



Redundanzen, Resilienzen und Nachhaltigkeit: Energie für die 20er Jahre

Schriftenreihe des Kuratoriums
Band 14

Impressum:

Forum für Zukunftsenergien e. V.
Reinhardtstraße 3
10117 Berlin

Telefon: +49 (0)30 / 72 61 59 98 0
Fax: +49 (0)30 / 72 61 59 98 9
E-Mail: info@zukunftsenergien.de
Internet: www.zukunftsenergien.de

Berlin, Mai 2021

Mit herzlichem Dank für die freundliche Unterstützung des:

Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU)



© KIT

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka
Präsident, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Holger Hanselka ist seit 2013 Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), der Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft sowie Vizepräsident für den Forschungsbereich „Energie“ der Helmholtz-Gemeinschaft, der größten Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Zuvor war er seit 2001 Direktor des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit und Leiter des Fachgebiets „Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik“ an der TU Darmstadt; von 2006 bis 2012 war er darüber hinaus Mitglied des Präsidiums der Fraunhofer Gesellschaft, und von 2011 bis 2013 Vizepräsident der TU Darmstadt. Das KIT konnte unter Hanselkas Leitung in der jüngsten Runde der Exzellenzstrategie den Titel „Exzellenzuniversität“ zurückerobern. Er ist in verschiedenen Beratungsgremien der Bundesregierung aktiv, unter anderem als Mitglied des Lenkungskreises für die Wissenschaftsplattform des Bundesumweltministeriums und des Bundesforschungsministeriums zum Klimaschutzplan 2050.

Resilience by Design: Erneuerbare Energiesysteme nachhaltig gestalten

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

Der menschenverursachte Klimawandel und die vor allem dadurch notwendig gewordene Transformation des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energiequellen führen zu einer neuen Art von Risiken: Diese liegen nicht mehr allein in der Verfügbarkeit von Rohstoffen sondern vor allem in der vieldimensionalen Verwundbarkeit unseres mehr und mehr vernetzten und komplexen Systems von Energieerzeugung, -verteilung und -verbrauch. Die Antwort darauf ist Resilienz, ein modernes Forschungsthema, welches am KIT und in der Helmholtz-Gemeinschaft immer mehr an Bedeutung gewinnt. Resilienz wird seit einigen Jahrzehnten zunehmend auf biologische, ökologische, ökonomische und technologische Systeme bezogen. Im Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft beschäftigen wir uns inzwischen intensiv mit der Entwicklung von Lösungen für ein resilientes Energiesystem der Zukunft.

Systemische Risiken vernetzter Systeme und sich verändernde Randbedingungen

Am 8. Januar 2021 hat eine Verkettung von Ereignissen in Kroatien einen schwerwiegenden Zwischenfall im europäischen Energiesystem ausgelöst, durch den das Verbundnetz der Stromversorgung in einen nordwesteuropäischen und südosteuropäischen Netzabschnitt mit erheblich abweichenden Netzfrequenzen aufgeteilt wurde. Im nordwesteuropäischen Netzabschnitt kam es zu einem Strommangel in einem Ausmaß, dass verschiedene Infrastrukturbetreiber ihre Notstromversorgung auslösen mussten. Im südosteuropäischen Netzabschnitt bestand dagegen ein Leistungsüberschuss. Nur durch automatische Abschaltungen einiger Industrieanlagen in Frankreich und Italien konnten Kaskadeneffekte verheerenden Ausmaßes verhindert werden.

In einem stark dezentralen und nachhaltigen Energiesystem mit volatiler Einspeisung könnten sich vergleichbare Situationen vermehrt ereignen und zu großflächigen Blackouts führen. Dunkelflauten bergen beispielsweise das Potenzial für ein großes Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Nachfrage und könnten so netzkritische Situationen wie am 8. Januar dieses Jahres hervorrufen.

Volatilität der erneuerbaren Energiegewinnung und Klimawandel

Verlässliche mittel- und langfristige Klimaprognosen sowie Day-Ahead-Wettervorhersagen sind für die robuste Planung und das zuverlässige Management zukünftiger Energiesysteme mit fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energien essentiell. Unerwartete Abweichungen prognostizierter Wetterlagen sowie Extremereignisse können einem nachhaltigen Energiesystem erheblich zusetzen. Zudem können wir die globale Reduktion der Treib-

hausgasemissionen heute kaum für die kommenden Jahre und Jahrzehnte vorhersagen. Wichtige Parameter von Klimavorhersagemodellen sind also mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb sich Prognosen zu mittel- bis langfristigen Verschiebungen klimatischer Bedingungen erheblich unterscheiden. Neben Aussagen über globale Klimatrends sind Vorhersagemodelle mit regionaler Auflösung oft unerlässlich. Notwendig sind regionale Modelle etwa für die Integration von regenerativen Erzeugungsanlagen und Energiespeichern. Unsicherheiten in den Modellen erschweren dabei gezielte Investitionen mit Blick auf robuste und machbare Systemlösungen.

Digitalisierung, Vernetzung, Automatisierung und neue Lasten

Neben der Volatilität erneuerbarer Energieerzeugung und ihrer gleichzeitigen Abhängigkeit von der langfristigen Klimaentwicklung beeinflusst auch die fortschreitende Digitalisierung das gesamte Energiesystem. Durch Automatisierung und Vernetzung wirken zusätzliche Stressoren auf ein transformiertes Energiesystem und die nachgelagerten Systeme.

Der zuverlässige Betrieb eines dezentralen Energiesystems hängt im Wesentlichen vom Zustand zweier interdependenter Infrastrukturen ab: vom Energienetz und von einer Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Der zunehmende Einsatz eingebetteter Systeme bringt dabei ein wachsendes Vulnerabilitätspotential und neue systemische Versorgungsrisiken mit sich.

Systemische Risiken entstehen nicht nur durch das mögliche Versagen einzelner Komponenten sondern auch durch den verbreiteten Einsatz neuer, energieintensiver Technologien sowie der damit verbundenen Lasten. Ein aggregiertes Bild entsteht über die Zusammenführung vieler Vorhersagen, beispielsweise in Form von sogenannten Diffusionsmodellen, die Aussagen über allgemeine Trends und Marktentwicklungen enthalten. Belastbare Projektionen zur lokalen Ausbreitung einzelner Technologien fehlen dabei. Unter anderem unterscheiden sie sich erheblich, beispielsweise aufgrund regional spezifischer sozio-ökonomischer Randbedingungen. Die Netzbetreiber werden im Bereich der Stromversorgung auf der Verteilnetzebene vor entsprechende Herausforderungen gestellt. Bereits in absehbarer Zeit könnten in einigen Städten Herausforderungen auf der Niederspannungsebene durch das gleichzeitige Laden einer vergleichsweise geringen Anzahl von Elektrofahrzeugen mit 22 kW auftreten. Darüber hinaus lassen sich mit einer zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung komplexe Wechselwirkungen zwischen sozio-technischen Systemen, den damit verbundenen Kaskaden und deren Auswirkung auf die Versorgungssicherheit kaum noch vorhersehen.

Der Umgang mit Risiken und Unsicherheiten: Robustheit und Resilienz

Energiesystemplanung: Was tun, wenn Analysen zukünftiger Risiken keine valide Entscheidungsgrundlage mehr bieten?

Die Unsicherheiten bei den zuvor genannten Randbedingungen – Klima, Digitalisierung und technologischer Fortschritt – sind zu groß, um zukünftige Risiken bei der Energieversorgung komplexer sozio-technischer Systeme zuverlässig und sinnvoll abzuschätzen. Die kumulative Natur der Unsicherheiten erschwert jede ernsthafte Anwendung probabilistischer Ansätze der Sicherheits- und Risikobewertung, um geeignete Maßnahmen für die Erhaltung und Verbesserung von Zuverlässigkeit und Resilienz eines künftigen Energiesystems zu identifizieren.

Einige Unsicherheiten werden voraussichtlich im Laufe der Zeit durch die Weiterentwicklung wissenschaftlicher Modelle reduziert, wobei gezielte Investitionen die Robustheit eines nachhaltigen Energiesystems erhöhen können. Eine konsequente Umsetzung Robustheit steigernder Maßnahmen auf der Material-, Komponenten- und Infrastrukturebene würde den direkten Auswirkungen einiger Stressoren entgegenwirken. Verbleibende Unsicherheiten, die sich beispielsweise auf mit krimineller Absicht verursachte Schäden und Störungen (z. B. Cyber-Attacken) oder auf Fluktuationen bei der Bereitstellung erneuerbarer Energie beziehen, blieben nach wie vor groß.

Auch das KIT forscht in seinem Institut für Informationssicherheit und Verlässlichkeit KASTEL an Maßnahmen zur Cybersicherheit von Energiesystemen. Es zeigt sich: Trotz hoher Investitionen in Cybersicherheitsmaßnahmen und in eine scheinbar ausreichende Dimensionierung des Energiesystems bleiben Unsicherheiten bestehen. Auf Grund dieser verbleibenden Unsicherheiten wird es immer schwieriger, bei bestimmten Risiko-Kategorien eine scharfe Unterscheidung zwischen den sogenannten *High Probability Low Impact* (HPLI) und *Low Probability High Impact* (LPHI) Risiken zu treffen. In der Regel sind HPLI-Risiken Gegenstand von Zuverlässigkeits-Betrachtungen, während LPHI-Risiken in den Bereich der Resilienz-Forschung fallen.

Resilienzstrategien sind integraler Bestandteil von Transformationspfaden. Wäre dies nicht der Fall, wären die Systeme durch *High Probability High Impact* Risiken gefährdet, was zu kostspieligen Patchwork-Lösungen führen könnte. Darum sind eine systemische, integrierte Betrachtung und eine Zusammenführung von Bereichen der Zuverlässigkeits- und Resilienz-Forschung notwendig.

Resilienz: Robustheit und Rückkehr zu einem stabilen Zustand

Die kommunale oder urbane Resilienz ist mehrdimensional und hängt nicht allein von der physischen Belastbarkeit einzelner Versorgungssysteme innerhalb ihrer eigenen Grenzen ab. Sie hängt auch von der Frage ab, ob die

Grundversorgung verschiedener kritischer Dienste in einer kritischen Phase aufrechterhalten werden kann oder ob es stattdessen zu einem Blackout kommt. Was eine Stadtbevölkerung als akzeptable Grundversorgung wahrnimmt, ist dabei nicht per se klar. Sicher ist jedoch, dass mit fortschreitender Digitalisierung und Automatisierung die Bedeutung einer kontinuierlichen Energieversorgung immer wichtiger wird.

Bisher geht der Begriff Resilienz im Kontext von Versorgungsinfrastrukturen meist nicht über die entsprechend der Infrastruktur definierten Systemgrenzen hinaus. Aktuelle Forschung am KIT zum Thema *Smart Resilience Engineering* im Forschungsprogramm *Energy System Design* der Helmholtz-Gemeinschaft beschäftigt sich mit Fragen der sogenannten operationellen Resilienz zukünftiger Smart Grids. Dabei wird Grid-Design im Zusammenhang mit Netzbetrieb und dem Umgang mit kritischen Netzzuständen untersucht. Wir adaptieren dabei eine Definition von Resilienz aus der Ökosystemforschung: *Resilienz ist die intrinsische Fähigkeit eines Systems, kritische Situationen zu antizipieren, während anhaltender Belastung einen dynamisch stabilen Zustand aufrechtzuerhalten oder zu diesem möglichst schnell zurückzukehren.*

Üblicherweise sind Resilienz steigernde Maßnahmen durch wohldefinierte und nicht mehr zu akzeptierende Risiken motiviert – in anderen Worten LPHI Risiken. Das können beispielsweise wiederkehrende Naturereignisse wie Dürren oder andere Wetterextreme sein, die eine solide Grundlage für spezifische Härtingsmaßnahmen bilden: eine Erhöhung der Robustheit von Materialien und Komponenten oder die Entwicklung effizienter Ressourceneinsatz- und Resilienz-Strategien zur Abmilderung ihrer Folgen.

Angesichts der oben genannten Unsicherheiten hinsichtlich *High Impact* Risiken steigt das Potenzial, dass Systeme kritischer Infrastrukturen zunehmend durch Störungen beeinträchtigt und beispielsweise die *Performance* von Smart Cities oder die Versorgungssicherheit im Allgemeinen leiden werden. Vor diesem Hintergrund sind innovative Konzepte zu Netzdesign und Netzmanagement dringend notwendig, um ein smartes, urban resilientes und adaptives Energiesystem aufzubauen. Ein operationell resilientes, anpassungsfähiges, agiles und smartes Versorgungssystem, das auf *High Impact* Risiken vorbereitet ist, kann zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit urban resiliente Entscheidungen zur Energieverteilung treffen und damit Kaskaden und Blackouts vermeiden.

Smart Resilient Grid Design: Lose Kopplung von Energiesystemen und Verteilnetzen

Die Stärkung der Resilienz ist nicht nur eine Frage der technologischen Innovation auf Komponentenebene. Sie ist auch eine Frage des Systemdesigns und der Identifizierung geeigneter Muster für die Integration erneuerbarer Erzeugungskapazitäten und Speicher in Verbindung mit der Sektorkopplung auf der Übertragungsnetz-, aber vor allem auf der Verteilnetzebene. Für die

Forschung am KIT ist dabei von Relevanz, dass ein *lose gekoppeltes* Energiesystem durch einen systematischen Einsatz von sogenannten Microgrids zu einem resilienteren Energiesystem beitragen kann.

Die Ausgestaltung und Dimensionierung eines Microgrids hängt, vereinfacht gesagt, von der Wirtschaftlichkeit des lokalen Einsatzes erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen, den Lastprofilen der im Microgrid befindlichen Verbraucher und der maximal zu erwartenden Dauer einer autarken Energieversorgung ab. Die Berücksichtigung weiterer sozio-ökonomischer Kriterien, wie beispielsweise die Kritikalität von Lasten, kann auf der Verteilnetzebene für eine strukturierte Implementierung von Microgrids herangezogen werden, um einen systematischen Schutz kritischer Infrastrukturen zu ermöglichen und die Negativfolgen für eine urbane Bevölkerung zu minimieren. So gesehen kann ein Microgrid als eingebaute Redundanz im Energiesystem betrachtet werden: Abgesteckte Zonen im Verteilnetz wären aufgrund lokaler Ressourcen in der Lage, für eine gewisse Zeit energieautark zu sein und in den sogenannten Inselbetrieb zu wechseln. Microgrids könnten zudem zur Stabilisierung des Energiesystems eingesetzt werden, indem sie die kaskadenartige Ausbreitung von lokalen Störungen oder Schad-Software verhindern. Diese Betrachtung offenbart viele Freiheitsgrade bei der Planung der Netztopologie, der internen Konfiguration von Microgrids, der Integration von Energietechnologien, der Auslegung von Smart-Metering-Infrastrukturen oder beim Microgrid-Clustering von Verteilnetzen. Letztendlich bestimmt die Auslegung eines Energiesystems das Spektrum resilienter Managementoptionen maßgeblich mit.

Resilienz und Zuverlässigkeit: Autonomes Management zur Erhöhung der Elastizität – lassen sich Blackouts vermeiden?

Stromengpässe oder ein überlastetes Netz können heute zu großflächigen Blackouts mit dramatischen Konsequenzen für die Bevölkerung führen. Im Fall von Versorgungsengpässen wird nach aktuellem Stand der Technik durch den Übertragungsnetzbetreiber in bestimmten Fällen der *kontrollierte Lastabwurf* veranlasst. Im Rahmen dieser auch *Rolling Blackouts* genannten Prozedur werden jeweils ähnlich große Versorgungsgebiete nacheinander vom Netz genommen, um einen größeren Blackout zu vermeiden. Viel diskutierte Konzepte des *Demand Side Managements* stoßen darüber hinaus in bestimmten kritischen Situation an ihre Grenzen; beispielsweise dann, wenn es kurzfristig ein unerwartetes, konvergentes Verhalten von sehr vielen Verbrauchern gibt. Marktversagen oder sozio-ökonomisch unfaire Versorgungsmuster könnten die Folge sein.

Ein aktueller Gegenstand der systemischen Resilienzforschung ist vor diesem Hintergrund die Frage nach einem anpassungsfähigen und elastischen Versorgungsmanagement zum Umgang mit kritischen Netzzuständen mittels smarter Technologien. Ihr Einsatz ermöglicht neue, kohärente Kommunikationsstrukturen zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern unter Einbe-

ziehung der Verbraucher. In diesem Zusammenhang sind Smart Grid Technologien als Chance zu sehen. Neue, smarte Formen der automatisierten und integrierten Ressourcen- und Resilienzplanung könnten in unserem Beispiel das grobe Verfahren der *Rolling Blackouts* ersetzen und Kaskadeneffekte auch innerhalb urbaner Systeme verhindern.

Hilft künstliche Intelligenz beim autonomen und resilienten Management?

Der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) wird auf verschiedenen Ebenen von Planung und Management zuverlässiger und resilienter Energiesysteme eine entscheidende Rolle spielen. Gleichzeitig leistet KI bei Fragen zur Integration und Dimensionierung regenerativer Erzeugungsanlagen und Speicher oder der Gestaltung von Verteil- und Übertragungsnetzen wichtige Beiträge. Kurz- oder mittelfristige Erzeugungspotentiale auf regionaler, nationaler oder europäischer Ebene und Lastprognosen können mittels KI vorhergesagt und die damit verbundenen Unsicherheiten abgebildet und reduziert werden. Dadurch wird KI wesentlich zur Entscheidungsfindung beitragen können.

Vielteilige, stark vernetzte, auf erneuerbare Energien bauende Energiesysteme werden kaum noch manuell regelbar sein. Daher werden Schaltvorgänge und Steuerungen von Leistungselektronik in komplexen Smart Grids beispielsweise durch Multi-Agenten Systeme oder durch zentrale Steuer-Algorithmen autonom durchgeführt werden. Entscheidend dabei ist die Verfügbarkeit von system-relevanten Daten als Entscheidungsgrundlage. Liegen diese aufgrund von Störungen nicht vor oder sind diese mit großen Unsicherheiten behaftet, muss ein autonomes Management weiterhin in der Lage sein, robuste Entscheidungen zu treffen. Dies gilt auch für den Fall, dass abrupte Störungen sowohl im Informations- und Kommunikations- als auch im Energienetz auftreten. Smarte Formen der KI-basierten Echtzeit-Lageerkennung, Frühwarnung und Entscheidungsfindung unter Unsicherheit sind daher entscheidend für eine erhöhte Anpassungsfähigkeit gegenüber unerwarteten Ereignissen und damit wichtige Attribute zuverlässiger und resilienter Smart Grids.

Welchen Beitrag leisten das KIT und die Helmholtz Gemeinschaft?

Im Zuge der Energiewende finden umfangreiche Investitionen in den Netzausbau statt. Gleichzeitig werden weitreichende Resilienz-Bewertungen bisher kaum durchgeführt. Eine Integration solcher Analysen und damit eine Verbesserung der Resilienz kann durch eine gründliche Untersuchung netzplanerischer Freiheitsgrade realisiert werden – was nicht notwendigerweise mit einer Erhöhung der Investitionskosten verbunden ist.

Im Rahmen des Helmholtz-Programms *Energy System Design* werden systemische Resilienz-Ansätze für den Umgang mit den oben diskutierten Unsicherheiten entwickelt. Die neuen Konzepte basieren dabei auf einer

integrierten Betrachtung von Ansätzen aus der Zuverlässigkeits- und Resilienz-Forschung. Lose gekoppelte, auf Microgrid-Clustern und elastischen Versorgungskonzepten basierende Energiesysteme, die sowohl kohärente Kommunikations- und Informationsinfrastrukturen nutzen als auch die Flexibilität und Kritikalität von Endverbrauchern miteinbeziehen, stellen hierbei vielversprechende und ganzheitliche Ansätze dar.

Robuste Lösungen zum Umgang mit unvorhergesehenen, kritischen Situationen und eine autonome Anpassungsfähigkeit moderner Smart Grids erfordern die Einbeziehung systemischer Resilienz als einen festen Bestandteil der Transformation von Energiesystemen – nur so kann die Energiewende zu einer langfristigen Erfolgsgeschichte werden.