Brandfall sowie Rettung von Personen möglich ist (vgl. LANUV, 2012).

Üblicherweise ist eine Aufrechterhaltung der vollen Versorgungsleistung durch eine *Sicherheitsstromversorgung* allein nicht möglich. Dies kann nur durch eine (zusätzliche) *Ersatzstromversorgung* sichergestellt werden, welche ausgewählte Verbraucher provisorisch und für eine festgelegte Dauer mit Elektrizität versorgt. Es werden in der Praxis insbesondere die Verbraucher versorgt, für die eine Hochverfügbarkeitsanforderung gilt und bei deren Ausfall Gefahren, Betriebsstörungen oder wirtschaftliche Schäden drohen und deren Unterbrechung der Stromversorgung aus betrieblichen Gründen nicht zulässig ist. Da dies auch sicherheitstechnische Verbraucher einschließen kann, sind *Ersatz-* und *Sicherheitsstromversorgungen* nicht in jedem Fall klar voneinander zu trennen. Je nach Projektierung von elektrotechnischen Anlagen werden deswegen auch elektrische Notstromanlagen sowohl für *Ersatz-* als auch für die *Sicherheitsstromversorgung* errichtet.

Neben einer *alternativen Versorgung* kann eine Notversorgung auch durch *Substitution* von Prozessprodukten sichergestellt werden. Können Prozesse aufgrund eines Stromausfalls nicht mehr durchgeführt werden, fehlen ihre Produkte bei der Aufrechterhaltung der Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung. Für einige Prozesse, die während eines Stromausfalls nicht durchgeführt werden können, ist es möglich, einen Sicherheitsvorrat von Prozessprodukten zu schaffen oder diese adäquat zu ersetzen, so dass eine Notversorgung und damit ein kontinuierlicher Betrieb sichergestellt sind. Eine entsprechende Lagerhaltung von Medizinprodukten und Medikamenten in Krankenhäuser, Dialysekliniken und Apotheken ermöglicht so z. B., dass zwar Bestellprozesse aufgrund eines Stromausfalls ausfallen, dieser Ausfall aber durch die vorgehaltenen Produkte temporär kompensiert und so die lebenswichtigen Versorgungsleistungen weiterhin erbracht werden können.

Die *alternative Versorgung* durch Notstrom und die *Substitution* fehlender Prozessprodukte stellen Redundanzen zur ausgefallenen externen Stromversorgung dar. Darüber hinaus bestehen weitere Fertigkeiten und Ressourcen, die es erlauben, eine Notversorgung sicherstellen. Hierzu zählen z. B. die Vorbereitung einer besonderen Aufbau- und Ablauforganisation oder die Planung, Dokumentation, Test und Übung von Sofort-, Reaktions- und Gefahrenabwehrmaßnahmen und der dazugehörigen Mittel bei Stromausfall (vgl. Birkmann, Bach, Guhl, Witting, Welle und Schmude, 2010). Diese sind als Unterstützungsaktivitäten zur Notversorgung zu verstehen.

Nicht in jedem Fall ist davon auszugehen, dass eine Notversorgung adäquat einem Regel- bzw. Normalbetrieb entspricht (vgl. BBK, 2015b). Trotz der Planung von Ersatzstromanlagen und Substitution kann in manchen Fällen ein Notbetrieb nicht einen vollumfänglichen Regel- bzw. Normalbetrieb sicherstellen. In diesem Fall kommt es zwangsläufig zu einem *Leistungsverlust*.

Darüber hinaus kann es gegenüber dem Regel- bzw. dem Normalbetrieb neben der Bereitstellung von niedrigeren Mengen auch zu Abweichungen von der gewohnten Güte bzw. Qualität der Versorgungsgüter bzw. der Dienstleistung kommen. Bei der Bewertung der Bewältigungskapazität ist ausschlaggebend, ob trotz der Abweichung das erwartete übliche Versorgungsziel noch erreicht wird. Insbesondere qualitative Abweichungen sind nur dann zulässig, wenn aufgrund der Abweichung weitere Gefahren ausgeschlossen werden können und ein lebenswichtiger Bedarf gedeckt wird. Bei unzulässigen Abweichungen kommt es zu einem entsprechenden *Leistungsverlust*. Ein Beispiel für eine zulässige Abweichung findet sich im Einsatz von Notbrunnen (Fischer und Wienand, 2015; BMI, 2017, 2016). Soweit der mengenmäßige Bedarf an Wasser verfügbar ist, zielt der Einsatz von Notbrunnen auf eine Minimalversorgung der Bevölkerung mit Notwasser in nicht gesundheitsschädlicher Qualität ab. Die Wasserqualität muss dabei nicht zwingend

den Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) entsprechen, so dass die Versorgung in zulässiger Weise von der geforderten Qualität im Regel- und Normalbetrieb abweichen darf und trotzdem eine Bewältigungskapazität der Trinkwasserversorgung darstellt.

Einige (Teil-)Prozesse können während eines Stromausfalls auch bei niedrigeren zur Verfügung gestellten Mengen von Eingangsprodukten aufrechterhalten werden. Andere sind wiederum in begrenzter Weise stromunabhängig und stellen ohne den Einsatz von Ersatzstromanlagen oder Substitution einen kontinuierlichen Betrieb sicher. Ähnlich verhält es sich bei entsprechender Prozessflexibilität und -elastizität, wenn (Teil-)Prozesse ohne erheblich negativen Einfluss auf die Leistungserbringung ausfallen, verzögert oder verringert werden. All diese Eigenschaften können je nach Sachverhalt eine *Teilaufrechterhaltung* der Versorgung ermöglichen.

Der *Leistungsverlust* und der *Teilleistungserhalt* sind Dimensionen der Bewältigungskapazität. Sie ermöglichen die Berücksichtigung der Abweichungen von erwarteten und üblichen Leistungen einer KRITIS-Einrichtung, die unabhängig von der Uhrzeit eines Ausfalls sind. Der *Leistungsverlust* stellt den prozentualen Teil der Leistung dar, der prozessbedingt während eines Stromausfalls trotz einer vorgeplanten Ersatzstromversorgung oder einer Substitution nicht mehr bereitgestellt werden kann. Der *Teilleistungserhalt* stellt den prozentualen Teil einer Leistung dar, der prozessbedingt während eines Stromausfalls permanent und unabhängig von einer vorgeplanten Ersatzstromversorgung oder einer Substitution aufrechterhalten werden kann.

Die *Notversorgung* beinhaltet eine der Situation angepasste Umstellung der internen Aufbau- und Ablauforganisation im Ereignisfall. Die abgestimmte Kombination aller reaktiven Krisenmaßnahmen, die regelmäßige Überprüfung der Notversorgung und ihrer Betriebsdauer ist nach guter kaufmännischer Praxis, den geltenden gesetzlichen Anforderungen und dem normativen Stand der Technik die Pflicht der Betreiber. So ist bei einer durchgeführten elektrotechnischen Projektierung und Vorhandensein einer Notstromeinrichtung und einer Substitution davon auszugehen, dass bei Ausfall der externen Stromversorgung vorgeplante und geübte Notfallkonzepte greifen, die es den Betreibern der KRITIS-Einrichtungen in einem bestimmten Umfang und einer bestimmten Dauer ermöglichen, Kernprozesse ihres Betriebes, und damit eine kontinuierliche Erbringung lebenswichtiger Versorgungsleistungen, ohne die Entstehung zusätzlicher Gefahren sicherzustellen.

Neben der von den Betreibern einer KRITIS-Einrichtung vorgehaltenen Bewältigungskapazität bestehen weitere Fertigkeiten und Ressourcen bei Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, die zu einer Aufrechterhaltung einer Notversorgung beitragen können. Diese externe Bewältigungskapazität ist jedoch stark begrenzt und stellt eine Engpassressource dar, die weder unmittelbar zeitnah noch verbindlich konzeptionell vorgeplant werden darf. Es ist davon auszugehen, dass diese Ressourcen bei großflächigen Schadenslagen nicht in ausreichender Zahl dort zur Verfügung gestellt werden können, wo sie benötigt werden (BBK, 2012). Im Rahmen der Betrachtung der initialen Wirkungen ist es daher sachgerecht, diese Bewältigungskapazität nicht zu berücksichtigen.

Während eines Stromausfalls kann eine Notversorgung in der Regel nicht unendlich lang aufrechterhalten werden. Die Betriebsdauer der Notversorgung leitet sich u. a. aus dem Ladestand von Akkumulatoren, dem Füllstand von Treibstoff- und Brennstofftanks oder dem Notfallvorrat ab. In einigen Fällen kann zwar die Dauer der Notversorgung in begrenztem Maße mithilfe Dritter durch Auffüllen und -tanken der Notversorgung während eines Stromausfalls über die eigentliche Betriebsdauer hinaus verlängert werden, ob dies jedoch in jedem Einzelfall auch mit entsprechender Vorplanung und durch vertragliche Regelung sichergestellt werden kann, ist im Hinblick auf die zu erwartenden krisenhaften Gesamtumstände fraglich

und kann nur durch ereignisabhängige Lageerkundungen Berücksichtigung finden. Je nach Anlagentyp ist zudem davon auszugehen, dass nach einer gewissen Betriebszeit die Notversorgung zwingend zu unterbrechen ist, weil z. B. Treibstoff- und Brennstoff aufgefüllt, Motorenöle und Kühlmittel ausgetauscht, Verschleißteile wie Staub- und Schmutzfilter gewechselt oder Wartungsintervalle zur Sicherung haftungsrechtlicher Schutzansprüche eingehalten werden müssen. Aufgrund der individuellen Projektierung der Notversorgung ist eine generische Vorhersage über Zeitpunkt und Umfang derartiger Unterbrechungen nur bedingt möglich. Aus diesen Gründen ist generell nicht von einer langandauernden oder gar unendlichen Betriebsdauer der Notversorgung auszugehen. Im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse für die initialen Wirkungen eines Stromausfalls auf KRITIS-Einrichtungen ist es daher sach- und praxisgerecht, von einem Baseline-Szenario auszugehen, in dem die Betriebsdauer der Notversorgung als endlich und unberücksichtigt eines Nachfüllens oder Nachladens betrachtet wird.

Mit der Dauer eines Stromausfalls werden die Bewältigungsressourcen gleichmäßig verbraucht, wodurch auch die Dauer, in der eine Notversorgung einer KRITIS-Einrichtung noch aufrechterhalten werden kann, gleichmäßig sinkt. Der gleichmäßige Verbrauch von Bewältigungsressourcen trifft sowohl für die Verwendung einer Notstromversorgung als auch für die Substitution zu. So liegt der Dimensionierung einer Notstromversorgung entsprechend den elektrotechnischen Anforderungen wie der Norm DIN 6280-13 (12/1994) sowie den assoziierten Empfehlungen wie LANUV (2012) und ZVEI (2008) ein weitestgehend gleichbleibender Betrieb der Versorgungsanlagen in einem zuvor ermittelten Lastbereich zugrunde. Zur Vermeidung erheblicher Anlagenschäden, Leistungsverluste oder gar eines Anlagenausfalls sind Netzstromersatzanlagen soweit möglich ausschließlich unter Normallast zu betreiben. Der Einsatz von Netzstromersatzanlagen ist so zu dimensionieren, dass Überlast-, Unterlast- und Leerlaufbetrieb zu vermeiden sind. Im Allgemeinen gilt, dass Generatoren nicht unterhalb einer Mindestbelastungsgrenze von 30 Prozent betrieben werden dürfen, da sonst die Gefahr droht, dass unverbranntes Öl in den Abgastrakt gelangt und diesen schädigt. Ein Unterlastbetrieb führt darüber hinaus zum Leistungsabfall, übermäßigem Ölverbrauch und zu Verrußung. Zur Vermeidung eines Unterlastbetriebs, wie er bei sinkender Versorgungsleistung z. B. in der Nacht droht, werden häufig Belastungswiderstände eingesetzt (in der Regel Heizwiderstände bzw. so genannte Lastbänke), die einen Betrieb wie unter Normallast sicherstellen. Im Leerlaufbetrieb besteht ebenfalls die Gefahr der Verrußung. Im Überlastbetrieb kann der Generator überhitzen, so dass Überstromschutzeinrichtungen ausgelöst werden. Ein gleichbleibender Betrieb ist deshalb anzustreben, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen und Schäden an Generatoren, Akkumulatoren und strombetriebenen Betriebsmitteln zu vermeiden. Von einem gleichmäßigen Verbrauch der Bewältigungsressourcen kann auch deswegen ausgegangen werden, weil in der Angabe der Betriebsdauer der Notversorgung dimensionierungs- und normbedingt bereits kurzzeitige Schwankungen des Verbrauchs (wie durch vorübergehende Unter- und Überlastphasen bei Belastungstößen durch Zuschalten von Motoren) sowie kurzzeitige Abweichungen von Betriebsparametern (wie zu hohe oder zu niedrige (Außen-)Temperatur) berücksichtigt sind (u. a. LANUV, 2012; ZVEI, 2008; Rosa, 2013). Ein gleichmäßiger Verbrauch liegt ebenfalls beim Verzehr von Notfallvorräten im Rahmen der Substitution vor.

Das Verhältnis zwischen bereits verbrauchter und maximal vorhandenen Bewältigungsressourcen einer KRITIS-Einrichtung wird für jeden Zeitpunkt eines Stromausfalls durch die Verbrauchsquote ausgedrückt. Je näher während eines Stromausfalls der Zeitpunkt rückt, in dem die Bewältigungsressourcen zur kontinuierlichen Bereitstellung lebenswichtiger Versorgungsleistungen einer KRITIS-Einrichtung vollständig aufgebraucht sind, desto weniger Zeit steht zur Verfügung, um Maßnahmen für eine Aufrechterhaltung oder für die Zeit nach dem Ende der Notversorgung zu planen, vorzubereiten und umzusetzen. Aufgrund der Gleichmäßigkeit der Reduzierung von Bewältigungsressourcen liegt der Verbrauchsquote ein linearer

Zusammenhang zwischen der Dauer des Stromausfalls und der Betriebsdauer der Notversorgung zugrunde. Je höher der Wert der Verbrauchsquote ist, desto höher ist der Anteil der verbrauchten Bewältigungsressourcen und desto geringer ist die noch verfügbare Betriebsdauer der Notversorgung.

Mit dem Ende der Betriebsdauer der Notversorgung erreicht auch die Verbrauchsquote ihre höchste Ausprägung. Der Anstieg der Verbrauchsquote indiziert einen zunehmenden Verlust der Resistenzfähigkeit einer KRITIS-Einrichtung, da weniger Zeit zur Verfügung steht, Maßnahmen einzuleiten, die eine Weiterführung der Notversorgung ermöglichen. Die Stärke des Anstiegs des Resistenzverlustes in Abhängigkeit von der Verbrauchsquote wird durch eine Verbrauchsfunktion beschrieben, die für alle KRITIS-Einrichtungen gilt.

### 9.5.2 Operationalisierung des Resistenzverlusts

Des Weiteren ist der Resistenzverlust zu operationalisieren. Da der Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung von ihrer Bewältigungskapazität abhängt, ist die Operationalisierung des Resistenzverlustes zweistufig vorzunehmen. Zunächst ist in einer ersten Stufe die bestehende Bewältigungskapazität der betrachteten KRITIS-Einrichtungen festzustellen. Die zweite Stufe der Operationalisierung besteht darin, den vom Verzehr der Bewältigungsressourcen abhängigen Resistenzverlust mithilfe einer Verbrauchsfunktion zu bewerten. Die Messung der Bewältigungskapazität und der Verbrauchsfunktion bedingen einander und können in unterschiedlicher Weise erfolgen. Ausgewählte Optionen zur Operationalisierung beider Stufen werden im Nachfolgenden diskutiert.

In der Literatur finden sich implizite oder explizite Ansätze zur Messung der Bewältigungskapazität. Die *implizite Messung* basiert auf der Annahme, dass die Effektivität der Bewältigungskapazität einer substantiellen ex-ante-Planung und Investition in die Katastrophenvorsorge bedarf (vgl. Cardona et al., 2012). Vorgeplante Notfallmaßnahmen können nur dann etabliert werden, wenn entsprechende Vermögenswerte, soziale Netzwerke sowie lokale und auch externe Institutionen, die sich potentiellen Gefahren widmen, vorhanden sind (vgl. Inter-American Development Bank, 2010; Carreño, Cardona und Barbat, 2007; Ciurean, Schröter und Glade, 2013). Entsprechend werden in einer Vielzahl an Resilienz- und Vulnerabilitätsrahmenwerken für diese Einflussgrößen Parameter gebildet, mit denen je nach Analysezweck und Kontext die Bewältigungskapazität implizit gemessen wird. Dieses Vorgehen ist insbesondere dann geeignet, wenn die Beurteilung von Gefahren einem Mehr- oder All-Gefahrenansatz folgt, Widerstands- und Anpassungsfähigkeiten zu berücksichtigen sind und eine geringe zeitliche und räumliche Auflösung für die Entscheidungsunterstützung ausreichend ist. Eine *explizite Messung* der Bewältigungskapazität stützt sich hingegen auf das Vorhandensein von konkreten Fertigkeiten und Ressourcen, mit denen eine konkrete Gefährdung beherrscht werden soll. Hierdurch liegt der Fokus auf hochaufgelösten raumzeitlichen und objektscharfen Darstellungen. Da für die Zwecke der vorliegenden Vulnerabilitätsanalyse eine implizite Messung zu allgemeine und unkonkrete Ergebnisse in einer nicht geeigneten Auflösung liefern würde, wird eine explizite Messung der Bewältigungskapazität favorisiert.

Hinsichtlich der Beherrschung eines Stromausfalls entspricht die Bewältigungskapazität einer KRITIS-Einrichtung der Betriebsdauer der Notversorgung. Diese bestimmt sich aus der Ersatzstromversorgung und der Dauer, in der eine Substitution möglich ist.

Die Betriebsdauer einer Notversorgung von KRITIS-Einrichtungen kann operationalisiert werden anhand

- *Normativer Vorgaben*,
- *Studien und bestehender Rahmenwerke* oder
- *Expliziten Abfragen* bei den KRITIS-Betreibern.

Anhand von *normativen Vorgaben* kann die Betriebsdauer der Notversorgung für einige KRITIS-Typen operationalisiert werden. Im Bauordnungs- und Arbeitsschutzrecht sowie in den anerkannten Regeln der Technik sind Forderungen über den Betrieb und die Länge der Betriebsdauer der Notversorgung einiger KRITIS-Typen enthalten. So besteht z. B. für eine batteriegestützte Stromversorgung in Krankenhäusern und Arztpraxen nach DIN VDE 0558-507 (12/2008) die elektrotechnische Anforderung, eine Notbetriebszeit von einer bis drei Stunden zu erreichen. Die Musterkrankenhausbauverordnung fordert zur Aufrechterhaltung des Krankenhausbetriebes eine Ersatzstromversorgung mit einer Betriebszeit von 24 Stunden (§ 19 Abs. 1 KhBauVO). Beim Einsatz von Netzersatzanlagen, Notstromgeneratoren und Batterien in Störfallbetrieben wird üblicher Weise eine kontinuierliche Notstromversorgung von wenigen Minuten bis zu 72 Stunden angestrebt (LANUV, 2012), in Rechenzentren 24 bis 72 Stunden (ebd.). Teilweise gelten für einzelne Prozessschritte auch individuelle Anforderungen (u. a. LANUV, 2012; AMEV, 2006; Geburtig, 2014).

Die Betriebsdauer der Notversorgung von KRITIS-Typen kann des Weiteren anhand *bestehender Rahmenwerke* und anhand von *Studienergebnissen* operationalisiert werden. So wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Studien durchgeführt, in denen mithilfe von Literaturrecherchen, Experteninterviews und -workshops die Betriebsdauern der Notversorgung von KRITIS-Typen analysiert wurden (u. a. Steetskamp und Wijk, 1994, Kirchner, Heinrich, Kemmler, Rits, Schlesinger und Weinmann, 2009; Hiete et al., 2010; Deutscher Bundestag, 2011a; Brenig et al., 2011; Deutscher Bundestag, 2011b, 2013a und b; Laugé et al., 2015). Bei der Analyse der Betriebsdauern beziehen sich die Studienautoren teilweise auf normative Vorgaben. Durch diese Arbeiten liegen generische Aussagen über die Betriebsdauer von KRITIS-Typen vor, die Eingang in Rahmenwerken zur Gefahrenabwehrplanung und Vorbereitung auf Stromausfälle fanden (u. a. Hiete et al., 2010; HdMI, 2013).

Eine Reihe von Rahmenwerken und Konzepten zur Vorbereitung auf Stromausfälle und zur Gefahrenabwehrplanung empfiehlt darüber hinaus die *explizite Abfrage* der Betriebsdauer der Notversorgung bei den jeweiligen KRITIS-Einrichtungen (u. a. Ministerium des Innern, für Sport und Infrastruktur Rheinland-Pfalz, 2006, Hiete et al. 2010, Regierungspräsidium Karlsruhe, 2014, Münzberg, Wiens und Schultmann, 2017). Diese Aufgabe sollte parallel zur Erstellung von lokalen KRITIS-Katastern und mithilfe der etablierten Sicherheitspartnerschaften auf lokaler Ebene erfüllt werden.

Für die Zwecke der Operationalisierung der Betriebsdauer der Notversorgung in dieser Arbeit erscheint die *explizite Abfrage* am geeignetsten. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Nicht für alle KRITIS-Typen lassen sich normative Vorgaben finden. Üblicherweise beinhalten die Vorgaben lediglich Mindestanforderungen als nutzungsspezifisch normierte Bemessungsbetriebsdauern, welche durch KRITIS-Einrichtungen übertroffen werden können. Darüber hinaus können bei Vorlage entsprechender Sachgründe Ausnahmeregelungen möglich sein. Hierdurch ist durch die bloße Existenz einer Regelung kein genereller Rückschluss möglich, dass alle KRITIS-Einrichtungen (lediglich) den Mindestanforderungen entsprechen. Die Erkenntnisse der aufgezeigten Studien über die Betriebsdauern der Notversorgung von KRITIS-Einrichtungen sind

zu generisch. Es ist unklar, wie repräsentativ die Ergebnisse sind und inwieweit sich diese auf die Grundgesamtheit aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen übertragen lassen. Problematisch ist bei der Operationalisierung sowohl mithilfe *normativer Vorgaben* als auch mithilfe von *Studienergebnissen*, dass die Betriebsdauern üblicherweise Ergebnisse einer einrichtungsindividuellen Überlegung nach taktischen, wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten ist (vgl. Melioumis, 2013). So können sich aufgrund der spezifischen Strukturen und betriebseigenen Konzepte zulässige Ausnahmen und unterschiedliche Betriebsdauern der Notversorgung ergeben. Eine pauschalisierte Annahme einer Betriebsdauer zur Notversorgung basierend auf *normativen Vorgaben* oder *Studien* ermöglichen dahingehend keine objektscharfen und zuverlässigen Rückschlüsse über die tatsächlich vorliegende Betriebsdauer der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen und würden daher zu unkalkulierbaren Unsicherheiten und Verzerrungen im Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse führen. Solche Operationalisierungsansätze erscheinen deswegen ungeeignet und für eine Entscheidungsunterstützung als nicht sachgemäß.

Häufig wird die *explizite Abfrage* aufgrund ihres Aufwandes bei der Datenakquise und der Aktualisierung der Daten kritisiert. In den Rahmenwerken zur Vorbereitung auf Stromausfälle und zur Gefahrenabwehrplanung, die *explizite Abfrage* empfehlen, wird jedoch darauf hingewiesen, dass für eine effektive Gefahrenabwehrplanung ortsspezifische Daten notwendig sind (wie Kontakt- und Standortdaten).

Die zweite Stufe der Operationalisierung besteht darin, eine geeignete Verbrauchsfunktion festzulegen, die den Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Resistenzverlustes und der Verbrauchsquote darstellt.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs können unterschiedliche Anstiegsfunktionen zur Anwendung kommen, wie

- *binäre*,
- *lineare*,
- *exponentielle* oder
- *entscheiderdefinierte*

Funktionen. Binäre, lineare und exponentielle Funktionen basieren auf vereinfachten Annahmen. Die entscheiderdefinierte Funktion basiert dagegen auf der Einschätzung durch Entscheidungsträger. Abbildung 9.5 zeigt die Anwendung der verschiedenen Funktionen auf ein fiktives Beispiel von drei KRITIS-Einrichtungen, die unterschiedliche Betriebsdauern der Notversorgung aufzeigen.

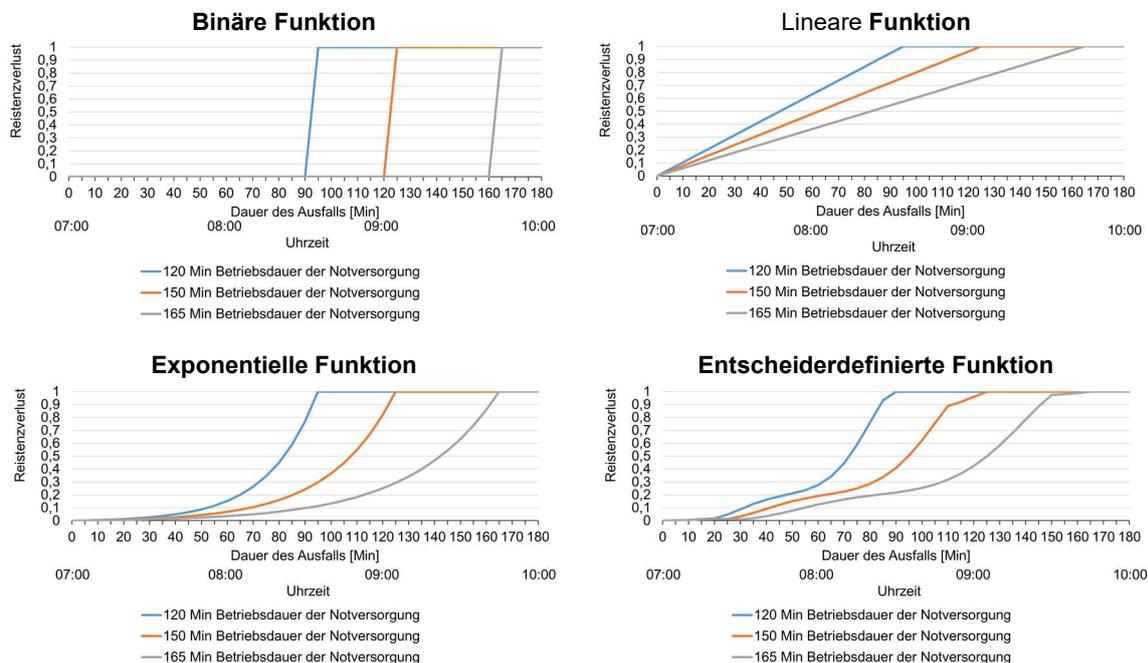


Abbildung 9.5: Ergebnisse des Resistenzverlusts unter Verwendung verschiedener Verbrauchsfunktionen.

Je nach Wahl kommt es zu unterschiedlichen Ergebnisdarstellungen in der Vulnerabilitätsanalyse. Der Einfluss der jeweiligen Funktionen auf die Bestimmung des Resistenzverlustes ist deswegen dem Entscheidungsträger stets transparent zu machen.

Die Wahl einer *binären Funktion* führt in der Darstellung des Resistenzverlustes dazu, dass lediglich Wirkung und Nicht-Wirkung der Notversorgung dargestellt werden. Hierdurch ist der Anstieg einstufig und zeigt keinen sich entwickelnden Verlauf zwischen den Zeitpunkten des Ausfallbeginns und dem vollständigen Verzehr von Bewältigungsressourcen. Die mit dem Verzehr von Bewältigungsressourcen einhergehenden zeitlichen Veränderungen der Resistenzfähigkeit werden nur bedingt wiedergegeben, was nicht hinreichend praxisgerecht erscheint.

Eine *lineare Funktion* zeigt hingegen einen monotonen und geradlinigen Anstieg zwischen diesen beiden Zeitpunkten. Das Ergebnis unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen der Verbrauchsquote und dem Anstieg des Resistenzverlustes, so dass die Verbrauchsfunktion in diesem Fall der Verbrauchsquote entspricht. Dadurch wird z. B. dargestellt, dass zum Zeitpunkt, an dem die Hälfte der Bewältigungsressourcen verbraucht ist, auch nur noch die Hälfte der Resistenzfähigkeit besteht. Da jedoch in dieser Situation noch eine ausreichende Handlungsfähigkeit gegeben sein kann, erscheint die Verwendung einer linearen Funktion nicht hinreichend sachgerecht.

Durch eine *exponentielle Funktion* kann der Anstieg des Resistenzverlusts so betont werden, dass erst gegen Ende der Betriebsdauer der Notversorgung der Resistenzverlust ein erhebliches Maß erreicht. Eine solche Funktion erscheint praxis- und sachgerecht, gleichwohl unklar ist, welche geeignete Krümmung der exponentiellen Funktion zu wählen ist.

Der Zusammenhang zwischen Verbrauchsquote und Resistenzverlust kann darüber hinaus durch Entscheidungsträger geschätzt werden. Die Schätzung kann innerhalb einer Abfrage erfolgen, in der die Entscheidungsträger anhand ihrer Erfahrung und Beurteilung den Anstieg bewerten. Aus deren Auswertung wird eine entscheidenderdefinierte Verbrauchsfunktion abgeleitet. Da hierdurch die Beurteilung der Experten explizit berücksichtigt wird, wird diese Option der Operationalisierung der Verbrauchsfunktion hinsichtlich ihrer Sach- und Praxisgerechtigkeit als geeignet betrachtet.

Der Entschluss, Leistungsverluste und Teilleistungserhalte zu berücksichtigen, sowie die Wahl ihres Beurteilungsverfahrens sind mit Bedacht zu fassen. Je nach Wahl des Messverfahrens haftet dem Ergebnis des Resistenzverlustes unter Umständen eine nicht unerhebliche Intransparenz an, die es für den Entscheidungsträger äußerst schwierig machen kann, das Ergebnis zu interpretieren und auszuwerten.

Die Beurteilung des Leistungsverlustes als auch des Teilleistungserhaltes ist durch die KRITIS-Betreiber vorzunehmen und durch die lokalen Gefahrenabwehrbehörden in ihren regionalen Zuständigkeitsbereich zu koordinieren. Zur Vermeidung von Messfehlern und zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Beurteilungsergebnisse ist es notwendig, dass für KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs ein einheitliches Messverfahren gewählt und standardisiert angewendet wird (Ordnungsaxiom). Die Wahl des Messverfahrens kann dabei auf eine rein subjektive Schätzung bis hin zu einer detaillierten Mikrosimulation fallen.

Sowohl die Koordination als auch die Durchführung des gewählten Messverfahrens ist mit Schwierigkeiten und hohem Aufwand verbunden. Gerade aufgrund des Mangels an personellen und finanziellen Ressourcen, Fachwissen, politischem wie betrieblichem Rückhalt und Umsetzungswillen kann dieser Aufwand sowohl für die koordinierende lokale Gefahrenabwehrbehörde als auch für die einzelnen KRITIS-Betreiber einen unzumutbaren Umfang annehmen, der nicht mehr im Verhältnis steht zum Erkenntnisgewinn der Analyse. Die Integration weiterer Dimensionen der Bewältigungskapazität und deren Berücksichtigung bei der Berechnung des Resistenzverlustes ist daher generell möglich, aber aus den genannten Gründen kritisch zu reflektieren.

### 9.5.3 Mathematische Beschreibung des Resistenzverlustes

Für eine KRITIS-Einrichtung  $i$  ist eine Betriebsdauer der Notversorgung  $\Delta t_i^{CC}$  festzustellen. Mit dem Zeitpunkt  $t_0$ , zu dem ein Stromausfall beginnt und  $\Delta t_i^{CC}$  kann der Zeitpunkt  $t_i^{CC}$ , ab dem die vorhandenen Bewältigungsressourcen einer KRITIS-Einrichtung vollständig aufgebraucht sind und eine Notversorgung in der initialen Betrachtung eines Stromausfalls nicht mehr aufrechterhalten werden kann, berechnet werden:

$$t_i^{CC} = t_0 + \Delta t_i^{CC} \quad (9-5)$$

Der Wert der Verbrauchsquote  $ConsRatio_i(t_{out})$  ist zeitpunktspezifisch für eine KRITIS-Einrichtung  $i$  und für einen Zeitpunkt während eines Stromausfalls  $t_{out}$  im Betrachtungszeitraum eines Bemessungsstromausfalls.  $ConsRatio_i(t_{out})$  liegt in einem Wertebereich zwischen null und hundert.

Verfügt eine KRITIS-Einrichtung über Bewältigungskapazität ( $t_i^{CC} \neq t_0$ ), liegt zu Beginn eines Stromausfalls die maximale Ausprägung der Menge an Bewältigungsressourcen vor, um die Betriebsdauer der Notversorgung  $\Delta t_i^{CC}$  sicherzustellen. Die Verbrauchsquote liegt bei null, und es gilt  $ConsRatio_i(t_{out} = t_0) = 0$ . Bis zum Zeitpunkt  $t_i^{CC}$  werden alle Bewältigungsressourcen vollständig verzehrt. Die Verbrauchsquote steigt zu diesem Zeitpunkt auf hundert, und es gilt  $ConsRatio_i(t_{out} = t_i^{CC}) = 100$ . Die Veränderung der

Verbrauchsquote zwischen den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_i^{CC}$  kann durch verschiedene Funktionen dargestellt werden. Entsprechend der vorhergehenden Diskussion zur Operationalisierung des Resistenzverlustes wird ein linearer Zusammenhang festgelegt, aus dem für jeden Zeitpunkt eines Stromausfalls eine zeitspezifische Verbrauchsquote berechnet wird. Ab dem Zeitpunkt  $t_i^{CC}$  liegt ein Zustand vor, der dem Zustand einer KRITIS-Einrichtung ohne Bewältigungskapazität gleicht und bei dem  $ConsRatio_i(t_i^{CC} > t_{out}) = 100$  gilt. Liegt bereits vor einem Stromausfall keine Bewältigungskapazität vor ( $\Delta t_{CC}^i = 0$  bzw.  $t_i^{CC} = t_0$ ), kann eine KRITIS-Einrichtung auch während eines Stromausfalls keine Notversorgung sicherstellen und erreicht mit dem Beginn des Stromausfalls die maximale Ausprägung der Verbrauchsquote.

Die Verbrauchsquote  $ConsRatio_i(t_{out})$  berechnet sich unter Verwendung eines linearen Zusammenhangs aus:

$$ConsRatio_i(t_{out}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } t_{out} = t_0 \\ 1 & \text{wenn } \frac{t_{out} - t_0}{t_i^{CC} - t_0} > 1 \\ \frac{t_{out} - t_0}{t_i^{CC} - t_0} & \text{wenn } \frac{t_{out} - t_0}{t_i^{CC} - t_0} < 1 \end{cases} \quad (9-6)$$

In Abbildung 9.6 werden beispielhaft die Verbrauchsquoten von drei KRITIS-Einrichtungen dargestellt, die verschiedene Betriebsdauern der Notversorgung aufweisen. Die Darstellung zeigt die Verbrauchsquoten der drei KRITIS-Einrichtungen für verschiedene Zeitpunkte während eines Stromausfalls, der um sieben Uhr begonnen hat. Unterstellt wird, dass die Notversorgung der KRITIS-Einrichtungen 120, 150 bzw. 165 Minuten anhält.

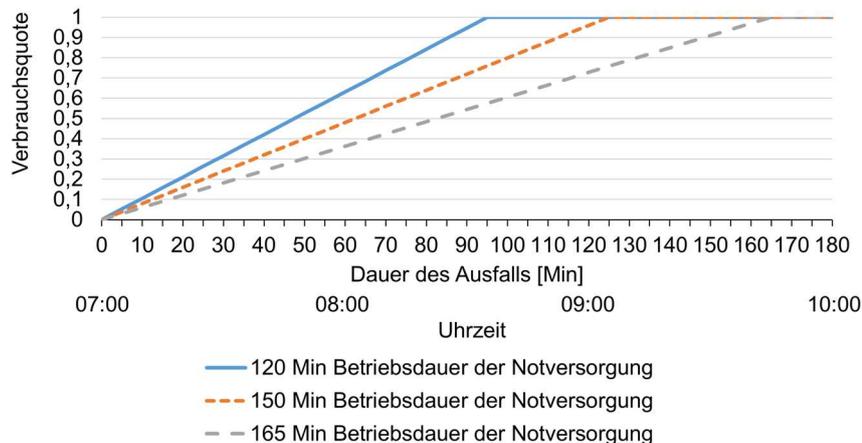


Abbildung 9.6: Darstellung der Verbrauchsquote für drei fiktive KRITIS-Einrichtungen.

Mit steigender Verbrauchsquote steigt auch der Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung. Der Resistenzverlust  $ResistLoss_i(t_{out})$  gibt für eine KRITIS-Einrichtung  $i$  und für einen bestimmten Zeitpunkt während eines Stromausfalls  $t_{out}$ , der im Betrachtungszeitraum des Bemessungsstromausfalls liegt, an, wie stark der Verlust der Resistenzfähigkeit in Abhängigkeit zur Verbrauchsquote ist. Der Resistenzverlust liegt in einem Wertebereich zwischen null und eins. Der Resistenzverlust ist null, wenn eine vollwirksame Notversorgung mit unverbrauchten Bewältigungsressourcen vorliegt. Es gilt  $ResistLoss_i(t_{out} = t_0) = 0$ . Sind alle Bewältigungsressourcen aufgebraucht und kann eine Notversorgung nicht mehr sichergestellt

werden, erreicht die Verbrauchsquote den höchsten Wert  $ConsRatio_i(t_i^{CC} \geq t_{out}) = 100$ . Der Resistenzverlust liegt ab diesem Zeitpunkt bei eins, und es gilt  $ResistLoss_i(t_i^{CC} \geq t_{out}) = 1$ .

Wie stark sich der Resistenzverlust in Abhängigkeit von der Verbrauchsquote insbesondere zwischen dem Beginn eines Stromausfalls  $t_0$  und dem Ende der Betriebsdauer der Notversorgung  $t_i^{CC}$  ändert, wird durch die Verbrauchsfunktion  $CopingDepl_i(t_{out})$  beschrieben:

$$ResistLoss_i(t_{out}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } ConsRatio_i(t_{out}) = 0 \\ 1 & ConsRatio_i(t_{out}) = 1 \\ CopingDepl_i(t_{out}) & \text{sonst} \end{cases} \quad (9-7)$$

Die Verbrauchsfunktion  $CopingDepl_i(t_{out})$  ist eine Anstiegsfunktion, die den Anstieg des Resistenzverlustes in Abhängigkeit von der Verbrauchsfunktion beschreibt. Wie zuvor diskutiert, sind unterschiedliche Operationalisierungsoptionen möglich, aus denen eine zu wählen ist.

Darüber hinaus kann in der Berechnung des Resistenzverlustes auch der Leistungsverlust  $PerfLoss_i$  und der Teilleistungserhalt  $PerfCont_i$  einer KRITIS-Einrichtung  $i$  berücksichtigt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob lediglich (1) ein Leistungsverlust, (2) ein Teilleistungserhalt oder (3) ein Leistungsverlust und Teilleistungserhalt vorliegen.

Liegt lediglich (1) ein Leistungsverlust  $PerfLoss_i$  vor, kann dieser wie folgt in die Berechnung des Resistenzverlustes integriert werden:

$$ResistLoss_i(t_{out}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } ConsRatio_i(t_{out}) = 0 \\ 1 & ConsRatio_i(t_{out}) = 1 \\ \left( \frac{100 - PerfLoss_i}{100} \right) * CopingDepl(t_{out}) + \frac{PerfLoss_i}{100} & \text{sonst} \end{cases} \quad (9-8)$$

Abbildung 9.7 zeigt beispielhaft eine lineare Abhängigkeit des Resistenzverlustes von der Verbrauchsquote für eine KRITIS-Einrichtung mit einem dreißigprozentigen Leistungsverlust.

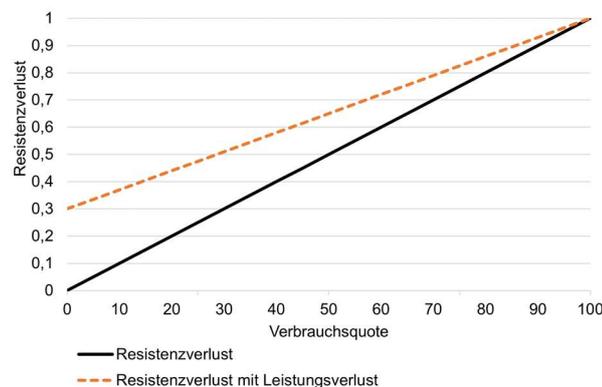


Abbildung 9.7: Berücksichtigung eines Leistungsverlustes im Resistenzverlust.



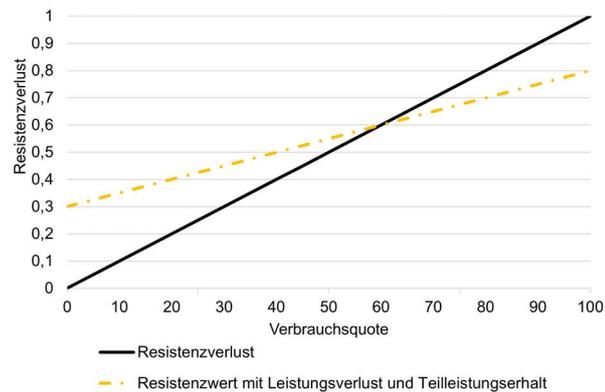


Abbildung 9.9: Berücksichtigung von Leistungsverlust und Teilleistungserhalt im Resistenzverlust.

## 9.6 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Analysekomponenten der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse erläutert. Hierzu wurde zunächst auf die wesentlichen Notationen und Mengen von KRITIS-Einrichtungen eingegangen. Im Anschluss wurden die einzelnen Analysekomponenten des Relevanzgewichtes, des Leistungsvermögens (Kritikalitätsindikator), der fehlenden Versorgungsleistung (Kritikalitätsindikator) und des Resistenzverlustes (Bewältigungsindikator) hinsichtlich ihrer Begriffsbestimmung erläutert. Darüber hinaus wurden jeweils geeignete Operationalisierungsoptionen diskutiert und für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit eine mathematische Beschreibung festgelegt.

Was zur praktischen Anwendung der vorgestellten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalysekomponenten noch fehlt, ist die Wahl der jeweiligen Operationalisierungsoption und die Bestimmung der Eingangswerte. Entsprechend der Struktur der Entscheidungsanalyse ist hierbei eine enge Einbindung der Entscheidungsträger vorgesehen. Basierend auf ihren Beurteilungen und Präferenzen sind geeignete Relevanzgewichte, Vergleichsattribute zur Berechnung des Leistungsvermögens, Funktionen der fehlenden Versorgungsleistung und geeignete Betriebsdauern der Notversorgung und Verbrauchsfunktion zur Berechnung des Resistenzverlustes zu bestimmen bzw. festzulegen, was das folgende Kapitel zeigt.

# 10 Bestimmung der Eingangswerte der Analysekomponenten

Im vorhergehenden Kapitel wurde mit der Erörterung der einzelnen Analysekomponenten in die Grundzüge und den möglichen Operationalisierungsoptionen der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse eingeführt. Da für die Analysekomponenten verschiedene Operationalisierungsoptionen zur Verfügung stehen, werden im Nachfolgenden die jeweils favorisierten Optionen gewählt, ihre konkrete Umsetzung erläutert und die daraus resultierenden Ergebnisse für die Bestimmung der Eingangswerte dargestellt.

Für die Bestimmung der Eingangswerte bedarf es der Partizipation der Entscheidungsträger. Deswegen werden zunächst die Schnittstellen zwischen den Entscheidungsträgern, dem KRITIS-Kataster und der Bestimmung der Eingangswerte der Analysekomponenten erläutert. Anschließend wird dargestellt, wie die Eingangswerte für die Relevanzgewichte, das Leistungsvermögen, die Versorgungsleistung und den Resistenzverlust ermittelt werden. Schlussendlich wird ein Bemessungsstromausfall festgelegt.

## 10.1 Schnittstellen zwischen Entscheidungsprozessen und Entscheidern

In den Abschnitten 8.1 und 8.2 wurden die Entscheidungsprozesse der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung erläutert. In beiden Entscheidungsprozessen ist die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse eingebettet. Zur Bestimmung der Eingangswerte sind Informationen aus dem KRITIS-Kataster eines zu analysierenden Kreises und die Beurteilungen von Entscheidungsträgern von wesentlicher Bedeutung.

Die Abbildung 10.1 zeigt in schematischer Weise die Schnittstellen zwischen den Entscheidungsträgern, dem KRITIS-Kataster und der Bestimmung der Eingangswerte der Analysekomponenten.

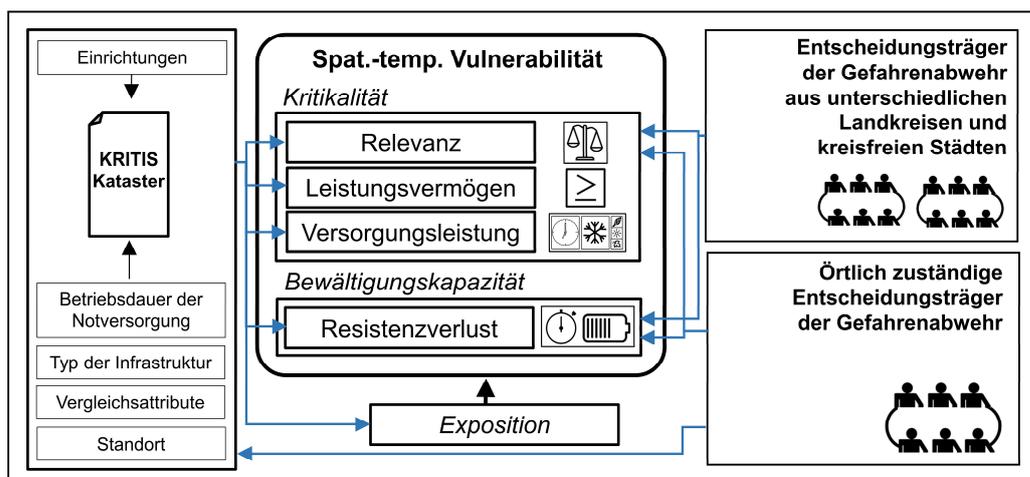


Abbildung 10.1: Schnittstellen zwischen den Entscheidungsträgern, dem KRITIS-Kataster und der Bestimmung der Eingangswerte.

Zunächst wird die Schnittstelle zwischen den Entscheidungsträgern und dem KRITIS-Kataster beleuchtet. In beiden Entscheidungsprozessen ist zunächst ein KRITIS-Kataster zu erstellen. Dieses dient der Risikoidentifikation, um entweder die zu berücksichtigenden Schutzgüter oder die Lage mit den jeweils betroffenen KRITIS-Einrichtungen festzustellen. Wie KRITIS-Kataster erstellt werden, wurde in den Abschnitten 4.6.2 und 8.4 beschrieben. Diese Festlegung der im KRITIS-Kataster aufgelisteten KRITIS-Einrichtungen obliegt den örtlich zuständigen Entscheidungsträgern, die dies von den gewählten Analysezielen abhängig machen. Es ist zu beachten, dass mit steigender Anzahl der zu berücksichtigten KRITIS-Typen die Differenzierung der Gefahrenpotentiale schwieriger wird, da aufgrund der niedrigeren Vulnerabilitätswerte der einzelnen KRITIS-Einrichtungen auch der verwertbare Erkenntnisgewinn sinkt. Sinnvoll kann es daher sein, mehrere unabhängige Analysen mit unterschiedlichen KRITIS-Typen oder mit Schwerpunkten zu einzelnen Sektoren durchzuführen.

Über die zu berücksichtigenden Einrichtungen müssen wesentliche Informationen im KRITIS-Kataster vorhanden sein, damit diese als Eingangswerte in die Vulnerabilitätsanalyse einfließen können. Die Angaben sind durch die örtlich zuständigen Entscheidungsträger federführend zusammenzutragen und zur Durchführung der Vulnerabilitätsanalyse zur Verfügung zu stellen.

Im Entscheidungsprozess der akuten Krisenbewältigung werden nur die KRITIS-Einrichtungen berücksichtigt, die von den Wirkungen eines Stromausfalls betroffen sind. Die exponierten KRITIS-Einrichtungen werden in der Vulnerabilitätsanalyse berücksichtigt (Exposition). In dieser Weise lassen sich unterschiedliche Szenarien eines Stromausfalls abbilden.

Wie in Kapitel 9 aufgezeigt, braucht es zur Operationalisierung der Analysekomponenten Daten aus einem KRITIS-Kataster. Diese Schnittstelle wurde dort ausführlich beschrieben.

Darüber hinaus ist die Schnittstelle zwischen den Entscheidungsträgern und der Bestimmung der Eingangswerte der Analysekomponenten zu beleuchten. Für die Operationalisierung von Relevanzgewichten (vgl. Abschnitt 9.2) und des Resistenzverlustes (vgl. Abschnitt 9.5) sind Beurteilungen von Entscheidungsträgern vorzunehmen. Um den Anforderungen der Gefahrenprognose nach einer Beurteilung von Durchschnittsentscheidern zu entsprechen (vgl. Abschnitte 3.2, 7.2 und 9.2), werden zunächst Beurteilungen durch eine Gruppe von Entscheidungsträgern aus unterschiedlichen Landkreisen und kreisfreien Städten vorgenommen, die die Beurteilung unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten und von weiteren Tatsacheerkennungnissen vornehmen (vgl. Abschnitt 9.2.2). Dieses Vorgehen dient gleichzeitig der Entscheidungsunterstützung für die örtlich zuständigen Entscheidungsträger, die in einem weiteren Schritt die Möglichkeit haben, Anpassungen aufgrund ihres Tatsachenwissens und ihrer örtlichen Kenntnisse vorzunehmen.

Bei der Bestimmung der Relevanzgewichte und des Resistenzverlustes liegen aufgrund der subjektiven Abschätzung durch Entscheidungsträger Unschärfen vor. Neben der Verwendung von Durchschnittswerten und Werten, die durch die örtlichen Entscheidungsträger im Konsens festgelegt werden, können auch die Unschärfen mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigt werden. Die Umsetzung wird in den nachfolgenden Abschnitten in Bezug auf die einzelnen Analysekomponenten erläutert.

Darüber hinaus bestimmen örtlich zuständige Entscheidungsträger, welche Vergleichsattribute für die Operationalisierung des Leistungsvermögens und welches Operationalisierungsverfahren für die Operationalisierung der Versorgungsleistung gewählt werden.

## 10.2 Eingangswerte für die Relevanzgewichte

In Anbetracht der Kontroversität bei der Bestimmung Lokaler Kritischer Infrastrukturen können Relevanzgewichte nicht für alle in Abschnitt 4.6 erörterten Einrichtungen diskutiert werden. Exemplarisch werden an dieser Stelle die am bedeutendsten erscheinenden 27 KRITIS-Typen zur Bestimmung des jeweiligen Relevanzgewichtes ausgewählt. Zur Bestimmung der Relevanzgewichte wird eine subjektive Gewichtungsmethodik (vgl. Abschnitt 6.2.3) anhand der Abschätzung durch Entscheidungsträger favorisiert, die sowohl Konsensentscheidungen einer Gruppe als auch die Berücksichtigung von Unschärfen (vgl. Abschnitt 6.2.4), die durch die Abschätzung von mehreren Entscheidern entstehen, zulässt.

Aufgrund der hohen Anzahl an zu gewichtenden KRITIS-Typen, der geringen Erfahrung der Entscheidungsträger mit Gewichtungsmethoden der multiattributiven Analyse und der hohen Anzahl der an der Bestimmung zu beteiligenden Entscheidungsträger erscheint die Gewichtungsmethode des Direct Weightings als eine der praktikabelsten Methoden. Sie wird daher zur Bestimmung der Relevanzgewichte genutzt.

Um den Anforderungen an die Gefahrenprognose gerecht zu werden, müssen die Bewertungen vergleichbar sein mit denen von Durchschnittsentscheidern (vgl. Abschnitte 3.2, 7.2 und 9.2). Um dahingehend eine Entscheidungsunterstützung zu ermöglichen, werden Beurteilungen von Entscheidern berücksichtigt, die unterschiedliche räumliche Zuständigkeitsgebiete haben. Von deren Bewertungen lässt sich zunächst eine Bewertung von Durchschnittsentscheidern ableiten. Gleichzeitig ist die konkrete Situation und Tatsachenwissen einzubeziehen, welches im Augenblick der Bewertung im Erkenntnishorizont des Entscheiders liegen. Hierzu nutzen örtlich zuständige Entscheidungsträger die Ergebnisse der Durchschnittsentscheider und passen es entsprechend ihrer örtlichen Kenntnisse und ihres Tatsachenwissens an.

Dieses Vorgehen wird in einem aus zwei Runden bestehenden modifizierten Delphi-Verfahren angewendet (Abbildung 10.2). Üblicherweise besteht ein Delphi-Verfahren aus mehreren Runden, in denen Sachverhalte beurteilt und diskutiert werden. In einer ersten Runde beurteilen Teilnehmer einen Sachverhalt unabhängig voneinander. Die einzelnen Beurteilungen werden in den weiteren Runden aggregiert und durch die Beteiligten so lange diskutiert, evaluiert und angepasst, bis ein Konsens entsteht.

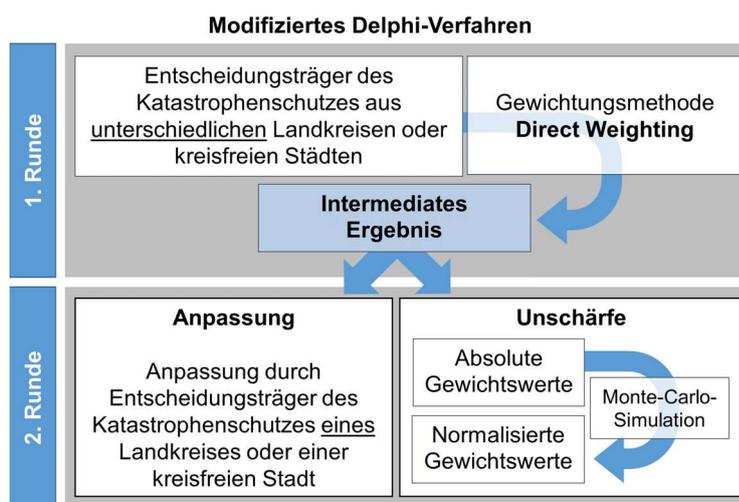


Abbildung 10.2: Aufbau des modifizierten Delphi-Verfahrens zur Bestimmung des Relevanzgewichtes.

Das übliche Vorgehen eines Delphi-Verfahrens wird modifiziert. In einer ersten Runde schätzen Entscheidungsträger, die in unterschiedlichen Landkreisen und kreisfreien Städten leitende Tätigkeiten in der Gefahrenabwehr und im Katastrophenschutz wahrnehmen, die Relevanzgewichtung für KRITIS-Typen mithilfe des Direct Weighting Verfahrens ab. Die Abschätzung erfolgt entsprechend ihrer Kenntnisse, Präferenzen, Erfahrung, Rückschlüssen aus vergangenen Schadenslagen, der persönlichen Risikowahrnehmung und damit ihrer subjektiven Auffassungen über Stromausfallgefahren, ohne dass konkrete lokale Kenntnisse oder Tatsachenwissen über bestimmte KRITIS-Einrichtungen berücksichtigt werden. Die Abschätzung ist daher unabhängig von konkreten KRITIS-Einrichtungen, ihrer Anzahl, ihrer verfügbaren Bewältigungskapazität, ihrer Größe, der Uhrzeit und weiteren Umweltzuständen. Ziel ist es, dass mit der Beurteilung durch diese Entscheidergruppe ein intermediates Ergebnis entsteht, das eine verallgemeinerte und repräsentative Schätzung der Relevanzgewichte entspricht und von derart allgemeiner und generischer Natur ist, dass es Beurteilungen von Durchschnittsentscheidern darstellt.

In der zweiten Runde des Delphi-Verfahrens können örtlich zuständige Entscheidungsträger die Abschätzungen der Relevanzgewichte aus der ersten Runde entsprechend ihrer örtlichen Kenntnisse und ihres Tatsachenwissens anpassen. Die Abschätzung der Durchschnittsentscheider der ersten Runde dient als Entscheidungsunterstützung für eine Konsensfindung der örtlich zuständigen Entscheidungsträger. Dabei können Entscheidungsträger nicht nur aufgrund sachlicher Gründe die Gewichtungen der Durchschnittsentscheider anpassen, sondern auch weitere bisher nicht berücksichtigte KRITIS-Typen entsprechend dem örtlich-individuellen Gefahrenpotential zufügen.

Darüber hinaus ist es auch möglich, die Abschätzungen der ersten Runde für eine Vulnerabilitätsanalyse zu verwenden. Dabei können die sich ergebenden Mittelwerte, Mediane oder auch Streuungen verwendet werden. Diese Ergebnisse dienen ebenso der Entscheidungsfindung für die örtlich zuständigen Entscheidungsträger.

Zur Durchführung der ersten Runde des Delphi-Verfahrens wurde eine Abschätzung der Relevanzgewichte durch eine hinreichend hohe Anzahl an Entscheidern vorgenommen. Hierfür wurden zwei Workshops durchgeführt. Der erste Workshop fand im Rahmen einer bundesweiten Fachveranstaltung im Herbst 2014 in Dresden statt, an dem elf Entscheidungsträger des Katastrophenschutzes aus unterschiedlichen Landkreisen und kreisfreien Städten teilnahmen. Im Winter 2014 erfolgte ein zweiter zweitägiger Workshop in Karlsruhe mit 41 Entscheidungsträgern. Zu diesem Workshop wurden alle Unteren und Oberen Katastrophenschutzbehörden des Landes Baden-Württemberg eingeladen. Zu den Eingeladenen zählten Vertreter aller Katastrophenschutzbehörden der neun Stadtkreise, 35 Landkreise und vier Regierungspräsidien. Es nahmen Vertreter aus sechs Stadtkreisen (67 Prozent aller Stadtkreise) und elf Landkreisen (31 Prozent aller Landkreise) teil. Damit wurden 75 Prozent aller baden-württembergischen Regierungsbezirke (drei Regierungsbezirke) repräsentiert.

In beiden Workshops waren die Teilnehmer hauptamtliche Kräfte der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes, die Aufgaben nach dem jeweiligen Katastrophenschutzgesetz wahrnehmen. Hierzu zählen im Rahmen ihrer örtlichen Zuständigkeit die planerisch-konzeptionelle Vorbereitungen auf Stromausfälle als auch Koordinations- und Führungstätigkeiten bei Großschadenslagen. Die Teilnehmer entsprechen damit den anvisierten Entscheidungsträgern, die die Vulnerabilitätsanalyse adressiert. Sie verfügen entsprechend ihrer Verwendung über Qualifikationen, Erfahrungen und Entscheidungsbefugnisse für die Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes. Dies qualifiziert sie hinreichend, um Beurteilungen im Rahmen der ersten Runde des Delphi-Verfahrens durchzuführen.

In beiden Workshops wurden die Entscheider in einem moderierten Verfahren gebeten, Relevanzgewichte für die gewählten KRITIS-Typen mithilfe des Direct Weighting Verfahrens abzuschätzen. Zur Dokumentation der Abmessung wurde ein standardisierter Fragebogen verwendet (Abbildung 10.3). Den Teilnehmern wurde zu Beginn der Abschätzung der Zweck der Befragung und anhand von Beispielen die Bedeutung der Relevanzgewichtung erläutert. Anschließend wurde das Direct Weighting Verfahren und die Dokumentation ihrer Schätzung erklärt. Auf Rückfragen wurde eingegangen, so dass von einem zutreffenden und einheitlichen Verständnis bei allen Teilnehmern ausgegangen werden konnte.

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

### Ermittlung der Relevanz von Einrichtungen Kritischer Infrastruktur

Höchste Relevanz 100

Keine Relevanz 0

**Beispiel**

Anmerkungen:

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

---

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**Bitte kreuzen Sie Zutreffendes an.**

**Berufsfeld**

Brand- und Katastrophenschutz  
 Sonstiges:

**Führungsqualifikation**  
(mehrere Angaben möglich)

keine Führungsqualifikation

**Truppführer:**  Feuerwehr  Rettungsdienst  Katastrophenschutz  
**Gruppenführer:**  Feuerwehr  Rettungsdienst  Katastrophenschutz  
**Zugführer:**  Feuerwehr  Rettungsdienst  Katastrophenschutz  
**Verbandführer:**  Feuerwehr  Rettungsdienst  Katastrophenschutz

**Stabsausbildungen**  
(mehrere Angaben möglich)

Bisher keine Erfahrungen gesammelt  
 Teilnahme Seminar/Weiterbildung zu operativ-taktischer Führung im Stab  
 Teilnahme an Stabsübungen und Stabsarbeit  
 Führungs- und Stabslehre I oder Krisenmanagement I (Einführung)  
 Führungs- und Stabslehre II oder Krisenmanagement II (AKNZ)  
 Führungs- und Stabslehre III oder Krisenmanagement III (AKNZ)

**Anmerkungen**  
Haben Sie hierzu noch weitere Ideen, Gedanken oder Kritik?

**Vielen Dank für Ihre Mitwirkung!**

**Kontakt** Thomas Münzberg Telefon 0721 608-24694  
IKET, Campus Nord, Bau 451 thomas.muenzberg@kit.edu  
Postfach 3840, 76021 Karlsruhe

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

Abbildung 10.3: Fragebogen zur Bestimmung von Relevanzgewichten.

Mithilfe des Fragebogens schätzten die Entscheider die Relevanzgewichte für die jeweiligen KRITIS-Typen eigenständig, ohne Absprache und unabhängig voneinander ab. Innerhalb des Direct Weighting Verfahrens haben sie für jeden KRITIS-Typen ein Relevanzgewicht auf einer Skala [0,100] abgeschätzt, wobei null keine Relevanz und hundert höchste Relevanz darstellen.

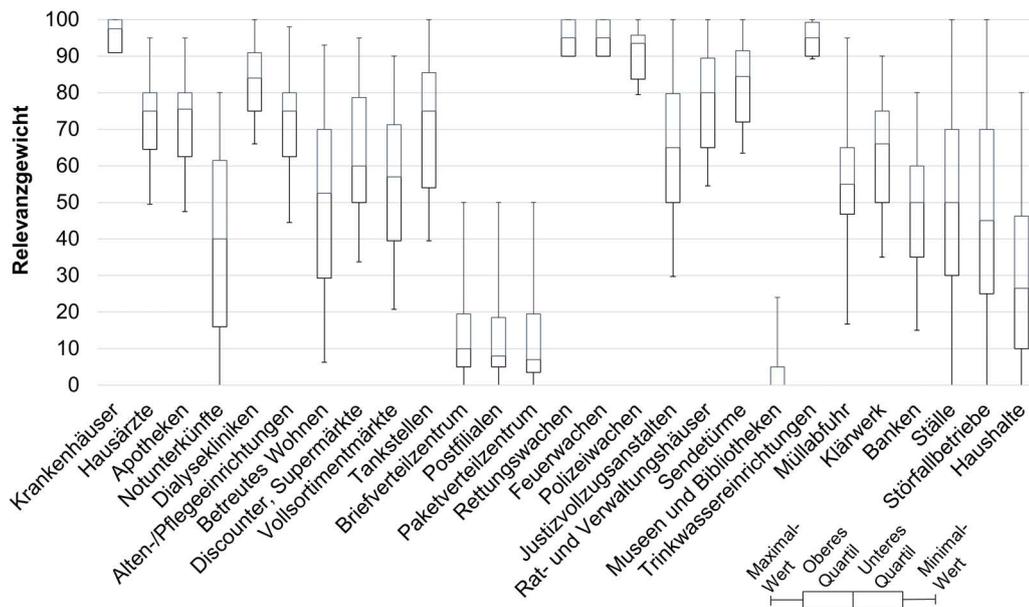


Abbildung 10.4: Abschätzung von Relevanzgewichten durch Entscheider, N=32.

Insgesamt konnten aus beiden Workshops der ersten Runde des Delphi-Verfahrens 32 Rückmeldungen ausgewertet werden. Abbildung 10.4 zeigt das intermediate Ergebnis der Abschätzung.

Die Relevanzgewichte der einzelnen KRITIS-Typen wurden durch die Entscheidungsträger unterschiedlich bewertet. Die Verteilung der Rückmeldungen wird in Abbildung 10.4 in einem Box-Plot-Diagramm dargestellt und zeigt die Streuung der einzelnen KRITIS-Typen. Sie stellen eine realistische Unbestimmtheitsbeschreibung der Relevanzgewichte dar. Bei einigen KRITIS-Typen, wie bei Krankenhäusern zeigt sich eine geringe Streuung. Bei anderen KRITIS-Typen, wie bei Justizvollzugsanstalten, ist die Streuung größer. Durch die Bandbreite der empfohlenen Relevanzgewichte bildet sich der bei den Entscheidungsträgern vorherrschende Konsens bzw. Dissens über die Relevanz der KRITIS-Typen ab. Eindeutige oder vage Beurteilungen bzw. die Unsicherheit der Bestimmung von Relevanzgewichten eines KRITIS-Typs werden deutlich. Das Ergebnis entspricht der Abschätzung von Durchschnittsentscheidern.

Um den Anforderungen an die Gefahrenprognose gerecht zu werden, müssen die von örtlich zuständigen Entscheidern ausgewählten Gewichtungen vergleichbar sein mit denen von Durchschnittsentscheidern (vgl. Abschnitt 3.2). Um dahingehend eine Entscheidungsunterstützung zu ermöglichen, werden die Abschätzungen der Entscheider aus unterschiedlichen räumlichen Zuständigkeitsgebieten als Abbild einer Abschätzung von Durchschnittsentscheidern genutzt. Gleichzeitig passen örtlich zuständige Entscheidungsträger die Gewichtung anhand der konkreten Situation und unter Einbeziehung von Tatsachenwissen, das im Augenblick der Bewertung im Erkenntnishorizont des Entscheiders liegt, an.

Wie bereits erwähnt, können die Abschätzungen der Relevanzgewichte in der ersten Runde des Delphi-Verfahrens bereits in einer Vulnerabilitätsanalyse verwendet werden. Hierzu können sowohl die statistischen Durchschnittswerte des Mittelwertes oder des Medians als auch die statistischen Beschreibungen der Streuungen verwendet werden. Die Berücksichtigung der Streuung der Relevanzgewichte ermöglicht die Darstellung plausibler Variationen des Analyseergebnisses, wodurch ein verbessertes Verständnis über den Einfluss der Streuung der Relevanzgewichte auf das Gesamtergebnis hergestellt werden kann.

Die Berücksichtigung der ermittelten Streuungen der Relevanzgewichte erfolgt mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation, deren Umsetzung im Folgenden erläutert wird.

Zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation werden die Streuungen der Relevanzgewichte aus der ersten Runde des Delphi-Verfahrens statistisch durch Verteilfunktionen beschrieben. Mithilfe der Inversionsmethode werden aus gleichverteilten Pseudozufallszahlen Relevanzgewichte entsprechend der Verteilfunktion ermittelt. Im Anschluss folgt im selben Simulationslauf die Normalisierung aller gewählten Relevanzgewichte für die berücksichtigten KRITIS-Typen und die Berechnung von Analyseergebnissen. Im Folgenden wird kurz auf Erstellung der Verteilfunktionen, die Verwendung von Zufallszahlen, die Inversmethode und die Normalisierung eingegangen.

Neben einem Boxplot-Diagramm kann die Streuung der Rückmeldungen für einen KRITIS-Typ aus der ersten Runde des Delphi-Verfahrens auch statistisch durch Verteilfunktionen anhand der relativen Häufigkeiten und der Dichtefunktionen abgebildet werden (Abbildung 10.5). Hierzu werden geeignete Häufigkeitsklassen gebildet und Histogramme für die relative Häufigkeit und die Dichtefunktion (relative Summenhäufigkeit) erstellt. Die Dichtefunktion zeigt eine Verteilung der Rückmeldungen zum Relevanzgewicht eines KRITIS-Typs  $u$  und entspricht einer empirischen und üblicherweise nicht normalen Verteilung  $F_u^{distribution}$ .

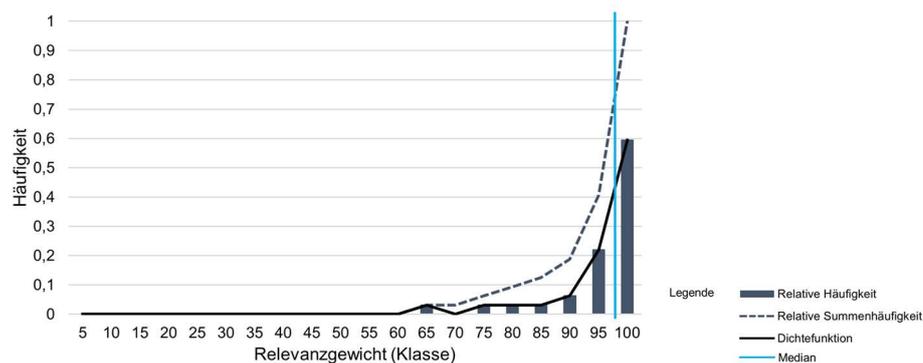


Abbildung 10.5: Streuung und statistische Verteilungen der Rückmeldungen für den KRITIS-Typ Krankenhäuser.

Zur Berücksichtigung der Streuung ist eine Zufallsvariable zu erzeugen, die der ermittelten empirischen Verteilfunktion eines Relevanzgewichtes eines KRITIS-Typs genügt. Hierzu wird die Inversionsmethode angewendet, mit der es möglich ist, aus gleichverteilten Zufallszahlen beliebige zufallsbedingte Verteilungen zu erzeugen. Zur Simulation eines zufälligen, der Dichtefunktion  $F_u^{distribution}$  genügenden Relevanzgewichtes  $w_u^{RelevMC}$  eines KRITIS-Typs  $u$  wird zunächst für jeden KRITIS-Typ  $u$  eine Zufallsvariable  $Rand_u^{weigh}$  erzeugt, die unabhängig von anderen Zufallsvariablen ist und eine uniforme und gleichverteilte Zufallsvariable im Intervall  $[0,1]$  bildet. Da computergestützte Zufallsgeneratoren nach deterministischen Prinzipien arbeiten, können sie keine zufälligen Werte wiedergeben. Deswegen werden Algorithmen zur Generierung von Pseudozufallsvariablen verwendet, die eine berechenbare Zufälligkeit nachempfinden. Zur Erzeugung von Pseudozufallszahlen wird der von Wichman und Hill (1982, 1987) entwickelte Zufallsgenerator verwendet. Er genügt nachweislich den Qualitätsbedingungen für Zufallsgeneratoren des Diehard-Tests (u. a. Rotz et al., 2001). Damit eignet er sich als Zufallsgenerator, gleichwohl in der mathematischen Literatur als auch auf dem kommerziellen Markt eine hohe Vielzahl an alternativen Zufallsgeneratoren zur Verfügung stehen.

Da die Dichtefunktionen  $F_u^{distribution}$  streng monoton steigend sind, kann die jeweilige Umkehrfunktion  $F_u^{distribution}{}^{-1}$  zur Simulation eines Relevanzgewichts  $w_u^{RelevMC}$  eines KRITIS-Typs  $u$  verwendet werden. Mithilfe der erzeugten und gleichverteilten Zufallsvariablen  $Rand_u^{weigh}$  berechnet sich das simulierte Relevanzgewicht  $w_u^{RelevMC}$  nach der Inversionsmethode durch:

$$w_u^{RelevMC} := F_u^{distribution}{}^{-1}(Rand_u^{weigh}) \quad (10-1)$$

Da die simulierten Relevanzgewichte Zahlen erzeugen im Intervall  $[0,100]$ , sind sie für die weitere Verwendung zu normalisieren. In jedem Simulationsschritt findet daher gleichzeitig eine Normalisierung unter Berücksichtigung der erzeugten simulierten Relevanzgewichte statt. Durch die Durchführung einer großen Anzahl von Simulationsdurchläufen kann näherungsweise ein Analyseergebnis unter Berücksichtigung der Streuung der Relevanzgewichte berechnet werden. Eine derartige Monte-Carlo-Simulation kann in die Vulnerabilitätsaggregation integriert werden. Das Ergebnis wird sodann als Streuung dargestellt, anhand dessen der Einfluss der Unschärfe der Eingangswerte deutlich wird.

## 10.3 Eingangswerte für das Leistungsvermögen

Für die Bestimmung des Leistungsvermögens von KRITIS-Einrichtungen sind für jeden KRITIS-Typ Vergleichsattribute zu bestimmen und zu operationalisieren (vgl. Abschnitt 9.3).

Zur Demonstration der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse wird eine vergleichsweise hohe Anzahl an KRITIS-Typen berücksichtigt. Das impliziert, die Anzahl der Vergleichsattribute je KRITIS-Typ auf das Mindeste zu reduzieren (vgl. Abschnitt 9.3). Für jeden der in Abschnitt 10.2 aufgezeigten KRITIS-Typen wird daher nur jeweils ein Vergleichsattribut aufgezeigt. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 9.3, müssen diese verhältnisskaliert sein.

In Tabelle 8 werden geeignete Vergleichsattribute für die entsprechenden KRITIS-Typen aufgelistet. Für jedes Vergleichsattribut werden Ämter aufgezeigt, bei denen ein Zugriff zu den entsprechenden Datenquellen zur Operationalisierung der Vergleichsattribute zu vermuten ist. Die Bezeichnung der Ämter können sich je nach Landesrecht unterscheiden. Der Zugriff ergibt sich häufig auf der Grundlage von Gesetzen. Einige dieser Gesetze werden in Tabelle 8 beispielhaft aufgeführt.

Tabelle 8: Liste geeigneter Vergleichsattribute für ausgewählte KRITIS-Typen und mögliche Quellen.

KRITIS-Typ	Geeignetes Vergleichsattribut	Geeignete Quellen	Gesetzesgrundlage
Krankenhäuser	Anzahl der Krankenhausbetten	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Gesundheitsamt	Landeskrankenhausbearbeitungsplanung, IfSG, BImSchV
Hausärzte	Anzahl	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Gesundheitsamt, Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä.	SGB V, IfSG
Apotheken	Anzahl	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Gesundheitsamt, Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Apothekenkammer	ApoG, ApBetrO
Notunterkünfte	Anzahl der Übernachtungsplätze	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Gesundheitsamt	BImSchV, SGB II und XII
Dialysekliniken	Anzahl der Dialyseplätze	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Gesundheitsamt	BImSchV, SGB V, IfSG
Alten-/Pflegeeinrichtungen	Anzahl der Betten	Heimaufsichtsbehörden	HeimG, BImSchV
Betreutes Wohnen	Anzahl der Betten	Heimaufsichtsbehörden	HeimG, BImSchV
Discounter, Supermärkte	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, Stadtentwicklung ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	
Vollsortimentmärkte	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	
Tankstellen	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	BImSchV
Briefverteilzentren	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	PTSG
Postfilialen	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	PTSG
Paketverteilzentren	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	PTSG
Rettungswachen	Anzahl der Mitarbeiter pro Schicht	Amt für Brand- und Katastrophenschutz	Landesrettungsdienstgesetze
Feuerwachen	Anzahl der Mitarbeiter pro Schicht	Amt für Brand- und Katastrophenschutz	Landesbrandschutzgesetze
Polizeiwachen	Anzahl der Mitarbeiter pro Schicht	Landespolizei	Landespolizei- und Ordnungsgesetze

KRITIS-Typ	Geeignetes Vergleichsattribut	Geeignete Quellen	Gesetzesgrundlage
Justizvollzugsanstalten	Anzahl der Vollzugsplätze	Landespolizei, Amt für Brand- und Katastrophenschutz	StVollzG
Rat-/Verwaltungshäuser	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Amt für Brand- und Katastrophenschutz	
Sendetürme	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Amt für Brand- und Katastrophenschutz	BSI-KritisV
Museen und Bibliotheken	Anzahl, Anzahl der Besucher	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Amt für Brand- und Katastrophenschutz	
Trinkwasser-einrichtungen	Durchschnittlicher Durchfluss pro Jahr	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Städtischer Versorger	BImSchV, BSI-KritisV
Müllabfahren	Durchschnittlicher Durchfluss pro Jahr	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Amt für Abfallwirtschaft	
Klärwerke	Durchschnittlicher Durchfluss pro Jahr	Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Amt für Abfallwirtschaft	
Banken	Anzahl	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Öffentlich zugängliche Telefon- und Adressverzeichnisse	
Ställe	Anzahl der Tiere	Amt für Stadtplanung, Liegenschaften, Vermessung, ö. ä., Amt für Veterinärwesen, Landwirtschaftskammer	
Störfallbetriebe	Anzahl der Umschlagsmenge pro Jahr	Amt für Brand- und Katastrophenschutz	BImSchV
Haushalte	Anzahl	Amt für Statistik	ZensG

## 10.4 Eingangswerte für die fehlende Versorgungsleistung

Zur Operationalisierung fehlender Versorgungsleistungen von KRITIS-Einrichtungen wird die Verwendung von Stromlastprofilen favorisiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die durch die BDEW zur Verfügung gestellten standardisierten Profiltypen verwendet.

Die Stromlastprofile der BDEW liegen normalisiert auf 1GWh/a vor. In ihrer üblichen Verwendung in der Netzplanung werden sie auf den prognostizierten Jahresverbrauch eines Zählpunktes skaliert. Dieses Vorgehen ist jedoch zur Parametrisierung der fehlenden Versorgungsleistung nicht nötig. Durch ihre Verwendung in der multiattributiven Analyse sind sie wie in der in Kapitel 9.4.3 diskutierten Weise auf einen Wertebereich zwischen null und eins zu normalisieren. Hierdurch entfällt das vorherige Erfassen des Jahresverbrauchs einer KRITIS-Einrichtung und ein Skalieren auf den entsprechenden Jahresverbrauch. Das stellt auch die Unabhängigkeit der Versorgungsleistung vom Leistungsvermögen einer betrachteten KRITIS-Einrichtung sicher.

Die auf den Stromlastprofilen der BDEW basierenden normalisierten Versorgungsleistungen sind KRITIS-Typ-spezifisch. Einer betrachteten KRITIS-Einrichtung ist entsprechend ihres KRITIS-Typs ein normalisiertes Stromlastprofil der BDEW zuzuordnen. Die Zuordnung basiert auf den verbandsinternen Zuordnungen der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (2000), in denen Stromlastprofile der BDEW bestimmten Einrichtungen zugeordnet werden. Alle betrachteten KRITIS-Typen lassen sich dementsprechend zuordnen (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Zuordnung von KRITIS-Typen zu Stromlastprofilen der BDEW.

KRITIS-Typ	Zuordnung	KRITIS-Typ	Zuordnung
Krankenhäuser	G3	Justizvollzugsanstalten	G3
Hausärzte	G1	Rat- und Verwaltungshäuser	G1
Apotheken	G4	Sendetürme	BAM
Notunterkünfte	G2	Trinkwassereinrichtungen	G3
Dialysekliniken	G4	Müllabfahren	G1
Alten-/Pflegeeinrichtungen	G2	Klärwerke	G3
Betreutes Wohnen	G2	Banken	G1
Rettungswachen	G3	Ställe	L1
Feuerwachen	G3	Störfallbetriebe	G1
Polizeiwachen	G3	Haushalte	H0

Die Tabelle 9 zeigt, wie die KRITIS-Typen den Profiltypen der Stromlastprofile der BDEW zur Berechnung KRITIS-Typ-spezifischer normalisierter Versorgungsleistungen zugeordnet werden können. In der Spalte der Zuordnung findet sich die jeweilige Bezeichnung der Stromlastprofile der BDEW.

## 10.5 Eingangswerte für den Resistenzverlust

Um den Resistenzverlust zu operationalisieren, bedarf es der Festlegung einer Verbrauchsfunktion (vgl. Abschnitt 9.5). Die Verbrauchsfunktion gibt den Zusammenhang zwischen dem Verzehr von Bewältigungsressourcen (Verbrauchsquote) und Resistenzverlust wieder.

Es wird eine geeignete entscheidenderdefinierte Verbrauchsfunktion favorisiert, die Geltung für alle KRITIS-Einrichtungen hat. Zur Festlegung wurde in einem moderierten Verfahren und mithilfe eines standardisierten Fragebogens eine Abschätzung der Verbrauchsfunktion durch Entscheidungsträger durchgeführt. Im Nachfolgenden werden die Durchführung und die Ergebnisse der Abschätzung erläutert.

Die Abschätzung wurde durch den Teilnehmerkreis des bereits im Kapitel 10.2 beschriebenen Workshops in Karlsruhe durchgeführt. Zunächst wurden den Teilnehmern des Workshops anhand von praktischen Beispielen das grundsätzliche Verständnis und die Bedeutung des Zusammenhangs zwischen Verbrauchsquote und Resistenzverlust erörtert. Durch Rückfragen und durch die Beantwortung von Verständnisfragen konnte auch im weiteren Verlauf der Abschätzung sichergestellt werden, dass keine Unklarheiten vorliegen und die Teilnehmer über das für die Abschätzung notwendige Verständnis verfügten.

Für die Abschätzung wurde ein standardisierter Fragebogen zur Bestimmung des Resistenzverlustes vorbereitet. Mit ihm hatten die Teilnehmer die Höhe des Resistenzverlustes in Abhängigkeit von einer Verbrauchsquote abzuschätzen. Da nicht alle Verbrauchsquoten abgeschätzt werden können, wurde die Schätzung auf eine handhabbare und für eine Befragung akzeptable Anzahl von Verbrauchsquoten reduziert. Betrachtet wurden die Verbrauchsquoten, bei denen ein Viertel ( $ConsRatio_i(t_{out}) = 0,25$ ), die Hälfte ( $ConsRatio_i(t_{out}) = 0,5$ ) und Dreiviertel ( $ConsRatio_i(t_{out}) = 0,75$ ) der Bewältigungsressourcen verbraucht sind. Nachdem den Teilnehmern der Zweck und der Aufbau des standardisierten Fragebogens erklärt wurde, wurden die Entscheider gebeten, für die aufgezeigten Zeitpunkte bzw. Verbrauchsquoten die Höhe des Resistenzverlustes auf einer Skala zwischen null und eins zu beurteilen. Die Abschätzung war dabei in generischer Weise und unabhängig von einem bestimmten KRITIS-Typ, der Zeitdauer des Stromausfalls oder der Größe einer Einrichtung vorzunehmen. So wurde sichergestellt, dass in der Abschätzung allein der Verbrauch von Bewältigungsressourcen berücksichtigt wurde. Die Abschätzungen haben die Teilnehmer selbstständig ohne Absprache mit anderen Teilnehmern durchgeführt. Auf etwaige Unklarheiten konnte aufgrund des moderierten Verfahrens jederzeit eingegangen werden.

Im Ergebnis der Abschätzung kommt es zwangsläufig zu Abweichungen und zu Ergebnisstreuung. Aufgrund eines fehlenden objektiven Maßes und damit fehlender Eindeutigkeit basiert die Schätzung auf den subjektiv geprägten Kompetenzen und Präferenzen der Entscheider, die zu unterschiedlichen Bewertungen kommen. Die Abweichungen stellen daher auch die in einer Entscheidungssituation tatsächlich vorliegenden Uneindeutigkeiten und abweichenden Ansichten von Durchschnittsentscheidern dar.

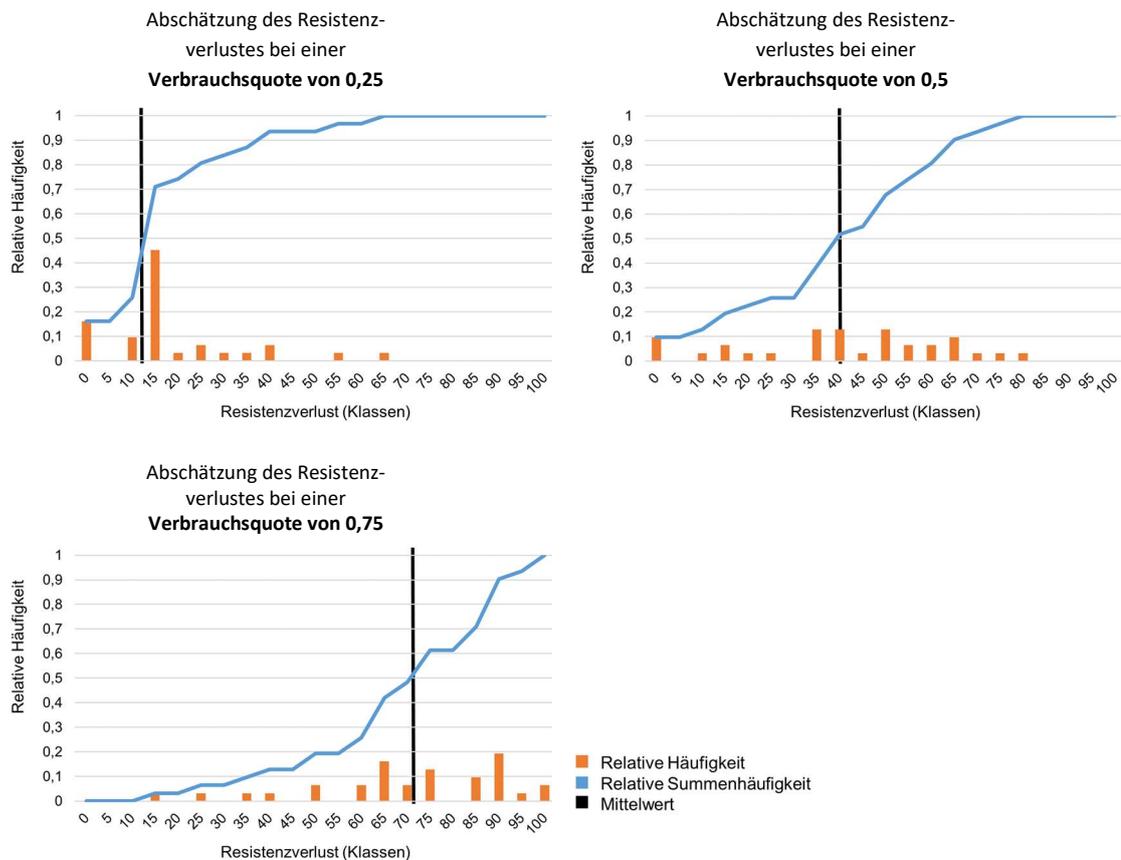


Abbildung 10.6: Ergebnisse der Expertenbefragung zur Abschätzung des Resistenzwertes für unterschiedliche Verbrauchsquoten

Es konnten 31 Rückmeldungen ausgewertet werden. Als Ergebnis liegt von jedem Entscheider eine Abschätzung des Resistenzverlustes für die ausgewählten Verbrauchsquoten vor. Für die ausgewählten Verbrauchsquoten lassen sich die beurteilten Resistenzverluste aller Rückmeldungen auch als statistische Verteilung deskriptiv beschreiben (Abbildung 10.6). Hierzu wurden die Rückmeldungen entsprechenden Klassen von Werten des Resistenzverlustes zugeordnet.

Die Ergebnisse der Abschätzung in Abbildung 10.6 zeigen die Streuungen, die relativen Häufigkeiten und Summenhäufigkeiten sowie die Mittelwerte der betrachteten Verbrauchsquoten. Neben den ermittelten Werten liegen per Definition zwei weitere feststehende Werte des Resistenzverlustes vor (vgl. Abschnitt 9.5). Da zum Zeitpunkt des Ausfallbeginns noch keine Bewältigungsressourcen verbraucht wurden, liegt der Resistenzverlust zu diesem Zeitpunkt bei null ( $ConsRatio(t_{out} = t_0) = 0$ ). Sind alle verfügbaren Bewältigungsressourcen verbraucht, liegt der Resistenzverlust bei eins ( $ConsRatio(t_{out} = t_i^{CC}) = 1$ ). Anhand der Mittelwerte und der beiden feststehenden Werte des Resistenzverlustes kann die Abhängigkeit des Resistenzverlustes von der Verbrauchsquote durch eine geeignete Approximationsfunktion dargestellt werden. Bei hinreichend genauer Beschreibung der ermittelten Werte des Resistenzverlustes können Resistenzverluste für beliebige Verbrauchsquoten bestimmt werden.

Soll die Streuung bei der Schätzung der Verbrauchsfunktion in der Vulnerabilitätsanalyse unberücksichtigt bleiben, kann diese Approximationsfunktion der Mittelwerte bzw. der Quantile  $Q_{0,5}$  als Verbrauchsfunktion verwendet werden. Um die Unschärfe der Abschätzungen in der Bestimmung des Resistenzverlustes zu berücksichtigen, bietet sich u. a. an, eine Monte-Carlo-Simulation mithilfe der *Abschätzungen der einzelnen Entscheider* oder anhand der *Verteilung der Abschätzungen aller Entscheider* anzuwenden.

Bei der Simulation mithilfe der *Abschätzungen der einzelnen Entscheider* wird mithilfe der feststehenden Werte des Resistenzverlustes und der drei durch einen Entscheider beurteilten Resistenzwerte eine Approximationsfunktion gebildet, mit der die vorliegenden Werte des Resistenzverlustes hinreichend genau beschrieben werden. Mithilfe der entscheidedefinierten Approximationsfunktion können Werte für eine beliebige Verbrauchsquote bestimmt werden. Für alle Rückmeldungen eines jeden Entscheiders ist eine Approximationsfunktion  $CopingDepl_i^{ePe}(t_{out})$  mit  $e = 1, 2, \dots, o$  und  $o$  Anzahl von Entscheidern zu bilden. Mit jedem Simulationsdurchlauf wird anhand einer Zufallsvariable, die gleichverteilt ganzzahlige Zahlen zwischen eins und  $o$  generiert, eine Approximationsfunktion für den jeweiligen Simulationsdurchlauf ausgewählt mit:

$$e = \begin{cases} 1 & \text{wenn } Rand_{expert}^{CopingDepl} = 1 \\ 2 & \text{wenn } Rand_{expert}^{CopingDepl} = 2 \\ \vdots & \vdots \\ o & \text{wenn } Rand_{expert}^{CopingDepl} = o \end{cases} \quad (10-2)$$

Durch dieses Vorgehen werden die jeweiligen Abschätzungen der Entscheider gleichverteilt berücksichtigt.

Bei der Simulation der *Verteilung der Abschätzungen aller Entscheider* werden Unschärfen mithilfe eines Streumaßes simuliert. Hierzu sind zunächst die Rückmeldungen aller Entscheider statistisch auszuwerten und ein geeignetes Streumaß zu bestimmen. Im vorliegenden Fall wird die Bildung von Quantilen anhand der relativen Summenhäufigkeitsfunktion favorisiert. So können für jede Abschätzung einer Verbrauchsquote Dezile  $Q_{dez}$  mit  $dez = 0,1; 0,2; \dots; 0,9$  gebildet werden, die die jeweilige Funktion in zehn umfangsgleiche Teile zerlegt. Von Interesse sind dabei die neun Dezilenwerte innerhalb des Interdezilbereiches.

Mithilfe der feststehenden Resistenzverluste und der gleichartigen Resistenzverlust-Dezile für ausgewählte Verbrauchsquoten lässt sich mithilfe von Regressionen eine approximierende Dezil-Verbrauchsfunktion  $CopingDepl_i^{Q_{dez}}(t_{out})$  bilden. Bei vorliegender hinreichender Genauigkeit beschreibt sie nicht nur annähernd die abgeschätzten gleichartigen Resistenzverlust-Dezile und die feststehenden Werte des Resistenzverlustes, sondern auch jeden Wert des Resistenzverlust-Dezils für eine beliebige Verbrauchsquote. In dieser Weise lassen sich neun Dezil-Verbrauchsfunktionen bilden (s. Tabelle 10).

Je nach Wahl der Regression können verschiedene approximierende Dezil-Verbrauchsfunktionen generiert werden, die sich in ihrer Güte unterscheiden. Die in Tabelle 10 aufgezeigten Approximationsfunktionen stellen eine Auswahl dar.

Tabelle 10: Übersicht über parametrisierte Dezil-Verbrauchsfunktionen.

Dezil	Parametrisierte Dezil-Verbrauchsfunktionen	RSS	R <sup>2</sup>
0,1	$CopingDepl_i^{Q_{0,1}}(t_{out}) = (1,05) * ConsRatio(t_{out})$	80,633	0,989
0,2	$CopingDepl_i^{Q_{0,2}}(t_{out}) = 1,49 * 10^{-3} * (ConsRatio_i(t_{out}) * 100)^{2,41} * 10^{-2} + 0,0103$	46,147	0,993
0,3	$CopingDepl_i^{Q_{0,3}}(t_{out}) = \frac{4 * 10^{-4}}{((CConsRatio_i(t_{out}) * 100 + 3,33)^2 + 1)^{-0,84}} - 0,0026$	0,464	0,999
0,4	$CopingDepl_i^{Q_{0,4}}(t_{out}) = \frac{(0,16 * (100 * ConsRatio_i(t_{out}))^{1,19} + 0,28)^{1,26}}{100}$	3,806	0,999
0,5	$CopingDepl_i^{Q_{0,5}}(t_{out}) = \frac{ConsRatio_i(t_{out})}{3,94 * ConsRatio_i(t_{out}) - 7,69 * ConsRatio_i(t_{out})^{0,5} + 4,75}$	3,033	0,999
0,6	$CopingDepl_i^{Q_{0,6}}(t_{out}) = \frac{ConsRatio_i(t_{out})}{4,296 * ConsRatio_i(t_{out}) - 7,69 * ConsRatio_i(t_{out})^{0,5} + 4,41}$	24,132	0,997
0,7	$CopingDepl_i^{Q_{0,7}}(t_{out}) = \frac{ConsRatio_i(t_{out})}{5,36 * ConsRatio_i(t_{out}) - 9 * ConsRatio_i(t_{out})^{0,5} + 4,64}$	1,624	0,999
0,8	$CopingDepl_i^{Q_{0,8}}(t_{out}) = (-1,08 * ConsRatio_i(t_{out})^3 + 1,22 * ConsRatio_i(t_{out})^2 + 0,84 * ConsRatio_i(t_{out}) + 0,01)$	2,167	0,999
0,9	$CopingDepl_i^{Q_{0,9}}(t_{out}) = 0,008 * (ConsRatio_i(t_{out}) * 100)^{1,27} * e^{-0,99 * ConsRatio_i(t_{out})}$	20,831	0,997

Zur Vergleichbarkeit der Güte der in der Tabelle 10 aufgelisteten Funktionen wird für jede Funktion die Residuenquadratsumme (Residual Sum of Squares, RSS) und das Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) angegeben. Die gewählten Funktionen zeigen vergleichsweise hohe Gütewerte. Im Resistenzverlust-Verbrauchsquote-Diagramm der Abbildung 10.7 sind plausible und keine extremen Verläufe zu beobachten. Die abgeschätzten und feststehenden Werte werden hinreichend genau abgebildet und die Funktionen sind geeignet, Werte des Resistenzverlustes für beliebige Verbrauchsquoten zu berechnen.

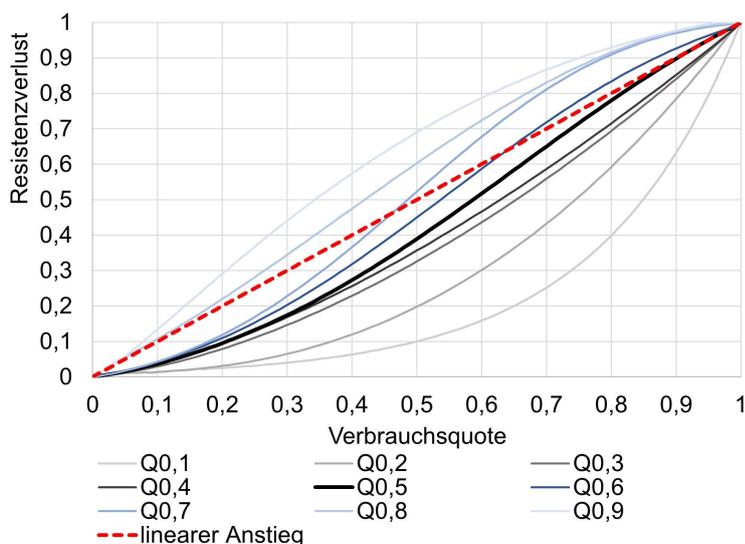


Abbildung 10.7: Resistenzverlust-Verbrauchsquote-Diagramm für die ausgewählten Dezil-Verbrauchsquoten.

Mithilfe der Dezil-Verbrauchsfunktionen lassen sich Dezil-Werte des Resistenzverlustes für beliebige Verbrauchsquoten berechnen. Dadurch kann eine Streuung auch für solche Verbrauchsquoten angegeben werden, die nicht explizit durch die Entscheider abgeschätzt wurden.

Durch die Dezil-Verbrauchsfunktionen kann mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Unschärfe der Abschätzungen in die Berechnung des Resistenzverlustes berücksichtigt werden. Da die Dezile umfangsgleiche Teile der Verteilfunktion der Abschätzungen darstellen, treten alle Dezil-Regressionsfunktionen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auf. Durch eine Zufallsvariable  $Rand^{CopingDepl}$ , die gleichverteilt und zufällige ganzzahlige Zahlenwerte zwischen eins und neun generiert, wird die Wahl einer Dezil-Regressionsfunktion in einem Simulationsdurchlauf bestimmt:

$$dez = \begin{cases} 0,1 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 1 \\ 0,2 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 2 \\ 0,3 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 3 \\ 0,4 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 4 \\ 0,5 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 5 \\ 0,6 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 6 \\ 0,7 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 7 \\ 0,8 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 8 \\ 0,9 & \text{wenn } Rand^{CopingDepl} = 9 \end{cases} \quad (10-3)$$

Für jeden Zeitpunkt wird mithilfe einer zufällig gewählten Dezil-Verbrauchsfunktion ein Wert des Resistenzverlustes einer KRITIS-Einrichtung berechnet. Mit der Durchführung einer großen Anzahl an Simulationsdurchläufen wird damit auch die Unschärfe der Abschätzungen simuliert.

Für die Bestimmung des Resistenzverlustes wird eine Verbrauchsfunktion verwendet, die durch Entscheidungsträger abgeschätzt wurde. Die inhärente Unschärfe wird durch Dezil-Verbrauchsfunktionen mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation in der Berechnung des Resistenzverlustes inkludiert.

## 10.6 Bestimmung eines Bemessungsstromausfalls

Damit die Vulnerabilitätsanalyse insbesondere für den Entscheidungsprozess der Bedarfsplanung angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 8.1), bedarf es einer Festlegung, auf welches Ausmaß eines Stromausfalls sich die kommunale Gefahrenabwehr vorzubereiten hat. Gleichwohl in der Literatur eine Reihe relevanter Stromausfallszenarien zu finden sind (vgl. Abschnitt 4.2), besteht in Deutschland bisher keine Klarheit darüber, welche Beschaffenheit ein Bemessungsstromausfall hat. Zur ausreichenden Dimensionierung von Maßnahmen zur Bewältigung von Stromausfällen existieren bisher keine bundesweit einheitlichen Referenzszenarien (s. a. Kapitel 4.1).

Ein Bemessungsstromausfall wird im Rahmen dieser Arbeit als ein auslegungsrelevantes Stromausfallszenario verstanden, anhand dessen Schutzmaßnahmen mit vordefinierten Schutzniveaus zu Grunde gelegt werden. Die Festlegung eines Bemessungsstromausfalls beruht auf der Abschätzung eines ungünstigen Szenarios, das für die wirkungsvolle Vorbereitung auf Stromausfälle eine ausreichende Signifikanz, Plausibilität und Repräsentativität aufweist. In Anlehnung an die Festlegung spezifischer Störfallablaufszszenarien im Störfallrecht (s. Ziff. 9.2.6.2.3. Vollzugshilfe zur StörfallIV) wird eine vernünftigerweise auszuschließende Stromausfallmagnitude als Dennoch-Ereignis angewendet.

Die Verwendung des am schwerwiegendsten anzunehmenden Stromausfalls (Worst-Case-Scenario), der aufgrund der weiträumigen Vernetzung der Übertragungsnetze europaweite Ausmaße annehmen und auf unbestimmter Dauer sein kann, übersteigt wesentlich die möglichen Dimensionierungswerte einer zumutbaren Stromausfallvorbereitung. Er erscheint daher zu pauschal und ungeeignet.

Ein signifikantes Stromausfallereignis ist charakterisiert durch das überwiegend öffentliche Interesse an den durch ihn zu befürchtenden Konsequenzen. Ein öffentliches Interesse liegt dann vor, wenn der Umfang und die Dauer des Ausfalls außerhalb der herkömmlichen Maße liegen, so dass übliche Selbsthilfemaßnahmen ausgereizt werden und ein großes Schadenspotential zu unterstellen ist. Bei einem signifikanten Stromausfallereignis ist mit der Entstehung von Gefahren für das Leben der Bevölkerung durch die Unterversorgung mit lebenswichtigen Gütern und Dienstleistungen sowie mit Schäden im außerordentlichen Maße zu rechnen. Die Ausprägungen des Ausfalls müssen daher hinreichend ungünstig sein, erheblich die Schwelle der Alltäglichkeit überschreiten und einer Katastrophe entsprechen, ohne unrealistisch zu sein. Hierdurch erfolgt gleichzeitig ein starker Fokus auf den initialen Verlauf, für den deterministische Vorhersagen anhand der Vulnerabilitätsanalyse getroffen werden sollen.

Plausibel erscheint daher ein Bemessungsstromausfall dann, wenn seine Extremwerte augenscheinlich nachvollziehbar und anhand von objektiven Gesichtspunkten hergeleitet werden. Ein Bemessungsstromausfall ist repräsentativ, wenn seine Extremwerte im Wesentlichen der Grundgesamtheit aller Stromausfälle entsprechen.

In Abschnitt 4.2.3 wurden aus der Analyse von Mediendaten Stromausfallszenarien hergeleitet. Dabei wird eine vernünftigerweise auszuschließende Stromausfallmagnitude daran erkannt, dass sie die Stromausfallmagnitude, in der normalerweise ein Umschalten möglich ist, erheblich übersteigt. Ein Bemessungsstromausfall hat daher erheblich länger anzudauern als 120 Minuten.

Aufgrund der verschiedenartig möglichen Ausfallkausalitäten erscheint die Wahl von verschiedenen Bemessungsstromausfällen sinnvoll. Die Wahl obliegt den Entscheidungsträgern, jedoch soll für die Zwecke

dieser Arbeit ein Bemessungsstromausfall erörtert und festgelegt werden. Dieser Bemessungsstromausfall wird innerhalb der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse als auslegungsrelevanter bzw. sogenannter „kritischer Stromausfall“ verwendet.

Da die Zuständigkeit der operativen Bewältigung der Stromausfallfolgen bei den kommunalen Gebietskörperschaften liegt, erscheint es als Extremwert für den Bemessungsstromausfall zweckmäßig, von einer Betroffenheit der gesamten betrachteten Gebietskörperschaft auszugehen. Aus der Perspektive der jeweiligen Gebietskörperschaft erscheint dies hinsichtlich der räumlichen Betroffenheit als das schwerwiegendste anzunehmende Ereignis. Die Planung der initialen Handlungen erfolgt in der Regel unabhängig von der Betroffenheit weiterer Gebietskörperschaften, gleichwohl sich gerade im Hinblick auf die überörtliche Hilfe und die Amtshilfe erhebliche Beschränkungen ergeben. Dass ganze Landkreise und kreisfreie Städte von einem Stromausfall betroffen sind, trat in Deutschland wiederkehrend auf, weshalb ein solches Ereignis als plausibel, relevant und repräsentativ betrachtet werden kann.

Hinsichtlich eines Extremwertes für die Dauer eines Bemessungsstromausfalls werden empirische Daten vergangener Stromausfallereignisse und ihrer jeweiligen empirischen Unterschreitenswahrscheinlichkeiten aus dem Abschnitt 4.2.2 herangezogen (Abbildung 10.8).

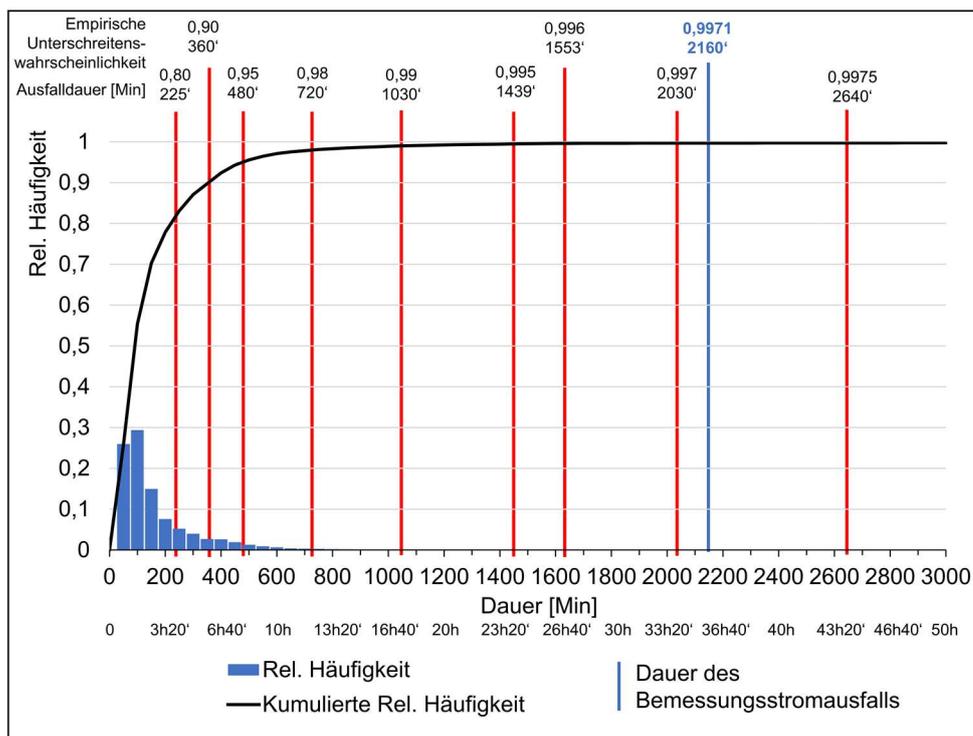


Abbildung 10.8: Dauer des Bemessungsstromausfalls anhand der kumulierten relativen Häufigkeit (empirische Verteilfunktion).

Die empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit für extreme Stromausfälle wird mit 0,99 angegeben (vgl. Abschnitt 4.2.2). Dies entspricht einem Stromausfall mit einer Dauer von 1030 Minuten (17 Stunden und 10 Minuten). Ein solches Ereignis tritt nicht regelmäßig auf und gilt als außergewöhnlich. Die dabei zu erwartenden Gefahren erscheinen ausreichend signifikant für die Zwecke der Dimensionierung der Gefahrenabwehr. Es ist davon auszugehen, dass bei dieser Ausfalldauer bereits die Schwelle zu einer Kata-

strophe überschritten ist (vgl. Abschnitt 4.2.8). Zur Festlegung des Bemessungsstromausfalls wird pessimistischer Weise zu dieser Ausfalldauer ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag gewährt, indem diese Ausfalldauer verdoppelt wird. Nach Rundung wird der Bemessungsstromausfall festgelegt auf einen Ausfall der Stromversorgung, der die gesamte Fläche einer betrachteten Gebietskörperschaft für mehr als 2160 Minuten (bzw. 36 Stunden) betrifft. Die empirische Unterschreitenswahrscheinlichkeit dieser Ausfalldauer liegt bei 0,9971 (Abbildung 10.8)

Mithilfe der Ausfalldauer des Bemessungsstromausfalls  $\Delta t_{Outage}^{Calc}$  wird der Betrachtungszeitraum einer Vulnerabilitätsanalyse für den Entscheidungsprozess einer Bedarfsplanung festgelegt. Dieser beginnt mit dem Eintritt des Stromausfalls zum Zeitpunkt  $t_0$  und endet mit dem Zeitpunkt  $t_{Calc}$ . Der Zeitpunkt, der das Ende der Bemessungsstromausfalldauer kennzeichnet, wird hergeleitet aus:

$$t_{Calc} = t_0 + \Delta t_{Outage}^{Calc} \quad (10-4)$$

Angesichts der Ausfalldauer ist dieser Bemessungsstromausfall ein extremer Stromausfall. Da davon auszugehen ist, dass die initial bestehenden Selbsthilfefähigkeiten innerhalb der Ausfalldauer ausgereizt werden und der Eintritt erster Schäden droht, ist ein hohes öffentliches Interesse für ein derartiges Szenario zu erwarten. Durch die Herleitung anhand der empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit erfolgt die Festlegung nachvollziehbar anhand objektiver Gesichtspunkte. Es werden die meisten der in der Vergangenheit stattgefundenen Stromausfälle in diesem Szenario berücksichtigt.

## 10.7 Fazit

Zur Durchführung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wurden Eingangswerte für die Relevanzgewichte, dem Leistungsvermögen, der Versorgungsleistung und dem Resistenzverlust bestimmt. Hierfür wurden favorisierte Operationalisierungsoptionen umgesetzt und deren Ergebnisse erläutert.

Die gewählten Operationalisierungsoptionen bedürfen der Daten aus dem KRITIS-Kataster und Abschätzungen durch Entscheidungsträger. Die Schnittstellen zwischen KRITIS-Kataster, den Entscheidungsträgern und den Analysekomponenten wurde daher näher beleuchtet.

Für die Bestimmung von Gewichtswerten wurde ein modifiziertes, zweistufiges Delphi-Verfahren entwickelt und umgesetzt, mit dem zunächst Entscheidungsträger von unterschiedlichen Landkreisen und kreisfreien Städten Relevanzgewichte für KRITIS-Typen mithilfe des Direct Weighting Verfahrens abschätzen. Hierdurch entsteht zunächst ein intermediates Ergebnis von Durchschnittsentscheidern, das in einer zweiten Runde den örtlich zuständigen Entscheidungsträgern als Entscheidungsunterstützung dient und entsprechend ihrer lokalen Kenntnisse und ihres Tatsachenwissens angepasst wird.

Für die Bestimmung des Leistungsvermögens wurden Vergleichsattribute für die berücksichtigten KRITIS-Typen vorgeschlagen und Möglichkeiten für deren Operationalisierung aufgezeigt. Für die Bestimmung der Versorgungsleistung wurden Standardlastprofile der BDEW den berücksichtigten KRITIS-Typen zugeordnet. Zur Bestimmung des Resistenzverlustes wurde eine Abschätzung durch Entscheidungsträger durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen der Verbrauchsquote und dem Resistenzverlust zu beschreiben. Diese Beschreibung wird in der Vulnerabilitätsanalyse mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation entweder unter Verwendung der Abschätzungen der einzelnen Entscheider oder der Verteilung der Abschätzungen aller Entscheider berücksichtigt.

Darüber hinaus wurde ein Bemessungsstromausfall bestimmt, der die gesamte betrachtete Gebietskörperschaft betrifft und für mehr als 2160 Minuten (bzw. 36 Stunden) anhält.

# 11 Vulnerabilitätsaggregationen

Entsprechend einer multiattributiven Analyse sind die Analysekomponenten in geeigneter Weise zu aggregieren. Die Aggregationsergebnisse dienen der Analyse des Gefahrenpotentials und erhöhen das Verständnis über die raum-zeitlichen Stromausfallwirkungen.

In diesem Kapitel werden geeignete Aggregationsverfahren zur Vulnerabilitätsanalyse aufgezeigt und anhand eines Demonstrationsbeispiels diskutiert. Hierfür wird zunächst ein Überblick über die empfohlenen Vulnerabilitätsaggregationen gegeben, dann das Demonstrationsbeispiel erläutert und anschließend auf die einzelnen Vulnerabilitätsaggregationen eingegangen.

## 11.1 Überblick über Vulnerabilitätsaggregationen

Das Kernelement einer multiattributiven Analyse ist die Aggregation der Analysekomponenten (auch Synthese genannt). Innerhalb einer üblichen multiattributiven Analyse ist das Ziel einer Aggregation, für die berücksichtigten Alternativen jeweils einen Index- bzw. Nutzwert mithilfe gewichteter Attributwerte und deren Summe zu berechnen. Der Index- bzw. Nutzwert wird als einheitlicher, zeitpunktunabhängiger und monokriterieller Bewertungsmaßstab verwendet, mithilfe dessen eine strukturierte, transparente und objektive Vergleichbarkeit der zu analysierenden Alternativen möglich wird (vgl. Abschnitt 6.2.2). Im Allgemeinen wird lediglich ein Aggregationsverfahren verwendet.

Für die Zwecke der raum-zeitlichen Analyse von Stromausfallfolgen ist dieses übliche Verfahren zu modifizieren. Ziel der Aggregation der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse ist es, eine Vergleichbarkeit von Gefahrenpotentialen in Bezug auf

- einzelne KRITIS-Einrichtungen,
- eine Menge von KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs und
- eine Menge von KRITIS-Einrichtungen in einer bestimmten Gebietskörperschaft

herzustellen. Hierdurch sollen erweiterte Erkenntnisse über die objektscharfen und raum-zeitlichen Folgen eines Stromausfalls abgeleitet werden, was in Teilen einer zeitlichen Differenzierung bedarf. Entgegen dem üblichen Vorgehen werden hierfür

- mehrere Aggregationsverfahren genutzt,
- zwei Aggregationsebenen eingeführt,
- modifizierte Aggregationsverfahren in Form von zeitpunktabhängigen und -unabhängigen Aggregationen angewandt.

Jede Aggregation ist eine Abstraktion, bei der ursprüngliche Informationen eines Attributs oder eines Gewichts zu Gunsten neuer Erkenntnisse verloren gehen. Durch die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Analyseverfahren kann diesem Informationsverlust teilweise entgegengewirkt und das Gefahrenpotential je nach Blickwinkel und Zweck in unterschiedlicher Auflösung und unterschiedlichem zeitlichem Bezug

beleuchtet werden. Je nach berücksichtigten Analysekomponenten und der Art und Weise ihrer methodischen Verknüpfung werden für die Vulnerabilitätsanalyse verschiedene Aggregationsverfahren entwickelt. Die Verfahren ermöglichen unterschiedliche Erkenntnisse, haben aber auch hinsichtlich ihres Geltungsbereichs und ihrer Interpretierbarkeit Grenzen sowie Vor- und Nachteile. Diese sind den Entscheidungsträgern transparent zu machen. Die Abbildung 11.1 zeigt eine Übersicht über die empfohlenen Aggregationsverfahren und die aus ihnen resultierenden Vulnerabilitätsindizes.

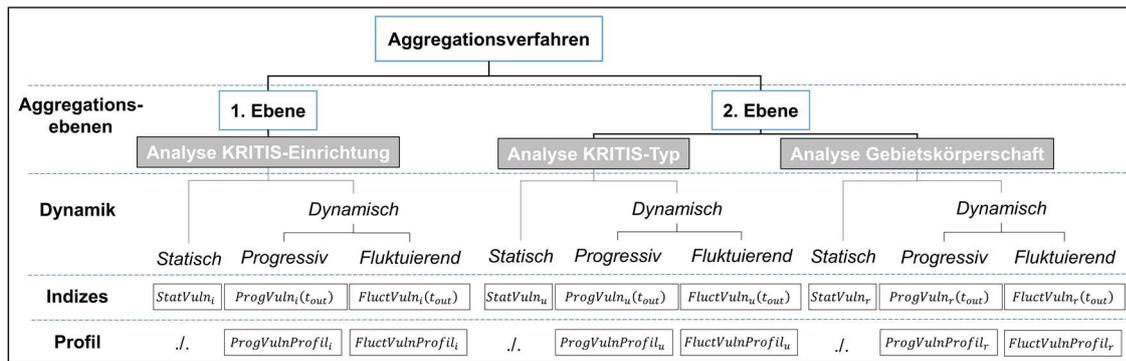


Abbildung 11.1: Empfohlene Aggregationsverfahren zur Vulnerabilitätsanalyse.

Da die Aggregationsverfahren teilweise aufeinander aufbauen, werden zwei Ebenen gebildet. Auf der ersten Ebene werden für jede KRITIS-Einrichtung Vulnerabilitätsindizes gebildet, durch die Rückschlüsse über die Vulnerabilität der einzelnen KRITIS-Einrichtung abgeleitet werden. Diese KRITIS-Einrichtung-spezifische Vulnerabilitätsindizes können zeitpunktabhängig (dynamisch) oder -unabhängig (statisch) sein und repräsentieren jeweils einen relativen Wert, der die Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung in ein Verhältnis zur Summe der Vulnerabilität aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen in einer betrachteten Gebietskörperschaft setzt. Bei zeitpunktabhängigen (dynamischen) Vulnerabilitätsindizes werden die zeitlichen Wirkungen eines Stromausfalls auf die betreffenden KRITIS-Einrichtungen dargestellt. In diesen Fällen ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der Vulnerabilität auch als ein Vulnerabilitätsprofil darzustellen. Je nach Wahl der berücksichtigten Analysekomponenten ergeben sich progressive oder fluktuierende Vulnerabilitätsprofile. Deren Bedeutung und Bildung werden in den Abschnitten 11.4 bis 11.7 im Detail diskutiert.

Mithilfe der KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes können auf einer zweiten Aggregationssebene Vulnerabilitätsindizes von

- Gebietskörperschaften und
- KRITIS-Typen

berechnet werden. Die Vulnerabilitätsindizes einer Gebietskörperschaft werden gebildet durch die Vulnerabilitätsindizes aller KRITIS-Einrichtungen, die sich in der jeweiligen zu analysierenden Gebietskörperschaft befinden. Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Typen werden gebildet aus der gleichartigen Vulnerabilität aller KRITIS-Einrichtungen, die sich in einem bestimmten KRITIS-Typ befinden. Je nach Wahl der jeweiligen Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Typen sind auch hier statische und dynamische Analysen möglich. Bei dynamischen Analysen lassen sich ebenso progressive und fluktuierende Vulnerabilitätsindizes bilden, aus denen sich entsprechende Vulnerabilitätsprofile ableiten lassen.

Durch die Bildung von zeitpunktabhängigen und -unabhängigen Vulnerabilitätsindizes kann in beiden Aggregationsebenen die unterschiedliche Bedeutung der Entwicklung der Vulnerabilität über die Dauer eines Stromausfalls je nach Analysezweck Rechnung getragen werden. Die Wahl der in den KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes berücksichtigten Analysekomponenten bzw. die Wahl der KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes in der Bildung der Vulnerabilitätsindizes der zweiten Aggregationsebene sind abhängig vom Analyseziel.

Das in einer multiattributiven Analyse verwendete Aggregationsverfahren wird dem Zweck der Vulnerabilitätsanalyse angepasst. Abweichend vom üblichen Aggregationsverfahren werden hierzu die Indizes nicht gebildet durch die Gewichtung der einzelnen Indikatoren oder durch gewichtete Summen. Vielmehr wird den Indikatoren ein gleichhoher Einfluss auf die Vulnerabilität unterstellt. Die Bildung der KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes der ersten Aggregationsebene basiert auf einer multiplikativen Aggregation aller bzw. ausgewählter Analysekomponenten. Für die Bildung der Vulnerabilitätsindizes der zweiten Aggregationsebene werden die ausgewählten gleichartigen KRITIS-Einrichtung-spezifischen Vulnerabilitätsindizes summiert. In den Abschnitten 11.3 bis 11.7 wird die Bildung der einzelnen Aggregationsverfahren anhand eines nachfolgend erläuterten Beispiels erklärt.

## 11.2 Demonstrationsbeispiel

Die Demonstration der Vulnerabilitätsaggregationen erfolgt anhand eines fiktiven Beispiels einer Stadt mit sechs KRITIS-Einrichtungen. Es wird angenommen, dass die Entscheidungsträger der Stadt eine Vulnerabilitätsanalyse durchführen. Die Analyse soll sich auf die beiden KRITIS-Typen „Krankenhäuser“ und „Dialysekliniken“ beschränken. In der Stadt befinden sich drei Krankenhäuser und drei Dialysekliniken in drei unterschiedlichen Stadtteilen.

Tabelle 11: Auszug aus einem KRITIS-Kataster mit Merkmalen von KRITIS-Einrichtungen des fiktiven Beispiels.

KRITIS-Einrichtung	Standort	KRITIS-Typ	Leistungsvermögen	Versorgungsleistung	Betriebsdauer der Notversorgung
$i$	$Name$	$r$	$u$		$\Delta t_{CC}^i$
1	Dialyseklinik 1	Stadtteil 1	Dialyseklinik	15 Dialysebetten SLP Dialyseklinik	12 Stunden
2	Dialyseklinik 2	Stadtteil 1	Dialyseklinik	20 Dialysebetten SLP Dialyseklinik	16 Stunden
3	Dialyseklinik 3	Stadtteil 2	Dialyseklinik	25 Dialysebetten SLP Dialyseklinik	10 Stunden
4	Krankenhaus 1	Stadtteil 1	Krankenhaus	90 Krankenhausbetten SLP Krankenhaus	24 Stunden
5	Krankenhaus 2	Stadtteil 2	Krankenhaus	100 Krankenhausbetten SLP Krankenhaus	12 Stunden
6	Krankenhaus 3	Stadtteil 3	Krankenhaus	150 Krankenhausbetten SLP Krankenhaus	12 Stunden

Die Einrichtungen sind unterschiedlich groß (Leistungsvermögen). Des Weiteren sind sie unterschiedlich gut auf einen Stromausfall vorbereitet, was sich in unterschiedlichen Betriebsdauern der Notstromversorgung äußert (Resilienzverlust). Entsprechend ihres KRITIS-Typs wird die Versorgungsleistung der KRITIS-Einrichtungen aus den spezifischen Standardlastprofilen (SLP) der BDEW hergeleitet (fehlende Versorgungsleistung). Die genauen Eigenschaften der KRITIS-Einrichtungen sind dem fiktiven KRITIS-Kataster der Stadt der Tabelle 11 zu entnehmen.

Es wird angenommen, dass Entscheidungsträger der Stadt die Relevanzgewichtung der KRITIS-Einrichtungen diskutiert haben und zu einem Konsens gekommen sind. Dialysekliniken erhalten demnach ein Relevanzgewicht von 0,3 und Krankenhäuser von 0,7. Es wird von einem Stromausfall ausgegangen, der an einem Werktag im Sommer um fünf Uhr morgens beginnt und alle drei Stadtteile gleichzeitig betrifft. Als Analysehorizont wird im Rahmen dieser Demonstration ein Stromausfallszenario mit einer Dauer von 19 Stunden festgelegt.

### 11.3 Statischer Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung

Eine der einfachsten Varianten eines Aggregationsverfahren stellt die Bildung von statischen Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Einrichtungen dar (vgl. Münzberg et al., 2013 und 2014). Ein statischer Vulnerabilitätsindex  $StatVuln_i$  einer KRITIS-Einrichtung  $i$  ist ein zeitunabhängiges Vergleichsmaß für eine KRITIS-Einrichtung in einer Stadt oder in einem Landkreis. Es können mehrere Varianten des Analyseverfahrens entwickelt werden. Zwei geeignete Varianten werden im Nachfolgenden diskutiert.

In einer ersten Variante erfolgt die Bildung des statischen Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung mithilfe des Relevanzgewichtes  $w_u^{Relev}$ , des relativen Leistungsvermögens  $Perform_i^u$ , der Betriebsdauer der Notversorgung  $\Delta t_i^{CC}$ , der Dauer des Stromausfallszenarios  $\Delta t_{Outage}^{Calc}$  und der Anzahl der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs  $k_u$ :

$$StatVuln_i^{Variante 1} = w_u^{Relev} * 0,5 * \left( \frac{1}{k_u} * \frac{\Delta t_{Outage}^{Calc} - \Delta t_i^{CC}}{\Delta t_{Outage}^{Calc}} + Perform_i^u \right) \quad (11-1)$$

In diesem Aggregationsverfahren haben das relative Leistungsvermögen und die Betriebsdauer der Notversorgung zu gleichen Teilen Einfluss auf den Vulnerabilitätsindex, kompensieren sich jedoch nicht, so dass trotz Resistenzfähigkeit eine Vulnerabilität anhand des Leistungsvermögens dargestellt wird. Die Betriebsdauer der Notversorgung wird invers berücksichtigt und in Relation gesetzt zur Dauer des gewählten Stromausfallszenarios. In dieser Form der Aggregation steigt der Wert des statischen Vulnerabilitätsindex

- mit höherer Relevanz,
- mit größerem Leistungsvermögen und
- mit kürzerer Betriebsdauer der Notversorgung

der zu analysierenden KRITIS-Einrichtung.

Zur Demonstration werden für die in Abschnitt 11.2 vorgestellten beispielhaften KRITIS-Einrichtungen die jeweiligen statischen Vulnerabilitätsindizes in Abbildung 11.2 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Höhe

der jeweiligen statischen Vulnerabilität. Ebenfalls wird deutlich, welchen Einfluss das jeweilige relative Leistungsvermögen und die Betriebsdauern der Notversorgung auf die Vulnerabilitätsindizes haben.

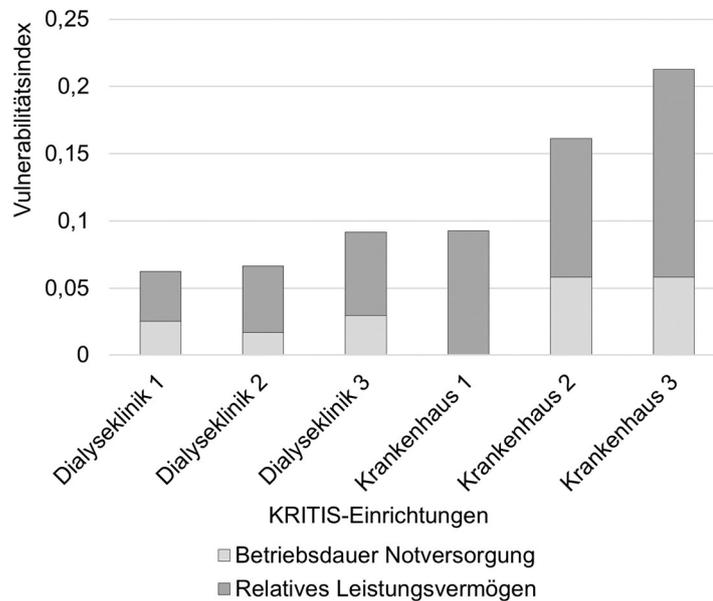


Abbildung 11.2: Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex für KRITIS-Einrichtungen nach Variante 1.

Das Ergebnis des statischen Vulnerabilitätsindex der Variante 1 zeigt in diesem Beispiel in Abbildung 11.2, dass die Krankenhäuser 2 und 3 die höchste Vulnerabilität und damit das größte Gefahrenpotential aufweisen. Unter den Dialysekliniken erreicht die Dialyseklinik 3 den höchsten Vulnerabilitätswert. Durch die Darstellung des statischen Vulnerabilitätsindexwertes als gestapeltes Balkendiagramm wird die Zusammensetzung der Vulnerabilität der einzelnen KRITIS-Einrichtungen transparent. In allen KRITIS-Einrichtungen zeigt sich neben dem Einfluss des Leistungsvermögens auch der des Mangels an Bewältigungskapazität. Dieser wird bei dieser Aggregationsvariante in einen Bezug zur Dauer des Stromausfallszenarios gesetzt.

In einer zweiten Variante erfolgt die Berechnung des statischen Vulnerabilitätsindexes in einer Form, durch der die Betriebsdauer der Notversorgung die negativen Wirkungen eines Stromausfalls kompensieren:

$$StatVuln_i^{Variante\ 2} = w_u^{Relev} * \frac{\Delta t_{Outage}^{Calc} - \Delta t_i^{CC}}{\Delta t_{Outage}^{Calc}} * Perform_i^u \quad (11-2)$$

Auch in diesem Aggregationsverfahren wird die Betriebsdauer der Notversorgung invers in Relation gesetzt zur Dauer des gewählten Stromausfallszenarios. Sie wird multiplikativ in Verbindung gesetzt mit dem relativen Leistungsvermögen und der Betriebsdauer der Notversorgung.

In dieser Form der Aggregation steigt der Wert des statischen Vulnerabilitätsindex

- mit höherer Relevanz,
- mit größerem Leistungsvermögen und
- in Abhängigkeit mit der Betriebsdauer der Notversorgung der zu analysierenden KRITIS-Einrichtung.

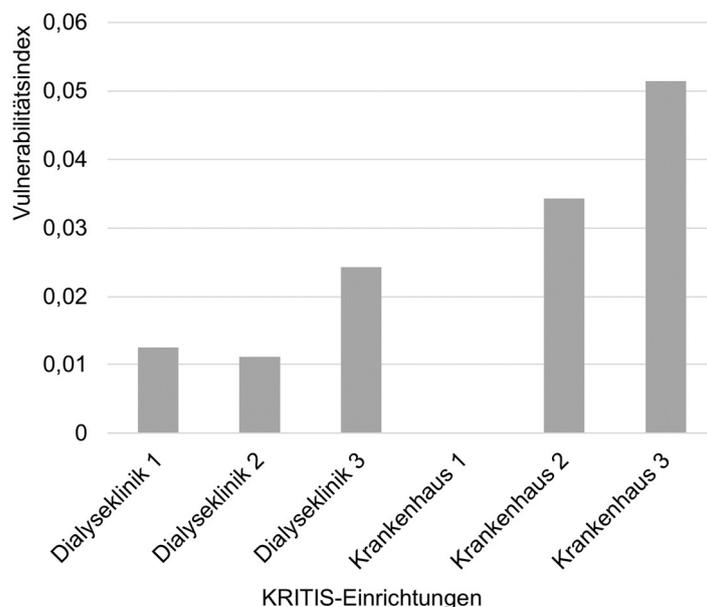


Abbildung 11.3: Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex für KRITIS-Einrichtungen nach Variante 2.

Das Ergebnis des statischen Vulnerabilitätsindex der Variante 2 weicht vom Ergebnis der Variante 1 ab (Abbildung 11.3). Durch die Art und Weise der Aggregationen sind die berechneten Werte der beiden Varianten per se nicht vergleichbar. Es ist ein deutlicher Unterschied im Ergebnis des Krankenhauses 1 zu erkennen. Dieses Krankenhaus besitzt für die gesamte Dauer des Stromausfallszenarios eine Resistenzfähigkeit. In der zweiten Berechnungsvariante kompensiert der berücksichtigte Resistenzverlust das Gefahrenpotential, so dass sich daraus keine Vulnerabilität für diese KRITIS-Einrichtung berechnet.

In Tabelle 12 werden die Aggregationsergebnisse der beiden Berechnungsvarianten gegenübergestellt. Mit beiden Verfahren können alle KRITIS-Einrichtungen zeitunabhängig und -abhängig vom Stromausfallszenario gerankt werden. Hierfür wird für jede KRITIS-Einrichtung ein Rank  $VulnRank_i$  ( $StatVuln_i$ ) entsprechend ihres statischen Vulnerabilitätsindex zugeordnet.

Mithilfe des statischen Vulnerabilitätsindexwertes entsteht eine Übersicht über das einrichtungsspezifische Gefahrenpotential in einer Gebietskörperschaft. Die Ergebnisse zeigen, welche KRITIS-Einrichtungen in Bezug auf ihre Kritikalität und Bewältigungskapazität bedeutsam sind und welche Stärken bzw. Schwachstellen in der Vorbereitung liegen. Es lassen sich vorläufige Differenzierungen und Priorisierungen vornehmen, so dass objektscharfe Schwerpunkte in der Vorbereitung auf einen Stromausfall festgelegt werden können.

Tabelle 12: Ränge der im Beispiel analysierten statischen Vulnerabilität der KRITIS-Einrichtungen

$VulnRank_i$	Variante 1		Variante 2	
	KRITIS-Einrichtung	$StatVuln_i^{Variante 1}$	KRITIS-Einrichtung	$StatVuln_i^{Variante 2}$
1	Krankenhaus 3	0,21	Krankenhaus 3	0,05
2	Krankenhaus 2	0,16	Krankenhaus 2	0,03
3	Krankenhaus 1	0,09	Dialyseklinik 3	0,02
4	Dialyseklinik 3	0,09	Dialyseklinik 1	0,01
5	Dialyseklinik 2	0,07	Dialyseklinik 2	0,01
6	Dialyseklinik 1	0,06	Krankenhaus 1	0

Die Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex ermöglicht jedoch nur eine vergleichende Darstellung in der Ausgangssituation der einzelnen KRITIS-Einrichtungen. Mit steigender Anzahl der Einrichtungen leidet die Übersichtlichkeit und die Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Die Berechnung des Vulnerabilitätsindex basiert auf Eigenschaften der einzelnen Einrichtungen. Zwar werden temporale Eigenschaften von KRITIS-Einrichtungen berücksichtigt, aufgrund der Aggregation werden diese jedoch im Ergebnis sowohl raum- als auch zeitunabhängig abstrahiert und ermöglichen in dieser Form keine differenzierten Rückschlüsse über den zeitlichen Verlauf eines Ausfalls.

## 11.4 Dynamischer Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung

Bei der Berechnung von dynamischen Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Einrichtungen werden die fehlende Versorgungsleistung und der Resistenzverlust, die sich beide über die Dauer eines Stromausfalls zeitpunktspezifisch ändern, in das Aggregationsverfahren integriert. Dadurch ergibt sich ein Vulnerabilitätsindex für eine KRITIS-Einrichtung, dessen Wert sich auf einen konkreten Zeitpunkt während eines Stromausfalls bezieht.

Bei der Bildung von dynamischen Vulnerabilitätsindizes einer KRITIS-Einrichtung wird zwischen einem progressiven und einem fluktuierenden Index unterschieden. Beim progressiven Index wird als zeitabhängige Komponente lediglich der Verlust der Resistenzfähigkeit durch den Verzehr von Bewältigungsressourcen berücksichtigt. Der Index ist abhängig von der Dauer eines Stromausfalls, jedoch unabhängig vom Zeitpunkt des Ausfallbeginns. Über die Dauer eines Stromausfalls steigen die Werte des progressiven Index bis zu einem bestimmten Vulnerabilitätsniveau an, an dem die vorhandenen Bewältigungsressourcen vollständig aufgebraucht sind. Beim fluktuierenden Index wird neben der Dauer des Ausfalls auch der Ausfallbeginn berücksichtigt. Hierfür wird die relative Versorgungsleistung in das Aggregationsverfahren integriert.

Der *progressive Indexwert*  $ProgVuln_i(t_{out})$  ist objektscharf für eine KRITIS-Einrichtung  $i$ . In Bezug zur Dauer eines Ausfalls ist der Index spezifisch für einen bestimmten Analysezeitpunkt.

Er berechnet sich aus einem mit dem Relevanzgewicht  $w_u^{Relev}$  gewichteten Produkt des relativen Leistungsvermögens  $Perform_i^u$  und des Resistenzverlustes  $ResistLoss_i(t_{out})$  zum Zeitpunkt  $t_{out}$  während eines Stromausfalls:

$$ProgVuln_i(t_{out}) = w_u^{Relev} * Perform_i^u * ResistLoss_i(t_{out}) \quad (11-3)$$

Die Gewichtung des Leistungsvermögens ergibt einen statischen Wert, der durch die Multiplikation mit dem Resistenzwert sich in den Fällen kompensiert, in denen Bewältigungsressourcen - auch in Teilen - noch vorhanden sind. Sind zum Analysezeitpunkt Bewältigungsressourcen vorhanden ( $t_{CC}^i < t_{out}$ ), liegt der Resistenzverlust in Abhängigkeit der restlichen Betriebsdauer der Notversorgung unter eins und führt durch die Multiplikation mit dem gewichteten Leistungsvermögen zu einem verminderten Wert des zeitpunktbezogenen Vulnerabilitätsindex.

Da bis zum Zeitpunkt des vollständigen Verbrauchs von Bewältigungsressourcen der Resistenzverlust und somit die Vulnerabilität ansteigt und dann ab dem Zeitpunkt, ab dem alle Bewältigungsressourcen aufgebraucht sind ( $t_{CC}^i = t_{out}$ ), die Vulnerabilität auf einem gleichbleibenden Niveau entsprechend des gewichteten Leistungsvermögens bleibt, ist dieser Index progressiv. Bis zu diesem Zeitpunkt sind Bewältigungsressourcen vorhanden, um eine (Not-)Versorgung des kontinuierlichen Betriebs sicherzustellen. Die Vulnerabilität einer KRITIS-Einrichtung steigt in Abhängigkeit mit dem anhaltenden Verzehr der Bewältigungsressourcen.

Beim *fluktuierenden Index* wird zusätzlich die relative Versorgungsleistung berücksichtigt. Der fluktuierende Indexwert  $FluctVuln_i(t_{out})$  ist objektscharf für eine KRITIS-Einrichtung  $i$ . Er ist spezifisch in Bezug auf einen bestimmten Analysezeitpunkt während eines Stromausfalls und berechnet sich aus einem mit dem Relevanzgewicht  $w_u^{Relev}$  gewichteten Produkt des relativen Leistungsvermögens  $Perform_i^u$ , des Resistenzverlustes  $ResistLoss_i(t_{out})$  und der relativen Versorgungsleistung  $Service_u^{Season, Day}(t_{out})$  zum Zeitpunkt  $t_{out}$  während eines Stromausfalls:

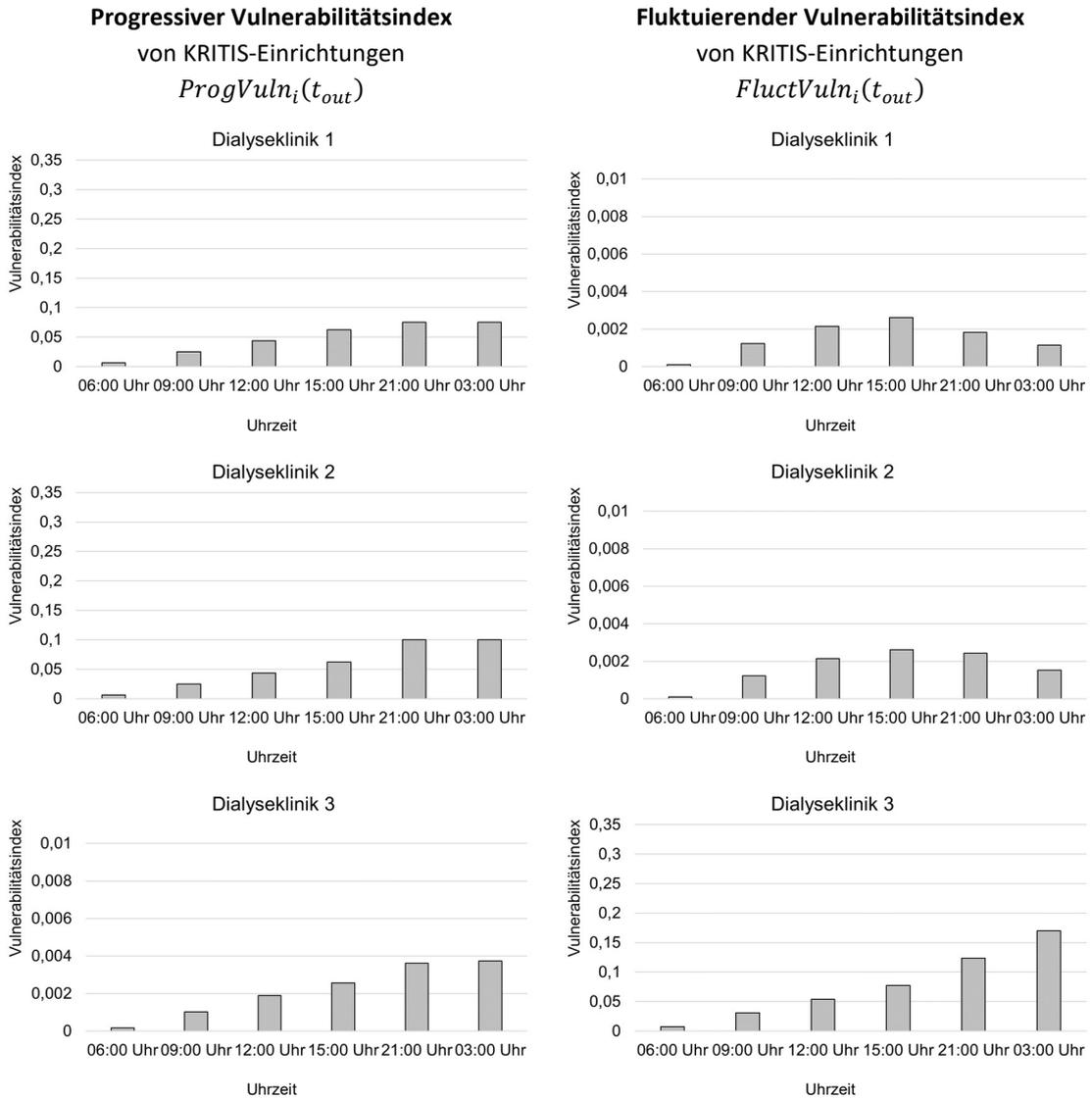
$$FluctVuln_i(t_{out}) = w_u^{Relev} * Perform_i^u * ResistLoss_i(t_{out}) * Service_u^{Season, Day}(t_{out}) \quad (11-4)$$

Beim fluktuierenden Vulnerabilitätsindex variiert die Vulnerabilität entsprechend der Versorgungsleistung, des Resistenzverlustes und in der Höhe des gewichteten Leistungsvermögens. So lange noch Bewältigungsressourcen vorhanden sind, wirkt der Resistenzverlust durch die multiplikative Verknüpfung kompensierend und reduziert die Höhe des Vulnerabilitätswertes. Erst wenn die Bewältigungsressourcen aufgebraucht sind, berechnet sich der Indexwert nur noch aus dem Produkt der Versorgungsleistung zum jeweiligen Analysezeitpunkt und dem fehlenden gewichteten Leistungsvermögen. Da insbesondere in Nachtzeiten der Bedarf an einer Dienstleistung und damit die Versorgungsleistung sinken, sinkt auch der Indexwert zu diesen Zeitpunkten. Soweit die Bewältigungsressourcen aufgebraucht sind und die Versorgungsleistung wieder ansteigt, steigt auch der fluktuierende Vulnerabilitätsindex. Hierdurch kommt es abhängig vom Zeitpunkt, an dem ein Stromausfall wirkt, zur Fluktuation des Vulnerabilitätsindex.

Im Nachfolgenden wurden das progressive und das fluktuierende Aggregationsverfahren für KRITIS-Einrichtungen auf das vorgenannte Beispiel angewendet. Dabei wurde zur Berechnung des Resistenzverlustes vereinfachend eine lineare Verbrauchsfunktion, zur Berechnung des Leistungsvermögens eine lineare Normalisierung der Vergleichsattribute und zur Berechnung der Versorgungsleistung eine Herleitung aus

Standardlastprofilen der BDEW verwendet. Es wird von einem Stromausfall ausgegangen, der an einem Werktag um fünf Uhr beginnt.

Zur Anwendung der Aggregationsverfahren sind Analysezeitpunkte zu definieren. Exemplarisch werden für alle KRITIS-Einrichtungen die jeweiligen Indizes für die sechs Zeitpunkte 6:00 Uhr ( $t_{out} = 60Min$ ), 9:00 Uhr ( $t_{out} = 240Min$ ), 12:00 Uhr ( $t_{out} = 420Min$ ), 15:00 Uhr ( $t_{out} = 600Min$ ), 21:00 Uhr ( $t_{out} = 960Min$ ) und 3:00 Uhr ( $t_{out} = 1320Min$ ) berechnet (Abbildung 11.4).



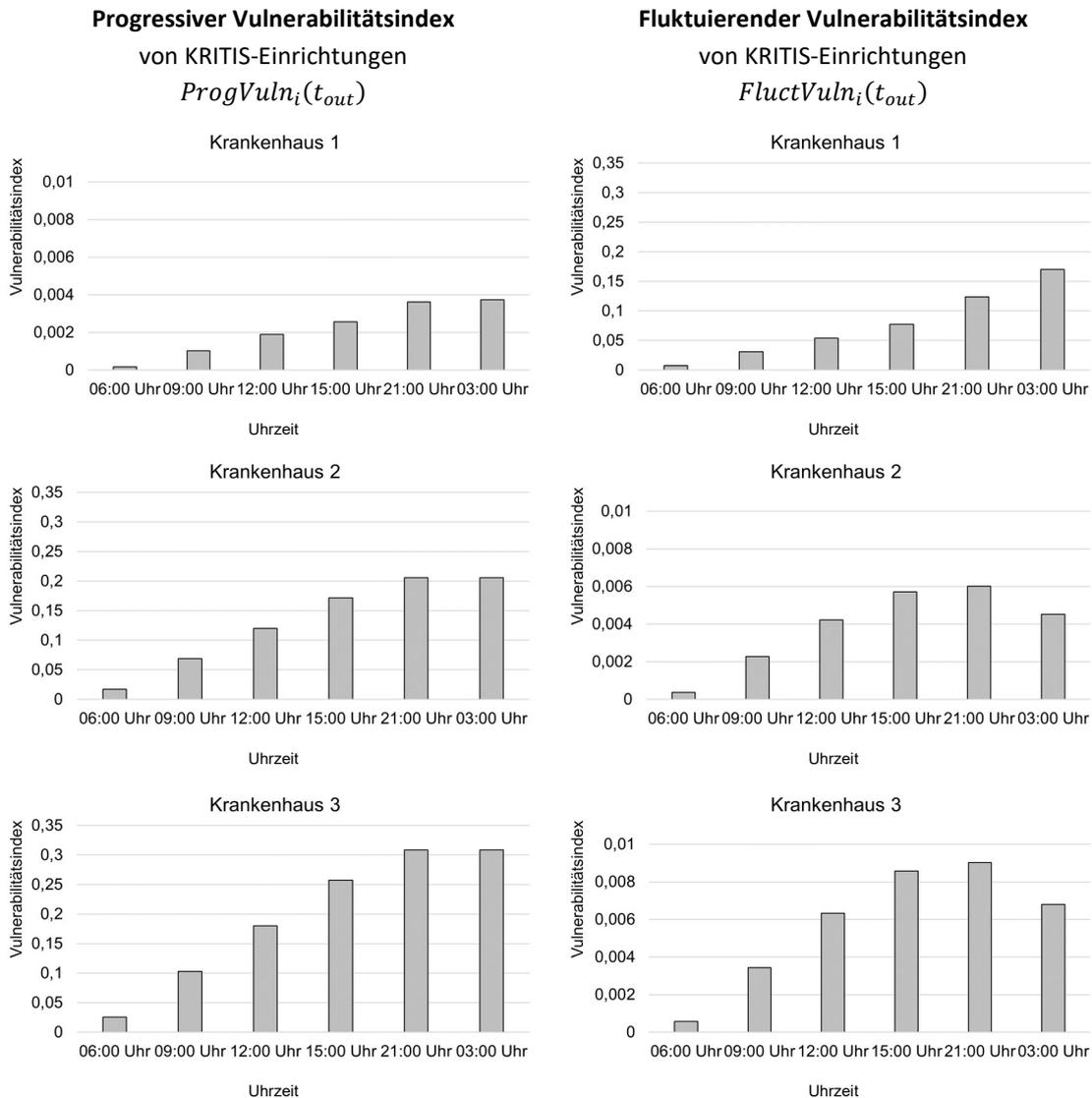


Abbildung 11.4: Ergebnisse der progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes am Beispiel.

Soweit noch Bewältigungsressourcen vorhanden sind, steigen die progressiven Vulnerabilitätsindizes der KRITIS-Einrichtungen von Zeitschritt zu Zeitschritt. Sind alle Ressourcen verbraucht, bleibt im darauffolgend analysierten Zeitschritt der Wert konstant. Dies zeigt sich bis auf das Krankenhaus 1 in allen progressiven Vulnerabilitätsindizes. Beim Krankenhaus 1 reichen die Bewältigungsressourcen bis zum Ende des Stromausfallszenarios, so dass auch im letzten betrachteten Zeitschritt die Vulnerabilität noch steigt.

Wie bei den progressiven Vulnerabilitätsindizes zeigt sich auch bei den fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes, dass die Vulnerabilität am Vormittag bei allen KRITIS-Einrichtungen allmählich ansteigt. Die Vulnerabilität des Dialyseklिनик 1 und 2 sinkt nach 15:00 Uhr, bei den Krankenhäusern 2 und 3 ist dies ab 21:00 Uhr zu beobachten. Hier zeigt sich der Einfluss der Versorgungsleistungen, die am Nachmittag bei Krankenhäusern und Dialysekliniken sinken. Gleichzeitig sind Bewältigungsressourcen weitestgehend aufgebraucht, so dass eine Kompensation nicht mehr möglich ist. Die Verzögerungen bei den Krankenhäusern 2 und 3 begründen sich in der Überlagerung der Versorgungsleistungen mit dem Resistenzverlust, der sich gegenüber den Dialysekliniken verzögert auswirkt. Die Vulnerabilität der Dialyseklिनик 3 und des

Krankenhauses 1 steigen auch in den letzten betrachteten Zeitpunkten. Der Grund hierfür liegt in den Bewältigungsressourcen. Beide KRITIS-Einrichtungen können vergleichsweise lange einen kontinuierlichen Betrieb aufrechterhalten. Im weiteren Verlauf werden jedoch auch diese verzehrt, so dass die Vulnerabilität dieser KRITIS-Einrichtungen steigt.

Anhand eines konkreten Stromausfallszenarios lassen sich für bestimmte Zeitpunkte die dynamischen Vulnerabilitätsindexwerte berechnen und untereinander vergleichen. Dabei werden der Verzehr von Bewältigungsressourcen (Resistenzverlust) und der variierende Bedarf (relative Versorgungsleistung) entsprechend der Tageszeit berücksichtigt. Beide Varianten ermöglichen eine objektscharfe und zeitdiskrete Berechnung. Mit steigender Anzahl der zu berücksichtigenden KRITIS-Einrichtungen leidet in der Visualisierung der Ergebnisse die Übersichtlichkeit und Interpretierbarkeit der dynamischen Vulnerabilitätsindizes. Zwar lassen sich für fast alle Zeitpunkte Indexwerte berechnen, ein essentieller Erkenntnisgewinn erschließt sich jedoch erst im Vergleich der Indexwerte mit geeigneten Zeitpunkten einer Zeitreihe. Um mehr Verständnis über den Verlauf und die Eskalation zu erhalten, bedarf es deswegen einer kontinuierlichen Darstellung der Indexwerte. Mit Zeitreihen lassen sich zudem Vulnerabilitätsprofile bilden.

## 11.5 Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Einrichtungen

Mithilfe mehrerer dynamischer Vulnerabilitätsindexwerte von KRITIS-Einrichtungen lassen sich Zeitreihen bilden, die sich als Vulnerabilitätsprofil darstellen lassen. Die in dieser Arbeit verwendeten Zeitreihen sind äquidistant mit einem geeigneten konstanten Zeitabstand von  $\Delta t_{dist}$ . Soweit Standardlastprofile zur Herleitung der Versorgungsleistung verwendet werden, kann für eine KRITIS-Einrichtung eine zeitabhängige Folge von Vulnerabilitätsindizes im gleichbleibenden Abständen von 15 Minuten als die höchstmögliche Auflösung gebildet werden.

Für das gewählte Stromausfallszenario mit einer Dauer von  $\Delta t_{Outage}^{Calc} = 1440 Min$  ergeben sich bei einer 15-minütigen Auflösung 96 Zeitschritte, in denen je ein Wert berechnet wird. Zwar werden die Werte für die jeweiligen Zeitschritte diskret berechnet, ihre Darstellung als Zeitreihe ergibt jedoch eine kontinuierliche Darstellung als ein Vulnerabilitätsprofil. Vulnerabilitätsprofile können für progressive und für fluktuierende Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Einrichtungen erstellt werden. Beide sind objektscharf und zeigen einen Verlauf der Vulnerabilität in der Dauer des gewählten Stromausfallszenarios.

Progressive Vulnerabilitätsprofile zeigen den kontinuierlichen Verlauf der Vulnerabilität unter Berücksichtigung von Relevanz, Leistungsvermögen und Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung. Das progressive Vulnerabilitätsprofil  $ProgVulnProfil_i$  einer KRITIS-Einrichtung  $i$  berechnet sich aus den einzelnen progressiven Vulnerabilitätsindizes  $ProgVuln_i(t_{out})$  aller Zeitpunkte zwischen Beginn ( $t_{out} = t_0$ ) und Ende ( $t_{out} = t_{calc}$ ) des Stromausfallszenarios mit:

$$ProgVulnProfil_i = \{ProgVuln_i(t_{out})\}_{t_{out}=t_0}^{t_{out}=t_{calc}} \quad (11-5)$$

Fluktuierende Vulnerabilitätsprofile zeigen den kontinuierlichen Verlauf der Vulnerabilität und berücksichtigen neben Relevanz, Leistungsvermögen und Resistenzverlust auch die Versorgungsleistung einer KRITIS-Einrichtung. Das fluktuierende Vulnerabilitätsprofil  $FluctVulnProfil_i$  einer KRITIS-Einrichtung  $i$  berechnet sich aus den einzelnen fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes  $FluctVuln_i(t_{out})$  aller Zeitpunkte zwischen Beginn ( $t_{out} = t_0$ ) und Ende ( $t_{out} = t_{calc}$ ) des Stromausfallszenarios mit:

$$FluctVulnProfil_i = \{FluctVuln_i(t_{out})\}_{t_{out}=0}^{t_{out}=t_{calc}} \quad (11-6)$$

Für die KRITIS-Einrichtungen aus dem vorgenannten Beispiel werden in Abbildung 11.5 die Ergebnisse der progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsprofile dargestellt.

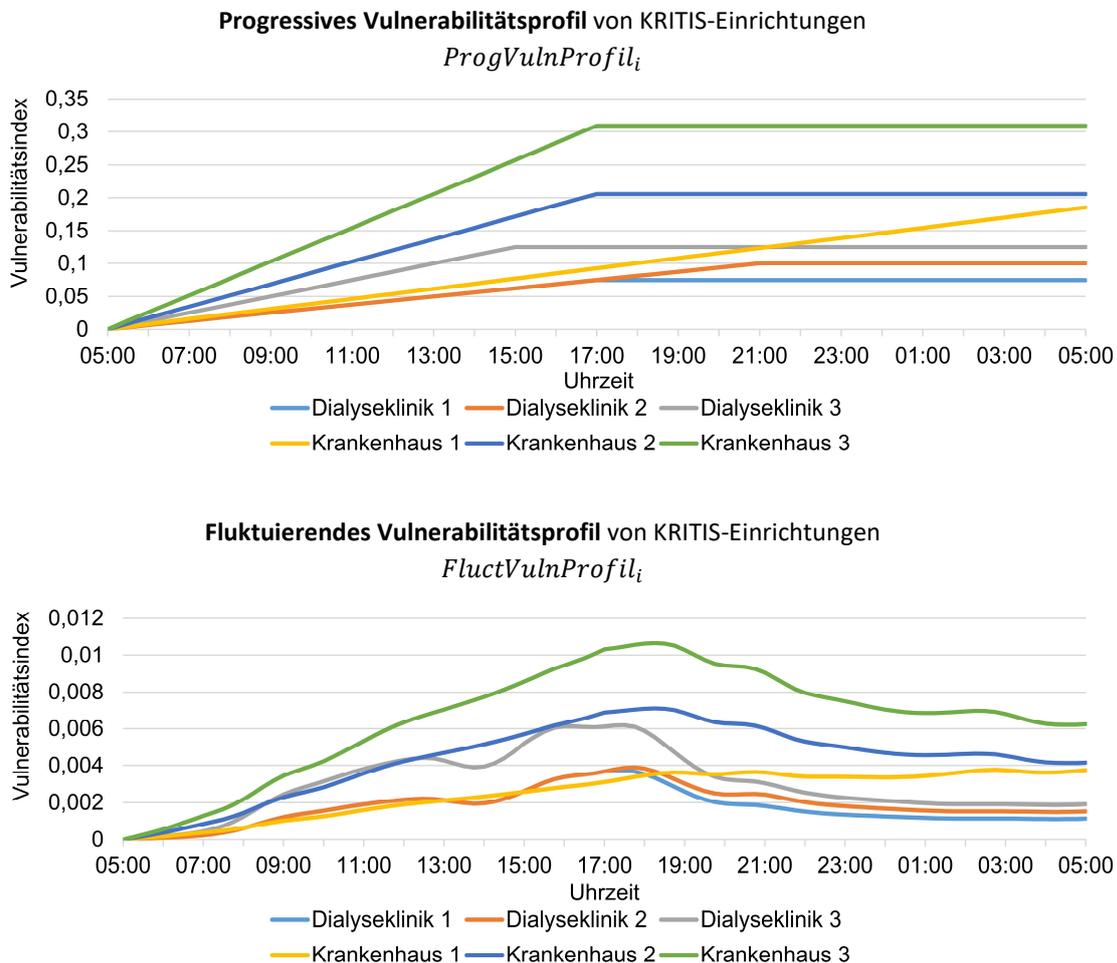


Abbildung 11.5: Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Einrichtungen.

Abbildung 11.5 zeigt, dass die progressiven Vulnerabilitätsprofile entsprechend der Verbrauchsquote bis zu einem gleichbleibenden Vulnerabilitätsniveau ansteigen. Sobald eine Einrichtung nicht mehr über Bewältigungsressourcen verfügt, stellt sich dieses Niveau ein, und es kommt zu keiner weiteren Veränderung. Das Niveau entspricht dem Produkt aus der Relevanzgewichtung und des Leistungsvermögens der KRITIS-Einrichtung. Aus der Darstellung lassen sich der zeitliche Anstieg der Vulnerabilität und die unterschiedliche Höhe der Vulnerabilität ableiten.

Sowohl im progressiven als auch im fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil ergeben sich in den ersten sechs Stunden des Ausfalls bis 11:00 Uhr zwei Cluster von KRITIS-Einrichtungen. Die Verläufe der Vulnerabilitätsindizes ähneln sich. Die Vulnerabilität der Dialysekliniken 2 und 3 sowie des Krankenhauses 1 steigen in dieser Zeit in gleichen Maßen mäßig an. Ein Anstieg ist auch für die Dialyseklinik 1 und die Krankenhäuser 2 und 3 zu verzeichnen, gleichwohl diese höhere Vulnerabilitätsindizes aufweisen. Ab 11:00 Uhr sind

die Bewältigungsressourcen bei einigen KRITIS-Einrichtungen aufgebraucht. In den progressiven Vulnerabilitätsprofilen zeigt sich dies durch das Erreichen eines gleichbleibenden Niveaus bei der Dialyseklinik 1 und dem Krankenhaus 2.

Im progressiven Vulnerabilitätsprofil zeigen sich für die Dialyseklinik 1 und das Krankenhaus 2 unterschiedlich hohe Niveaus. Beim fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil findet sich dieser Unterschied aufgrund der Verknüpfung mit der Versorgungsleistung kaum wieder. Das Vulnerabilitätsprofil der Dialyseklinik 1 schwankt stark. Gegenüber dem Krankenhaus 2 tritt ein starker Rückgang der Vulnerabilitätsindizes über die Mittagszeit auf, da zu dieser Zeit entsprechend der Versorgungsleistung eine geringere Nachfrage und ein geringerer Bedarf vorliegt. Erst am Abend zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Höhe der Vulnerabilitätsindizes der beiden Einrichtungen.

Eine weitere Besonderheit zeigt sich beim fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil des Krankenhauses 1. Die Vulnerabilität des Krankenhauses steigt kontinuierlich bis 17:00 Uhr an. Zu diesem Zeitpunkt sind alle Bewältigungsressourcen des Krankenhauses aufgebraucht. Aufgrund der sinkenden Versorgungsleistung nach diesem Zeitpunkt steigt die Vulnerabilität jedoch nicht. Wie bei allen Einrichtungen sinkt am Abend bis in die Nacht hinein die Vulnerabilität aufgrund sinkender Nachfrage und sinkenden Bedarfs. Die Situation entspannt sich, auch wenn keine Einrichtung mehr über Bewältigungskapazitäten verfügt. In den fluktuierenden Vulnerabilitätsprofilen ist ein retardierender Moment bzw. eine zeitliche Regredienz des Gefahrenpotentials zu erkennen. Dieses Beispiel zeigt das Erkenntnispotential, wenn verschiedenartige Aggregationsverfahren genutzt werden.

## 11.6 Aggregationsebene KRITIS-Typ

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Aggregationsebene lassen sich in der zweiten Aggregationsebene Indizes entwickeln, die das Gefahrenpotential der Menge von KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs abbilden. Aus den verschiedenen statischen Vulnerabilitätsindizes der KRITIS-Einrichtungen desselben KRITIS-Typs lassen sich entsprechende auf die KRITIS-Typen bezogene Vulnerabilitätsindizes bilden. Im Nachfolgenden wird die Bildung von statischen, progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes für KRITIS-Typen und ihren entsprechenden Vulnerabilitätsprofilen erläutert.

Der statische Vulnerabilitätsindex von KRITIS-Typen stellt das Gefahrenpotential aller KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs dar. Hierdurch lassen sich die KRITIS-Typen untereinander vergleichen und entsprechende Schwerpunkte ableiten.

Ein statischer Vulnerabilitätsindex von KRITIS-Typen berechnet sich aus der Summe der statischen Vulnerabilitätsindizes der KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs. Hierzu wird aus der Obermenge aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen  $Set\ All\ CI = \{CI_1^{r,u}, CI_2^{r,u}, \dots, CI_l^{r,u}\}$  eine Teilmenge von KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs  $Set_{Typ_v} = \{Set\ All\ CI : u = v\}$  festgelegt. Unabhängig davon, welche Variante zur Berechnung des statischen Vulnerabilitätsindex einer KRITIS-Einrichtung gewählt wird, berechnet sich der statische Vulnerabilitätsindex eines KRITIS-Typs  $Typ_v$  aus:

$$StatVuln_v^{Variante} = \sum_{i=1}^l StatVuln_i^{Variante}, \forall Set_{Typ_v} = \{Set\ All\ CI : u = v\} \quad (11-7)$$

Angewendet auf das vorgenannte Beispiel ergeben sich je nach verwendeter Berechnungsvariante die in Abbildung 11.6 dargestellten Ergebnisse für die KRITIS-Typen.

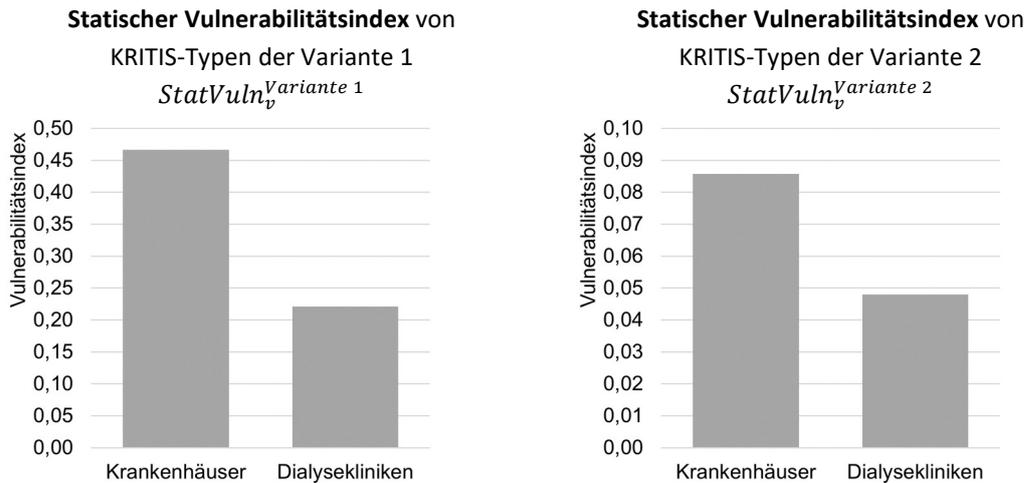


Abbildung 11.6: Ergebnisse des statischen Vulnerabilitätsindex für KRITIS-Typen nach beiden Varianten.

Die in der Abbildung 11.6 dargestellten Ergebnisse der beiden Varianten zur Berechnung des statischen Vulnerabilitätsindex eines KRITIS-Typs sind aufgrund der unterschiedlichen Aggregationsverfahren nur bedingt vergleichbar. In beiden Varianten zeigt sich, dass von den Krankenhäusern ein fast doppelt so hohes Gefahrenpotential ausgeht wie von den Dialysekliniken.

In der zweiten Aggregationsebene werden für KRITIS-Typen progressive Vulnerabilitätsindizes berechnet, die das Gefahrenpotential von KRITIS-Typen für ausgewählte Zeitpunkte darstellen. Für einen ausgewählten Zeitpunkt  $t_{out}$  wird der progressive Vulnerabilitätsindex  $ProgVuln_v(t_{out})$  eines bestimmten KRITIS-Typs  $Typ_v$  durch die Summe der progressiven Vulnerabilitätsindizes aller KRITIS-Einrichtungen dieses KRITIS-Typs gebildet mit:

$$ProgVuln_v(t_{out}) = \sum_{i=1}^l ProgVuln_i(t_{out}) , \forall Set_{Typ_v} = \{Set\ All\ CI : u = v\} \quad (11-8)$$

Analog zur Berechnung der progressiven Vulnerabilitätsindizes können fluktuierende Vulnerabilitätsindizes eines KRITIS-Typs für einen ausgewählten Zeitpunkt  $t_{out}$  anhand der jeweiligen Summe der fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Einrichtungen des betrachteten KRITIS-Typs  $FluctVuln_i(t_{out})$  berechnet werden mithilfe von:

$$FluctVuln_v(t_{out}) = \sum_{i=1}^l FluctVuln_i(t_{out}) , \forall Set_{Typ_v} = \{Set\ All\ CI : u = v\} \quad (11-9)$$

Aus den progressiven bzw. den fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Typen lassen sich progressive bzw. fluktuierende Vulnerabilitätsprofile ( $ProgVulnProfil_v$  bzw.  $FluctVulnProfil_v$ ) erstellen mit:

$$ProgVulnProfil_v = \{ProgVuln_v(t_{out})\}_{t_{out}=t_0}^{t_{out}=t_{Calc}} \quad (11-10)$$

bzw.

$$FluctVulnProfil_v = \{FluctVuln_v(t_{out})\}_{t_{out}=t_0}^{t_{out}=t_{calc}} \quad (11-11)$$

Abbildung 11.7 zeigt das progressive und das fluktuierende Vulnerabilitätsprofil der beiden KRITIS-Typen des vorgenannten Beispiels.

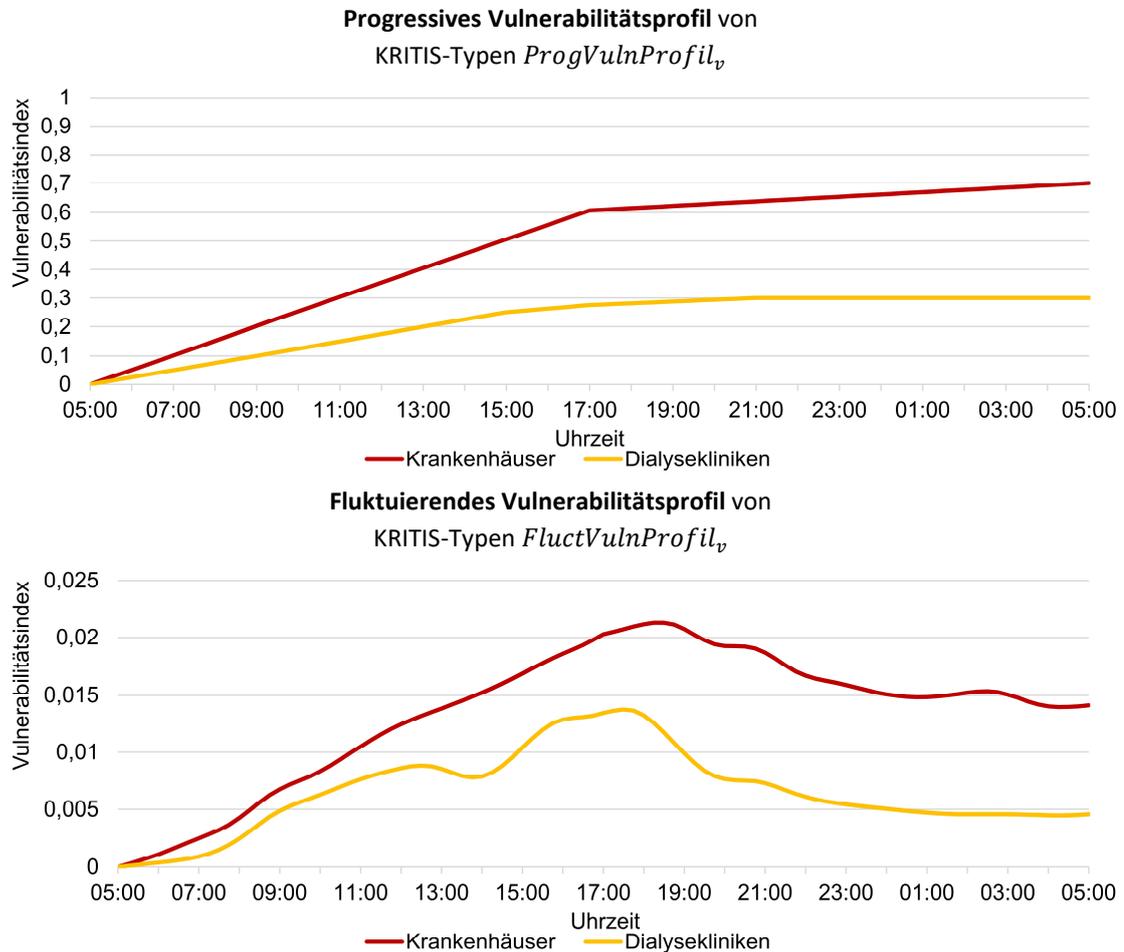


Abbildung 11.7: Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von KRITIS-Typen.

Anhand der progressiven Vulnerabilitätsprofile wird der allmähliche Anstieg der Vulnerabilität beider KRITIS-Typen deutlich. Die Profile zeigen, dass alle Dialysekliniken ab 13:00 Uhr nicht mehr funktionsfähig sind und vollständig unter den Folgen eines Stromausfalls leiden. Aufgrund der höheren Bewältigungskapazität tritt dieser Zustand bei den Krankenhäusern erst ab 17:00 Uhr ein, wobei schon deutlich vorher der kontinuierliche Betrieb bei einem großen Teil der Krankenhäuser nicht mehr sichergestellt werden kann. Die Krankenhäuser erreichen schon nach wenigen Stunden einen höheren Vulnerabilitätsindex als die Dialysekliniken. Sobald die Bewältigungsressourcen in allen Einrichtungen verbraucht sind, entspricht die Höhe des Vulnerabilitätsindex der beiden KRITIS-Einrichtungen dem Wert ihres Relevanzgewichtes.

Die fluktuierenden Vulnerabilitätsprofile der beiden KRITIS-Typen verlaufen bis 11:00 Uhr sehr ähnlich. Erst danach steigen Krankenhäuser auf höhere Werte. Die Vulnerabilität der Dialysekliniken fluktuert über die Mittagszeit bis in den frühen Abend hinein. Am Abend ab ca. 19:00 Uhr sinken die Vulnerabilitätswerte bei beiden KRITIS-Typen, wobei die Vulnerabilität bei Krankenhäusern deutlich erhöht bleibt.

Entsprechend der Ergebnisse der Vulnerabilitätsprofile wird deutlich, dass die Krankenhäuser zwar ein höheres Gefahrenpotential aufweisen, Leistungen der Dialysekliniken aber viel früher nicht mehr zur Verfügung stehen. Ein eindeutiger Gefahrenschwerpunkt bildet sich bei den Krankenhäusern erst nach 11:00 Uhr heraus. Entsprechend ihrer Versorgungsleistung sinkt das Gefahrenpotential von Dialysekliniken am Nachmittag des Ausfalltages stark. Ähnliches ist bei den Krankenhäusern zu erkennen, die bereits zum Mittag ein weit höheres Gefahrenpotential aufweisen.

## 11.7 Aggregationsebene Gebietskörperschaft

Die Vulnerabilitätsindexwerte betrachteter Gebietskörperschaften leiten sich aus den Vulnerabilitätsindizes der KRITIS-Einrichtungen her, die in ihnen verortet sind. Im Nachfolgenden werden die Bildung von statischen, progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes für Gebietskörperschaften sowie entsprechende Vulnerabilitätsprofile erläutert.

Der statische Vulnerabilitätsindex einer Gebietskörperschaft stellt ihr jeweiliges Gefahrenpotential dar. Hierdurch sind räumliche Analysen über das Gefahrenpotential der einzelnen Gebietskörperschaften möglich.

Ein statischer Vulnerabilitätsindex einer Gebietskörperschaft berechnet sich aus der Summe der statischen Vulnerabilitätsindizes der KRITIS-Einrichtungen, die sich in der zu analysierenden Gebietskörperschaft befinden. Hierzu wird aus der Obermenge aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen  $Set\ All\ CI = \{CI_1^{r,u}, CI_2^{r,u}, \dots, CI_l^{r,u}\}$  eine Teilmenge der KRITIS-Einrichtungen bestimmt, die sich in der zu analysierenden Gebietskörperschaft  $District_z$  befinden  $Set_{District_z} = \{Set\ All\ CI : r = z\}$ . Unabhängig davon, welche Variante zur Berechnung des statischen Vulnerabilitätsindex der KRITIS-Einrichtungen gewählt wird, berechnet sich der statische Vulnerabilitätsindex einer Gebietskörperschaft  $District_z$  aus:

$$StatVuln_z^{Variante} = \sum_{i=1}^l StatVuln_i^{Variante}, \forall Set_{District_z} = \{Set\ All\ CI : r = z\} \quad (11-12)$$

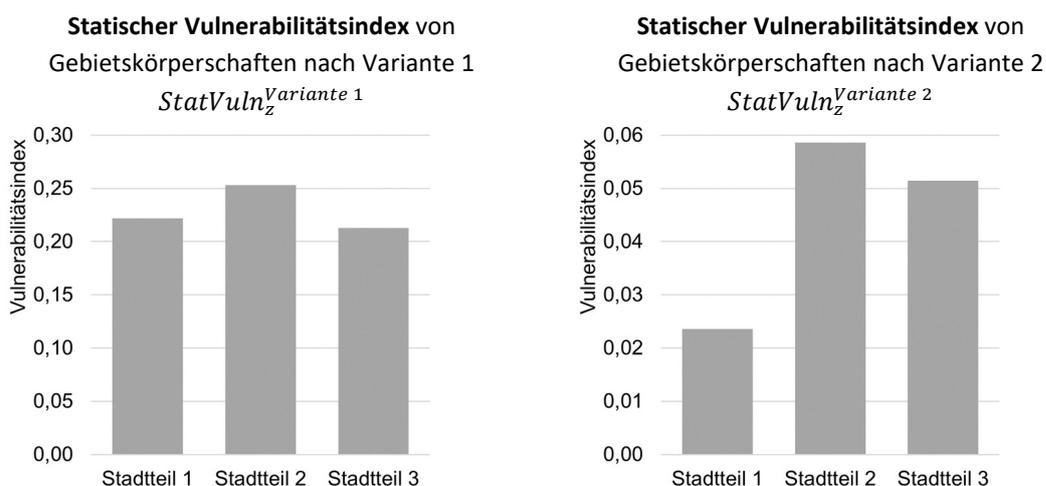


Abbildung 11.8: Ergebnisse der statischen Vulnerabilitätsindizes für Gebietskörperschaften nach beiden Varianten.

Die in der Abbildung 11.8 dargestellten Ergebnisse der beiden Varianten zur Berechnung des statischen Vulnerabilitätsindex einer Gebietskörperschaft sind aufgrund der unterschiedlichen Aggregationsverfahren nur bedingt vergleichbar. Ein erheblicher Unterschied besteht bei der Einschätzung des Gefahrenpotentials des ersten Stadtteils. In der zweiten Berechnungsvariante zeigt sich eine erheblich niedrigere Vulnerabilität gegenüber den anderen Stadtteilen. In der ersten Berechnungsvariante erscheint die Vulnerabilität der Stadtteile 1 und 2 dagegen auf ähnlich hohem Niveau. Dieser Unterschied begründet sich in der multiplikativen Aggregation der zweiten Berechnungsvariante. Hierdurch haben vorhandene Bewältigungsressourcen kompensierenden Einfluss auf die Höhe des Vulnerabilitätsindex. Da beim ersten Krankenhaus Bewältigungsressourcen für die gesamte Dauer des Stromausfallszenarios vorhanden sind, liegt der statische Vulnerabilitätsindex des Krankenhauses 1 in allen betrachteten Zeitpunkten bei null. Der statische Vulnerabilitätsindex des Stadtteils 1, in dem sich dieses Krankenhaus befindet, ist daher niedrig im Vergleich zur ersten Berechnungsvariante.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Funktionsweise eines Aggregationsverfahrens wesentlich den Erkenntnisgewinn beeinflussen und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Die Funktionsweise der Aggregationsverfahren ist deswegen den Entscheidungsträgern stets transparent zu machen. Darüber hinaus bedarf es zur Interpretation der Ergebnisse der zweiten Aggregationsebene auch der Ergebnisse aus der ersten Aggregationsebene. Auf der zweiten Aggregationsebene lassen sich zwar neue Erkenntnisse gewinnen, Zusammenhänge und Ursachen sind jedoch häufig erst durch das Hinzuziehen der Ergebnisse der ersten Aggregationsebene möglich.

Die progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes von Gebietskörperschaften werden analog gebildet wie die für KRITIS-Typen. Für einen ausgewählten Zeitpunkt  $t_{out}$  wird der progressive Vulnerabilitätsindex  $ProgVuln_z(t_{out})$  einer bestimmten Gebietskörperschaft  $District_z$  durch die Summe der progressiven Vulnerabilitätsindizes aller KRITIS-Einrichtungen, die sich in der betreffenden Gebietskörperschaften befinden, gebildet mit:

$$ProgVuln_z(t_{out}) = \sum_{i=1}^l ProgVuln_i(t_{out}), \forall Set_{District_z} = \{Set\ All\ CI : r = z\} \quad (11-13)$$

Der fluktuierende Vulnerabilitätsindex einer Gebietskörperschaft für einen ausgewählten Zeitpunkt  $t_{(out)}$  wird gebildet aus der Summe der fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes  $FluctVuln_i(t_{(out)})$  von KRITIS-Einrichtungen, die sich in der betreffenden Gebietskörperschaft befinden, mit:

$$FluctVuln_z(t_{out}) = \sum_{i=1}^l FluctVuln_i(t_{out}), \forall Set_{District_z} = \{Set\ All\ CI : r = z\} \quad (11-14)$$

Aus den progressiven bzw. den fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes von KRITIS-Typen lassen sich progressive bzw. fluktuierende Vulnerabilitätsprofile ( $ProgVulnProfil_z$  bzw.  $FluctVulnProfil_z$ ) erstellen mit:

$$ProgVulnProfil_z = \{ProgVuln_z(t_{out})\}_{t_{out}=t_0}^{t_{out}=t_{Calc}} \quad (11-15)$$

bzw.

$$FluctVulnProfil_z = \{FluctVuln_z(t_{(out)})\}_{t_{out}=t_0}^{t_{out}=t_{Calc}} \quad (11-16)$$

Abbildung 11.9 zeigt das progressive und das fluktuierende Vulnerabilitätsprofil der drei Gebietskörperschaften im vorgenannten Beispiel.

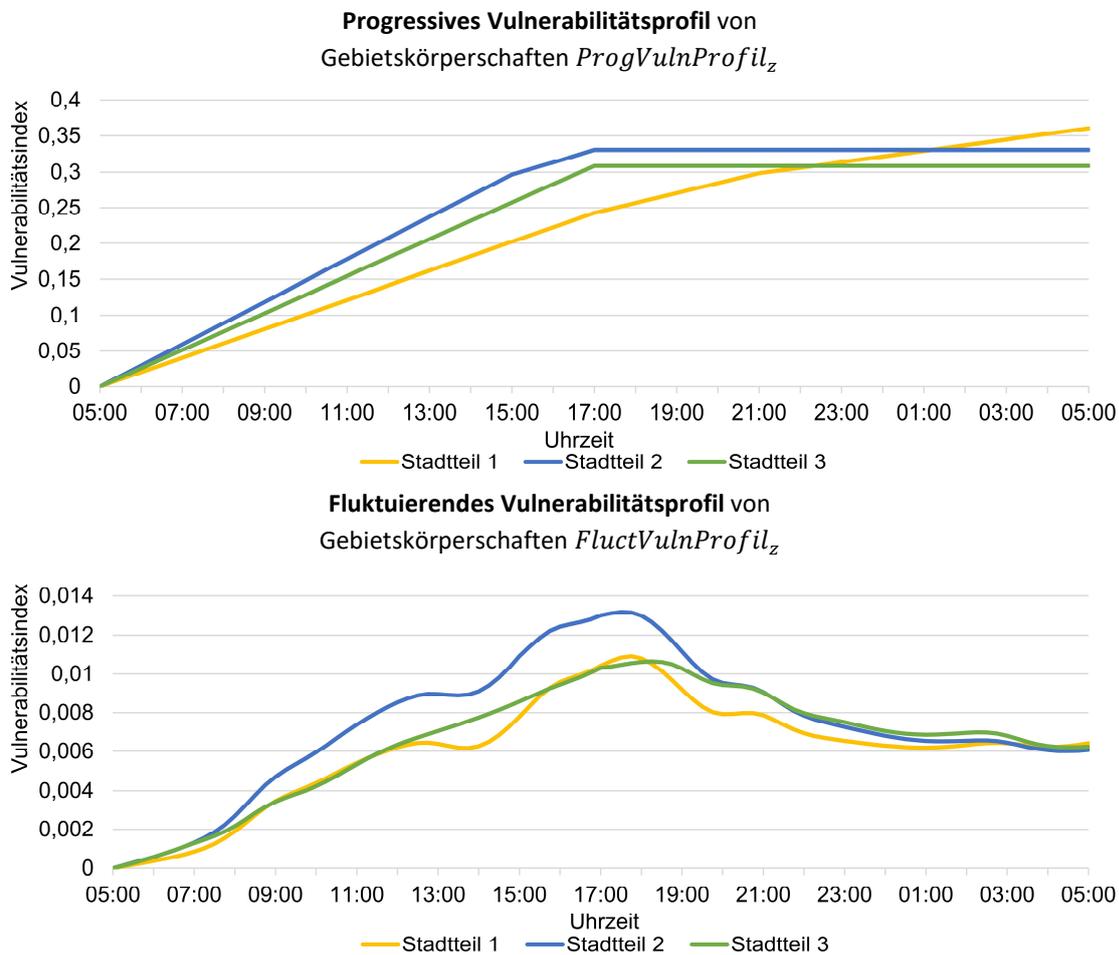


Abbildung 11.9: Ergebnisse progressiver und fluktuierender Vulnerabilitätsprofile von Gebietskörperschaften.

Im progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil zeigt sich, dass bis 17:00 Uhr in allen Stadtteilen ein ähnlicher Anstieg der Vulnerabilität zu verzeichnen ist. Im progressiven Vulnerabilitätsprofil wird deutlich, dass alle KRITIS-Einrichtungen in den Stadtteilen 2 und 3 ab 17:00 Uhr über keine Bewältigungsressourcen verfügen. Im Stadtteil 2 werden die höchsten Vulnerabilitätswerte erreicht, die sich jedoch in der Höhe nicht erheblich von den anderen unterscheiden. Bis 21:00 Uhr (progressives Vulnerabilitätsprofil) bzw. bis 17:00 Uhr (fluktuierendes Vulnerabilitätsprofil) erreicht der Stadtteil 1 die niedrigsten Vulnerabilitätswerte. Im fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil zeigt sich in allen Stadtteilen durch die zeitpunktbedingte Mäßigung der Versorgungsleistungen ab ca. 19:00 Uhr ein Rückgang. Die Vulnerabilitätsprofile der Stadtteile gleichen sich an. Im progressiven Vulnerabilitätsprofil wird deutlich, dass um ca. 22:00 Uhr die Vulnerabilität im Stadtteil 1 derart ansteigt, dass dort ein höheres Gefahrenpotential angezeigt wird als in den anderen Stadtteilen.

Basierend auf den Erkenntnissen des progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsprofils zeigt sich, dass von Stadtteil 1 ein besonderes Gefahrenpotential ausgeht. Zwar verfügen die KRITIS-Einrichtungen in Stadtteil 1 und 3 ab 17:00 Uhr über keine ausreichenden Bewältigungsressourcen mehr, die Vulnerabilitätswerte des Stadtteil 1 liegen jedoch vergleichsweise höher. Obwohl viele KRITIS-Einrichtungen ab 17:00 Uhr keinen kontinuierlichen Betrieb mehr sicherstellen können, sinkt ab diesem Zeitpunkt die Nachfrage. Im fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil zeigt sich, dass die Vulnerabilität bei allen Stadtteilen sinkt.

## **11.8 Fazit**

Anhand eines Demonstrationsbeispiels wurden geeignete Vulnerabilitätsaggregationen diskutiert. Schon die Ergebnisse einzelner Vulnerabilitätsaggregationen ermöglichen wertvolle Rückschlüsse über das Gefahrenpotential eines Stromausfalls. Das gewählte Beispiel zeigte, dass die Verwendung der Vulnerabilitätsaggregationen den Erkenntnisgewinn erheblich erweitert. Je nach Aggregationsverfahren sind statische, dynamische und raum-zeitliche Rückschlüsse über einzelne KRITIS-Einrichtungen, Mengen von KRITIS-Einrichtungen desselben Typs und Gebietskörperschaften möglich. Aufbauend auf diesen Ergebnissen lassen sich Gefahrenpotentiale entsprechend ihrer Dringlichkeit und ihrer Erheblichkeit differenzieren und Handlungsbedarf und Prioritäten erkennen. Der Einfluss einzelner KRITIS-Einrichtungen, aber auch der Menge von KRITIS-Einrichtungen desselben Typs, und der Gebietskörperschaften wird sowohl hinsichtlich der Zusammensetzung als auch hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Gefahrenpotentials deutlich.

## 12 Bewertung von Gefahrenpotentialen

Anhand der berechneten Aggregationen lassen sich weitere Bewertungen des Gefahrenpotentials vornehmen. Durch diese Bewertungen werden Gefahrenpotentiale identifiziert und deren Tragweite beurteilt, so dass ein erweitertes Verständnis der Stromausfallfolgen, die über die Ergebnisse der Vulnerabilitätsaggregationen hinaus gehen, möglich wird. Darüber hinaus ermöglichen die Bewertungen auch den Vergleich von verschiedenen Szenarien und Strategien und stellen zusätzliche Optionen zur Entscheidungsunterstützung dar. In diesem Kapitel wird die Bewertung anhand von

- Sensitivitätsanalysen,
- Vulnerabilitätsgradienten,
- szenariobasierten Resilienzwerten,
- Heat Maps für Standort- und Vulnerabilitätsdichten und
- schutzzielorientierten Bewertungen mithilfe Zielprogrammierung

erläutert. Dabei wird auf die Zielstellung und die Umsetzung der jeweiligen Bewertungen eingegangen. Anhand dieser Bewertungen können Gefahrenschwerpunkte und Prioritäten identifiziert werden. Die Erkenntnisse dienen dem Verständniserwerb über Steuergrößen, Priorisierung und Handlungsbedarf.

Erste Grundlagen zu Bewertung von Gefahrenpotentialen mithilfe szenariobasierter Resilienzwerte und schutzzielorientierte Bewertungen mithilfe Zielprogrammierung wurden bereits in Münzberg, Wiens, und Schultmann (2014b) diskutiert.

### 12.1 Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen sind Bestandteil multiattributiver Analysen (vgl. Abschnitt 6.2) und dienen der Quantifizierung von Modellunsicherheiten bei den verwendeten Gewichts- und Eingangswerten (Merz, 2011). Durch sie wird der Einfluss der u. a. aus der Subjektivität herrührenden Unschärfe von Gewichts- und Eingangswerten auf das schlussendliche Ergebnis analysiert. Eingangparameter und Gewichte, die entscheidende Treiber für ein Ergebnis sind, werden identifiziert. In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Varianten, wie bei multiattributiven Analysen Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können (u. a. Bertsch, 2008, Hyde, 2006). Die Wahl ist dabei abhängig vom Entscheidungsproblem, der Umsetzung der multiattributiven Analyse und der notwendigen Analysetiefe. Eine vorherrschende Variante einer Sensitivitätsanalyse besteht nicht.

Gerade weil indikatorenbasierte multiattributive Analysen kaum validiert werden können, geben Sensitivitätsanalysen Aufschluss über die Verlässlichkeit der Ergebnisse (Merz, 2011). Darüber hinaus bedarf es einer Sensitivitätsanalyse, wenn subjektive Beurteilungen in der Gewichtung und zur Operationalisierung von Eingangswerten angewendet wurden (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Durch Sensitivitätsanalysen erhöht sich für Entscheidungsträger die Transparenz und das Verständnis über die Zusammenhänge von Gewichten und Eingangswerten auf das Ergebnis. Gerade bei bestehenden

Unsicherheiten in subjektiven Bewertungsverfahren kann durch die Darstellung des Einflusses auf das Ergebnis eine für die Entscheidungsträger zufriedenstellende Lösung und ein tragfähiger Konsens gefunden werden. Sensitivitätsanalysen tragen daher zu einer höheren Akzeptanz der Ergebnisse bei.

Bei der vorgestellten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse werden subjektive Beurteilungsverfahren bei der Operationalisierung des Resistenzverlustes und der Gewichtung verwendet.

Wie in Abschnitt 10.5 aufgezeigt, wurde zur Operationalisierung des Resistenzverlustes eine Verbrauchsfunktion verwendet, die durch Entscheidungsträger abgeschätzt wurde. Inhärent kommt es dabei zu Abweichungen der Abschätzungen. Diese inhärente Unschärfe wurde durch Dezil-Verbrauchsfunktionen mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation in der Berechnung des Resistenzverlustes inkludiert. Das Ergebnis des Resistenzverlustes stellt sich so als Streuung dar, die sich aufgrund der abweichenden Abschätzungen der Entscheidungsträger herleitet. Da die Monte-Carlo-Simulation für die Bestimmung des Resistenzverlustes auch in der Berechnung der Vulnerabilitätsaggregationen angewendet werden kann, kann der Einfluss der abweichenden Abschätzungen auch im Ergebnis der jeweiligen Vulnerabilität dargestellt werden.

Zu Abweichungen durch eine Schätzung von Entscheidungsträgern kommt es auch bei der Bestimmung von Relevanzgewichten (vgl. Abschnitt 10.2). Auch hier können die unterschiedlichen Abschätzungen der Relevanzgewichte mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation in die Berechnung der Vulnerabilitätsaggregationen integriert werden, wodurch die Ergebnisse der Vulnerabilität als Streuung dargestellt werden.

Für die Gewichtung der Relevanz ist es für die Entscheidungsträger darüber hinaus von Interesse, wie stark der Einfluss der einzelnen Relevanzgewichte auf die Vulnerabilität ist. Es stellt sich die Frage, ob sich leichte Gewichtsverschiebungen übermäßig stark in einer Veränderung der Vulnerabilität niederschlagen. Eine Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss darüber, wie stabil das Ergebnis gegenüber Gewichtsänderungen ist.

Weitläufig werden hierzu Ergebnisse mit unterschiedlichen Gewichtswerten berechnet und als Sensitivitätsgraph dargestellt, in den der Einfluss der Gewichte auf das Ergebnis deutlich wird (u. a. Bertsch, 2008). Ein Sensitivitätsgraph gibt Aufschluss darüber, wie robust das Ergebnis gegenüber den gewählten Gewichten ist.

Durch die Verwendung von Monte-Carlo-Simulation können im Ergebnis der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse Streuungen dargestellt werden, die die Subjektivität der Beurteilungen des Relevanzgewichtes und des Resistenzverlustes berücksichtigen. Darüber hinaus wird durch einen Sensitivitätsgraphen der Einfluss der Relevanzgewichte auf die Vulnerabilität angezeigt.

## 12.2 Vulnerabilitätsgradient

Da die Versorgungsleistung und der Resistenzverlust einer KRITIS-Einrichtung zeitpunktabhängig sind und im Laufe eines Stromausfalls variieren, verändert sich ihre Vulnerabilität während eines Stromausfalls. Hierbei kann das Gefahrenpotential sowohl ansteigen, sinken oder gleichbleiben. Für die Entscheidungsunterstützung sind markante Ereignisse in den Verläufen relevant. Dabei wird zwischen Tipping Points und Plateaus unterschieden.

Umschlagpunkte, so genannte Tipping Points, kennzeichnen Ereignisse zwischen zwei Zeitpunkten, in denen sich die Situation schlagartig ändert. Dabei steigt entweder das Gefahrenpotential erheblich schnell

an, und es kommt plötzlich zu einer fortschreitenden Verschlechterung der Situation (regredierender Tipping Point), oder das Gefahrenpotential sinkt erheblich schnell, und es kommt zu einer plötzlichen Verbesserung der Situation (progredierender Tipping Point). Plateaus kennzeichnen Phasen im Verlauf eines Stromausfalls, in denen sich in einem verhältnismäßig langen Zeitraum keine markante Änderung des Gefahrenpotentials ergibt.

Zur Identifizierung von Tipping Points und Plateaus wird ein Vulnerabilitätsgradient genutzt, mit dem basierend auf fluktuierenden Vulnerabilitätsindizes zweier Zeitpunkte der Verlauf der Vulnerabilität bewertet wird. Die beiden Zeitpunkte markieren einen Zeitraum  $\Delta t_{TempThrea}$ , innerhalb dessen Veränderungen der Vulnerabilität entsprechend dem Reaktionsvermögen der Akteure als ausreichend zeitnah und unmittelbar betrachtet werden. Der Zeitraum muss hinreichend lang sein, dass Veränderungen wirksam werden können, und ausreichend kurz, dass im Hinblick auf die Veränderungen geeignete Maßnahmen noch ergriffen werden können. Im Hinblick auf die Durchführung möglicher Spontanmaßnahmen zur Beherrschung stromausfallbedingter Gefahren erscheint im Rahmen dieser Arbeit ein Zeitraum von vier Stunden als ausreichend ( $\Delta t_{TempThrea} = 240Min$ ).

Tipping Points und Plateaus werden geometrisch als Winkel bzw. auch als Ratio operationalisiert. Für jeden betrachteten Zeitpunkt wird der Vulnerabilitätsgradient  $TempThreat_q$  berechnet, anhand dessen ein auf den prognostizierten Verlauf der Vulnerabilität bewertetes Gefahrenpotential bewertet wird. Die Analyse erfolgt für einen Betrachtungszeitraum  $\Delta t_{TempThreat_q}$ , der sich aus einem Beginn  $t_{Begin}^{TempThreat_q}$ , einem Ende  $t_{End}^{TempThreat_q}$  und  $\Delta t_{TempThreat_q} = t_{End}^{TempThreat_q} - t_{Begin}^{TempThreat_q}$  ergibt. Der Vulnerabilitätsgradient  $TempThreat_q$  wird zwischen den beiden gewählten Zeitpunkten mit der Anstiegsfunktion

$$TempThreat_q = \frac{\sum_{i=1}^l FluctVuln_i \left( t_{Begin}^{TempThreat_q} \right)}{\sum_{i=1}^l FluctVuln_i \left( t_{End}^{TempThreat_q} \right)} \quad (12-1)$$

berechnet. Anhand dieses Anstieges wird geprüft, ob Kennwerte für einen Tipping Point oder ein Plateau zutreffen. Mit der Erfahrung bei der Interpretation von Vulnerabilitätsverläufen mehrerer realer Anwendungsbeispiele erschienen hierfür folgende Kennwerte als praktikabel, plausibel und zielführend:

$$TempThreat_q = \begin{cases} \text{progredierender Tipping Point} & \text{wenn } TempThreat_q \leq 0,5 \\ \text{regredierender Tipping Point} & \text{wenn } TempThreat_q \geq 2 \\ \text{Plateau} & \text{wenn } 0,88 \leq TempThreat_q \leq 1,1 \\ \text{irrelevant} & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Identifikation von Tipping Points und Plateaus ermöglicht ein verbessertes Verständnis über den Verlauf von Stromausfallwirkungen und der Bildung von Einsatzschwerpunkten anhand markanter Ereignisse. Werden progredierende Tipping Points rechtzeitig identifiziert, besteht in der akuten Krisenbewältigung die Chance, rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Auch in der Bedarfsplanung können Maßnahmen ergriffen werden, um eine Eskalation zu verhindern oder abzumindern bzw. eine Überbrückung bis zur Entlastung herbeizuführen. Regredierende Tipping Points leiten Phasen einer (vorübergehenden) Entspannung ein, in der sich mittelfristig auf eine ggf. spätere Eskalation eingerichtet werden kann. In Phasen von Plateaus findet weder eine wesentliche Verschlechterung noch eine wesentliche Verbesserung der Situation statt. In der Aktionsplanung kann sich daher darauf konzentriert werden, die Stromausfallfolgen zu reduzieren, ohne dass mittelfristig eine Eskalation zu erwarten ist.

## 12.3 Szenariobasierte Resilienzwerte

Mit der Berechnung von Resilienzwerten entsteht ein monokriterieller Wert, anhand dessen sich je nach verwendeter Vulnerabilitätsaggregation einzelne KRITIS-Einrichtungen, Stadtteile und Mengen von KRITIS-Einrichtungen desselben Typs untereinander vergleichen lassen. Hierdurch ist die Identifikation von Gefahrenschwerpunkten und Prioritäten möglich. Die Resilienzwerte beziehen sich jeweils auf ein Stromausfallszenario. Stromausfallszenarien lassen sich u. a. durch die Variation des Ausfallbeginns oder der gewählten Vorsorge- und Bewältigungsstrategien bilden. Mithilfe des Resilienzwertes lassen sie sich vergleichen.

Um die Resilienz eines Systems während eines Schadensereignisses zu quantifizieren, wird das Integral einer Zeitfunktion berechnet, die den sich verändernden Leistungsverlauf des Systems kennzeichnet (vgl. Abschnitt 5.2). Zur szenariobasierten Resilienzwertberechnung wird das Integral eines inversen Vulnerabilitätsprofils eines Stromausfallszenarios als relatives Maß für die Resilienz verwendet (Abbildung 12.1). Je größer die inverse Fläche des Vulnerabilitätsprofils im betrachteten Szenario ist, desto leistungsfähiger werden die Wirkungen eines Stromausfalls minimiert. Die Fläche stellt damit ein Maß für die Resilienz dar und nimmt einen Wert zwischen null und eins an.

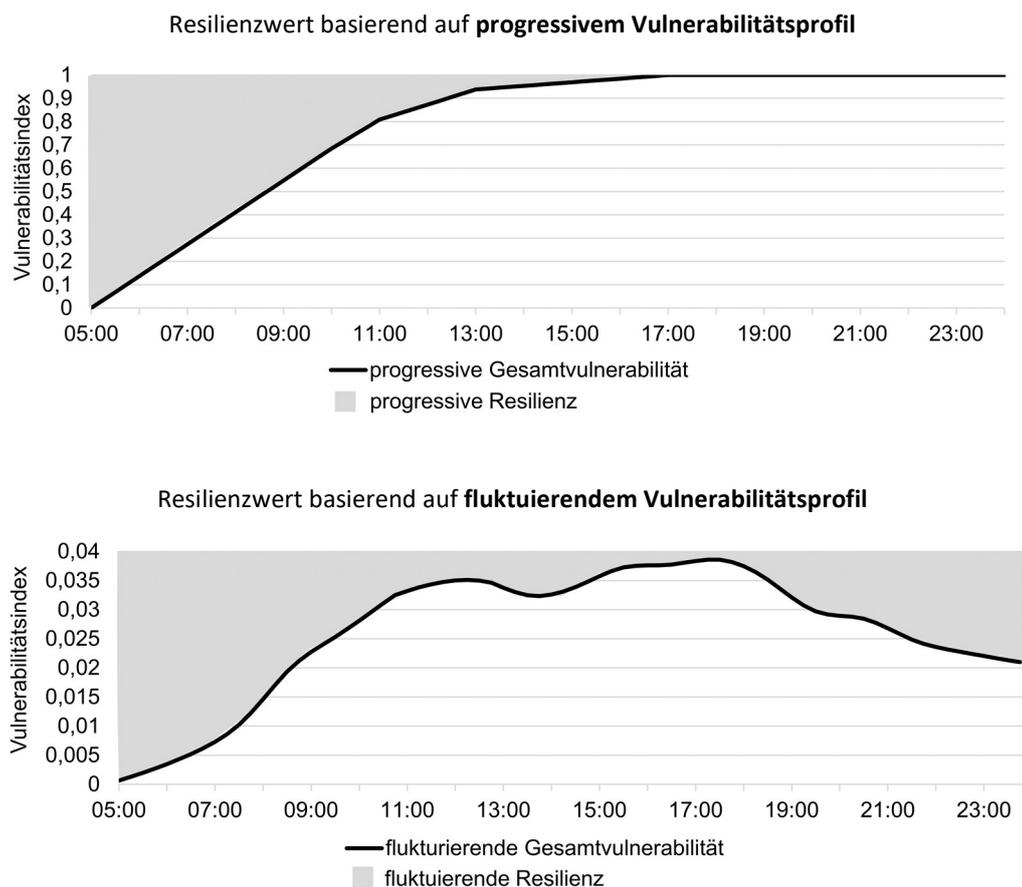


Abbildung 12.1: Resilienzwerte basierend auf dem progressiven und fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil.

Der Resilienzwert kann sowohl aus dem progressiven Vulnerabilitätsprofil als auch aus dem fluktuierenden Vulnerabilitätsprofil einer KRITIS-Einrichtung, eines Gebietes oder einer Menge an KRITIS-Einrichtungen desselben Typs abgeleitet werden. Entsprechend wird zwischen einem progressiven Resilienzwert  $ProgResilience(scen_\alpha)$  und einem fluktuierenden Resilienzwert  $FluctResilience(scen_\alpha)$  für ein Szenario  $\alpha$  unterschieden.

Zur Berechnung des Resilienzwertes muss zunächst ein geeigneter Vulnerabilitätsreferenzwert  $RefVuln$  festgelegt werden. Geeignet erscheint unter anderem der Wert des größten Elements aus der Menge aller Vulnerabilitätswerte.

Um Szenarien zu vergleichen, wird für jedes Szenario ein so genannter globaler Resilienzwert  $Resilience^{global}(scen_\alpha)$  berechnet, der sich aus den Vulnerabilitätsprofilen aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen herleitet. Die Abbildung 12.1 zeigt anhand eines fiktiven Stromausfallszenarios ( $\alpha = 1$ ) die Verläufe der progressiven und fluktuierenden Gesamtvulnerabilität sowie die jeweilige Resilienz. Der fiktive Stromausfall beginnt um 5:00 Uhr morgens, dauert mit  $\Delta t_{Outage}^{Calc} = 1140$  Min bis Mitternacht an. Für die Bewertung des Resilienzwertes werden  $\Delta t_{dist} = 15$  Min und  $RefVuln = 0,04$  festgelegt.

Der globale und der progressive Resilienzwert  $ProgResilience^{global}(scen_\alpha)$  eines Szenarios  $scen_\alpha$  berechnet sich aus den progressiven Vulnerabilitätsprofilen aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen:

$$ProgResilience^{global}(scen_\alpha) = \frac{\left(\frac{\Delta t_{Outage}^{Calc}}{\Delta t_{dist}} + 1\right) * RefVuln - \int_{t_0}^{t_{Calc}} \sum_1^l ProgessVuln_i(t_{out}) dt}{\frac{\Delta t_{Outage}^{Calc}}{\Delta t_{dist}} + 1} \quad (12-2)$$

Der globale und der fluktuierende Resilienzwert  $FluctResilience^{global}(scen_\alpha)$  eines Szenarios  $scen_\alpha$  berechnet sich aus den fluktuierenden Vulnerabilitätsprofilen aller berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen:

$$FluctResilience^{global}(scen_\alpha) = \frac{\left(\frac{\Delta t_{Outage}^{Calc}}{\Delta t_{dist}} + 1\right) * RefVuln - \int_{t_0}^{t_{Calc}} \sum_1^l FluctVuln_i(t_{out}) dt}{\left(\frac{\Delta t_{Outage}^{Calc}}{\Delta t_{dist}} + 1\right) * RefVuln} \quad (12-3)$$

Mit der Berechnung von Resilienzwerten lassen sich die Verläufe der Vulnerabilität anhand eines monokriteriellen Wertes vergleichen. Innerhalb eines Szenarios können je nach verwendetem Vulnerabilitätsprofil KRITIS-Einrichtungen, Mengen von KRITIS-Einrichtungen desselben Typs und Gebiete miteinander verglichen werden. Anhand des jeweiligen Resilienzwertes können Einsatzschwerpunkte identifiziert werden und entsprechende Rankings nach Gefahrenpotential abgeleitet werden. Hierdurch sind diskriminierende Abschaltungen oder prioritäre Versorgungen anhand eines objektiven Maßes möglich (vgl. Abschnitte 4.2.5, 4.2.6, 4.8 und 7.1).

Bei Vergleichen von mehreren Szenarios wird je nach variierten Parametern entweder die Stromausfallwirkung oder die Wirkung der Bewältigungsfähigkeit verglichen. Mit einem Vergleich der Stromausfallwirkung lassen sich der schwerwiegendste und der mildeste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls identifizieren. Hierzu wird lediglich der Ausfallbeginn eines Bemessungsstromausfalls bei

gleichbleibenden betroffenen KRITIS-Einrichtungen und gleichbleibender Ausfalldauer variiert. Bei der Variation der Zeitpunkte des Ausfallbeginns variieren Typtag wie Werkstage, Samstage, Sonntage, Uhrzeiten und Jahreszeiten. Anhand der berechneten Resilienzwerte wird das Stromausfallszenario mit den gravierendsten und den mildesten Wirkungen abgeleitet. Entsprechend ist der schwerwiegendste und mildeste Ausfallbeginn identifizierbar.

Werden verschiedene Vorsorge- und Bewältigungsstrategien gebildet, und die Bewältigungsfähigkeit der betrachteten KRITIS-Einrichtungen variiert, können die so generierten Szenarien hinsichtlich der Wirkung der Bewältigungsfähigkeit miteinander verglichen werden. Hierdurch lässt sich die Effektivität der Vorsorge- und Bewältigungsstrategien abbilden.

## 12.4 Heat Maps für Standort- und Vulnerabilitätsdichten

Heat Maps werden für die Darstellung von Standort- und Vulnerabilitätsdichten verwendet. Eine Heat Map ist eine Visualisierungsmethode zur schnellen intuitiven und markanten Erfassung geographischer Cluster eines Phänomens. Die Darstellung erfolgt in der Regel zweidimensional mithilfe von Farbgradienten. Heat Maps können im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse zur Darstellung der Standort- und der Vulnerabilitätsdichte genutzt werden.

Eine Heat Map der Standortdichte in einer Gebietskörperschaft zeigt die zeitpunktunabhängige räumliche Standortkonzentration von KRITIS-Einrichtungen. Hierbei wird der Standort der KRITIS-Einrichtungen berücksichtigt. Orte mit höherer räumlicher Konzentration von KRITIS-Einrichtungen werden in einer Heat Map markanter dargestellt. Basis dieser Darstellung ist die Punktdichte der Standorte.

Eine Heat Map der Vulnerabilitätsdichte einer Gebietskörperschaft zeigt die zeitpunktunabhängige räumliche Konzentration von KRITIS-Einrichtungen entsprechend den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse. Dabei wird nicht nur der Standort der Einrichtungen berücksichtigt, sondern auch der inverse Resilienzwert, als eine Variation eines statischen Vulnerabilitätswertes, der einzelnen KRITIS-Einrichtungen. Orte mit entsprechend hoher räumlicher Konzentration von KRITIS-Einrichtungen, die zudem einen hohen inversen Resilienzwert aufweisen, werden in einer Heat Map markanter dargestellt. Zur Darstellung derartiger Heat Maps wird eine Kerndichte verwendet.

Eine Heat Map der Vulnerabilitätsdichte zeigt das räumliche Gefahrenpotential unabhängig von gewählten Grenzen einer Gebietskörperschaft. Hierdurch können sich neue Erkenntniszusammenhänge über die Verortung von Gefahrenpotentialen ergeben, die evtl. mit einer räumlichen Darstellung anhand der Grenzen von Gebietskörperschaften verborgen bleiben würden. Häufig ergibt sich aus einer verhältnismäßig hohen Standortdichte kein Gefahrenpotential. Die Gegenüberstellung einer Heat Map der Standortdichte und einer Heat Map der Vulnerabilitätsdichte verdeutlicht, inwieweit sich aus der Anzahl von KRITIS-Einrichtungen in einem Gebiet ein Gefahrenpotential ableiten lässt.

## 12.5 Schutzzielorientierte Bewertung mithilfe Zielprogrammierung

Wie in den Abschnitten 4.7.3, 4.7.4 und 6.3 erörtert, gibt es bisher kein Verfahren, mit dem auf Basis der Ergebnisse einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse eine schutzzielorientierte Bewertung von verschiedenen Szenarien oder Schutzstrategien möglich ist. Zur Lösung dieser Problemstellung wird eine modifizierte Zielprogrammierung vorgestellt. Hierzu werden zunächst mögliche Maße und Metriken von Schutzniveaus erläutert. Anschließend erfolgt die formale Darstellung der schutzzielorientierten Bewertung mithilfe einer modifizierten Zielprogrammierung.

Die schutzzielorientierte Bewertung von Vorsorge- und Bewältigungsstrategien basiert auf der Messung von Abweichungen zwischen den berechneten Ergebnissen der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse und der vordefinierten Schutzziele bzw. Schutzniveaus. Diese Abweichungen werden durch Abstandsmessungen operationalisiert. Schutzziele bzw. Schutzniveaus sind zeitpunktabhängige Schutzansprüche, die eine ausreichende Versorgung der Bevölkerung während eines Stromausfalls kennzeichnen. Die Zielerreichung verdeutlicht die Wirksamkeit von Vorsorge- und Bewältigungsstrategien.

Im Unterschied zur konservativen Zielprogrammierung (vgl. Abschnitt 6.3) liegt eine Zielerreichung im vorliegenden Fall vor, wenn der Schutzanspruch unterschritten wird. Der Schutzanspruch kann z. B. eine bestimmte Höhe eines Performanzverlaufs (Abbildung 12.2) oder eines Vulnerabilitätsprofils (Abbildung 12.3) kennzeichnen. Je höher die gewünschte Unterschreitung ist, desto besser ist die Zielerreichung. Je größer der nicht gewünschte Abstand zum Schutzniveau ist, desto schlechter ist die Zielerreichung.

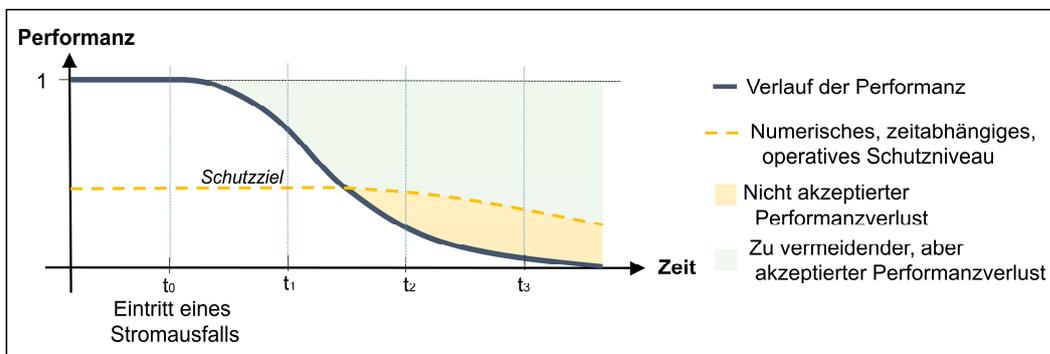


Abbildung 12.2: Schutzzielorientierte Bewertung eines Performanzverlaufs.

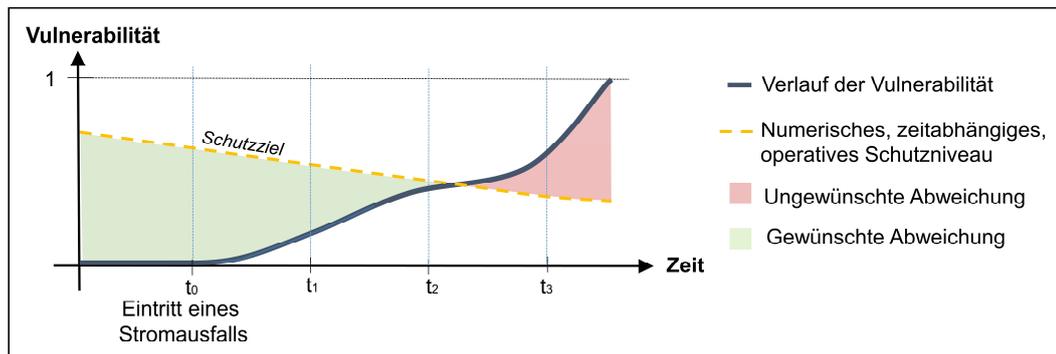


Abbildung 12.3: Schutzzielorientierte Bewertung eines Vulnerabilitätsprofils.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Schutzniveaus als ein numerisches, zeitabhängiges und operativ messbares Akzeptanzniveau einer Vulnerabilitätsausprägung verstanden. Sie kennzeichnen hinsichtlich einer lebensnotwendigen Versorgung der Bevölkerung das maximal noch akzeptierbare Niveau, was als Minimalversorgung zu verstehen ist (vgl. Abschnitt 4.7.3). Ein weiterer Unterschied zu einer konservativen Zielprogrammierung liegt in der Verwendung zweckgebundener Schutzziele. Da die Gefahr einer Unterversorgung abhängig ist von einzelnen KRITIS-Einrichtungen, erscheint es geeignet, zumindest für jeden berücksichtigten KRITIS-Typ ein spezifisches Schutzziel zu definieren. Diese Zweckbindung bezieht sich entweder auf die einzelnen KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs (infrastrukturzeitliche Schutzziele) oder auf die Menge aller KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs (raumzeitliche Schutzziele).

Für jedes Schutzziel können unterschiedliche Metriken gewählt werden. Die Wahl der geeigneten Metrik leitet sich aus dem gewählten Festlegungsverfahren her. Zur Durchführung von Abstandsmessungen müssen das Schutzniveau und das Ergebnis einer Vulnerabilitätsanalyse, auf das sich das Schutzniveau bezieht, gleichartig sein. Gleichwohl die Form der Schutzniveaus abhängig ist vom Analysezweck, kann sie entsprechend der möglichen Ergebnismetriken vielfältig gestaltet sein. Die gewählte Metrik ist innerhalb einer Analyse einheitlich anzuwenden.

In Anlehnung an die etablierte Zielformulierung im Management (vgl. Doran, 1981) lassen sich grundsätzliche Anforderungen auch auf die Formulierung von Schutzniveaus ableiten. Demnach sind sie spezifisch, objektiv, geeignet, realistisch und zeitlich referenziert zu gestalten. Im vorliegenden Zusammenhang sind Schutzzielniveaus spezifisch formuliert, wenn ihre Geltung abgrenzbar und ggf. objektscharf die zu analysierenden KRITIS-Einrichtungen adressieren. Die Formulierung ist objektiv, wenn die Zielerreichung in unzweifelhafter und unabhängiger Weise anhand von Tatsachen unter Verwendung der gewählten Vulnerabilitätsmessung operationalisierbar ist. Die Geeignetheit einer Formulierung liegt vor, wenn durch die anvisierte Zielerreichung der übergeordnete Zweck des Schutzziels erreicht wird. Schutzzielformulierungen sind zeitlich referenziert, wenn aus ihnen konkrete Zeitpunkte zur Zielerreichung hervorgehen.

Hinsichtlich dieser Anforderung erscheint für die Formulierung von Schutzniveaus die Verwendung der Metrik der ungewichteten progressiven Vulnerabilitätsprofile von einzelnen KRITIS-Einrichtungen bzw. KRITIS-Typen geeignet (vgl. Kapitel 11). Sie berücksichtigen keine Fluktuation durch die Tageszeit, so dass die Aufrechterhaltung eines kontinuierlichen Betriebes über die Ausfalldauer betrachtet werden kann.

Anhand eines morphologischen Kastens bietet die Tabelle 13 einen Überblick über mögliche Maße und Metriken der Schutzzielformulierung.

Tabelle 13: Morphologischer Kasten mit möglichen Maßen und Metriken der Schutzzielformulierung.

Ausprägung	Variationen		
Adressat	Infrastrukturzeitliche Schutzziele (einzelne KRITIS-Einrichtungen eines KRITIS-Typs)	Raumzeitliche Schutzziele (Menge aller KRITIS-Einrichtungen eines KRITIS-Typs)	
Zeitliche Differenzierung	Vorgegebene Werte für alle Zeitpunkte einer Zeitreihe	Vorgegebene Werte für ausgewählte Zeitpunkte	Funktion für ausgewählte Zeitpunkte
Zeitliche Variabilität bezüglich der Ausfalldauer	Variabel über die gesamte Bemessungsdauer	Gleichbleibende Niveaus über Teile der Bemessungsdauer	Gleichbleibendes Niveau über die gesamte Bemessungsdauer
Zeitliche Variabilität bezüglich des Tageszeitpunktes	Tageszeitpunktunabhängig (bzw. unabhängig von der Versorgungsleistung)		Tageszeitpunktabhängig (bzw. abhängig von der Versorgungsleistung)
Zielkombination	Einzelzielniveau (Einzelnes Maß für ein Schutzziel)	Mehrzielniveau (Mehrere Maße für ein Schutzziel)	
Erreichungsgrad	Vollumfänglich		Teilerreichungsbasiert

Die Schutzzielformulierung kann infrastrukturzeitlich auf einzelne KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs oder raumzeitlich auf die Menge aller KRITIS-Einrichtungen eines bestimmten KRITIS-Typs ausgerichtet sein (Abbildung 12.4).

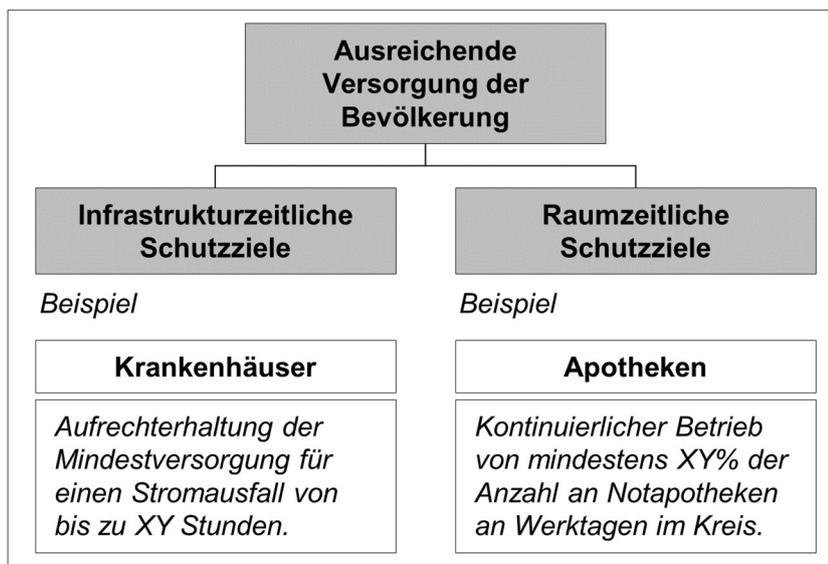


Abbildung 12.4: Beispiele für eine infrastrukturzeitliche und raumzeitliche Schutzzielformulierung.

Infrastrukturzeitliche Schutzziele sind objektspezifisch und beziehen sich auf eine bestimmte KRITIS-Einrichtung wie z. B. Krankenhäuser, deren Ausfall ein hohes Gefahrenpotential in sich trägt. Derartig formulierte Schutzziele zeigen auf, welche Höhe an Vulnerabilität der einzelnen Einrichtung noch vertretbar ist. In der Regel basiert das Schutzniveau auf die zu erreichende Mindestversorgung einer Einrichtung, durch die Gefährdungen ausgeschlossen werden können. Durch eine Zielkombination können einzelne Leistungs- und Prozessbereiche einer Einrichtung differenziert betrachtet werden.

Raumzeitliche Schutzzielformulierungen beziehen sich auf eine bestimmte Menge von KRITIS-Einrichtungen in einem Landkreis oder einer kreisfreien Stadt, die demselben KRITIS-Typ angehören. Das Schutzniveau bezieht sich dabei nicht auf eine einzelne KRITIS-Einrichtung, sondern auf die ausreichende Versorgung aller KRITIS-Einrichtungen desselben Typs in der Gebietskörperschaft. So hat z. B. der Ausfall einer einzelnen Apotheke in der Regel keine bevölkerungsschutzrelevante Auswirkung auf die Versorgung der Bevölkerung. Eine kleine Anzahl von Notapotheken ist ausreichend, um zeitlich befristet eine ausreichende Versorgung mit Medikamenten sicherzustellen. Fallen mehr als diese Anzahl an Apotheken aus, kann eine Gefährdung der Medikamentenversorgung unterstellt werden. Aus solchen Abwägungen lassen sich Schutzniveaus herleiten.

Ein Schutzziel kann abhängig oder unabhängig vom Tageszeitpunkt sein. Liegt eine Abhängigkeit vor, ist es zu koppeln an die tageszeitpunktabhängige Versorgungsleistung. Des Weiteren können über die Dauer eines Stromausfalls gleichbleibende oder von der Dauer abhängige Schutzniveaus gebildet werden. Auch eine Kombination ist möglich.

Ein Schutzziel kann darüber hinaus differenziert werden nach dessen Erreichungsgrad, welcher ausdrückt, wie umfänglich ein Schutzniveau zu erfüllen ist, um ein Schutzziel zu erreichen. Durch die Festlegung eines Erreichungsgrades reicht es zur Erfüllung eines Schutzzieles auch aus, wenn ein Teil der KRITIS-Einrichtungen eines KRITIS-Typs das Schutzniveau erreichen.

Mithilfe einer modifizierten Zielprogrammierung wird die Zielerreichung bewertet. Dabei werden zunächst Abstandsmaße einzelner Schutzziele berechnet. Unter Verwendung dieser Abstandsmaße erfolgt eine Bewertung der Zielerreichung in einem Szenario. Abweichend vom üblichen Zweck der Zielprogrammierung wird die Zielprogrammierung nicht zur Optimierung, sondern zur Bewertung der Zielerreichung und -abweichung verwendet.

Zur Bewertung der Zielerreichung einzelner Schutzziele wird basierend auf dem konservativen Vorgehen einer Zielprogrammierung

- eine Metrik und das Schutzniveau festgelegt,
- die gewünschten und unerwünschten Abstände zwischen den berechneten Vulnerabilitätswerten und den Schutzniveaus gemessen,
- eine Funktion formuliert, in der die Abstandswerte geeignet normalisiert werden, und
- die Ergebnisse in Form von Abstandsmaßen visualisiert.

Wie gut ein Schutzniveau in einem Zeitpunkt  $t_{out}$  unterschritten wird, bemisst sich am Abstand zwischen dem zu vergleichenden Wert  $CompVal_u(t_{out})$  und dem festgelegten Schutzzielniveau  $ProtObj_u(t_{out})$ .  $CompVal_u(t_{out})$  und  $ProtObj_u(t_{out})$  beziehen sich auf denselben KRITIS-Typ  $u$  und haben dieselbe Met-

rik.  $CompVal_u(t_{out})$  ist ein für die schutzzielorientierte Bewertung geeignetes Ergebnis einer Vulnerabilitätsaggregation.  $ProtObj_u(t_{out})$  ist ein Wert des Schutzniveaus, der durch ein vorhergehend durchzuführendes Verfahren bestimmt wurde und den Anforderungen an die Festlegung von Schutzzielniveaus entsprechend die gleiche Einheit wie  $CompVal_u(t_{out})$  aufweist.

Die positiven und die negativen Abweichungen vom Anspruchsniveau sind nicht wie in einer üblichen Zielprogrammierung gleichartig unerwünscht. Vielmehr besteht eine gewünschte Unterschreitung des Schutzzielniveaus. Eine Überschreitung ist unerwünscht.

Bei der Verwendung von KRITIS-Typ-spezifischen Schutzzielen wird für die Abstandsmessung ein KRITIS-Typ-spezifisches Abstandsmaß  $Dev_u^{[-1,1]}(t_{out})$  verwendet. Das ungewichtete Abstandsmaß  $Dev_u^{[-1,1]}(t_{out})$  bemisst die Zielerreichung für den Zeitpunkt  $t_{out}$  und den KRITIS-Typ  $v$  auf einer Skala zwischen -1 und 1. Hierdurch ist innerhalb eines KRITIS-Typs eine Vergleichbarkeit der Zielerreichung zwischen verschiedenen Zeitpunkten und KRITIS-Typen möglich. Erwünschte Abweichungen ( $ProtObj_u(t_{out}) - CompVal_u(t_{out}) \geq 0$ ) und unerwünschte Abweichungen ( $(ProtObj_u(t_{out}) - CompVal_u(t_{out})) < 0$ ) vom Schutzzielniveau werden anschließend normalisiert. Je nach gewünschter oder unerwünschter Abweichung zeigt das ungewichtete Abstandsmaß den Grad der gewünschten normalisierten Abweichung  $dev_u^{des}$  im Wertebereich zwischen 0 und 1 oder den Grad der unerwünschten normalisierten Abweichung  $dev_u^{undes}$  im Wertebereich zwischen -1 und 0:

$$Dev_u^{[-1,1]}(t_{out}) = \begin{cases} dev_u^{des} & \text{wenn } (ProtObj_u(t_{out}) - CompVal_u(t_{out})) \geq 0 \\ dev_u^{undes} & \text{wenn } (ProtObj_u(t_{out}) - CompVal_u(t_{out})) < 0 \end{cases} \quad (12-4)$$

mit

$$dev_u^{des} = \frac{1 - CompVal_u(t_{out})}{ProtObj_u(t_{out})} \quad (12-5)$$

und

$$dev_u^{undes} = \frac{ProtObj_u(t_{out}) - CompVal_u(t_{out})}{1 - ProtObj_u(t_{out})} \quad (12-6)$$

Auf den Ergebnissen dieser Abstandsmaße für einzelne Schutzziele baut sich eine ganzheitliche Bewertung der Zielerreichung auf. Die Bewertung basiert auf ein Zielerreichungsmaß. Je höher das Zielerreichungsmaß ist, desto besser wird das Schutzzielniveau erfüllt. Zur Berechnung eines zeitpunktabhängigen Zielerreichungsmaßes sind

- erwünschte und unerwünschte Abstandsmaße für einzelne Schutzziele zu ermitteln,
- Abstandsgewichtswerte und Zeitpunktgewichte festzulegen und
- eine Zielerreichungsfunktion aufzustellen.

Aus den erwünschten und unerwünschten Abstandsmaßen und Abstandsgewichten wird ein Zielerreichungsmaß  $WeightDev_u^{[0,1]}(t_{out})$  berechnet. Das Zielerreichungsmaß ist zeitpunktabhängig und spezifisch für einen Zeitpunkt  $t_{out}$  und einem KRITIS-Typ  $u$ . Die Abstandsgewichte  $w_{desDev}$  und  $w_{undesDev}$  sind einzuführen, wenn Entscheidungsträger die erwünschten und unerwünschten Abstandsmaße in ihrer Bedeutung unterschiedlich bewerten. Es gilt  $w_{desDev} + w_{undesDev} = 1$ . Um die Bedingung der Zielprogram-

mierung zu erfüllen, dass Abweichungen keine negativen Werte annehmen dürfen, wird jeweils der Betrag der unerwünschten normalisierten Abweichungen verwendet. Da eine Unterschreitung des Schutzniveaus gewünscht ist, wird das entsprechende Abstandsmaß invers berücksichtigt. Das gewichtete und zeitpunktabhängige Zielerreichungsmaß berechnet sich aus:

$$WeightDev_u^{[0,1]}(t_{out}) = w_{desDev} * dev_u^{des} + w_{undesDev} * (1 - |dev_u^{undes}|) \quad (12-7)$$

Des Weiteren werden Zeitpunktgewichte  $w_{(t_{out})}$  für einzelne Zielerreichungsmaße  $WeightDev_u^{[0,1]}(t_{out})$  verwendet, um die zeitliche Dimension einer Zielerreichung zu berücksichtigen. Dabei gilt  $\sum_{1=t_0}^{t_{out}} w_{(t_{out})} = 1$ . Die Summe aller gewichteten zeitpunktabhängigen Zielerreichungsmaße der berücksichtigten Zeitpunkte ergibt ein statisches Zielerreichungsmaß  $WeightDev_u^{[0,1]}_{static}$ :

$$WeightDev_u^{[0,1]}_{static} = \sum_{1=t_0}^{t_{out}} w_{(t_{out})} * WeightDev_u^{[0,1]}(t_{out}) \quad (12-8)$$

Anschließend werden alle statischen Zielerreichungsmaße mit dem jeweiligen KRITIS-Typ-spezifischen Relevanzgewicht gewichtet und zu einer aggregierten Zielerreichung eines Szenarios  $Dev_{Scen}$  aggregiert:

$$Dev_{Scen} = \sum_{1=u}^h w_u^{Relev} * WeightDev_u^{[0,1]}_{static} \quad (12-9)$$

Mit der aggregierten Zielerreichung eines Szenarios  $Dev_{Scen}$  können sowohl Vorsorge- und Bewältigungsstrategien als auch eine schutzzielorientierte Auswahl von Gebietskörperschaften für eine priorisierte Versorgung bei Lastreduzierungen oder Netzinselbetrieben vorgenommen werden. In beiden Anwendungsfällen werden konstruierte Szenarien anhand eines Basiszenarios mithilfe eines monokriteriellen Wertes hinsichtlich ihrer Schutzgüte bewertet und verglichen.

## 12.6 Fazit

In diesem Kapitel wurden Bewertungen des Gefahrenpotentials vorgestellt, die über die Ergebnisse der Vulnerabilitätsaggregationen hinaus einen Erkenntnisgewinn ermöglichen. Anhand von Sensitivitätsanalysen wird der Einfluss der sich durch die subjektive Abschätzung der Relevanzgewichte und des Resistenzverlustes ergebende Streuung im Ergebnis der Vulnerabilität quantifiziert. Vulnerabilitätsgradienten dienen der Identifikation markanter Ereignisse im Verlauf von Stromausfallwirkungen. Hierdurch lassen sich Tipping Points und Plateaus erkennen und beurteilen, wodurch eine verbesserte Planung der umzusetzenden Maßnahmen erfolgt. Mithilfe szenariobasierter Resilienzwerte lassen sich Vorsorge- und Bewältigungsstrategien hinsichtlich der Wirkung der Bewältigungsfähigkeit vergleichen. Darüber hinaus sind Szenariovergleiche möglich, wodurch für einen Bemessungsstromausfall der schwerwiegendste und der mildeste Ausfallbeginn identifiziert wird. Heat Maps zeigen Standort- und Vulnerabilitätsdichten von KRITIS-Einrichtungen unabhängig von gewählten Grenzen einer Gebietskörperschaft an. Bei der schutzzielorientierten Bewertung werden Vorsorge- und Bewältigungsstrategien durch eine modifizierte Zielprogrammierung hinsichtlich ihrer Schutzgüte bewertet und verglichen. Die Bewertungen ermöglichen einen Erkenntnis- und Verständnisgewinn. Sie zeigen Gefahrenschwerpunkte, Steuergrößen und Handlungsbedarf auf.

## 13 Anwendungsfälle

Um die Praktikabilität, den potentialen Erkenntnisgewinn und die Grenzen des vorgestellten Analyseverfahrens zu demonstrieren, wird in diesem Kapitel die vorgestellte Methodik unter Verwendung realitätsnaher Daten auf die beiden baden-württembergischen Stadtkreise Mannheim und Karlsruhe angewendet.

Zunächst wird hierfür die gewählte Grundkonfiguration festgelegt. Im Anschluss erfolgt die Anwendung des Analyseverfahrens. Es werden jeweils Ergebnisse verschiedener Aggregationsverfahren dargestellt und diskutiert. Zur Übersichtlichkeit wird bei beiden Anwendungsfällen die gleiche Struktur der Ergebnisdarstellung gewählt, gleichwohl je nach Zweck darüberhinausgehende Darstellungen und weitere Detaildarstellungen möglich sind.

### 13.1 Grundkonfiguration

Um die vorgestellte Vulnerabilitätsanalyse auf die Stadtkreise Karlsruhe und Mannheim anzuwenden, ist zunächst eine Grundkonfiguration der Vulnerabilitätsanalyse zu bestimmen. Im Rahmen der Demonstration werden zur Sicherstellung der Übersichtlichkeit der Anwendungsfälle für beide Stadtkreise weitestgehend ähnliche Grundkonfigurationen gewählt. Bei der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse in (i) der Gefahrenabwehrplanung oder bei (ii) einer akuten Krisenbewältigung wird diese Konfiguration von den Entscheidungsträgern unter Berücksichtigung der jeweiligen Umstände vorgenommen. Spätere Änderungen der Grundkonfiguration sind von Anwendern nach Bedarf und Datenverfügbarkeit jederzeit möglich. Je nach Ergebnissen und Umständen kann eine Änderung in einem interaktiven Verfahren geboten sein.

In beiden Anwendungsfällen werden ausgewählte KRITIS-Typen betrachtet. Die Auswahl der KRITIS-Typen beschränkt sich zur Demonstration vornehmlich auf Einrichtungen des Gesundheitssektors sowie der Berücksichtigung der Bevölkerung in Form von Haushalten. Tabelle 14 zeigt die ausgewählten KRITIS-Typen in beiden Anwendungsfällen.

Tabelle 14: Übersicht über die berücksichtigten KRITIS-Typen in den Anwendungsfällen.

Nr.	Anwendungsfall Karlsruhe	Anwendungsfall Mannheim
1	<i>Krankenhäuser</i>	<i>Krankenhäuser</i>
2	<i>Hausärzte</i>	<i>Hausärzte</i>
3	<i>Apotheken</i>	<i>Apotheken</i>
4	<i>Dialysekliniken</i>	<i>Dialysekliniken</i>
5	<i>Alten-/Pflegeeinrichtungen</i>	<i>Alten-/Pflegeeinrichtungen</i>
6	<i>Trinkwassereinrichtungen</i>	<i>Betreutes Wohnen</i>
7	<i>Haushalte</i>	<i>Haushalte</i>

Die Auflösung der räumlichen Wirkungen erfolgt anhand der Grenzen der jeweiligen Stadtteile (Karlsruhe) bzw. Stadtbezirke (Mannheim). Im Rahmen der Analyse für einen Lastabwurf wird davon ausgegangen, dass diese Grenzen auch die Grenzen von fernschaltbaren Umspannwerkbezirken abbilden.

Bei der Bestimmung der Relevanzgewichtung im Rahmen des modifizierten Delphi-Verfahrens ist die Konsensfindung durch die örtlich zuständigen Entscheidungsträger für die Demonstration nicht zwingend erforderlich. Für die Demonstration ist es ausreichend, wenn erste vorläufige Analyseergebnisse mithilfe der Mittelwerte und der Streuungen der aus der ersten Runde des Delphi-Verfahrens bestimmten Relevanzgewichte verwendet werden. Für den Indikator des Leistungsvermögens wird für jeden KRITIS-Typ jeweils ein linear normalisiertes Vergleichsattribut entsprechend der Tabelle 8 verwendet. Für den Indikator Versorgungsleistung werden linear normalisierte Standardlastprofile der BDEW (VDN, 2007c) verwendet. Aufgrund des unverhältnismäßigen Aufwands und des beschränkten Erkenntnisgewinns wird auf die Berücksichtigung eines Leistungsverlustes und eines Teilleistungserhalts verzichtet (vgl. Abschnitt 9.5). Der Indikator des Resistenzverlustes basiert auf dem Mittelwert des in einem Expertenworkshop ermittelten Vulnerabilitätsanstiegs. In beiden Anwendungsfällen wird vereinfachend angenommen, dass Haushalte über keine Bewältigungsressourcen verfügen.

Im Analyseverfahren werden Tipping Points und Plateaus identifiziert (vgl. Abschnitt 12.2). Für die Demonstration wird ein Betrachtungszeitraum von vier Stunden gewählt. Dieser Zeitraum erscheint hinreichend lang, dass Veränderungen wirksam werden und ausreichend kurz, dass im Hinblick der Veränderungen geeignete Maßnahmen ergriffen werden können. Des Weiteren wird festgelegt, dass eine wesentliche Änderung vorliegt, wenn für einen Zeitpunkt ein Vulnerabilitätsgradient von unter 0,5 vorliegt. Liegt der Vulnerabilitätsgradient für einen Zeitpunkt zwischen 0,88 und 1,1, liegt ein Plateau vor.

In beiden Anwendungsfällen werden ausgewählte Aggregationen dargestellt und diskutiert. Hierbei werden zunächst Berechnungen von scharfen Werten auf Basis der gewählten Grundkonfiguration durchgeführt. Anschließend werden die ermittelten Parameterunschärfen bei der Abschätzung der Relevanzgewichte und beim Indikator des Resistenzverlustes mithilfe der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt. Bei jeder Monte-Carlo-Simulation werden 10.000 Simulationsdurchläufe durchgeführt. Die so berechneten Ergebnisstreuungen werden dargestellt und diskutiert.

Mit der Veröffentlichung der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse gehen mögliche nachteilige Wirkungen auf die öffentliche Sicherheit und auf die betrieblichen Interessen einher. Die Ziele der Veröffentlichung sind hinsichtlich dieser nachteiligen Wirkungen abzuwägen. Entsprechend dieser Sicherheitsabwägungen werden die vollständigen und zutreffenden Ergebnisse basierend auf Daten, die den tatsächlichen Sachverhalt wiedergeben, in Absprache mit den zuständigen Stellen in diesem Kapitel nur beschränkt und in verzerrter Weise öffentlich gemacht. Gleichwohl umfassendere Ergebnisse und Erkenntnisse über Tatsachen vorliegen, werden deswegen nur Ausschnitte einer vollständigen Analyse und ausgewählte KRITIS-Einrichtungen, die so nicht den Tatsachen entsprechen, dargestellt.

Zur Durchführung der Vulnerabilitätsanalysen wurden KRITIS-Kataster verwendet, deren Inhalte weitestgehend den Tatsachen entsprechen, soweit diese Informationen auch durch einen zumutbaren Aufwand mithilfe öffentlich zugänglicher Daten recherchiert werden können. Für alle betriebsinternen Daten und Informationen, die von Interesse für die öffentliche Sicherheit sind, wurden fiktive Daten verwendet und so verfremdet, dass durch die Analyseergebnisse in keinem Fall objektspezifische Aussagen oder Rückschlüsse auf die tatsächlich vorliegenden Sachverhalte möglich sind. Die zutreffenden Ergebnisse liegen den zuständigen Stellen vor.

Der Aufbau der Ergebnisdarstellung ist in beiden Anwendungsfällen gleich. Zunächst werden grundlegende Informationen zur Geografie und Stadtentwicklung gegeben. Es schließt sich eine Analyse des schwerwiegendsten und des mildesten Beginns eines Bemessungsstromausfalls an. Basierend auf den schwerwiegendsten anzunehmenden Beginn werden Gefahrenpotentiale der Stadtkreise analysiert.

Diese werden in verschiedenen Aggregationsebenen der Stadtteile bzw. -bezirke, der KRITIS-Typen und für einzelne KRITIS-Einrichtungen dargestellt. Es werden Aggregationen mit und ohne Berücksichtigung von Versorgungsleistungen angewendet.

Es folgt die Bewertung der Gefahrenpotentiale. Hierzu wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, mit der der Einfluss von Veränderungen von Gewichtswerten der berücksichtigten KRITIS-Typen auf das Ergebnis des Resilienzwertes analysiert wird. Dies ermöglicht es, die Einflüsse der einzelnen KRITIS-Einrichtungen zu beurteilen. Anschließend werden die zeitlichen Gefahrenpotentiale hinsichtlich des Vorhandenseins von Tipping Points und Plateaus beurteilt.

Bei den szenariobasierten Bewertungen von Gefahrenpotentialen werden jeweils ein Szenario einer Lastreduzierung und real stattgefundenen Stromausfälle analysiert. Da die Bewertung den vorgenannten Auseinandersetzungen mit Gefahrenpotentialen gleicht, steht allein die Demonstration im Mittelpunkt, dass reale Ausfallereignisse dargestellt werden können. Für die Analyse real stattgefundenen Stromausfälle sind Informationen über den Beginn eines Ausfalls und die betroffenen Regionen bzw. KRITIS-Einrichtungen nötig. Da hierfür in beiden betrachteten Stadtkreisen keine geeigneten offiziellen Ausgangsdaten über historische Stromausfälle von den Stadtwerken oder den Behörden vorliegen, wurde jeweils eine Medienanalyse durchgeführt. Hierdurch konnten relevante Stromausfallereignisse identifiziert und die für die Analyse notwendigen Informationen recherchiert werden. Für jeden Stadtkreis wurden drei Ereignisse größeren Ausmaßes gewählt.

Den verwendeten Informationen aus Medienberichten haftet entsprechend ihres journalistischen Charakters eine gewisse Unsicherheit an. Trotz der Erfüllung der journalistischen Wahrhaftigkeits- und Sorgfaltspflichten ist davon auszugehen, dass teilweise bedingt überprüfbare Sachverhalte oder nur Schätzungen veröffentlicht wurden, so dass Abweichungen insbesondere zum tatsächlichen Ausfallsbeginn und hinsichtlich der tatsächlich betroffenen Regionen bzw. KRITIS-Einrichtungen nicht auszuschließen sind. Für die Zwecke der Demonstration in dieser Arbeit sind diese Informationen mitsamt der damit verbundenen Unsicherheit jedoch ausreichend. In einer akuten Krisensituation sind hingegen, soweit verfügbar und zumutbar, geprüfte Sachverhalte zu verwenden. Im Ereignisfall ist eine hinreichende Gewissheit über tatsächliche Sachverhalte ggf. durch (zusätzliche) Lageerkundungen herzustellen.

## 13.2 Anwendungsfall Stadtkreis Karlsruhe

Der Stadtkreis Karlsruhe (kreisfreie Stadt) liegt im nordwestlichen Baden-Württemberg und ist die zweitgrößte Stadt des Landes. Mehr als 300.000 Einwohner leben in Karlsruhe verteilt auf 27 Stadtteile. Karlsruhe wurde als Modell-, Plan- und Residenzstadt 1715 gegründet und hat hierdurch einen relativ jungen Stadtkern, der sich fächer- und zirkelartig vom Turm des Karlsruher Schlosses Richtung Süden erstreckt. Mit der Urbanisierung und Industrialisierung ging eine Ausdehnung der Stadt insbesondere in den Süden, Osten und Westen einher, der kranzartig umfangreiche Angliederungen benachbarter Gemeinden und Städte folgten.

Raumplanerisch ist die Stadt Karlsruhe als einziges Oberzentrum in der Raumordnungs- und Planungsregion Mittlerer Oberrhein ausgewiesen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2002). Im Hinblick auf die Grenznähe zu Frankreich ist die Stadt zudem Teil der Trinationalen Metropolregion Oberrhein und Mitglied im grenzüberschreitenden Zweckverband des Eurodistrikts Pamina.

In der nachfolgenden Analyse werden

- zehn Krankenhäuser,
- zwei Dialysekliniken,
- 43 Alten- und Pflegeheime,
- 87 Apotheken,
- 102 Hausärzte,
- 21 Trinkwassereinrichtungen und
- 173.996 Haushalte

berücksichtigt. Die Abbildung 13.1 zeigt die Standorte dieser 265 KRITIS-Einrichtungen im Stadtgebiet Karlsruhes (ohne Haushalte).

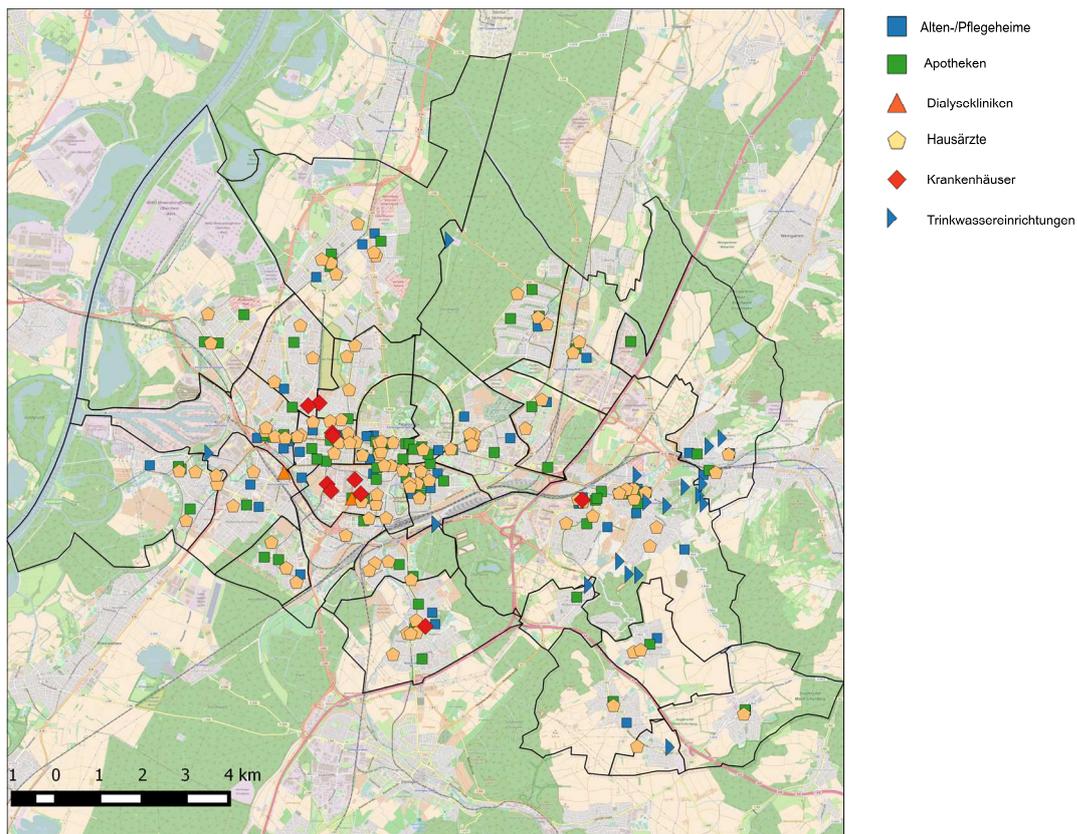


Abbildung 13.1: Standorte von KRITIS-Einrichtungen in den Stadtteilen des Stadtkreises Karlsruhe.

Die für die Durchführung der Analyse notwendigen Daten aller KRITIS-Einrichtungen der berücksichtigten KRITIS-Typen wurden in einem KRITIS-Kataster zusammengeführt. Die Daten des Katasters stammen aus öffentlich zugänglichen Informationsquellen, welche im Rahmen des Portfolio Projektes „Sicherheitsforschung“ der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. (mehr hierzu s. Raskob et al. 2015a und b) recherchiert wurden. Sensible und betriebsinterne Daten wie die Betriebsdauer der Notversorgung und Vergleichsattribute zur Größe wurden angenommen. Wie bereits diskutiert, dienen die nachfolgenden Ergebnisse ausschließlich dem Zweck der Demonstration.

### 13.2.1 Schwerwiegendster und mildester Ausfallbeginn

Tabelle 15 zeigt die jeweils fünf schwerwiegendsten und mildesten Beginne eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Karlsruhe.

Gleichwohl durch die vorgenommene Normalisierung der Standardlastprofile nur bedingt ein saisonaler Vergleich möglich ist, zeigt sich, dass der schwerwiegendste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Karlsruhe um 7:15 Uhr auf einen Werktag im Sommer fällt, auf den zwei weitere Werkstage folgen. Der mildeste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls geschieht um 18:45 Uhr an einen Samstag im Winter.

Tabelle 15: Übersicht der jeweils fünf schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginne eines Bemessungsstromausfalls in Karlsruhe.

Der am schwerwiegendsten anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls				Der am mildesten anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls			
Rang	Saison	Typtage	Uhrzeit	Rang	Saison	Typtage	Uhrzeit
1	Sommer	3 Werktage	7:15 Uhr	1	Winter	Sa/So/Mo	18:45 Uhr
2	Sommer	3 Werktage	7:30 Uhr	2	Winter	Sa/So/Mo	19:00 Uhr
3	Herbst	3 Werktage	7:15 Uhr	3	Winter	Sa/So/Mo	18:30 Uhr
4	Sommer	3 Werktage	7:00 Uhr	4	Winter	Sa/So/Mo	19:15 Uhr
5	Herbst	3 Werktage	7:45 Uhr	5	Winter	Sa/So/Mo	18:15 Uhr

Abbildung 13.2 zeigt die Verläufe der Vulnerabilität über die Dauer des am schwerwiegendsten und des am mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Karlsruhe.

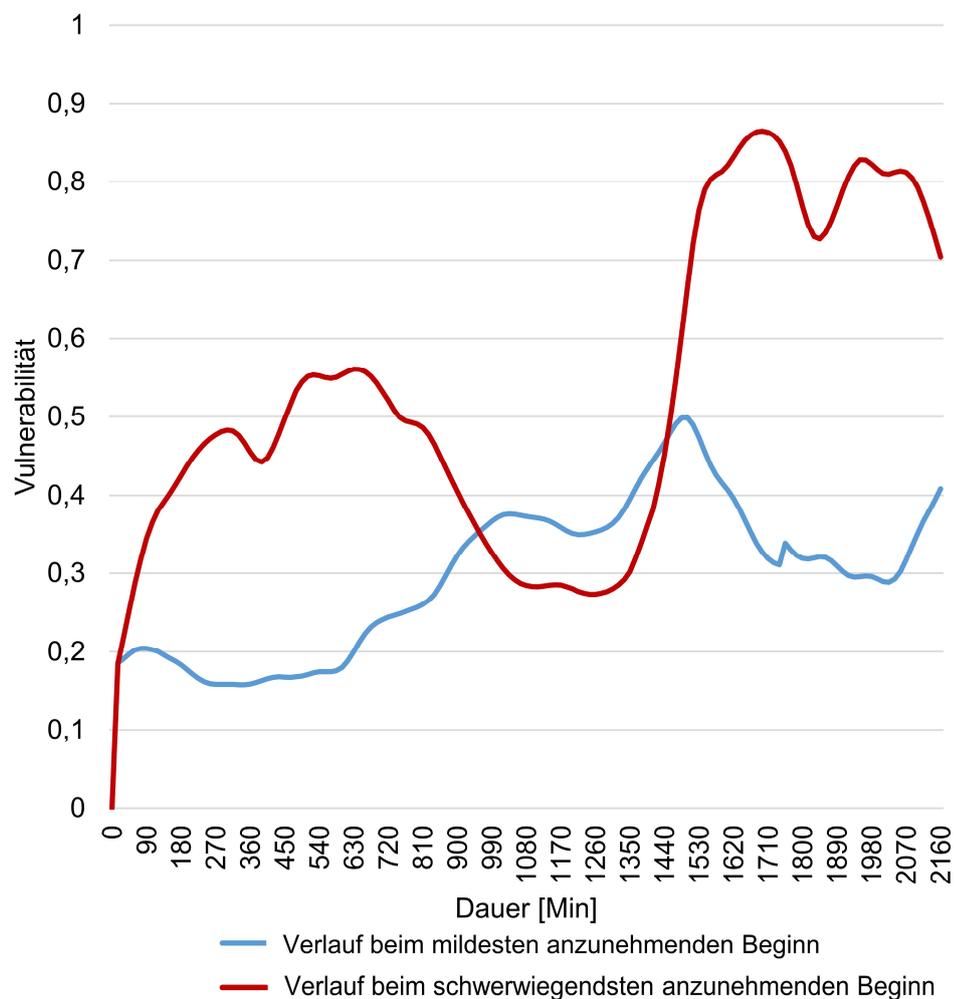


Abbildung 13.2: Verlauf des am schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Karlsruhe.

Der am *schwerwiegendste anzunehmende Bemessungsstromausfall* wirkt an Tagen, an denen die Versorgungsleistung von KRITIS-Einrichtungen gleich hoch ist. An beiden Tagen kommt es zu Spitzen der Versorgungsleistung zur jeweiligen Tagesmitte. Da der Stromausfall bereits am Morgen beginnt, wirkt er sich auf beide Versorgungsspitzen aus.

Zu Beginn des ersten Ausfalltages kann die Höhe der Vulnerabilität noch gedämpft werden, so dass die erste Versorgungsspitze gegenüber der zweiten am darauffolgenden Tag schwächer ausfällt. Hierbei zeigen sich die Wirkungen der vorgehaltenen Bewältigungsressourcen, die jedoch im Laufe der Dauer des Ausfalls verzehrt werden. Dadurch stehen am zweiten Ausfalltag nur noch wenige Bewältigungsressourcen zur Verfügung, wodurch die Werte des Resistenzverlusts und damit die Vulnerabilität steigen. Entsprechend des Verlaufs steigt die Vulnerabilität bereits am ersten Ausfalltag erheblich an. Der Anstieg am zweiten Tag ist demgegenüber noch stärker. Über Nacht sinkt die Vulnerabilität bedingt durch die rückläufige Versorgungsleistung. Sie steigt dann aber am Morgen des darauffolgenden Tages schlagartig. Warum sich dieser Verlauf abzeichnet, ist durch weitere Aggregationen zu analysieren. Erst aufgrund dieser sind Erkenntnisse über geeignete Maßnahmen möglich.

Demgegenüber beginnt *der mildeste anzunehmende Bemessungsstromausfall* am Wochenende an einem Samstagabend im Winter. Im Vergleich zu Werktagen erreicht die Versorgungsleistung in diesen Tagen weniger hohe Werte und zeigt lediglich eine Versorgungsleistungsspitze am Samstag. Diese wird jedoch weitestgehend kompensiert durch die Wirkungen von Bewältigungsressourcen, weshalb zu dieser Zeit die Vulnerabilität nur mäßige Werte erreicht. Bevor sich die zum Sonntag aufkommende Versorgungsspitze ausprägen kann, reduziert sich die Versorgungsleistung tageszeitbedingt bereits wieder, wodurch die Vulnerabilität am Nachmittag des Sonntags sinkt. Im Vergleich zum schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall erreicht dieser Ausfall geringere Vulnerabilitätswerte.

Nach allgemeiner Erfahrung sind Stromausfälle im Winter als gefährlicher anzusehen. Entsprechend der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse liegt der schwerwiegendste Ausfallbeginn jedoch im Sommer. Das höher wahrgenommene Gefahrenpotential für einen Ausfall im Winter leitet sich insbesondere aus dem Auskühlen von Gebäuden her und des erhöhten Bedarfs an Elektrizität. Um zu heizen und zu kochen weichen Menschen dann häufig auf offenes Feuer aus. Hierdurch kommt es vermehrt zu Unfällen (Verbrennungen und Rauchgasintoxikationen) und Brandereignissen. Diese Aspekte werden jedoch durch die Vulnerabilitätsanalyse nicht berücksichtigt. Das Ergebnis der Analyse, dass der schwerwiegendste anzunehmende Beginn im Sommer liegt, erklärt sich aus der linearen Normalisierung der Standardlastprofile für den Betrachtungszeitraum des Bemessungsstromausfalls. Hierdurch ergeben sich geringere Tag-Nacht-Unterschiede in der Versorgungsleistung von KRITIS-Einrichtungen im Sommer, die wiederum aufgrund der Normalisierung zu höheren Vulnerabilitätswerten als im Winter führen.

### **13.2.2 Gefahrenpotentiale im Stadtkreis Karlsruhe**

Gefahrenpotentiale lassen sich durch unterschiedliche Vulnerabilitätsaggregationen darstellen. Im nachfolgenden werden Aggregationen verwendet, die die Gefahrenpotentiale für KRITIS-Typen, Stadtteile und einzelne KRITIS-Einrichtungen darstellen. Die Darstellung der Gefahrenpotentiale wird anhand des schwerwiegendsten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls vorgenommen.

### 13.2.2.1 Gefahrenpotentiale nach KRITIS-Typen

Abbildung 13.3 stellt die Vulnerabilitätsverläufe der berücksichtigten KRITIS-Typen für den am schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall dar.

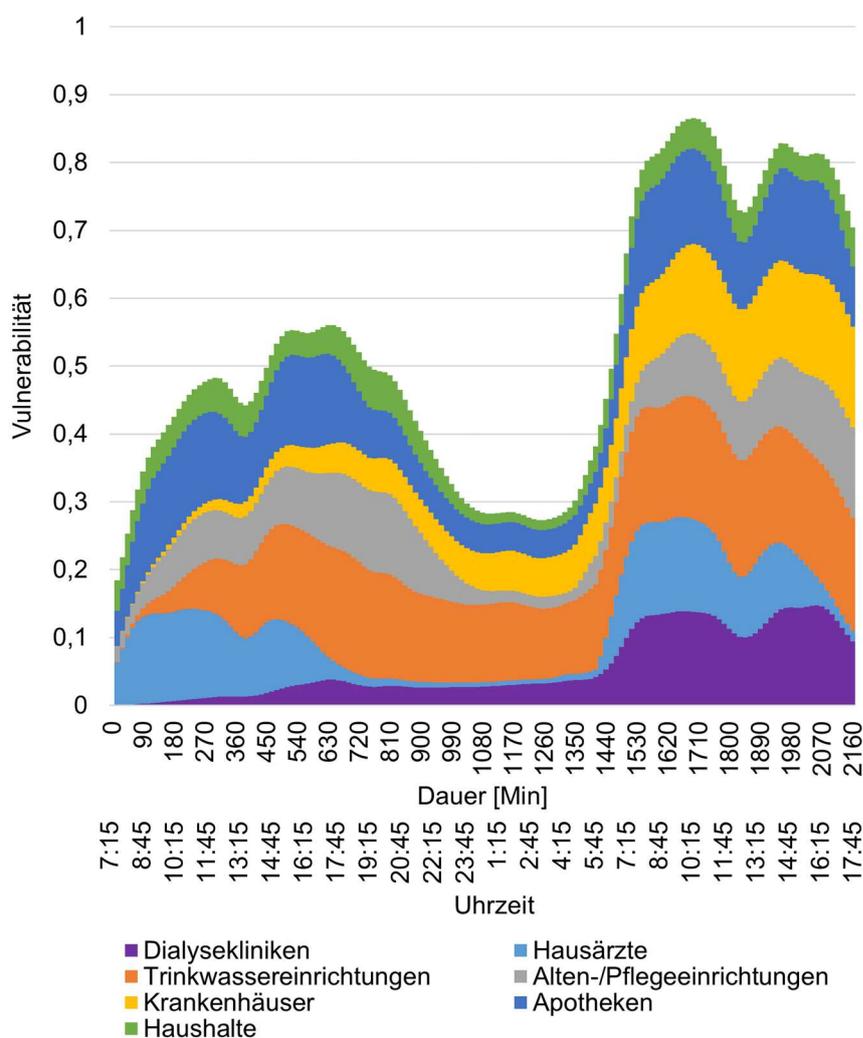


Abbildung 13.3: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Karlsruhe.

Die Abbildung 13.3 zeigt das Vulnerabilitätsprofil differenziert nach KRITIS-Typen. Dabei wird deutlich, dass sich die Einflüsse der KRITIS-Typen auf die Gesamtvulnerabilität unterscheiden und im zeitlichen Verlauf variieren. Liegt in den ersten zwölf Stunden der stärkste Einfluss noch bei den Hausärzten, steigt mit zunehmender Dauer des Ausfalls z. B. der Einfluss der Trinkwassereinrichtungen und Dialysekliniken erheblich an. Auf Basis der Darstellung lässt sich je nach Szenario bzw. abzusehender Ausfalldauer die Aufmerksamkeit auf die jeweiligen KRITIS-Typen lenken, die den stärksten Einfluss auf das Gefahrenpotential haben. Mithilfe des Resilienzwertes kann eine Rangliste des Gefahrenpotentials der KRITIS-Typen erstellt werden (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Rangliste der KRITIS-Typen nach Gefahrenpotential im Stadtkreis Karlsruhe.

Rang	KRITIS-Typ
1	Trinkwassereinrichtungen
2	Apotheken
3	Alten-/Pflegeeinrichtungen
4	Krankenhäuser
5	Hausärzte
6	Dialysekliniken
7	Haushalte

Die Berechnung des Resilienzwertes zeigt, dass der größte Einfluss auf das gesamtstädtische Gefahrenpotential im Stadtkreis Karlsruhe von der Trinkwasserversorgung ausgeht. Der Verlauf ihrer Vulnerabilität ist in den ersten Stunden des Ausfalls zunächst unerheblich. In dieser Zeit erscheint jedoch insbesondere das Gefahrenpotential durch Hausärzte besonders hoch. Bereits nach zwei Stunden nach Ausfallbeginn steigt jedoch die Vulnerabilität der Trinkwasserversorgung, der Apotheken und der Alten- und Pflegeeinrichtungen erheblich an. Die Vulnerabilität der Hausärzte reduziert sich betriebsbedingt am Nachmittag und am Abend des ersten Tages. Dem gegenüber reduziert sich die Vulnerabilität der Trinkwasserversorgung nicht wesentlich im weiteren Verlauf des Ausfalls. Zu Beginn des zweiten Tages steigt die Vulnerabilität bei vielen KRITIS-Typen an, so dass die Gesamtvulnerabilität mit Abstand höhere Werte erreicht als am ersten Ausfalltag.

Wie bereits diskutiert, ermöglicht die Aggregation unter Berücksichtigung aller Indikatoren keinen Erkenntnisgewinn darüber, welche KRITIS-Typen noch vollumfänglich funktionsfähig sind bzw. inwieweit mit flächendeckenden Ausfällen bei bestimmten KRITIS-Typen zu rechnen ist. Diese Sachverhalte werden erst durch eine Aggregation deutlich, in der die Versorgungsleistung der KRITIS-Einrichtungen ausgeschlossen wird. Abbildung 13.4 zeigt das Ergebnis des Verlaufs der Vulnerabilität für die berücksichtigten KRITIS-Typen ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung.

In Abbildung 13.4 wird deutlich, dass alle Haushalte und alle Trinkwassereinrichtungen im Betrachtungszeitraum des Bemessungsstromausfalls die jeweils höchste mögliche Vulnerabilitätsausprägung erreichen. Da für Haushalte keine Bewältigungsressourcen angenommen werden, steigt ihre Vulnerabilität bereits mit dem Ausfallbeginn und bleibt dann konstant auf einem Vulnerabilitätsniveau. Die Vulnerabilität der Trinkwasserversorgung steigt bis 19:15 Uhr bzw. 720 Minuten (12 Stunden) nach Ausfallbeginn an. Ab diesem Zeitpunkt haben allen Einrichtungen dieses KRITIS-Typs ihre Bewältigungsressourcen vollständig aufgebraucht. Bei allen anderen KRITIS-Typen existieren Einrichtungen, deren Bewältigungsressourcen einen längeren kontinuierlichen Betrieb sicherstellen als die Dauer des Bemessungsstromausfalls.

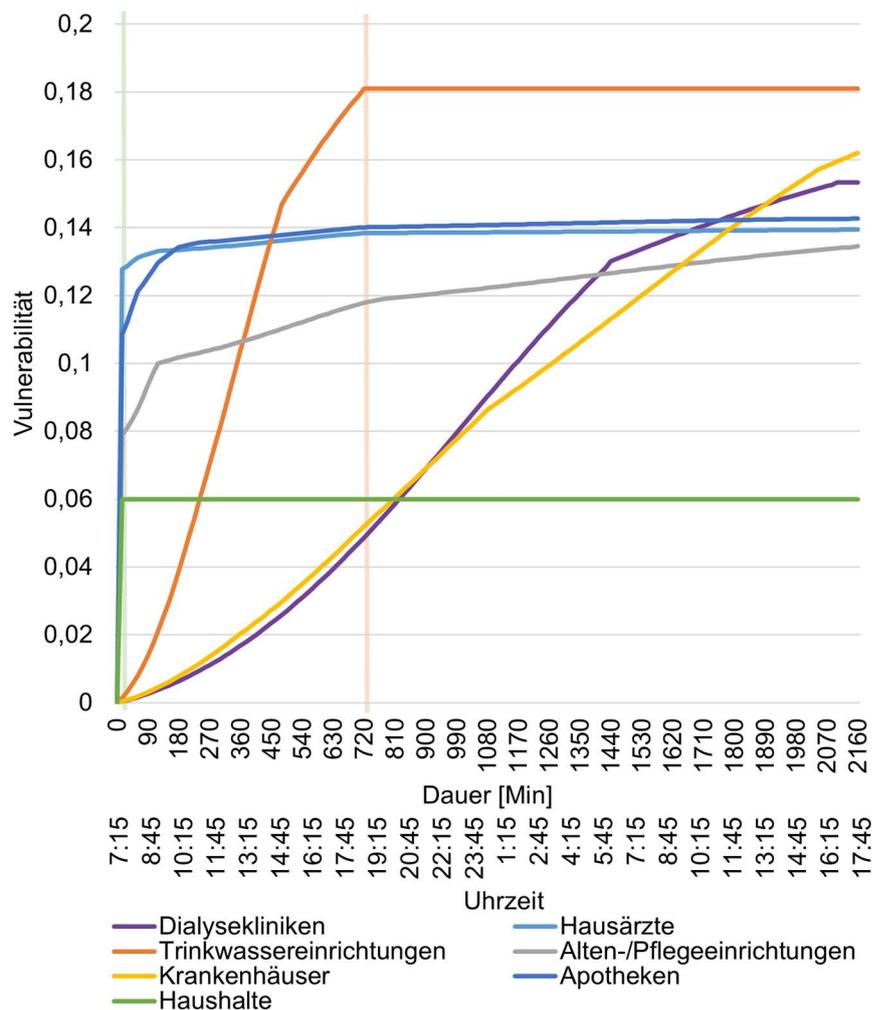


Abbildung 13.4: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Karlsruhe ohne die Berücksichtigung von Versorgungsleistungen.

Die Höhe und der Verlauf der Vulnerabilität werden beeinflusst vom Leistungsvermögen und des Resistenzverlustes der jeweiligen Einrichtungen. Um weitere Aussagen über den Einfluss von bestimmten KRITIS-Einrichtungen auf den Verlauf der Vulnerabilität zu erhalten, sind weitere Aggregationen auf der Ebene der KRITIS-Einrichtungen notwendig. Zur Demonstration werden nachfolgend beispielhaft Krankenhäuser näher beleuchtet.

### 13.2.2.2 Gefahrenpotentiale nach KRITIS-Einrichtungen

Abbildung 13.1 zeigt die Standorte der KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis. Basierend auf der räumlichen Konzentration der Standorte kann eine Heat Map der Standortdichte erzeugt werden (Abbildung 13.5). Durch sie wird zeitpunktunabhängig die Dichte der KRITIS-Einrichtungen im Stadtgebiet durch entsprechende Farbcodierungen dargestellt. Dabei werden allein die Standorte und keine weiteren Merkmale der Einrichtungen berücksichtigt.

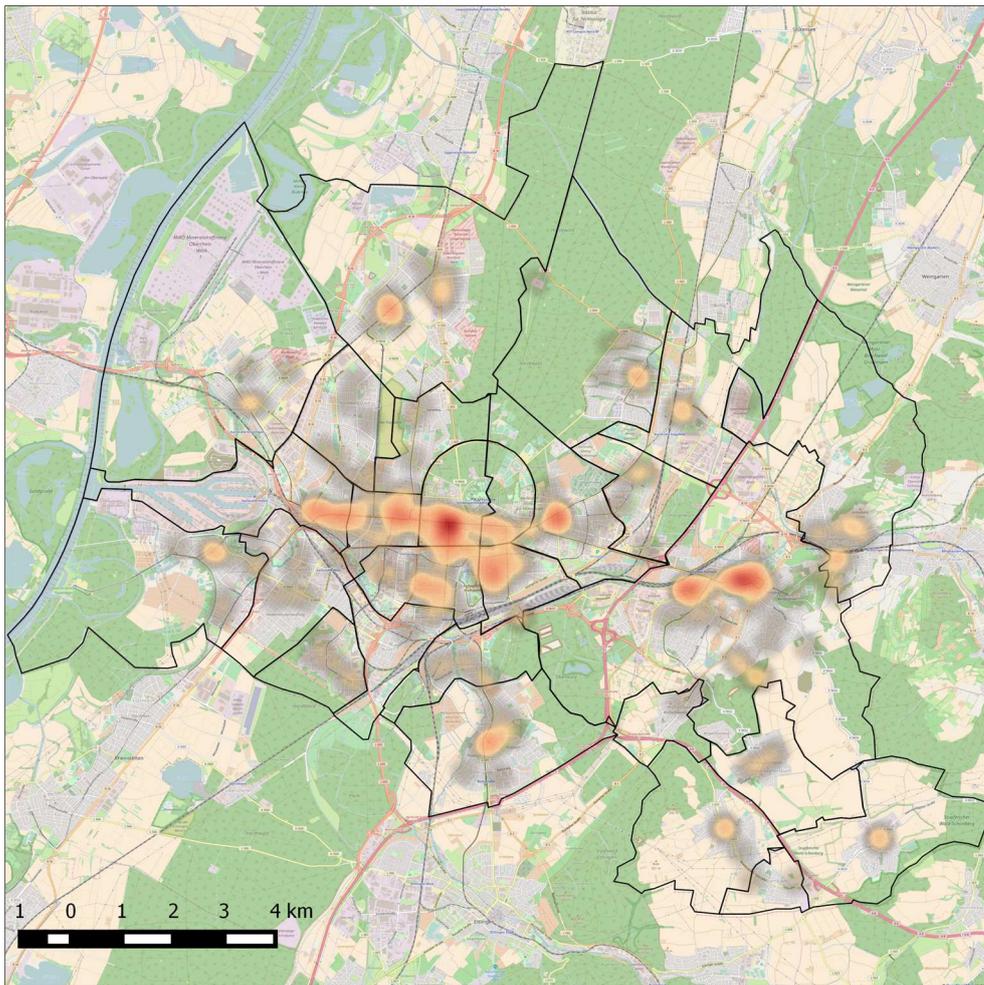


Abbildung 13.5: Heat Map der Standortdichte der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Karlsruhe.

Abbildung 13.5 zeigt die Heat Map Standortdichte für den Stadtkreis Karlsruhe. Markante Standortdichten von KRITIS-Einrichtungen lassen sich demnach in der Südweststadt, in Durlach, der Weststadt, der Innenstadt-West und -Ost, Mühlburg, der Oststadt und in Teilen Neureuts erkennen. Die höchste Dichte zeigt sich in der Innenstadt-West. Objektspezifische Aussagen sind in der Darstellung der Abbildung 13.5 nicht möglich.

Eine Heat Map der Standortdichte berücksichtigt lediglich die Standorte von KRITIS-Einrichtungen. Differenzierte Aussagen über die Vulnerabilität und die raum-zeitlichen Gefahrenpotentiale von KRITIS-Einrichtungen sind auf dieser Grundlage nicht möglich. Somit stellt die alleinige Nutzung einer Heat Map der Standortdichte keine ausreichende Grundlage für ein sachgerechtes Entscheiden im Rahmen der Gefahrenabwehrplanung und der akuten Krisenbewältigung dar.

Um die Zusammensetzung der Vulnerabilität und die raum-zeitlichen Gefahrenpotentiale von einzelnen KRITIS-Typen besser verstehen zu können, ist der Einfluss der jeweiligen KRITIS-Einrichtungen zu analysieren. Hierzu eignet sich die Aggregation nach KRITIS-Einrichtungen.

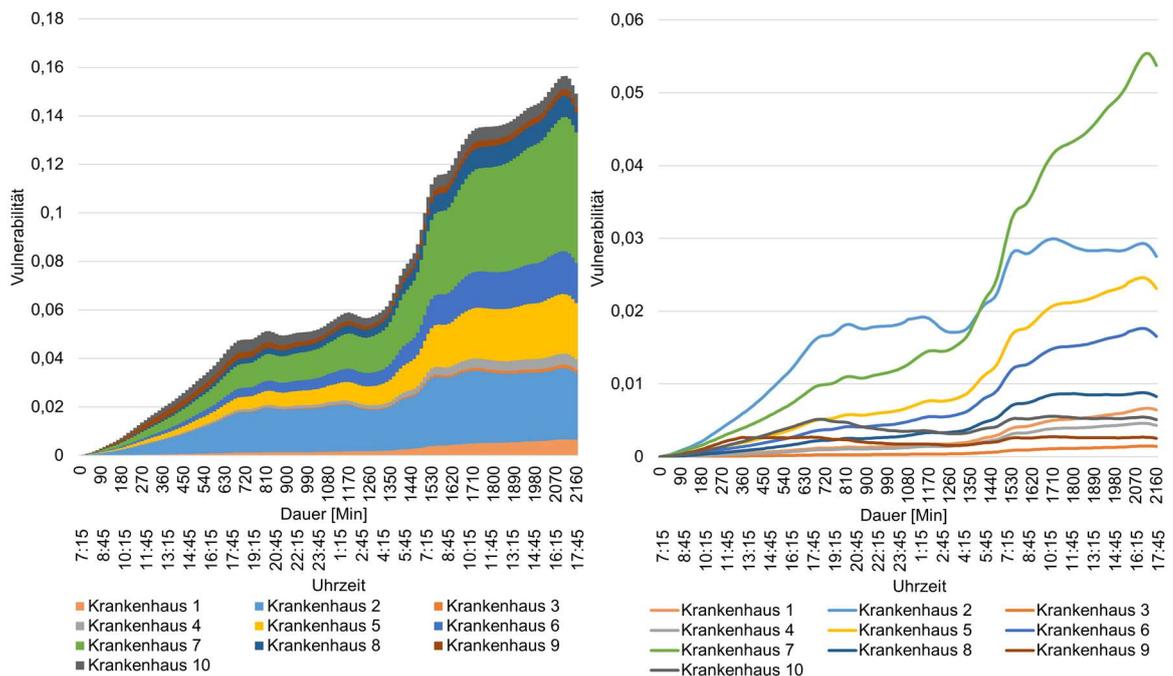


Abbildung 13.6: Verlauf der Vulnerabilität der Karlsruher Krankenhäuser.

Abbildung 13.6 zeigt eine Vulnerabilitätsaggregation für KRITIS-Einrichtungen des KRITIS-Typs Krankenhäuser als gestapeltes Balkendiagramm (links) und als Liniendiagramm (rechts). Da es sich hierbei um Einrichtungen desselben KRITIS-Typs handelt, werden für die Berechnung der einrichtungsspezifischen Vulnerabilität für jede einzelne Einrichtung die gleichen Relevanzgewichte und dieselben Versorgungsleistungen verwendet. Die Vulnerabilitätsprofile der einzelnen Einrichtungen unterscheiden sich lediglich aufgrund der unterschiedlichen Leistungsvermögen und Resistenzverluste.

In Abbildung 13.6 wird deutlich, dass das Krankenhaus 2 vergleichsweise früh hohe Vulnerabilitätswerte erreicht. Die bereits aufgebaute Amplitude nimmt im weiteren Verlauf weiter zu. In den ersten 19 Stunden (bzw. 1140 Minuten, um 2:15 Uhr des zweiten Ausfalltages) ist bezugnehmend auf das ermittelte Gefahrenpotential eine erhöhte Aufmerksamkeit bei der Lagefeststellung oder gar ein Einsatzschwerpunkt auf dieses Krankenhaus zu legen. Im Laufe des Ausfalls steigt jedoch die Vulnerabilität des Krankenhauses 7 erheblich an und übersteigt die Werte des Krankenhauses 2 nach einer Ausfalldauer von 23 Stunden und 15 Minuten (bzw. 1395 Minuten, um 6:30 Uhr des zweiten Ausfalltages). Dieser Verlauf ist zum einen mit dem anhaltenden Verbrauch von Bewältigungsressourcen zu erklären. Das Krankenhaus 7 verfügt über länger anhaltende Ressourcen, so dass seine Vulnerabilität am ersten Ausfalltag weniger hoch ausfällt. Des Weiteren hat diese Einrichtung ein erheblich höheres Leistungsvermögen, weshalb es am zweiten Ausfalltag entsprechend höhere Vulnerabilitätswerte erreicht. Zudem sind zu dieser Zeit ihre Bewältigungsressourcen weitestgehend aufgebraucht. Der Einsatzschwerpunkt oder zumindest eine erhöhte Aufmerksamkeit in der Lagefeststellung wären bei derart langen Ausfällen frühzeitig bei Krankenhaus 2 vorzunehmen. Auf Grundlage der Höhe der Gefahrenpotentiale beider Einrichtungen ist im Rahmen der Gefahrenabwehrplanung zu empfehlen, dass diese beiden Einrichtungen im Mittelpunkt der Betrachtung möglicher Maßnahmenabwägung stehen sollten.

Die bisher dargestellten Aggregationen berücksichtigen alle Indikatoren. Wie bereits diskutiert, kommt es jedoch durch den Indikator der Versorgungsleistung zur verzerrten Darstellung der Vulnerabilität. Hierdurch kann nicht deutlich erkannt werden, ob eine KRITIS-Einrichtung noch über Bewältigungsressourcen verfügt oder ob bereits ein kontinuierlicher Betrieb nicht mehr sichergestellt werden kann. Eine Störung tritt zu diesem Zeitpunkt ein und besteht dann fort. Um hierüber Erkenntnisse zu erlangen, bedarf es einer Aggregation, die die Versorgungsleistung ausschließt.

Abbildung 13.7 zeigt den Verlauf der Vulnerabilität der Karlsruher Krankenhäuser ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung.

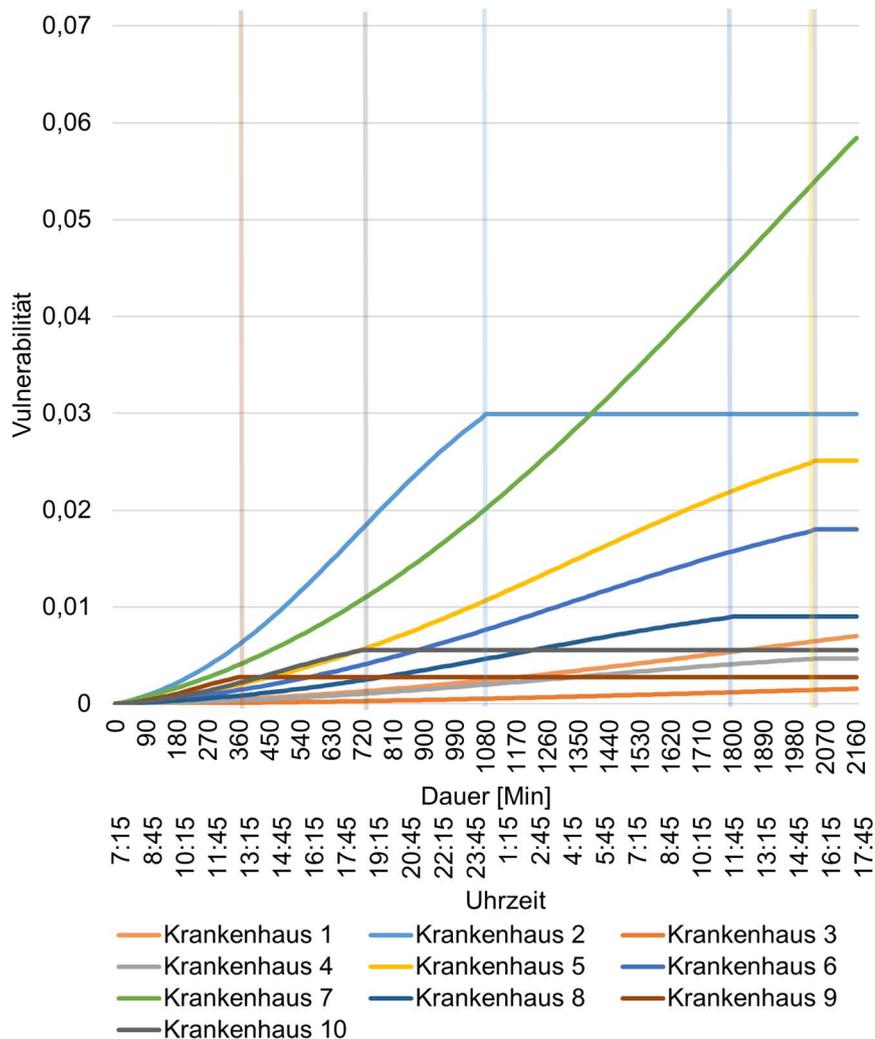


Abbildung 13.7: Verlauf der Vulnerabilität aller Karlsruher Krankenhäuser ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung.

Entsprechend der vertikalen Kennzeichnung wird deutlich, dass bereits

- Krankenhaus 9 nach einer Ausfalldauer von sechs Stunden (bzw. 360 Minuten, um 15:15 Uhr am ersten Ausfalltag),
- Krankenhaus 10 nach 12 Stunden (bzw. 720 Minuten, um 19:15 Uhr am ersten Ausfalltag),
- Krankenhaus 2 nach 18 Stunden (bzw. 1080 Minuten, um 1:15 Uhr am zweiten Ausfalltag) und
- die Krankenhäuser 4 und 5 nach 34 Stunden (bzw. 2040 Minuten, um 17:15 Uhr am ersten Ausfalltag)

ihren höchsten Vulnerabilitätswert erreicht haben. Eine Störung ist ab diesem Zeitpunkt eingetreten, da die Einrichtungen nach diesen Zeitpunkten nicht mehr über die Fähigkeit einer kontinuierlichen Versorgung verfügen. Die Höhe der Vulnerabilitätswerte zeigt die Erheblichkeit des Gefahrenpotentials an. In einer akuten Krisenbewältigung sind entsprechend dieser Erkenntnisse frühzeitige Lageerkundungen durchzuführen, Einsatzschwerpunkte zu bilden und Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren einzuleiten. Die Maßnahmen zielen auf eine kontinuierliche Versorgung oder auf die Herstellung eines sicheren Betriebszustandes ab und sind nach Prüfung der Verhältnismäßigkeit zu wählen. Dabei kann je nach Umständen, Verfügbarkeit von Ressourcen z. B.

- eine priorisierte Versorgung mit Elektrizität durch Netzumschaltungen,
- eine Versorgung mit Elektrizität mithilfe mobiler Notstromaggregate in den Einrichtungen,
- eine Einspeisung mithilfe mobiler Notstromaggregate,
- das Bilden von Versorgunginseln,
- eine Evakuierung von Einrichtungen und
- eine Kombination aus den genannten Maßnahmen

realisiert werden.

Der jeweilige Resilienzwert einer KRITIS-Einrichtung wird gebildet. Um nachteilige Wirkungen auf die öffentliche Sicherheit zu vermeiden und aufgrund des betrieblichen Interesses der einzelnen KRITIS-Einrichtungen wird auf die Demonstration von Ergebnissen an dieser Stelle verzichtet. Der Resilienzwert der KRITIS-Einrichtungen kann jedoch genutzt werden zur Darstellung einer Heat Map der Vulnerabilitätsdichte. Abbildung 13.8 zeigt zeitpunktunabhängige Gefahrenpotentiale basierend auf dem Standort und dem jeweiligen Resilienzwert von KRITIS-Einrichtungen.

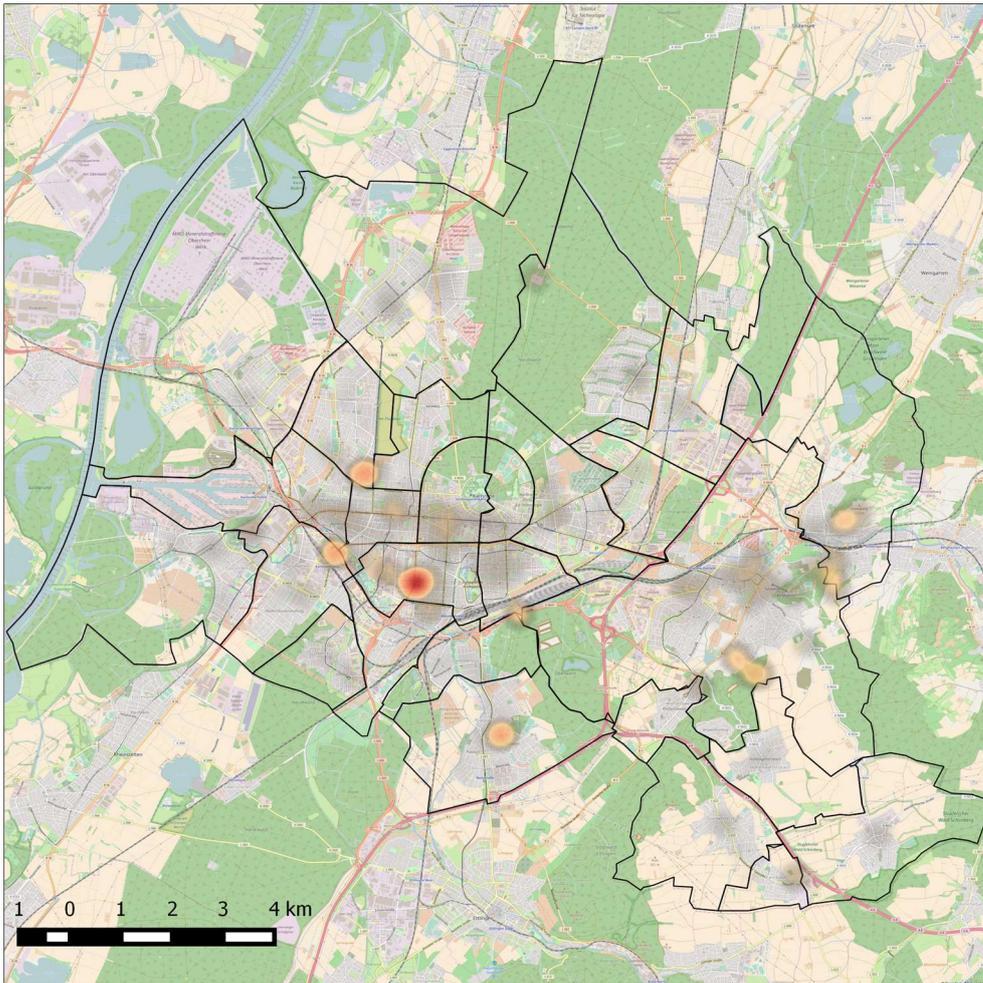


Abbildung 13.8: Heat Map der Vulnerabilitätsdichte für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Karlsruhe.

Abbildung 13.8 zeigt die Heat Map Vulnerabilitätsdichte für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Karlsruhe. Im Vergleich zur Heat Map Standortdichte zeigt sich eine Reduzierung der Flächen-darstellung auf markante Punkte in der Stadt in den Bereichen der Südweststadt, Nordweststadt, Durlach und Rüppur. Dies erscheint insbesondere begründet durch die Standorte von Krankenhäusern, Dialysekliniken und Einrichtungen der Trinkwasserversorgung. Nichtsdestotrotz sind trotz der punktierten Ergebnisse der Vulnerabilitätsdichte objektspezifische Aussagen nur bedingt möglich.

### 13.2.2.3 Gefahrenpotentiale nach Stadtteilen

Die Abbildung 13.9 zeigt die Gefahrenpotentiale aggregiert auf die Karlsruher Stadtteile.

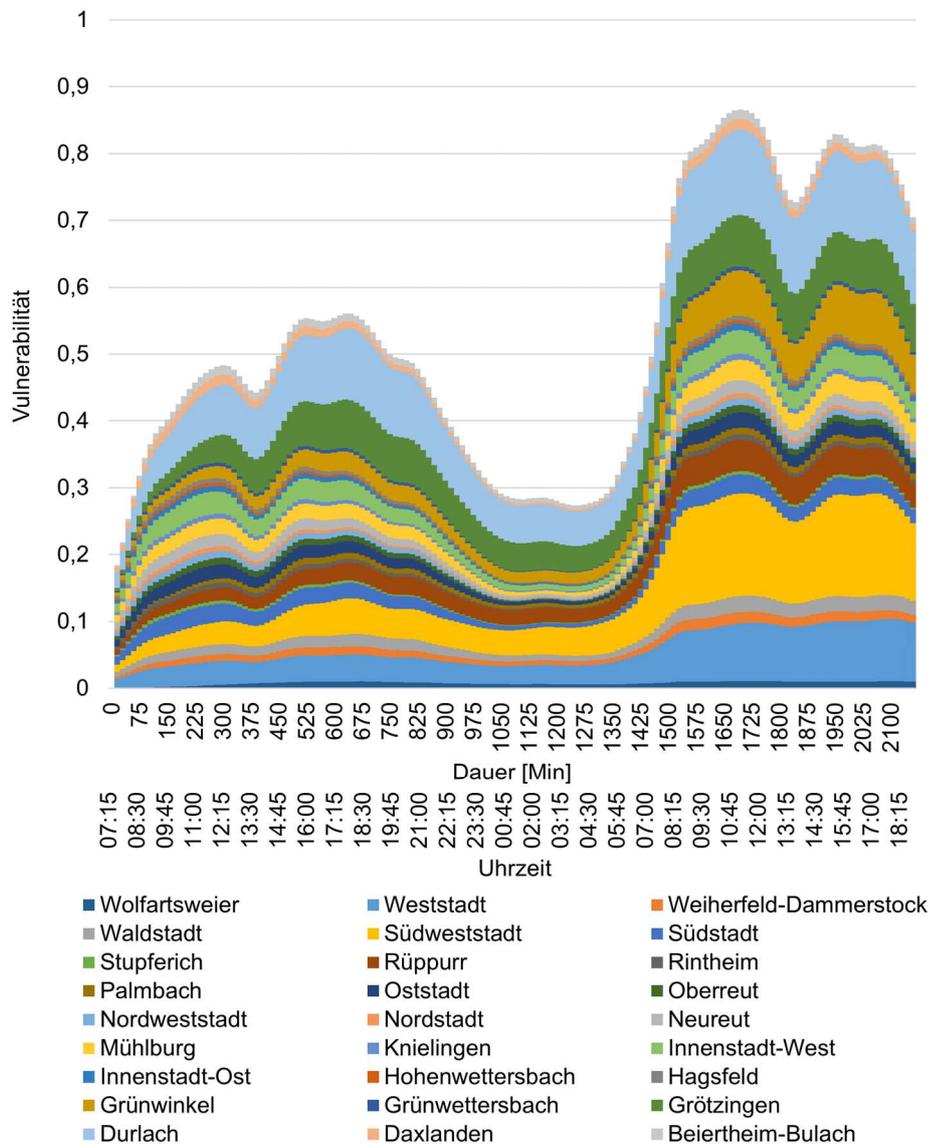


Abbildung 13.9: Vulnerabilitätsverlauf der Karlsruher Stadtteile.

Mithilfe dieser Grundlage lassen sich räumliche Gefahrenschwerpunkte identifizieren und eine entsprechende Rangliste der Stadtteile ableiten. Die Rangliste der Tabelle 17 basiert auf den Gefahrenpotentialen und den Berechnungen des Resilienzwertes für den am schwerwiegendsten anzunehmenden Beginn eines Bemessungsstromausfalls.

Tabelle 17: Rangliste der Karlsruher Stadtteile nach Gefahrenpotential.

Rang	Stadtteil	Rang	Stadtteil	Rang	Stadtteil
1	Durlach	10	Oststadt	19	Nordweststadt
2	Südweststadt	11	Waldstadt	20	Innenstadt-Ost
3	Grötzingen	12	Neureut	21	Knielingen
4	Weststadt	13	Weiherfeld-Dammerstock	22	Rintheim
5	Grünwinkel	14	Beiertheim-Bulach	23	Nordstadt
6	Rüppurr	15	Daxlanden	24	Hagsfeld
7	Innenstadt-West	16	Wolfartsweier	25	Grünwettersbach
8	Mühlburg	17	Oberreut	26	Stupferich
9	Südstadt	18	Palmbach	27	Hohenwettersbach

Die größten Gefahrenpotentiale existieren demnach in Durlach, der Südweststadt und in Grötzingen.

Die räumliche Darstellung von Gefahrenpotentialen lässt sich auch als Abbildung in Geoinformationssystemen für verschiedene Zeitpunkte darstellen (Abbildung 13.10).

Durch die Darstellung der Gefahrenpotentiale in einem Geoinformationssystem ist es für Entscheidungsträger möglich, ein verbessertes Verständnis über die raumzeitliche Wirkung zu erhalten. Von besonderem Interesse sind die Verläufe, in denen sich die Situation erheblich ändert. Die Abbildung 13.11 stellt die räumliche Vulnerabilität der Stadtteile für die Zeitpunkte um 8:15 Uhr und 9:30 Uhr am zweiten Ausfalltag dar. In dieser kurzen Zeit steigt die Vulnerabilität insbesondere in den Stadtteilen Durlach, Südweststadt und Grötzingen erheblich an.

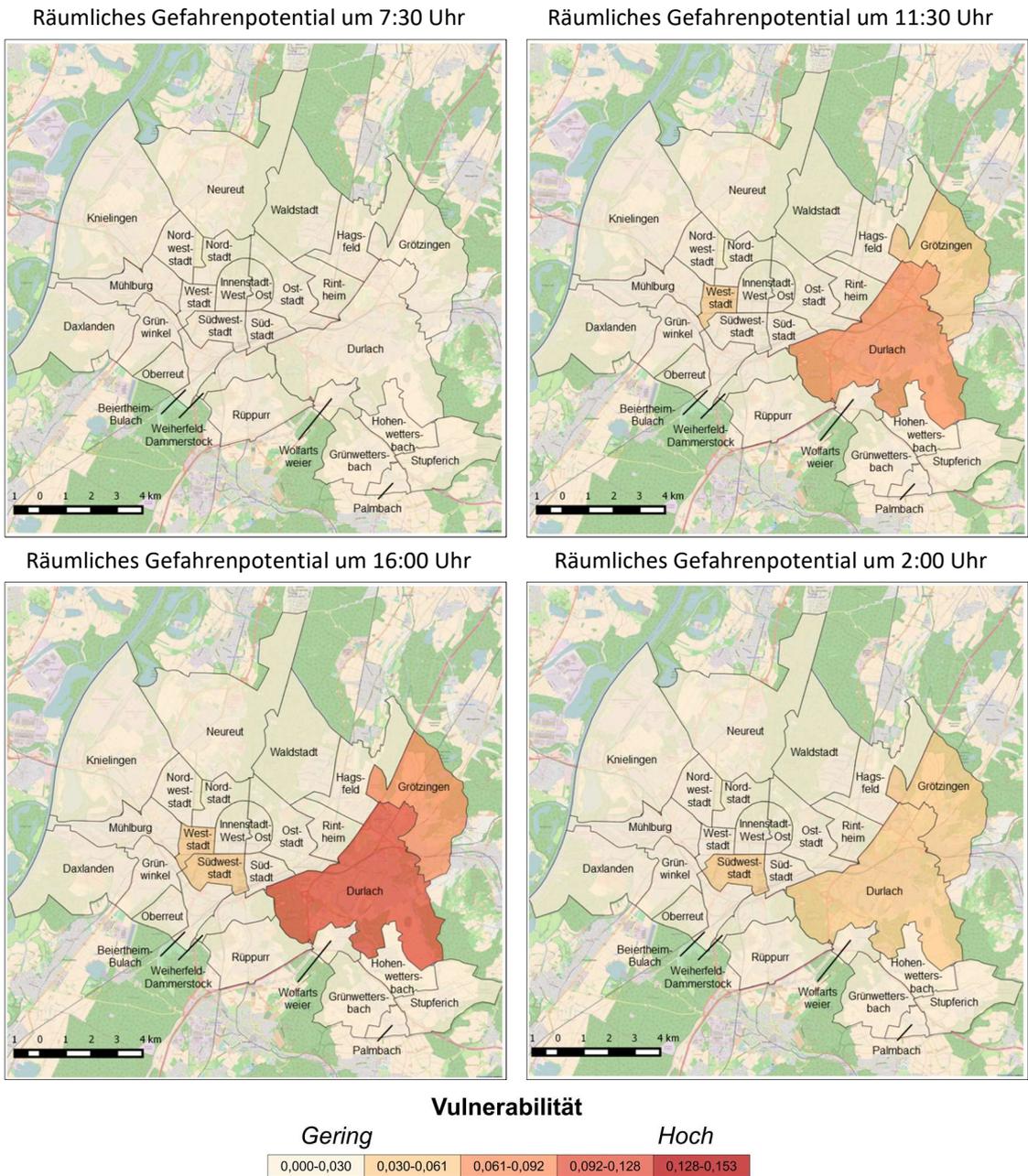


Abbildung 13.10: Räumliche Gefahrenpotentiale in Karlsruhe für verschiedene Zeitpunkte.

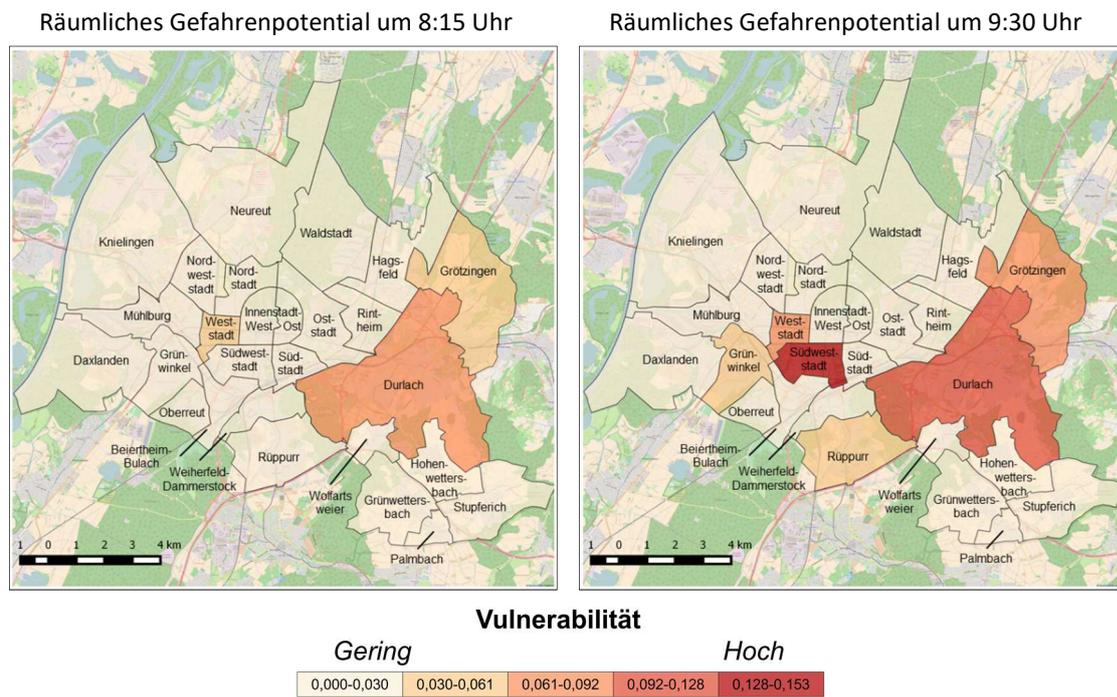


Abbildung 13.11: Gegenüberstellung der Vulnerabilität der Karlsruher Stadtteile am zweiten Ausfalltag um 8:15 Uhr und 9:30 Uhr.

Um einen detaillierteren Einblick in die jeweiligen räumlichen Gefahrenpotentiale zu erhalten, kann die Zusammensetzung der Vulnerabilität durch eine Aggregation von KRITIS-Typen für diese Stadtteile dargestellt werden.

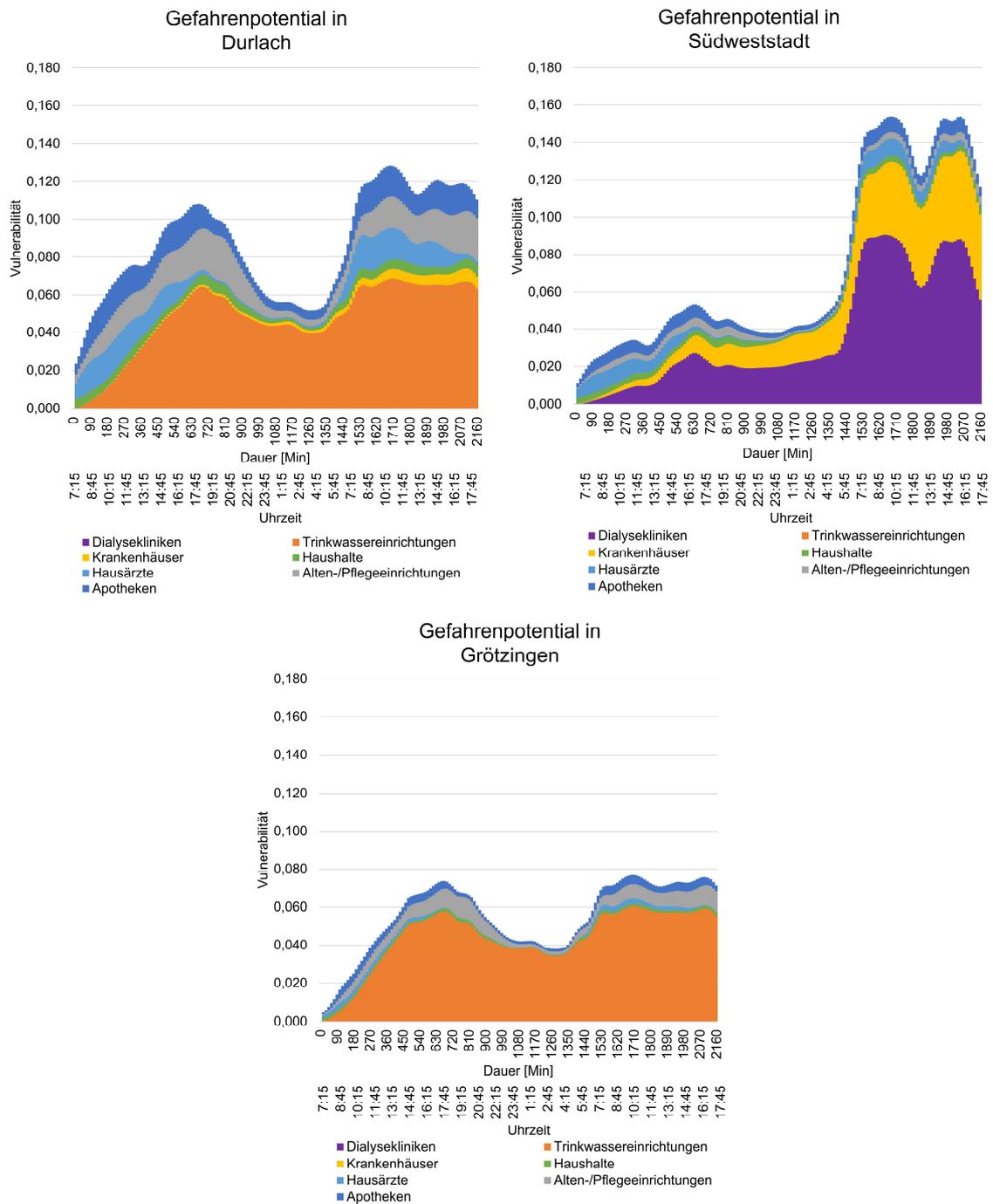


Abbildung 13.12: Vulnerabilitätsverlauf der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen.

Die Zusammensetzung der Gefahrenpotentiale der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen unterscheiden sich grundlegend. So dominieren in Durlach und Grötzingen die Einflüsse der Trinkwasserversorgung, in der Südweststadt die der Dialysekliniken und der Krankenhäuser. In Durlach und Grötzingen sind jeweils zur Tagesmitte mit ähnlich stark ausgeprägten Vulnerabilitätsspitzen zu rechnen. In den Nächten sinkt in beiden Stadtteilen die Vulnerabilität. In der Südweststadt hingegen steigt die Vulnerabilität

im Verlauf des ersten Tages nur vergleichsweise moderat an und sinkt nicht in den Nachtstunden. Zu Beginn des zweiten Ausfalltages kommt es jedoch zu einem erheblichen Anstieg der Vulnerabilität, welche in ihrer Amplitudenhöhe die der Stadtteile Durlach und Grötzingen deutlich übersteigt. Grund hierfür ist der Anstieg der Vulnerabilität der dort verorteten Dialyseklinik und der Krankenhäuser. In beiden Fällen sind bestehende Bewältigungsressourcen weitestgehend aufgebraucht.

Dieses Beispiel zeigt, dass mithilfe des Resilienzwertes lediglich die Gesamthöhe des Gefahrenpotentials, jedoch nicht deren Verlauf berücksichtigt wird. Die Anwendung weiterer Aggregationen und Bewertungen unter Verwendung verschiedener räumlicher Auflösungen und Fokussierungen führt zu differenzierten Erkenntnissen.

#### **13.2.2.4 Unsicherheiten der Gefahrenpotentiale**

Abbildung 13.13 und die Abbildung 13.14 zeigen die Vulnerabilitätsprofile der KRITIS-Typen für einen Bemessungsstromausfall, der zum ungünstigsten Zeitpunkt beginnt. Die Streuungen sind unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Streuungen bilden die Standardabweichung der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation in den jeweiligen Zeitpunkten dar. Die Streuung ist individuell und wird beeinflusst von der Relevanzgewichtung und vom Resistenzverlust.

Das Vulnerabilitätsprofil der Krankenhäuser zeigt einen Verlauf mit vergleichsweise geringer Streuung. Gründe hierfür sind die geringen Streuungen der Relevanzgewichte für Krankenhäuser und die Tatsache, dass innerhalb des Bemessungsstromausfalls nur ein Teil der vorhandenen Bewältigungskapazitäten verzehrt werden und daher die Streuungen des Resistenzverlustes gering sind.

Beim Vulnerabilitätsprofil der Haushalte zeigt sich bis auf die Nachtstunden durchgängig eine vergleichsweise starke Streuung, die insbesondere auf die Uneinigkeit der befragten Experten zurückzuführen ist, wie die Relevanz von Haushalten einzuschätzen ist. Diese Uneinigkeit zeigt sich in einer Streuung des Relevanzgewichtes, die sich auch im Vulnerabilitätsprofil niederschlägt. In den Nachtstunden sinkt die Versorgungsleistung, so dass die Streuung auch geringer erscheint.

Beim Vulnerabilitätsprofil der Dialysekliniken zeigt sich in der ersten Hälfte des Bemessungsstromausfalls nur eine geringe Streuung. Dies liegt an der zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen Bewältigungskapazitäten und der geringen Streuung der Relevanzgewichte. Erst am zweiten Ausfalltag steigt die Streuung, da sich einige Einrichtungen dem Ende ihrer Bewältigungsfähigkeit nähern und Experten den darin begründeten Vulnerabilitätsanstieg unterschiedlich beurteilen. Diese Unterschiede spiegeln sich auch in der Streuung der Vulnerabilität wider.

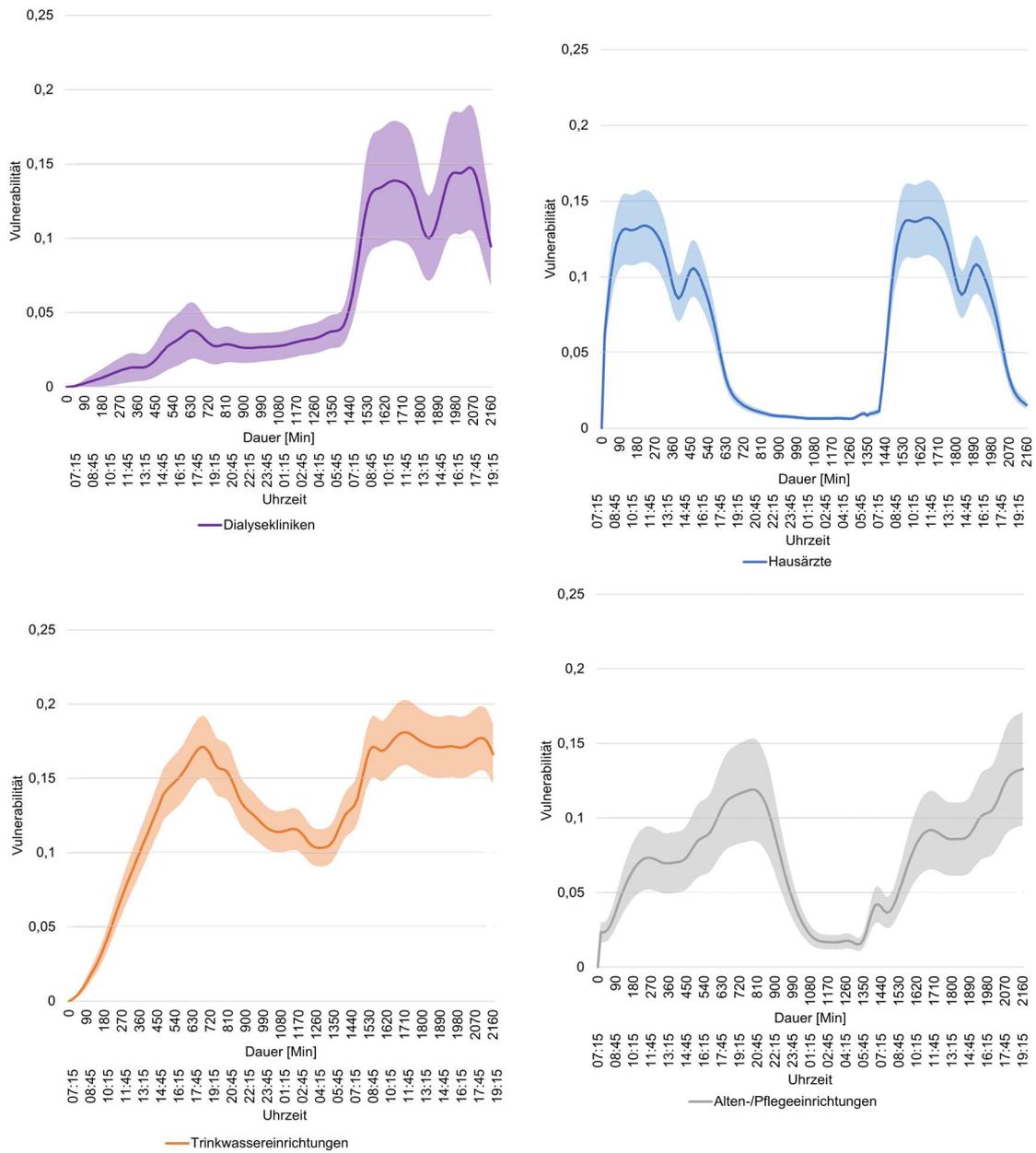


Abbildung 13.13: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Dialysekliniken, Hausärzte, Trinkwassereinrichtungen und Alten-/Pflegeeinrichtungen in Karlsruhe mit Streuung.

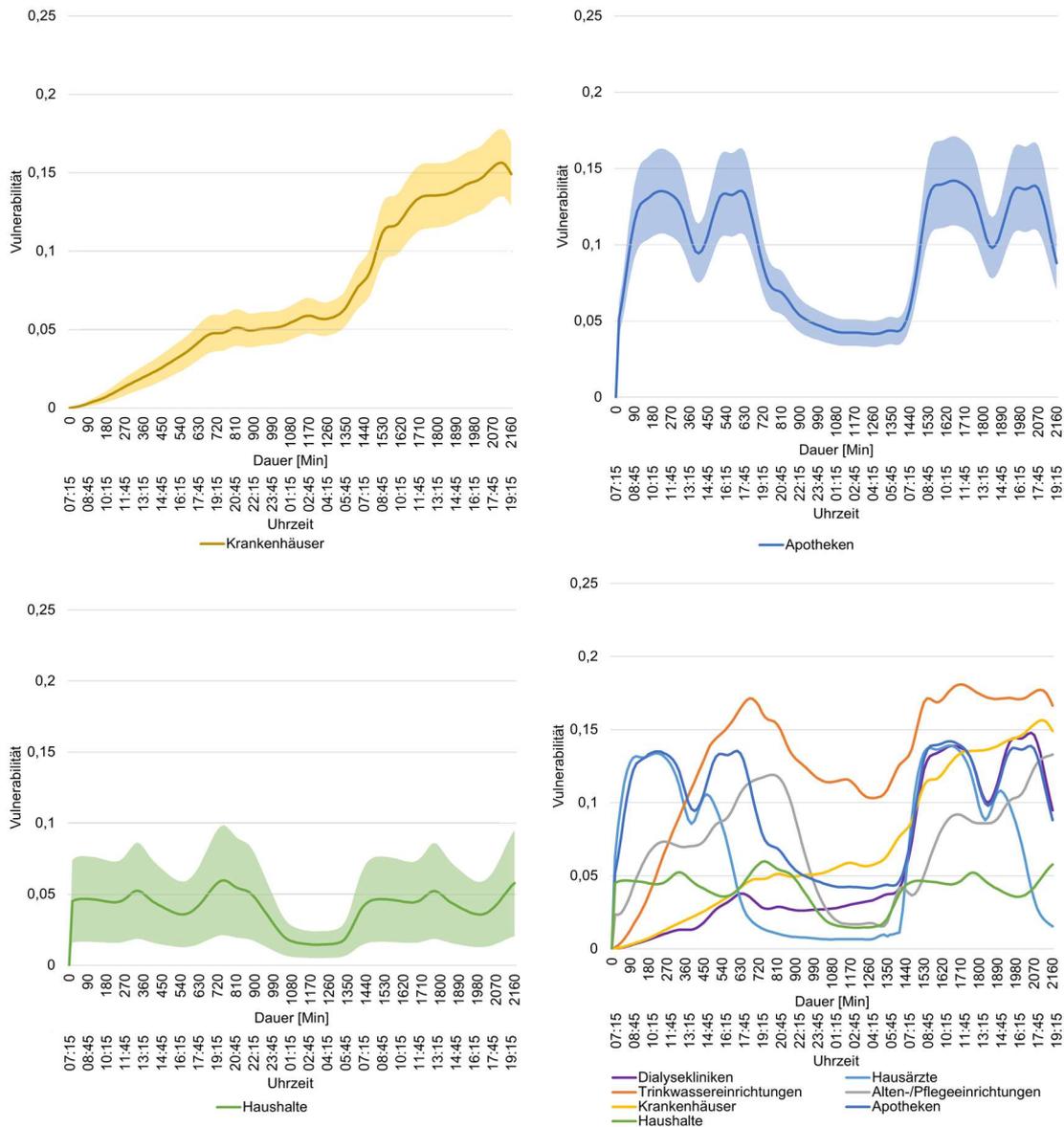


Abbildung 13.14: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Krankenhäuser, Apotheken und Haushalte in Karlsruhe mit Streuung sowie eine Übersicht.

Abbildung 13.15 zeigt die Vulnerabilitätsprofile von ausgewählten Stadtteilen und ihre jeweiligen Streuungen für das gleiche Szenario. Die Abbildung zeigt, dass die Streuungen in Durlach und Grötzingen vergleichsweise klein sind, wohingegen mit anhaltendem Stromausfall die Streuung in der Weststadt leicht steigt. In der Südweststadt sind ebenfalls stärkere Streuungen zu erkennen, jedoch variieren sie im Verlauf des Stromausfalls. Jeweils tagsüber sind größere Streuungen als nachts zu erkennen. Auffällig niedrig erscheint die Streuung beim erheblichen Anstieg der Vulnerabilität zwischen 7:45 Uhr und 9:00 Uhr.

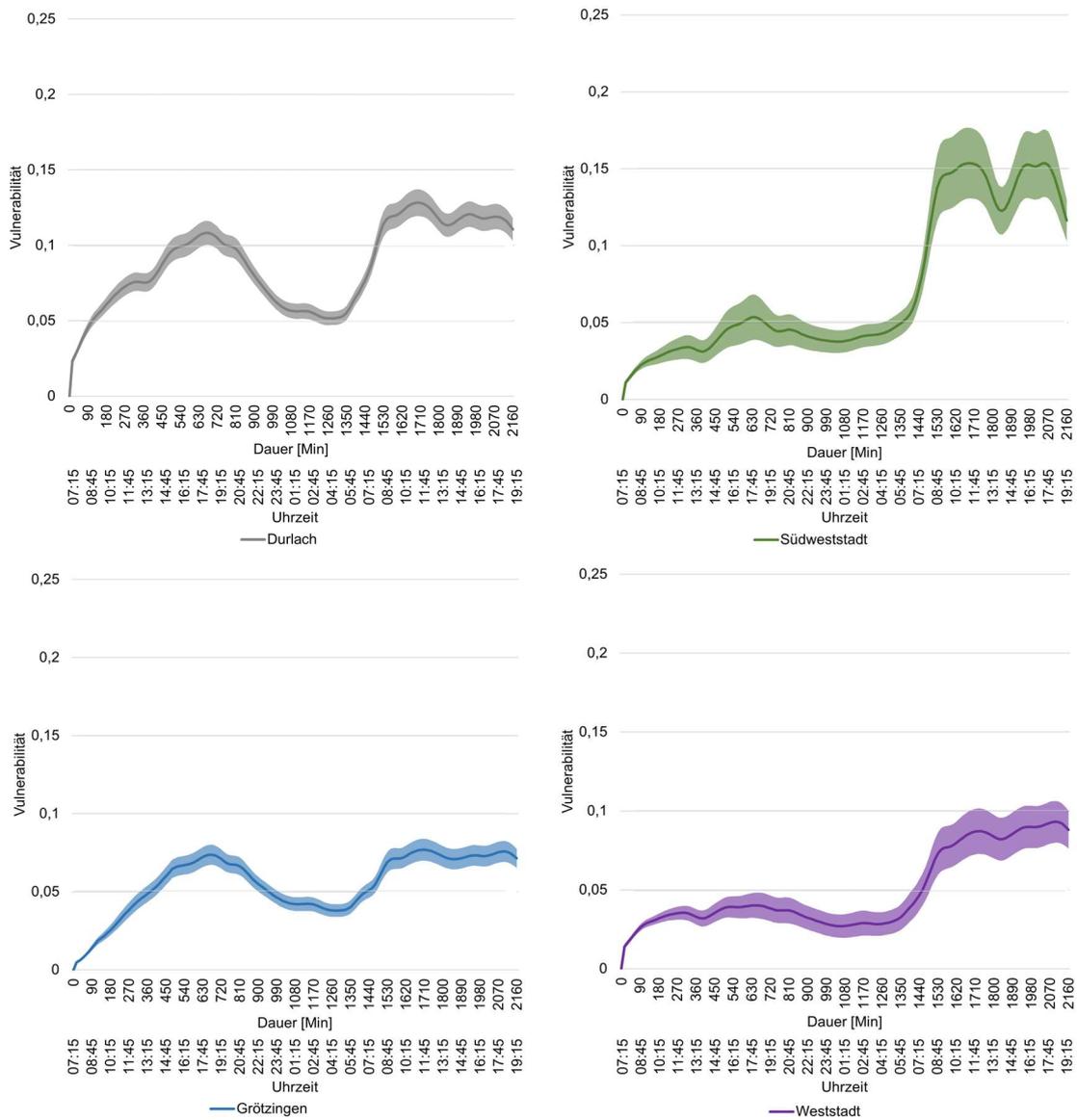


Abbildung 13.15: Vulnerabilitätsverläufe ausgewählter Stadtteile von Karlsruhe mit Streuung.

Durch die dargestellten Streuungen in Abbildung 13.15 werden mögliche Ergebnisabweichungen abgebildet. Gerade bei ähnlichen Verläufen von Vulnerabilitätsprofilen können Unterschiede deutlicher werden. Die Darstellungen der Ergebnisvariationen bilden in diesen Fällen eine zusätzliche Entscheidungsunterstützung.

### 13.2.3 Bewertung der Gefahrenpotentiale

Die Gefahrenpotentiale werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Sensitivität, ihres zeitlichen Verlaufs und der Erreichung von Schutzzielen bewertet.

### 13.2.3.1 Bewertung der Sensitivität gegenüber Änderung der Relevanzgewichtung

Eine Veränderung der Gewichtswerte der berücksichtigten KRITIS-Typen führt zur Veränderung des Resilienzwertes. Durch die Analyse der Sensitivität des Resilienzwertes ist es möglich, die Einflüsse der einzelnen KRITIS-Typen zu beurteilen.

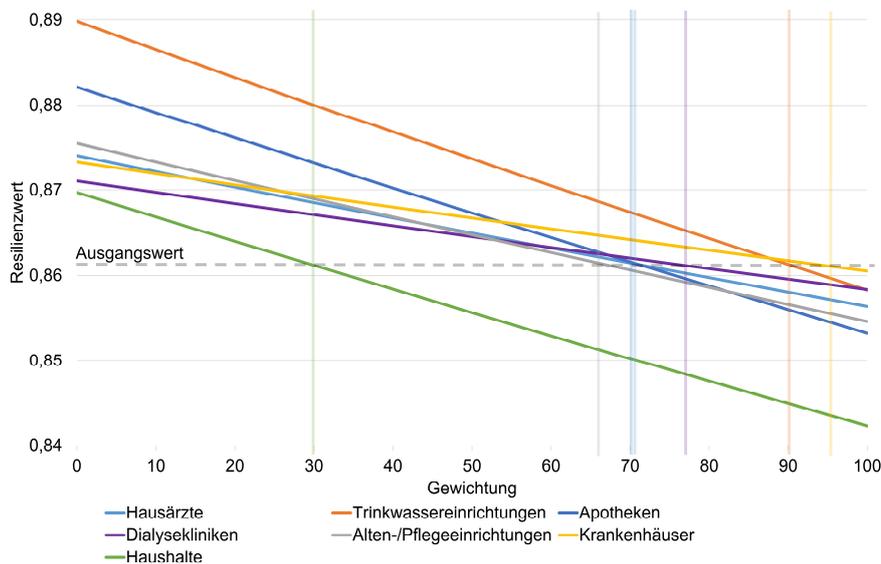


Abbildung 13.16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von geänderten Gewichtswerten im Anwendungsfall Karlsruhe.

Abbildung 13.16 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse im Anwendungsfall Karlsruhe. Vertikale Markierungen in den Farben des jeweiligen KRITIS-Typen zeigen die ursprüngliche Gewichtung der KRITIS-Typen in der Ausgangslage. Sie schneiden jeweils die gestrichelte graue Linie, welche den Ausgangswert des Resilienzwertes bei Verwendung der ursprünglichen Gewichtswerte darstellt.

Deutlich zeigt sich, dass bei Zunahme des Gewichtswertes für Einrichtungen der Trinkwasserversorgung der Resilienzwert äußerst stark sinkt. Im erheblichen Maße lässt sich das auch bei Haushalten und Apotheken beobachten. Diese Einrichtungen können daher als Vulnerabilitätstreiber identifiziert werden.

Demgegenüber verändert sich die Resilienz bei Veränderung der Gewichtswerte für Krankenhäuser und Dialysekliniken nur mäßig. Sie lassen sich daher als Resilienztreiber identifizieren.

### 13.2.3.2 Bewertung zeitlicher Gefahrenpotentiale

Mithilfe von Vulnerabilitätsgradienten werden die zeitlichen Gefahrenpotentiale bewertet. Durch die Bewertung können Plateaus und Tipping Points identifiziert werden. Um dies zu demonstrieren, wird der Verlauf eines am schwerwiegendsten anzunehmenden Ausfallbeginns eines Bemessungsstromausfalls verwendet und Vulnerabilitätsgradienten für die Dauer von vier Stunden berechnet. Für den Stadtkreis Karlsruhe können fünf Plateaus und zwei Tipping Points identifiziert werden.

Während der Dauer eines Stromausfalls zeigen die fünf identifizierten Plateaus die Zeit an, in der sich das Gefahrenpotential nicht wesentlich verändert. Die Plateaus befinden sich am Vormittag und Mittag des ersten Ausfalltages, in der Nacht und am Morgen und Mittag des zweiten Ausfalltages (Abbildung 13.17).

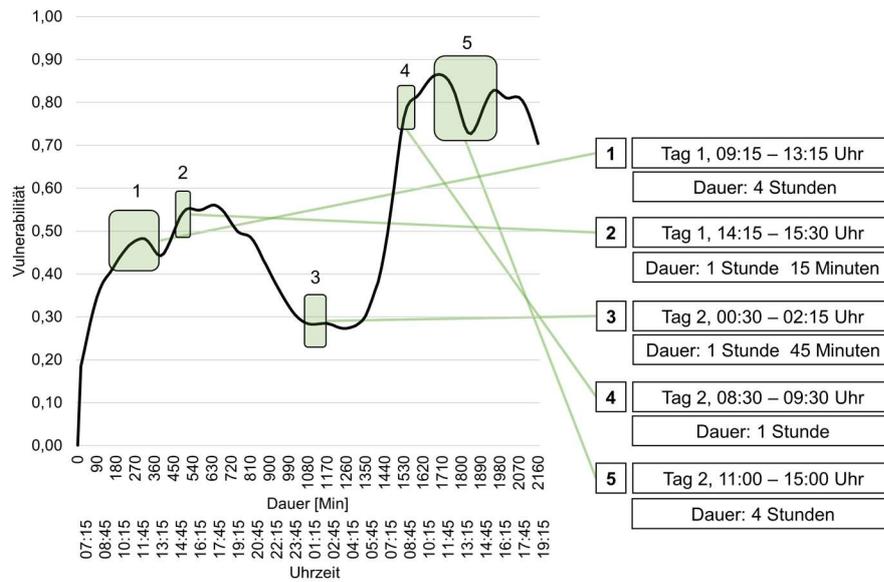


Abbildung 13.17: Identifizierte Plateaus im Anwendungsfall Karlsruhe.

Abbildung 13.17 zeigt die Lage der Plateaus. Am Vormittag und Mittag des ersten Ausfalltages zeigen sich zwei Plateaus, die durch eine tageszeitbedingt gleichbleibend hohe Nachfrage an Dienstleistungen erklärt werden können. Sie werden kurzzeitig über die Mittagszeit unterbrochen. In der Nacht kommt es zu einem weiteren Plateau, was wahrscheinlich auf eine tageszeitbedingt gleichbleibend geringe Nachfrage an Dienstleistungen zurückzuführen ist. Am Morgen und Mittag des zweiten Ausfalltages stellen sich weitere Plateaus ein, deren Amplitude jedoch erheblich höher liegen als die vom Vortag. Zeitlich lassen sie sich wieder mit einer tageszeitbedingt gleichbleibend hohen Nachfrage an Dienstleistungen erklären. Die Höhe ergibt sich aus den Bewältigungsressourcen, die in vielen KRITIS-Einrichtungen zu diesem Zeitpunkt aufgebraucht erscheinen.

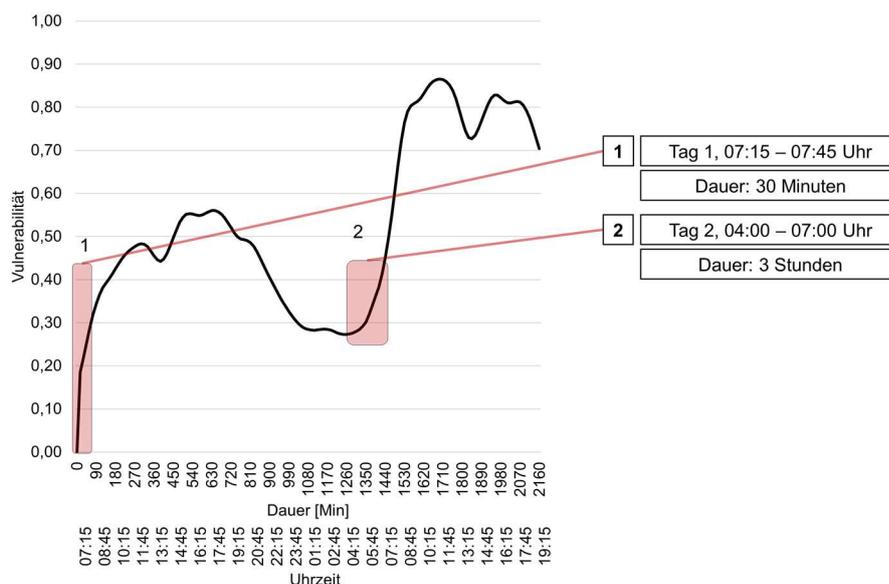


Abbildung 13.18: Identifizierte Tipping Points im Anwendungsfall Karlsruhe.

Des Weiteren können während der Dauer eines Stromausfalls zwei Tipping Points identifiziert werden. Sie markieren Zeitpunkte, in deren Folge sich das Gefahrenpotential erheblich ändert. Die Tipping Points stellen sich zu Beginn des Ausfalls und am frühen Morgen des ersten Ausfalltages ein (Abbildung 13.18).

Abbildung 13.18 zeigt die Lage der Tipping Points. Zu Beginn des Ausfalls kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Vulnerabilität. Dies begründet sich durch die unmittelbare Betroffenheit und die nicht ausreichende Vorbereitung von KRITIS-Einrichtungen. Verstärkt wird der Vulnerabilitätsanstieg durch die tageszeitbedingte Steigerung der Nachfrage an Dienstleistungen. Diese erscheint auch wesentlich Ursache zu sein für den zweiten, weit ausgedehnteren Tipping Point in der Nacht. Verstärkt wird dieser Anstieg durch die jeweilige Vulnerabilität der KRITIS-Einrichtungen, deren Bewältigungsressourcen zu diesem Zeitpunkt weitestgehend verbraucht sind.

### 13.2.3.3 Schutzzielorientierte Bewertung von Gefahrenpotentialen

Die schutzzielorientierte Bewertung wird anhand des schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfalls vorgenommen. Abbildung 13.19 zeigt das Ergebnis der Bewertung für die Stadt Karlsruhe anhand der normalisierten gewünschten und unerwünschten Abweichungen von den KRITIS-Typ-spezifischen Schutzzielen. Es wurde die in Abschnitt 12.5 erörterte Bewertung angewendet.

Das Ergebnis zeigt, dass unmittelbar mit dem Eintritt des Worst-Case-Szenarios das Schutzziel für die Alten-/ Pflegeheime erheblich unterschritten wird. Bereits nach kurzer Ausfalldauer werden die Schutzziele für die Trinkwasserversorgung (45 Minuten), Hausärzte (1 Stunde 45 Minuten) und Apotheken (2 Stunden 45 Minuten) leicht unterschritten. Mit der Dauer des Ausfalls wächst die Unterschreitung bei diesen KRITIS-Typen kontinuierlich an. Aufgrund der Schutzziele bei Apotheken, in denen Öffnungszeiten am Tage und in der Nacht berücksichtigt werden, werden diese Schutzziele für eine kurze Dauer zu Beginn des Abends erfüllt. Bereits nach 12 Stunden sind alle Trinkwassereinrichtungen von einem kompletten Ausfall bedroht. Krankenhäuser und Dialysekliniken dagegen erfüllen im ersten Drittel der Ausfalldauer die an sie gestellten Schutzziele. Nach 7 Stunden und 30 Minuten unterschreiten die Krankenhäuser, nach 10 Stunden und 30 Minuten die Dialysekliniken die jeweiligen Schutzziele.

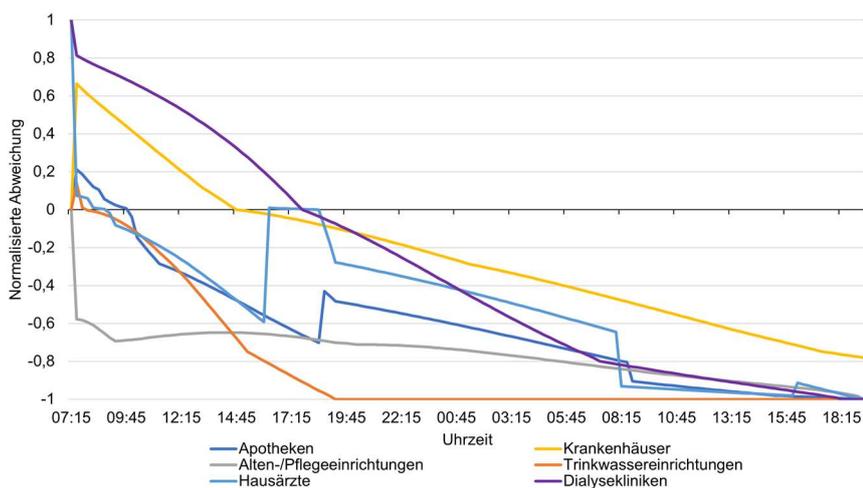


Abbildung 13.19: Ergebnis der schutzzielorientierten Bewertung des Gefahrenpotentials für die Stadt Karlsruhe.

Mithilfe der aggregierten Zielerreichung kann der Einfluss einer Priorisierung der einzelnen Stadtteile analysiert werden (vgl. Abschnitt 12.5). Als Referenz wurde hierfür zunächst die aggregierte Zielerreichung im Basisszenario ermittelt, in dem alle Stadtteile gleichermaßen betroffen sind. Anschließend wurde die aggregierte Zielerreichung für Szenarios berechnet, in denen jeweils ein Stadtteil priorisiert versorgt wird. In Abbildung 13.20 werden die Ergebnisse als Histogramm dargestellt, aus denen auch der Einfluss der einzelnen Stadtteile auf die Zielerreichung bei den einzelnen KRITIS-Typen transparent wird.

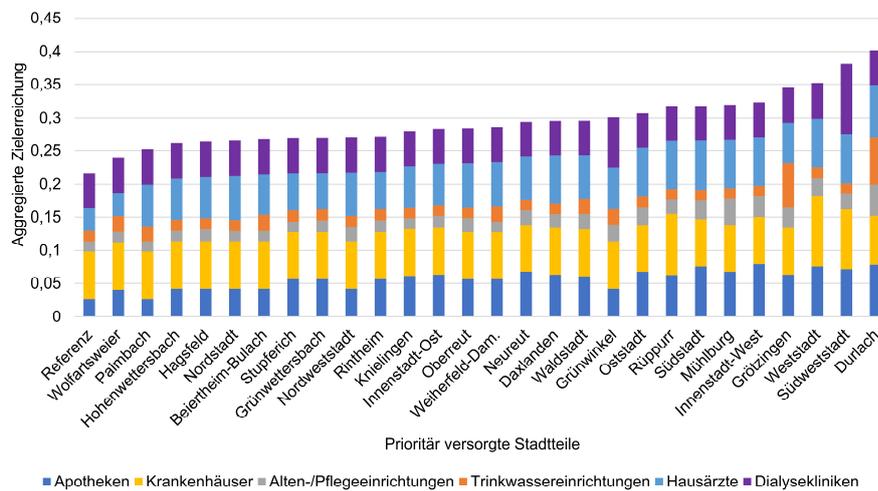


Abbildung 13.20: Histogramm der aggregierten Zielerreichung bei prioritärer Versorgung einzelner Karlsruher Stadtteile.

Anhand dieser räumlichen Analyse lassen sich die Wirkungen einer prioritären Versorgung von Stadtteilen messen und vergleichen. Können nur drei Stadtteile prioritär versorgt werden, lassen sich verschiedene Kombinationen wählen. Werden die Stadtteile mit der höchsten aggregierten Zielerreichung entsprechend dem Histogramm in Abbildung 13.20 ausgewählt, also die Stadtteile Durlach, Südweststadt und Weststadt, zeigt sich die resultierende Zielerreichung in Abbildung 13.21.

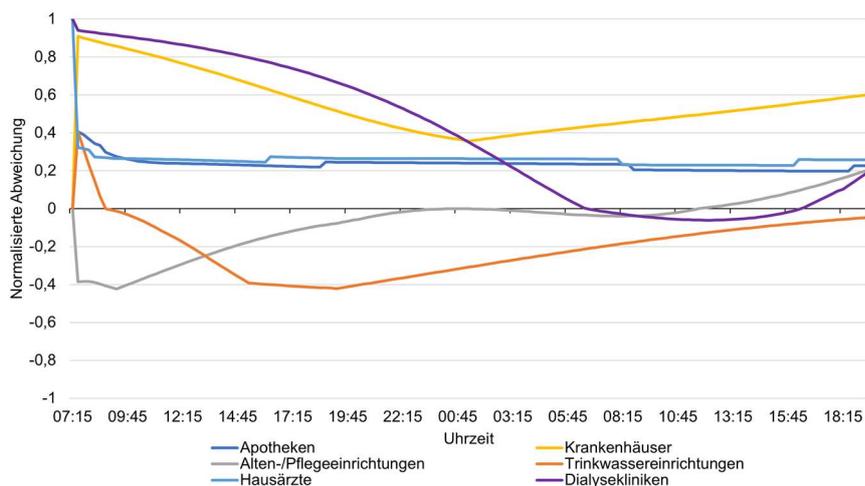


Abbildung 13.21: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Weststadt.

Wenn auch nicht in der Erheblichkeit wie im Worst-Case-Szenario kommt es in diesem Fall trotz der prioritären Versorgung nach wie vor mit Beginn des Stromausfalls zur Unterschreitung des Schutzzieles für Alten- und Pflegeeinrichtungen. Auch die Schutzziele der Trinkwasserversorgung werden ab einer Ausfalldauer von 1 Stunde und 30 Minuten unterschritten. Aufgrund der zeitlichen Änderung der Schutzziele verringern sich die unerwünschten Abweichungen von den Schutzzielen der Alten- und Pflegeeinrichtungen sowie Trinkwasserversorgung. Im weiteren Verlauf kommt es bei Alten- und Pflegeeinrichtungen daher sogar zu einer Erfüllung der Schutzziele.

In der Ergebnisdarstellung des monokriteriellen Erreichungsgrads in Abbildung 13.22 wird deutlich, dass der Stadtteil Grötzingen eine vergleichsweise hohe Zielerreichung bei der Trinkwasserversorgung aufweist. So lässt sich zur prioritären Versorgung alternativ die Kombination der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen wählen. Im Vergleich zur vorgenannten Kombination zeigt sich, dass die Schutzziele für die Trinkwasserversorgung in dieser Kombination erfüllt werden, Krankenhäuser jedoch unerwünscht vom Schutzziel ab einer Ausfalldauer von 11 Stunden 15 Minuten abweichen. Zwar weichen nach wie vor auch die Alten- und Pflegeeinrichtungen vom Schutzziel ab, sie erreichen jedoch wieder ab einer Ausfalldauer von 10 Stunden die Schutzansprüche. Dialysekliniken unterschreiten die Schutzansprüche leicht in der zweiten Hälfte des Bemessungsstromausfalls.

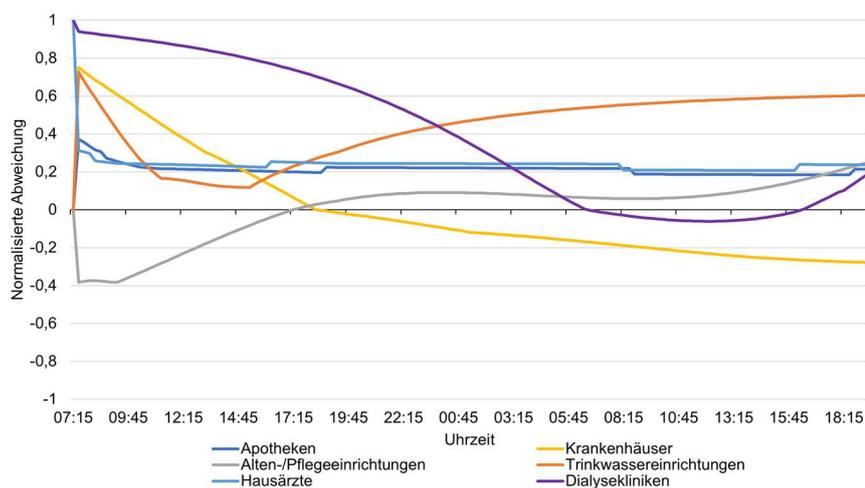


Abbildung 13.22: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtteile Durlach, Südweststadt und Grötzingen.

## 13.2.4 Szenariobasierte Analysen

### 13.2.4.1 Diskriminierende Lastreduzierung unter Berücksichtigung von Gefahrenpotentialen

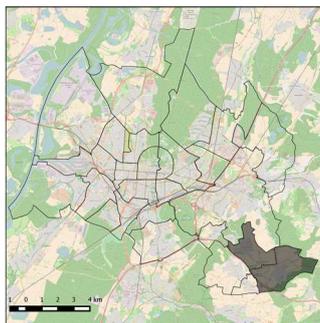
Um die Verwendung der Vulnerabilitätsanalyse für die Zwecke der Lastreduzierung zu demonstrieren, ist zunächst ein entsprechendes Szenario zu definieren. Das angenommene Szenario sieht vor, dass unter Berücksichtigung der Gefahrenpotentiale in den einzelnen Umspannwerkbezirken eine Lastreduzierung für eine Dauer von neun Stunden durchgeführt wird. Dabei sind permanent zwei Umspannwerkbezirke vom Netz zu trennen. Um die Folgen für die Bevölkerung abzumildern, ist die Lastreduzierung rollierend und hinsichtlich des Gefahrenpotentials durch die in den Umspannwerkbezirken verorteten KRITIS-Einrichtungen diskriminierend durchzuführen. Die rollierende Abschaltung wird realisiert, indem für eine Dauer von 90 Minuten jeweils zwei unterschiedliche Umspannwerkbezirke vom Netz getrennt werden.

Die Berücksichtigung des Gefahrenpotentials erfolgt durch die Berechnung des Resilienzwertes der Umspannwerkbezirke für die Dauer und Zeitpunkt der potentiellen Lastreduzierung. Es wird angenommen, dass die Grenzen der Umspannwerkbezirke den Grenzen der Stadtteile entsprechen. Die Lastreduzierung soll entsprechend dem am schwerwiegendsten anzunehmenden Beginn eines Bemessungsstromausfalls an einem Werktag um 7:15 Uhr beginnen und bis 16:15 Uhr andauern. Es wird angenommen, dass ab 16:15 Uhr die vollständige Versorgung wiederhergestellt werden kann.

Abbildung 13.23 zeigt die unterschiedlichen Zeitpunkte, für die ein Wechsel der vom Netz zu reduzierenden Umspannwerkbezirke vorgesehen ist. Die aufgezeigten Stadtteile haben entsprechend ihres Resilienzwertes das geringste Gefahrenpotential und werden für die Lastreduzierung für die jeweiligen Zeitpunkte vorgeschlagen.

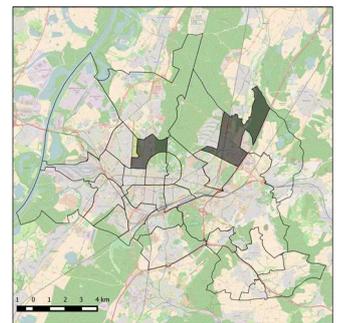
#### Lastreduzierung ab 7:15 Uhr

Hohenwettersbach  
Stupferich



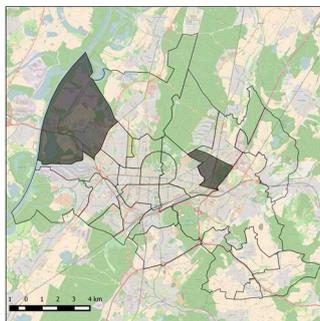
#### Lastreduzierung ab 8:45 Uhr

Nordstadt  
Hagsfeld



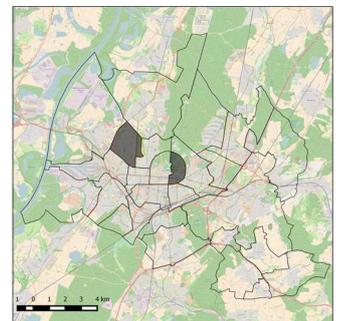
#### Lastreduzierung ab 10:15 Uhr

Rintheim  
Knielingen



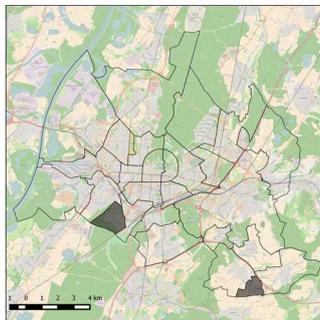
#### Lastreduzierung ab 11:45 Uhr

Innenstadt-Ost  
Nordweststadt



#### Lastreduzierung ab 13:15 Uhr

Oberreut  
Palmbach



#### Lastreduzierung ab 14:45 Uhr

Wolfartsweier  
Daxlanden

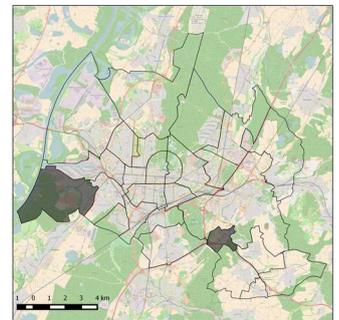


Abbildung 13.23: Übersicht der vom Netz zu trennenden Umspannwerkbezirke bei Lastreduzierung im Stadtkreis Karlsruhe.

13.2.4.2 Reale Stromausfälle in Karlsruhe

Die am Mittwoch, 30. Januar 2008, und am Sonntag, 3. November 2012 stattgefundenen Stromausfälle in Karlsruhe werden nachfolgend näher beleuchtet (Abbildung 13.24 und Abbildung 13.25).

Datum: Mittwoch, 30. Januar 2008  
 Beginn: 17:36 Uhr  
 Dauer: 1,5 Stunden  
 Betroffene: Gesamtes Stadtgebiet  
 Stadtteile:   
 Ursache: Brand eines 110-Kilovolt-Meßwandlers in einem Hochspannungstransformator im Umspannwerk

Quelle: ka-news.de (2008)

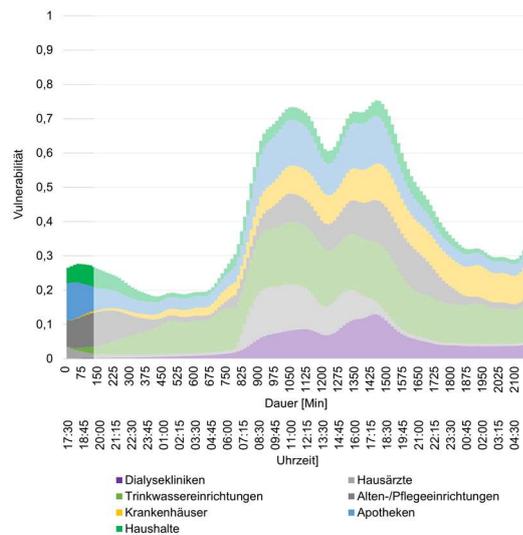
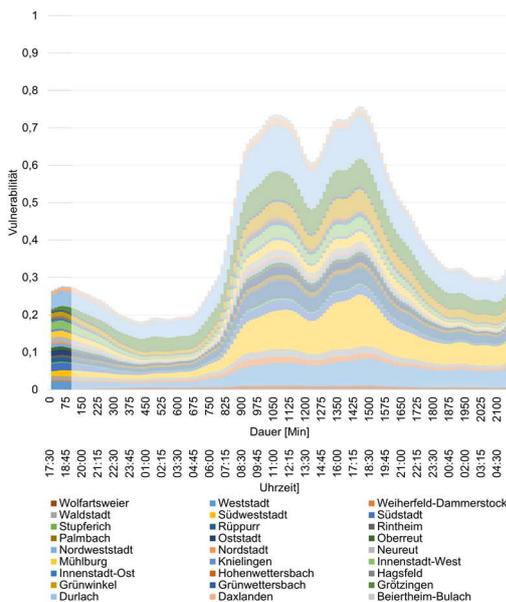
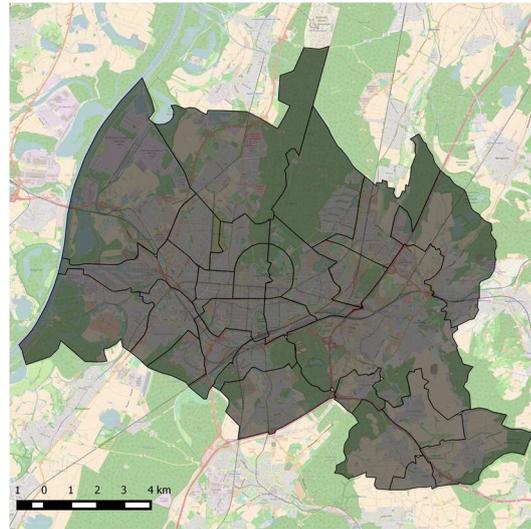


Abbildung 13.24: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 30. Januar 2008 in Karlsruhe.

Der am 30. Januar 2008 stattgefunden Stromausfall betraf alle Stadtteile und dauerte mit 90 Minuten vergleichsweise kurz. Die Erkenntnisse der Vulnerabilitätsanalyse zeigen in Abbildung 13.24, dass durch den vorabendlichen Ausfallbeginn die Ausprägung des stadtweiten Gefahrenpotentials in den ersten Stunden bis zum nächsten Morgen mäßig ist. Erst am darauffolgenden Morgen kommt es zu einem erheblichen Anstieg der Gesamtvulnerabilität. Die Ergebnisse zeigen die raumzeitliche Entwicklung und die Zusammensetzung der Vulnerabilität. Bis zum erheblichen Anstieg am ersten Morgen verläuft die Vulnerabilität der einzelnen Stadtteile vergleichsweise gleichartig. Erst dann zeigt sich, dass der Einfluss in den Stadtteilen Südweststadt, Weststadt und Durlach erheblich an Einfluss gewinnt. Zu Beginn treiben insbesondere die Apotheken die Vulnerabilität in die Höhe. Bis zum Morgen des ersten Ausfalltages steigt die

Vulnerabilität der Trinkwasserversorgung und der Hausärzte erheblich an. Dialysekliniken sind in der ersten Nachtphase des Ausfalls aufgrund des niedrigen Gefahrenpotentials zu vernachlässigen, ihr Gefahrenpotentials steigt dann aber im weiteren Verlauf des darauffolgenden Ausfalltages. Entsprechend dieser Erkenntnisse lassen sich Einsatzschwerpunkte und einrichtungsspezifische Maßnahmen ableiten.

Datum: Sonntag, 3. November 2012  
 Beginn: 0:29 Uhr  
 Dauer: bis 2:04 Uhr  
 Betroffene Stadtteile: Durlach, Rüppurr, Weiherfeld und der Südstadt  
 Ursache: Fehler an einem 20-kV-Kabel

Quelle: ka-news.de (2012)

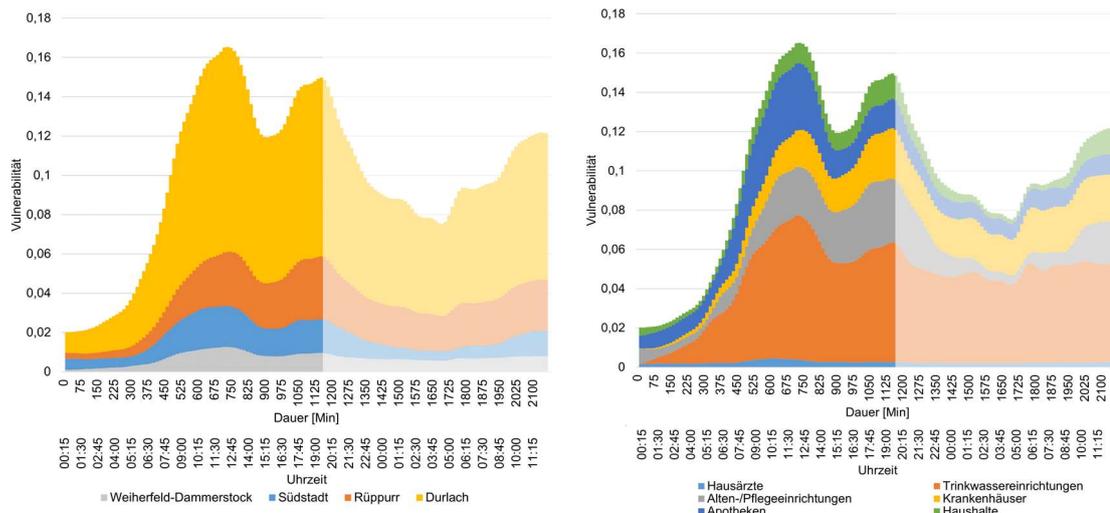
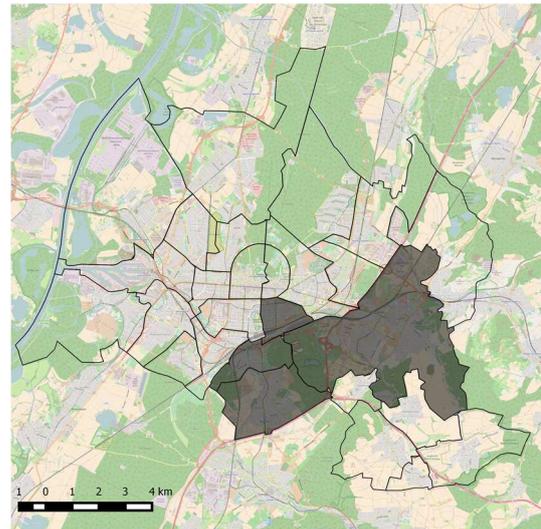


Abbildung 13.25: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 3. November 2012 in Karlsruhe.

Der am 3. November 2012 stattgefundenen Stromausfall in Karlsruhe betraf die vier Stadtteile Durlach, Rüppurr, Weiherfeld und die Südstadt. Die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse zeigen in Abbildung 13.25, dass der stärkste raumzeitliche Einfluss auf das gesamtstädtische Gefahrenpotential von den KRITIS-Einrichtungen in Durlach ausgeht. Die Betrachtung der Einflüsse der einzelnen KRITIS-Typen zeigt wiederum den erheblichen Einfluss auf die Trinkwasserversorgung. Um eine wirksame Abwehr von Gefahren sicherzustellen, lassen sich entsprechende Einsatzschwerpunkte bilden.

### 13.3 Anwendungsfall Stadtkreis Mannheim

Der Stadtkreis Mannheim (kreisfreie Stadt) ist die drittgrößte Stadt in Baden-Württemberg. Sie liegt im unmittelbaren Dreiländereck von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen. Mehr als 300.000 Einwohner leben in Mannheim verteilt auf insgesamt 17 Stadtbezirke.

Städtebaulich ist Mannheim geprägt von seiner gitter- und quadratförmigen Innenstadt mit Häuserblöcken. Durch die Stadt fließt der Neckar. Nach mehreren kommunalen Neugliederungen wurden umliegende Ortschaften eingemeindet. Eine städtebauliche Besonderheit liegt in der räumlichen Verflechtung mit der angrenzenden rheinland-pfälzischen Stadt Ludwigshafen am Rhein. Die beiden Städte bilden ein zusammenhängendes Stadtgebiet, welches geografisch durch den Rhein getrennt wird.

Mannheim liegt im Zentrum der Metropolregion Rhein-Neckar, wodurch raumplanerische Verflechtungen in Gemeinden nach Hessen und Rheinland-Pfalz vorliegen. Die Stadt Mannheim ist als Oberzentrum in der Region Mittlerer Oberrhein ausgewiesen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2002).

In der nachfolgenden Analyse werden

- fünf Krankenhäuser,
- sieben Dialysekliniken,
- 29 Alten- und Pflegeheime,
- 15 Einrichtungen „Betreutes Wohnen“,
- 90 Apotheken,
- 109 Hausärzte und
- 173.533 Haushalte

berücksichtigt. Abbildung 13.26 zeigt die Standorte dieser 255 KRITIS-Einrichtungen im Stadtgebiet Mannheim (ohne Haushalte).

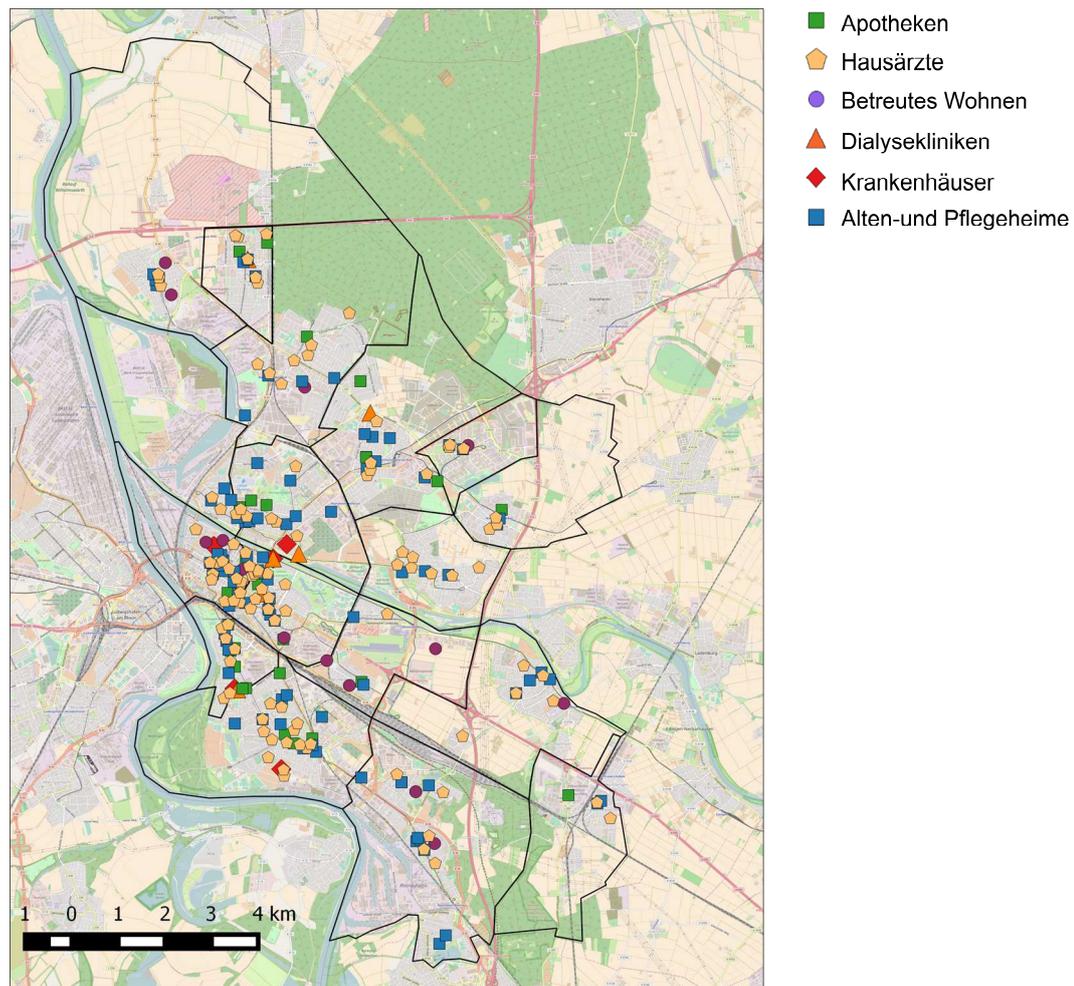


Abbildung 13.26: Standorte von KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim.

Die für die Durchführung der Analyse notwendigen Daten aller Einrichtungen der berücksichtigten KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim entstammen dem KRITIS-Kataster Mannheim. Ein im Entwurf befindliches KRITIS-Kataster Mannheim wurde vom Amt 37 Feuerwehr und Katastrophenschutz der Stadt Mannheim erarbeitet und zur Entwicklung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt.

Im öffentlichen Interesse, im Interesse des Amtes 37 und im Interesse der Betreiber der KRITIS-Einrichtungen wurden Daten des KRITIS-Katasters Mannheim weitgehend abgeändert, verzerrt und anonymisiert. Standortdaten sind nur enthalten, sofern sie auch in öffentlich zugänglichen Informationsquellen ausgewiesen sind. Sensible und betriebsinterne Daten wie die Betriebsdauer der Notversorgung und Vergleichsattribute zur Größe der Einrichtungen lagen zwar mit dem durch die Stadt Mannheim erstellten Kataster vor, wurden aber verfälscht und durch fiktive Daten ersetzt. Insofern stellen auch in diesem Fall die nachfolgenden Ergebnisse nur bedingt reale Sachverhalte dar und dienen ausschließlich dem Zweck der Demonstration.

### 13.3.1 Schwerwiegendster und mildester Ausfallbeginn

Tabelle 18 zeigt jeweils die fünf schwerwiegendsten und mildesten Startzeitpunkte eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim, die anhand des Resilienzwertes bestimmt wurden.

Tabelle 18: Übersicht der jeweils fünf schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginne eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim.

Der am schwerwiegendsten anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls				Der am mildesten anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls			
Rang	Saison	Typtage	Uhrzeit	Rang	Saison	Typtage	Uhrzeit
1	Sommer	3 Werktage	7:30 Uhr	1	Winter	Sa/So/Mo	19:00 Uhr
2	Herbst	3 Werktage	7:15 Uhr	2	Winter	Sa/So/Mo	18:45 Uhr
3	Herbst	3 Werktage	7:30 Uhr	3	Winter	Sa/So/Mo	19:15 Uhr
4	Sommer	3 Werktage	7:15 Uhr	4	Winter	Sa/So/Mo	18:30 Uhr
5	Sommer	3 Werktage	7:45 Uhr	5	Winter	Sa/So/Mo	19:30 Uhr

Der schwerwiegendste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim ist um 7:30 Uhr an einen Werktag im Sommer, auf den zwei weitere Werktage folgen. Der mildeste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls ist um 19:00 Uhr an einen Samstag im Winter.

Abbildung 13.27 zeigt den Verlauf der Vulnerabilität über die Dauer des am schwerwiegendsten und am mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim. Beide Verläufe zeigen Ähnlichkeiten mit den Verläufen im Stadtkreis Karlsruhe. Auch hier wirkt der am schwerwiegendsten anzunehmende Bemessungsstromausfall an Tagen, an denen die Versorgungsleistung von KRITIS-Einrichtungen vergleichbar hoch ist. An beiden Tagen kommt es zu Spitzen der Versorgungsleistung zur jeweiligen Tagesmitte. Im Vergleich zu den Ergebnissen in der Stadt Karlsruhe beginnt der schwerwiegendste anzunehmende Bemessungsstromausfall etwas später am Morgen. Gleichwohl wirkt er sich auch in diesem Fall auf die Versorgungsspitzen der jeweils betroffenen Tage aus.

Zu Beginn des ersten Ausfalltages kann die Höhe der Vulnerabilität bedingt gedämpft werden, so dass die erste Spitze gegenüber der zweiten am darauffolgenden Tag ein wenig schwächer ausfällt. Hierbei zeigen sich die Wirkungen der vorgehaltenen Bewältigungsressourcen, die jedoch im Laufe der Dauer des Ausfalls verzehrt werden.

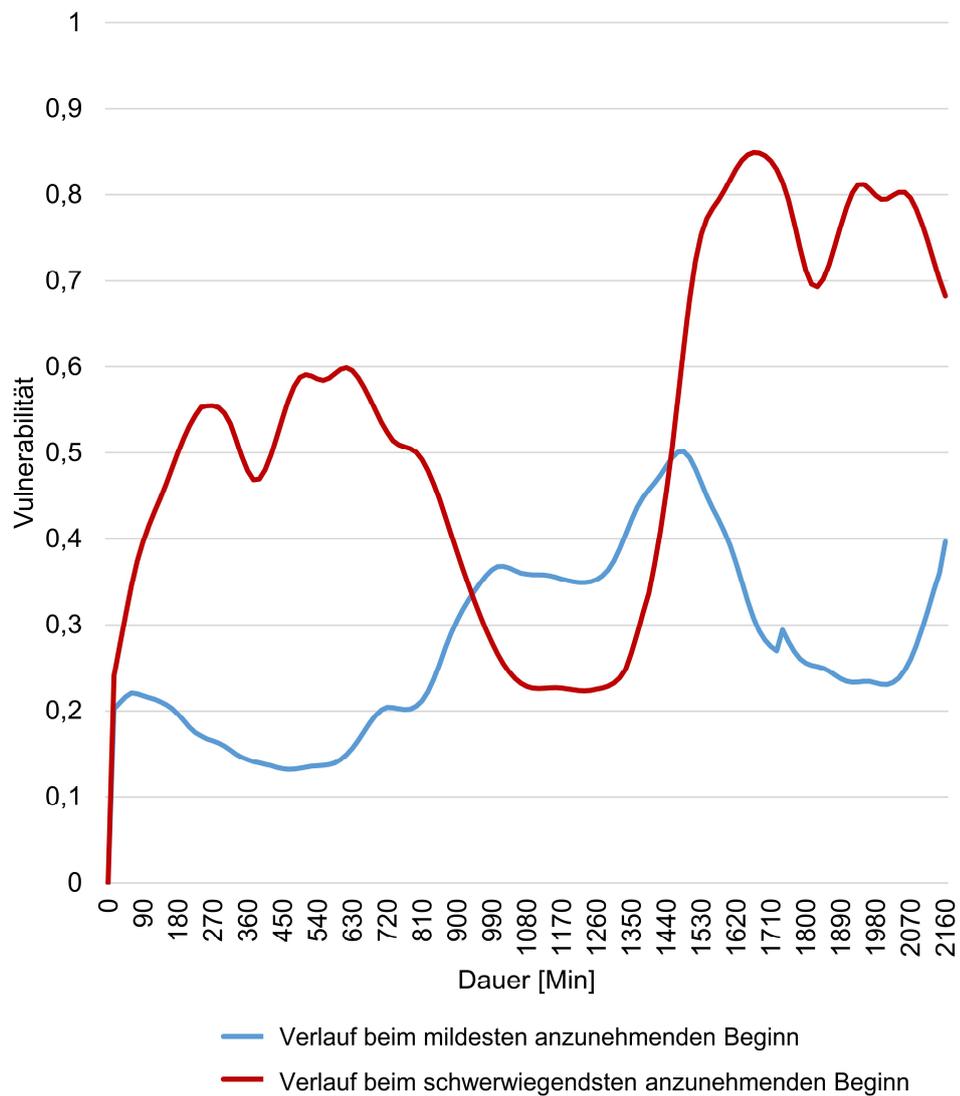


Abbildung 13.27: Verlauf des am schwerwiegendsten und mildesten anzunehmenden Beginns eines Bemessungsstromausfalls im Stadtkreis Mannheim.

Auch an diesem Beispiel zeigt sich, dass über Nacht die Vulnerabilität bedingt durch die rückläufige Versorgungsleistung sinkt. Sie steigt am Morgen des folgenden Ausfalltages schlagartig an.

Der mildeste anzunehmende Beginn eines Bemessungsstromausfalls beginnt auch hier am Wochenende an einem Samstagabend im Winter. Die samstägige Versorgungsspitze zur Mittagszeit wird wieder weitestgehend kompensiert durch die Wirkungen von Bewältigungsressourcen, so dass zu dieser Zeit nur mäßige Vulnerabilitätswerte erreicht werden. Im Vergleich zum schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall erreicht auch dieser Ausfall geringere Vulnerabilitätswerte.

## 13.3.2 Gefahrenpotentiale im Stadtkreis Mannheim

### 13.3.2.1 Gefahrenpotentiale nach KRITIS-Typen

Abbildung 13.28 zeigt den Verlauf der Vulnerabilität für die berücksichtigten KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim für den am schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall.

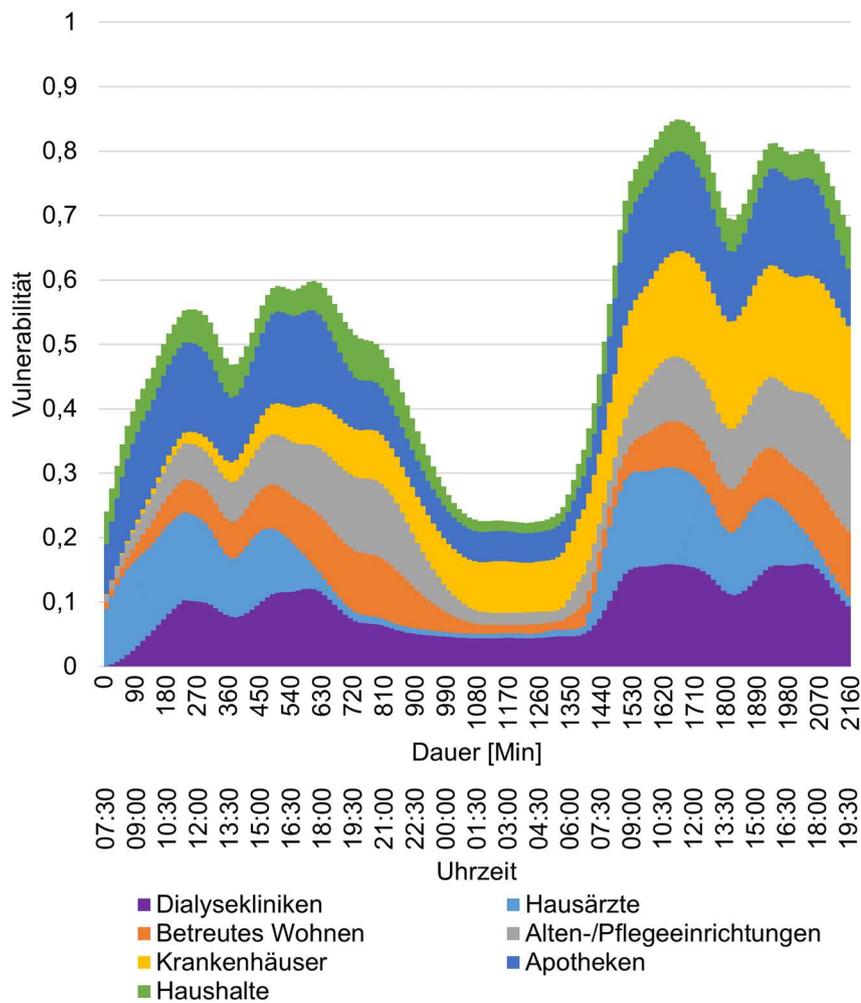


Abbildung 13.28: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim.

Aus Abbildung 13.28 werden die zeitlichen Vulnerabilitätsprofile der einzelnen KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim deutlich.

Basierend auf den Vulnerabilitätsverläufen kann mithilfe des Resilienzwertes eine Rangliste der KRITIS-Typen entsprechend ihres Gefahrenpotentials erstellt werden (s. Tabelle 19). Je niedriger der Rang ist, desto höher ist das Gefahrenpotential.

Tabelle 19: Rangliste der KRITIS-Typen nach Gefahrenpotential.

Rang	KRITIS-Typ
1	Apotheken
2	Krankenhäuser
3	Dialysekliniken
4	Alten-/Pflegeeinrichtungen
5	Hausärzte
6	Betreutes Wohnen
7	Haushalte

Die Berechnung des Resilienzwertes zeigt, dass der größte Einfluss auf das gesamtstädtische Gefahrenpotential von den Apotheken ausgeht. Schon früh nach dem Ausfallbeginn zeigen sich bei ihnen vergleichsweise hohe Vulnerabilitätswerte. Erst später zeigt sich ein Anstieg der Vulnerabilität auch bei den Hausärzten und Dialysekliniken. Zu Beginn des Ausfalls erreichen die Haushalte hohe Werte, die jedoch in den Abend- und Nachtstunden stark sinken. Erst nach den ersten Ausfallstunden erreichen die Dialysekliniken ebenfalls erheblich hohe Werte. Demgegenüber erscheint die Höhe der Vulnerabilität bei den Krankenhäusern am ersten Ausfalltag fast unerheblich. Sie steigt erst im Laufe des zweiten Ausfalltages stark an.

Auch in diesem Anwendungsbeispiel zeigt erst eine Aggregation ohne die Versorgungsleistung, inwieweit die KRITIS-Einrichtungen eines Typs noch aufrechterhalten bleiben. Abbildung 13.29 zeigt das Ergebnis des Verlaufs der Vulnerabilität für die KRITIS-Typen ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung für den Stadtkreis Mannheim.

In Abbildung 13.29 wird deutlich, dass alle Haushalte, Dialysekliniken und Einrichtungen des Betreuten Wohnens im Betrachtungszeitraum des Bemessungsstromausfalls vollständig ihre Bewältigungsressourcen aufbrauchen.

Wie im Stadtkreis Karlsruhe werden für Haushalte auch im Beispiel des Stadtkreises Mannheim keine Bewältigungsressourcen angenommen, so dass ihre Vulnerabilität bereits mit dem Ausfallbeginn auf die höchst mögliche Ausprägung ansteigt und einen konstanten Wert annimmt. Bei Dialysekliniken und Einrichtungen des Betreuten Wohnens steigt die Vulnerabilität stark an, bevor hier um 7:30 Uhr bzw. 1440 Minuten (24 Stunden) nach Ausfallbeginn bei allen Einrichtungen dieses KRITIS-Typs alle Bewältigungsressourcen aufgebraucht sind. Bei allen anderen KRITIS-Typen existieren Einrichtungen, deren Bewältigungsressourcen einen längeren kontinuierlichen Betrieb sicherstellen als die Dauer des Bemessungsstromausfalls.

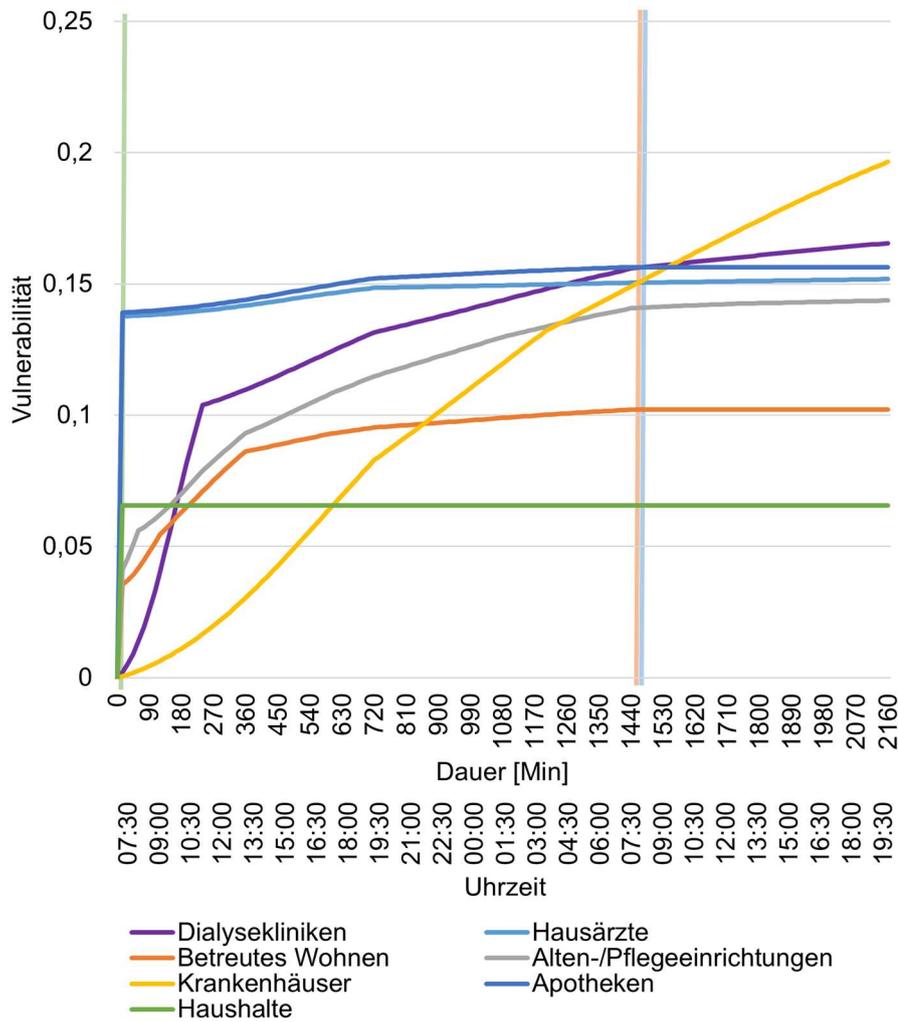


Abbildung 13.29: Vulnerabilitätsverlauf von KRITIS-Typen im Stadtkreis Mannheim ohne die Berücksichtigung von Versorgungsleistungen.

### 13.3.2.2 Gefahrenpotentiale nach KRITIS-Einrichtungen

Mithilfe der Standorte der KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim kann eine Heat Map Standortdichte erstellt werden (Abbildung 13.30).

Abbildung 13.30 zeigt eine sehr markante zusammenhängende Standortdichte von KRITIS-Einrichtungen in Schwetzingenstadt/Oststadt und der Innenstadt/Jungbusch. Darüber hinaus lassen sich in allen Stadtbezirken geringere markante Orte als Punktdichten erkennen.

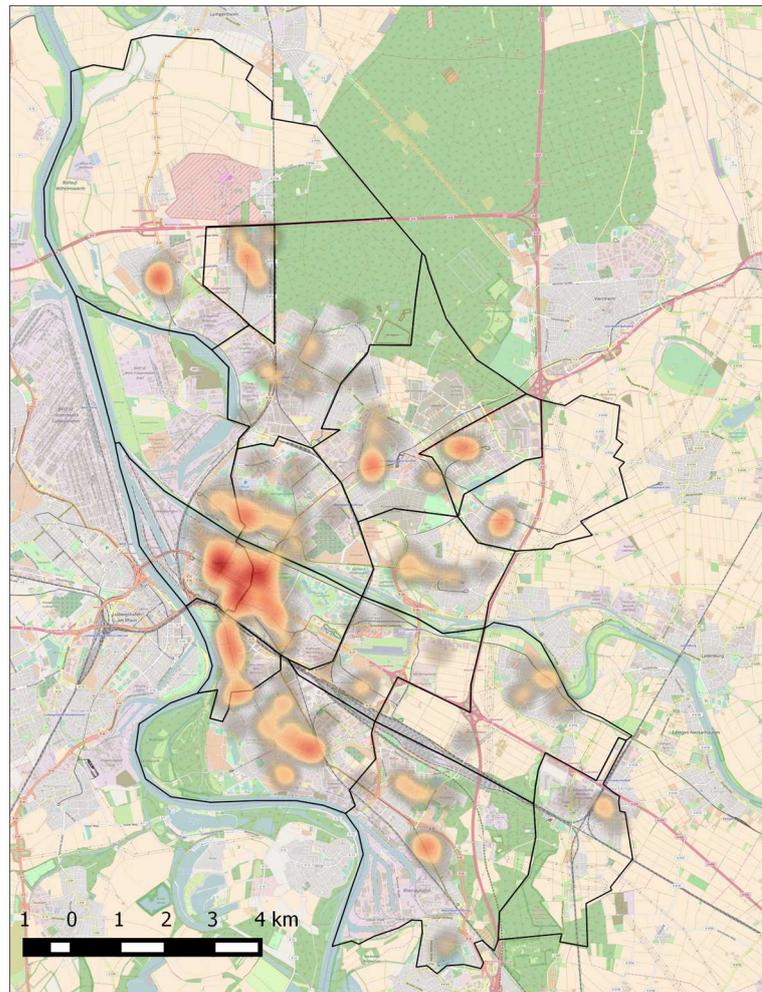


Abbildung 13.30: Heat Map Standortdichte der berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim.

Um die zeitliche Analyse der Gefahrenpotentiale von einzelnen KRITIS-Typen zu demonstrieren, zeigt Abbildung 13.31 das Ergebnis einer Aggregation, in der die Vulnerabilitätsprofile der Mannheimer Krankenhäuser als gestapeltes Balkendiagramm (links) bzw. als Liniendiagramm (rechts) dargestellt werden.

Abbildung 13.31 zeigt, dass im Vergleich zu anderen Krankenhäusern das Krankenhaus 5 am ersten Ausfalltag im Stadtkreis Mannheim die höchsten Vulnerabilitätswerte erreicht. Betriebsbedingt sinkt die Vulnerabilität in den Abend- und Nachtstunden auf ein ähnliches Niveau wie die Krankenhäuser 3 und 4. In den ersten ca. 17 Stunden (bzw. 1080 Minuten, um 0:30 Uhr des zweiten Ausfalltages) wäre demnach eine erhöhte Aufmerksamkeit auf das Krankenhaus 5 zu legen. Ähnlich wie im Stadtkreis Karlsruhe steigt im weiteren Verlauf des Ausfalls jedoch die Vulnerabilität eines Krankenhauses erheblich an. In Mannheim zeigt sich dies beim Krankenhaus 3. Entsprechend ist die Aufmerksamkeit auf diese Einrichtung anzupassen.

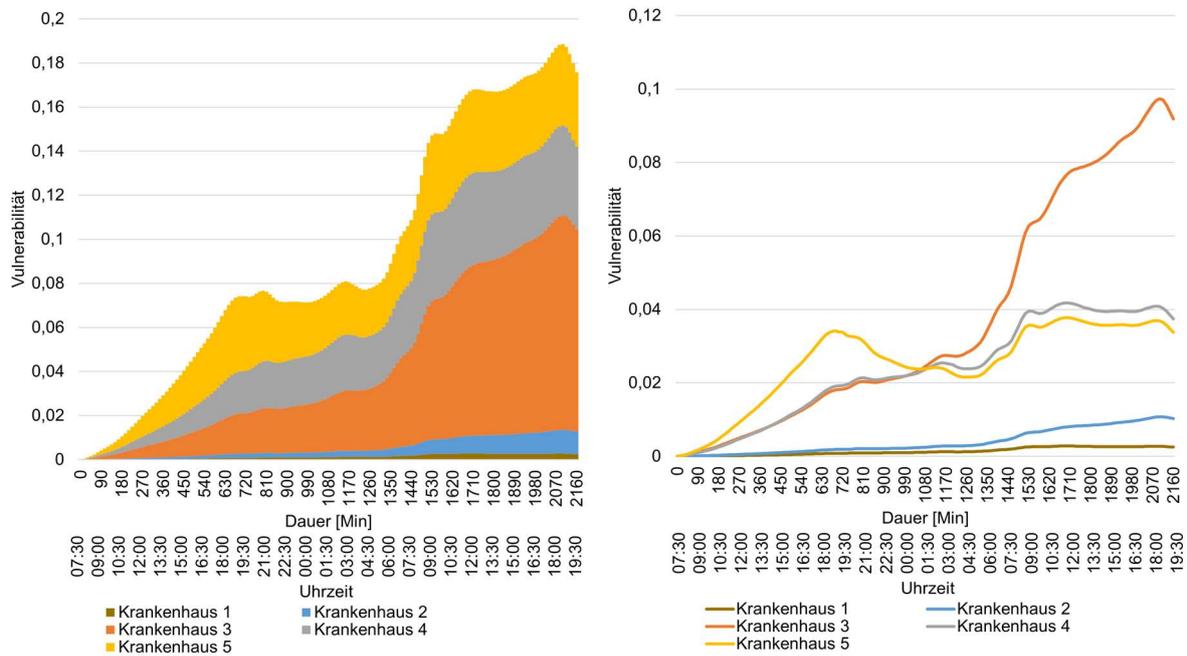


Abbildung 13.31: Verlauf der Vulnerabilität der Mannheimer Krankenhäuser.

Auch in diesem Fall ermöglicht eine Aggregation auf der Ebene der KRITIS-Einrichtung ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung weitere Erkenntnisse (Abbildung 13.32).

In Abbildung 13.32 wird anhand der vertikalen Kennzeichnung deutlich, dass bereits

- Krankenhaus 5 nach einer Ausfalldauer von 12 Stunden (bzw. 720 Minuten, um 19:30 Uhr des ersten Ausfalltages),
- Krankenhaus 4 nach 20 Stunden (bzw. 1200 Minuten, um 3:30 Uhr des zweiten Ausfalltages) und
- Krankenhaus 1 nach 26 Stunden (bzw. 1560 Minuten, um 9:30 Uhr des zweiten Ausfalltages)

ihren höchsten Vulnerabilitätswert erreicht haben und nach diesen Zeitpunkten nicht mehr über die Fähigkeit einer kontinuierlichen Versorgung verfügen. Dies ist bei der Wahl geeigneter Maßnahmen ebenfalls zu berücksichtigen.

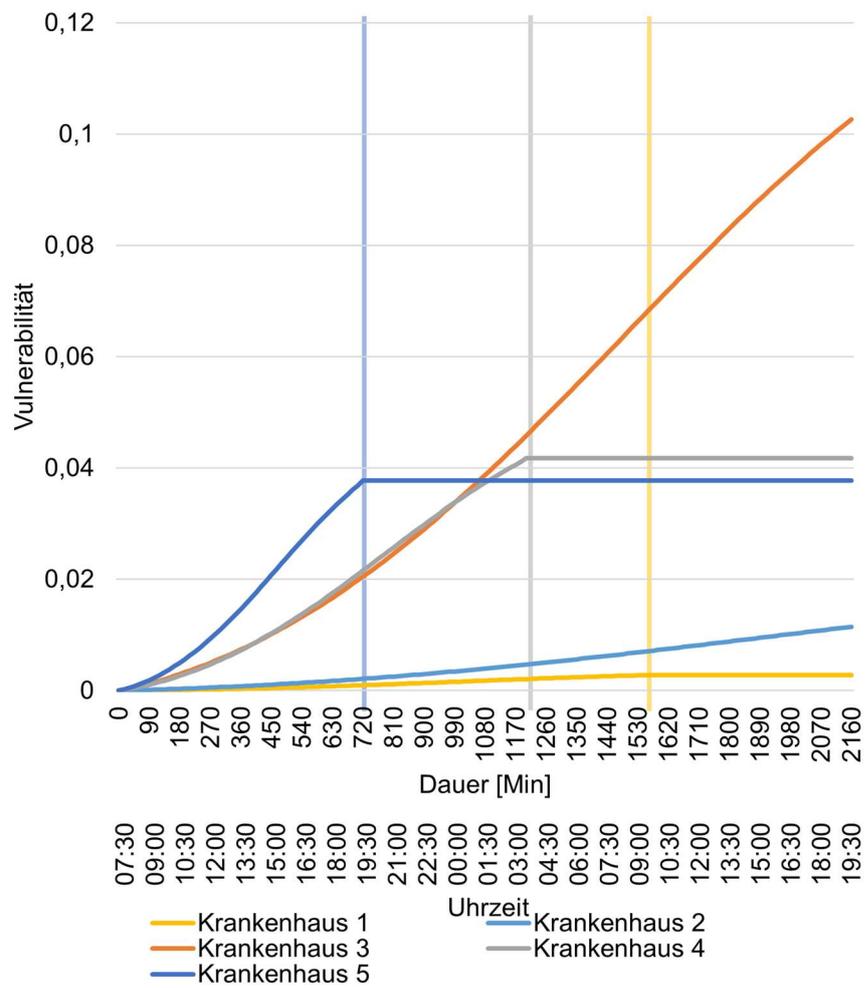


Abbildung 13.32: Verlauf der Vulnerabilität aller Mannheimer Krankenhäuser ohne die Berücksichtigung der Versorgungsleistung.

Auch in diesem Anwendungsfall kann für jede KRITIS-Einrichtung der Resilienzwert berechnet und in der Darstellung einer Heat Map Vulnerabilitätsdichte berücksichtigt werden (Abbildung 13.33).

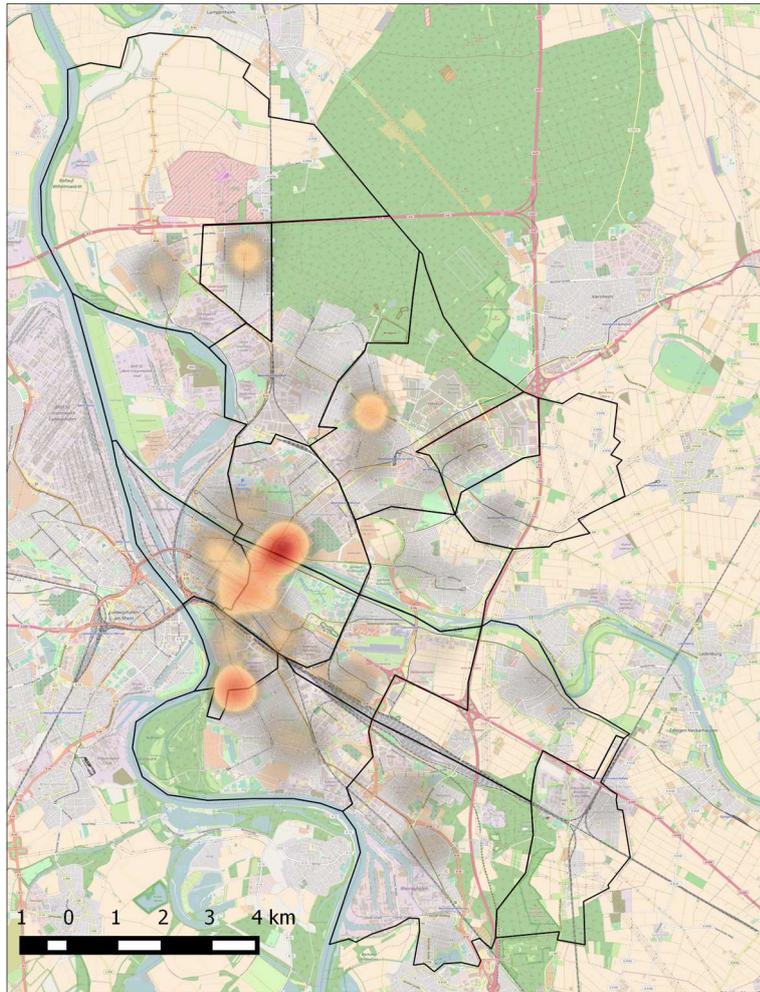


Abbildung 13.33: Heat Map Vulnerabilitätsdichte für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen im Stadtkreis Mannheim.

### 13.3.2.3 Gefahrenpotentiale nach Stadtteilen

Abbildung 13.34 zeigt eine Aggregation der Vulnerabilität der Mannheimer Stadtbezirke für den am schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall.

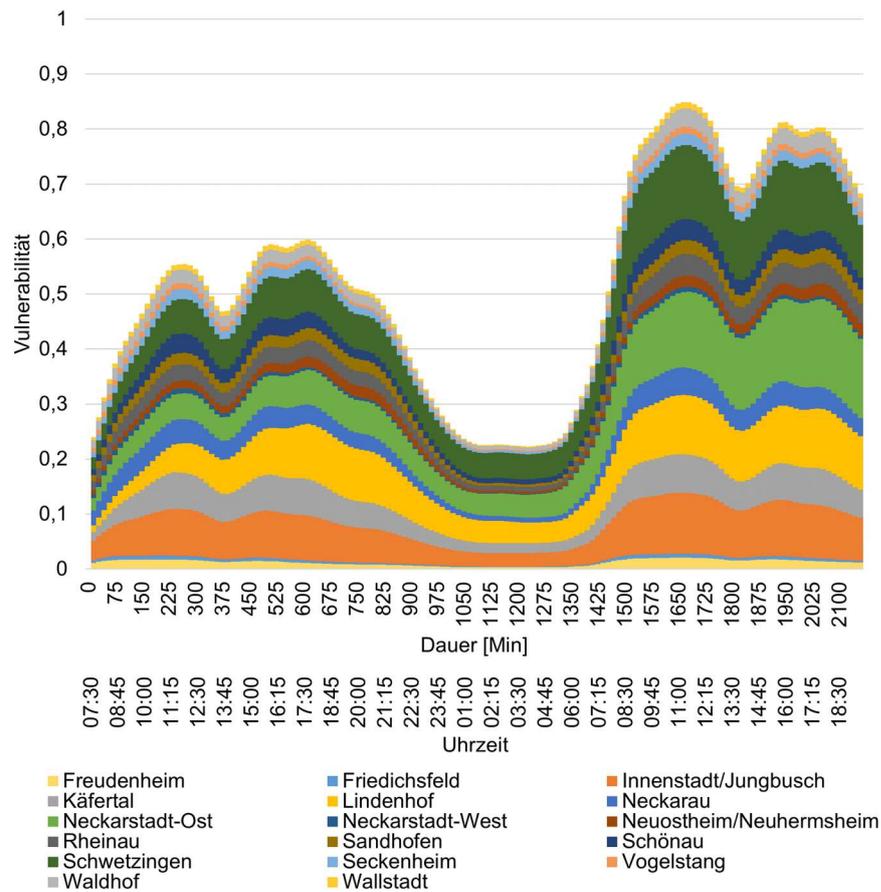


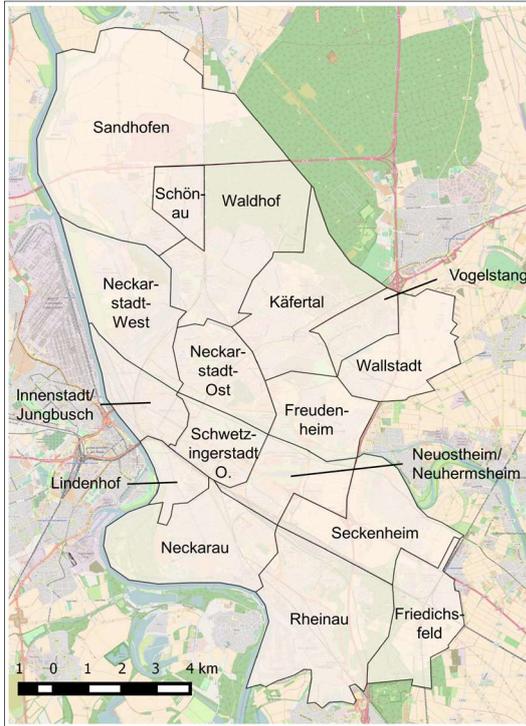
Abbildung 13.34: Vulnerabilitätsverlauf der Mannheimer Stadtbezirke.

Die Tabelle 20 zeigt eine Rangliste der Mannheimer Stadtbezirke entsprechend ihres Gefahrenpotentials für den für schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall. Das Gefahrenpotential wurde aus der Berechnung des Resilienzwertes abgeleitet.

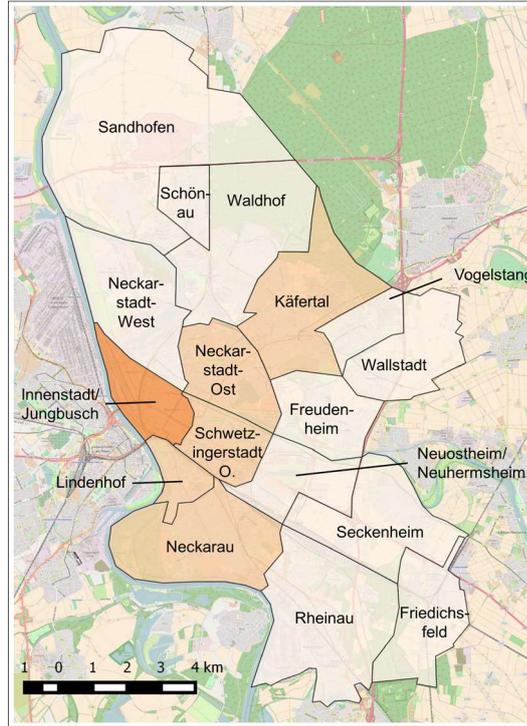
Tabelle 20: Rangliste der Stadtbezirke von Mannheim nach Gefahrenpotential.

Rang	Stadtbezirk	Rang	Stadtbezirk
1	Neckarstadt-Ost	10	Sandhofen
2	Schwetzingen/Oststadt	11	Neuostheim/Neuhermsheim
3	Lindenhof	12	Seckenheim
4	Innenstadt/Jungbusch	13	Freudenheim
5	Käfertal	14	Friedrichsfeld
6	Neckarau	15	Vogelstang
7	Rheinau	16	Wallstadt
8	Schönau	17	Neckarstadt-West
9	Waldhof		

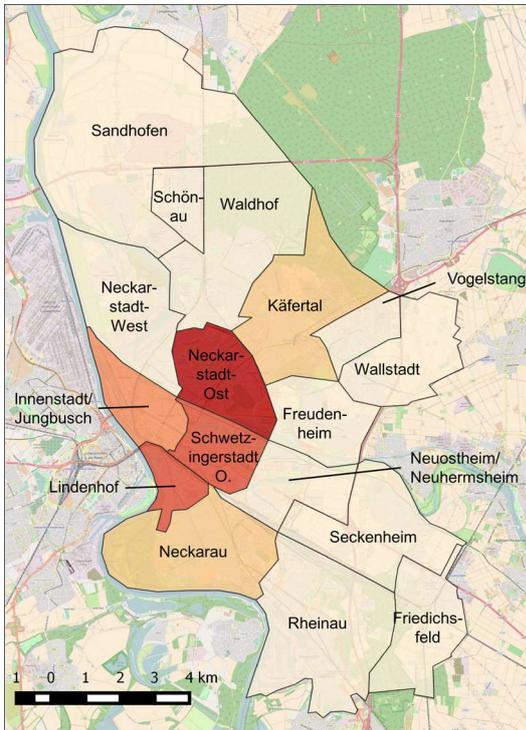
Räumliches Gefahrenpotential um 7:45 Uhr



Räumliches Gefahrenpotential um 12:30 Uhr



Räumliches Gefahrenpotential um 18:00 Uhr



Räumliches Gefahrenpotential um 2:15 Uhr

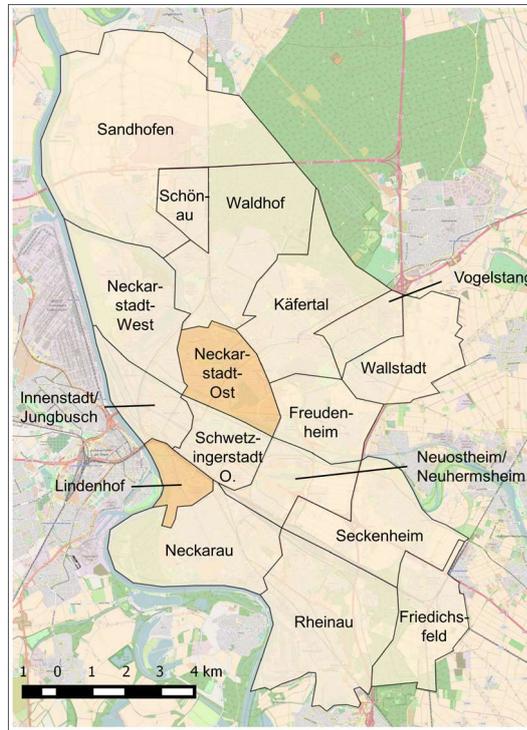


Abbildung 13.35: Räumliche Gefahrenpotentiale in Mannheim für verschiedene Zeitpunkte.

Die größten Gefahrenpotentiale existieren demnach in Neckarstadt-Ost, Schwetzingenstadt/Oststadt und Lindenhof. Die nachfolgende Darstellung zeigt die räumlichen Gefahrenpotentialen der Stadtbezirke für verschiedene Zeitpunkte mithilfe eines Geoinformationssystems (Abbildung 13.35).

Abbildung 13.36 stellt die räumliche Vulnerabilität der Stadtbezirke am zweiten Ausfalltag für die Zeitpunkte 7:15 Uhr und 09:30 Uhr dar. In dieser kurzen Zeit steigt die Vulnerabilität insbesondere in den Innenstadtbezirken Innenstadt/Jungbusch, Neckarstadt-Ost, Schwetzingenstadt/Oststadt und Lindenhof erheblich an.

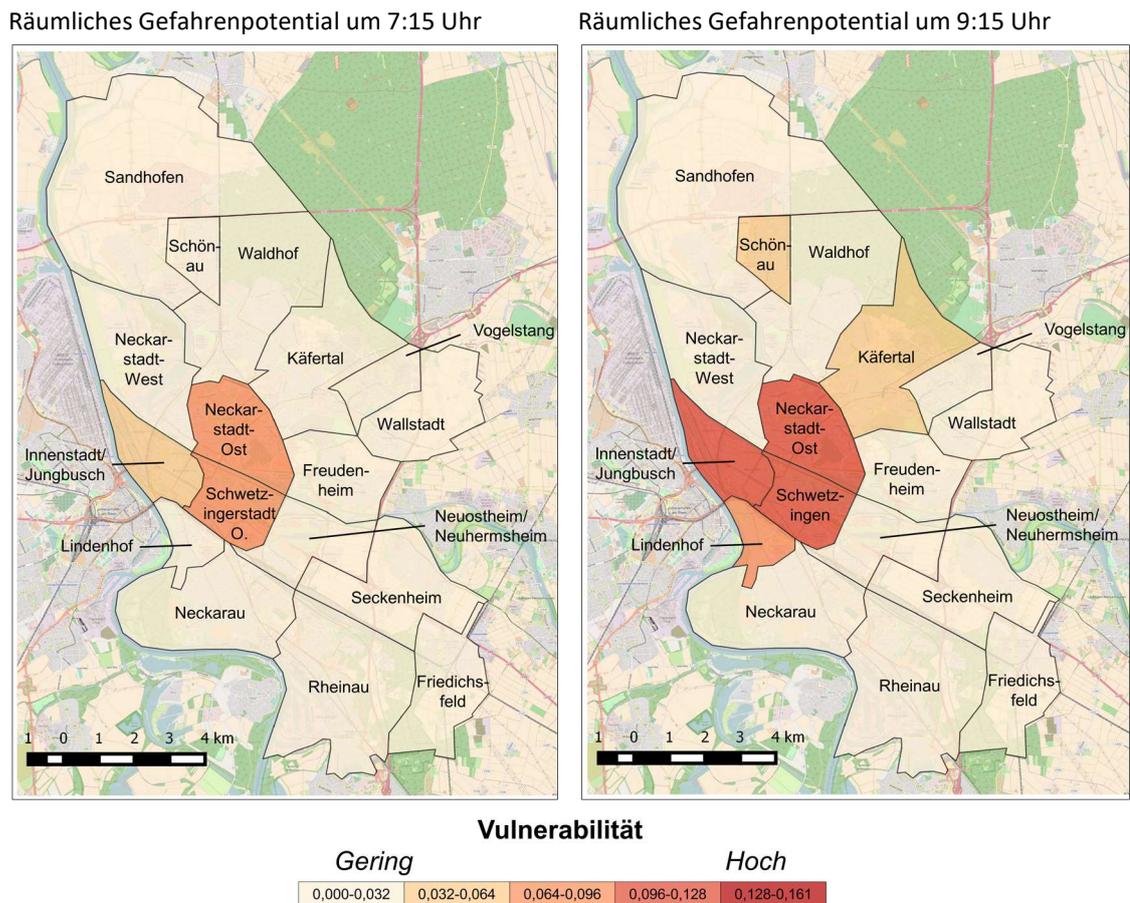


Abbildung 13.36: Gegenüberstellung der Vulnerabilität der Mannheimer Stadtbezirke am zweiten Ausfalltag um 7:15 Uhr und 9:15 Uhr.

Für einen detaillierteren Einblick in die jeweiligen räumlichen Gefahrenpotentiale kann die Zusammensetzung der Vulnerabilität von Stadtbezirken als Aggregation nach KRITIS-Typen wie in Abbildung 13.37 dargestellt werden.

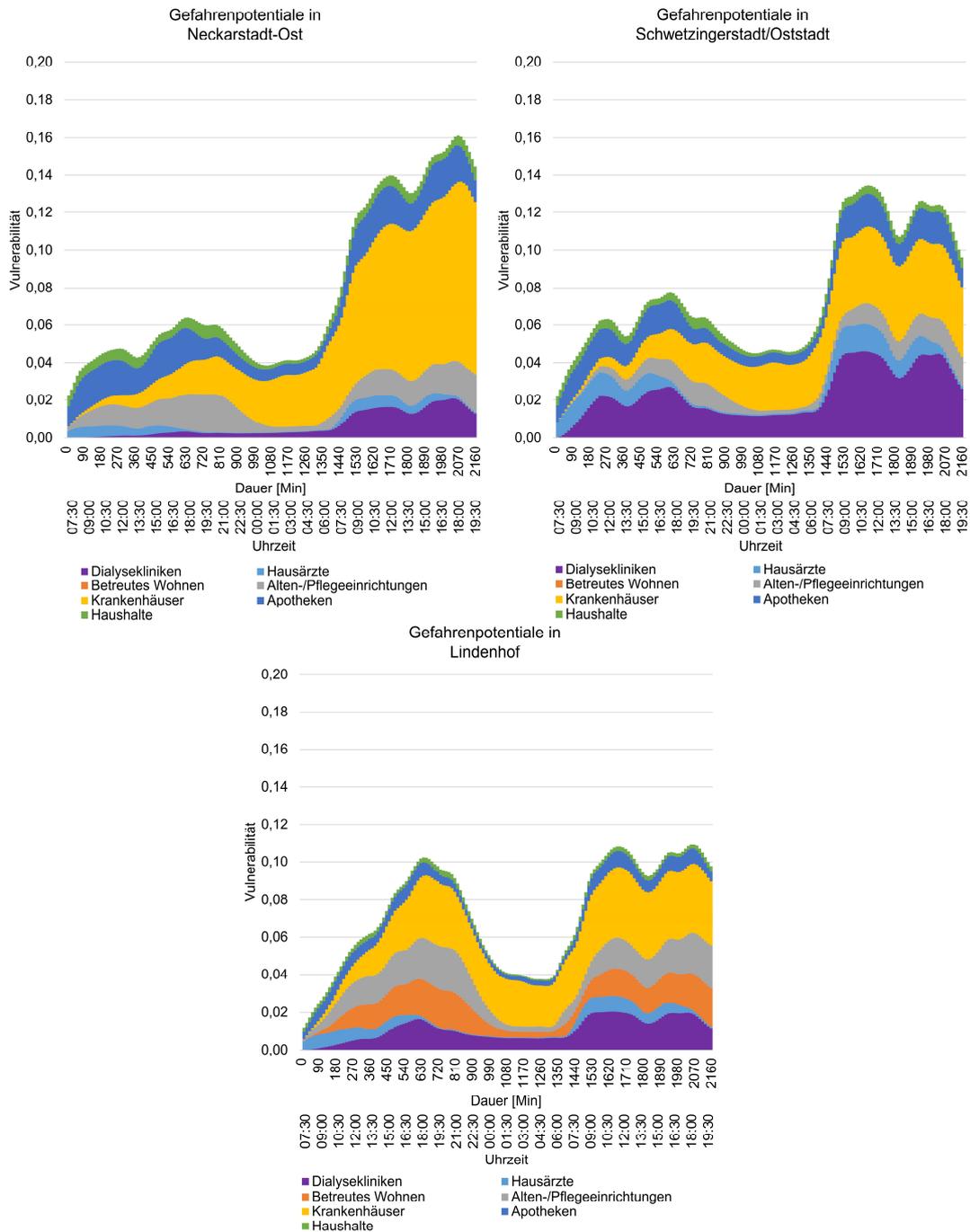


Abbildung 13.37: Vulnerabilitätsverlauf der Stadtbezirke Neckarstadt-Ost, Schwetzingenstadt/Oststadt und Lindenhof.

Das Gefahrenpotential in den Stadtbezirken Neckarstadt-Ost, Schwetzingenstadt/Oststadt und Lindenhof setzen sich unterschiedlich zusammen. In allen Stadtbezirken dominiert der Einfluss der Krankenhäuser und der Dialysekliniken. In Neckarstadt-Ost ist der Einfluss der Krankenhäuser erheblich. Die Vulnerabilität der dort verorteten Krankenhäuser steigt über den ersten Ausfalltag nahezu linear an und prägt die Zusammensetzung der Vulnerabilität am zweiten Ausfalltag. Der Einfluss der Dialyseklinik ist vergleichsweise gering. In Schwetzingenstadt/Oststadt sind die Einflüsse von Krankenhäusern und Dialysekliniken ähnlich

hoch. Die Vulnerabilitätsspitzen in Neckarstadt-Ost und Schwetzingen/Oststadt sind am ersten Ausfalltag wesentlich kleiner als am zweiten Ausfalltag. Dagegen steigt in Lindenhof bereits am ersten Ausfalltag die Vulnerabilität erheblich auf eine Höhe an, die ebenfalls am zweiten Ausfalltag erreicht wird. Für weitere Aussagen über das Gefahrenpotential erscheint die Durchführung einer Aggregation ohne die Versorgungsleistung auf der Ebene der Stadtbezirke angezeigt.

### 13.3.2.4 Unsicherheiten der Gefahrenpotentiale

Durch die Variation der Relevanzgewichte und des Resistenzverlustes unterliegt auch das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse für Mannheim einer Unsicherheit. Mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation werden in Abbildung 13.39 und in Abbildung 13.38 die Ergebnisstreuung für KRITIS-Typen anhand der Standardabweichung dargestellt.

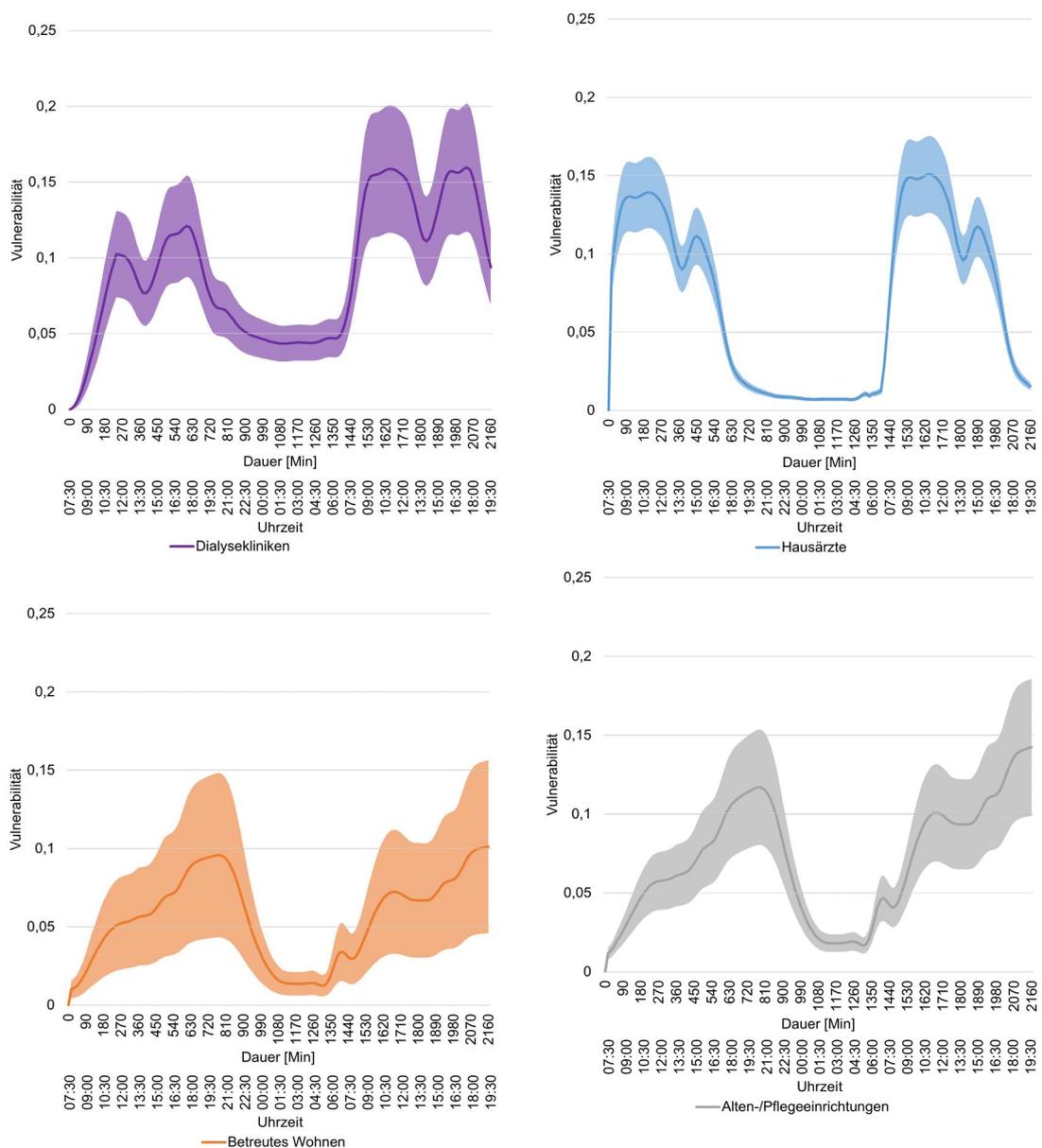


Abbildung 13.38: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Dialysekliniken, Hausärzte, Betreutes Wohnen und Alten-/Pflegeeinrichtungen in Mannheim mit Streuung.

Für die Einrichtungen des Betreuten Wohnens und für Haushalte zeigt sich eine vergleichsweise starke Ergebnisstreung. Wesentlicher Grund hierfür ist die Streuung des jeweiligen Relevanzgewichtes. Demgegenüber sind die Ergebnisstreungen der Dialysekliniken, Hausärzte, Alten- und Pflegeeinrichtungen und Apotheken vergleichsweise mäßig. Zudem sind diese vorherrschend tagsüber augenscheinlich. Neben der mäßigen Streuung des jeweiligen Relevanzgewichtes zeigt sich hier auch der Einfluss der Streuung beim Resistenzverlust. Die Ergebnisstreung bei den Krankenhäusern ist demgegenüber vergleichsweise gering und steigt im Verlauf des Ausfalls nur leicht an.

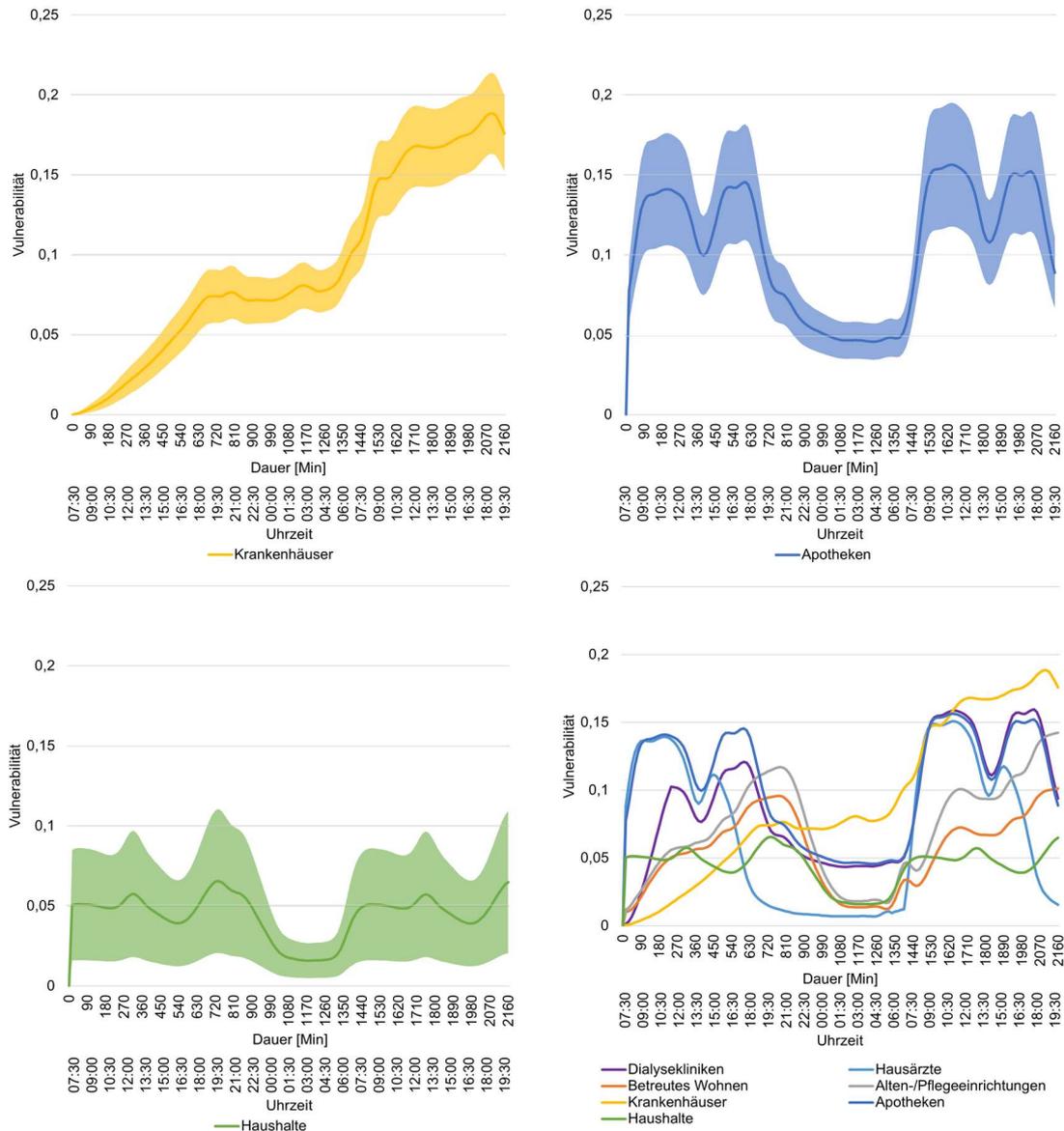


Abbildung 13.39: Vulnerabilitätsverläufe der KRITIS-Typen Krankenhäuser, Apotheken und Haushalte in Mannheim mit Streuung sowie eine Übersicht.

Zur Demonstration wird in der nachfolgenden Abbildung 13.40 die Ergebnisstreung von ausgewählten Stadtbezirken dargestellt. Deren Streuung hängt wiederum mit den jeweils in den Stadtbezirken verorteten KRITIS-Einrichtungen zusammen. In diesen Beispielen zeigt sich in Neckarstadt-Ost, Lindenhof und

Schwetzingen eine vergleichsweise ähnlich starke Ergebnisstreuung. In der Innenstadt ist die Ergebnisstreuung weniger stark ausgeprägt. Insbesondere am Morgen des Folgetags erscheint die Ergebnisstreuung geringer.

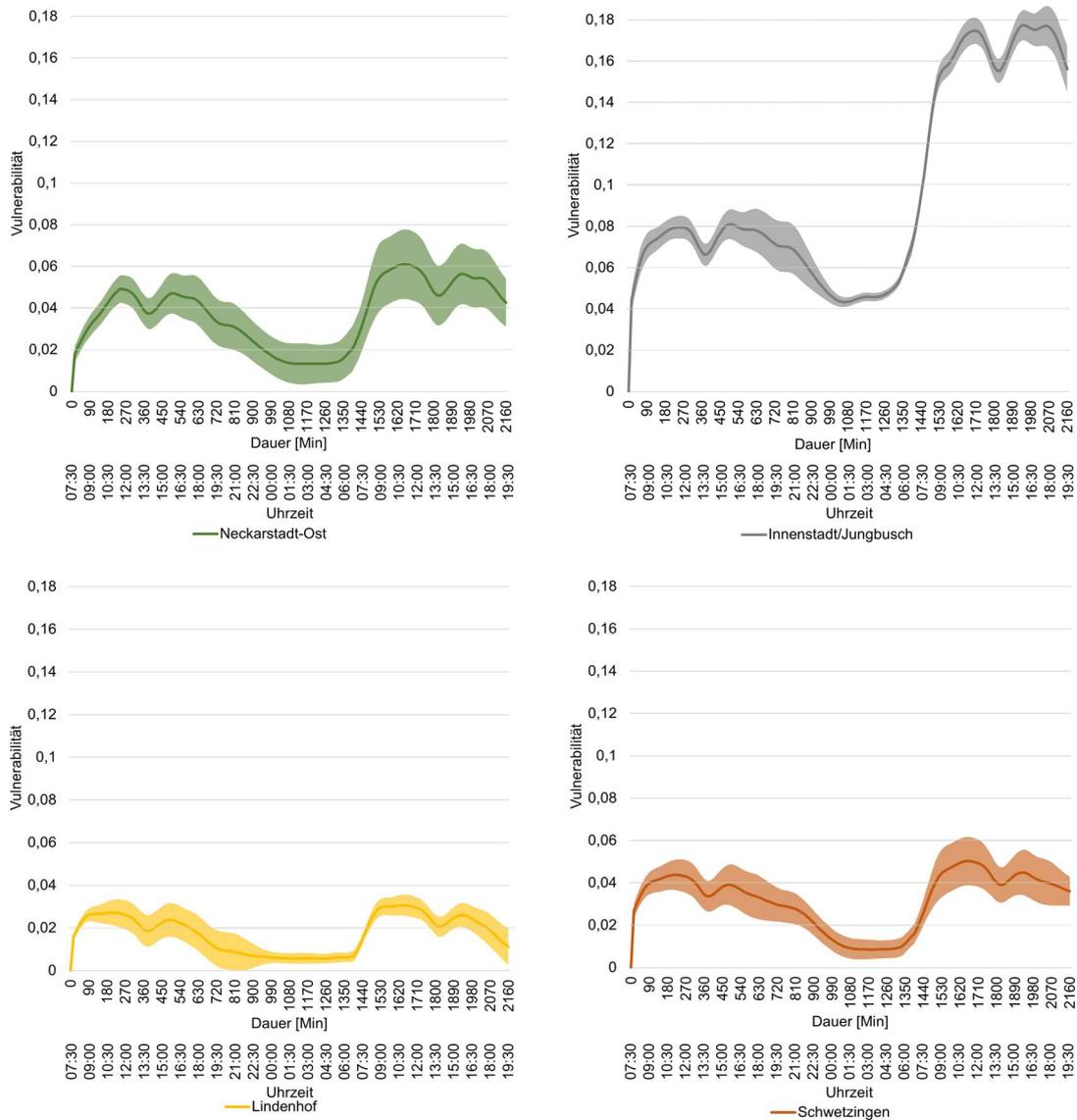


Abbildung 13.40: Vulnerabilitätsverläufe ausgewählter Stadtbezirke von Mannheim mit Streuung.

### 13.3.3 Bewertung der Gefahrenpotentiale

#### 13.3.3.1 Bewertung der Sensitivität gegenüber Änderung der Relevanzgewichtung

Abbildung 13.41 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse im Anwendungsfall Mannheim. Vertikale Markierungen in den Farben des jeweiligen KRITIS-Typen zeigen die ursprüngliche Gewichtung der KRITIS-Typen in der Ausgangslage. Sie schneiden jeweils die gestrichelte graue Linie, welche den Ausgangswert des Resilienzwertes bei Verwendung der ursprünglichen Gewichtswerte darstellt.

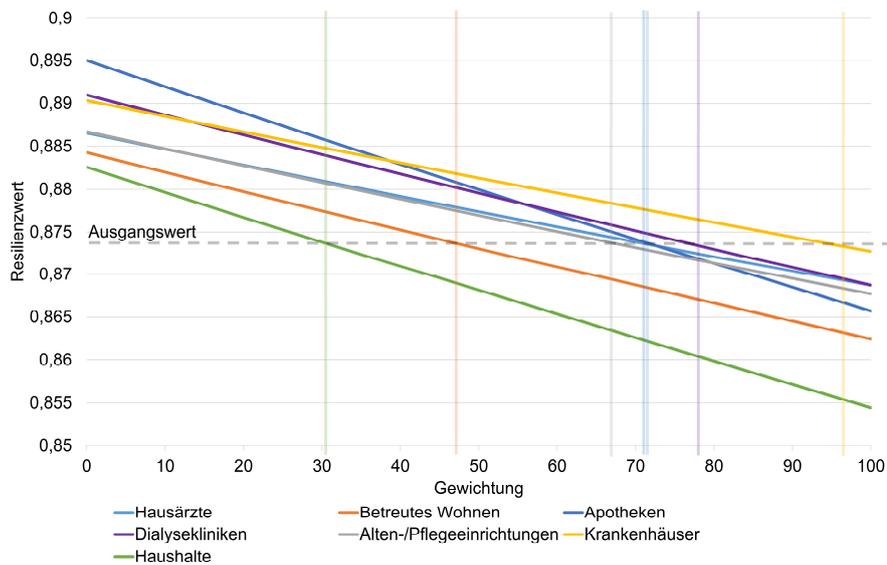


Abbildung 13.41: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse von geänderten Gewichtswerten im Anwendungsfall Mannheim.

In Abbildung 13.41 zeigt sich, dass bei Zunahme der Gewichtswerte von Haushalten und Apotheken die Resilienz erheblich sinkt bzw. bei niedrigeren Gewichtswerten erheblich höhere Resilienz Werte erreicht werden. Sie können daher als Vulnerabilitätstreiber identifiziert werden.

Demgegenüber zeigt sich bei Krankenhäusern und Hausärzten nur eine mäßige Änderung der Resilienz Werte bei Änderung der jeweiligen Gewichtswerte. Sie lassen sich daher als Resilienztreiber identifizieren.

### 13.3.3.2 Bewertung zeitlicher Gefahrenpotentiale

Für den Stadtkreis Mannheim können fünf Plateaus und zwei Tipping Points identifiziert werden. Sie sind ähnlich gelagert wie im Anwendungsfall Karlsruhe, da sie auf dieselben Phänomene zurückzuführen sind.

Die Plateaus finden sich am Vormittag und Mittag des ersten Ausfalltages, in der Nacht und am Morgen und Mittag des zweiten Ausfalltages (Abbildung 13.42).

Abbildung 13.42 zeigt die Lage der Plateaus. Am Vormittag und Mittag des ersten Ausfalltages zeigen sich zwei Plateaus, die kurzzeitig unterbrochen werden. Auch in der Nacht kommt es zu einem kurzzeitigen Plateau. Ähnlich kurz ist ein weiteres Plateau am Morgen des zweiten Ausfalltages, welches sich jedoch auf einem höheren Vulnerabilitätsniveau einstellt. Annähernd hoch ist auch das letzte länger anhaltende Plateau über die Mittagszeit bis in den frühen Nachmittag.

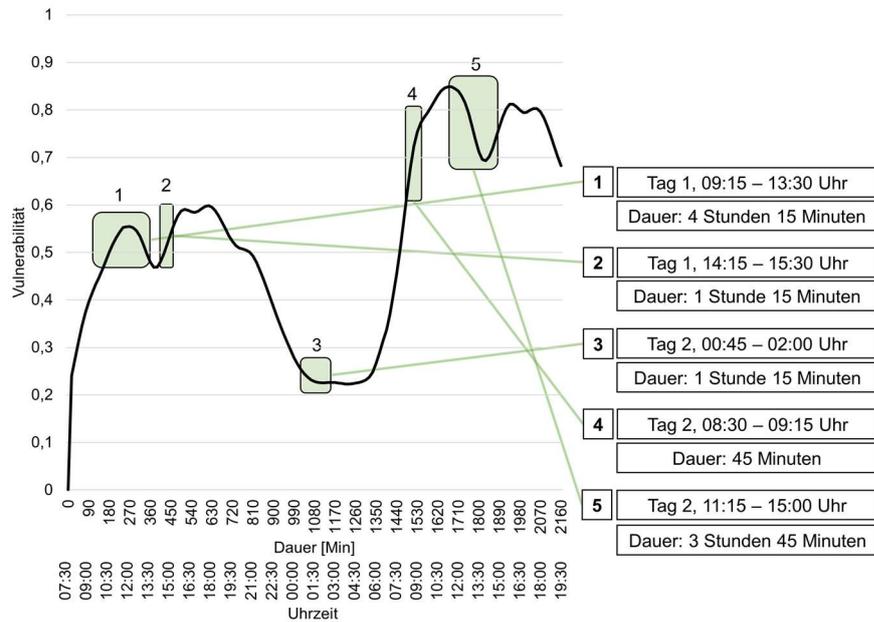


Abbildung 13.42: Identifizierte Plateaus im Anwendungsfall Mannheim.

Des Weiteren können zwei Tipping Points identifiziert werden. Ein Tipping Point findet sich zu Beginn des Ausfalls. Ein Weiterer am frühen Morgen des ersten Ausfalltages (Abbildung 13.43).

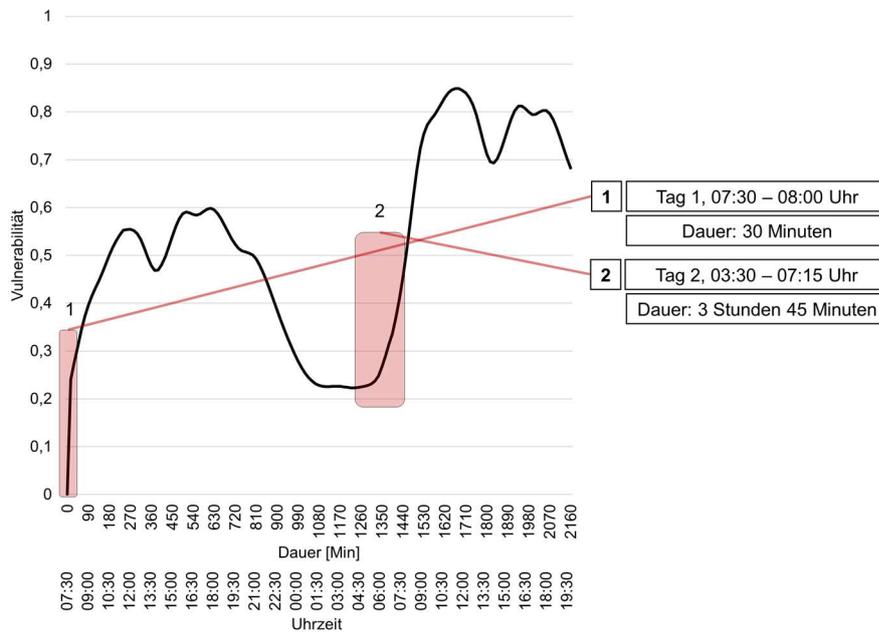


Abbildung 13.43: Identifizierte Tipping Points im Anwendungsfall Mannheim.

### 13.3.3.3 Schutzzielorientierte Bewertung von Gefahrenpotentialen

Auch im Anwendungsfall des Stadtkreises Mannheim wird der schwerwiegendste anzunehmende Bemessungsstromausfall zur Demonstration einer schutzzielorientierten Bewertung herangezogen. Abbildung 13.44 zeigt die normalisierten gewünschten und unerwünschten Abweichungen der Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse von den KRITIS-Typ-spezifischen Schutzzielen. Hierfür wurde die in Abschnitt 12.5 erörterte Bewertungsmethode angewendet.

Das Ergebnis zeigt, dass unmittelbar mit dem Eintritt des Stromausfalls das Schutzziel für die Einrichtungen des Betreuten Wohnens erheblich unterschritten wird. Nach 24 Stunden verfügen keine dieser Einrichtungen mehr über eine Bewältigungskapazität, so dass bei diesem KRITIS-Typ ab diesem Zeitpunkt die maximale Abweichung vom Schutzziel erreicht wird. Wenn auch weniger erheblich, wird von Beginn an auch das Schutzziel für die Alten- und Pflegeheime unterschritten. Diese Unterschreitung ist über die Dauer des Ausfalls mäßig gleichbleibend. Aufgrund der Veränderung des Schutzzielniveaus wird das Schutzziel am Ende des Bemessungsstromausfalls wieder erfüllt (ab 34 Stunden und 15 Minuten). Nach einer Ausfalldauer von 30 Minuten wird das Schutzziel für die Dialysekliniken unterschritten. Die Unterschreitung nimmt im ersten Fünftel des Stromausfalls stark zu, geht dann aber in eine mäßiger steigende Abweichung über. Das Schutzziel der Apotheken wird nach 7 Stunden und 15 Minuten unterschritten. Durch die Tag-Nacht-bedingte Änderung des Schutzzielniveaus kommt es zu einem kurzzeitigen Anstieg des Zielerreichungsgrades nach 11 Stunden und 30 Minuten bzw. um 19:00 Uhr. Jedoch sinkt der Zielerreichungsgrad auch danach wieder erheblich an. Nach einer Stromausfalldauer von 24 Stunden verfügen diese Einrichtungen über keine Bewältigungskapazität mehr. Das Schutzziel der Krankenhäuser wird bis zur Ausfalldauer von über 5 Stunden und 15 Minuten erfüllt. Danach wird das Schutzziel unterschritten und der Abstand vom Schutzziel steigt kontinuierlich über die weitere Dauer des Stromausfalls an. Während der Dauer des Bemessungsstromausfalls wird das Schutzziel für die Hausärzte durchgehend erfüllt.

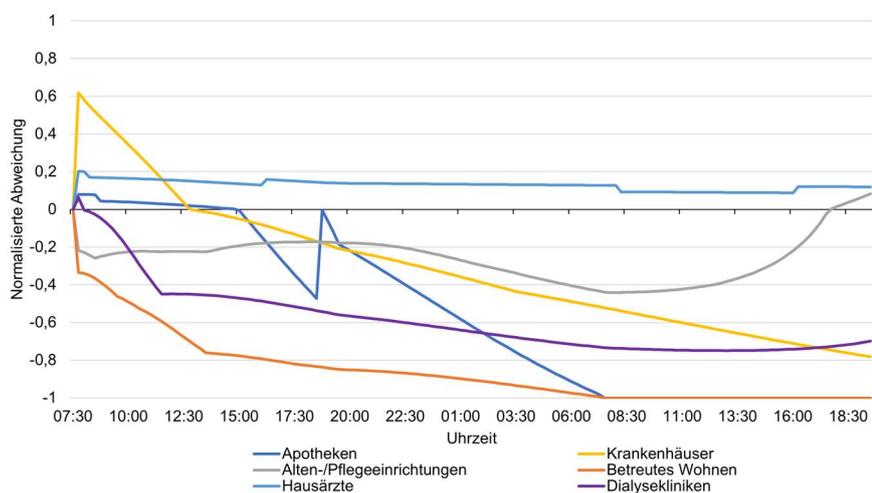


Abbildung 13.44: Ergebnis der schutzzielorientierten Bewertung des Gefahrenpotentials für die Stadt Mannheim.

Wie beim Anwendungsfall Karlsruhe ändert sich die Zielerreichung, wenn einzelne Stadtbezirke priorisiert versorgt werden. Mithilfe der aggregierten Zielerreichung wird auch in diesem Fall der Einfluss der einzelnen Stadtbezirke analysiert, wenn diese prioritär versorgt werden. Abbildung 13.45 zeigt als Histogramm die Referenz des Basisszenarios, in dem alle Stadtbezirke betroffen sind, und die Ergebnisse der aggregierten Zielerreichung für Szenarios, in dem einzelne Stadtbezirke prioritär versorgt werden.

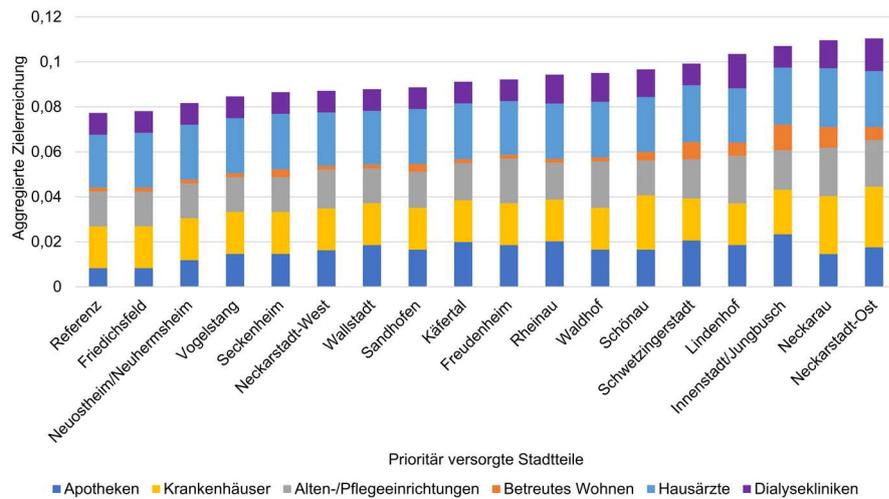


Abbildung 13.45: Histogramm der aggregierten Zielerreichung bei prioritärer Versorgung einzelner Mannheimer Stadtbezirke.

Der Vergleich der Ergebnisse der aggregierten Zielerreichung für die priorisierte Versorgung von einzelnen Stadtbezirken zeigt, dass die Stadtbezirke Neckarstadt-Ost, Neckarau, Innenstadt/ Jungbusch und Lindenhof die höchste Zielerreichung aufweisen. Im Nachfolgenden wird beispielhaft angenommen, dass zum einen die Stadtbezirke Neckarstadt-Ost, Neckarau und Innenstadt/ Jungbusch (Abbildung 13.46) bzw. die Stadtbezirke Neckarstadt-Ost, Neckarau und Lindenhof (Abbildung 13.47) priorisiert werden können.

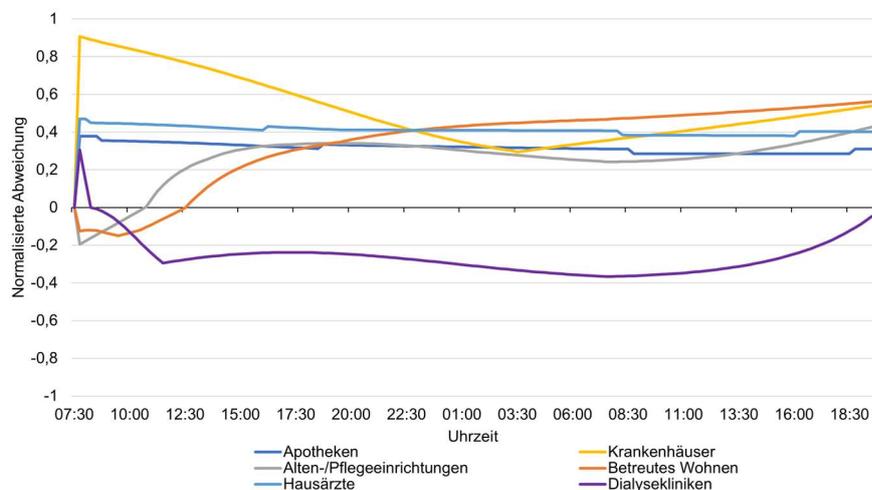


Abbildung 13.46: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Innenstadt/Jungbusch.

Im Falle der priorisierten Versorgung der Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Innenstadt/Jungbusch (Abbildung 13.47) können bis auf die Schutzziele der Dialysekliniken alle anderen Schutzziele überwiegend erreicht werden. Zu Beginn des Ausfalls werden die Schutzziele für die Alten- und Pflegeheime (bis drei Stunden) sowie für die Einrichtungen des Betreuten Wohnens (bis 4 Stunden und 45 Minuten) geringfügig unterschritten. Danach werden die Schutzziele für diese Einrichtungen erfüllt.

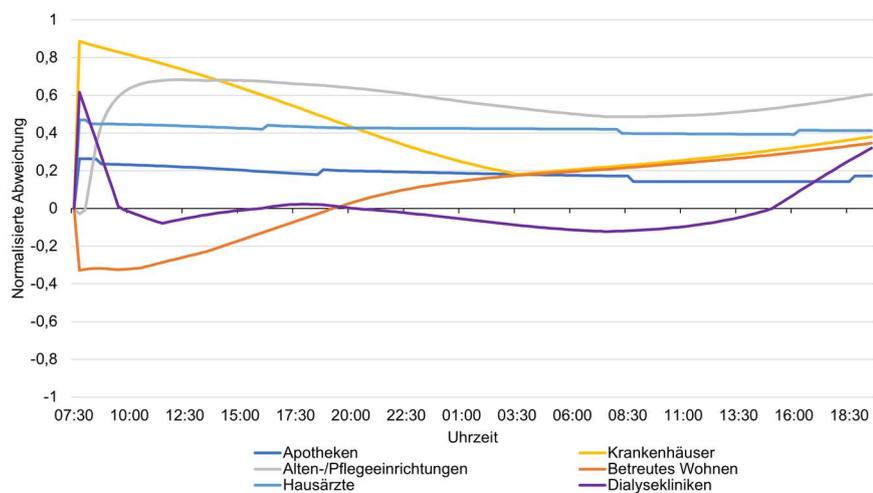


Abbildung 13.47: Zielerreichung bei prioritärer Versorgung der Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Lindenhof.

Auch wenn die Stadtbezirke Neckarau, Neckarstadt-Ost und Lindenhof priorisiert versorgt werden, unterschreiten Dialysekliniken, wenn auch in geringerer Tragweite, das an sie gestellte Schutzniveau (Abbildung 13.47). Die Unterschreitung der Schutzziele für die Einrichtungen des Betreuten Wohnens werden zu Beginn des Stromausfalls langanhaltender unterschritten. Erst nach einer Ausfalldauer von 12 Stunden und 45 Minuten ihr Schutzziel erreicht. Alle anderen Schutzziele werden teilweise in besserer Weise erfüllt als in der vorgenannten Kombination der zur priorisierten Versorgung ausgewählten Stadtbezirke.

### 13.3.4 Szenariobasierte Analysen

#### 13.3.4.1 Diskriminierende Lastreduzierung unter Berücksichtigung von Gefahrenpotentialen

Zur Demonstration einer Lastreduzierung wird angenommen, dass für eine Gesamtdauer von acht Stunden Netzkunden vom Netz getrennt werden. Die Lastreduzierung soll diskriminierend rollierend vorgenommen werden. Die Wahl der zu reduzierenden Umspannwerkbezirke erfolgt dabei anhand ihrer Gefahrenpotentiale, beginnend mit den Umspannwerkbezirken mit dem geringsten Gefahrenpotential. Entsprechend den angenommenen Vorgaben des vorgelagerten Netzbetreibers ist eine Last zu reduzieren, die drei Umspannwerkbezirke entspricht. Die rollierende Abschaltung wird realisiert, indem für eine Dauer von 90 Minuten jeweils drei unterschiedliche Umspannwerkbezirke vom Netz getrennt werden.

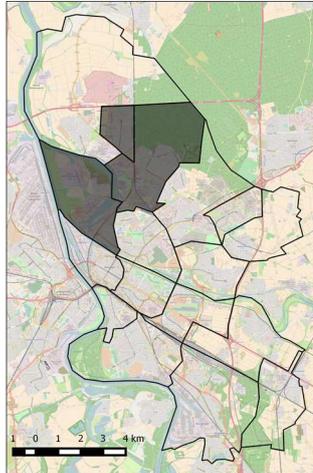
Es wird angenommen, dass die Lastreduzierung entsprechend dem am schwerwiegendsten anzunehmenden Beginn eines Bemessungsstromausfalls an einem Werktag um 7:30 Uhr beginnt und bis 15:30 Uhr andauert. Es wird angenommen, dass ab 15:30 Uhr die vollständige Versorgung wiederhergestellt werden kann.

Zur Bestimmung der Gefahrenpotentiale wird die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse angewandt. Anhand der Vulnerabilität der Stadtbezirke wird der jeweilige Resilienzwert eines Stadtbezirks gebildet und mithilfe dessen eine Rangliste für eine diskriminierende Lastreduzierung entworfen. Abbildung 13.48 zeigt die Ergebnisse dieses Vorgehens. Demnach beginnt die diskriminierende Lastreduzierung, in dem für 90 Minuten die Stadtbezirke bzw. die angeschlossenen Verbraucher in Neckarstadt-West, Schönau und

Waldhof vom Netz getrennt werden. Entsprechend den in diesen Stadtbezirken verorteten KRITIS-Einrichtungen und ihren Eigenschaften würde dieses Vorgehen die geringsten Störungen hervorrufen.

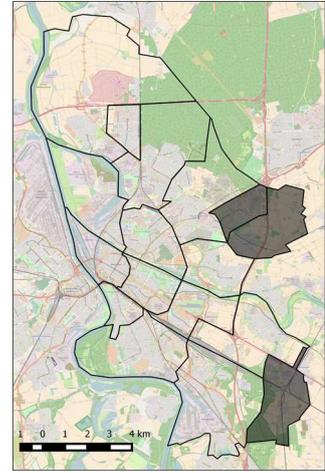
**Lastreduzierung ab 7:30 Uhr**

Neckarstadt-West  
Schönau  
Waldhof



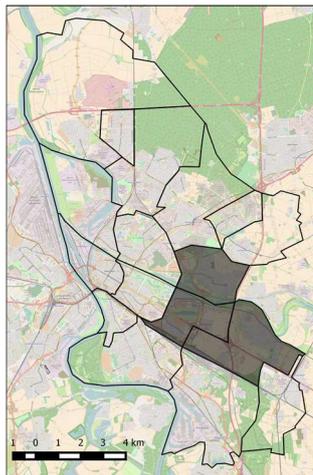
**Lastreduzierung ab 9:00 Uhr**

Friedrichsfeld  
Wallstadt  
Vogelstang



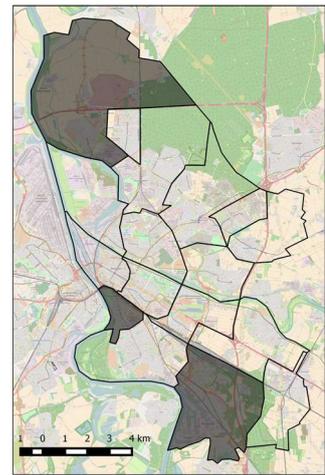
**Lastreduzierung ab 10:30 Uhr**

Seckenheim  
Neuostheim/  
Neuhermsheim  
Freudenheim



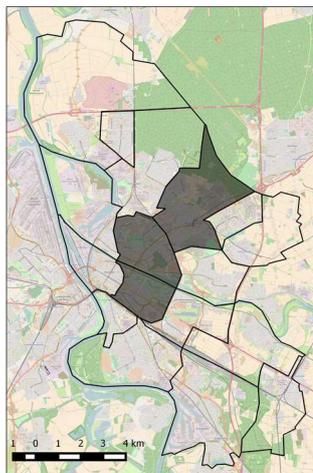
**Lastreduzierung ab 12:00 Uhr**

Sandhofen  
Lindenhof  
Rheinau



**Lastreduzierung ab 13:30 Uhr**

Käfertal  
Schwetzingenstadt/Oststadt  
Neckarstadt-Ost



**Lastreduzierung ab 15:00 Uhr**

Neckarau  
Innenstadt/  
Jungbusch  
Neckarstadt-West

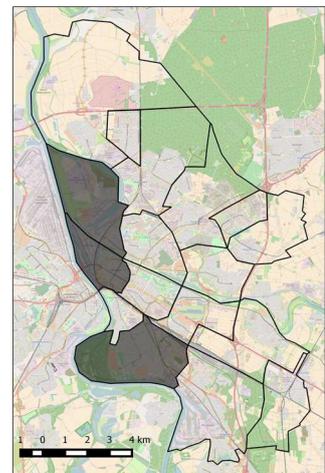


Abbildung 13.48: Übersicht der vom Netz zu trennenden Umspannwerkbezirke bei einer rollierenden Abschaltung im Stadtkreis Mannheim.

13.3.4.2 Reale Stromausfälle in Mannheim

Anhand von realen Stromausfällen soll die Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse in der akuten Krisenbewältigung demonstriert werden. Für die am Donnerstag, 11. Juni 2014 und am Montag, 06. Juli 2015 stattgefundenen Stromausfälle in Mannheim werden nachfolgend Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen dargestellt (Abbildung 13.49 und Abbildung 13.50). Zur Durchführung der Analysen werden die anhand von Medienberichten hergeleiteten Informationen zum Ausfallbeginn der betroffenen Stadtbezirke berücksichtigt.

Datum: Donnerstag, 11. Juni 2014  
 Beginn: 03:00 Uhr  
 Dauer: bis 08:30 Uhr  
 Betroffene: Käfertal  
 Stadtbezirke:  
 Ursache: Kurzschluss in einem Umspanner

Quelle: Langscheid (2014)

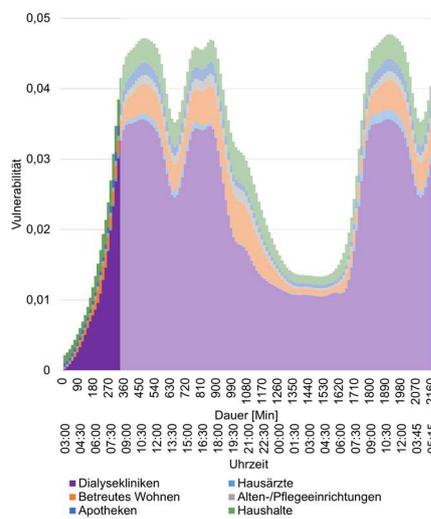
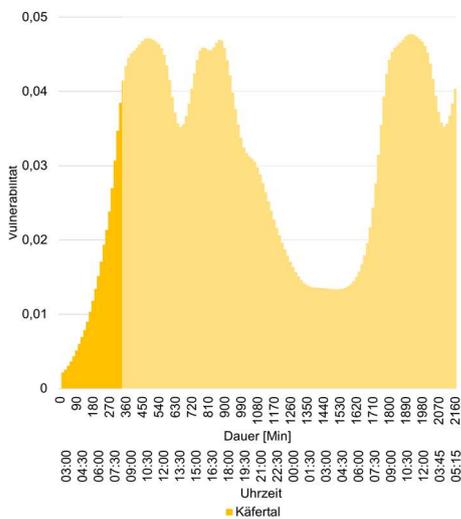
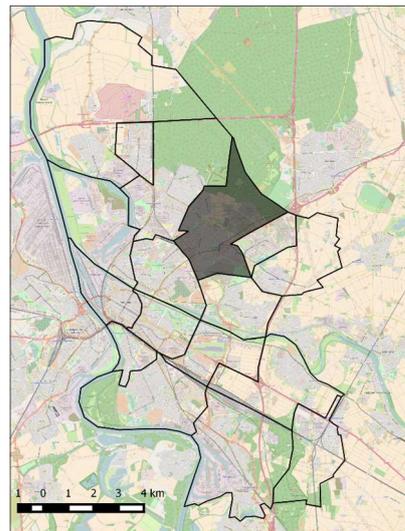


Abbildung 13.49: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 11. Juni 2014 in Mannheim.

Der Ausfall vom 11. Juni 2014 betraf lediglich den Stadtbezirk Käfertal und dauert insgesamt ca. fünf Stunden und 30 Minuten an. Die in Abbildung 13.49 dargestellten Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse zeigen den Verlauf dieses Ausfalls. Deutlich wird, dass bereits am Morgen des ersten Ausfalltages nach wenigen Stunden die Vulnerabilität erheblich ansteigt und deshalb unverzügliche Maßnahmen zur Abwehr stromausfallbedingter Gefahren zu ergreifen sind. Darüber hinaus zeigt das Ergebnis, dass der bestimmende Einfluss für den Anstieg des Gefahrenpotentials von der in Käfertal verorteten Dialyseklinik ausgeht. Die Beherrschung der von ihr ausgehenden Gefahren würde zur wesentlichen

Reduzierung des Gefahrenpotentials führen. Die Bildung eines entsprechenden Einsatzschwerpunktes ist daher angezeigt.

Datum: Montag 06. Juli 2015  
 Beginn: 12:30 Uhr  
 Dauer: bis 16:00  
 Betroffene: Innenstadt, Käfertal, Lindenhof,  
 Stadtbezirke: Gartenstadt (Waldhof)  
 Ursache: nicht bekannt.

Quelle: Bockwoldt (2015)

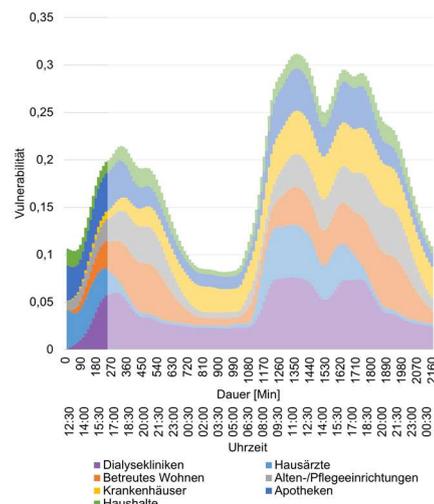
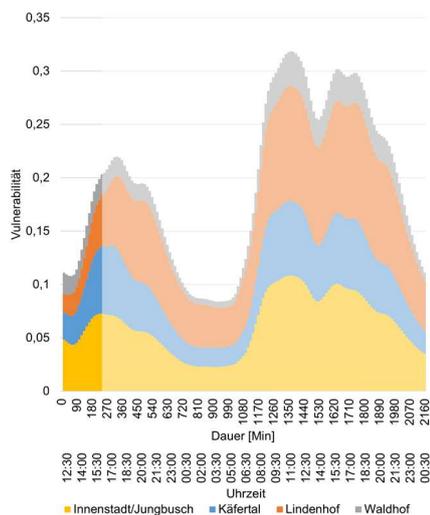
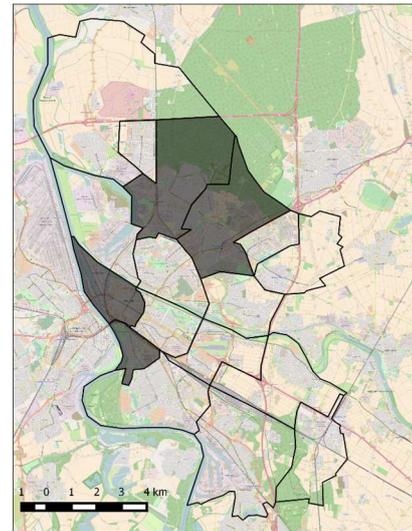


Abbildung 13.50: Ergebnisse und Darstellung des Stromausfalls vom 06. Juli 2015 in Mannheim.

Von dem am 6. Juli 2015 stattgefundenen Stromausfall waren die vier Stadtbezirke Innenstadt, Käfertal, Lindenhof und Waldhof betroffen. Abbildung 13.50 zeigt, welchen Einfluss die Vulnerabilität der Stadtbezirke auf die Gesamtvulnerabilität haben und wie sich das raumzeitliche Gefahrenpotential gestaltet. Es wird deutlich, dass in den ersten Stunden des Ausfalls der stärkste Einfluss auf das Gefahrenpotential der Stadt von der Innenstadt ausgeht. Ab ca. 15:00 Uhr sind die Einflüsse der Innenstadt, Käfertal und Lindenhof ca. gleich stark. Im weiteren Verlauf zeigt sich im zweiten Ausfalltag, dass das Gefahrenpotential, das vom Stadtbezirk Lindenhof ausgeht, erheblich stärker ist als in den anderen Stadtbezirken. Zur Differenzierung des Gefahrenpotentials sind weitere Aggregationen notwendig. In dieser Demonstration zeigt die Aggregation der KRITIS-Typen, dass der Einfluss der Hausärzte und der Dialysekliniken zu Beginn des Ausfalls das Gefahrenpotential prägt. Erst im weiteren Verlauf des ersten Tages steigt das Gefahrenpotential der Einrichtungen des Betreuten Wohnens und der Alten- und Pflegeeinrichtungen.

Ableitend von diesen Erkenntnissen sind Maßnahmen abzuwägen, die entweder auf die priorisierte oder zügig wiederhergestellte Versorgung von Stadtbezirken oder auf die Aufrechterhaltung des Betriebs einzelner Einrichtungen abzielen. Weitere Aggregationen, die die Vulnerabilitätsprofile der einzelnen KRITIS-Einrichtungen darstellen, können hierbei zusätzliche Unterstützung zur Entscheidungsfindung leisten. Da die weiteren Umstände, die zur Verfügung stehenden Ressourcen und die Erkenntnisse der Lageerkundung nicht zur Verfügung stehen, lassen sich an dieser Stelle zur Maßnahmenauswahl keine weiteren Aussagen treffen.

## 13.4 Fazit

Die Demonstration der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse anhand der beiden Stadtkreise Karlsruhe und Mannheim zeigt, dass eine Anwendung auf beliebige Szenarios möglich ist. Berücksichtigt werden können sowohl reale, tatsächlich stattfindende oder stattgefundene Stromausfälle als auch hypothetische Bemessungsstromausfälle. Die jeweiligen Ergebnisse dienen entweder der akuten Krisenbewältigung oder der Vorbereitung. Für die Anwendung sind die zu verwendenden Grundkonfigurationen und die zu berücksichtigenden KRITIS-Typen zu bestimmen. Entsprechend der Grundkonfiguration und der zu berücksichtigenden KRITIS-Typen bedarf es Daten von KRITIS-Einrichtungen aus einem KRITIS-Kataster.

Die Demonstration zeigt die Ergebnisse zweier Gefahrenprognosen über die stromausfallbedingten Gefahren. Sowohl diverse räumliche Aggregationen als auch Aggregationen unter Verwendung verschiedener Indikatorverknüpfungen wurden demonstriert, durch die das jeweilige raumzeitliche Gefahrenpotential differenziert dargestellt wurde. Zusätzlich wurde für den schwerwiegendsten anzunehmenden Bemessungsstromausfall Analysen der Schutzzielerreichung durchgeführt. Ergebnisstreuungen aufgrund abweichender Abschätzungen von Relevanzgewichten und des Resistenzverlustes wurden anhand der Vulnerabilitätsprofile für KRITIS-Typen und ausgewählter Stadtteile dargestellt.

In beiden Anwendungsbeispielen lassen sich die Gefahrenpotentiale der jeweiligen Stadtteile/-bezirke und KRITIS-Typen vergleichen. Jeweils sind anhand der Ergebnisse die Stadtteile und die KRITIS-Typen identifizierbar, die den größten Einfluss auf die Gesamtvulnerabilität haben. Mithilfe der Ergebnisse wird die Zusammensetzung der Vulnerabilität in den jeweiligen Stadtteilen und KRITIS-Typen deutlich. Für weiterführende Auseinandersetzungen können zusätzliche Aggregationen durchgeführt werden. Hierbei sind insbesondere solche von Interesse, die die Vulnerabilitätsprofile einzelner KRITIS-Einrichtungen darstellen. Die Demonstration zeigt auch, dass aus der Nutzung lediglich einer Aggregation nicht ausreichend Erkenntnisse über das Gefahrenpotential ableitbar sind und erst weitere, parallel durchgeführte Aggregationen zu differenzierten Erkenntnissen über die raum-zeitlichen Gefahren führen.

Anhand der Ergebnisse lassen sich Gefahrenschwerpunkte und notwendige Priorisierungen ableiten, konkrete Ansätze für Maßnahmen erkennen und deren Effektivität messen. Neben der Sensibilisierung für Gefahren stehen so auch Vorhersagen zur Verfügung, was sowohl in der akuten Krisenbewältigung als auch in der Vorbereitung auf Stromausfälle nützlich ist. Die Identifikation und die Wahl der Maßnahmen wurden in den Demonstrationen angedeutet und hypothetisch diskutiert. Sie sind stets abhängig von den zur Verfügung stehenden Maßnahmenoptionen und können objekt-, raum- oder KRITIS-Typ-spezifisch sein. Die Art und Anzahl der geeigneten Maßnahmen ist nicht nur abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen, sondern auch von den gegebenen Umständen, der Ausfalldauer und vom Zeitpunkt (Saison, Uhrzeit). In dieser Hinsicht entwickelt jede Schadenslage ihren eigenen, individuellen Charakter,

der kaum vorhersehbar ist. Aufgrund der unzähligen Freiheitsgrade sind a priori unbegrenzt viele Maßnahmenoptionen denkbar, die sich jedoch in Anbetracht der Rahmenbedingungen einer konkreten Situation und der Lagefeststellung auf eine übersichtliche Anzahl reduzieren. Vor diesem Hintergrund erscheinen weitere analysegebundene Betrachtungen zur Maßnahmenumsetzung als Entscheidungsunterstützung nicht zielführend.

In den Demonstrationen wurden in den Grundkonfigurationen die Abschätzungen von Entscheidungsträgern berücksichtigt. Mithilfe der Veränderung der Relevanzgewichtung lassen sich abweichende Beurteilungen der Entscheidungsträger im Ergebnis unverzüglich darstellen. Dadurch, aber auch mithilfe der Sensitivitätsanalyse, können sich Entscheidungsträger tiefgreifender mit den Zusammenhängen der einzelnen KRITIS-Typen und Stadtteile/-bezirke sowie deren Einfluss auf die Gesamtvulnerabilität und das raumzeitliche Gefahrenpotential auseinandersetzen. Für den Bemessungsstromausfall wurde zusätzlich die Ergebnisstreuung demonstriert. Durch sie wird die Robustheit der einzelnen Ergebnisse dargestellt. Dies ist insbesondere dann nützlich, wenn ein Konsens in der Gruppe der Entscheidungsträger zu erarbeiten ist.

Gerade das Beispiel von Mannheim und Ludwigshafen am Rhein zeigt die Problematik der fehlenden Koinzidenz von örtlicher Handlungskompetenz (s. Kapitel 3.1.2), das sich sowohl in der Gefahrenabwehr als auch im Katastrophenschutz und in der Raumplanung niederschlägt. Mannheim und Ludwigshafen am Rhein bilden ein zusammenhängendes Stadtgebiet, was jedoch aufgrund der örtlichen Handlungskompetenz der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes in Vulnerabilitätsanalysen auf kommunaler Ebene nicht als zusammenhängend betrachtet wird. Durch die isolierte Betrachtung der Stadtgebiete kann die Bedeutung von einzelnen KRITIS-Einrichtungen und Stadtteilen-/bezirken verzerrt werden. Die überörtliche Versorgungsreichweite einzelner Einrichtung wird keiner Beachtung gezollt. Zur Sicherstellung des Effektivitätsgebots erscheint daher die zusammenhängende und damit ganzheitliche Betrachtung aller KRITIS-Einrichtungen in beiden Städten notwendig. Darüber hinaus kann es auch zielführend sein, neben kommunalen Betrachtungen auch die Betrachtung von zusammenhängenden Metropolregionen durchzuführen.

## 14 Schlussfolgerungen und Ausblick

In den nachfolgenden Schlussfolgerungen wird sowohl das Resultat als auch die methodische Herangehensweise der entwickelten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse kritisch gewürdigt. Dabei werden der Fortschritt gegenüber dem bisherigen Stand der Wissenschaft, die Grenzen, die Verbesserungsmöglichkeiten und der bestehende Forschungsbedarf herausgestellt. Zunächst werden Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Anwendungsbeispiele gezogen. Anschließend wird die Methodik der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse kritisch gewürdigt, indem auf die Kooperation zwischen KRITIS-Betreibern und Entscheidungsträgern, die Relevanzgewichtung, die Indikatoren und die Alternativenbildung, die Vulnerabilitätsaggregationen und die Bewertungsverfahren der Gefahrenpotentiale eingegangen wird.

### 14.1 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse

Mit der Entwicklung der Vulnerabilitätsanalyse liegen umfangreiche entscheidungsrelevante Grundlagen vor. Zur Bildung der entscheidungsrelevanten Grundlagen wurden in systematischer Weise

- die relevanten Stromausfallszenarien,
- die Schutzpflichten und die Schutzziele,
- die stromausfallbedingte Gefahr,
- die Auslegung Lokaler Kritischer Infrastrukturen und
- die Prozesse der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung für Stromausfälle

untersucht.

Erstmalig konnten hierdurch ein Bemessungsstromausfall und Lokale Kritische Infrastrukturen bestimmt werden. Neben der Herleitung der entscheidungsrelevanten Anforderungen an die Vulnerabilitätsanalyse und deren Einbettung in die Entscheidungsprozesse wurde durch die Untersuchung die Deutung von Schutzpflichten, Schutzziele und Gefahren in Bezug auf Stromausfallfolgen geschärft. Die Untersuchung stellt damit einen wertvollen Beitrag im Diskurs um Szenarien, Schutzziele und Lokale Kritische Infrastrukturen dar, mithilfe dessen ein bisher fehlendes bundeseinheitliches Verständnis überwunden werden kann.

An zwei Anwendungsfällen wurde demonstriert, dass die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse für eine beliebige Gebietskörperschaft angewendet werden kann und anhand ihrer Ergebnisse eine Beurteilung des raum-zeitlichen Gefahrenpotentials möglich ist. Es wurden die entwickelten Aggregations- und Bewertungsverfahren verwendet, durch die unterschiedliche raum-zeitliche Analysen möglich sind. Darüber hinaus wird mit der Verwendung mehrerer Verfahren auch den mit einer Aggregation verbundenen Informationseinbußen entgegenwirkt. Mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen und des modifizierten Delphi-Verfahrens kann der Einfluss der mit der Beurteilungssubjektivität verbundenen Unschärfe auf das Ergebnis analysiert werden und eine wertvolle Entscheidungsunterstützung bereitgestellt.

In den Vulnerabilitätsanalysen werden jeweils Daten aus KRITIS-Katastern genutzt. Die dort dokumentierten Eigenschaften von KRITIS-Einrichtungen müssen wiederkehrend aktualisiert werden. Aus diesem Grund ist es ratsam, dass die Vulnerabilitätsanalyse ebenso wiederkehrend mit den aktualisierten Daten durchgeführt wird. In Anbetracht des Aufwandes und der Verzahnung mit anderen kommunalen Strategien erscheint eine Periodik von fünf Jahren als angemessen.

Aus der Anwendung der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse können Erkenntnisse gezogen werden, die im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf andere Gebietskörperschaften von Interesse sind. In beiden Anwendungsfällen zeigen sich vergleichbare Startzeitpunkte und Verläufe der Vulnerabilität für die am schwerwiegendsten und mildesten Bemessungsstromausfälle. In beiden Verläufen zeigten sich ähnliche Plateaus und Tipping Points. Beim schwerwiegendsten Bemessungsstromausfall zeigte sich jeweils eine erhebliche Eskalation am Morgen des zweiten Ausfalltages. In beiden Anwendungsfällen wurde deutlich, dass die Standortdichte von KRITIS-Einrichtungen nicht die jeweilige Vulnerabilitätsdichte widerspiegeln. Die Gefahrenpotentiale gingen insbesondere von einzelnen Einrichtungen aus, so dass sich räumliche Gefahrenpotentiale ohne unmittelbaren Bezug zur Standortdichte ergeben. In beiden Beispielen zeigt sich, dass das höchste Gefahrenpotential nicht in den Innenstädten, sondern in den unmittelbar angrenzenden Stadtteilen bzw. Stadtbezirken liegt. Auch lassen sich stadtkernferne räumliche Gefahrenpunkte identifizieren. Schlussendlich zeigte sich in den beiden aufgezeigten Anwendungsfällen, dass die gewählten Schutzziele sich mit einer priorisierten Versorgung von nur wenigen Teilbereichen einer Gebietskörperschaft weitestgehend erreichen lassen. Bei diesen Teilbereichen handelt es sich um die Gebiete, von denen auch das höchste Gefahrenpotential ausgeht.

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Anwendungsfälle lassen sich erste Thesen formulieren (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Abgeleitete Thesen aus den Erkenntnissen der bisherigen Anwendungsfälle.

Nr.	These
1	Der schwerwiegendste Bemessungsstromausfall beginnt in jeder Gebietskörperschaft am Morgen eines Werktages, auf dem ein Werktag folgt, im Sommer zwischen 7:00 und 8:00 Uhr.
2	Der mildeste Bemessungsstromausfall beginnt in jeder Gebietskörperschaft am Abend eines Samstags im Winter zwischen 18:00 und 19:00 Uhr.
3	Im Verlauf eines Stromausfalls zeigen sich Plateaus und Tipping Points.
4	Beim schwerwiegendsten Bemessungsstromausfall kommt es in jeder Gebietskörperschaft am Morgen des zweiten Ausfalltages zu einer erheblichen Eskalation zwischen 7:00 und 9:00 Uhr.
5	Die Standortdichte von KRITIS-Einrichtungen spiegelt nicht die Vulnerabilitätsdichte und damit das räumliche Gefahrenpotential wider.
6	In Stadtkreisen bzw. kreisfreien Städten liegt das höchste räumliche Gefahrenpotential nicht in den Innenstädten.
7	Bei Stadtkreisen bzw. kreisfreien Städten lassen sich mit einer priorisierten Versorgung der Teilbereiche mit dem höchsten Gefahrenpotential wesentliche Schutzziele erfüllen.

Da im Rahmen dieser Arbeit keine Landkreise analysiert wurden, lassen sich nur bedingt Aussagen zum räumlichen Überschneiden von Gefahrenpotentialen mit der Verortung von Ober- und Mittelzentren bzw. Mittelzentren mit oberzentralen Teilfunktionen formulieren. Es bleibt zu vermuten, dass bei Landkreisen das räumliche Gefahrenpotential in Ober- und Mittelzentren bzw. Mittelzentren mit oberzentralen Teilfunktionen liegt und sich mit einer priorisierten Versorgung dieser Zentren wesentliche Schutzziele erfüllen lassen. Zur Verifizierung oder Falsifizierung bedarfs weiterer Forschungsaktivitäten.

Die aus den Erkenntnissen abgeleiteten Thesen über die raum-zeitlichen Folgen eines Stromausfalls in Gebietskörperschaften basieren auf ersten Anwendungsfällen, in denen mehrere KRITIS-Typen und der in dieser Arbeit festgelegte Bemessungsstromausfall betrachtet wurden. Eingeflossen in die Thesenbildung sind neben den Anwendungsfällen Karlsruhe und Mannheim weitere Fälle. Aufgrund der geringen Anzahl an bisherigen Anwendungsfällen kann im Rahmen dieser Arbeit keine Regelmäßigkeit abgeleitet werden. Gleichwohl ist von Interesse, ob die Thesen auch in anderen Stadtkreisen bzw. kreisfreien Städten und Landkreisen zutreffend sind und ob sich anhand dessen eine Regelmäßigkeit herausstellen lässt. Ist dies der Fall, können effektive Vorsorge- und Bewältigungsstrategien, die sachgerecht im Moment nur anhand der individuellen Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilität für einen zu analysierende Gebietskörperschaft entworfen werden können, generalisiert werden. Gerade bei Thesen zum räumlichen Gefahrenpotential (Thesen 5, 6 und 7) hätte die Feststellung von Regelmäßigkeiten erheblichen Einfluss auf die bevölkerungsschutzbezogene Interpretation der Verflechtungsbereiche und Verdichtungsräume im Rahmen des Zentrale-Orte-Konzeptes in der Raumordnung.

Üblicherweise gestaltet sich die Validierung der Ergebnisse indikatorenbasierter Ansätze schwierig. Da die Vulnerabilitätsanalyse Zusammenhänge herstellt und abbildet, die nicht direkt gemessen werden können, ist eine Validierung aufgrund des Mangels an vergleichbaren Beurteilungsmodellen nicht möglich. Ebenso war es bisher aufgrund fehlender Stichproben und fehlender Dokumentation nicht möglich, Validierungen anhand tatsächlich stattgefundener Stromausfälle durchzuführen. Nichtsdestotrotz lassen sich die Grundannahmen des Verfahrens sowie die Plausibilität der gewählten Operationalisierungsvariante und der Ergebnisse bewerten. Für den Anwendungsfall Mannheim wurde mit den örtlich zuständigen Entscheidungsträgern reflektiert, dass die gewählten Indikatoren und Gewichte entscheidungsrelevant sind und dass die genutzten Operationalisierungen zu plausiblen, nachvollziehbaren und realitätsnahen Ergebnissen führen, die zu einem Verständnissgewinn beitragen und für eine Priorisierung geeignet sind. Das bestätigte sich auch in der Auswertung der tatsächlich stattgefundenen Stromausfälle und die hierfür durchgeführten Vulnerabilitätsanalysen.

## **14.2 Schlussfolgerungen zur Methodik der Vulnerabilitätsanalyse**

### **14.2.1 Kooperation zwischen KRITIS-Betreibern und Entscheidungsträgern**

Durch die Vorgehensweise und die Struktur der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse besteht ein systematisches Verfahren zur Einbindung der Entscheidungsträger. Mithilfe von Abschätzungen durch Entscheidungsträger unterschiedlicher Zuständigkeiten wurden erstmals Relevanzgewichte und eine Verbrauchsfunktion ermittelt. Durch dieses Vorgehen haftet den Ergebnissen jedoch eine Subjektivität an. Es genügt daher nicht, in den weiteren Berechnungen die einmal vorgenommenen Abschätzungen zu ver-

wenden, sondern es muss auch analysiert werden, wie stabil die Ergebnisse gegenüber der aus der Subjektivität hervorgehenden Variationen sind (Eisenführ, Weber und Langer, 2010). Im Hinblick auf die Relevanzgewichtung ist mit der Verwendung des modifizierten Delphi-Verfahrens den örtlich zuständigen Entscheidungsträgern die Variation der Abschätzung durch Durchschnittsentscheider bekannt. Dieses Wissen unterstützt sie bei der schlussendlich vorzunehmenden Gewichtung. Eine Entscheidungsunterstützung ist auch, dass die Streuung der Abschätzung der Relevanzgewichte durch die Durchschnittsentscheider mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation in die Ergebnisberechnung integriert werden kann. Gleiches gilt für die Abschätzung der Verbrauchsfunktion. Mit der so berechneten Streuung wird der Einfluss der Parameterunschärfe im Ergebnis deutlich. Darüber hinaus besteht auch über die Auswertung der Sensitivitätsanalyse die Möglichkeit, den Einfluss der Streuung und damit die Stabilität der Ergebnisse zu beurteilen. Durch diesen Umgang mit Subjektivität kann ihr Einfluss auf das Ergebnis besser beherrscht werden.

Durch das Vorgehen in der Umsetzung der Vulnerabilitätsanalyse wird die zielgerichtete Kooperation zwischen den Behörden der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes und den Betreibern von Kritischen Infrastrukturen gefördert. Die Einbindung der Betreiber erfolgt dabei einerseits zweckgebunden, indem sie die zur Durchführung der Analyse notwendigen Daten bereitstellen. Zum anderen wird mit dem Analyseergebnis das Gefahrenpotential der jeweiligen Einrichtung während eines Stromausfalls reflektiert und die Rolle der einzelnen Einrichtung im System der Kritischen Infrastrukturen einer Gebietskörperschaft transparent. Durch die in der Vulnerabilitätsanalyse verwendeten objektiven Maßstäbe wird erstmals ein die Bildung eines einheitlichen Verständnisses über die Stromausfallfolgen für alle eingebundenen Akteure möglich. Anhand dessen sind in den etablierten Sicherheitspartnerschaften geeignete Maßnahmen abzuwägen. Deren Effektivität kann mithilfe der Vulnerabilitätsanalyse zusätzlich bewertet werden.

Für die erfolgreiche Nutzung der Vulnerabilitätsanalyse bedarf es der vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen den Behörden und den KRITIS-Betreibern. Besteht dies nicht, sind soziale Dilemmata nicht auszuschließen. Soziale Dilemmata können in sozialen Konfliktsituationen entstehen, wenn allein eigeninteressensorientiertes Handeln, das der Maximierung der eigenen Gewinne dient, zu schlechteren Ergebnissen führt als ein kooperatives Vorgehen (Diekmann, 2016). Zur Verdeutlichung möglicher Dilemmata bei der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse wird nachfolgend auf die in der Literatur weit verbreiteten möglichen Mitnahmeeffekte (u. a. Scharpf, 1983), Nutzungsdilemmata (u. a. Dawes, 1980), Trittbrettfahrerprobleme (u. a. Diekmann, 2016) und Prinzipal-Agent-Probleme (u. a. Kiener, 1990; Kleine, 1996) eingegangen. Es werden einzelne Beispiele im Zusammenhang mit der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse aufgezeigt.

Mitnahmeeffekte liegen bei Anreizen vor, die eine bestimmte Akteursgruppe ansprechen sollen, die aber auch ebenso die begünstigt, die ohnehin eine gewünschte Handlung vorgenommen hätten. Werden basierend auf den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse Anreize für bestimmte Akteure zur erweiterten Vorbereitung auf Stromausfälle gesetzt, könnten Mitnahmeeffekte entstehen, wenn ebenso Akteure von diesen Anreizen profitieren, die sich z. B. aus betriebswirtschaftlichen, rechtlichen oder anderen Gründen sowieso für Maßnahmen der erweiterten Vorbereitung entschieden hätten.

Ein Nutzungsdilemma tritt ein, wenn Gewinne individualisiert und mögliche Schäden sozialisiert werden. Dieses Dilemma kann z. B. bei Betreibern Kritischer Infrastrukturen vorliegen, die durch fehlende oder mangelnde Vorbereitung auf einen Stromausfall den kontinuierlichen Betrieb ihrer Einrichtung nicht in ausreichendem Maß eigenständig sicherstellen. Durch dieses Verhalten wird bei Stromausfall eine Unterversorgung der Bevölkerung billigend in Kauf genommen. Im Wettbewerb mit anderen Einrichtungen des

gleichen Typs ergibt sich für derartige Betreiber ein Vorteil, da sie die mit der notwendigen Vorbereitung verbundenen Aufwendungen und Betriebskosten nicht tätigen. Gleichzeitig sozialisieren sie die Wirkungen einer drohenden Unterversorgung. Darüber hinaus binden sie die im Ereignisfall bei ihnen für einen kontinuierlichen Betrieb eingesetzten Fähigkeiten der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes, die wiederum an anderer Stelle zur Beherrschung von anderen stromausfallbedingten Gefahren hätten eingesetzt werden können. Verwirklichen sich diese anderen Gefahren zu Schäden, werden diese wiederum zum Vorteil der entsprechenden Betreiber sozialisiert.

Ein Trittbrettfahrerproblem tritt auf, wenn Akteure von einem kollektiven Handeln profitieren bzw. öffentliche Güter nutzen, ohne dass sie dafür eine Gegenleistung bereitstellen. Dieses Problem kann bei der priorisierten Versorgung auftreten. Akteure, die sich in einem Umspannwerkbezirk befinden, der aufgrund der Eigenschaften der dort verorteten Kritischen Infrastrukturen im Vergleich zu anderen Umspannwerkbezirken zu priorisieren ist, profitieren ebenfalls die anderen dort verorteten Einrichtungen von der Priorisierung, gleichwohl sie aus Sicht des Gemeinwohls hierfür keinen schutzwürdigen Beitrag leisten. Sind zu priorisierende Umspannwerkbezirke bereits im Vorfeld bekannt, können Akteure bei Standortentscheidungen zu vorsätzlichen Trittbrettfahrern werden. Mit der kommenden objektscharfen Schaltbarkeit von Netzkunden lassen sich derartige Trittbrettfahrerprobleme jedoch beschränken.

Ein weiteres soziales Dilemma stellt das Prinzipal-Agent-Problem dar. Das Prinzipal-Agent-Problem ist gekennzeichnet von einer Informationsasymmetrie zwischen einem Auftraggeber (bzw. einer Aufsichtsinstanz, einem ‚Prinzipal‘) und einem Auftragnehmer (bzw. einem Beauftragten, einem ‚Agenten‘). Beide verfolgen durchaus unterschiedliche Zielvorstellungen. Der Auftragnehmer verfügt über einen Wissensvorsprung, den er zu Gunsten oder Ungunsten des Prinzipals einsetzt. Im vorliegenden Kontext liegt ein Prinzipal-Agent-Problem im Hinblick auf die Erstellung von KRITIS-Katastern vor. Betreiber Kritischer Infrastrukturen, die Daten über ihre Einrichtungen und deren Eigenschaften den Gefahrenabwehr- und Katastrophenschutzbehörden bereitstellen, verfügen über einen Wissensvorsprung hinsichtlich der Eigenschaften ihrer Einrichtungen. Die Gefahrenabwehr- und Katastrophenschutzbehörden sind wohlfahrts- und schutzpflichtorientiert und verwenden die Daten aus dem KRITIS-Kataster entsprechend in der Vulnerabilitätsanalyse. Die Betreiber können durch die bereitgestellten Daten in den KRITIS-Katastern das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse zu ihren Gunsten oder Ungunsten beeinflussen. Motiviert vom Eigennutzen und durch unkooperatives Verhalten können die Daten beliebig mangelhaft und manipuliert sein oder gar fehlen. Bisher fehlt es an Aufsichtsprinzipien und Sanktionen, um dieses drohende soziale Dilemma zu beherrschen.

Weder fördert noch verhindert die vorgestellte Vulnerabilitätsanalyse das Auftreten sozialer Dilemmata. Nichtsdestotrotz sind Entscheidungsträger für derartige missbräuchliche Nutzungen der Vulnerabilitätsanalyse zu sensibilisieren. In der Konsequenz eines solchen Missbrauchs basieren Entscheidungen auf falschen Tatsachen, was ein Ermessensfehlgebrauch provoziert. Je nach Tragweite droht bei derartigen Missbräuchen ein Vertrauensverlust sowohl gegenüber den Betreibern der jeweiligen Einrichtung als auch gegenüber der Funktionsfähigkeit des Risiko- und Krisenmanagementsystems.

### **14.2.2 Relevanzgewichtung**

Zur Relevanzgewichtung wurde das Direct Weighting Verfahren mit einem modifizierten Delphi-Verfahren kombiniert. Es bietet ein strukturiertes Vorgehen zur Bestimmung der Relevanzgewichte durch die örtlich zuständigen Entscheidungsträger einer zu analysierenden Gebietskörperschaft und unterstützt hierdurch die sachgerechte Durchführung der Gefahrenprognose. Die daraus resultierende Transparenz, Flexibilität

und Beteiligung zielen einerseits auf die Verbesserung des Verständnisses, der Nachvollziehbarkeit, der Interpretationsfähigkeit und der Akzeptanz der Analyseergebnisse ab. Auf der anderen Seite führt ein solches Vorgehen zu weniger willkürlichen, beliebigen, manipulierbaren oder zufälligen Ergebnissen, weshalb die hierbei getroffenen Entscheidungen der juristischen Kritik besser standhält.

Die mit dem Direct Weighting Verfahren ermittelten Schätzungen der Relevanzgewichte wurden normalisiert. Da das hierbei angewendete Normalisierungsverfahren wesentlich das Ergebnis der Analyse beeinflusst, ist dessen Auswahl mit Bedacht vorzunehmen. Die in dieser Arbeit vorgenommene Wahl einer linearen Normalisierung begründet sich in der einfachen Anwendung, die für ungeübte Entscheidungsträger transparent und nachvollziehbar ist. Gleichwohl können auch andere Normalisierungsverfahren angewendet werden.

Der so vorgenommenen Gewichtung haftet Subjektivität an, weshalb Verzerrungen nicht auszuschließen sind. Mit der Kombination des Direct Weighting Verfahrens mit einem Delphi-Verfahren kann sichergestellt werden, dass sachgemäße und konsistente Gewichtswerte festgelegt werden. Anhand der Ergebnisbandbreite der ersten Delphi-Runde werden etwaige Abweichungen der Abschätzungen der Durchschnittsentscheider deutlich. Dies dient der Entscheidungsunterstützung und kann sachgrundbezogen durch die örtlich zuständigen Entscheider angepasst werden.

Als eine weitere Quelle für Verzerrungen wird in der Literatur der sogenannte Bandbreiteneffekt erkannt (Monat, 2009; Goodwin und Wright, 2004), der gerade bei kleinen Ausprägungsunterschieden (Bandbreiten) der Indikatoren zu ungewollten Verstärkungen im Ergebnis führen könnte. Im gewählten Verfahren erfolgt die Gewichtung zunächst generisch und losgelöst von einem konkreten Kontext einer Gebietskörperschaft, weshalb die Ausprägungen der Indikatoren (Bandbreiten) bei der Gewichtung nicht berücksichtigt werden. Die Ausprägungen der Indikatoren werden in jeder Analyse in Bezug zum Anwendungskontext gesetzt. Um ggf. vorhandene Verzerrungen von Bandbreiteneffekten zu beherrschen, könnten unterschiedliche Gewichtungsmethoden (Pöyhönen und Hämäläinen, 2001) oder eine Analyse der Bandbreitensensitivität (Steiner, 2007) vorgenommen werden.

Obwohl in der ersten Runde des Delphi-Verfahrens eine hinreichend hohe Anzahl von Entscheidungsträgern für die Bestimmung der Relevanzgewichte befragt wurde, könnte durch eine noch größere Anzahl an Teilnehmern die Repräsentativität der abgeschätzten Relevanzgewichte erhöht werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es aufgrund des unverhältnismäßigen Aufwandes nicht zumutbar, eine annähernde große Teilerhebung oder gar eine Gesamterhebung aller Entscheidungsträger in Deutschland durchzuführen. Mit dem für die Abbildung der Abschätzung durch Durchschnittsentscheider hinreichend hohen Stichprobenumfang wurden Tendenzen der Relevanzgewichtung deutlich.

Soweit die örtlich zuständigen Entscheider zu einem Konsens in der Bestimmung der Relevanzgewichte kommen, kann das Delphi-Verfahren sachbegründet durch die zuständigen Entscheider verändert werden, ohne dass hinsichtlich der sachrichtigen Entscheidung wesentliche Vorbehalte zu erkennen sind. So können die örtlich zuständigen Entscheidungsträger auch zunächst selbst eine erste Runde des Delphi-Verfahrens durchlaufen, in der sie selbstständig und unabhängig voneinander Relevanzgewichte abschätzen. Auch können sie gemeinsam jedes einzelne Relevanzgewicht im Diskurs festlegen. Ihr Ergebnis könnte dann mit den empfohlenen Ergebnissen der Durchschnittsentscheider verglichen und diskutiert werden.

Die Wahl alternativer Gewichtungungsverfahren ist nicht ausgeschlossen. Nach Abwägung erscheinen jedoch etablierte Alternativen gegenüber dem vorgestellten Verfahren aufgrund der gewählten hohen Anzahl der bewerteten KRITIS-Typen, der Eigenschaft als Gruppenentscheid und hinsichtlich der Anforderungen an die Gefahrenprognose als zu anspruchsvoll, zu zeitintensiv und deswegen als nicht ausreichend praktikabel. Da die örtlich zuständigen Entscheidungsträger sich schlussendlich für die Bestimmung der Gewichte verantwortlich zeichnen und ihre Wahl sachbegründet sein muss, obliegt ihnen die Wahl des Vorgehens.

### 14.2.3 Indikatoren

Für die Indikatoren des Leistungsvermögens, der fehlenden Versorgungsleistung und des Resistenzverlustes wurden jeweils Operationalisierungsvarianten diskutiert. Für die Anwendungsfälle wurden die favorisierten Optionen angewendet.

Für die Operationalisierung des Kritikalitätsindikators des Leistungsvermögens wurden aussagekräftige Vergleichsattribute verwendet. Die Anzahl und die Wahl der verwendeten Vergleichsattribute für KRITIS-Typen beeinflusst wesentlich die Aussagequalität und ist daher mit Bedacht zu wählen. Bei der Wahl der Vergleichsattribute ist anzumerken, dass nicht nur geeignete Daten für alle berücksichtigten KRITIS-Einrichtungen vorliegen, sondern dass diese auch für eine sachverhaltswahre Darstellung ausreichend aktuell sein müssen. In dieser Arbeit wurde mit dem Leistungsvermögen das größtmögliche Produktionsvermögen einer KRITIS-Einrichtung nach quantitativen Gesichtspunkten beleuchtet. Bei manchen lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen kann jedoch gerade in Krisenzeiten auch von der Qualität des Gutes oder Dienstleistungen abgewichen werden, ohne dass Einbußen im Leistungsvermögen zu verzeichnen sind. Für die Berücksichtigung der Qualität ist die Operationalisierung anzupassen.

Der Kritikalitätsindikator der fehlenden Versorgungsleistung beruht auf der Annahme eines stetig vorhandenen Gleichgewichts von Nachfrage und Angebot, das während der initialen Phasen eines Stromausfalls den normalen Umständen entspricht. Gerade während eines Stromausfalls kann es jedoch zu nicht marktüblichen Verhaltensänderungen kommen. Es ist unklar und bedarf weiterer empirischen Forschungen, bis zu welcher Stromausfalldauer davon ausgegangen werden kann, dass sich die Nachfrage gegenüber normalen Umständen nur unbedeutend ändert und daher mit einer Nachfrage zu rechnen ist, die im Wesentlichen den normalen Umständen entspricht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Versorgungsleistung anhand von Standardlastprofilen operationalisiert. Zwar ist diese Wahl zielführend, muss aber kritisch reflektiert werden hinsichtlich des Alters und der fehlenden Unschärfeinformation der Standardlastprofile. Hierdurch und gerade hinsichtlich der anhaltenden Nutzeränderungen beim Stromverbrauch und bei der Eigenstromversorgung stellt sich die Frage, ob die Standardlastprofile ausreichend repräsentativ die heutigen individuellen Eigenschaften einer betrachteten Einrichtung abbilden. Darüber hinaus bestehen bei der Versorgungsleistung auch Unschärfen, die im schlussendlichen Ergebnis widerspiegelt werden könnten. Im Hinblick auf die anhaltende Digitalisierung des Netzbetriebs mag es in Zukunft möglich sein, auf objektscharfe Verbrauchsdaten von Einrichtungen zuzugreifen. Gleiches gilt ggf. für Daten aus sozialen Medien und mobilen Anwendungen, die ebenso derartige Aufschlüsse über die Nachfrage für die Leistung einer Einrichtung geben und daher alternative Operationalisierungsverfahren darstellen könnten.

Für die Operationalisierung des Resistenzverlustes können unterschiedliche Verbrauchsfunktionen Anwendung finden. In der vorliegenden Arbeit wurde eine entscheidenderdefinierte Verbrauchsfunktion favorisiert. Hierfür wurde ein Workshop durchgeführt, bei dem Entscheidungsträger unterschiedlicher örtlicher Zuständigkeit Verbrauchsquoten für eine kleine Anzahl an Referenzzeitpunkten abgeschätzt haben. Anhand der Mittelwerte der abgeschätzten Verbrauchsquoten zu den gewählten Referenzzeitpunkten wurde eine Verbrauchsfunktion approximiert, mit der Verbrauchsquoten für beliebige Zeitpunkte annäherungsweise abgeschätzt werden können. Die geringe Anzahl der Punkte sicherte die unmittelbare und handhabbare Mitwirkung der Experten und die Akzeptanz der sich daraus ergebenden Approximationsfunktion. Hierdurch wurden zeitintensive und den Entscheidern überfordernde Abfragen vermieden.

Die Bestimmung einer Approximationsfunktion kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. Die Güte einer Approximationsfunktion entscheidet maßgeblich, wie gut die Bestimmung des Resistenzverlustes die tatsächlichen Abschätzungen der Entscheider repräsentieren. In der gewählten Form zeigte sich eine plausible und konsistente entscheidungsdefinierte Verbrauchsfunktion, gleichwohl Approximationsfunktionen mit besserer Güte nicht auszuschließen sind.

Die Abschätzungen durch Entscheider ermöglichten auch, Unschärfen in der Beurteilung der Verbrauchsquote zu berücksichtigen. Hierfür wurde die Rückmeldung und deren Streuung mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation in der Berechnung der Ergebnisse eingebunden. Auch diese Durchführung kann variieren, wobei die Wahl entsprechend den Anforderungen an die Genauigkeit letztendlich durch den Entscheidungsträger zu erfolgen hat.

#### **14.2.4 Alternativenbildung, Aggregationen und Bewertungen der Gefahrenpotentiale**

Um die örtliche Zuständigkeit für die Gefahrenabwehr entsprechend des Polizei- und Ordnungsrechts Rechnung zu tragen, wurde bei der Alternativenbildung der Vulnerabilitätsanalyse eine räumliche Betrachtung gewählt, die den administrativ-politischen Grenzen in einem analysierten Landkreis oder einer kreisfreien Stadt entspricht. Hierdurch lassen sich erstmals Stromausfallfolgen in der für die Entscheidungsfindung des Risiko- und Krisenmanagements geeigneten Weise räumlich darstellen. Die vorgestellte Methodik der Vulnerabilitätsanalyse schließt jedoch andere Betrachtungsweisen gerade auch zur Berücksichtigung der Verteilnetztopologie nicht aus.

Die räumliche Auflösung der Vulnerabilität anhand der administrativ-politischen Raumgrenzen von Landkreisen und kreisfreien Städten folgt gemäß dem Ordnungsrecht der örtlichen Handlungskompetenz. Für überörtliche Schadenslagen ist dieses Vorgehen jedoch kritisch zu bewerten. Die Versorgungsreichweite von Einrichtungen kann bis in benachbarte Gebietskörperschaften reichen. In Städteverbänden und Metropolregionen ergänzen sich Einrichtungen funktional. In strukturschwachen Gegenden bestehen starke Versorgungsabhängigkeiten zu umliegenden Ober- und Mittelzentren mit oberzentralen Funktionen. Derartige überörtliche Bedeutungen von KRITIS-Einrichtungen werden bei einem an den Grenzen von Landkreisen und kreisfreien Städten ausgerichteten Verfahren vernachlässigt. Bei strukturschwachen Gebieten kann die Rolle bestehender Mittelzentren ggf. überschätzt werden. Für manche Fälle erscheint es daher zielführend, Einrichtungen mit überregionaler Versorgungsreichweite und umliegende Ober- und Mittelzentren mit oberzentralen Funktionen durch die Wahl geeigneter weiträumigere Analyserahmen einzubinden. Hierzu bieten sich überörtliche Raumstrukturen mehrerer Landkreise und kreisfreie Städte genauso an wie geowirtschaftliche Raumbezüge mit ihren jeweiligen Planungsregionen und -verbänden. Um in dieser Weise die überörtliche Bedeutung von Einrichtungen zu berücksichtigen, bedarf es aufgrund der

ordnungsrechtlich problematischen Koinzidenz örtlicher Handlungskompetenzen sowohl in der Analyse-durchführung als auch in der Entscheidungsfindung geeignete Kooperationsmechanismen der zuständigen Stellen.

Die vorgestellte spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse bietet eine Vielzahl an Vulnerabilitätsaggregationen und Bewertungen für das Gefahrenpotential und ermöglicht daher in umfassender Weise wertvolle Rückschlüsse. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass nicht vorhersehbare und nicht modellierbare Effekte während eines Stromausfalls eintreten, die nicht ausreichend mithilfe der Vulnerabilitätsanalyse prognostiziert und adressiert werden können. Die Ergebnisse des vorgestellten Analyseverfahrens stellen eine Methodik für eine umfassende Entscheidungsunterstützung zur Verfügung, können aber im Hinblick auf die umfassenden und individuellen Eigenschaften einer Schadenslage nicht alleiniges Entscheidungswerkzeug im Führungsvorgang und in der Risikoanalyse sein.

### 14.3 Anschlussfähigkeit und zukünftiger Forschungsbedarf

Zur Umsetzung der vorliegenden spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse wurde ein Java-basierter Demonstrator entwickelt, mithilfe dessen die wesentliche Durchführung der Analyse sowohl für die Bedarfplanung als auch für die akute Krisenbewältigung möglich ist. Abbildung 14.1 zeigt einen Screenshot der Nutzeroberfläche des Demonstrators. Für eine marktfähige Anwendung bedarf es im Hinblick auf Praktikabilität, Nutzerfreundlichkeit und Anwendungsoberfläche weiterer Investitions- und Entwicklungsmaßnahmen.

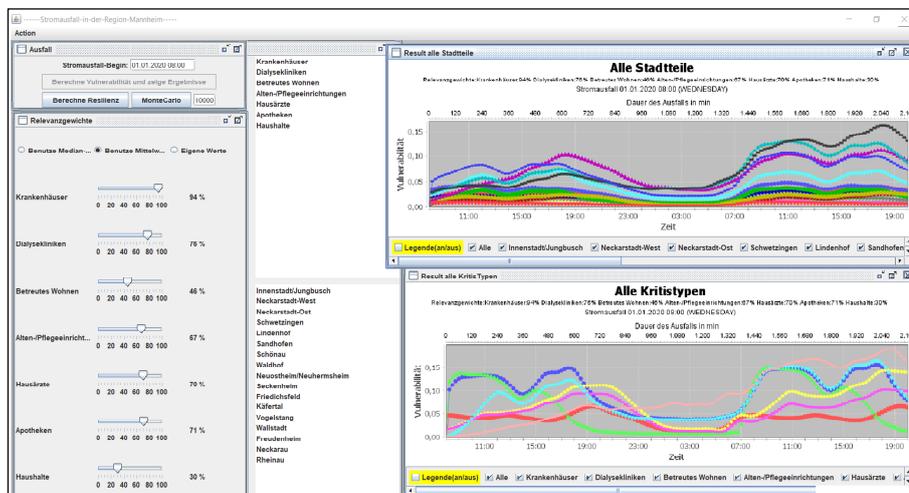


Abbildung 14.1: Screenshot der Nutzeroberfläche des Java-basierten Demonstrators.

Die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse lässt sich auf verschiedenartige Schadenslagen wie Hochwasser, Erdbeben, Orkane, Cyberangriffe oder Terroranschläge anwenden, soweit es bei denen durch sie ausgelösten Stromausfällen eine Beurteilung stromausfallbedingter Gefahren bedarf. Da die Vulnerabilitätsanalyse den kontinuierlichen Betrieb von Kritischen Infrastrukturen beleuchtet, ist die Ursache eines Stromausfalls nur bedingt von entscheidungspraktischer Relevanz.

Durch die Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse liegen raum-zeitliche Erkenntnisse über stromausfallbedingte Gefahren einzelner Einrichtungen und Gebietskörperschaften vor. Dieses Wissen kann in unterschiedlicher Weise genutzt werden, um eine wesentliche Steigerung der Resilienz zu erzielen. So können im Rahmen des Gesamtkonzepts Notstrom der Konzeption Zivile Verteidigung anhand der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse z. B. die wenigen zur Verfügung stehenden Notstromaggregate, Netzersatzanlagen und Treibstoffe verteilt werden. Auch in der Anwendung des Kaskadenprinzips zur Beherrschung kritischer Netzsituationen (VDE-AR-N 4140), insbesondere bei der Durchführung von Lastreduzierungen und Netzinselbetrieben, kann anhand der Resultate der spatial-temporalen Vulnerabilität eine priorisierte Versorgung von KRITIS-Einrichtungen erfolgen. Soweit lageabhängig zumutbar, hat eine priorisierte Versorgung in der Kaskade in einem Umfang stattzufinden, der für einen Vollbetrieb der priorisierten KRITIS-Einrichtung notwendig ist. In nicht vermeidbaren Fällen muss zumindest eine ausreichende Versorgung mit Elektrizität für einen kontinuierlichen Notbetrieb sichergestellt sein. Hierdurch besteht die Möglichkeit, eine Gefährdung der Bevölkerung aufgrund eines durch Elektrizitätsminderversorgung ausgelösten Mangels an lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen auszuschließen. Zur Umsetzung dieses Vorhabens haben Netzbetreiber, die Einrichtungen Lokaler Kritischer Infrastrukturen als Letztkunden mit Elektrizität versorgen, nach eigenem Vermögen und mit angemessenem organisatorischen Aufwand die baulichen, technischen und organisatorischen Vorkehrungen umzusetzen, durch die in kritischen Netzsituationen Kritische Infrastrukturen entsprechend ihrer Kritikalität bzw. ihres Gefahrenpotentials mit Elektrizität zu versorgen sind. Hierzu kann es auch dienlich sein, die Netztopologie an das räumliche Gefahrenpotential anzupassen (Ottenburger und Münzberg, 2017). Mit anhaltender Digitalisierung des Netzbetriebes und der flexiblen Steuerung von Endverbrauchern verringert sich der Aufwand dieser Umsetzung und die Grenzen der Unzumutbarkeit sinken erheblich. Eine priorisierte Versorgung von KRITIS-Einrichtungen oder von Gebietskörperschaften während netztechnischer Maßnahmen wie Lastreduzierungen oder Netzinselbetrieben führt nicht nur zur Systemsicherheit im Netzbetrieb, sondern auch zu einer systemischen Sicherheit für die Bevölkerung.

Forschungsbedarf besteht einerseits in der methodischen Fortentwicklung der Vulnerabilitätsanalyse und andererseits hinsichtlich der aus der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse abgeleiteten Erkenntnisse. Beides wird Nachfolgend erörtert.

Die Vulnerabilitätsanalyse kann zur Verbesserung der Aussagekraft methodisch fortentwickelt werden. Die in dieser Arbeit gewählte Struktur der Vulnerabilitätsanalyse berücksichtigt nicht in ausreichendem Maße die Wirkungen des Verhaltens der Bevölkerung auf das entstehende Gefahrenpotential. Gerade während langanhaltender und angekündigter Stromausfälle passen sich Betroffene an die veränderte Ausgangslage an. Wie diese Anpassung stattfindet, welche Faktoren dieses Verhalten (z. B. Risiko- und Krisenkommunikation) begünstigt oder behindert und welchen Einfluss das auf den zu erwartenden Schaden hat, darüber gibt es bisher keine ausreichenden Erkenntnisse. Mehr Kenntnisse über das Verhalten und den Einfluss auf das Gefahrenpotential bedarf es auch hinsichtlich des Zeitraumes nach einem Stromausfall. Mit der Instandsetzung der Stromversorgung lösen sich Gefahren nicht vollständig auf. Mögliche Rückschlüsse über die Entwicklung des Gefahrenpotentials nach einem Stromausfall könnten einer raumzeitlichen Analyse für den Zeitraum nach einer Wiederherstellung der Stromversorgung dienlich sein.

Zwar sind empirisch mehrstufige Kaskadeneffekte während der initialen Phase eines Stromausfalls kaum zu beobachten (vgl. Abschnitt 5.6), die Berücksichtigung der Interdependenz in der Vulnerabilitätsanalyse kann jedoch zur Aufweitung des Analysehorizontes führen. Vorbehaltlich sind dabei sowohl die Datenbeschaffung als auch der Modellierungsaufwand ins Verhältnis zum Erkenntnisgewinn zu setzen. Die Berücksichtigung von Interdependenzen kann mithilfe hybrider Modellierung erfolgen, in denen z. B. auch die

Erkenntnisse von Mikrosimulationen von KRITIS-Einrichtungen einfließen können. Mit den Erkenntnissen einer Mikrosimulation sind darüber hinaus nicht nur allgemeine einrichtungsspezifische Erkenntnisse möglich, sondern auch innerbetriebliche und prozessorientierte Rückschlüsse über die Einflüsse stromausfallbedingter Gefahren herleitbar (s. a. Münzberg, Müller und Raskob, 2018). Über den Mehrwert von Makro- und Mikrosimulationen im Rahmen der Analyse von Infrastrukturausfällen findet sich eine erweiterte Auseinandersetzung bei Brauner, Münzberg, Wiens, Fiedrich, Lechleuthner und Schultmann (2015).

Bisher adressiert die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse technisch bedingte Stromausfallfolgen, die mit dem kontinuierlichen Betrieb von Kritischen Infrastrukturen und der Sicherstellung der Versorgung mit lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen verknüpft ist. Kriminelle Taten wie Plünderungen, der gefühlte Verlust an Sicherheit oder Stabilität und insbesondere das Vertrauen in die staatliche Ordnung können ebenfalls als drohende und abzuwehrende Stromausfallfolgen verstanden werden, die jedoch bisher nicht methodisch adressiert wurden. Bestünden ausreichend Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen diesen Wirkungen, den Eigenschaften eines Stromausfalls und allen relevanten Einflussfaktoren, so dass diese hinreichend modelliert werden könnten, erscheint eine Erweiterung der Vulnerabilitätsanalyse möglich, die ebenso derartige gesellschaftlichen Zusammenhänge abbilden könnte.

Weiterer Forschungsbedarf ist in der Berücksichtigung von Echtzeitdaten zu erkennen. Da in Zukunft voraussichtlich Daten aus mobilen Anwendungen und aus sozialen Medien verfügbar sein werden, bedarf es weiterer Forschung, wie diese Daten zur Prognose von Stromausfallfolgen verwendet werden können. Darüber hinaus werden im Moment Lastprofile für die Darstellung der Versorgungsleistung verwendet. Mit der anhaltenden Digitalisierung des Netzbetriebes ist in Zukunft flächendeckend zu erwarten, dass objektscharfe Daten über den Stromverbrauch von Einrichtungen vorhanden sind, die zur Operationalisierung der Versorgungsleistung herangezogen werden können.

Ebenso besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezüglich der Anwendung und der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse. Es bedarf einer Validierung der Ergebnisse einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse. Diese kann z. B. anhand vergleichbarer Beurteilungsmodelle oder anhand tatsächlich stattgefundener Stromausfälle und deren tatsächlichen Auswirkungen auf den Betrieb von Kritischen Infrastrukturen erfolgen. Aus den bisherigen Ergebnissen der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse wurden Thesen über Regelmäßigkeiten von Stromausfallfolgen für kreisfreie Städte und Landkreise abgeleitet. Mithilfe von Ergebnissen weiterer Anwendungen sind diese entweder zu falsifizieren oder in Hypothesen zu überführen. Des Weiteren besteht zwar ein prototypischer Demonstrator, dieser ist jedoch hinsichtlich seiner Markttauglichkeit weiterzuentwickeln. Schlussendlich bedarf es weiterer Entwicklung, um die Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse in der Praxis nutzbar zu machen. Hierzu ist zunächst die Vulnerabilitätsanalyse in den Prozessen der Bedarfsplanung, der akuten Krisenbewältigung und der operativen Kaskade zu etablieren.

## 15 Zusammenfassung

Die Vorbereitung auf Stromausfälle hat in der vergangenen Dekade an erheblicher Bedeutung gewonnen. Landkreise und kreisfreie Städte haben sich intensiv mit den möglichen Folgen und den entstehenden Gefahren eines Stromausfalls auseinandergesetzt, um eine effektive Katastrophenvorsorge sicherzustellen. Hierbei fehlte es bisher an einer geeigneten Entscheidungsunterstützung, die sowohl die Entscheidungsfindung für die Bedarfsplanung als auch für die akute Krisenbewältigung adressiert. Ziel der Arbeit war es, die zur sachgerechten Entscheidung notwendigen Grundlagen und eine den umfangreichen Anforderungen an die Entscheidungsfindung gerecht werdende Methodik zur Beurteilung stromausfallbedingter Gefahren zu entwickeln. Gelöst wurde dies durch die Entwicklung einer spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse, der eine Untersuchung zu entscheidungsrelevanten Aspekten vorausging.

Mithilfe der entwickelten spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse kann für eine beliebige Gebietskörperschaft eine Beurteilung der Wirkungen eines Stromausfalls erfolgen. Durch die verschiedenartigen raum-zeitlichen Auflösungen der Ergebnisse erhöht sich nicht nur das Verständnis über die Zusammenhänge der örtlich individuellen Stromausfallfolgen. Die aufgezeigten Vulnerabilitätsaggregationen und Bewertungsverfahren ermöglichen auch eine Beurteilung der Dringlichkeit und der Erheblichkeit des stromausfallbedingten Gefahrenpotentials samt einer Priorisierung der KRITIS-Einrichtungen oder der Gebietskörperschaft sowie der Beurteilung von Szenarien.

Mit den Ergebnissen der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse besteht erstmals ein auf einem objektiven Maß basierende systematische Beurteilung der raum-zeitlichen Einflüsse einzelner KRITIS-Einrichtungen, mit der die ausreichende Versorgung der Bevölkerung mit lebensnotwendigen Dienstleistungen und Gütern während eines Stromausfalls in einer betrachteten Gebietskörperschaft bewertet werden kann. Hierdurch wird der Handlungsbedarf unterhalb der Ebene der Landkreise und kreisfreien Städten identifiziert, was ebenso die Zusammenarbeit zwischen Behörden und KRITIS-Betreibern im Rahmen der Sicherheitspartnerschaften als auch die Bildung eines einheitlichen Gefahrenverständnisses fördert. Die Methodik wurde eingebettet in die Entscheidungsprozesse der Bedarfsplanung und der akuten Krisenbewältigung in Deutschland.

Grundlage der Vulnerabilitätsanalyse ist ein indikatorenbasierter Ansatz mit modifizierten multiattributiven Analysen. Mit der Betrachtung des Leistungsvermögens und der fehlenden Versorgungsleistung wurden zwei Indikatoren entwickelt, mit der die Kritikalität von Kritischen Infrastrukturen beurteilt werden kann. Mit dem Indikator des Resistenzverlustes wird die Bewältigungskapazität von Einrichtungen beurteilt. Mithilfe von Gewichten wurde die Schutzwürdigkeit von KRITIS-Typen quantifiziert. Für eine zeitliche Beurteilung wurden einzelne Indikatoren dynamisiert. Die Ergebnisdarstellung erfolgt unter Verwendung verschiedener Vulnerabilitätsaggregationen und Bewertungsverfahren.

Für die Operationalisierung der Relevanzgewichte für KRITIS-Typen wurde ein modifiziertes Delphi-Verfahren entwickelt, wodurch Abschätzungen durch Entscheidungsträger unterschiedlicher Zuständigkeit in mehreren Workshops vorgenommen wurden. Die so generierte Abschätzung verdeutlicht die Beurteilung von Durchschnittsentscheidern und dient den örtlich zuständigen Entscheidungsträgern als Entscheidungsunterstützung. Anhand ihrer örtlichen Kenntnisse und weiteren Tatsachenwissens können die Gewichtswerte von KRITIS-Typen sachbegründet angepasst werden. Gleichzeitig kann die aus der subjektiven Schätzung der Durchschnittsentscheider herrührende Parameterunschärfe mithilfe einer Monte-

Carlo-Simulation im Analyseergebnis dargestellt werden. Hierdurch und durch eine Sensitivitätsanalyse lassen sich die Wirkungen der abweichenden Beurteilungen analysieren.

Für die Operationalisierung des Resistenzverlustes bedurfte es einer Abschätzung, wie sich schwindende Bewältigungsressourcen auf die Beurteilung des Gefahrenpotentials auswirken. Dieser Zusammenhang wurde ebenso durch Entscheider in einem Workshop abgeschätzt. Die anhaftende Subjektivität und die sich hierdurch ergebene Parameterunschärfe kann ebenfalls mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation im Ergebnis als Streuung dargestellt werden. Die so berücksichtigte Abschätzung von Durchschnittsentscheidern und der damit verbundenen Berücksichtigung der Unschärfe entsprechen den Anforderungen an eine sachgerechte Durchführung von Gefahrenprognosen und fördern ein rechtssicheres Entscheiden.

Die vorgestellte Methodik der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse ist derart flexibel gestaltet, dass

- weitere Indikatoren eingebunden werden können,
- die Analyse auf beliebige Gebietskörperschaften und
- einer beliebigen Wahl an KRITIS-Typen angewendet werden kann,
- eine Einflussnahme auf die Beurteilung durch die örtlich zuständigen Entscheidungsträger möglich ist und
- unterschiedliche Szenarien von Stromausfällen analysiert werden können.

Durch diese Flexibilität lässt sich die Methodik entsprechend der verfügbaren Daten, des verhältnismäßigen Aufwandes für die Durchführung der Analyse, des zu analysierenden Szenarios, den gewünschten Analysezielen und den gewünschten räumlichen Bezügen anpassen.

Durch die grundlegende Auseinandersetzung mit der Rolle von Kritischen Infrastrukturen bei der Entstehung von Gefahrenpotentialen bei Stromausfall entstand für die Zwecke der kommunalen Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes eine systematische Reflektion über plausible Stromausfallszenarien, eine Definition von Lokalen Kritischen Infrastrukturen, die Erstellung von KRITIS-Katastern, die Operationalisierung von Schutzzielen für die lokale Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz und die Bestimmung stromausfallbedingter Gefahren. Mit der Festlegung eines Bemessungsstromausfalls als kritischer Stromausfall besteht eine auslegungsrelevante Referenz, anhand der die ausreichende Dimensionierung von Vorsorge- und Bewältigungsmaßnahmen ausgerichtet wird. Die Reflektionen füllen bisherige Lücken in der Debatte zum Schutz Kritischer Infrastrukturen und in der sachgerechten Entscheidungsfindung bei der Vorbereitung auf Stromausfälle auf kommunaler Ebene. Sie bilden daher für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz einen wertvollen Beitrag in der normativen Entscheidungsunterstützung

Die Vulnerabilitätsanalyse wurde für die Stadtkreise Karlsruhe und Mannheim angewendet. Die Anwendungsfälle demonstrieren, welche Transparenz über die örtlichen Stromausfallfolgen erzielt werden kann. Anhand des Resilienzwertes wurde der schwerwiegendste und der mildeste Beginn eines Bemessungsstromausfalls identifiziert und deren jeweilige Vulnerabilitätsverläufe ermittelt. Anhand des schwerwiegendsten Beginns wurde durch die Wahl unterschiedlicher Vulnerabilitätsaggregationen das Verständnis über die Einflüsse der betroffenen KRITIS-Typen, einzelner KRITIS-Einrichtungen sowie Stadtteile bzw. Stadtbezirke vergrößert. Hierdurch wurden nicht nur die räumlichen, sondern auch die zeitlichen Gefahrenpotentiale sowie Tipping Points und Plateaus identifiziert.

Sowohl für Karlsruhe als auch für Mannheim konnte anhand von Heat Maps festgestellt werden, dass die Standortdichte nicht das räumliche Gefahrenpotential abbildet. Ebenso liegt das höchste räumliche Gefahrenpotential nicht in den Innenstädten. Für die Aktionsplanung im akuten Krisenmanagement wurde anhand des schwerwiegendsten Bemessungsstromausfalls ermittelt, wie Priorisierungen von Stadtteilen bzw. Stadtbezirken z. B. für eine Lastreduzierung oder für einen Netzinselbetrieb vorgenommen werden können. Untersucht wurde auch, welche Wirkung Priorisierungen auf die Erreichung von Schutzzielen hat. Die hierfür angewendete schutzzielorientierte Bewertung zeigte, dass eine Priorisierung weniger Stadtteile bzw. Stadtbezirke mit dem höchsten Gefahrenpotential ausreicht, um wesentliche Schutzziele zu erreichen. Darüber hinaus wurden Stromausfälle, die in den Städten tatsächlich stattfanden, analysiert. Die Analyseergebnisse zeigen wichtige Erkenntnisse für die akute Krisenbewältigung.

In zukünftigen Forschungstätigkeiten sind mögliche Regelmäßigkeiten raum-zeitlicher Stromausfallfolgen in Landkreisen und kreisfreien Städten, die sich aus den bisherigen Erkenntnissen der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse ableiten lassen, zu untersuchen. Derartige Regelmäßigkeiten hätten wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung von Vorsorge- und Bewältigungsstrategien und der Bedeutung des Zentrale-Orte-Konzeptes der Raumordnung für die effektive Abwehr von stromausfallbedingten Gefahren.

Durch die Anwendungsbeispiele wurde demonstriert, dass sich die spatial-temporale Vulnerabilitätsanalyse als ein geeignetes Vorhersage-, Analyse- und Entscheidungsunterstützungswerkzeug anbietet, um den Anforderungen der Brand-, Rettungsdienst- und Landeskatastrophenschutzgesetze sowie der polizei- und ordnungsrechtlichen Vorgaben an die Entscheidungsfindung in der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes an die Abwehr stromausfallbedingter Gefahren zu entsprechen. Darüber hinaus fördert die Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse das Erreichen der strategischen Ziele in der Katastrophenvorsorge, denen sich die Bundesregierung mit dem Sendai Framework for Disaster Risk Reduction verpflichtet hat. Die Verwendung der Ergebnisse der spatial-temporalen Vulnerabilitätsanalyse als Maß für die Priorisierung von KRITIS-Einrichtungen oder Gebietskörperschaften kann in der Umsetzung des Gesamtkonzeptes Notstrom im Rahmen der Konzeption Zivile Verteidigung zu einer wesentlichen Steigerung der Resilienz beitragen. Das Vulnerabilitätsmaß kann darüber hinaus auch im Kaskadenprinzip der VDE-AR-N 4140 bei kritischen Netzsituationen dazu eingesetzt werden, Netzendkunden nach ihrem anhaftenden Gefahrenpotential bevorzugt zu behandeln und, soweit technisch möglich und zumutbar, prioritär zu versorgen, wodurch nicht nur die systematische Sicherheit sondern auch aus ganzheitlicher Sicht eine systemische Sicherheit für eine bedrohte Bevölkerung erzielt wird.



# Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH (Berlin), Amprion GmbH (Dortmund), TenneT TSO GmbH (Bayreuth), TransnetBW GmbH (Stuttgart) (April 2015): *Grundsätze für die Planung des deutschen Übertragungsnetzes*.
- Adams, T. M., Bekkem, K. R. und Toledo-Durán, E. J. (2012): *Freight Resilience Measures*, in: Journal of Transportation Engineering, vol. 138, No. 11, 1403-1409.
- Adger, W. N. (2006): *Vulnerability*, in: Global Environmental Change, vol. 16, 268-281.
- Ajodhia, V., van Gemert, M. und Hakvoort, R. (2002): *Electricity outage cost valuation: A survey*, Proceedings CEPSI, 14 Conference of the Electrical Power Supply Industry, Fukuoka/Japan.
- Akgun, I., Kandakoglu, A. und Ozok, A. F. (2010): *Fuzzy integrated vulnerability assessment model for critical facilities in combating the terrorism*, in: Expert Systems with Applications, vol. 37, No. 5, 3561–3573.
- Albuquerque, M. T. D., Sanz, G., Oliveira, S. F., Martínez-Alegría, R. und Antunes, I. (2013): *Spatio-temporal Groundwater vulnerability assessment - a coupled remote sensing and GIS approach for Historical land cover reconstruction*, in: Water Resource Management, vol. 27, No. 13, 4509–4526.
- Alfares, H. K. und Nazeeruddin, M. (2002): *Electric load forecasting: Literature survey and classification of methods*, in: International Journal of Systems Science, vol. 33, No. 1, 23-34.
- Alisch, K., Winter, E. und Arentzen, U. (2014): *Gabler Wirtschaftslexikon*, 16. Auflage, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Alwang, J., Siegel, P. B. und Jorgensen S. L. (2001): *Vulnerability: A View From Different Disciplines*, In: Social Protection Discussion Paper Series, No. SP 115, World Bank, Washington, DC.
- Amt für Bauordnung und Hochbau (2013): *Störfallbetriebe und schutzwürdige Nutzungen im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren und im immissionsschutzrechtlichen Beteiligungsverfahren*, Bauprüfdienst (BPD) 4/2013, Freie und Hansestadt Hamburg.
- Anagnostatos, S. D., Halevidis, C. D., Polykrati, A. D., Bourkas, P. D. und Karagiannopoulos, C. G. (2013): *Examination of the 2006 blackout in Kefallonia Island, Greece*, in: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 49, 122-127.
- Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland und Deutscher Städtetag (AGBF und DST) (2015): *Kritische Infrastrukturen KRITIS: Gemeinsame Themenfelder des Deutschen Städtetages (DST) und des Verbandes kommunaler Unternehmen (VKU), (KRITIS vku 150511)*.
- Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) (Hrsg.) (2006): *Hinweise zur Ausführung von Ersatzstromversorgungsanlagen in öffentlichen Gebäuden (Ersatzstrom 2006)*, lfd. Nr. 96, Berlin.
- Aubrecht, C., Steinnocher, K., Köstl, M., Züger, J. und Loibl, W. (2013): *Long-term spatio-temporal social vulnerability variation considering health-related climate change parameters particularly affecting elderly*, in: Natural Hazards, vol. 68, No. 3, 1371–1384.

- Aven, T. (2013): *Practical implications of the new risk perspectives*, in: Reliability Engineering and System Safety, vol. 115, 136–45.
- Aven, T. und Krohn, B. S. (2014): *A new perspective on how to understand, assess and manage risk and the unforeseen*, in: Reliability Engineering and System Safety, vol. 121, 1–10.
- Backes, J. (2013): *Bewertung der Versorgungszuverlässigkeit, Neue Ansätze zur Verwendung probabilistischer Zuverlässigkeitskenngrößen in der Netzplanung und -optimierung*, Herbert Utz Verlag, München.
- Bagheri, E., Baghi, H. und Ghorbani, A. A. (2007): *An agent-based service-oriented simulation suite for critical infrastructure behaviour analysis*, in: International Journal of Business Process Integration and Management, vol. 2, No. 4, 312-326.
- Bahr, T. et al., Regierungspräsidium Karlsruhe (2014): *Musternotfallplan Stromausfall. Handlungsempfehlungen zur Vorbereitung auf einen flächendeckenden und langanhaltenden Stromausfall*, Karlsruhe, <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/Sicherheit/Documents/MusternotfallplanStromausfall.pdf>, 24.05.2018.
- Balica, S. F., Wright, N. G. und van der Meulen, F. (2012): *A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts*, in: Natural Hazards, vol. 64, No. 1, 73–105.
- Balzer, G. und Schorn, C. (2015): *Asset Management for Infrastructure Systems: Energy and Water*, Spinger, Heidelberg.
- Bankoff, G., Frerks, G. E. und Hilhorst, D. J. M. (2004): *Mapping Vulnerability, Disasters, Development, and People*, Earthscan Publications, London.
- Bañuls, V. A., Turoff, M. und Hiltz, S. R. (2013): *Collaborative scenario modelling in emergency management through cross-impact*, in: Technological Forecasting and Social Change, vol. 80, No. 9, 1756–1774.
- Basilio, M. P., Pereira, V. und Costa, H. G. (2017): *Review of the Literature on Multicriteria Methods Applied in the Field of Public Security*, in: Universal Journal of Management, vol. 5, No. 12, 549 - 562.
- Beccari, B. (2016): *A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators*, in: PLOS Currents Disasters, <http://currents.plos.org/disasters/article/a-comparative-analysis-of-disaster-risk-vulnerability-and-resilience-composite-indicators/> 18.05.2018.
- Becker, H., Hennig, T., Akbulut, A., Mende, D. und Hofmann, L. (2016): *Netzwiederaufbaukonzepte mit Windenergieanlagen und thermischen Kraftwerken*, in: VGB PowerTech, 10/2016, 57-62.
- Beenstock, M. (1991): *Generators and the cost of electricity outages*, in: Energy Economics, vol. 113, No. 4, 283-289.
- Beenstock, M., Goldin, E. und Haitovsky, Y. (1998): *Response bias in a conjoint analysis of power outages*, in: Energy Economics, vol. 20, No. 2, 135–156.
- Belliveau, S., Smit, B. und Bradshaw, B. (2006): *Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley*, in: Global Environmental Change, vol. 16, No. 4, 364–378.

- Belton V. und Stewart, T. (2002): *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bender, J. (2015): *Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen an Flussmündungen*, *Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen*, Heft 9, zugl. Diss. Univ-Siegen.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J. und Pérez-García, R. (2012): *An approach to AHP decision in a dynamic context*, in: *Decision Support Systems*, vol. 53, No. 3, 499–506.
- Berndt, H. et al. (2007): *TransmissionCode 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber Version 1.1*, Verband der Netzbetreiber (VDN), Berlin.
- Bhamra, R., Dani, S. und Burnard, K. (2011): *Resilience: The concept, a literature review and future directions*, in: *International Journal of Production Research*, vol. 49, No. 18, 5375–5393.
- Billinton, R. (2001): *Methods to consider customer interruption costs in power system analysis*, in: *Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE)*, Brochures thématiques, CIGRE, Paris.
- Billinton, R., Tollefson, G. und Wacker, G. (1993): *Assessment of electric service reliability worth*, in: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 15, No. 2, 95-100.
- Birkmann, J., (ed.) (2006): *Measuring Vulnerability To Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo (u.a.).
- Birkmann, J. (2007): *Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications*, in: *Environmental Hazards*, vol. 7, No. 1, 20–31.
- Birkmann, J., Bach, C., Guhl, S., Witting, M., Welle, T. und Schmude, M. (2010): *State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit Kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom/Stromausfall*, *Forschungsforum Öffentliche Sicherheit*, FU Berlin, Schriftenreihe Sicherheit Nr. 2.
- Birkmann, J., Wenzel, F., Greiving, S. et al. (2016): *Extreme Events, Critical Infrastructures, Human Vulnerability and Strategic Planning: Emerging Research Issues*, in: *Journal of Extreme Events*, vol. 3, No. 4, 1650017 (25 pages).
- Birkmann, J. und Wisner, B. (2006): *Measuring the Un-Measurable. The Challenge of Vulnerability*, SOURCE Studies Of the University: Research, Counsel, Education – Publication Series of UNU-EHS No. 5, UNU-EHS, Bonn.
- Birolini, A. (1997): *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*, 4. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Blake, E. S., Kimberlain, T. B., Berg, R. J., Cangialosi, J. P. und Beven, J. L. (2013): *Tropical cyclone report hurricane sandy (AL182012)*, [http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182012\\_Sandy.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182012_Sandy.pdf), 05.05.17.
- Blauhut, V., Stahl, K. und Vogt, J. (2015): *Assessing risk by impacts: a probabilistic approach for drought assessment in Europe*, in: *Geophysical Research Abstracts Vol. 17*, EGU 2015-688, 2015, EGU General Assembly 2015.
- Bliem, M. (2005): *Eine makroökonomische Bewertung zu den Kosten eines Stromausfalls im österreichischen Versorgungsnetz*, IHSK Discussion Paper 02/2005, Institut für Höhere Studien Kärnten IHSK, Klagenfurt/Austria

- Bockwoldt, D. (2015): *Erneut Stromausfälle in Mannheim*, Mannheimer Morgen 10.07.2015, <http://www.morgenweb.de/mannheim/mannheim-stadt/erneut-stromausfalle-in-mannheim-1.2329962>, 05.11.17.
- Bogardi, J. (2004): *Hazards, risks and vulnerabilities in a changing environment: the unexpected onslaught on human security?*, in: *Global Environmental Change*, vol. 14, No. 4, 361-365.
- Bohle, H.-G. (2001): *Vulnerability and criticality: Perspectives from Social Geography*, In: IHDP Update 2/01
- Bosch&Partner GmbH Berlin et al., Weingarten, E. et al (2015): *Qualifizierung des Alternativenvergleichs als Mittel zur Beschleunigung und Akzeptanzsteigerung der Planung von Stromtrassen*, Projektbericht, Kurztitel: Alternativenvergleich im Rahmen des Netzausbaus, [http://www.netzausbau-niedersachsen.de/downloads/alternativenvergleich\\_bundesfachplanung.pdf](http://www.netzausbau-niedersachsen.de/downloads/alternativenvergleich_bundesfachplanung.pdf), 05.11.17.
- Bosetti, L., Ivanovic, A. und Munshey, M. (2016): *Fragility, Risk, and Resilience: A Review of Existing Frameworks*, United Nations University UNU-CPR, Centre for Policy Research, Background Paper, Bonn.
- Brauner, F., Münzberg, T., Wiens, M., Fiedrich, F., Lechleuthner, A. und Schultmann, F. (2015): *Critical Infrastructure Resilience: A Framework for Considering Micro and Macro Observation Levels*, in: Palen, L. et al.(eds.): *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, Kristiansand/Norway*.
- Brenig, H.-W., Fekete, A., Blümel, M., Heuser, J., Ihle, R., Norf, C., Raab, S., Münzberg, T., Wandler, S., Deines, E., Raskob, W., Müller, T. O., Möhrle, S. und Lin, L. (2013): *Abschlussbericht der Studie Überblick über die Forschung mit Bezug zu Kritischen Infrastrukturen auf nationaler, EU- und internationaler Ebene sowie Bewertung der Verwendungsmöglichkeit beim Schutz Kritischer Infrastrukturen, Studie KritisFuE*, Fachhochschule Köln, Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr, [https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/FIS/DownloadsInformationsangebot/DownloadsKritischeInfrastrukturen/DownloadMethodischerTeil.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/FIS/DownloadsInformationsangebot/DownloadsKritischeInfrastrukturen/DownloadMethodischerTeil.pdf?__blob=publicationFile), 19.05.2018.
- Brenig, H.-W., Münzberg, T., Voß, M., Proksch, C., Groß, A., Ludäscher, S., Lutz, K., Müller, F., Rhein, S., Baumgarten, C., Blümel, M., Lotter, A., Ruso, G., und Thomas, H. (2011): *Abschlussbericht der Studie Risiko Stromausfall: Grundlagenermittlung zur Festlegung von Schutzzielen auf der Basis von Kapazitäten von Betreibern, staatlichem Krisenmanagement und der Bevölkerung, Studie KRITISKapa*, B 1.25 – 0055/10/VV : 1, unveröffentlicht, Technische Hochschule Köln (Hrg.), Köln.
- Broggi, M. F. und Roch, P., (Hrsg.) (2001): *Lothar, der Orkan 1999, Ereignisanalyse*, Birmensdorf: WSL, Bern: BUWAL.
- Brooks, N. (2003): *Vulnerability, Risk And Adaptation: A Conceptual Framework*, Tyndall Centre for Climate Change, Working Paper 38.
- Bruch, M., Münch, V., Aichinger, M., Kuhn, M., Weymann, M. und Schmid, G. (2011): *Power Blackout Risks - Risk Management Options Emerging Risk Initiative – Position Paper*, CRO Forum, Amsterdam.
- Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G. et al. (2003): *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*, in: *Earthquake Spectra*, vol. 19, No. 4, 733–752.

- Brunner, E. M. und Suter, M. (2009): *International CIIP Handbook 2008/2009, An Inventory of 25 National and 7 International Critical Information Infrastructure Protection Policies*, ETH Zürich, Center for Security Studies.
- Buede, D. M. (2000): *The Engineering Design of Systems: Models and Methods*, John Wiley & Sons, New York.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) (2015): *Leitfaden Schutz kritischer Infrastrukturen*, Bern: BABS.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2009): *Für den Notfall vorgesorgt: Vorsorge und Eigenhilfe in Notsituationen*, 11. Auflage, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrg.) (2010): *BBK-Glossar, Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes*, 8, 10, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrg.) (2012): *Schutzkonzepte Kritischer Infrastrukturen im Bevölkerungsschutz: Ziele, Zielgruppen, Bestandteile und Umsetzung im BBK*, Wissenschaftsforum Bd. 11, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2014): *Stromausfall - Grundlagen und Methoden zur Reduzierung des Ausfallrisikos der Stromversorgung*, Wissenschaftsforum Bd. 12, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2015a): *LÜKEX-Historie – von Terror bis Stromausfall*, [http://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Krisenmanagement/Luekex/Vergangene\\_UEbungen/vergangene\\_uebungen\\_node.html](http://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Krisenmanagement/Luekex/Vergangene_UEbungen/vergangene_uebungen_node.html), 05.09.17.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2015b): *Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden: Leitfaden für die Planung, die Einrichtung und den Betrieb einer Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden*, Praxis im Bevölkerungsschutz Bd. 13, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2015c): *Tagungsband LÜKEX 2015, 2. Thementag: Ausfall von Kritischen Infrastrukturen*, Bonn.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2017): *Ratgeber für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notsituationen*, 4 Aufl. Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2008): *BSI-Standard 100-4, Notfallmanagement, Version 1.0.*, Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2015a): *KRITIS-Sektorstudie „Energie“*, Öffentliche Version, Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2015b): *KRITIS-Sektorstudie „Ernährung und Wasser“*, Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2015c): *KRITIS-Sektorstudie „Finanz- und Versicherungswesen“*, *Analyse Kritischer Infrastrukturen in Deutschland*, Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2015d): *KRITIS-Sektorstudie „Informationstechnik und Telekommunikation“ (IKT)*, Öffentliche Version, Bonn.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2015e): *KRITIS-Sektorstudie „Transport und Verkehr“, Öffentliche Version*, Bonn.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2016a): *KRITIS-Sektorstudie „Gesundheit“, Öffentliche Version*, Bonn.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2016b): *KRITIS-Sektorstudie „Medien und Kultur“, Analyse Kritischer Infrastrukturen in Deutschland*, Bonn.

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin (BAM) (2006): *Schadensanalyse an im Münsterland umgebrochenen Strommasten*, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Berichte\\_Fallanalysen/Bericht\\_11.pdf;jsessionid=6E4A1748DF21CAC707E172013E00C409?\\_\\_blob=publicationFile&v=1, 19-05-2018](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Berichte_Fallanalysen/Bericht_11.pdf;jsessionid=6E4A1748DF21CAC707E172013E00C409?__blob=publicationFile&v=1, 19-05-2018)

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn (BBSR) (2011): *Lebensqualität in kleinen Städten und Landgemeinden - Aktuelle Befunde der BBSR-Umfrage*, BBSR-Berichte KOMPAKT 5/2011.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Deutsches Zentrum für Altersfragen, Berlin (2016): *Regionale Disparitäten in Deutschland auf der Ebene von Gemeinden und Kreisen: Expertise zum Siebten Altenbericht der Bundesregierung*, <http://www.paritaet-alsopflege.de/index.php/downloadsnew/pflegerische-versorgung/9520-16-1114-7-altenbericht-anlage-expertise-bbsr/file, 05.11.17>.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2005): *Schutz Kritischer Infrastrukturen – Basisschutzkonzept, Empfehlungen für Unternehmen*, Berlin.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2007): *Umsetzungsplan KRITIS des Nationalen Plans zum Schutz der Informationsinfrastrukturen*, Berlin.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2009): *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)*, Berlin.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2011a): *Sektoren- und Brancheneinteilung Kritischer Infrastrukturen*, Berlin, [https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Downloads/Kritis/neue\\_Sektoreneinteilung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile, 28.5.18](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Downloads/Kritis/neue_Sektoreneinteilung.pdf?__blob=publicationFile, 28.5.18).

Bundesministerium des Innern (BMI) (2011b): *Empfehlungen zur Sicherstellung des Zusammenwirkens zwischen staatlichen Ebenen des Krisenmanagements und den Betreibern Kritischer Infrastrukturen*, Berlin, [https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis-empfehlungen-staat-wirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1, 28.5.18](https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis-empfehlungen-staat-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=1, 28.5.18).

Bundesministerium des Innern (BMI) (2011c): *Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement, Leitfaden für Unternehmen und Behörden*, 2. Aufl., Berlin, [http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenKritis/Leitfaden\\_Schutz-Kritis.pdf?\\_\\_blob=publicationFile, 19.05.2018](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenKritis/Leitfaden_Schutz-Kritis.pdf?__blob=publicationFile, 19.05.2018).

Bundesministerium des Innern (BMI) (2016): *Konzeption Zivile Verteidigung (KZV)*, Berlin.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2017): *Referentenentwurf des Bundesministeriums des Innern, Erste Verordnung zur Änderung der BSI-Kritisverordnung*, Berlin,

[https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/gesetztestexte/gesetztesentwuerfe/refereentenentwurf-zur-aenderung-kritis-vo.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/gesetztestexte/gesetztesentwuerfe/refereentenentwurf-zur-aenderung-kritis-vo.pdf?__blob=publicationFile&v=2), 19.05.2018

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2011): *Leitfaden, Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten*, Wien, <http://www.wasseraktiv.at/resources/files/2012/3/22/2192/leitfaden-verfahren-zur-abschaetzung-von-hwkennwerten.pdf>, 05.11.17.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2011): *Auswirkungen des Kernkraftwerk-Moratoriums auf die Übertragungsnetze und die Versorgungssicherheit*, Aktualisierung 26. Mai 2011, Bonn, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2011/FortschreibungMoratoriumsBericht26Mai2011pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2011/FortschreibungMoratoriumsBericht26Mai2011pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2), 05.11.17.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hrg.) (2015): *Bericht Feststellung des Reservekraftwerksbedarfs für den Winter 2015/2016 sowie die Jahre 2016/2017 und 2019/2020 und zugleich Bericht über die Ergebnisse der Prüfung der Systemanalysen*, Bonn, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Berichte\\_Fallanalysen/Feststellung\\_Reservekraftwerksbedarf\\_1516\\_1617\\_1920.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Berichte_Fallanalysen/Feststellung_Reservekraftwerksbedarf_1516_1617_1920.pdf?__blob=publicationFile&v=1), 11.05.18.

Bundesnetzagentur (BNetzA), Bundeskartellamt (2017a): *Monitoringbericht 2017*, Bonn, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Monitoringbericht\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Monitoringbericht_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=4), 05.11.17.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2017b): *Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Erstes Quartal 2017*, Bonn, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Quartalsbericht\\_Q1\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Quartalsbericht_Q1_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=2), 05.11.17.

Bundesrechnungshof (2013): *Bundesministerium des Innern (Einzelplan 06) 17 Kat. B Gesamtstaatlicher Bevölkerungsschutz erfordert bessere planerische und rechtliche Grundlagen (Kapitel 0628)*, Berlin, <https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/bemerkungen-jahresberichte/jahresberichte/2013/teil-iii-einzelplanbezogene-entwicklung-und-pruefungsergebnisse/bundeministerium-des-innern/langfassungen/2013-bemerkungen-nr-17-gesamtstaatlicher-bevoelkerungsschutz-erfordert-bessere-planerische-und-rechtliche-grundlagen>, 05.11.17.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2018): *Fkten und Argumente, Redispatch in Deutschland, Auswertung der Transparenzdaten, April 2013 bis einschließlich Januar 2018*, Berlin, [https://www.bdew.de/media/documents/Awh\\_20180212\\_Bericht\\_Redispatch\\_Stand\\_Februar-2018.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180212_Bericht_Redispatch_Stand_Februar-2018.pdf), 05.11.17.

Bündnis Entwicklung Hilft, United Nations University (UNU.EHS (2015): *WeltRisikoBericht 2015*, Bonn

Bush, B., Dauelsberg, L., LeClaire, R., Powell, D., Deland, S. und Samsa, M. (2005): *Critical infrastructure protection decision support system (CIPS/DSS) project overview*, 2005 International System Dynamics Conference, July 2005, Boston/USA, Los Alamos National Laboratory LA-UR-05-1870, [https://www.researchgate.net/publication/237520178\\_Critical\\_Infrastructure\\_Protection\\_Decision\\_Support\\_System\\_CIPDSS\\_Project\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/237520178_Critical_Infrastructure_Protection_Decision_Support_System_CIPDSS_Project_Overview), 19-05-2018.

- Buth, M., Kahlenborn, W., Savelsberg, J., Becker, N. et al. (2015): *Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel*, Umweltbundesamt, Dessau, Climate Change 24/2015, UBA-FB 002226, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_24\\_2015\\_vulnerabilitaet\\_deutschlands\\_gegenueber\\_dem\\_klimawandel\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf), 19-05.2018
- Caballero, R., Gómez, T., González, M., Rey, L. und Ruiz, F. (1998): *Goal programming with dynamic goals*, in: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 7, No. 4, 217–229.
- Caballero, R. und Gonzalez, A. (1993): *Considerations on Dynamic Goal Programming*, in: *Estudios de Economía Aplicada*, 0, 121-145.
- Campanella, G. und Ribeiro, R. A. (2011): *A framework for dynamic multiple-criteria decision making*, in: *Decision Support Systems*, vol. 52, No. 1, 52–60.
- Cardona, O. D. (1999): *Environmental management and disaster prevention: Two related topics: A holistic risk assessment and management approach*, in: Ingleton, J. (ed.), *Natural Disaster Management*, IDNDR, Leicester: , T. Rose , 151-153.
- Cardona, O. D., van Aalst, M .K., Birkmann, J., et al. (2012): *Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability*, in: Field, C. B., V. Barros et al. (eds.): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Sect, III, Chapter 2, 65-108. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf)
- Carreño, M. L., Cardona, O. D. und Barbat, A. H. (2007): *A disaster risk management performance index*, in: *Natural Hazards*, vol. 41, No. 1, 1-20.
- Casalicchio, E., Galli, E. und Tucci, S. (2008): *Modeling and simulation of complex interdependent systems: A federated agent-based approach*, in: Setola, R., Geretshuber, S. (eds): *Critical Information Infrastructure Security, 3<sup>rd</sup> Int. Workshop, Rome/Italy, CRITIS 2008, Lecture Notes in Computer Science* vol. 5508, Springer, Berlin, Heidelberg, 72-83.
- Cavallini, S., d’Alessandro, C., Volpe, M., et al. (2014): *A System Dynamics Framework for Modeling Critical Infrastructure Resilience*, in: Butts, J., Sheno, S. (eds.): *Critical Infrastructure Protection VIII, 8<sup>th</sup> IFIP WG 11:10 International Conference, ICCIP 2014, Arlington/USA 2014, IFIP Advances in Information and Communication Technology* vol. 441, Springer, Berlin, Heidelberg, 141-154.
- Caverzan, A. und Solomos, G. (2014): *Review on Resilience in Literature and Standards for Critical Built-Infrastructure*, JRC Scienceand Policy Report, Luxembourg: EU, EUR 27065 EN.
- Cegan, J. C., Filion, A. M., Keisler, J. M. und Linkov, I. (2017): *Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review*, in: *Environment Systems and Decisions*, vol. 37, No. 2, 123–133.
- Charnes, A. und Cooper, W. W. (1961): *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, Wiley, New York, vol. 1, 2.
- Charnes, A., Cooper, W. W. und Ferguson R. (1955): *Optimal estimation of executive compensation by linear programming*, in: *Management Science*, vol. 1, No. 2, 138-151.
- Chelleri, L. (2012): *From the «Resilient City» to Urban Resilience. A review essay on understanding and integrating the resilience perspective for urban systems*, in: *Documents d’Anàlisi Geogràfica* vol. 58/2, 287.306.

- Chen, P. und Chen, X. (2012): *Spatio-temporal variation of flood vulnerability at the Poyang Lake Ecological Economic Zone, Jiangxi Province, China*, in: Water Science and Technology vol. 65, No. 7, 1332-1340.
- Chen, Y., Li, K. W. und He, S. (2010): *Dynamic multiple criteria decision analysis with application in emergency management assessment*, in: 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Istanbul/Turkey, 3513-3517.
- Choo, E. U., Schoner, B. und Wedley, W. C. (1999): *Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making*, in: Computers & Industrial Engineering vol. 37, No. 3, 527-541.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., Bruneau, M. und Rutenberg, A. (2006): *MultiDimensional Fragility of Structures: Formulation and Evaluation*, Technical Report MCEER-06-0002, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Univ. of Buffalo, New York/USA.
- Ciurean, R., Schröter, D. und Glade, T. (2013): *Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction*, in: Tiefenbacher, J. (Hrsg.): Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters, InTech, 3-32.
- Rocco Sanseverino, C. M. und Ramirez-Marquez, J. E. (2011): *Vulnerability metrics and analysis for communities in complex networks*, in: Reliability Engineering & System Safety, vol. 96, No. 10, 1360-1366.
- Contreras, D. und Kienberger, S. (2011): MOVE Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe, D.4.2 *Handbook of Vulnerability Assessment in Europe*, European Commission DG Environment, 7<sup>th</sup> Framework Programme, Cooperatio Theme 6 – Environment (incl. Climate Change), [http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx\\_rupprecht/MOVE\\_Handbook.pdf](http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/MOVE_Handbook.pdf), 12.05.18.
- Community and Regional Resilience Institute (CARRI, Washington) (2013) *Definitions Of Community Resilience: An Analysis*, A CARRI Report, <http://www.resilientus.org/wp-content/uploads/2013/08/definitions-of-community-resilience.pdf>, 05.11.17.
- Conejo, A. J., Carrión, M. und Morales, J. M. (2010) *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, Boston, Springer US, International Series in Operations Research & Management Science vol. 153.
- CONSENTEC Consulting für Energiewirtschaft und-technik GmbH, Aachen, EWI Energiewirtschaftliches Institut Univ. Köln, IAEW Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft RWTH Aachen (2008): *Analyse und Bewertung der Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung, Abschlussbericht*, [http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/Studien/Politik\\_und\\_Gesellschaft/2008/EWI\\_2008-08-12\\_Versorgungssicherheit-Gutachten.pdf](http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2008/EWI_2008-08-12_Versorgungssicherheit-Gutachten.pdf).
- Corwin, J. L. und Miles, W. T. (1978): *Impact Assessment of the 1977 New York City Blackout*, US Department of Energy, Washington, DC.
- Council of European Energy Regulators (CEER) (2017): *6TH CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply 2016*, <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/d064733a-9614-e320-a068-2086ed27be7f>, 05.11.17.
- Cutter, S. L. und Finch, C. (2008): *Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards*, in: PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America vol. 105, No. 7, 2301-2306.

- Dalheimer, M. (2016): *Netzausfalldaten, Saidi, Stromnetz, Datenanalyse; Liebe Bundesnetzagentur, ich hätte da ein paar Fragen ...*, <https://gonium.net/blog/2016/01/05/liebe-bundesnetzagentur/>, 19.07.2016.
- Dalkey, N. und Helmer, O. (1963): *An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts*, in: *Management Science* vol. 9, No. 3, 458-467.
- Dawes, R. M. (1980): *Social dilemmas*, in: *Annual Review of Psychology* vol. 31, 169-193.
- De Lange, H. J., Sala, S., Vighi, M. und Faber, J. H. (2010): *Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives*, in: *Science of The Total Environment* vol. 408, No. 18, 3871-3879.
- De Montis, A., De Toro, P., Droste-Franke, B., Omann, I. und Stagl, S. (2005): *Assessing the quality of different MCDA methods*, in: Getzner, M. et al. (eds-): *Alternatives for environmental evaluation*, London: Routledge, *Routledge Explorations in Environmental Economics* Vol. 4, 99-133.
- de Nooij, M., Koopmans, C. und Bijvoet, C. (2007): *The value of supply security: the costs of power interruptions: economic input for damage reduction and investment in networks*, in: *Energy Economics* vol. 29, No. 2, 277-295.
- de Nooij, M., Lieshout, R. und Koopmans, C. (2009): *Optimal blackouts: Empirical results on reducing the social cost of electricity outages through efficient regional rationing*, in: *Energy Economics*, 31, 342–347.
- Debnath, R. (2013): *An assessment of spatio-temporal pattern of urban earthquake vulnerability using GIS: A study on Dhaka City*, in: *Annals of GIS* vol. 19, No. 2, 63-78.
- Demirtas, E. A. und Ustun, O. (2009): *Analytic network process and multi-period goal programming integration in purchasing decisions*, in: *Computers & Industrial Engineering* vol. 56, No. 2677–690.
- Der Rat der Europäischen Union (2008): *Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection*, in: *Official Journal of the European Union*, 23.12.2008, L 345/75.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin (dena) (2008): *Elektrizitätswirtschaftliche und energiepolitische Auswirkungen der Erhebung von Netznutzungsentgelten für den Speicherstrombezug von Pumpspeicherwerken, (kurz: NNE-Pumpspeicher), Abschlussbericht*.
- Deutscher Bundestag (2008): *Gesetzentwurf der Bundesregierung, Entwurf des Gesetzes zur Neufassung des Raumordnungsgesetzes und zur Änderung anderer Vorschriften (GeROG), Drucksache 16/10292*, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2011a): *Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung, Technikfolgenabschätzung (TA), TA-Projekt: Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung, Drucksache 17/5672*, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2011b): *Unterrichtung durch die Bundesregierung, Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2011, Drucksache 17/8250*, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2013b): *Unterrichtung durch die Bundesregierung, Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2013, Drucksache 18/208*, Berlin.

- Deutscher Bundestag (2014): *Unterrichtung durch die Bundesregierung, Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014, Drucksache 18/3682*, Berlin.
- Deutscher Presserat (2017): *Publizistische Grundsätze (Pressekodex). Richtlinien für die publizistische Arbeit nach den Empfehlungen des Deutschen Presserates*, <http://www.presserat.de>, 22.05.18.
- Di Giorgio, A. und Liberati, F. (2012): *A Bayesian network-based approach to the critical infrastructure interdependencies analysis*, in: *IEEE Systems Journal* vol. 6, No. 3, 510-519.
- Di Mauro, C., Bouchon, S., Logtmeijer, C., Pride, R. D., Hartung, T. und Nordvik, J. P. (2010): *A structured approach to identifying European critical infrastructures*, in: *International Journal of Critical Infrastructures* vol. 6, No. 3, 277-292.
- Diekmann, A. (2016): *Sozialkapital und das Kooperationsproblem in sozialen Dilemmata*, in: *Analyse & Kritik* Bd 15, Nr. 1, 22-35.
- Dietlein, J. (2005): *Die Lehre von den grundrechtlichen Schutzpflichten*, 2. Aufl., Duncker & Humblot, Berlin, Münsteraner Beiträge zur Rechtswissenschaft Bd. 58, zugl. Diss. Münster 1991.
- Doorn, N. (2017): *Resilience indicators: Opportunities for including distributive justice concerns in disaster management*, in: *Journal of Risk Research* vol. 20, No. 6, 711-731.
- Doran, G. T. (1981): *There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives*, in: *Management Review* vol. 70, No. 11, 35-36.
- Dreier, H. (Hrsg.)(2004): *Grundgesetz, Kommentar*, Bd. 1, 2, 2. Aufl., Mohr Siebeck, Tübingen.
- Duan, M., Wu, D., Dong, B. und Zhang, L. (2016): *Quantitatively Measuring Transportation Network Resilience under Earthquake Uncertainty and Risks*, in: *American Journal of Civil Engineering* vol 4, No. 4, 174-184.
- EATON Germany (Hrg.) (2015): *Jahresbericht Stromausfälle, Blackout Tracker, Jahresreport 2014 Deutschland, Österreich, Schweiz.* [http://www.power-blackout.info/userfiles/downloads/Blackout\\_Tracker\\_Report\\_2014\\_DACH.pdf](http://www.power-blackout.info/userfiles/downloads/Blackout_Tracker_Report_2014_DACH.pdf), 22.05.2018
- e.dis AG et al. (2014): *10-Punkte-Programm der 110-kV-Verteilnetzbetreiber und des Übertragungsnetzbetreibers der Regelzone 50Hertz zur Weiterentwicklung der Systemdienstleistungen (SDL) mit Integration der Möglichkeiten von dezentralen Energieanlagen*, Berlin, [https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/01\\_stromnetz\\_downloads/10\\_punkte\\_programm\\_systemsicherheit.pdf?sfvrsn=b304a6f9\\_4](https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/01_stromnetz_downloads/10_punkte_programm_systemsicherheit.pdf?sfvrsn=b304a6f9_4), 25.05.2018.
- Edwards, W. (1977): *How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decision Making*, in: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* vol. 7, No. 5, 326-340.
- Edwards, W. und Barron, F. H. (1994): *SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement*, in: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* vol. 60, No. 3, 306-325.
- Einig, K. (2015): *Gewährleisten Zentrale-Orte-Konzepte gleichwertige Lebensverhältnisse bei der Daseinsvorsorge?*, in: *Informationen zur Raumentwicklung* H. 1, 2015, [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/lzR/2015/1/Inhalt/dl-einig.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/lzR/2015/1/Inhalt/dl-einig.pdf?__blob=publicationFile&v=2), 05.11.17.

- Eisenführ, F., Weber, M. und Langer, T. (2010): *Rationales Entscheiden*, 5. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Elxon (2013): *Load Profiles and their Use in Electricity Settlement*, [https://www.elxon.co.uk/wp-content/uploads/2013/11/load\\_profiles\\_v2.0\\_cgi.pdf](https://www.elxon.co.uk/wp-content/uploads/2013/11/load_profiles_v2.0_cgi.pdf), 22.05.18.
- Ellis, J. (2014): *Climate Resilience Indicator Literature Review: Prepared as part of "Using Columbia Basin State of the Basin Indicators to Measure Climate Adaptation"*, Canadian Electronic Library, Ottawa.
- Epe, C. et al. (2007): *DistributionCode 2007, Regeln für den Zugang zu Verteilungsnetzen Version 1.1*, Verband der Netzbetreiber (VDN), Berlin.
- Europäische Union (2013): *Building a green infrastructure for Europe*, [http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green\\_infrastructure\\_broc.pdf](http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green_infrastructure_broc.pdf), 05.11.17.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSOE) (2018): *Continuing frequency deviation in the Continental European Power System originating in Serbia/Kosovo: Political solution urgently needed in addition to technical.*, Press Release, Mar 6, 2018, <https://preview.entsoe.eu/news/2018/03/06/press-release-continuing-frequency-deviation-in-the-continental-european-power-system-originating-in-serbia-kosovo-political-solution-urgently-needed-in-addition-to-technical/>, 05.05.18.
- Eusgeld, I., Henzi, D. und Kröger, W. (2008): *Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures*, Scientific Report, ETH Zürich, Laboratorium für Sicherheitsanalytik, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), CIP Schutz Kritischer Infrastrukturen, Bern.
- Fachkommission Städtebau der Bauministerkonferenz (Hrg.) (2015): *Arbeitshilfe, Berücksichtigung des Art. 12 Seveso-II-Richtlinie im baurechtlichen Genehmigungsverfahren in der Umgebung von unter die Richtlinie fallenden Betrieben*, [http://www.mil.brandenburg.de/media\\_fast/4055/FK\\_Arbeitshilfe\\_Genehmigungsverfahren%20SEVESO-II.pdf](http://www.mil.brandenburg.de/media_fast/4055/FK_Arbeitshilfe_Genehmigungsverfahren%20SEVESO-II.pdf), 22.05.18.
- Fairman, R. (2007): *What makes Tolerability of Risk Work? Exploring the Limitations of its Applicability to Other Risk Fields*, in: Boudier, F., Slavina, D. (eds.): *The Tolerability of Risk, A New Framework for Risk Management*, Chapter 7, 119-136.
- Fekete, A. (2011): *Common criteria for the assessment of critical infrastructures*, in: *International Journal of Disaster Risk Science* vol. 2, No. 1, 15-24.
- Fekete, A. (2012): *Safety and security target levels: Opportunities and challenges for risk management and risk communication*, in: *International Journal of Disaster Risk Reduction* vol. 2, 67-76.
- Few, R. (2003): *Flooding, vulnerability and coping strategies: local responses to a global threat*, in: *Progress in Development Studies* vol. 3, No. 1, 43-58.
- Fickert, L. (2004): *Zollenkopf vs. (n-1)-Prinzip vs. Kosten - ein Lösungsvorschlag für die optimierte Gestaltung von Netzen*, in: *Elektrotechnik und Informationstechnik* vol. 121, No. 10, 377-379.
- Figueira, J. R. und Roy, B. (2002): *Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure*, in: *European Journal of Operational Research* vol. 139, 317-326.

- Fischer, D., Härtl, A. und Wille-Hausmann, B. (2015): *Model for electric load profiles with high time resolution for German households*, in: *Energy and Buildings* vol. 92, 170–179.
- Fischer, P. und Wienand, I. (2015): *Trinkwassernotbrunnen, Wasserversorgung in Extremsituationen*, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn.
- Fischer, S., Kubis, A., Greve, M. und Rehtanz, C. (2011): *Macro-Economic Calculation of the Value of Lost Load and the Costs per Hour of Blackouts in Germany*, Conference: IEEE Power and Energy Student Summit 2012, Bielefeld, Germany, [http://www.ie3.tu-dortmund.de/cms/Medienpool/Sonstiges/Veroeffentlichun/Fischer\\_Kubis\\_Greve\\_Rehtanz-Macro-Economic\\_Estimation\\_of\\_Blackout\\_Costs\\_for\\_Germany\\_using\\_the\\_VOLL\\_Approach.pdf](http://www.ie3.tu-dortmund.de/cms/Medienpool/Sonstiges/Veroeffentlichun/Fischer_Kubis_Greve_Rehtanz-Macro-Economic_Estimation_of_Blackout_Costs_for_Germany_using_the_VOLL_Approach.pdf), 05.11.17.
- Flechtner, J. und Bolay, S. (2015): *Faktenpapier Ausbau der Stromnetze*, Grundlagen, Planungen, Alternativen, Deutscher Industrie- und Handelskammertag DIHK, Berlin.
- Forsthoff, E. (1956): *Lehrbuch des Verwaltungsrechts*, 1. Allgemeiner Teil, Beck, München, Berlin.
- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., et al. (2016): *Multi-hazard assessment in Europe under climate change*, in: *Climatic Change* vol. 137, No. 1-2, 105–119.
- Franz, T. (2005): *Gewinnerzielung durch kommunale Daseinsvorsorge. Zugleich eine Untersuchung zu den Zwecken und Formen der kommunalen wirtschaftlichen Betätigung*, Jus Publicum Bd. 123, Tübingen.
- Friggens, M. M., Bagne, K. E., Finch, D. M., et al. (2013): *Review and Recommendations for Climate Change Vulnerability Assessment Approaches With Examples From the Southwest*, General Technical Report, RMRS-GTR-309, US Dept. of Agriculture, [https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr309.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr309.pdf), 05.11.17.
- Fritsch, M., Wein, T. und Ewers, H.-J. (2018) *Marktversagen und Wirtschaftspolitik: Mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns*, 10, Vahlen, München.
- Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., et al. (2014): *The Vulnerability Sourcebook, Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Bonn, Eschborn.
- Füssel, H.-M. (2009): *Review and Quantitative Analysis of Indices of Climate Change Exposure, Adaptive Capacity, Sensitivity, And Impacts*, Background Note to the World Development Report 2010, [http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-1255547194560/WDR2010\\_BG\\_Note\\_Fussel.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-1255547194560/WDR2010_BG_Note_Fussel.pdf), 05.11.17.
- Gaillard, J. (2010): *Vulnerability, capacity and resilience: Perspectives for climate and development policy*, in: *Journal of International Development* Vol. 22, No. 2, 218-232.
- Geburtig, G. (2014): *Brandschutz im Bestand: Altenpflegeheime und Krankenhäuser*, 2.Aufl., Beuth, Berlin.
- Geier, W. (2006): *Verstehen wir uns richtig? Definierte Begriffe für eine klare Kommunikation*, in: *Notfallvorsorge*, Zeitschrift für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Teil 1: H. 1, 32-33, Teil 2: H. 2, 29-33, Teil 3: H. 3, 32-33, Teil 4: H. 4, 32-33.

- Geldermann, J. und Lerche, N. (2014): *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, Methode: PROMETHEE*, Georg-August-Universität Göttingen, Wirtschaftswiss. Fakultät, Professur für Produktion und Logistik.
- Geneletti, D. und van Duren, I. (2008): *Protected area zoning for conservation and use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation*, in: *Landscape and Urban Planning* vol. 85, No. 2, 97-110.
- Giannopoulos, G., Filippini, R. und Schimmer, M. (2012): *Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection, Part I: a state of the art*, Publications Office of the European Union, EUR 25286 EN.
- Gilbert, S. W. (2010): *Disaster Resilience: A Guide to the Literature*, NIST Special Publication 1117, National Institute of Standards and Technology, US Dept. of Commerce, Gaithersburg/USA
- Giovinazzi, S., Brown, C., Seville, E., et al. (2016): *Criticality of Infrastructures for Organisations*, in: *International Journal of Critical Infrastructures* vol. 12, No. 4, 331-363.
- Giupponi, C. und Biscaro, C. (2015): *Vulnerabilities-bibliometric analysis and literature review of evolving concepts*, in: *Environmental Research Letters* vol. 10, No. 12.
- Giupponi, C., Giove, S. und Giannini, V. (2013): *A dynamic assessment tool for exploring and communicating vulnerability to floods and climate change*, in: *Environmental Modelling & Software* vol. 44, 136–147.
- Goersch, H. (2010): *Empirische Untersuchung von Möglichkeiten der Förderung der Persönlichen Notfallvorsorge in Deutschland*, Dissertation, KIT Publishing, Karlsruhe.
- Goodwin, P. und Wright, G. (2004): *Decision analysis for management judgment*, Wiley, Chichester.
- Götz, V. (2001): *Allgemeines Polizei- und Ordnungsrecht*, 13. Aufl., C.H.Beck, München.
- Götze, U. und Bloech, J. (1995): *Investitionsrechnung, Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*, 2.Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Growitsch, C., Malischek, R., Nick, S. und Wetzel, H. (2013): *The Costs of Power Interruptions in Germany - an assessment in the Light of the Energiewende*, Institute of Energy Economics, University Cologne (EWI), EWI Working Paper No 13/07.
- Gusy, C. (2009): *Polizei- und Ordnungsrecht*, 7. Aufl., Mohr Siebeck, Tübingen.
- Haines, Y. Y., Horowitz, B. M., Lambert, J. R., et al. (2005): *Inoperability input-output model for interdependent infrastructure sectors*. In: *Journal of Infrastructure Systems* Vol. 11, No. 2, 67, 67-79.
- Haneberg, W. C., Kelly, J. T., Graves, H. L. und Dan, G. (2015): *A GIS-based decision-support approach to deepwater drilling-hazard maps*, in: *The Leading Edge* vol. 34, No. 4, 398-404.
- Hayn, M., Bertsch, V. und Fichtner, W. (2014): *Electricity load profiles in Europe: The importance of household segmentation*, in: *Energy Research & Social Science* vol. 3, 30–45.
- Hämäläinen, R. P. und Mäntysaari, J. (2001): *A dynamic interval goal programming approach to the regulation of a lake–river system*, in: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* vol. 10, No. 2, 75-86.

- Herre, U., Wieben, H.-J., Wolf, P. und Dierks, K. (2012): *Wie gut sind deutsche Energieversorger auf Notfälle vorbereitet? Eine Studie zum Status quo des Notfallmanagements in der Branche. Empfehlungen für effektive Prävention, Bewältigung und Nachbereitung von Notfällen*, pwc PricewaterhouseCoopers, [http://www.pwc.de/de\\_DE/de/energiewirtschaft/assets/studie\\_notfallmanagement\\_energieversorger.pdf](http://www.pwc.de/de_DE/de/energiewirtschaft/assets/studie_notfallmanagement_energieversorger.pdf), 05.11.17.
- Hess, J. T. (2011): *Schutzziele im Umgang mit Naturrisiken in der Schweiz*, Dissertation, ETH Zürich No. 17956, vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- Hessisches Ministerium des Innern und für Sport (HdMI) (2013): *Rahmenempfehlungen zur Einsatzplanung des Brand- und Katastrophenschutzes bei flächendeckendem, langandauerndem Stromausfall*, Wiesbaden. [https://innen.hessen.de/sites/default/files/media/hmdis/handlungsempfehlung\\_stromausfall\\_.pdf](https://innen.hessen.de/sites/default/files/media/hmdis/handlungsempfehlung_stromausfall_.pdf), 22.05.2018
- Hewitt, K. und Burton, I. (1971): *The Hazardousness of a Place: A Regional Ecology of Damaging Events*, University of Toronto, <http://www.ilankelman.org/miscellany/hewittetal.1971.pdf>, 22.05.2018.
- Hiete, M., Bertsch, V., Comes, T., Schultmann, F. und Raskob, W. (2010): *Evaluation strategies for nuclear and radiological emergency and post-accident management*, in: Radioprotection vol. 45, No. 5, S133-S147.
- Hiete, M., Merz, M., Trinks, C., Grambs, W. und Thiede, T. (2010): *Krisenmanagement Stromausfall, Krisenmanagement bei einer großflächigen Unterbrechung der Stromversorgung am Beispiel Baden-Württemberg*, BBK Bonn, Innenministerium Baden-Württemberg Stuttgart, KIT Karlsruhe, [https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenKritis/Krisenhandbuch\\_Stromausfall\\_Kurzfassung\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenKritis/Krisenhandbuch_Stromausfall_Kurzfassung_pdf.pdf?__blob=publicationFile), 22-05.2018.
- Hippert, H. S., Pedreira, C.E. und Souza, R. C. (2001): *Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation*, in: IEEE Transactions on Power Systems vol. 16, No. 1, 44,55.
- Hobbs, B. F. und Meier, P. (2000): *Energy decision and the environment: A guide to the use of multicriteria methods*, International Series in Operations Research and Management Science vol. 28, Kluwer, Boston.
- Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut (HAW Landshut) (2013): *Netztechnik und -führung, HAW Landshut, SS 2013*, [https://www.haw-landshut.de/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Kapitel\\_13.pdf](https://www.haw-landshut.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Kapitel_13.pdf), 05.11.17.
- Holling, C. S. (1996): *Engineering resilience versus ecological resilience*, in: Schulze, P. C. (ed.), *Engineering within ecological constraints*, National Academy Press, Washington, D.C, 31-44.
- Hornmann, G. (2008): *Hessisches Gesetz über die öffentliche Sicherheit und Ordnung (HSOG), Kommentar*, 2.Aufl., Beck, München.
- Horvath, D. (2010): *Die regulierte Apothekenversorgung in Deutschland, eine Analyse der Regulierungsursachen und des Versorgungsgrades auf Basis räumlicher Wettbewerbsmodelle*, Diss. Univ. Duisburg-Essen.
- Höser, T. (2015): *Städtische Stromversorgung während eines langanhaltenden Stromausfalles*, in: Bevölkerungsschutz H. 4, 2015, 32-34.

- Hosseini, S., Barker, K. und Ramirez-Marquez, J. E. (2016): *A review of definitions and measures of system resilience*, in: Reliability Engineering & System Safety vol. 145, 47-61.
- Howell, J. P. (2012): *When the Lights Went Out: A History of Blackouts in America*, in: Journal of Historical Geography vol. 38, No. 1, 95-96.
- Huang, Y.-S., Liao, J.-T. und Lin, Z.-L. (2009): *A study on aggregation of group decisions*, in: Systems Research and Behavioral Science vol. 26, No. 4, 445-454.
- Hufschmidt, G. (2011): *A comparative analysis of several vulnerability concepts*, in: Natural Hazards vol. 58, No. 2, 621-643.
- Hyde, K. M. (2006): *Uncertainty Analysis Methods for Multi-Criteria Decision Analysis*, Thesis, University of Adelaide/Australia.
- Ignizio, J. P. (1976): *Goal Programming and Extensions*, Heath: Lexington Books.
- Inter-American Development Bank (Hrsg.) (2010): *Indicators of Disaster Risk and Risk Management – Program for Latin America and the Caribbean: Summary Report*, Evaluación de Riesgos Naturales - Latino America, ERNAL, Inter-American Development Bank, Washington, DC.
- Jensen, J. (1985): *Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste*, in: Mitteilungen Leichtweiß-Institut TU Braunschweig Bd 88, 141-319, zugl. Diss. TU Braunschweig.
- Jha, M. K. und Keel, R. A. (2012): *Using Dynamic Bayesian Networks for Investigating the Impacts of Extreme Events*, in: Premchaiswadi, W. (ed.), Bayesian Network, IntechOpen, London, Chapter 3, 35-48.
- Jochum, T. und Rühle, D. G. (2000): *Polizei- und Ordnungsrecht*, 2. Aufl., Nomos, Baden-Baden.
- Jolai, F., Yazdian, S.A., Shahanaghi, K. und Khojasteh, M.A. (2011): *Integrating fuzzy TOPSIS and multi-period goal programming for purchasing multiple products from multiple suppliers*, in: Journal of Purchasing and Supply Management vol. 17, No. 1, 42–53.
- Jones, D. F. und Tamiz, M. (2010): *Practical Goal Programming*, Springer, Boston, International Series in Operations Research & Management Science vol. 141.
- Jones, D. F. und Tamiz, M. (2016): *A Review of Goal Programming*, in: S. Greco et al. (eds.): Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research & Management Science vol. 233, 903-926.
- Jung, H. (2016): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 13. Aufl., De Gruyter Oldenbourg, Berlin.
- Jurgilevich, A., Räsänen, A., Groundstroem, F. und Juhola, S. (2017): *A systematic review of dynamics in climate risk and vulnerability assessments*, in: Environmental Research Letters vol. 12, No. 1, 013002.
- Kabak, Ö. und Ervural, B. (2017): *Multiple attribute group decision making: A generic conceptual framework and a classification scheme*, in: Knowledge-Based Systems vol. 123, 13-30.
- Kadri, F., Birregah, B. und Châtelet, E. (2014): *The Impact of Natural Disasters on Critical Infrastructures: A Domino Effect-based Study*, in: Journal of Homeland Security and Emergency Management vol. 11, No. 2, 217–241.

- ka-news.de (2004): *Stromausfall in Karlsruhe*, <http://www.ka-news.de/region/karlsruhe/Stromausfall-in-Karlsruhe;art6066,34262?show=tmr2004724-962K>, 05.11.17.
- ka-news.de (2008): *Stromversorgung unterbrochen*, <http://www.ka-news.de/region/karlsruhe/Stromversorgung-unterbrochen;art6066,65571>, 05.11.17.
- ka-news.de (2012): *Stromausfall in Karlsruhe: 800 Haushalte ohne Saft*, <http://www.ka-news.de/region/karlsruhe/Karlsruhe~/Stromausfall-in-Karlsruhe-800-Haushalte-ohne-Saft;art6066,1004981>, 05.11.17.
- Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner, B. L. (eds.) (1995): *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*, United Nations University Press, New York.
- Katina, P. F. und Hester, P. T. (2013): *Systemic determination of infrastructure criticality*, in: International Journal of Critical Infrastructures vol. 9, No. 3., 211-225.
- Katz, T. (2010): *Ein Beitrag zur Bewertung von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit*, Dissertation, RWTH Aachen.
- Keeney, R. L. und Raiffa, H. (1976): *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*, Wiley, New York.
- Keeney, R. L. und Raiffa, H. (1993): *Decisions with multiple objectives—preferences and value tradeoffs*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Khanmohammadi, S., Ribeiro, R. A. und Jassibi, J. (2003): *Multi criteria decision making using dynamics of criteria*, in: Proceedings of the 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Rhodes/Greece, Paper T3-013.
- Kienberger, S., Blaschke, T. und Zaidi, R. Z. (2013): *A framework for spatio-temporal scales and concepts from different disciplines: the 'vulnerability cube'*, in: Natural Hazards vol. 68, No. 3, 1343-1369.
- Kiener, S. (1990): *Die Principal-Agent-Theorie aus informationsökonomischer Sicht*, Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 28, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Killinger, S., Kreifels, N., Burger, B., Müller, B., Stiff, G. und Wittwer, C. (2016): *Impact of the Solar Eclipse from 20th March 2015 on the German Electrical Supply—Simulation and Analysis*, in: Energy Technology vol. 4, No. 2, 288-297.
- Kim, H.-J., Kim, Y.-J., Park, D.-J., Liew, D. und Rhee, Y. J. (2017): *Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) in Health Technology Assessment: Review of Literature on MCDA Methodology and Decision Criteria*, Journal of the Health Technology Assessment, Korea, vol. 5, No. 2, 128-142.
- Kingreen, T. (2003): *Das Sozialstaatsprinzip im Europäischen Verfassungsverbund, Gemeinschaftliche Einflüsse auf das deutsche Recht der gesetzlichen Krankenversicherung*, JusPublicum 97, Tübingen, Mohr.
- Kirchbach, H.-P. von, Franke, S., Biel, H. (2002): *Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung Flutkatastrophe 2002*, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/10825>, 5.11.17.
- Kirchner, A., Heinrich, S., Kemmler, A., Rits, V., Schlesinger, M., Weinmann, B. (2009): *Konzeptstudie: Gefährdung und Verletzbarkeit einer Gesellschaft – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung*, 31-6799, Prognos AG, Basel.

- Klas, C. (2000): *Gestaltungsmöglichkeiten im Gesundheitswesen*, Dt. Universitätsverl., Wiesbaden.
- Klein, R., Rome, E., Beyel, C., Linnemann, R., et al. (2008): *Information Modelling and Simulation in Large Interdependent Critical Infrastructures in IRRIS*, in: Setola, R., Geretshuber, S. (eds.): *Critical Information Infrastructure Security, 3<sup>rd</sup> Int. Workshop, CRITIS 2008, Rome/Italy 2008*, Lecture Notes in Computer Science vol. 5508, 36-47, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kleine, A. (1996): *Entscheidungstheoretische Aspekte der Principal-Agent-Theorie*, Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 53, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Klinger, C., Landeg, O. und Murray, V. (2014): *Power Outages, Extreme Events and Health: A Systematic Review of the Literature from 2011-2012*, in: PLOS Currents Disasters.
- Kloepfer, M. (2010a): *Rechtliche Grundprobleme des Katastrophenschutzes*, in: M. Kloepfer, K.-M. Ortloff et al.: *Verfassung - Umwelt - Wirtschaft: Festschrift Dieter Sellner z. 75. Geburtstag*, Beck, München. 391-408
- Kloepfer, M. (Hrsg.)(2010b): *Schutz Kritischer Infrastrukturen: IT und Energie*, Schriften zum Katastrophenrecht Bd. 3, Nomos, Baden-Baden.
- Kloepfer, M. (2015): *Handbuch des Katastrophenrechts*, Schriften des Katastrophenrechts, 9, 1, Beck, München.
- Kommission für Anlagensicherheit (KAS) beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): *Leitfaden, Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG*, KAS-18, 2. Aufl., [https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/leitfaden\\_kas-18.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/leitfaden_kas-18.pdf), 05.11.17.
- Königs, H.-P. (2013): *IT-Risikomanagement mit System*, 4. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Kornbluth, J. S. H. (1992): *Dynamic multi-criteria decision making*, in: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* vol. 1, No. 2, 81-92.
- Koschnick, W. J. (1995): *Management, Enzyklopädisches Lexikon*, De Gruyter, Berlin.
- Kozik, R., Choraś, M., Hołubowicz, W., Renk, R. (2015): *Increasing protection and resilience of critical infrastructures – current challenges and approaches*, in: *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars* vol. 6, No. 3, 79-84
- Krajewski, M. (2011): *Grundstrukturen des Rechts öffentlicher Dienstleistungen*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kreutzer, R. (2008): *Katastrophenschutz auf dem Prüfstand, Analysen, Prognosen und Empfehlungen für Deutschland, Allianz Deutschland AG*, München.
- Kröger, W. (2008): *Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools*, in: *Reliability Engineering & System Safety* vol. 93, No. 12, 1781–1787.
- Kröger, W. und Nan, C. (2014): *Addressing Interdependencies of Complex Technical Networks*, in: D'Agostino, G., Scala, A. (eds.): *Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity*, Chapter 13, 279-309, Springer, Berlin.
- Kugelmann, D. (2012): *Polizei- und Ordnungsrecht*, 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.

- Kuhlicke, C. (2013): *Resilience: A capacity and a myth: Findings from an in-depth case study in disaster management research*, in: *Natural Hazards* vol. 67, No. 1, 61–76.
- Kunz, M., Mühr, B., Kunz-Plapp, T., Daniell, J. E., Khazai, B., Wenzel, F., Vannieuwenhuysse, M., Comes, T., Elmer, F., Schröter, K., Fohringer, J., Münzberg, T., Lukas, C., Zschau, J. (2013): *Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach*, in: *Natural Hazards and Earth System Science* vol. 13, 2579–2598.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (2012): *Bericht zum Untersuchungsvorhaben, Anforderungen an Notstromsysteme in Betriebsbereichen nach Störfall-Verordnung*, <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/anlagen/pdf/nforderungenannotstromsysteme.pdf>, 05.11.17.
- Lange, H.-J., Gusy, C. (eds.) (2015): *Kooperation im Katastrophen- und Bevölkerungsschutz, Studien zur Inneren Sicherheit Bd. 20*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Langscheid, T. (2014): *Stromausfall trifft Tausende, Elektrizitätsversorgung - Gewerbegebiet Käfertal und rund 2000 Privathaushalte betroffen / Postzentrum steht ganztägig still*, in: *Mannheimer Morgen*, <http://www.morgenweb.de/mannheim/mannheim-stadt/stromausfall-trifft-tausende-1.1745370>, 5.11.17.
- Laugé, A., Hernantes, J. und Sarriegi, J. M. (2015): *Critical infrastructure dependencies: A holistic, dynamic and quantitative approach*, in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* vol. 8, 16-23.
- Lauwe, P., Geier, W. et al. (2012): *Schutzkonzepte Kritischer Infrastrukturen im Bevölkerungsschutz. Ziele, Zielgruppen, Bestandteile und Umsetzung im BBK*, WissenschaftsForum Bd. 11, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Bonn.
- Laux, H., Gillenkirch, R. und Schenk-Mathes, H.Y. (2012): *Entscheidungstheorie*, 8. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lavell, A. et al. (2012): *Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience*, in: Field, C. B. et al. (eds.): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, 25-64, Cambridge University Press, Cambridge.
- Leahy, E., Tol, R. S. J. (2011): *An estimate of the value of lost load for Ireland*, in: *Energy Policy* vol. 39, No. 3, 1514–1520.
- Lee, G., Jun, K.-S. und Chung, E.-S. (2013): *Integrated multi-criteria flood vulnerability approach using fuzzy TOPSIS and Delphi technique*, in: *Natural Hazards and Earth System Sciences* vol. 13, 1293–1312.
- Leichenko, R. (2011): *Climate change and urban resilience*, in: *Current Opinion in Environmental Sustainability* vol. 3, No. 3, 164–168.
- Lenz, S. (2009): *Vulnerabilität Kritischer Infrastrukturen*, Forschung im Bevölkerungsschutz Bd. 4, BBK, Bonn.
- Levary, R. R. (1984): *Dynamic programming models with goal objectives*, in: *International Journal of Systems Science* vol. 15, No. 3, 309–314.
- Levary, R. R. (1986): *Optimal control problems with goal objective functions*, in: *International Journal of Systems Science* vol. 17, No. 1, 97–109.

- Lisken, H. und Denninger, E. (Hrsg.)(2012): *Handbuch des Polizeirechts: Gefahrenabwehr, Strafverfolgung, Rechtsschutz*, 5. Aufl., Beck, München.
- Luijff, E., Nieuwenhuijs, A., Klaver, M., van Eeten, M. und Cruz, E. (2008): *Empirical Findings on Critical Infrastructure Dependencies in Europe*, in: Setola, R., Geretshuber, S. (eds.): *Critical Information Infrastructure Security*, 3<sup>rd</sup> Int. Workshop, CRITIS 2008, Rome/Italy 2008, Lecture Notes in Computer Science vol. 5508, 302–310, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Manyena, S. B. (2006): *The concept of resilience revisited*, in: *Disasters* vol. 30, Nr. 4, 433-450.
- Marti, J. R. Hollman, J.A., Ventura, C. und Jaskevich, J. (2008): *Dynamic recovery of critical infrastructures: Real-time temporal coordination*, in: *International Journal of Critical Infrastructures* vol. 4, No. 1-2, 17-31.
- Martini, M. (2008): *Der Markt als Instrument hoheitlicher Verteilungslenkung: Möglichkeiten und Grenzen einer marktgesteuerten staatlichen Verwaltung des Mangels*, Jus Publicum Bd. 176, Mohr, Tübingen.
- Marttunen, M., Lienert, J. und Belton, V. (2017): *Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations*, in: *European Journal of Operational Research* vol 263, No. 1, 1-17.
- Mateos, A., Jiménez-Martín, A. und Ríos-Insua, S. (2006): *Monte Carlo simulation techniques for group decision making with incomplete information*, in: *European Journal of Operational Research* vol. 174, No. 3, 1842-1864.
- Mayer, J. und Lauwe, P. (2015): *Schutzziele als Teil des Risikomanagements Kritischer Infrastrukturen*, in: *Bevölkerungsschutz* H. 1-2015, S.3-5.
- McDowell, G., Ford, J. und Jones, J. (2016): *Community-level climate change vulnerability research: trends, progress, and future directions*, in: *Environmental Research Letters* vol. 11, No. 3, 033001.
- Meerow, S., Newell, J. P. und Stults, M. (2016): *Defining urban resilience: A review*, in: *Landscape and Urban Planning* vol. 147, 38-49.
- Melioumis, M. (2013): *Hinweise für die Planung von Ersatzstromversorgungen für Feuerwehrrhäuser*, Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg, Bruchsal.
- Menski, U. und Gardemann, J. (2008): *Auswirkungen des Ausfalls Kritischer Infrastrukturen auf den Ernährungssektor am Beispiel des Stromausfalls im Münsterland im Herbst 2005*, FH Münster, <http://www.hb.fh-muenster.de/opus/fhms/volltexte/2011/677/>, 7.5.17.
- Merz, M. (2011): *Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, zugl. Diss. KIT Karlsruhe.
- Metzger, M. J. und Schröter, D. (2006): *Towards a spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of environmental change in Europe*, in: *Regional Environmental Change* vol. 6, No. 4, 201-216.
- Meyer, V., Haase, D. und Scheuer, S. (2007): *GIS-based multicriteria analysis as decision support in flood risk management*, UFZ-Diskussionspapiere No. 6/2007, Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), Leipzig.

- Min, H.-S. J., Beyeler, W., Brown, T., Son, Y. J. und Jones, A. T. (2007): *Toward modeling and simulation of critical national infrastructure interdependencies*. In: IIE Transactions vol. 39, No. 1, 57–71.
- Ministerium des Innern und für Sport Rheinland-Pfalz (MIS RLP) (2006): *Checkliste "Einsatzmaßnahmen bei Stromausfall"*, Stand: 06.11.2006, Mainz.
- Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) (2016): 41. Ministerkonferenz für Raumordnung am 9. März 2016 in Berlin, *Entschließung als Grundlage für eine zeitgemäße Fortentwicklung des Instruments der Zentralen Orte in den Ländern*, [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Raumentwicklung/41-mkro-beschluss-entschliessung-zentrale-orte.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Raumentwicklung/41-mkro-beschluss-entschliessung-zentrale-orte.pdf?__blob=publicationFile), 07.05.17.
- Möhle, M. (2001): *Vom Wert der Wohlfahrt: Normative Grundlagen des deutschen Sozialstaats*, Westdt. Verl., Wiesbaden.
- Monat, J. P. (2009): *The benefits of global scaling in multi-criteria decision analysis*, in: Judgment and Decision Making vol. 4, No. 6, 492-508.
- Moret, W. (2014): *Vulnerability Assessment Methodologies: A Review of the Literature*, US Agency for International Development (USAID), <https://www.fhi360.org/sites/default/files/media/documents/Vulnerability%20Assessment%20Literature%20Review.pdf>, 07.05.17.
- Moss, R. H., Brenkert, A. L. und Malone, E. L. (2001): *Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach*. US Dept. of Energy, PNNL-SA-33642, Pacific Northwest National Laboratory.
- Moteff, J. D. (2012): *Critical Infrastructure Resilience: The Evolution of Policy and Programs and Issues for Congress*, Congressional Research Service 7-5700, R42683, Washington/USA.
- Müller, K.-R. (2015): *Handbuch Unternehmenssicherheit: Umfassendes Sicherheits-, Kontinuitäts- und Risikomanagement mit System*, 3. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Müller-Heidelberg, K. (1956): *Das niedersächsische Gesetz über die öffentliche Sicherheit und Ordnung*, 2. Aufl., Boorberg, Hannover.
- Münzberg, T., Ludäscher, S. und Bach, C. (2013): *Stromausfall gegen Stromausfälle: Wie Lastreduzierungen Netzzusammenbrüche verhindern können und welches Dilemma daraus für den Bevölkerungsschutz und die Gefahrenabwehrplanung resultiert*, in: Bevölkerungsschutz, 01/2013, 36-39.
- Münzberg, T., Müller, T. und Raskob, W. (2018): *A Future Oriented Agent-based Simulation to Improve Urban Critical Infrastructure Resilience*, in: Fekete A., Fiedrich F. (eds.), Urban Disaster Resilience and Security: Addressing Risks in Societies, Chapter 16, 261-284, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Münzberg, T. und Ottenburger, S. (2018): *Schutz Kritischer Infrastrukturen: Kritikalität als Entscheidungsmaß zur Abwehr von Gefahr am Beispiel Stromausfall*, in: Engels, I. und Nordmann, A. (eds.), Was heißt Kritikalität? Zu einem Schlüsselbegriff der Debatte um Kritische Infrastrukturen, 156-179, Transcript Verlag.
- Münzberg, T., Wiens, M. und Schultmann, F. (2014a): *Dynamic-Spatial Vulnerability Assessments: A Methodical Review for Decision Support in Emergency Planning For Power Outages*, in: Vidan, A., Shoag, D. (eds.): HumTech2014, Humanitarian Technology: Science, Systems and Global Impact 2014, Procedia Engineering vol. 78, 78–87.

- Münzberg, T., Wiens, M. und Schultmann F. (2014b): *A Strategy Evaluation Framework Based on Dynamic Vulnerability Assessments*, in: Hiltz, S. R., et al. (eds.): Proceedings, 11th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2014), ID;50, Pennsylvania State Univ., USA.
- Münzberg, T., Wiens, M. und Schultmann, F. (2017): *A Spatial-temporal Vulnerability Assessment to Support the Building of Community Resilience against Power Outage Impacts*, in: Technological Forecasting & Social Change vol. 121, 99–118.
- Münzberg, T., Wiens, M. und Schultmann, F. (2015): *The Effect of Coping Capacity Depletion on Critical Infrastructure Resilience*, in: Palen, L., et al. (eds.): Proceedings 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, Kristiansand/Norway.
- Münzberg, T., Wiens, M. und Schultmann, F. (2016): *Understanding Resilience: A Spatio-temporal Vulnerability Assessment of a Population affected by a Sudden Lack of Food*, in: Zobel, C.W. et al. (eds.): Advances in Managing Humanitarian Operations, Springer, Berlin, Heidelberg, 257-280.
- Münzberg, T., Wiens, M., Raskob, W. und Schultmann, F. (2015b): *Measuring Resilience - The Benefits Of An Empirical Study Of Power Outages By Media Data*, in: 10<sup>th</sup> Future Security Conference 2015, Ed.: Beyerer, J., Fraunhofer Verlag, Berlin, 393-400.
- Murswiek, D. (2009): *Freie Entfaltung der Persönlichkeit, Recht auf Leben, körperliche Unversehrtheit, Freiheit der Person*, in: Sachs, M. (Hrsg.): Grundgesetz, Kommentar, 5. Aufl., 76-111.
- Musil, A. (2003): *Stärkere Eigenverantwortung in der Gesetzlichen Krankenversicherung, Eine agency-theoretische Betrachtung*, Dt. Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A. und Tarantola, S. (2005): *Tools for Composite Indicators Building*, EUR 21682 EN, <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC31473/EUR%2021682%20EN.pdf>, 07.05.17.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S. et al. (2008): *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, OECD, Paris.
- Nassopoulos, H., Ehret, M., Vuillet, M., Cariolet, J.M., Colombert, M. und Diab, Y. (2015): *State of the Art Report (1) Resilience, Adaptation and Disaster Risk Reduction. Concepts, definitions and application*, [http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user\\_upload/D1-1\\_SOTAdefinitions\\_EIVP\\_2015-Nov-30.pdf](http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user_upload/D1-1_SOTAdefinitions_EIVP_2015-Nov-30.pdf), 7.5.17.
- Nelson, D. R. und Finan, T. J. (2009): *Praying for drought: Persistent vulnerability and the politics of patronage in Ceara, Northeast Brazil*, in: American Anthropologist vol. 111, No. 3, 302-316.
- Neuhalfen, E. et al. (2015): *Gesamtstädtisches Gutachten der Stadt Leverkusen. Erstellung eines Konzeptes für die Stadtentwicklung unter dem Aspekt des § 50 BImSchG und Artikel 12 der Seveso-II-Richtlinie*, [https://www.leverkusen.de/leben-in-lev/downloads/bauen/2\\_Konzeptioneller\\_Gutachtenteil.pdf](https://www.leverkusen.de/leben-in-lev/downloads/bauen/2_Konzeptioneller_Gutachtenteil.pdf), 07.05.17.
- Oberender, P. und Zerth, J. (2005): *Zur Zukunft der flächendeckenden Versorgung im deutschen Gesundheitswesen. Gesundheitspolitische Implikationen, Diskussionspapier 13-05*, Universität Bayreuth.
- Obst, C. und Wenge J. (2006): *NS-Netze für die Sicherheitsstromversorgung*, in: Elektropraktiker Bd. 60, Nr. 7, 546-550.

- Ohder, C., Röpcke, J., Sticher, B., Geißler, S. und Schweer, B. (2014): *Hilfebedarf und Hilfsbereitschaft bei anhaltendem Stromausfall. Ergebnisse einer Bürgerbefragung in drei Berliner Bezirken*, Berlin, <http://www.kat-leuchtturm.de/assets/content/images/pdfs/Bericht%20B%C3%BCrgerbefragung%202014.01.16.pdf>, 23.5.2018.
- Oliva, G., Panzieri, S. und Setola, R. (2011): *Fuzzy dynamic input–output inoperability model*, in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* vol. 4, No. 3-4, 165–175.
- Omer, M. (2013): *The Resilience of Networked Infrastructure Systems. Analysis and Measurement*, Systems Research Series vol. 3, World Scientific.
- Opresnik, M. O. und Rennhak, C. (2015): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Grundlagen unternehmerischer Funktionen*, 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2008): *Protection of “critical infrastructure” and the role of investment policies relating to national security*, ORCD, Paris.
- Ortuño, M. T., Tirado, G. und Vitoriano, B. (2011): *A lexicographical goal programming based decision support system for logistics of Humanitarian Aid*, in: *TOP, An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research* vol. 19, No. 2, 464-479.
- Ottenburger, S. und Münzberg, T. (2017): *Smart Grid Topologies for Enhanced Resilience against Critical Infrastructure Disruptions*, in: Comes, T. et al. (eds.) *Proceedings 14th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management ISCRAM, Albi/France*.
- Ouyang, M. (2014): *Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems*. *Reliability Engineering & System Safety* vol., 121, 43-60.
- Pan, D. und Zhang, Y. (2009): *Study on the Method of Determining Objective Weight of Decision-Maker (OWDM) in Multiple Attribute Group Decision-Making*, in: Shi, Y. et al. (eds.), *Cutting-Edge Research Topics on Multiple Criteria Decision Making*, Communications in Computer and Information Science vol. 35, 357-360, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pant, R., Barker, K. und Zobel, C. (2014): *Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors*, in: *Reliability Engineering and System Safety* vol. 125, No. 5, 92–102.
- Patel, S. S., Rogers, M. B., Amlôt, R. und Rubin, G. J. (2017): *What Do We Mean by ‘Community Resilience’? A Systematic Literature Review of How It Is Defined in the Literature*, in: *PLOS Currents Disasters*.
- Patt, A. G., Schröter, D., Klein R. J. T. und Vega-Leinert, A. C. de la (2009): *Assessing Vulnerability to Global Environmental Change – Making Research Useful for Adaptation Decision Making and Policy*, Earthscan Publications, London.
- Pederson, P., Dudenhoefter, D., Hartley, S. und Permann, M. (2006): *Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of US and International Research*, Idaho National Laboratory, INL/EXT-06-11464, Idaho Falls.
- Perales, F.J.M. (2016): *Resilience Index: An Alternative in Resilience Measurement*, in: CIP Report, George Mason University, Virginia/USA, [cip.gmu.edu/2016/08/22/resilience-index-alternative-resilience-measurement](http://cip.gmu.edu/2016/08/22/resilience-index-alternative-resilience-measurement), 24.05.2018.

- Perdikaris, J., Gharabaghi, B. und McBean, E. (2011): *A Methodology for Undertaking Vulnerability Assessments of Flood Susceptible Communities*, in: International Journal of Safety and Security Engineering vol. 1, No. 2, 126-146.
- Pescaroli, G. und Alexander, D. (2016): *Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters*, in: Natural Hazards vol. 82, No. 1, 175-192.
- Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch M. und Riehm, U. (2010): *Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung*, TAB Arbeitsbericht Nr. 141, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab141.pdf>, 7.5.17.
- Piaszeck, S., Wenzel, L. und Wolf, A. (2013): *Regional Diversity in the Costs of Electricity Outages: Results for German Counties*, Hamburg Institute of International Economics, HWWI, HWWI Research Paper 142, Hamburg.
- Pieper, H.-G. (2013): *Polizei- und Ordnungsrecht NRW*, 5. Aufl., Alpmann und Schmidt, Münster.
- Piwko, R., Osborn, D., Gramlich, R., Jordan, G., Hawkins, D. und Porter, K. (2005): *Transmission planning and competitive electricity market operation*, in: IEEE Power and Energy Magazine Vol. 3., No.6, 12, 47-56.
- Platt, S., Hughes, M. und Brown, D. (2015): *Measuring resilience and recovery.*, in: 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, May 2015, Tehran/Iran, <http://www.carltd.com/sites/carwebsite/files/CAR%20Platt%20Measuring%20resilience.pdf>, 24.05.2018.
- Poompipatpong, C. und Kengpol, A. (2013): *An integrated AHP – Delphi group decision approach to weight engine's performance and emission parameters*, in: 2013 World Congress on Advance in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research, Seoul, Korea, [http://www.i-asem.org/publication\\_conf/anbre13/T4D.1.ER661\\_989F.pdf](http://www.i-asem.org/publication_conf/anbre13/T4D.1.ER661_989F.pdf), 24.05.2018.
- Power, C., Daniell, J., Khazai, B. und Burton, C. (2015): *Social and Economic Vulnerability, Global Indicator Database Handbook*, Socio-economic Vulnerability and Integrated Risk Project, CEDIM Report No. 1, <http://risklayer.com/wordpress431/wp-content/uploads/2016/05/Social-and-Economic-Vulnerability-Global-Indicator-Database-Handbook.pdf>, 05.05.17.
- Pöyhönen, M. und Härmäläinen, R. P. (2001): *On the convergence of multiattribute weighting methods*, in: European Journal of Operational Research vol. 129, No. 3, 569–585.
- Praktiknjo, A. (2016): *The Value of Lost Load for Sectoral Load Shedding, Measures: The German Case with 51 Sectors*, in: Energies vol. 9, No. 2, 116.
- President's Commission on Critical Infrastructure Protection (1997): *Critical Foundations. Protecting America's Infrastructures. The Report of the President's Commission on Critical Infrastructure Protection*, Washington/USA, <https://fas.org/sgp/library/pccip.pdf>, 24.05.2018.
- PricewaterhouseCoopers und Verband kommunaler Unternehmen e. V. (PwC und VKU) (Hrg.) (2017): *Checkliste Kaskade Strom*, unveröffentlicht, Berlin.
- Quarantelli, E. L. (1997): *Ten Criteria for Evaluating the Management of Community Disasters*, in: Disasters vol. 21, No. 1, 39-56.

- Rae, A. J. (2007): *Acceptable Residual Risk - Principles, Philosophies and Practicalities*, in: 2<sup>nd</sup> International Conference on System Safety 2007, 26-31, Institution of Engineering and Technology, London/UK, <http://ajrae.com/wp-content/uploads/2015/06/2007-Acceptable-Residual-Risk.pdf>, 24.5.2018.
- Ransikarbum, K. und Mason, S. J. (2016): *Goal programming-based post-disaster decision making for integrated relief distribution and early-stage network restoration*, in: International Journal of Production Economics vol. 182, 324-341.
- Rasche, J., et al. (2001): *Organisation der Ernährungsnotfallvorsorge*, Zivilschutzforschung N.F. Bd. 47, Bonn.
- Raskob, W., Bertsch, V., Ruppert, M., Strittmatter, M., Happe, L., Broadnax, B., Wandler, S. und Deines, E. (2015): *Security of electricity supply in 2030*, in: Critical Infrastructure Protection and Resilience Europe (CIPRE) Conference & Expo, The Hague/The Netherlands.
- Raskob, W., Wandler, S. und Deines, E. (2015): *Agent-based modelling to identify possible measures in case of Critical Infrastructure disruption*, in: Palen, L., et al. (eds.): Proceedings, 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, Kristiansand/Norway.
- Räsänen, A., Juhola, S., Nygren, A. et al. (2016): *Climate change, multiple stressors and human vulnerability: A systematic review*, in: Regional Environmental Change vol. 16, No. 8, 2291-2302.
- Reckon UK (2012): *Desktop review and analysis of information on Value of Lost Load for RIIO-ED1 and associated work*, <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/47154/riioed1conresvoll.pdf>, 24.5.2018.
- Ruiz, F., Caballero, R., Núñez, T., Lozano, M. und Rey, L. (1998) *The Static Approach to Quadratic Dynamic Goal Programming*, In: Stewart T. J., van den Honert R. C. (Hrsg.) Trends in Multicriteria Decision Making, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 465, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Reichenbach, G., Göbel, R., Wolff, H. und Stokar von Neuforn, S. (2008): *Risiken und Herausforderungen für die öffentliche Sicherheit in Deutschland. Szenarien und Leitfragen. Grünbuch des Zukunftsforums Öffentliche Sicherheit*, Berlin, [http://zoes-bund.de/wp-content/uploads/2015/10/Gruenbuch\\_Zukunftsforum.pdf](http://zoes-bund.de/wp-content/uploads/2015/10/Gruenbuch_Zukunftsforum.pdf), 24.05.2018.
- Rhein, S. (2013): *Kapazitäten der Bevölkerung zur Bewältigung eines lang anhaltenden flächendeckenden Stromausfalles. Empirische Untersuchung für das Bezugsgebiet Deutschland*, Praxis im Bevölkerungsschutz Bd. 12, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn.
- Riabacke, M., Danielson, M. und Ekenberg, L. (2012): *State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation*, in: Advances in Decision Sciences vol. 2012, ID 276584.
- Riedman, D. (2016): *Questioning the Criticality of Critical Infrastructure: A Case Study Analysis*, in: Homeland Security Affairs vol. 12.
- Riegel, C. (2007): *Schutz Kritischer Infrastruktur Gesundheit, Projektbericht*, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn.
- Riegel, C. (2015a): *Die Berücksichtigung des Schutzes Kritischer Infrastrukturen in der Raumplanung: zum Stellenwert des KRITIS-Grundsatzes im Raumordnungsgesetz*, Berichte des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr, RWTH Aachen, zugl. Dissertation, Aachen.

- Riegel, C. (2015b): *Spatial criticality - identifying CIP hot-spots for German regional planning*, in: International Journal of Critical Infrastructures vol. 11, No. 3, 265-277.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. und Kelly, T. K. (2001): *Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies*, in: IEEE Control Systems Magazine vol. 21, No. 6, 11–25.
- Rodríguez-Gaviria, E. M. und Botero-Fernández, V. (2013): *Flood Vulnerability Assessment: A Multiscale, Multitemporal and Multidisciplinary Approach*, in: Journal of Earth Science and Engineering vol. 2, 102-108.
- Rome, E., Bologna, S., Gelenbe, E., Luijff, E. und Masucci, V. (2009): *DIESIS: An interoperable European federated simulation network for critical infrastructures*, in: Proceedings, European Simulation Interoperability Workshop 2009, Istanbul/Turkey, 137–144.
- Rome, E., Voß, N., Connelly, A., Carter, J. und Handley, J. (2015): *State of the Art Report (1) Urban Critical Infrastructure Systems*, [http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user\\_upload/D1-1\\_UCIsystems\\_Fraunhofer\\_2015-11-30.pdf](http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user_upload/D1-1_UCIsystems_Fraunhofer_2015-11-30.pdf), 7.5.17.
- Romero, C. (1986): *A survey of generalised goal programming (1970-1982)*, in: European Journal of Operational Research vol. 25, No. 2, 183-191.
- Romero, C. (1991): *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*, Pergamon Press, Oxford.
- Rommelfanger, H.J. und Eickemeier, S. (2002): *Entscheidungstheorie: Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Roon, S. von und Eberl, B. (2017): *Energiewende im Strommarkt – Versorgungsqualität BIHK-Studie*, Der Bayerische Industrie- und Handelskammertag e. V. (BIHK).
- Rosa, A. (2013): *Projektierung von Ersatzstromaggregaten: Errichten und Betreiben von Stromerzeugungsaggregaten nach DIN VDE 0100-551, DIN VDE 0100-560, DIN VDE 0100-710, DIN VDE 0100-718, DIN 6280, VDE-AR-N 4105, VDN-, BDEW-Richtlinien, baurechtlichen Regelungen wie EltBauVO, LAR, usw., 2. Aufl., VDE-Schriftenreihe Bd. 122, VDE-Verlag, Berlin.*
- Rosenthal, U. (1992): *Crisis Management: On the Thin Line Between Success and Failure*, in: Asian Review of Public Administration, 6, 2, 73–78.
- Roszkowska, E. (2013): *Rank Ordering Criteria Weighting Methods – A Comparative Overview*, in: Optimum. Studia Ekonomiczne No. 5, (65), 14-33.
- Rotz, W., Falk, E., Wood, D. und Mulrow, J. (2001): *A Comparison of Random Number Generators Used in Business*, in: Joint Statistical Meetings, Atlanta/USA.
- Ruder, K-H. und Bätge, F. (2008): *Obdachlosigkeit: Sozial- und ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Vermeidung und Beseitigung*, Link, Köln.
- Ruschmann, S. (2015): *Netzausbau für die Energiewende*, Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Industrie- und Handelskammern IHK Nord, Hamburg.
- Saaty, T. L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York.
- Sachs, M. (Hrsg.)(2009): *Grundgesetz Kommentar*, 5. Aufl., Beck, München.

- Sahebjamnia, N., Torabi, S. A. und Mansouri, S. A. (2015): *Integrated business continuity and disaster recovery planning: Towards organizational resilience*, in: European Journal of Operational Research vol. 242, No. 1, 261-273.
- Sahin, O. und Mohamed, S. (2010): *Coastal vulnerability to sea level rise: A spatio-temporal decision making tool*, in: Proceedings, 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 89-93, Macau/China.
- Saisana, M., Saltelli, A. und Tarantola, S. (2005): *Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques as Tools for the Quality Assessment of Composite Indicators*, in: Journal of the Royal Statistical Society vol. 168A, Pt. 2, 307-323.
- Saldaña-Zorrilla, S. R. (2007): *Socio-economic vulnerability to natural disasters in Mexico: rural poor, trade and public response*, in: CEPAL Serie estudios y perspectivas No. 92, UN Mexico.
- Salek, K. (2001): *Implementation und Verifikation eines generischen wissensbasierten Netzwiederaufbau-Systems*, Dissertation, Univ. Duisburg.
- Salo, A. A., Hämäläinen, R. P. (1995): *Preference programming through approximate ratio comparisons*, in: European Journal of Operational Research vol. 82, No. 3, 458-475.
- Saltelli, A. (2007): *Composite Indicators between Analysis and Advocacy*, in: Social Indicators Research vol. 81, 1, 65-77.
- Scharpf, F. W. (1983): *Interessenlage der Adressaten und Spielräume der Implementation*, in: Mayntz, R. (Hrsg.), *Implementation politischer Programme II: Ansätze zur Theoriebildung*, Westdeutscher Verlag, Opladen, 99–116.
- Scheffler, J. (2016): *Verteilnetze auf dem Weg zum Flächenkraftwerk: Rechtlicher Rahmen, Erzeuger, Netze*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Schenke, W.-R. (2011): *Polizei- und Ordnungsrecht*, 7. Aufl., C.F. Müller, Heidelberg.
- Schniederjans, M. J. (1995): *Goal Programming: Methodology and Applications*, Kluwer Publishers, Boston.
- Schopp, N. (2016): *Bevölkerungsverhalten im Krisenfall – Deutungsmuster und Handlungsfolgen aus Sicht der Feuerwehren*, Masterthesis, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- Schönthaler, K. et al. (Hrsg.) (2015): *Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*, Umweltbundesamt, Dessau.
- Schubert, D. K. J., Meyer, T., von Selasinsky et al. (2013): *Der Stromausfall in München - Einfluss auf Zahlungsbereitschaften für Versorgungssicherheit und auf die Akzeptanz Erneuerbarer Energien*, Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft Bd. 2, TU Dresden.
- Schulze, T. (2006): *Bedingt abwehrbereit. Schutz kritischer Informations-Infrastrukturen in Deutschland und den USA*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schulze-Fielitz, H. (2004): *Art. 2 II, Grundgesetz, Kommentar*, in: Dreier, H. (Hrsg.), *Kommentar zum Grundgesetz*, 1, 2, Mohr Siebeck, Tübingen.

- Schwarz, R., Harmeling, S. und Bals, C. (2007): *Auswirkungen des Klimawandels auf Deutschland*, mit Exkurs NRW, Germanwatch, Bonn.
- Schwabe, J. (1987): *Fürmöglichhalten und irrige Annahme von Tatbestandsmerkmalen*, in: Selmer, Peter/von Münch, Ingo (Hrsg.): *Gedächtnisschrift für Wolfgang Martens*, Berlin, New York 1987.
- Schweer, B. (2011): *Analyse der Möglichkeiten und Grenzen bei der Verwendung von Schutzzielen in der Risikokommunikation zur Vorbereitung auf einen anhaltenden Stromausfall*, Bachelorarbeit, Hochschule für Wirtschaft und Recht, Berlin.
- Serra, P. und G. Fierro (1997): *Outage Cost in Chilean Industry*, in: *Energy Economics* vol. 19, No. 4, 417-434.
- Setola, R., De Porcellinis, S., Sforza, M. (2009): *Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model*, in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* vol. 2, No. 4, 170-178.
- Sahin, O. (2011): *Dynamic Assessment of Coastal Vulnerability and Adaption to Sea Level Rise: An Integrated Spatial-temporal Decision Making Approach*, Thesis, Griffith University/Australia.
- Simon, H. A. (1957): *Models of Man: Social and Rational*, Wiley, New York.
- Singh, A. K., Nasiruddin, I., Khatoon, S. et al. (2012): *Load Forecasting Techniques and Methodologies: A Review*, in: 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems, Allahabad/India.
- Singh, A. N., Gupta, M. P. und Ojha, A. (2014): *Identifying critical infrastructure sectors and their dependencies: An Indian scenario*, in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* vol. 7, 71–85.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R. J. T. und Street, R. (1999): *The Science Of Adaptation: A Framework For Assessment*, in: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* vol. 4, No. 3-4, 199–213.
- Soares, M. B., Gagnon, A. und Doherty, R. M. (2012): *Conceptual elements of climate change vulnerability assessments: A review*, in: *International Journal of Climate Change Strategies and Management* vol. 4, No. 1, 6-35.
- Sobiech, C. (2013): *Agent-Based Simulation of Vulnerability Dynamics: A Case Study of the German North Sea Coast*, zugl. Diss. Univ. Hamburg, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz (SKK) (Hrg.) (1999): *Führung und Leitung im Einsatz: Führungssystem*, Köln.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. und Foufoula-Georgiou, E. (1993): *Frequency Analysis of Extreme Events*, in: Maidment, D. (ed.), *Handbook of Hydrology*, Chapter 18, McGrawHill, New York.
- Steetskamp, I. und van Wijk, D. (1994): *Stromausfall. Die Verletzlichkeit der Gesellschaft. Die Folgen von Störungen der Elektrizitätsversorgung*, Rathenau-Instituut, Den Haag/The Netherlands.
- Steiner, M. (2007): *Nachfrageorientierte Präferenzmessung. Bestimmung zielgruppenspezifischer Eigenschaftssets auf Basis von Kundenbedürfnissen*, zugl. Diss. Univ. Jena, Dt. Universitätsverl., Wiesbaden.

- Steinkamm, A. (1989): *Zur Frage eines Verfassungsauftrages zum wirksamen Bevölkerungsschutz*, in: Faller, H. J., Kirchhof, P., Träger, E. (Hrsg.): *Verantwortlichkeit und Freiheit: die Verfassung als wertbestimmte Ordnung*, Mohr, Tübingen.
- Stephan, U., Deger, J., Wöhrle, G., Wolf, H. und Reiff, H. (2009): *Polizeigesetz für Baden-Württemberg Kommentar*, 6. Aufl., Boorberg, Stuttgart.
- Stergiopoulos, G., Kotzanikolaou, P., Theoharidou, M. et al. (2016): *Time-based critical infrastructure dependency analysis for large-scale and cross-sectoral failures*, in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* vol. 12, 46-60.
- Stern, K. (2010): *Die Schutzpflichtenfunktion der Grundrechte: Eine juristische Entdeckung*, in: *Die Öffentliche Verwaltung* Ausgabe 6, 241-248.
- Stolzenburg, K. (2011): *Kritische Infrastrukturen in Deutschland*, Vortrag, 3. Göttinger Tagung zu aktuellen Fragen zur Entwicklung der Energieversorgungsnetze, Mai 2011, Göttingen, [https://www.efzn.de/uploads/media/004\\_Stolzenburg.pdf](https://www.efzn.de/uploads/media/004_Stolzenburg.pdf), 12.1.12.
- Störfall-Kommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1994): *Abschlussbericht, Sicherheitsabstände als Schadensvorsorge, SFK-GS-04*, Berlin, [https://www.kas-bmu.de/sfk-berichte.html?file=files/.../SFK.../Berichte/sfk\\_gs\\_04.pdf](https://www.kas-bmu.de/sfk-berichte.html?file=files/.../SFK.../Berichte/sfk_gs_04.pdf), 28.5.18.
- Sureeyatanapas, P. (2016): *Comparison of rank-based weighting methods for multi-criteria decision making*, in: *KKU Engineering Journal* vol. 43, No. S3, 376-379.
- Tamiz, M., Jones, D. F. und El-Darzi, E. (1995): *A review of goal programming and its applications*, in: *Annals of Operations Research* vol. 58, No. 1, 39-53.
- Tamiz, M., Jones, D. F. und Romero, C. (1998): *Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art*, in: *European Journal of Operational Research* vol. 111, 569-581.
- Taylor, J. W. und McSharry, P. E. (2008): *Short-Term Load Forecasting Methods: An Evaluation Based on European Data*, in: *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 22, 2213-2219.
- Theoharidou, M., Kotzanikolaou, P. und Gritzalis, D. (2009): *Risk-Based Criticality Analysis*, in: *Critical Infrastructure Protection III, 3<sup>rd</sup> Annual IFIP WG 11.10 International Conference on Critical Infrastructure Protection*, Hanove, New Hampshire/USA, eds.: C. Palmer et al., IFIP Advances in Information and Communication Technology, 311, 35-49, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Theoharidou, M., Kotzanikolaou, P. und Gritzalis, D. (2011): *Risk assessment methodology for interdependent critical infrastructures*, in: *International Journal of Risk Assessment and Management* vol. 15, No. 2/3, 128-148.
- Thommen, J.-P., Achleitner, A.-K., Gilbert, D.U. et al. (2017): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*, 8. Aufl., Springer Gabler, Wiesbaden.
- Thywissen, K. (2006): *Components of Risk: A Comparative Glossary*, SOURCE Studies Of the University: Research Counsel Education - Publication Series of UNU-EHS No. 2/2006, Bonn
- Pais, T. C. und Ribeiro, R. A. (2009): *Contributions to dynamic multicriteria decision making models*, in: IFSA – EUSFLAT, 2009, Lisbon, <https://pdfs.semanticscholar.org/04f4/1d6543dca303baffb204970b5ebb569d9abd.pdf>, 24.05.2018.

- Todorovic, B., Trifunovic, D., Jonev, K. und Filipovic, M. (2017): *Contribution to Enhancement of Critical Infrastructure Resilience in Serbia*, in: Linkov, I., Palma-Oliveira, J.M. (eds.): *Resilience and Risk. Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains*, Environmental Security, Chapter 22, Springer, Netherlands.
- Tol, R. S. J. (2007): *The value of lost load*, in: O'Leary, F., Bazilian, M., Howley, M., O'Gallachoir, B. (Eds.), *Security of Supply in Ireland 2007 Report*, Sustainable Energy Ireland, Cork/Ireland, 63–66.
- Trzaskalik, T. (1992): *Hierarchical approach to multi-criteria dynamic programming*, in: *INFOR information Systems and Operational Research* vol. 30, No. 2, 138–147.
- Trzaskalik, T. (1997): *Dynamic Goal Programming Models*, In: *Advances in Multiple Objective and Goal Programming*, Proceeding, 2nd International Conference on Multiobjective Programming and Goal Programming, 1996, Torremolinos/Spain, Caballero, R. et al.(eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, 111-119.
- Trzaskalik, T. (2003): *Interactive Procedures in Hierarchical Dynamic Goal Programming*, in: Tanino, T., et al. (eds.): *Multi-Objective Programming and Goal Programming: Theory and Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Turner, B. L. et al. (2003): *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*, in: *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* vol. 100, No. 14, 8074–8079.
- Tzeng, G-H., Chen, T.-Y. und Wang, J.-C. (1998): *A weight-assessing method with habitual domains*, in: *European Journal of Operational Research* vol. 110, No. 2, 342-367.
- Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE) (2007): *Final report. System Disturbance on 4 November 2006*, UCTE, Brussels/Belgium.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2009): *UNISDR 2009 Terminology on Disaster Risk Reduction*, UNISDR, Geneva.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) (2015): *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030*, UNISDR, Geneva.
- United States Agency for International Development (USAID) (2014): *Design And Use Of Composite Indices In Assessments Of Climate Change Vulnerability And Resilience*. African and Latinamerica Resilience to Climat Change (ARCC), USAID, Washington/USA.
- Usov, A., Beyel, C., Rome, E., Beyer, U. et al. (2010): *The DIESIS approach to semantically interoperable federated critical infrastructure simulation*, in: *Proceedings 2nd International Conference on Advances in System Simulation*, 121–128, Nice/France.
- Van Eeten, M., Nieuwenhuijs, A., Luijff, E., Klaver, M. und Cruz, E. (2011): *The State and the Threat of Cascading Failure Across Critical Infrastructures: The Implications of Empirical Evidence from Media Incident Reports*, in: *Public Administration* vol. 89, No. 2, 381–400.
- Van Til, J., Groothuis-Oudshoorn, C., Lieferink, M., Dolan, J. und Goetghebeur, M. (2014): *Does technique matter; a pilot study exploring weighting techniques for a multi-criteria decision support framework*, in: *Cost Effectiveness and Resource Allocation* vol. 12, No. 1, 22.
- Velasquez, M. und Hester, P.T. (2013): *An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods*, in: *International Journal of Operations Research* vol. 10, No. 2, 56-66.

- Vennegeerts, H., Schröders, C., Holthausen, M., Quadflieg, D. und Moser, A. (2013): *Neue Auswertung der Berichtsjahre 2004 – 2011. Ermittlung von Eingangsdaten zur Zuverlässigkeitsberechnung aus der FNN-Störungsstatistik*, in: ew H. 7, 2013.
- Vleuten, E. van der, Legendijk, V. (2010): *Transnational infrastructure vulnerability: The historical shaping of the 2006 European "Blackout"*, in: Energy Policy vol. 38, No. 4, 2042-2052.
- Verband der Netzbetreiber (VDN) (2007c): *Praxisleitfaden. Ermittlung und Abrechnung von Jahresmehr- und -mindermengen*, VDN, Berlin, [https://www.swtue.de/fileadmin/user\\_upload/5Netze/Netznutzung/Netzentgelte\\_Strom/Praxisleitfaden-MuM-Abrechnung-2007.pdf](https://www.swtue.de/fileadmin/user_upload/5Netze/Netznutzung/Netzentgelte_Strom/Praxisleitfaden-MuM-Abrechnung-2007.pdf), 25.5.2018.
- Verband kommunaler Unternehmen e.V.(VKU), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. BDEW (2012): *BDEW/VKU-Praxis-Leitfaden für unterstützende Maßnahmen von Stromnetzbetreibern. Kommunikations- und Anwendungsleitfaden zur Umsetzung der Systemverantwortung gemäß §§ 13 Abs. 2.14 Abs. 1 und 14 Abs. 1c EnWG*, Berlin, <https://www.bdew.de/service/anwendungshilfen/bdew-vku-leitfaden-massnahmen-stromnetzbetreiber/>, 25.5.2018.
- Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) (2000): *Zuordnung der VDEW-Lastprofile zum Kundengruppenschlüssel*, Frankfurt am Main.
- Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) (2007): *Technischer Bericht. Elemente zur risikoangepassten Bemessung von Personal für die Brandbekämpfung bei öffentlichen Feuerwehren*, Altenberge.
- Viavattene, C., Micou, A.P., Owen, D., Priest, S. et al. (2015): *Resilience-Increasing Strategies for Coasts – Toolkit, Library of Coastal Vulnerability Indicators. Guidance Document*, [http://www.risckit.eu/np4/file/23/RISC\\_KIT\\_D.2.2\\_CVIL\\_Guidance\\_Document.pdf](http://www.risckit.eu/np4/file/23/RISC_KIT_D.2.2_CVIL_Guidance_Document.pdf), 07.05.18.
- Villagrán de León, J. C. (2006): *Vulnerability: A conceptual and methodological review*, SOURCE Studies Of the University: Research Counsel Education - Publication Series of UNU-EHS No. 4/2006, Bonn
- Vollmer, M., Walther, G., Jovanović, A. et al. (2016): *Initial Framework for Resilience Assessment*, <http://www.smartresilience.eu-vri.eu/sites/default/files/publications/SmartResD1.1.pdf>, 7.5.17.
- Von Twickel, C. (2002): *Beziehungen und Netzwerke in der modernen Gesellschaft: Soziales Kapital und normative Institutionenökonomik*, Philosophie und Ökonomik Bd. 2, Lit, Hamburg.
- von Winterfeldt, D. und Edwards, W. (1986): *Decision Analysis and Behavioral Research*, Cambridge Univ. Press.
- Wachsmuth, J., Brand, U., Kelkenberg, K. und Stührmann, T. (2013): *Dokumentation des Kick-Off-Meetings August 2013, RESYSTRA – Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen!*, Bremen, 2013, <http://www.resystra.de/files/aktuelles/resystra-kick-off-protokoll.master.pdf?v=1>, 07.05.17.
- Walker, B., Anderies, J. M., Kinzig, A. P. und Ryan, P. (2006): *Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: Introduction to the Special Issue*, in: Ecology and Society vol. 11, No. 1, 12.
- Walus, A. (2012): *Katastrophenorganisationsrecht. Prinzipien der rechtlichen Organisation des Katastrophenschutzes*, Wissenschaftsforum 10, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn.

- Wapler, F. (2012): *Alles geklärt? Überlegungen zum polizeilichen Gefahrerforschungseingriff*, in Deutsches Verwaltungsblatt 2012, 86-92.
- Watson, S. R. und Buede, D. M. (1987): *Decision synthesis: The principles and practice of decision analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wei, G. (2010): *Some induced geometric aggregation operators with intuitionistic fuzzy information and their application to group decision making*, in: Applied Soft Computing vol. 10, No. 2, 423-431.
- Wei, G. und Zhao, X. (2012): *Some induced correlated aggregating operators with intuitionistic fuzzy information and their application to multiple attribute group decision making*, in: Expert Systems with Applications vol. 39, No. 2, 2026-2034.
- Weniger, J., Bergner, J., Tjaden, T. und Quaschnig, V. (2014): *Studie. Einfluss der Sonnenfinsternis im März 2015 auf die Solarstromerzeugung in Deutschland*, HTW, Berlin, <https://pv-speicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2014/10/HTW-Berlin-Studie-Einfluss-der-Sonnenfinsternis-im-M%C3%A4rz-2015-auf-die-Solarstromerzeugung-in-Deutschland.pdf>, 7.5.17.
- Wichman, B. A. und Hill, I. D. (1982): *Algorithm AS 183: An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator*, in: Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics) vol. 31, No. 2, 188-190.
- Wichman, B. A. und Hill, I. D. (1987): *Building a Random-Number Generator*, in: BYTE vol. 12, No. 3, 127-128.
- Willows, R. et al. (eds.) (2003): *Climate adaptation: risk, uncertainty and decision-making*, UK Climate Impacts Programme, Oxford.
- Winter, E. (Hrsg.) (2013): *Gabler Wirtschaftslexikon*, 18, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2002): *Landesentwicklungsplan 2002 Baden-Württemberg*, Stuttgart.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. und Davis, I. (2004): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Taylor & Francis
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2007): *Zur Kompetenz des Bundes für den Bevölkerungsschutz, WD3-423/07*, Deutscher Bundestag, Berlin.
- Witte, T. fh. (2013): *Recht und Gerechtigkeit im Pandemiefall. Bevorratung, Verteilung und Kosten knapper Arzneimittel im Falle eines Seuchenausbruchs*, Münsterische Beiträge zur Rechtswissenschaft N.F. 24, Nomos, Baden-Baden.
- Wöhe, G., Döring, U. und Brösel, G. (2016): *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. Aufl., Vahlen, München.
- Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X. und Pan, X. (2013): *A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: A case study of Bayingolin, China*, in: Water Resource Management vol. 27, No. 8, 3085-3101.
- Xie, R. und Tang, J. (2011): *Study on the Optimization for Emergency Food Transportation Plan Based on Goal Programming*, in: Proceedings, International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011,137-140, Changchun/China.

- Yang, T., Kuo, Y., Parker, D. und Chen, K. H. (2015): *A Multiple Attribute Group Decision Making Approach for Solving Problems with the Assessment of Preference Relations*, in: *Mathematical Problems in Engineering* 2015, No. 3, 1-10, Article ID 849897.
- Yodo, N. und Wang, P. (2016): *Engineering Resilience Quantification and System Design Implications: A Literature Survey*, in: *Journal of Mechanical Design* vol. 138, No. 11, 111408.
- Yohe, G. und Tol, R. S. J. (2002): *Indicators for social and economic coping capacity - Moving towards a working definition of adaptive capacity*, in: *Global Environment Change* vol. 12, No. 1, 25-40.
- Yue, Z. (2011): *A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS*, in: *Applied Mathematical Modelling* vol. 35, No. 4, 1926-1936.
- Yusta, J. M., Correa, G. J. und Lacal-Arántegui, R. (2011): *Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art*, in: *Energy Policy* vol. 39, No. 10, 6100–6119.
- Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M. und Yusop, Z. B. (2015): *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), (EATON), CEMEP (2008): *Unterbrechungsfreie Stromversorgungen. Europäischer Leitfaden. Grundlagen für eine normgerechte Gestaltung von USV-Anlagen*. Frankfurt am Main.
- Zhou, H., Wang, J., Wan, J. und Jia, H. (2009): *Resilience to natural hazards: A geographic perspective*, in: *Natural Hazards* vol. 53, No. 1, 21-41.
- Ziegeldorf, J., Verheggen, L., Krahl, S. und Moser, A. (2014): *Optimale Ausbauplanung von Verteilnetzen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und innovativen Betriebsmitteln*, 13. Symposium Energieinnovation, 2014, Graz/Österreich.
- Zobel, C. und Khansa, L. (2014): *Characterizing multi-event disaster resilience*, in: *Computers and Operations Research*, vol. 42, 83–94.
- Zollenkopf, K. (1968): *Diskussionsbeitrag zur Cigre-Tagung 1968, Gruppe 32, Cigre-Bericht 32-00*, ETZ 89, 724, Paris.

# Anhang

Lokale Kritische Infrastrukturen lassen sich mithilfe der in den Abschnitten 4.6.1 und 4.6.2 erörterten Ansätze herleiten. Bezugnehmend auf diese Herleitung findet sich nachfolgend eine nicht abschließende Tabelle von Einrichtungen, die sich als Typen Lokaler Kritischer Infrastrukturen identifizieren lassen.

Die Tabelle gibt darüber Auskunft, wie die aufgelisteten Typen den erörterten Ansätzen zugeordnet werden und inwieweit die Einrichtungen als im engeren, weiteren oder weitesten Sinne Lokale Kritische Infrastrukturen erkannt werden.

Nr.	Lokale Kritische Infrastruktur	Sektorale Zuordnung	Schutzpflicht	Anhaftende betriebliche Eigengefahr	Schutzwürdige Nutzung	Lebensnotwendige Versorgung	Staatliche Bestand u. Funktionsfähigkeit	Kollektives Rechtsgut	Leistungen der Daseinsvorsorge	Sicherstellungs- u. Vorsorgegesetze	Europäischer Kritische Infrastrukturen	Bundesrelevanz	Lebens-/ Verteidigungswichtige Ein.	Leistungen der Grundversorgung
1	<b>Krankenhäuser</b>	Gesundheit	A,B	(Ja)	Ja	Ja		(Ja) <sup>1</sup>	(Ja)			(Ja)		
2	<b>Hausärzte</b>	Gesundheit	B			Ja		(Ja) <sup>1</sup>						Ja
3	<b>Apotheken</b>	Gesundheit	B			Ja		(Ja) <sup>1</sup>						Ja
4	Notunterkünfte (Asyl, Obdach)		A,B		Ja	(Ja)		Ja	(Ja)					
5	<b>Dialysekliniken</b>	Gesundheit	A,B	(Ja)	Ja	Ja		(Ja) <sup>1</sup>						
6	<b>Alten- und Pflegeeinrichtungen</b>		(A),B		Ja	(Ja)		(Ja) <sup>1</sup>	(Ja)					Ja
7	Betreutes Wohnen		(A),B		Ja	(Ja)		(Ja) <sup>1</sup>	(Ja)					
8	<b>Discounter, Supermärkte</b>	Ernährung	(B)		(Ja)	Ja			(Ja)	(Ja)				Ja
9	<b>Vollsortimentmärkte</b>	Ernährung	(B)		Ja	Ja			(Ja)	(Ja)				
10	Tankstellen		(B)		(Ja)	(Ja)				(Ja)				Ja
11	Postfilialen		(B)		(Ja)	(Ja)			(Ja)	(Ja)				Ja
12	Briefverteilzentrum		(B)			(Ja)			(Ja)	(Ja)			(Ja)	
13	Paketverteilzentrum		(B)			(Ja)			(Ja)	(Ja)			(Ja)	
14	<b>Rettungswachen (inkl. Lts)</b>	Staat u. Verwaltung	A			(Ja)	Ja	(Ja) <sup>1</sup>	(Ja)					
15	<b>Feuerwachen (inkl. Lts)</b>	Staat u. Verwaltung	A			(Ja)	Ja		(Ja)					Ja

Nr.	Lokale Kritische Infrastruktur	Sektorale Zuordnung	Schutzpflicht	Anhaftende betriebliche Eigengefahr	Schutzwürdige Nutzung	Lebensnotwendige Versorgung	Staatliche Bestand u. Funktionsfähigkeit	Kollektives Rechtsgut	Leistungen der Daseinsvorsorge	Sicherstellungs- u. Vorsorgegesetze	Europäischer Kritische Infrastrukturen	Bundesrelevanz	Lebens-/ Verteidigungswichtige Ein.	Leistungen der Grundversorgung
16	Polizeiwachen (inkl. Lst)	Staat u. Verwaltung	A			(Ja)	Ja							
17	Orts- Landes- und Bundesverband THW	Staat u. Verwaltung	A			(Ja)	Ja						Ja	
18	Justizvollzugsanstalten	Staat u. Verwaltung	A		(Ja)		Ja							
19	Rat- und Verwaltungshäuser	Staat u. Verwaltung	A		Ja	(Ja)	Ja							Ja
20	Gerichte	Staat u. Verwaltung	A		Ja		Ja							
21	Sendetürme	Informationstechnik u. Telekommunikation Medien und Kultur	(B)			(Ja)	Ja		(Ja)	(Ja)			(Ja)	
22	Museen und Bibliotheken		(B)		(Ja)		Ja							
23	Trinkwasser-einrichtungen	Wasser	A,B			Ja	Ja	Ja <sup>2</sup>	Ja	Ja		(Ja)		
24	Müllabfuhr		B			(Ja)			Ja					
25	Klärwerk	Wasser	B	Ja		(Ja)			Ja					
26	Banken	Finanz- und Versicherungswesen	(B)		(Ja)	(Ja)		(Ja) <sup>4</sup>	(Ja)	(Ja)				Ja

Nr.	Lokale Kritische Infrastruktur	Sektorale Zuordnung	Schutzpflicht	Anhaftende betriebliche Eigengefahr	Schutzwürdige Nutzung	Lebensnotwendige Versorgung	Staatliche Bestand u. Funktionsfähigkeit	Kollektives Rechtsgut	Leistungen der Daseinsvorsorge	Sicherstellungs- u. Vorsorgegesetze	Europäischer Kritische Infrastrukturen	Bundesrelevanz	Lebens-/ Verteidigungswichtige Ein.	Leistungen der Grundversorgung
27	Ställe		A	Ja										
28	Störfallbetriebe		A	Ja									Ja	
29	<i>Beherbergungsstätten</i>				(Ja)									
30	<i>Schulen</i>		B		Ja		Ja		(Ja)					Ja
31	<i>Kindergärten</i>		B		Ja		Ja		(Ja)					
32	<i>Versammlungsstätten</i>	Medien und Kultur			Ja									
33	<i>Krematorien (auch für Tierkörper)</i>		A	Ja				(Ja) <sup>3</sup>						
34	<i>Tierkörperbeseitigungsanstalten</i>		B	Ja				(Ja) <sup>3</sup>	(Ja)					
35	<i>Steuerung der Wasserhaltung</i>		A	Ja				(Ja) <sup>2</sup>						
36	<i>Hochwasserschutzanlagen</i>		A	Ja				(Ja) <sup>2</sup>						
37	<i>Schöpf-, Sielbau-, Bach-, Fluss- und Seepumpwerken</i>		A	Ja				(Ja) <sup>2</sup>						
38	<i>Grubenwasserpumpen</i>		A	Ja				(Ja) <sup>2</sup>						

Nr.	Lokale Kritische Infrastruktur	Sektorale Zuordnung	Schutzpflicht	Anhaftende betriebliche Eigengefahr	Schutzwürdige Nutzung	Lebensnotwendige Versorgung	Staatliche Bestände u. Funktionsfähig-	Kollektives Rechtsgut	Leistungen der Daseinsvorsorge	Sicherstellungs- u. Vorsorgegesetze	Europäischer Kritische Infrastr.	Bundesrelevanz	Lebens-/ Verteidigungswichtige Ein.	Leistungen der Grundversorgung
39	Anlagen zur Grundwasserabsenkung		A	Ja				(Ja) <sup>2</sup>						
40	See- und Binnenhäfen		(B)							(Ja)	(Ja)	Ja		
41	Kasernen bzw. Einrichtungen der Bundeswehr und ausländischen Streitkräften	Staat u. Verwaltung		Ja			Ja					Ja	(Ja)	
43	Rüstungsbetriebe												(Ja)	
44	Öffentlicher Personennahverkehr	Transport und Verkehr						(Ja) <sup>5</sup>	(Ja)	(Ja)		(Ja)		
45	(Straßen-)Tunnel	Transport und Verkehr	B	Ja				(Ja) <sup>5</sup>	(Ja)	(Ja)				
46	Kommunale Gasversorgung		B	Ja		(Ja)			(Ja)			(Ja)		
47	Fernwärme	Energie				(Ja)			(Ja)					
48	Straßenbeleuchtung								(Ja)					
49	Straßenreinigung								(Ja)					
50	Flughäfen	Transport und Verkehr		Ja					(Ja)	(Ja)	(Ja)	Ja		

Nr.	Lokale Kritische Infrastruktur	Sektorale Zuordnung	Schutzpflicht	Anhaftende betriebliche Eigengefahr	Schutzwürdige Nutzung	Lebensnotwendige Versorgung	Staatliche Bestand u. Funktionsfähigkeit	Kollektives Rechtsgut	Leistungen der Daseinsvorsorge	Sicherstellungs- u. Vorsorgegesetze	Europäischer Kritische Infrastrukturen	Bundesrelevanz	Lebens-/ Verteidigungswichtige Ein.	Leistungen der Grundversorgung
51	<i>Unterhaltssichernde Leistungen durch die Bundesagentur für Arbeit</i>	Staat u. Verwaltung	B			(Ja)			(Ja)					
52	<i>Leitstellen von Eisenbahnen und Untergrundbahnen</i>	Transport und Verkehr				(Ja)	(Ja)					Ja	Ja	
53	<i>Leitstellenbetriebe für das Elektrizitätsübertragungsnetz</i>	Energie				(Ja)					Ja	Ja	Ja	
54	<i>Niederlassung der Bundesbank</i>	Finanz- und Versicherungswesen	B			(Ja)	(Ja)		(Ja)				Ja	
55	<i>Über- und untertägigen Betriebseinrichtungen (Bergwerke, auch Tiefbohrungen)</i>		A	Ja										
56	<i>Anlagen zur Kontrolle und Reinigung von Altlasten und Schadstoffen</i>			Ja										
57	<i>Volksfeste</i>								(Ja)					
58	<i>Blutspendedienst</i>	Gesundheit	A	Ja		Ja		Ja					(Ja)	

**Lokale Kritische Infrastrukturen im engeren Sinne**

Lokale Kritische Infrastrukturen im weiteren Sinne

*Lokale Kritische Infrastrukturen im weitesten Sinne*

A - Schutzpflicht auf körperliche Unversehrtheit

B - Sozialstaatliche Leistungspflicht

() – bedingt bzw. im weiteren Sinne zutreffend

<sup>1</sup> Im Sinne des Kollektivrechtsguts nach öffentlicher Gesundheitsversorgung

<sup>2</sup> Im Sinne der Kollektivrechtsgüter nach sauberen Wasser und öffentlicher Wasserversorgung

<sup>3</sup> Im Sinne des Kollektivrechtsgut nach Infektionsschutz

<sup>4</sup> Im Sinne des Kollektivrechtsgut nach Sicherheit des Geldverkehrs

<sup>5</sup> Im Sinne des Kollektivrechtsgut nach Leichtigkeit des Straßenverkehrs