

**Ermittlung und Bewertung des
Energie- und Instandhaltungsaufwandes
von Bauteilen und Komponenten
in der Nutzungsphase von Gebäuden –
dargestellt am Beispiel
von Personenaufzügen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wi.-Ing. Matthias Unholzer

Karlsruhe 2018

Tag der mündlichen Prüfung:	17. Dezember 2018
Referent:	Prof. Dr. Thomas Lützkendorf
Korreferent:	Prof. Dr. David Lorenz

Kurzfassung

Der Energie- und Instandhaltungsaufwand der Technischen Gebäudeausrüstung fließt mit zunehmenden Anforderungen an die Datenqualität in Lebenszyklusbetrachtungen von Gebäuden ein, wie z.B. die Lebenszykluskostenrechnung oder die Ökobilanzierung.

In der Dissertation wird am Beispiel von Personenaufzügen gezeigt, dass zur sicheren Ermittlung und Bewertung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes der Technischen Gebäudeausrüstung von Gebäuden eine detaillierte Betrachtung der in den jeweiligen Gewerken verbauten Bauteile und Komponenten erforderlich ist.

Zur Überwindung von in der Praxis häufig angewandten Schätzmethoden, die Beobachtungen aus zurückliegenden Bauprojekten aggregiert und pauschalisiert auf geplante Neubau- oder Modernisierungsprojekte übertragen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Planungshilfsmittel entwickelt, das dem Anwender die Auswahl einer geeigneten Instandhaltungsstrategie bestehender Personenaufzüge und die Ermittlung des damit verbundenen Aufwandes ermöglicht. Es werden dabei sowohl die rein technischen und teils altersabhängigen Eigenschaften eines bestehenden Personenaufzugs, die zur Auswahl bestimmter Komponenten und Maßnahmen zur Instandhaltung führen, als auch ökonomische, ökologische und soziale Aspekte mit berücksichtigt.

Neben den Erkenntnissen aus einer Analyse bereits verfügbarer Forschungs- und Richtlinienarbeiten fließen in das Planungshilfsmittel zur Ermittlung des Energieaufwandes von Personenaufzügen in der Nutzungsphase die Ergebnisse einer vom Autor zusammen mit einem Industriepartner durchgeführten Messkam-

pagne ein. Entwickelt wurde dabei u.a. eine Vorgehensweise zur Hochrechnung des innerhalb einer Woche gemessenen Energieverbrauchs auf den Energiebedarf eines Betriebsjahres.

Abschließend wird festgestellt, dass zusammen mit den in dieser Arbeit entwickelten Verfahren geeignete Möglichkeiten zur sicheren Ermittlung und Bewertung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes existieren. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht hingegen zur weiteren Differenzierung von bauteil- und komponentenscharfen Instandhaltungsdaten. Dazu wird empfohlen, Hersteller und Dienstleister stärker einzubeziehen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xii
Abkürzungsverzeichnis.....	xvi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Personenaufzüge in Deutschland – ein Überblick.....	4
1.3 Zielsetzung.....	6
1.4 Motivation und Erfahrungshintergrund.....	7
1.5 Herangehensweise und Aufbau der Arbeit	8
2 Der Betrachtungsgegenstand: Personenaufzug.....	13
2.1 Abgrenzung der Systemebenen.....	13
2.2 Dienstgüte von Personenaufzügen	15
2.3 Historische und technische Einteilung der Technologien und Systemvarianten im Bestand	16
3 Energieaufwand von Personenaufzügen in der Nutzungsphase	25
3.1 Grundlagen zu Planungskennwerten.....	25
3.2 Forschungsvorhaben Dritter zur Ermittlung und Beeinflussung des Energiebedarfs von Aufzügen	28
3.2.1 Projekt S.A.F.E.	29
3.2.2 E4-Projekt	31
3.2.3 Projekt zur Standby-Optimierung.....	34
3.3 Normen und Richtlinien zum Energiebedarf von Aufzügen – aktueller Stand.....	36
3.3.1 VDI 4707	36

3.3.1.1	Blatt 1.....	36
3.3.1.2	Blatt 2.....	41
3.3.2	DIN EN ISO 25745.....	44
3.3.2.1	Teil 1.....	44
3.3.2.2	Teil 2.....	46
3.3.3	SIA 380/4.....	48
3.3.4	VDI 4707 Blatt 1 vereinfachte Variante	52
3.3.5	Zwischenfazit.....	56
3.4	Analyse des realen Gebäudebetriebs	58
3.4.1	Wochenmessungen	58
3.4.1.1	Ausführliches Verfahren (Kennwertebaukasten)	58
3.4.1.2	Vereinfachtes Verfahren (ohne Kennwertebaukasten).....	60
3.4.2	Auswertung von Produktdokumentationen.....	63
3.4.3	Etablierte Verfahren der Verkehrsplanung.....	63
3.4.3.1	Umlaufzeitkalkulation (up peak und general analysis).....	64
3.4.3.2	Simulation der Verkehrsströme	70
3.5	Messkampagne – Konzept und Ergebnisse	74
3.5.1	Zieldefinition und Analysemethode	74
3.5.2	Messkonzept	75
3.5.3	Auswertung	78
3.6	Bereitstellung von Energiekennwerten aus der Messkampagne.....	93
4	Instandhaltungskosten von Personenaufzügen.....	99
4.1	Stand nationaler und internationaler Normungs- und Richtlinienarbeit.....	101
4.1.1	DIN 13015	104
4.1.2	VDI 3810	107

4.1.3	VDMA 24186.....	107
4.1.4	AMEV.....	108
4.1.5	LCC Handbuch (CRB)	109
4.2	Besonderheiten der Instandhaltung von Aufzügen..	111
4.2.1	Instandhaltungsstrategien.....	111
4.2.2	Verträge zur Umsetzung von Instandhaltungsstrategien.....	115
4.2.3	Qualität der Instandhaltung.....	118
4.3	Aufzugsspezifische Kostendatenstruktur	121
4.3.1	Relevante Kostengruppen.....	122
4.3.2	Bereitstellung von Kostendaten.....	124
4.3.2.1	Baukosten auf Basis der Herstellerangaben von Systemen und Komponenten.....	124
4.3.2.2	Baukosten auf Basis abgerechneter Projekte von Betreibern und Bestandshaltern.....	125
4.3.2.3	Wartungskosten auf Basis der Angaben von Instandhaltungsdienstleistern.....	128
5	Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus.....	131
5.1	Lebenszyklusmodelle.....	132
5.1.1	Zusammenhänge zwischen den Lebenszyklusmodellen von Gebäuden und Aufzügen im Bestand	137
5.2	Methodischer Rahmen der LZK.....	139
5.2.1	Stand nationaler und internationaler Normungs- und Richtlinienarbeit	140
5.2.1.1	VDI 2884.....	140
5.2.1.2	DIN 276-1.....	142
5.2.1.3	DIN 18960	143
5.2.1.4	Geislinger Konvention.....	145
5.2.1.5	GEFMA 220 und 200	146
5.2.1.6	ISO 15686-5.....	147

5.2.1.7	ÖNORM (Österreich).....	149
5.2.1.8	SN und SIA (Schweiz)	153
5.2.2	Zusammenfassung und Zwischenfazit	156
6	Entwicklung einer Systematik zur Entscheidungsfindung im Anlagenbestand	159
6.1	Entscheidungsfindung auf Basis des Ausgangszustandes von Aufzügen	159
6.1.1	Unschärfe Logik zur Entscheidungsfindung bei mehrteiligen und komplexen Komponenten.....	160
6.1.1.1	Methodischer Rahmen der Fuzzy-Logic.....	161
6.1.1.1.1	Fuzzifikation.....	161
6.1.1.1.2	Regelwerk und Inferenz.....	163
6.1.1.1.3	Defuzzifikation	164
6.1.2	Konzept für ein Fuzzy-System zur Instandhaltungsplanung von Personenaufzügen	164
6.1.2.1	Darstellung der Zusammenhänge in Blockdiagrammen.....	165
6.1.2.2	Linguistische Variablen und Zugehörigkeitsfunktionen.....	166
6.1.2.3	Inferenz und Defuzzifikation.....	172
6.1.3	Entscheidungsfindung nach eindeutigen Regeln bei einteiligen Komponenten.....	174
6.1.3.1	Dynamische Anpassung von Referenzlebensdauern (Faktorenmethode)	174
6.1.3.2	Statische Berücksichtigung von Referenzlebensdauern.....	176
7	Bewertung von Instandhaltungsstrategien.....	179
7.1	Ökonomische Bewertung mit Nutzung der Annuitätenmethode.....	179

7.1.1	VDI 2067 – Anwendung bei Aufzügen.....	180
7.2	Nutzenbewertung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten	182
8	Entwicklung eines Planungshilfsmittels	185
8.1	Modularer Aufbau des Planungshilfsmittels	185
8.1.1	Erfassungsmodul	187
8.1.2	Fuzzy-, VS- und LD-Modul.....	188
8.1.3	Instandhaltungs- und Energiekostenmodul	189
8.1.4	LCC-Modul.....	191
8.1.5	Bewertungsmodul	192
9	Anwendungsbeispiele.....	201
9.1	Anwendung des Planungshilfsmittels an real existierenden Anlagen	201
9.1.1	Zweiergruppe im Nichtwohngebäude mit Konferenzzentrum	201
9.1.1.1	Beschreibung der Anlage und der Nutzungsrandbedingungen (Erfassungsmodul).....	202
9.1.1.2	Anwendung der Fuzzy-Logic für Steuerung und Regelung (Fuzzymodul).....	209
9.1.1.3	Bestimmung des Ersatzzeitpunktes einteiliger Komponenten (VS- und LD-Modul)	211
9.1.1.4	Zusammenfassung der möglichen Instandhaltungsstrategien.....	213
9.1.1.5	Ermittlung der Instandhaltungskosten (Instandhaltungskostenmodul).....	216
9.1.1.6	Ermittlung der Energiekosten im Betrieb (Energiekostenmodul)	216
9.1.1.7	Berechnung der Annuitäten (LCC-Modul)	217
9.1.1.8	Finale Entscheidungsempfehlung (Bewertungsmodul)	220

9.1.2	Einzelantrieb im gemischt genutzten Gebäude (Wohnungen und Büros).....	223
9.1.2.1	Beschreibung der Anlage und der Nutzungsbedingungen (Erfassungsmodul).....	223
9.1.2.2	Anwendung der Fuzzy-Logic für Steuerung und Regelung (Fuzzymodul).....	226
9.1.2.3	Bestimmung des Ersatzzeitpunktes einteiliger Komponenten (VS- und LD-Modul).....	227
9.1.2.4	Zusammenfassung der möglichen Instandhaltungsstrategien.....	229
9.1.2.5	Ermittlung der Instandhaltungskosten (Instandhaltungskostenmodul).....	230
9.1.2.6	Ermittlung der Energiekosten im Betrieb (Energiekostenmodul).....	230
9.1.2.7	Berechnung der Annuitäten (LCC-Modul)	231
9.1.2.8	Finale Entscheidungsempfehlung (Bewertungsmodul).....	233
9.2	Zusammenfassung und kritische Betrachtung	236
10	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	241
	Literaturangaben	245
	Anhang A: Kennwertebaukasten	259
	Anhang B: Regelbasis.....	260
	Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis.....	263
	Anhang D: Systemabgrenzung.....	272

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Struktur der vorliegenden Arbeit.....	10
Abbildung 2.1: Gegenseitige Anforderungen der Systemebenen Gebäude, Aufzug und Komponenten.....	14
Abbildung 2.2: Elektrisch angetriebener Treibscheibenaufzug mit getriebelem Antrieb und Aufhängung 1:1	20
Abbildung 3.1: Verteilung der ca. 650.000 Aufzüge im Gebäudebestand in Deutschland	33
Abbildung 3.2: Energieverbräuche in GWh nach Gebäudetyp mit Methode 2	33
Abbildung 3.3: Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen von 0 bis 6 Personen innerhalb von 10 Sekunden	73
Abbildung 3.4: Prinzipschaltbild zur Messung des Energieverbrauchs bei Aufzügen / Schnittstelle Aufzug-Gebäude ..	77
Abbildung 3.5: Häufigkeiten der abhängigen metrischen Variablen (JVVDI und JVWM in kWh/Jahr, QVDIWM und ASTVDI in %).....	84
Abbildung 3.6: Häufigkeiten der unabhängigen metrischen Variablen	85
Abbildung 3.7: Häufigkeiten der Größenordnungen von LASTBY und VDIREF (Eingangsgrößen) zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs nach VDI 4707	86
Abbildung 3.8: Häufigkeiten der Größenordnungen täglichen Energieverbräuche zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs auf Basis der Wochenmessungen (pro Wochentag in Wh)	87
Abbildung 3.9: Häufigkeiten der kategorialen unabhängigen Variablen	88
Abbildung 3.10: Abhängige vs. kategoriale unabhängige Variablen (JVVDI und JVWM in kWh, QVDIWM und ASTVDI in %).....	89
Abbildung 3.11: Verbrauch der Referenzfahrt nach VDI in Abhängigkeit der Ausführung von Antrieb und Regelung (in Wh) ..	91
Abbildung 3.12: Anteile der installierten Ausführungen von Antrieb und Regelung innerhalb der Nutzungskategorien.....	91

Abbildung 3.13: Förderhöhen (in m), Tragfähigkeiten (in kg) und Nenngeschwindigkeiten (in m/s) vs. Gebäudetyp und Nutzungs- kategorien	93
Abbildung 4.1: Unterteilung der Instandhaltung nach DIN 31051	100
Abbildung 4.2: Gesetzliche und normative Vorgaben für die Instandhaltung von Aufzügen	102
Abbildung 4.3: Abgrenzung des Instandhaltungsbegriffs zwischen DIN 31051 und DIN 13015.....	105
Abbildung 4.4: Vergleich Komplettmodernisierung und schrittweise Modernisierung	113
Abbildung 4.5: Planung von Stillstandszeiten in Abhängigkeit der gewählten Instandhaltungsstrategie	114
Abbildung 4.6: Kritikalitätsmatrix nach DIN EN 13306.....	117
Abbildung 4.7: Zusammenhänge zwischen der Bestimmung von Ersatzzeitpunkten in Abhängigkeit der Inspektionshäufigkeit	120
Abbildung 4.8: Abgrenzung DIN 276 / DIN 18960 im Kontext von Aufzügen	121
Abbildung 5.1: Lebenszykluskosten als ein Bestandteil einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung.....	132
Abbildung 5.2: GEFMA-Lebenszyklusmodell	133
Abbildung 5.3: Komplexität des Immobilienlebenszyklus – mehrdimensionale Darstellung.....	134
Abbildung 5.4: Lebensdauern des Aufzugs und seiner n Komponenten (Bauteile nicht dargestellt) mit Einordnung in den gebäudebezogenen Lebenszyklus.....	139
Abbildung 5.5: LCC und WLC nach ISO 15686-5	149
Abbildung 5.6: Gliederungssystem der ÖNORM B 1801-1:2009....	151
Abbildung 5.7: Lebenszykluskosten mit Abschreibung und Finanzierung nach ÖNORM B 1801-4:2014	153
Abbildung 5.8: Umfang der Lebenszykluskosten aus schweizerischer Sicht	155

Abbildung 6.1: Blockdiagramm des Fuzzy-Systems zur Unterstützung von Instandhaltungsentscheidungen bei Aufzugsteuerungen.....	165
Abbildung 6.2: Zugehörigkeitsfunktionen für das Alter von Steuerung und Regelung	168
Abbildung 6.3: Zugehörigkeitsfunktionen für die Art der Regelung	168
Abbildung 6.4: Zugehörigkeitsfunktionen für den Verfügbarkeitsanspruch – ausgedrückt in der maximal zulässigen Anzahl von Störungen pro Jahr	169
Abbildung 6.5: Zugehörigkeitsfunktionen für die tatsächliche Anzahl von Störungen pro Jahr	169
Abbildung 6.6: Zugehörigkeitsfunktionen für die Anzahl der Fahrten pro Tag.....	170
Abbildung 6.7: Zugehörigkeitsfunktionen für den anzunehmenden Staubanfall in Abhängigkeit der Umgebung bzw. dem Standort des Gebäudes	170
Abbildung 6.8: Zugehörigkeitsfunktionen für die Höhe der Umgebungstemperatur im Schacht und im Maschinenraum	171
Abbildung 6.9: Zugehörigkeitsfunktionen für die Situation der Ersatzteilversorgung, betrifft herstellerspezifische Ersatzteile, die nicht auf dem freien Markt verfügbar oder durch solche ersetzbar sind.....	171
Abbildung 6.10: Zugehörigkeitsfunktionen für die Situation der Ersatzteilversorgung, betrifft herstellerspezifische Ersatzteile, die nicht auf dem freien Markt verfügbar oder durch solche ersetzbar sind.....	172
Abbildung 7.1: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit zusammen mit den Querschnittsqualitäten.....	184
Abbildung 8.1: Übersicht Planungshilfsmittel.....	186
Abbildung 8.2: Zusammenhänge im Bewertungsmodul.....	192
Abbildung 0.1: Schnittstelle Aufzug-Gebäude aus Lüftungstechnischer Sicht.....	276

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technologiematrix Neuanlagen (ab 2010, Epoche A)	21
Tabelle 2: Technologiematrix Bestandsanlagen original (von vor 1960 bis 2010, Epochen B bis H)	22
Tabelle 3: Technologiematrix Bestandsanlagen modernisiert (von vor 1960 bis 2010, Epochen B bis H)	23
Tabelle 4: Energieverbrauch typischer Seilaufzüge mit frequenzgeregelten, getriebelosen Antrieben mit PM-Motoren	30
Tabelle 5: geschätzter jährlicher Energiebedarf in GWh von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland	32
Tabelle 6: Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1	37
Tabelle 7: Lastkollektiv nach VDI 4707 Blatt 1	38
Tabelle 8: Leistungsaufnahmen im Stillstand in Klassen aufgeteilt nach VDI 4707 Blatt 1	39
Tabelle 9: Energiebedarf für das Fahren in Klassen aufgeteilt nach VDI 4707 Blatt 1	39
Tabelle 10: Energieeffizienzklassen nach VDI 4707 Blatt 1 eines Aufzugs mit $Q = 630 \text{ kg}$ und $v = 1 \text{ m/s}$	41
Tabelle 11: Gewichtung der Betriebsmodi zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs nach VDI 4707 Blatt 1	42
Tabelle 12: Technologiefaktoren nach VDI 4707 Blatt 1	44
Tabelle 13: Nutzungskategorien für Aufzüge nach DIN EN ISO 25745-2	47
Tabelle 14: Zeitverhältnisse der Stillstandszeiten nach DIN EN ISO 25745-2	48
Tabelle 15: Wirkungsgrad des Antriebs	50
Tabelle 16: Wirkungsgrad der Regelung	51
Tabelle 17: Wirkungsgrad der Rekuperation	51
Tabelle 18: Geschwindigkeit	51
Tabelle 19: Anzahl der Fahrten pro Jahr je nach Benutzung	52
Tabelle 20: Wesentliche Eigenschaften und Inhalte relevanter Normen und Richtlinien zur Ermittlung des Energiebedarfs von	

Aufzügen im Vergleich zu den in dieser Arbeit entwickelten Methoden	57
Tabelle 21: Abkürzungen der metrischen Variablen.....	79
Tabelle 22: Abkürzungen der kategorialen Variablen	80
Tabelle 23: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen	81
Tabelle 24: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen	82
Tabelle 25: Zusammenfassung der metrischen Daten im reduzierten Datensatz	83
Tabelle 26: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen im reduzierten Datensatz.....	83
Tabelle 27: Energiekennwerte in kWh pro Jahr für einen Aufzug in Abhängigkeit der Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1	94
Tabelle 28: Prüfpunkte für Instandhaltungsanweisungen	105
Tabelle 29: Erfahrungswerte für Wartungsintervalle nach VDI-Richtlinie 3810	107
Tabelle 30: Wartungstätigkeiten nach VDMA-Einheitsblatt 24186-5.....	108
Tabelle 31: eindeutige Nummerierung der Komponenten innerhalb der Komponentengruppen M, F und S.....	123
Tabelle 32: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet....	126
Tabelle 33: Baukostenzuschläge Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet.....	127
Tabelle 34: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet....	128
Tabelle 35: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet....	128
Tabelle 36: Beispielhafte Wartungskosten für einen Treibscheibenaufzug.....	129
Tabelle 37: Beispielhafte Kosten für Zusatzleistungen und Notrufweiterleitung.....	130
Tabelle 38: Phasen, Prozesse und Datentypen in Anlehnung an DIN EN 15804.....	136

Tabelle 39: Zusammenfassung der Verursacher von Lebenszykluskosten und der jeweiligen geeigneten Datenquellen	141
Tabelle 40: Wesentliche Eigenschaften und Inhalte relevanter Normen und Richtlinien mit Bezug zur Lebenszykluskostenrechnung.....	157
Tabelle 41: Technische Lebensdauern der Komponenten eines Aufzuges.....	176
Tabelle 42: Jährlicher Aufwand für Wartung und Inspektion eines Aufzugs mit bis zu sechs Haltestellen, bezogen auf die ursprünglichen Herstellkosten.....	181
Tabelle 43: Spezifische Umsetzungsmöglichkeiten beim Aufzug zum Erreichen von Schutzzielen im Rahmen der Aspekte der Nachhaltigkeit	183
Tabelle 44: Gewichtete Bewertung für verschiedene Varianten, hier im Beispiel zwei Varianten	193
Tabelle 45: Bewertungsskala zum Energieverbrauch im Betrieb .	195
Tabelle 46: Bewertungsskala zur Vermeidung von Schmiermitteln	195
Tabelle 47: Bewertungsskala zur Vermeidung des Austauschs von Komponenten zur Schonung von Ressourcen	195
Tabelle 48: Bewertungsskala zu LCC	196
Tabelle 49: Bewertungsskala zur Vermiet- und Vermarktbarkeit	196
Tabelle 50: Bewertungsskala zur Sicherheit	196
Tabelle 51: Bewertungsskala zur Barrierefreiheit	197
Tabelle 52: Bewertungsskala zur Verfügbarkeit	197
Tabelle 53: Bewertungsskala zur Wartungsfreundlichkeit	197
Tabelle 54: Bewertungsskala zum Fahrkomfort	198
Tabelle 55: Bewertungsskala zu Stillstandszeiten durch Modernisierung	198
Tabelle 56: Bewertungsskala zu Stillstandszeiten durch Wartung	198
Tabelle 57: Bewertungsskala zur Information der Nutzer	199
Tabelle 58: Technische Daten der betrachteten Aufzüge	205
Tabelle 59: Zusammenfassung der Fuzzifikation aus Schritt 1.....	211

Tabelle 60: Barwerte der kapitalgebundenen Kosten (Ersatzinvestitionen) ohne Berücksichtigung des Restwertes nach VDI 2067 Blatt 1	218
Tabelle 61: Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (Energie, Wartung, Notruf) VDI 2067 Blatt 1	219
Tabelle 62: Gewichtete Bewertung der beiden Varianten	220
Tabelle 63: Technische Daten des betrachteten Aufzugs	225
Tabelle 64: Zusammenfassung der Fuzzifikation aus Schritt 1	227
Tabelle 65: Barwerte der kapitalgebundenen Kosten (Ersatzinvestitionen) ohne Berücksichtigung des Restwertes nach VDI 2067 Blatt 1	232
Tabelle 66: Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (Energie, Wartung, Notruf) VDI 2067 Blatt 1	232
Tabelle 67: Gewichtete Bewertung der beiden Varianten	235

Abkürzungsverzeichnis

AMEV	Arbeitskreis Maschinen und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
BGF	Bruttogrundfläche nach DIN 277-1
BKI	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (2013 bis 2017)
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (ab 2017)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (bis 2013), Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ab 2013)
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen des Bundes
BetrKV	Betriebskostenverordnung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
CAN	Controller Area Network (Bus-System)
CRB	Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierungen
DCP	Drive Control and Position (serielle Schnittstelle zur Ansteuerung von Reglern)
EG	Erdgeschoss

EnEV	Energieeinsparverordnung
EPD	Environment Product Declaration
EPBD	EU-Gebäuderichtlinie
GEFMA	German Facility Management Association
GST	Gruppensteuerung
FV	Polumschaltbarer Antrieb ohne Regelung
FM	Facility Management
FST	Feldbus-Steuerung
HC	handling capacity (Förderleistung)
INT	Intervall
KG	Kostengruppe
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LBO	Landesbauordnung
LBOAV	Ausführungsverordnung zur Landesbauordnung
LCC	Life Cycle Cost
LON	Local Operating Network (Feldbus-System)
LSV	Leitfaden zur sicheren Verwendung von Personen- und Lastenaufzügen nach dem Stand der Technik
LzK	Lebenszykluskosten

MBO	Musterbauordnung
MRL	Aufzug ohne Maschinenraum (maschinenraumlos)
NGF	Nettogrundfläche nach DIN 277-1-2005
NKG	Nutzungskostengruppe
NRF	Nettoraumfläche (neue Bezeichnung für NGF nach DIN 277-1-2016)
OG	Obergeschoss
PCR	Product Category Rules
RFU	Recommendation for Use
RTT	average round trip time (Umlaufzeit)
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlage
SAFÜ	Schutzeinrichtung gegen Übergeschwindigkeit für den aufwärts fahrenden Fahrkorb (auch als „Fang nach oben“ bezeichnet)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenver- ein
SN	Schweizer Norm
SUBF	Schutzeinrichtung gegen unbeabsichtigte Bewe- gung des Fahrkorbs
T	Betrachtungszeitraum
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
UBA	Umweltbundesamt
UCM	Unintending Car Movement (alternative Bezeichnung für SUBF)
UG	Untergeschoss
USV	Unabhängige Stromversorgung, Ersatzstromversorgung
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
VVVF	Frequenzregelung
VVFF	Spannungsregelung
WLC	Whole Life Cost
ZÜS	Zugelassene Überwachungsstelle

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Immobilien unterscheiden sich von anderen Wirtschaftsgütern u.a. durch eine besonders lange Lebensdauer. [1] Gleichzeitig steigen insbesondere die Anforderungen an die energetische und umweltbezogene Qualität [2] [3], an die Nutzerzufriedenheit [4], an die Flexibilität bei möglichen Umnutzungen und an den barrierefreien Zugang [5]. Die Ermittlung und Bewertung von Bau- und Folgekosten, und damit auch des Energie- und Instandhaltungsaufwandes, erfordert dazu geeignete Hilfsmittel. Eine lebenszyklusorientierte Planung und Analyse von Gebäuden (im Neubau und im Bestand) kann in diesem Zusammenhang die Bewältigung o.g. steigender Anforderungen unterstützen. [6] Der Aufzug ist, sofern vorhanden oder vorgesehen, fester Bestandteil eines Gebäudes (in Kapitel 2 beschrieben) und wird stellvertretend für die Haustechnik als Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit gewählt (Motivation hierzu in Abschnitt 1.2 erläutert); er zählt zu den besonders langlebigen haustechnischen Systemen [7, S. 7], weshalb die oben genannten Anforderungen an das Gesamtgebäude und die damit notwendigen lebenszyklusorientierten Planungen und Entscheidungen unmittelbar auf dieses System übertragbar sind. So ist es insgesamt nachvollziehbar, dass bei der Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen zunehmend lebenszyklusorientierte Auswahlkriterien herangezogen werden. In der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) 2016 Teil A [8] werden zur Bewertung von Angeboten die Berücksichtigung vielseitiger Aspekte, u.a. Qualität, Preis sowie Betriebs- bzw. Folgekosten, als Zuschlagskriterien genannt. Auch bei nichtöffentlichen Ausschreibungen bzw. bei privaten Bauvorhaben, die nicht zwingend auf Basis der VOB durchgeführt werden

müssen, ist eine zunehmende Berücksichtigung von Betriebs- bzw. Folgekosten geplanter Investitionen zu erkennen. [9] Bauprojekte (Neubau- oder Modernisierungsvorhaben), die sich für die Planung oder auch zur späteren Bewertung der Nachhaltigkeit an entsprechenden Systemen¹ orientieren, sind dazu angehalten, die gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus (auch Lebenszykluskosten genannt) zu ermitteln. Derartige Nachhaltigkeitsbewertungssysteme existieren mittlerweile auch für ausgewählte Aspekte in der Nutzungsphase für Gebäude.² Völlig losgelöst von formalen Anforderungen an die Ermittlung von Lebenszykluskosten lassen sich u.a. weitere wichtige Gründe für ihre Betrachtung aufzählen:

- Datenbasis für die Budgetplanung,
- Datenbasis für die Wirtschaftlichkeitsberechnung,
- Voraussetzung für das Kostencontrolling im laufenden Betrieb und damit
- Transparenz bei der Beurteilung von Zahlungsflüssen im Lebenszyklus von Gebäuden.

Die Auseinandersetzung mit Lebenszykluskosten erfolgt dabei sinnvollerweise bereits in frühen Planungsphasen. Erfahrungsgemäß stehen zu diesem Zeitpunkt selten präzise Planungswerte zur Verfügung. Es besteht daher oft die Notwendigkeit, mit Erfahrungswerten aus zurückliegenden Projekten zu arbeiten (z.B. [10] oder [11]), die teilweise aggregiert sind und nicht immer eine präzise Zuordnung zum konkreten Projekt ermöglichen. Aus dieser Situation heraus ergibt sich die Problemstellung, wie die aktuelle Datenlage für Planer, Bauherren und Investoren verbessert werden kann. Die Verbesserung der Datenlage als Zielsetzung

¹ siehe z.B. www.nachhaltigesbauen.de, www.nawoh.de oder www.dgnb.de

² z.B. Modul Nutzen und Betreiben für Bürogebäude im BNB (<https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bb-2013-3/kriterien-bnb-nutzen-und-betreiben-bnb-bb.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2018)

(vgl. Abschnitt 1.3) besteht insbesondere darin, folgende Lücken, die im Umgang mit der Ermittlung und Bewertung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes von Gebäuden auch in anderen Bereichen der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), wie z.B. bei der Wärmeerzeugung oder Raumluftechnik, auftreten können, zu schließen:

- bei der Prognose des Energiebedarfs und damit der Energiekosten durch
 - die Ermittlung und Bereitstellung geeigneter spezifischer Energiekennwerte,
 - eine möglichst zutreffende Vorhersage der Nutzungsintensität und -zeiten,
 - die projekt- und standortspezifische Zuordnung von Energiebezugstarifen sowie
- bei der Prognose des Instandhaltungsbedarfs und damit der Instandhaltungskosten durch
 - die bauteilspezifische Ermittlung und Bereitstellung von Angaben zu notwendigen Inspektions- und Wartungsintervallen,
 - die Ermittlung und Angabe technischer Lebensdauern von Bauteilen für die Bestimmung von Ersatzzeitpunkten,
 - die Erarbeitung von Grundlagen zur Berücksichtigung „versteckter“ Kosten, die zunächst nicht unmittelbar mit dem Bauteil in Verbindung stehen (z.B. Kosten für die Daten- und Sprachübertragung bei Fernüberwachung und -notruf).

Aus den zuvor genannten Punkten ergeben sich somit folgende konkrete Forschungsfragen:

1. Wie geht man mit Lebenszykluskosten auf der Ebene von Bauteilen und Komponenten, d.h. unterhalb der Betrachtungsebene Bauwerk, um?
2. Welche Datenquellen lassen sich dazu erschließen und in geeignete Darstellungsformen, z.B. in Form von Energie- und Kostenkennwerten, überführen?
3. Wie lassen sich die daraus gewonnenen Erkenntnisse bzw. der geschaffene Mehrwert für die Entscheidungsfindung bei der Planung und Durchführung von Bau- und Modernisierungsvorhaben praktisch nutzen?

In der vorliegenden Arbeit werden die zuvor aufgezählten Punkte am Beispiel von Personenaufzügen mit besonderer Berücksichtigung des Anlagenbestandes in Deutschland untersucht. Auf die Hintergründe für die Wahl des Betrachtungsgegenstandes Personenaufzug sei im folgenden Abschnitt kurz eingegangen.

1.2 Personenaufzüge in Deutschland – ein Überblick

Es kann davon ausgegangen werden, dass Mitte 2014 in Deutschland rund 690.000 Aufzüge existierten, davon ca. 584.000 zur Personenbeförderung. Durch Neuinstallationen wächst der Anlagenbestand um rund 2 % jährlich, d.h. bereits 2015 wird die Zahl auf über 700.000 [12, S. 5] angestiegen und ein weiterer Anstieg 2016/2017 zu erwarten sein.³ Die Anzahl der durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) geprüften Anlagen wird im Jahr 2011 auf rund 450.000 Anlagen⁴ geschätzt. [15, S. 104] 2015 ist diese Anzahl einem positiven Trend folgend auf ca. 535.000 Anlagen⁵ angestiegen. Mängelfrei sind davon ca. 39 % bereits vor

³ wird bestätigt durch die aufgrund der 2015 novellierten Betriebssicherheitsverordnung [13] wieder eingeführten Prüfungen vor Inbetriebnahme [14, S. 139]

⁴ ohne Prüfungen vor Inbetriebnahme

⁵ ohne Prüfungen vor Inbetriebnahme

der Prüfung und ca. 43 % danach.⁶ [16, S. 96] Rund die Hälfte der Anlagen ist älter als 20 Jahre und entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Gegenüber 2015 stieg 2016 die Anzahl der durch eine ZÜS geprüften Anlagen um 16.434 auf 550.663 an⁷, wobei der Anteil der mängelfreien Aufzüge auf ca. 42 % (mängelfrei vor Prüfung) und 46 % (mängelfrei nach Prüfung) ebenso anstieg. Dabei täuscht der relativ geringe Anteil von Anlagen mit gefährlichen Mängeln (ca. 0,63 %) darüber hinweg, dass damit rund 3.500 Anlagen in Deutschland Benutzer konkret gefährdet haben. Der restliche, überwiegende Anteil geprüfter Aufzüge zeigte geringe Mängel. [16, S. 96] 2017 blieb bei einer wieder geringfügig gesunkenen Anzahl geprüfter Anlagen (544.156)⁸ der Anteil von Anlagen mit sicherheitserheblichen oder gefährlichen Mängeln auf einem zum Vorjahr vergleichbaren Niveau. [14, S. 140]

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Treibscheibenaufzüge betrachtet, weil der Anteil der Installationen mit hydraulischem Antrieb in den vergangenen Jahren sowohl im Bestand als auch bei der Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen zunehmend an Bedeutung verlor. Nach VDMA-Auftragsstatistik ist der Anteil neu installierter hydraulischer Anlagen von ca. 66 % (1998) auf heute ca. 7 % gefallen.⁹ Ebenso nicht betrachtet werden Aufzüge in Hochhäusern¹⁰, da diese i.d.R. höchst projektspezifisch geplant und ausgeführt werden und somit in vielen Fällen individuelle Sonderlösungen darstellen (siehe z.B. [18]). Es ist anzunehmen, dass die in der vorliegenden Arbeit betrachteten

⁶ Beseitigung evtl. vorhandener Mängel noch während der ZÜS-Prüfung durch die Wartungsfirma, die in der Regel bei einer Hauptprüfung einen Monteur zur Assistenz im Auftrag des Betreibers bestellt.

⁷ ohne Prüfungen vor Inbetriebnahme

⁸ ohne Prüfungen vor Inbetriebnahme

⁹ Die Zahlen in vollständiger Tiefe sind nur VDMA-Mitgliedern zugänglich, siehe auch hier: <https://fogt.vdma.org/viewer/-/article/render/1139563> (zuletzt geprüft am 25.06.2018).

¹⁰ nach Musterbauordnung Gebäude mit Aufenthaltsräumen, deren Oberkante des Fußbodens 22 m über der Oberkante des Geländes liegt [17] (Bei einer angenommenen Geschosshöhe von 2,7 m entspricht dies acht Vollgeschossen.)

Systeme einen Großteil der typischen Installationen von Personenaufzügen im Gebäudebestand Deutschlands repräsentieren.¹¹ Dies trifft u.a. auf Wohn- und Nichtwohngebäude zu, in denen nach den jeweiligen Landesbauordnungen Aufzüge vorgeschrieben sind bzw. zum Zeitpunkt der Baugenehmigung vorgeschrieben waren. Die Anforderungen in den jeweiligen Bundesländern sind ähnlich aber nicht identisch, sie werden entweder in der für einen Aufenthaltsraum überschrittenen Höhe des Fußbodens über dem Gelände (z.B. 13 m in Baden-Württemberg) [19] oder in der Anzahl der Vollgeschosse (z.B. fünf in Rheinland-Pfalz) [20] festgelegt. Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit sollen überwiegend Aufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden mit fünf bis acht Vollgeschossen sein.¹²

1.3 Zielsetzung

Zur Bearbeitung der in Abschnitt 1.1 hergeleiteten Forschungsfragen am Beispiel des Betrachtungsgegenstandes Personenaufzug werden in dieser Arbeit fünf wesentliche Ziele verfolgt:

- Vorstellung und Analyse des Betrachtungsgegenstandes Personenaufzug (Hintergründe für die Auswahl im vorigen Abschnitt erläutert, später auch System oder Gesamtsystem Aufzug genannt),
- Aufbereitung methodischer Grundlagen für den Umgang mit Energiekennwerten und dem Instandhaltungsaufwand für Planungsentscheidungen haustechnischer Systeme,

¹¹ Einschätzung des Autors wurde in Expertengesprächen mit Herrn Axel Stohlmann (Autor von [16]) im Juni/Juli 2016 als realistisch angesehen.

¹² Hintergrund ist die Abgrenzung zu der weiter oben beschriebenen Hochhausgrenze. Es wird damit jedoch nicht ausgeschlossen, dass die betrachteten Aufzugsanlagen mehr als acht Haltestellen anfahren, z.B. acht Vollgeschosse und eine oder mehrere Haltestellen in Untergeschossen.

- Aufbereitung methodischer Grundlagen zur Ermittlung, Einordnung und Bewertung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung,
- Übertragung der aufbereiteten methodischen Grundlagen auf den Betrachtungsgegenstand, insbesondere verbunden mit einem Übergang von der Betrachtung des Gesamtbauwerkes zur Betrachtung einzelner Komponenten und Bauteile,
- Erschließung und Aufbereitung von Datenquellen zum Energieaufwand und zu Instandhaltungskosten von Personenaufzügen,
- Unterstützung der ökologischen Bewertung von Haustechnik (siehe auch [21]), u.a. durch Weiternutzung von Bauteilen und Komponenten, die nicht zwingend ausgetauscht werden müssen bzw. deren Lebensdauer durch geeignete Maßnahmen verlängert werden kann sowie
- Nutzung der zuvor erarbeiteten Ergebnisse zur Entwicklung eines praktisch anwendbaren Planungshilfsmittels mit konkreten Anwendungsbeispielen und Einschätzung des Nutzens für den Anwender.

1.4 Motivation und Erfahrungshintergrund

Der Autor der vorliegenden Arbeit war in den vergangenen Jahren in verschiedene Projekte¹³, die sich mit dem Energie- und Instandhaltungsaufwand haustechnischer Systeme auseinandersetzten, eingebunden. Es fiel dem Autor dabei auf, dass der Aufzug in der Energieforschung im Gebäudebereich neben anderen haustechnischen Gewerken, wie z.B. Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung, bisher selten zentraler Betrachtungsgegenstand war. Bereits im Rahmen des Forschungsprojektes

¹³ am Fachgeb. Immobilienwirtschaft des Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

EnOB¹⁴ hielt er dazu fest, dass Aufzüge bei der integralen Planung sowie beim Energie- und Kostenmonitoring im Gebäudebetrieb zukünftig viel stärker in den Mittelpunkt zu rücken sind [22, S. 104]. Auf die besondere Bedeutung der Instandhaltungskosten bei Personenaufzügen neben den Energiekosten wird hingewiesen. Im gleichen Zeitraum ist es dem Autor der vorliegenden Arbeit gelungen, zusammen mit einem Industriepartner neue Lösungsvorschläge zur Ermittlung des Energieverbrauchs und damit der -kosten von Personenaufzügen in der Nutzungsphase zu erarbeiten [23]. Wesentliche Ergebnisse hieraus finden sich in Kapitel 3.

Eine weitere Motivation für die beschriebene Zielsetzung ergibt sich u.a. aus Arbeitsergebnissen der im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen vom damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) eingerichteten Baukostensenkungskommission, die im November 2015 ihren Abschlussbericht veröffentlichte. Darin wird u.a. die verstärkte Ausbildung in der technischen Gebäudeausrüstung und Verbesserung der Ausbildungsqualität hinsichtlich der interdisziplinären Planung empfohlen. [24, S. 140] Die „Lebensdauer und Instandhaltungskosten technischer Anlagen“ wird in diesem Zusammenhang als Forschungsthema herausgestellt. Einen Beitrag zu diesem Thema am Beispiel von Personenaufzügen soll die vorliegende Arbeit leisten.

1.5 Herangehensweise und Aufbau der Arbeit

In einem ersten Schritt wird die historische und technische Einteilung der Bestandstechnologien als technische Basis zur Ermitt-

¹⁴ Energieoptimiertes Bauen (2007 bis 2015), gefördert vom damaligen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

lung des Energieaufwandes in der Nutzungsphase sowie von Instandhaltungsentscheidungen aufbereitet und typologisiert. Es folgen die Auseinandersetzung mit Kennwerten für den Energie- und Instandhaltungsaufwand. Diese werden in allgemeine Lebenszyklusmodelle von Gebäuden eingeordnet und auf den Betrachtungsgegenstand Personenaufzug übertragen. Der methodische Rahmen für den Umgang mit gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus (Lebenszykluskosten) wird anhand der Untersuchung des aktuellen Standes nationaler und internationaler Normungs- und Richtlinienarbeit abgegrenzt. Dabei wird auf die Besonderheiten unterschiedlicher Verfahren zur Prognose von Lebenszykluskosten näher eingegangen, und typische Anwendungsfälle der Lebenszykluskostenrechnung werden beschrieben. Im Kern der vorliegenden Arbeit werden deshalb Methoden zur Ermittlung, Prognose und Beurteilung von Energie- und Instandhaltungskosten von Personenaufzügen behandelt und entwickelt. Dabei rücken bestehende Aufzüge in den Vordergrund (vgl. Abschnitt 1.2). Darauf aufbauend, werden verschiedene Verfahren einerseits angelehnt an das Normungswesen und andererseits basierend auf Ergebnissen eigener Untersuchungen hergeleitet. Es ergeben sich daraus für Personenaufzüge typische Instandhaltungsstrategien, deren Varianten über einen vorgegebenen Lebenszyklus monetär vergleichbar gemacht werden. Neben der Anwendung eines dynamischen Verfahrens der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die hierfür notwendige Kostendatenstruktur entwickelt und auf Basis realer Daten von Herstellern, Instandhaltungsdienstleistern, Betreibern sowie aus Expertengesprächen und Literatur erprobt. Die vollständige Methodik wird im Rahmen eines selbstentwickelten Planungshilfsmittels abgebildet und für Entscheider zugänglich und praktisch anwendbar gemacht. Eine rein ökonomische Vorteilhaftigkeit von möglichen Instandhaltungsvarianten wird abschließend durch eine Analyse der Möglichkeiten zur Verbesserung des funktionalen Nutzens der Aufzugsanlage aus Sicht des Betreibers und Nutzers sowie der Redu-

zierung von schädlichen Umwelteinflüssen vervollständigt. Die vorliegende Arbeit gliedert sich somit nach dieser Einleitung (Kapitel 1) in drei wesentliche Teile gemäß Abbildung 1.1.

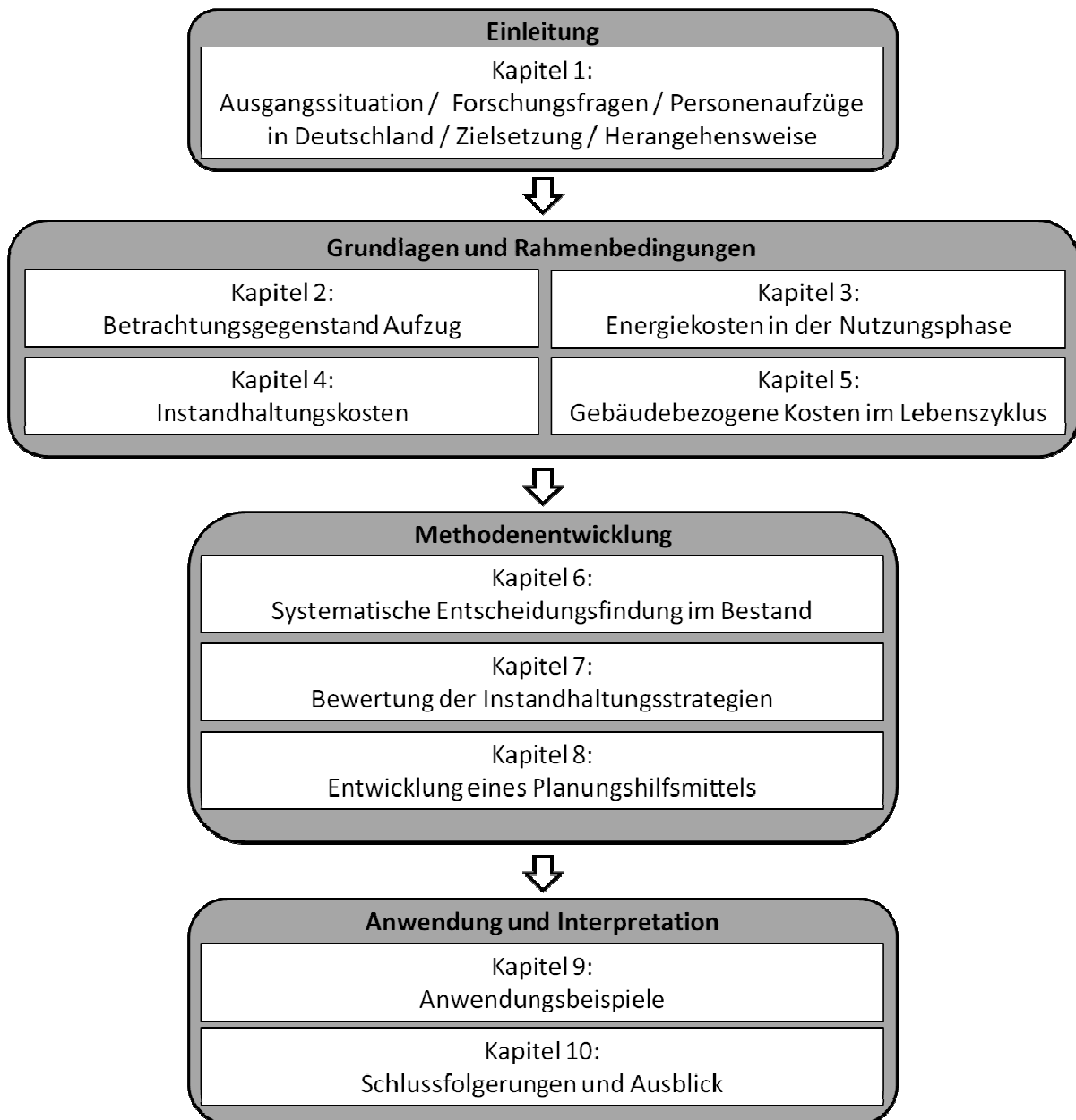


Abbildung 1.1: Struktur der vorliegenden Arbeit
(Quelle: eigene Darstellung)

Im Einzelnen enthalten die drei Teile:

- Aufbereitung existierender Grundlagen und Methoden zur Schaffung der Rahmenbedingungen (Kapitel 2 bis 5),
- Entwicklung einer neuen Methode und eines Planungshilfsmittels zur Ermittlung und Bewertung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes am Beispiel von Personenaufzügen (Kapitel 6 und 8),
- Anwendungsbeispiele (Kapitel 9).

Kapitel 10 fasst schließlich wesentliche Ergebnisse zusammen und zeigt weiteren Forschungsbedarf auf.

Zur weiteren Eingrenzung wird vom Autor zudem folgende Festlegung getroffen: Die Verwendung von Daten beim Umgang mit Lebenszykluskosten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen zum Zwecke der Gegenüberstellung von finanziellem Aufwand und dem finanziellen Nutzen ist nicht zentraler Bestandteil dieser Arbeit. Vielmehr soll einerseits die durch Zahlungsflüsse hergestellte oder erhaltene Funktion eines Aufzugs beurteilt und andererseits die Vergleichbarkeit dieser Zahlungsflüsse auf Basis von definierten Varianten mittels Kennwerten (Kennzahlen, Verhältniszahlen) unterstützt werden. Zur Abgrenzung von existierenden Wirtschaftlichkeitsbegriffen wird z.B. in [25, S. 4] und [26, S. 33] empfohlen, von „Wirtschaftlichkeit im engeren Sinne“ oder auch „Kostenwirtschaftlichkeit“ zu sprechen. Aus Sicht des Autors ist in diesem Zusammenhang insbesondere der Begriff „Kostenvergleichsrechnung“ bzw. „Lebenszykluskostenvergleichsrechnung“ angemessen und für die folgenden Betrachtungen besonders zutreffend. Im betriebswirtschaftlichen Sinne kann es sich bei den Lebenszykluskosten um Aufwendungen, Kosten, Ausgaben oder Auszahlungen handeln. Diese Differenzierung ist jedoch für die folgenden Betrachtungen zunächst ohne Bedeutung. Für die betriebswirtschaftliche Definition und Abgrenzung des Begriffs Kosten wird z.B. auf [27] verwiesen.

2 Der Betrachtungsgegenstand: Personenaufzug

Aufzüge verursachen einerseits durch ihren Betrieb einen elektrischen Energieaufwand (bedingt durch die Anlagentechnik und die Nutzung). Andererseits entstehen durch notwendige Öffnungen im Triebwerksraum und im Schacht für Belüftung und Entrauchung Wärmeverluste, die im weiteren Sinne auch dem System Aufzug bzw. Betrieb des Aufzugs zugerechnet werden können, jedoch von der Anlagentechnik nicht direkt beeinflusst werden. In den folgenden Abschnitten wird nur der elektrische Energieaufwand, der im direkten Zusammenhang mit der Anlagentechnik steht, analysiert. In Form eines Exkurses wird die Systemabgrenzung zu Schachtbelüftung und -entrauchung in Anhang D ausführlich behandelt.

2.1 Abgrenzung der Systemebenen

Zur Einordnung des Betrachtungsgegenstandes sind in den folgenden Ausführungen drei Systemebenen, die in Abbildung 2.1 dargestellt werden, zu unterscheiden:

- Gebäude,
- Aufzug,
- Komponenten des Aufzugs.

Innerhalb des Gebäudes sind aufgrund des Gebäudetyps und Nutzungsprofils, des Personenaufkommens und der Gebäudegeometrie eine bestimmte Anzahl von Personen täglich zu befördern (Förderbedarf). Dies ist die zentrale Schnittstelle zwischen Gebäude und Aufzug und wird ausführlich in [28] behandelt. Die

Anforderung wird an das Gesamtsystem Aufzug gestellt und auf Basis eines zwischen dem Betreiber bzw. Bauherrn und dem Errichter der Aufzugsanlage (vertraglich) vereinbarten Service-Levels¹⁵ erfüllt. Der Service-Level (teilweise auch als Dienstgüte oder Quality of Service bezeichnet) wird im Wesentlichen durch die technischen Eigenschaften des Aufzugs bestimmt. Diese werden im folgenden Abschnitt sowie in Abschnitt 3.4.3 ausführlich behandelt.

Unmittelbar aus den in Abbildung 2.1 dargestellten Zusammenhängen wird nun die Notwendigkeit einer detaillierten Betrachtung des Energie- und Instandhaltungsaufwandes auf Basis der verbauten Komponenten des Gesamtsystems Aufzug deutlich.

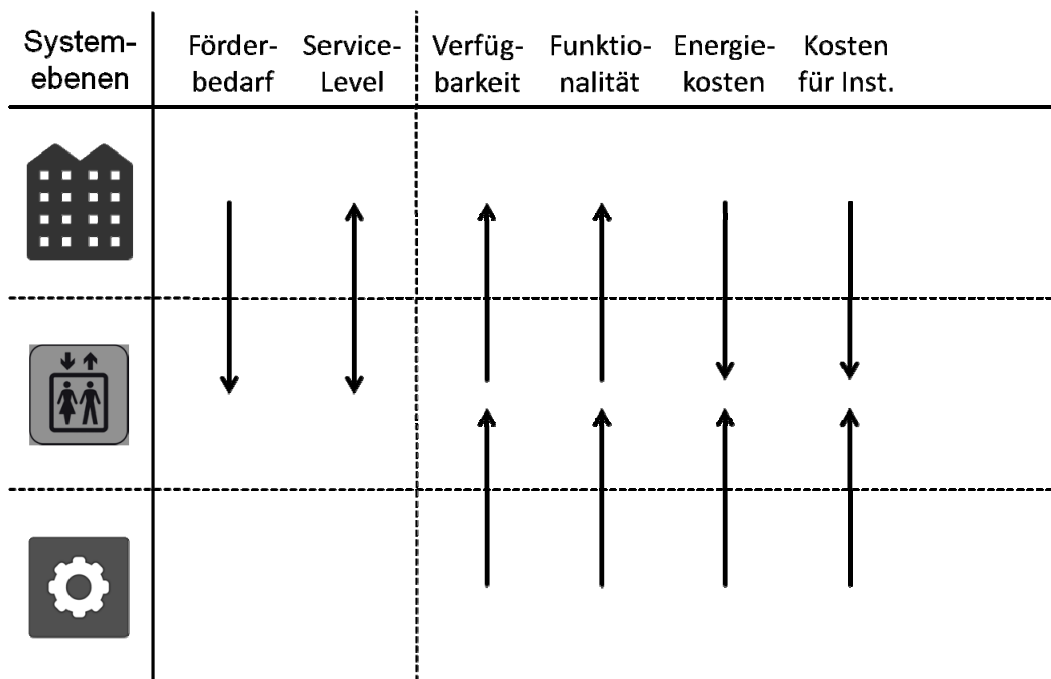


Abbildung 2.1: Gegenseitige Anforderungen der Systemebenen Gebäude, Aufzug und Komponenten (Quelle: eigene Darstellung)

¹⁵ Qualität der Aufzugsanlage (vgl. Abschnitt 2.2)

Abbildung 2.1 lässt zudem erkennen, dass einerseits an die Ebene Aufzug (in der mittleren Zeile angeordnet) die Anforderungen der Gebäudeebene (in der oberen Zeile angeordnet) gestellt werden und andererseits diese vollständig von den Eigenschaften und der Kombination der einzelnen Komponenten in der unteren Ebene (untere Zeile) erfüllt werden müssen. Verfolgt wird aus dieser Erkenntnis heraus ein Bottom-Up-Ansatz.

2.2 Dienstgüte von Personenaufzügen

Die Dienstgüte eines Personenaufzugs wird u.a. in der Zielsetzung, bestimmte durchschnittliche Wartezeiten an den Haltestellen nicht zu überschreiten, definiert (vgl. Abschnitt 3.4.3.2). Das Gesamtsystem Aufzug erreicht den Service-Level durch eine definierte Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit) und eine definierte Funktionalität (Fahreigenschaften, z.B. beschrieben durch die Fahrkurven¹⁶ und die Schnelligkeit der Türspiele bzw. Minimierung der Türverlustzeiten¹⁷). Diese Eigenschaften werden direkt durch die geeignete Kombination, eine sorgfältige Montage, die Qualität und schließlich durch den Wartungszustand der Komponenten beeinflusst. Unmittelbar hieraus ergeben sich der Energieaufwand für den Betrieb sowie den zur Aufrechterhaltung des sicheren und störungsarmen Betriebs notwendigen Instandhaltungsaufwand. Deren Umfang hängt zudem von den Nutzungsbedingungen, die sich aus dem Gebäudebetrieb ergeben, ab. Die

¹⁶ Die Fahrkurve beschreibt die dynamischen Eigenschaften (Fahrdynamik) eines Fahrvorgangs mit den Phasen Beschleunigung, Verrundungen/Übergänge (Rucks), konstanter Fahrgeschwindigkeit, Verzögerung und ggf. Schleichweg bei der Einfahrt in die Haltestelle (vgl. <https://www.peters-research.com/index.php/support/articles-and-papers/53-ideal-lift-kinematics>, zuletzt geprüft am 25.06.2018).

¹⁷ Differenz zwischen der Fahrtzeit zwischen zwei Haltestellen mit Zwischenhalt und der Fahrtzeit zwischen den zwei gleichen Haltestellen ohne Zwischenhalt (abhängig von der Qualität und Einstellung der Türantriebe sowie des Verhaltens der Kabine (Fahrdynamik) beim An- und Einfahren aus und in die Haltestelle (vgl. [29])).

Nutzungsbedingungen werden u.a. beschrieben durch die Anzahl der Fahrten pro Tag. Besondere Anforderungen und Umstände, wie z.B. die mutwillige Beschädigung von Bauteilen und Komponenten durch Vandalismus, was insbesondere für Aufzüge in öffentlich zugänglichen Bereichen oder Wohngebäuden mit schwierigem sozialen Umfeld zutreffen kann, beeinflussen die auszuwählende Instandhaltungsstrategie zusätzlich.

2.3 Historische und technische Einteilung der Technologien und Systemvarianten im Bestand

In der vorliegenden Arbeit werden Personenaufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden betrachtet. Im Bestand anzutreffen sind dabei Aufzugsanlagen, die nach den technischen Regeln für Aufzüge (TRA 200 - 400) bzw. nach den Normen DIN EN 81-1 und -2 errichtet wurden. Förderanlagen, die nicht unter die Aufzugsrichtlinie 95/16/EG fallen, werden nicht betrachtet (z.B. Baustellenaufzüge, Homelifts (Einfachaufzüge) oder Fahrtreppen). Der Betrieb der betrachteten Aufzugsanlagen wird durch die Betriebsicherheitsverordnung (BetrSichV¹⁸) geregelt. Diese wird durch die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS¹⁹) konkretisiert und ersetzt seit dem 01.01.2003 die bisherige Aufzugsverordnung. Im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung gelten Aufzüge als überwachungsbedürftige Anlagen. Durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) sind diese Anlagen wiederkehrend auf ihren ordnungsgemäßen Zustand zu überprüfen (Haupt- und Zwischenprüfung im abwechselnd jährlichen Rhythmus, nicht zu verwechseln mit Wartung). Ist ein Aufzugsbetreiber gleichzei-

¹⁸ vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/betrsv_2015/ (zuletzt geprüft am 26.06.2018)

¹⁹ vgl. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS.html> (zuletzt geprüft am 26.06.2018)

tig Arbeitgeber²⁰, gilt der Aufzug zudem als Arbeitsmittel. Arbeitgeber sind über die sicherheitstechnische Bewertung hinausgehend zu einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet. Dabei werden Abweichungen vom Stand der Technik beispielsweise anhand einer Checkliste nach DIN EN 81-80 ermittelt. Maßnahmen zur freiwilligen Erhöhung der Sicherheit bestehender Aufzugsanlagen können als Chance zur gleichzeitigen energetischen Verbesserung aufgefasst werden. Bei Neuanlagen trifft diese Abhängigkeit nicht zu, weil die Mindestanforderungen an die Sicherheit nach DIN EN 81-1 und -2 immer verbindlich sind. Ab Mitte 2015 gilt eine novellierte Betriebssicherheitsverordnung mit entsprechenden Auswirkungen auf die relevanten TRBS. Die Normen DIN EN 81-1 und -2 wurden 2017 durch die aktuellen DIN EN 81-20 und -50 ersetzt (auf Basis der seit 20.04.2014 geltenden Aufzugsrichtlinie 2014/33/EU). Bis zum 31.08.2017 galt eine Konformitätsvermutung (Übergangsregelung), d.h. neue Aufzüge konnten bis zu diesem Datum noch nach der alten Norm in Verkehr gebracht werden.²¹ Die Checkliste nach DIN EN 81-80 für bestehende Aufzüge wurde darauf aufbauend überarbeitet. Ein Ersatz der Version von 2004 ist vorgesehen [30]. Vom Erfahrungsaustauschkreis der zugelassenen Überwachungsstellen (EK-ZÜS²²) wurde zum Ende des Jahres 2016 eine normenkonforme Checkliste für die Anwendung bei den Prüfungen empfohlen [31]. Hierauf wird in den Abschnitten 4.1 und 4.2 nochmals ausführlicher in direktem Zusammenhang zu Instandhaltungsstrategien eingegangen.

Grundlage für Entscheidungen zu notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen sowie zur Abschätzung des aktuellen Energiebedarfs bestehender Aufzüge ist die Einordnung und Bewertung der angetroffenen Technologie und des Gebäudetyps. Der Anlagenbe-

²⁰ Dies ist in der Regel zu unterstellen und gilt auch für Betreiber, deren Mieter oder Nutzer Arbeitgeber sind. Auch Servicetechniker am Aufzug sind in diesem Zusammenhang Beschäftigte, die direkt oder indirekt für den Betreiber tätig sind.

²¹ <http://auf.vdma.org/article/-/articleview/4119890> (zuletzt geprüft am 26.06.2018)

²² Geschäftsstelle betreut vom VdTÜV (Verband der TÜV e.V., www.vdtuev.de)

stand kann grundsätzlich zwischen Neuinstallationen, die mindestens dem Stand der Technik entsprechen oder darüber hinaus das technisch Machbare realisieren sowie älteren Anlagen, die sich im Originalzustand ihres ursprünglichen Baujahres befinden oder mindestens einmal modernisiert wurden, unterschieden werden. In der vorliegenden Arbeit werden Anlagen ab Baujahr 2010 als Neuinstallationen definiert. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Hauptkomponenten von Treibscheibenaufzügen sind (siehe auch [32] und [33]):

- Art des Antriebs: mit/ohne Getriebe,
- Art der Tragmittel²³: Stahlseile, kunststoffummantelte Stahlseile, Gurte,
- Position des Antriebs: über dem Schacht mit Maschinenraum, neben dem Schacht (unten), im Schachtkopf ohne Maschinenraum (MRL),
- Art der Aufhängung: direkt 1:1 (wie in Abbildung 2.2 dargestellt) oder indirekt, z.B. 2:1, zur Sicherstellung der notwendigen Treibfähigkeit u.a. in Abhängigkeit der bei der jeweiligen Anlage möglichen Rollen- und Seildurchmesser,
- Ausführung der Regelung: frequenzgeregelt²⁴ (VVVF), phasenanschnitts- bzw. spannungsgeregelt²⁵ (VVFV), gleichstromgeregelt²⁶ (DC) mit statischem oder rotie-

²³ In der vorliegenden Arbeit werden nur Stahlseile betrachtet.

²⁴ Antriebsmotor mit einer Wicklung, Drehzahlregelung mit variabler Spannung und variabler Frequenz, ohne Schwungmassen

²⁵ Antriebsmotor mit zwei Wicklungen wie beim polumschaltbaren Antrieb, Drehzahlregelung mit variabler Spannung, Wicklung für schnelle Fahrt zum Treiben, Wicklung für langsame Fahrt zum Bremsen (Gleichstrombremse), ohne Schwungmassen

²⁶ Gleichstrom-Antriebsmotor, Drehzahlregelung durch Veränderung der Erreger-spannung, Gleichstromerzeugung durch rotierenden Umformer (Ward Leonard) oder statischen Umrichter

rendem Umformer, polumschaltbar²⁷ (zweitourig, FV), eintourig²⁸,

- Ausführung der Steuerung: Mikroprozessorsteuerung mit CAN-Bus (mit/ohne Standby-Optimierung), Mikroprozessorsteuerung mit proprietärem Bus, elektronische Baugruppensteuerung mit diskreter Verkabelung, Relaissteuerung,
- Ausführung der Kabinentür: Falttür mit unregelmäßigem Antrieb, Schiebetür mit regelmäßigem oder unregelmäßigem Antrieb, ohne Kabinentür,
- Ausführung der Schachttüren: Drehtüren oder Schiebetüren.

Orientiert an den oben genannten wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen, zeigt Abbildung 2.2 schematisch einen elektrisch angetriebenen Personenaufzug mit oben liegendem Maschinenraum, getriebelosem Antrieb und Schiebetüren. Kabine und Gegengewicht sind über die Treibscheibe und Umlenkrolle im Maschinenraum direkt ohne weitere Übersetzungen verbunden, d.h. in Aufhängung 1:1 ausgeführt.

Tabelle 1 bis Tabelle 3 zeigt jeweils, welche Technologien in den Epochen von ca. 1960 bis heute im Anlagenbestand in Deutschland anzutreffen sind.²⁹ Die verwendeten Kürzel ergeben sich aus der Unterscheidung zwischen Neuanlagen (N), modernisierten Anlagen (M), originalen Anlagen (O) sowie den Epochen (A bis H) mit den jeweils darin vorkommenden Varianten. Bei modernisier-

²⁷ Antriebsmotor mit zwei Wicklungen, die für schnelle und langsame Fahrt umgeschaltet werden, zur Dämpfung von Beschleunigung und Verzögerung mit Schwungmassen ausgestattet

²⁸ Antriebsmotoren mit einer Wicklung ohne Drehzahlveränderung, mit Schwungmassen ausgestattet

²⁹ Die dazu entwickelten Technologiematrizen (Tabelle 1 bis Tabelle 3) basieren auf langjährigen Markt- und Feldbeobachtungen des Autors. Eine Weiterentwicklung erfolgte u.a. auch in einem Forschungsprojekt zusammen mit einem Industriepartner (vgl. [23], sowie Abschnitt 1.4 und Kapitel 3).

ten Anlagen wird angenommen, dass die wesentlichen Komponenten nach 20 Jahren Betriebszeit ausgetauscht wurden.

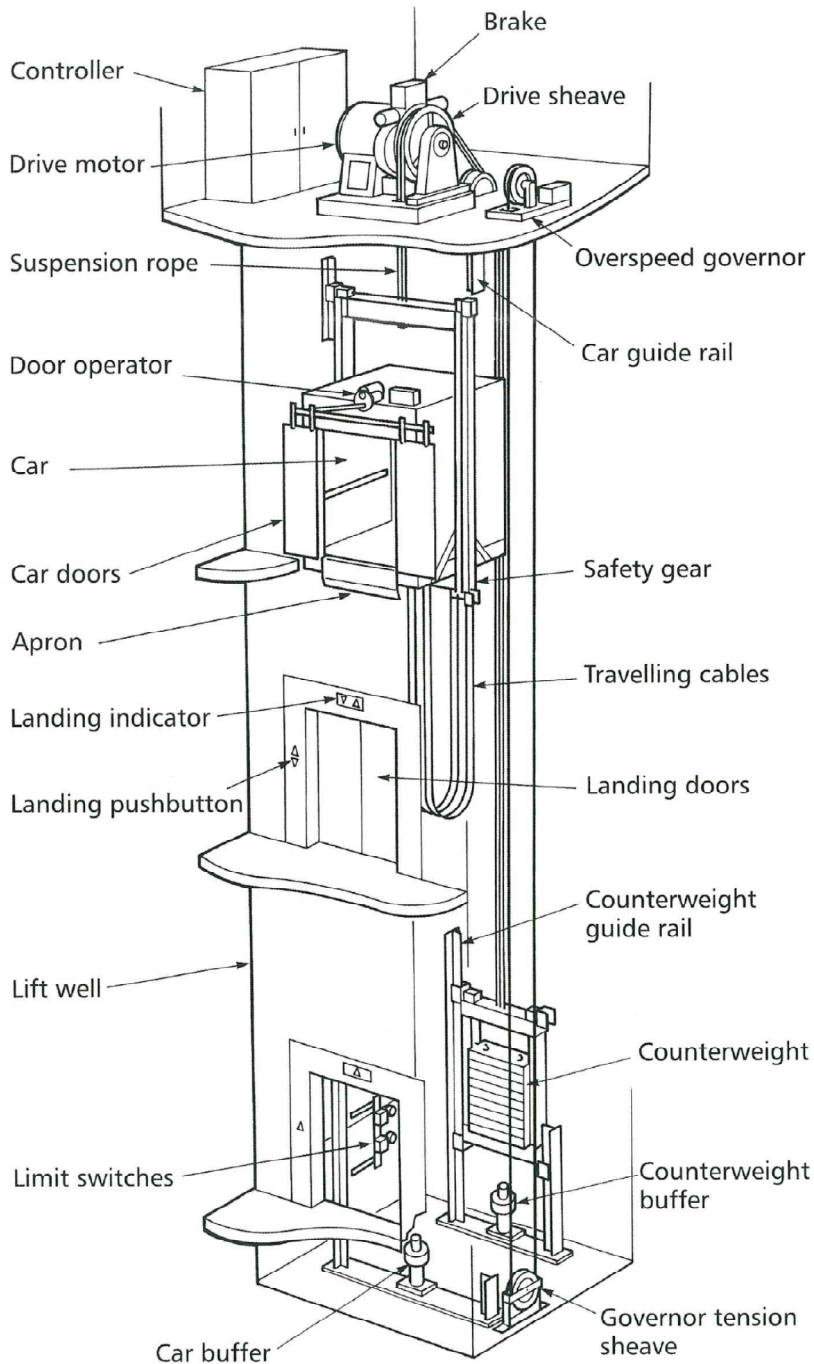


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines elektrisch angetriebenen Treibscheibenaufzugs mit getriebelosem Antrieb, oben liegendem Maschinenraum und Aufhängung 1:1 (Quelle: [33, S. 5-1])

Bei Neuanlagen (ab 2010, Epoche A) wird im Folgenden auf Basis der zur Verfügung stehenden Technologien und ihrer Kombinationsmöglichkeiten unterschieden nach:

- optimal, Realisierung des technisch Machbaren (NA0),
- Standardlösung 1 (NA1) und
- Standardlösung 2 (NA2).

Tabelle 1: Technologiematrix Neuanlagen
(ab 2010, Epoche A, Quelle: eigene Darstellung)

Epoche/Variante	Art des Antriebs		Position des Antriebs		Regelung				Steuerung			Kabinentür			Schachttür						
	mit Getriebe	ohne Getriebe	über dem Schacht	neben dem Schacht	ohne Maschinenraum	Frequenzregelung	Rückspeisung	Spannungsregelung	zweitourig	eintourig	Mikro, CAN, Standbyopt.	Mikro, CAN	Mikro, Bus proprietär.	elektronisch, diskret	Relais	Falttür ungeregelt	Schiebetür ungeregelt	Schiebetür geregelt	ohne	Drehtüren	Schiebetüren
NA0		•			•	•	•				•						•				•
NA1	•		•	•		•						•					•				•
NA2	•		•			•						•					•			•	

Bei Bestandsanlagen werden fünf weitere Epochen unterschieden:

- 2005 bis 2010 (B)
- 1995 bis 2005 (C),
- 1985 bis 1995 (D),
- 1980 bis 1985 (E),
- 1970 bis 1980 (F),
- 1960 bis 1970 (G) und
- vor 1960 (H).

Tabelle 2: Technologiemarkt Bestandsanlagen original
(von vor 1960 bis 2010, Epochen B bis H, Quelle: eigene Darstellung)

Epoche/Variante	Art des Antriebs		Position des Antriebs		Regelung				Steuerung				Kabinentür			Schachttür					
	mit Getriebe	ohne Getriebe	über dem Schacht	neben dem Schacht	ohne Maschinenraum	Frequenzregelung	Rückspeisung	Spannungsregelung	zweitourig	eintourig	Mikro, CAN, Standbyopt.	Mikro, CAN	Mikro, Bus proprietär	elektronisch, diskret	Relais	Falldtür ungeregelt	Schiebetür ungeregelt	Schiebetür geregelt	ohne	Drehtüren	Schiebetüren
OB1		•			•	•					•						•				•
OB2	•		•	o		•					•						•				•
OC1	•		•	o		o		•			•						•				•
OC2	•		•	o		o		•			•					•	o				•
OD1	•		•	o				•				•					•	o			•
OD2	•		•	o				•				•					•			•	
OD3	•		•	o					•			•					•	o			•
OD4	•		•	o					•			•					•			•	
OE1	•		•	o				•					•				•	o			•
OE2	•		•	o				•					•				•			•	
OE3	•		•	o					•				•				•	o			•
OE4	•		•	o					•				•				•			•	
OF1	•		•	o					•				o	•			•	o			•
OF2	•		•	o					•				o	•			•			•	
OG1	•		•	o					•					•			•				•
OG2	•		•	o					•					•			•			•	
OG3	•		•	o					•					•	•					•	
OH1	•		•	o					•					•			•				•
OH2	•		•	o					•					•				•		•	
OH3	•		•	o					•					•				•		•	

Tabelle 3: Technologiematrix Bestandsanlagen modernisiert
(von vor 1960 bis 2010, Epochen B bis H, Quelle: eigene Darstellung)

Epoche/Variante	Art des Antriebs		Position des Antriebs		Regelung				Steuerung				Kabinentür			Schachttür					
	mit Getriebe	ohne Getriebe	über dem Schacht	neben dem Schacht	ohne Maschinenraum	Frequenzregelung	Rückspeisung	Spannungsregelung	zweitourig	eintourig	Mikro, CAN, Standbyopt.	Mikro, CAN	Mikro, Bus proprietär	elektronisch, diskret	Relais	Falldtür ungeregelt	Schiebetür ungeregelt	Schiebetür geregelt	ohne	Drehtüren	Schiebetüren
MB1		•			•	•					•						•				•
MB2	•		•	0		•					•						•				•
MC1	•		•	0		0		•			•						•				•
MC2	•		•	0		0		•			•					•	0				•
MD1	•		•	0		0		•			•					•	0				•
MD2	•		•	0		0		•			•					•				•	
MD3	•		•	0		0		•			•					•	0				•
MD4	•		•	0		0		•			•					•			•		
ME1	•		•	0				•			•					•	0				•
ME2	•		•	0				•			•					•				•	
ME3	•		•	0				•			•					•	0				•
ME4	•		•	0				•			•					•				•	
MF1	•		•	0				•				•				•	0				•
MF2	•		•	0				•				•				•				•	
MG1	•		•	0				0	•				•			•	0				•
MG2	•		•	0				0	•				•			•				•	
MG3	•		•	0				0	•				•			•				•	
MH1	•		•	0					•				•			•	0				•
MH2	•		•	0					•				•		•					•	
MH3	•		•	0					•				•		•					•	

Die oben entworfene Typisierung gängiger Aufzugssysteme nach Technologie, Ausführung und Baujahr bzw. Modernisierungsjahr kann nicht die vollständige, heterogene Vielfalt aller im Bestand vorkommenden Personenaufzüge wiedergeben. Es ist im Einzelfall nicht auszuschließen, dass individuelle Sonderlösungen oder besonders innovative Produkte einzelner Hersteller auch in anderen (i.d.R. früheren) als in den oben zugordneten Epochen zu beobachten sind. Trotzdem wird dadurch eine kompakte sowie eindeutige und damit vergleichbare Beschreibung der am häufigsten auftretenden Aufzugssysteme möglich und dient der Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei in Frage kommenden Instandhaltungsstrategien, die in Abschnitt 4.2.1 behandelt werden.

3 Energieaufwand von Personenaufzügen in der Nutzungsphase

Wesentliche Voraussetzung zur Ermittlung bzw. Prognose von Energiekosten ist die möglichst genaue Bestimmung des Energiebedarfs. Im folgenden Kapitel werden dazu methodische Grundlagen aufbereitet (u.a. die Auswertung früherer Forschungsvorhaben Dritter sowie relevante Normungs- und Richtlinienarbeiten). Es folgt darauf die Entwicklung eigener Ansätze, und es werden Ergebnisse einer (im Rahmen eines eingeworbenen und begleiteten Forschungsvorhabens) durchgeführten Messkampagne ausgewertet und einbezogen. Teile des Kapitels 3 wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit bereits vorab publiziert [23].

3.1 Grundlagen zu Planungskennwerten

Zur Bildung von Kennwerten für die Planung werden in den folgenden Ausführungen absolute Größen, wie z.B. der Energieaufwand in der Nutzungsphase und die dadurch verursachten Energiekosten geeigneten Bezugsgrößen, wie z.B. Zeiträumen und/oder Flächen gegenübergestellt. Als Zeitraum für die energetische Bewertung von Gebäuden und Komponenten wird i.d.R. ein Bezugszeitraum von einem Jahr gewählt. Eine geeignete Bezugsgröße ist z.B. die thermisch konditionierte Nettogrundfläche (NGF), wie sie in der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) bei Nichtwohngebäuden zur Anwendung kommt.³⁰ Bei Kostenkennwerten hat sich z.B. bei der Lebenszykluskostenrech-

³⁰ vgl. http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/EnEV/enev_node.html (zuletzt geprüft am 27.06.2018)

nung im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung die Bruttogrundfläche (BGF) als Bezugsgröße etabliert.³¹ Ein typischer Energiekennwert zur Beurteilung der energetischen Qualität eines Gebäudes tritt also z.B. in folgender Form auf (Gleichung 3.1):

$$\text{Energiekennwert} = \frac{\text{Energieaufwand [kWh]}}{\text{Fläche [m}^2\text{]} \times \text{Bezugszeitraum[a]}}$$

3.1

In den folgenden Ausführungen bezieht sich der Energieaufwand immer auf die Endenergiemenge, aus der mit einem Tarif des Energieversorgers die Energiekosten direkt abgeleitet werden können (hier für elektrische Energie). Im Kontext der energetischen Beurteilung von Aufzügen wird, wie in den folgenden Ausführungen dargelegt, auf eine Bezugsfläche verzichtet, d.h. der Energieaufwand wird rein zeitbezogen dargestellt und beurteilt. Eine Darstellung mit Flächenbezug ist zwar möglich, jedoch nur für sehr frühe Planungsphasen bei Neubau oder Sanierung bzw. für grobe Abschätzungen zur ersten Beurteilung des Bestandes geeignet (siehe Abschnitt auch 3.6).

Zusammenfassend ausgedrückt, liegt mit einem nachvollziehbar ermittelten Endenergiekennwert die Grundlage für weiterführende Berechnungen³² vor:

1. Berechnung der endenergiebezogenen Klimagasemissionen (z.B. als CO₂-Äquivalente) mit Anwendung geeigneter

³¹ vgl. z.B. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bn-2015/kriterien-bnb-buero-und-verwaltungsgebaeude-neubau.html> (zuletzt geprüft am 27.06.2018)

³² Quellen für Primärenergiefaktoren: z.B. [34] oder [22, S. 67], Quellen für Emissionsfaktoren (CO₂-Äquivalente): z.B. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf (zuletzt geprüft am 06.06.2018) oder [22, S. 284]

- Emissionsfaktoren bzw. die Ermittlung eines Carbon Footprints, z.B. nach DIN EN ISO 14067 [35],
2. Berechnung der Ressourceninanspruchnahme in Form des Primärenergieaufwandes (nicht erneuerbar) mit Anwendung eines für den Endenergieträger (hier: Strom) geeigneten Primärenergiefaktors sowie
 3. Berechnung der Energiekosten auf Basis des für den Anlagenstandort bzw. für den Betreiber zutreffenden Energiebezugstarifs.

Die möglichen Berechnungen nach Punkt 1 und 2 unterstützen die Erstellung einer Ökobilanz und die Erstellung von Umweltdeklarationen bzw. Produktumweltdeklarationen³³ (EPDs) Typ III nach ISO 14025 [36] bzw. DIN 15804 [37]. Für Aufzüge wurden diese international von Forschung und Industrie konkretisiert.³⁴

Punkt 3 leistet einen Beitrag zur Berechnung von Lebenszykluskosten. Alle drei oben genannten Berechnungen unterstützen damit auch die Beschreibung und Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, z.B. im Rahmen gängiger Bewertungs- bzw. Zertifizierungssysteme, wie schon weiter oben erwähnt.

Zur Verwendung der Begriffe Energiebedarf und Energieverbrauch ist den folgenden Ausführungen noch eine weitere Anmerkung voranzustellen: Üblicherweise, z.B. im Zusammenhang mit dem öffentlich rechtlichen Energieausweis nach aktuell gültiger EnEV, wird der Begriff Energiebedarf bei einem berechneten Bedarf unter der Annahme von (normierten) Randbedingungen verwendet. (Dieser Begriff wird auch dann verwendet, wenn der Energiebedarf unter realitätsnahen Bedingungen simuliert wird.) Vom Energieverbrauch wird jedoch immer dann gesprochen,

³³ systematische und umfassende Beschreibung der Umweltleistung eines Produktes oder einer Dienstleistung

³⁴ Grundlage: PCR (siehe <http://environdec.com/en/PCR/Detail/?Pcr=9211>, zuletzt geprüft am 27.06.2018)

wenn es sich um einen gemessenen Wert im realen Betrieb handelt. Es ist deshalb möglich, dass in Abhängigkeit der angenommenen Randbedingungen und Systemgrenzen Energiebedarf und Energieverbrauch voneinander abweichen. Da in den folgenden Abschnitten sowohl im Zusammenhang mit früheren Forschungsprojekten als auch mit Normen und Richtlinien von Messungen (Verbräuchen) auf den zukünftigen Bedarf geschlossen wird, ist die konsequente Trennung der beiden Begriffe nicht immer möglich.

Schließlich ist sowohl bei bedarfs- als auch bei verbrauchsorientierten Energiekennwerten die Qualität der einfließenden Daten (hier die berechnete oder gemessene Endenergiemenge) zu differenzieren. Während in frühen Planungsphasen Daten auf dem Niveau von Schätzungen oder Beobachtungen bei vergleichbaren Gebäuden ausreichend sind, nehmen die Anforderungen an die Genauigkeit in fortgeschrittenen Phasen der Planung zu. Die vorliegende Arbeit soll hierfür am Beispiel von Personenaufzügen einen Mehrwert liefern.

3.2 Forschungsvorhaben Dritter zur Ermittlung und Beeinflussung des Energiebedarfs von Aufzügen

In den folgenden Abschnitten wird sowohl im Zusammenhang mit früheren Forschungsprojekten als auch mit Normen und Richtlinien von Messungen (Verbräuchen) auf den zukünftigen Bedarf geschlossen, weshalb die konsequente Trennung der beiden Begriffe, wie schon erwähnt, nicht immer möglich ist.

3.2.1 Projekt S.A.F.E.

Der Schlussbericht des Forschungsvorhabens der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.) entstand im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Schweiz) und wurde im November 2005 veröffentlicht. Nach derzeitigem Kenntnisstand des Autors war dies die erste Publikation, die sich mit der Thematik systematisch auf der Basis von Messungen auseinandersetzt. [38]

Es wurden Stromverbrauchsmessungen in der Schweiz an 33 Aufzügen verschiedener Hersteller durchgeführt. Die gemessenen Aufzüge wurden in einer Technologiematrix spezifiziert und so ausgewählt, dass bis zum damaligen Zeitpunkt gängige Technologien repräsentiert waren. Der überwiegende Teil der Anlagen befindet sich in Wohn- und Bürogebäuden. Tabelle 4 gibt die Ergebnisse der Hochrechnungen wieder. Es ist ersichtlich, dass bei niederfrequentierten Anlagen der Stromverbrauch im Stillstand (Standby), z.B. für Kabinenbeleuchtung, mit 83 % überwiegt. Bei höher frequentierten Anlagen in mittleren und großen Bürogebäuden bzw. Krankenhäusern nimmt der anteilige Stromverbrauch im Stillstand ab, d.h. der Stromverbrauch für das Fahren überwiegt.

Aus diesen Hochrechnungen lassen sich mögliche Verbesserungsstrategien ableiten: Möglichkeiten zur weiteren Reduzierung des Energiebedarfs bei niederfrequentierten Anlagen sind zunächst bei den Stillstands-Stromverbräuchern zu suchen, wo hingegen bei höher frequentierten Anlagen das meiste Verbesserungspotential in der Antriebstechnologie zu finden ist. Dennoch wird in [38] darauf hingewiesen, dass besonders ineffiziente Kabinenbeleuchtungen, z.B. mit Halogen-Glühlampen, auch bei höher frequentierten Anlagen „nicht unwesentlich“ zum Gesamtstromverbrauch beitragen können.

Tabelle 4: Energieverbrauch typischer Seilauzüge mit frequenzgeregelten, getriebelosen Antrieben mit PM-Motoren³⁵
 (Quelle: angelehnt an [38, S. 33])

Gebäude/ Nutzung	Nutzlast [kg]	Geschwin- digkeit [m/s]	Haltestellen	Wh pro Fahrt (ohne Standby)	Fahrten pro Jahr	kWh pro Jahr. (inkl. Standby)	Anteil Standby [%]
Wohn- haus klein	630	1	6	4	40.000	950	83
Büro/ Wohn- haus mittel	1.000	1,5	8	13	200.000	4.350	40
Spital/ Büro groß	2.000	2	12	19	700.000	17.700	25

Zur Hochrechnung des erwarteten Energiebedarfs typischer Seilauzüge könnten die in Tabelle 4 aufgeführten Kennwerte „Wh pro Fahrt“ herangezogen werden. Würde man bei der Kategorie „Büro/Wohnhaus mittel“ den Standby-Anteil hinzurechnen, ergäbe sich beispielsweise ca. 22 Wh³⁶ (anstelle 13 Wh) pro (durchschnittlicher) Fahrt. Diese Kennwerte stellen ein sehr grobes Hilfsmittel für Abschätzungen dar. Sie können jedoch unter der Annahme, dass die Längen der Fahrten über den Nutzungszeitraum gleichmäßig verteilt sind, als ersten Anhaltspunkt herangezogen werden.

³⁵ Synchronmotoren mit Permanentmagnet

³⁶ $((4.350 \text{ kWh} * 0,4 / 200.000) * 1.000) + 13 \text{ Wh}$

3.2.2 E4-Projekt

Das E4-Projekt wurde durch das Programm „Intelligent Energy Europe“ der Europäischen Kommission gefördert.³⁷ Auftragnehmer war die ISR-University of Coimbra (Portugal), die zusammen mit den Partnern, dem Europäischen Aufzugsverband (ELA), der italienischen Energie- und Umweltagentur (ENEA), dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Deutschland und der polnischen Energiesparagentur (KAPE) im März 2010 den Endbericht veröffentlichte [39]. Der Energieverbrauch von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland wurde in einem „Country Report“ [40], basierend auf der Beschreibung der zugrundeliegenden Energieverbrauchsmessungen [41], separat behandelt.

Zwei Methoden werden zur Abschätzung des Energieverbrauchs aller Aufzüge und Fahrtreppen herangezogen. Methode 1 basiert auf der angegebenen Nennleistung der Antriebsmotoren der betrachteten Anlagen und den Abschätzungen zum Stromverbrauch im Stillstand aus dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Projekt. Der Methode 2 liegen Messungen an realen Anlagen zugrunde. Die sich daraus ergebenden Hochrechnungen für Deutschland sind in Tabelle 5 wiedergegeben.³⁸

Es zeigt sich, dass der Energieverbrauch für das Fahren der Aufzüge bei Anwendung von Methode 1 gegenüber Methode 2 deutlich abweicht. Die Schätzung des Stromverbrauchs im Stillstand von Methode 1, die auf [38] basiert, korrespondiert jedoch relativ gut mit dem Ergebnis von Methode 2.

³⁷ vgl. <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/e4> (zuletzt geprüft am 27.06.2018)

³⁸ vgl. Abschnitt 3.3.1.1 zur Unterscheidung von Energieverbrauch Fahrt und Energieverbrauch Stillstand

Tabelle 5: geschätzter jährlicher Energiebedarf in GWh von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland (Quelle: angelehnt an [40, S. 15], vom Autor ins Deutsche übersetzt)

Methode		Energiever- brauch Fahrt	Energiever- brauch Stillstand	Energiever- brauch Gesamt
1	Aufzüge	1.104	1.202	2.206
	Fahrtrep- pen	304	11	315
	Gesamt	1.408	1.213	2.521
2	Aufzüge	2.829	1.135	3.964
	Fahrtrep- pen	304	11	315
	Gesamt	3.133	1.146	4.279

Bezieht man sich auf die Ergebnisse von Methode 2, so verbrauchen ca. 650.000 Aufzüge in Deutschland jährlich knapp 4 TWh elektrische Energie. Dies entsprach bei der Veröffentlichung der Ergebnisse im Jahr 2010 0,8 % des deutschen Gesamtstromverbrauchs [40, S. 15]. Dabei verteilen sich die installierten Aufzüge gemäß Abbildung 3.1 auf die Gebäudetypen des Gebäudebestands in Deutschland. Es dominieren Wohn- und Bürogebäude.

Nach Methode 2 teilt sich der Energieverbrauch für das Fahren und für den Stillstand gemäß Abbildung 3.2 auf. Es wird zudem erneut sichtbar, dass der Energieverbrauch für den Stillstand bei Wohngebäuden überwiegt. Bei höher frequentierten Nutzungsarten, wie z.B. Bürogebäude und Krankenhäuser, dominiert der Energieverbrauch für das Fahren. Bei Aufzügen in öffentlichen

Verkehrsbereichen (z.B. Bahnhöfe oder Flughäfen) ist hingegen ein weitgehend ausgeglichenes Verhältnis erkennbar.

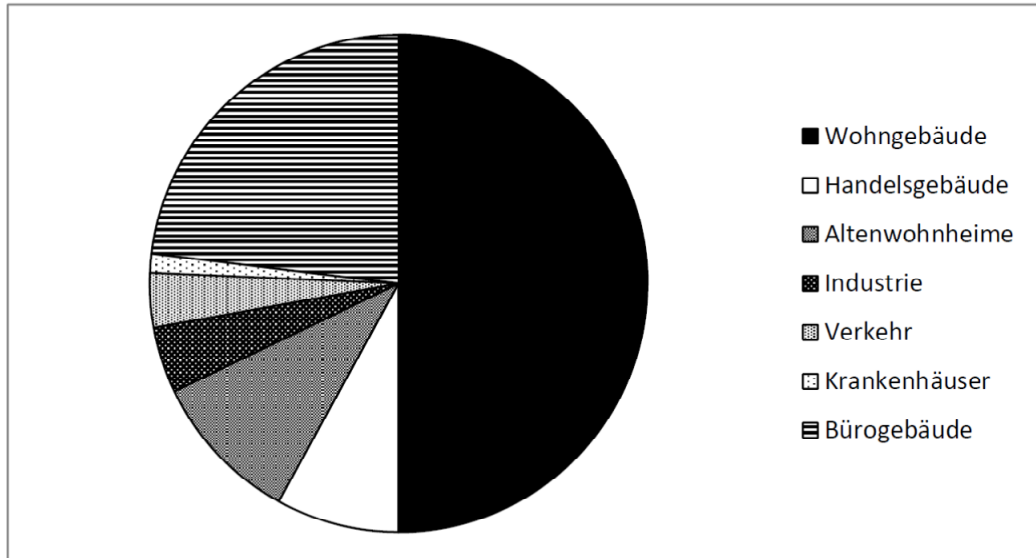


Abbildung 3.1: Verteilung der ca. 650.000 Aufzüge im Gebäudebestand in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [40, S. 6])

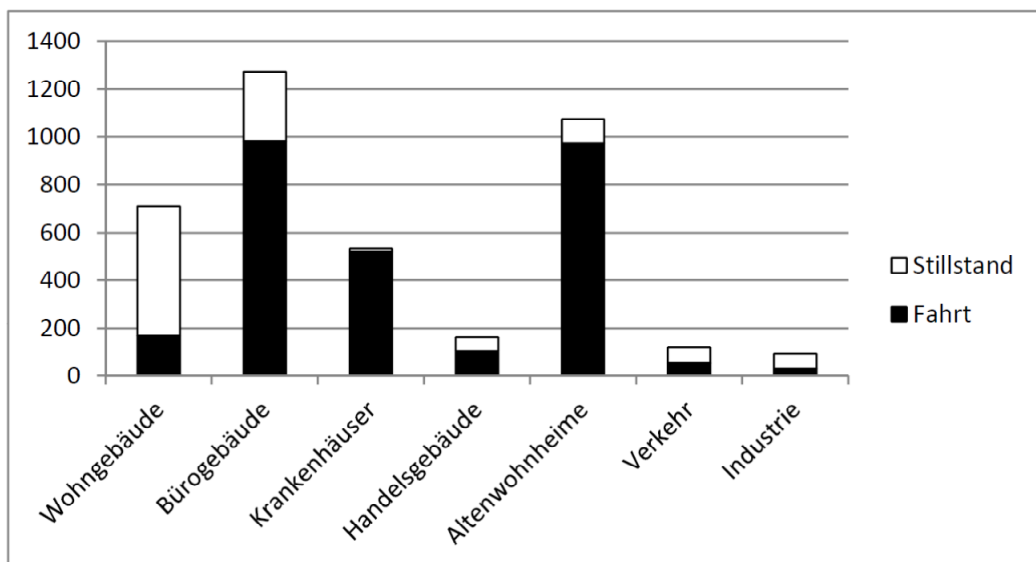


Abbildung 3.2: Energieverbräuche in GWh nach Gebäudetyp mit Methode 2 (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [40, S. 16])

3.2.3 Projekt zur Standby-Optimierung

Die beiden zuvor erläuterten Forschungsprojekte kommen zu dem Ergebnis, dass der Energiebedarf im Stillstand bei niederfrequentierten Aufzügen den Gesamtenergiebedarf dominiert. Der Forschungsbericht zur „Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen“ entstand im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Schweiz) und wurde im Juli 2010 veröffentlicht [42]. Untersucht wurden dabei Möglichkeiten, bestehende Anlagen mit einer herstellerunabhängigen Lösung zur nahezu kompletten Abschaltung der Steuerung im Stillstand nachträglich auszurüsten. Getestet wurde die Nachrüstlösung an einem Aufzug in einem Hochhaus mit überwiegender Büronutzung (18 Haltestellen, Nennlast 1.600 kg, Nenngeschwindigkeit 2,5 m/s, getriebeloser Antrieb mit Frequenzumrichter) und an einem Aufzug in einem Wohnhaus mit sechs Haltestellen und einer Nennlast von 450 kg bei einer Nenngeschwindigkeit von 1,0 m/s (Antrieb auch getriebelos mit Frequenzumrichter).

Der jährliche elektrische Energiebedarf des Aufzugs im Bürogebäude beträgt nach VDI 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.3.1.1) 8.183 kWh. Die Leistungsaufnahme dieses Aufzugs im Stillstand beträgt 39 W. Bei einer angenommenen Stillstandszeit von 21 Stunden (Nutzungskategorie 4 nach DIN 4707 Blatt 1) sowie einer Komplettabschaltung nachts wäre mit der Standby-Optimierung eine Reduzierung des jährlichen Stillstandsbedarfs um ca. 30 % auf ca. 209 kWh realisierbar. Die erzielte Einsparung ist, verglichen mit dem Gesamtverbrauch, mit ca. 2,5 % relativ gering.

Im Wohnhaus wurde eine Anlage analysiert, die nach VDI 4707 Blatt 1 einen jährlichen Stromverbrauch von 1.114 kWh aufweist. Im Stillstand wurde eine Leistungsaufnahme von 103 W gemessen, was einem durchschnittlichen Wert entspricht. Bei einer wohnhaustypischen, angenommenen Stillstandszeit von 23,5 Stunden (Nutzungskategorie 2 nach DIN 4707 Blatt 1) käme der

Stillstandsbedarf auf einen Jahreswert in Höhe von 883 kWh. Das entspricht ca. 80 % des Gesamtverbrauchs im Ausgangszustand, der durch eine Standby-Optimierung deutlich reduziert werden könnte.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Studie lässt sich zusammenfassend feststellen:

- a) Eine nachträgliche Standby-Optimierung ist sinnvoll, wenn die bestehende Anlage einen anteilig überdurchschnittlich hohen Stillstandsbedarf aufweist und in Abhängigkeit der Gebäudenutzung eine hohe durchschnittliche Stillstandszeit festzustellen ist.
- b) Das zeitweise Abschalten von Aufzugsanlagen oder Teilen davon (z.B. Beleuchtung) ist mit den Anforderungen an die Verfügbarkeit bzw. die Reaktionszeiten (Nutzerzufriedenheit) und die Sicherheit (Funktion des Notrufs) in Einklang zu bringen.
- c) Vor dem nachträglichen Einbau einer Standby-Optimierung in ältere Aufzugsanlagen ist zu prüfen, ob bei der Steuerung durch die regelmäßig wiederkehrenden Abschaltvorgänge eine Verringerung der Lebensdauer zu erwarten ist. (Nach Einschätzung des Autors sind elektronische Steuerungen der 1980er und 1990er Jahre nach jahrelangem Dauerbetrieb hierzu nur bedingt geeignet. Der dadurch evtl. zu erwartende (vorzeitige) Ausfall von Bauteilen könnte den Nutzen der Energieeinsparmaßnahme möglicherweise durch notwendige Reparaturkosten und Reduzierung der Verfügbarkeit relativieren.)

3.3 Normen und Richtlinien zum Energiebedarf von Aufzügen – aktueller Stand

Die in den folgenden Abschnitten behandelten Normen und Richtlinien setzen sich einerseits mit Rechenverfahren, Randbedingungen und bisherigen Erfahrungswerten sowie andererseits mit geeigneten Messtechniken auseinander. Der Fokus liegt dabei überwiegend auf der Betrachtung der gesamten Anlage, wobei eine Richtlinie bereits auf Komponentenebene herunter bricht.

3.3.1 VDI 4707

Die VDI-Richtlinie besteht aus drei Teilen (genannt Blättern). Für die vorliegende Arbeit sind die ersten beiden Teile relevant.³⁹

3.3.1.1 Blatt 1

Die VDI-Richtlinie 4707 Blatt 1 wurde im März 2009 veröffentlicht [43]. Sie dient der transparenten Berechnung, Beurteilung und Kennzeichnung des Energiebedarfs von Aufzügen. Entscheidend bei dieser Richtlinie zur Vergabe eines Energieeffizienzlabels ist die Berücksichtigung der Einsatzbedingungen in Abhängigkeit des Gebäudetyps (Nutzungskategorie). Es wird dazu zwischen Energiebedarfsklassen (nur anlagenabhängig) und Energieeffizienzklassen (auch gebäudeabhängig) unterschieden.

Nach VDI 4707 Blatt 1 setzt sich der Gesamtenergiebedarf eines Aufzugs zusammen aus:

- dem Stillstandsbedarf (auch Standby-Bedarf genannt) und
- dem Fahrtbedarf.

³⁹ Der dritte Teil (vgl. https://www.vdi.de/nc/richtlinie/entwurf_vdi_4707_blatt_3_aufzuege_energieeffizienz_von_aufzuegen_nach_maschinenrichtlinie_/, zuletzt geprüft am 27.06.2018) widmet sich Aufzügen nach Maschinenrichtlinie, die in dieser Arbeit nicht betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.3).

Unter Stillstandsbedarf wird die Leistungsaufnahme bei abgeschaltetem Triebwerk, d.h. bei stehendem Aufzug verstanden. Verbraucher, wie z.B. die Kabinenbeleuchtung, Stockwerkanzeigen und Notrufsysteme, beeinflussen den Stillstandsbedarf. Triebwerksraum- und Schachtbeleuchtung werden nicht berücksichtigt, da sie nicht zum Betrieb des Aufzugs erforderlich sind und i.d.R. nur vorübergehend für Instandhaltungsarbeiten eingeschaltet werden. Der Stillstandsbedarf ergibt sich aus der Leistungsaufnahme (in Watt) und der täglichen Stillstandszeit des Aufzugs. Die Leistungsaufnahme im Stillstand kann vom Hersteller angegeben werden oder an einer bestehenden Anlage gemessen werden (fünf Minuten nach Beendigung der letzten Fahrt gemäß derzeitiger Definition nach VDI 4707 Blatt 1). Die tägliche durchschnittliche Stillstandszeit kann aus der Nutzungskategorie des Aufzugs abgeschätzt (vgl. Tabelle 6) oder gebäudespezifisch ermittelt werden.

Tabelle 6: Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [43, S. 6])

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5
Nutzungsintensität/-häufigkeit	sehr gering sehr selten	gering selten	mittel gelegentlich	stark häufig	sehr stark sehr häufig
Durchschnittliche Fahrtzeit in Stunden pro Tag*)	0,2 (≤ 0,3)	0,5 (> 0,3–1)	1,5 (> 1–2)	3 (> 2–4,5)	6 (> 4,5)
Durchschnittliche Stillstandszeit in Stunden pro Tag	23,8	23,5	22,5	21	18
Typische Gebäude- und Verwendungsarten	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 6 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 20 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit 2 bis 5 Geschossen kleine Hotels Lastenaufzug mit wenig Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 50 Wohnungen mittleres Büro- und Verwaltungsgebäude mit bis zu 10 Geschossen mittlere Hotels Lastenaufzug mit mittlerem Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit mehr als 50 Wohnungen hohes Büro- und Verwaltungsgebäude mit über 10 Geschossen großes Hotel kleines bis mittleres Krankenhaus Lastenaufzug in Produktionsprozess bei einer Schicht 	<ul style="list-style-type: none"> Büro- und Verwaltungsgebäude über 100 m Höhe großes Krankenhaus Lastenaufzug in Produktionsprozess bei mehreren Schichten

Der Fahrtbedarf des Aufzugs wird durch vier sogenannte Referenzfahrten ermittelt, deren Fahrtzyklus wie folgt definiert ist:

- Beginn mit offener Tür,
- Tür schließen,
- Fahrt auf oder ab über die volle Förderhöhe,
- Tür öffnen und sofort wieder schließen,
- Fahrt auf oder ab über die volle Förderhöhe,
- Tür öffnen,
- Ende mit offener Tür.

Die vier Referenzfahrten werden jeweils mit unterschiedlichen Beladungen durchgeführt, und anschließend wird ein gewichteter Durchschnittsverbrauch gebildet, um eine möglichst realitätsnahe Verbrauchsvorhersage zu erhalten (Tabelle 7).

Tabelle 7: Lastkollektiv nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [43, S. 8])

Referenzfahrt Nr.	Beladung (Anteil in % der Nennlast)	Gewichtung (Anteil Fahrten in % der Gesamtfahrten)
1	0	50
2	25	30
3	50	10
4	75	10

Vereinfachend kann auch nur eine Referenzfahrt durchgeführt werden. Der gemessene Energieverbrauch ist dann mit einem sogenannten Lastfaktor k zu multiplizieren. Bei üblichen Treib-

scheibenaufzügen mit Gegengewicht und Halblastausgleich⁴⁰ beträgt dieser Faktor 0,7. Der nun ermittelte Referenzbedarf für die Fahrt in Wh wird in Relation gesetzt zur Nennlast des Aufzugs in kg und der Wegstrecke in m (Förderhöhe). Dies wird als spezifischer Energiebedarf für das Fahren bezeichnet. Zur Berechnung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs werden der Stillstandsbedarf über die Stillstandszeiten und die Anzahl der Tage pro Jahr sowie der Fahrtbedarf über die Fahrzeiten und die Anzahl der Tage pro Jahr aufsummiert. Stillstands- und Fahrtbedarf werden zudem gemäß der Tabelle 8 und der Tabelle 9 Energiebedarfsklassen A bis G zugeordnet.

Tabelle 8: Leistungsaufnahmen im Stillstand in Klassen aufgeteilt nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [43, S. 12])

Leistung [W]	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	≤ 1.600	> 1.600
Klasse	A	B	C	D	E	F	G

Tabelle 9: Energiebedarf für das Fahren in Klassen aufgeteilt nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [43, S. 12])

Spezifischer Energieverbrauch [mWh/(kg m)]	≤ 0,56	≤ 0,84	≤ 1,26	≤ 1,89	≤ 2,80	≤ 4,20	> 4,20
Klasse	A	B	C	D	E	F	G

⁴⁰ Halblastausgleich bedeutet, dass das Gegengewicht um etwa die Hälfte der zulässigen Nennlast schwerer ist als das Fahrkorbgewicht ohne Beladung.

Zur Bestimmung der Energieeffizienzklasse des Aufzugs werden der Stillstandsbedarf und der spezifische Fahrtbedarf (bezogen auf die Nutzlast und die zurückgelegte Wegstrecke) zueinander in Relation gesetzt (Gleichung 3.2).

$$E_{\text{Aufzug, spez, max}} = E_{\text{Fahren, spez, max}} + \frac{P_{\text{Stillstand, max}} \times t_{\text{Stillstand}} \times 1000}{Q \times v_{\text{nenn}} \times t_{\text{Fahren}}}$$

3.2

Für einen Aufzug mit einer Tragfähigkeit (Nennlast) von $Q = 630 \text{ kg}$ und einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ m/s}$ ergeben sich damit beispielhaft Grenzwerte für die Einordnung in eine Energieeffizienzklasse von A bis G in Abhängigkeit der Nutzungskategorie (Tabelle 10). Es ist zu erkennen, dass sich innerhalb jeder Effizienzklasse die Grenzwerte bei zunehmender Nutzungshäufigkeit der Anlage verschärfen. So kann beispielsweise ein Aufzug, der in Nutzungskategorie 1 (kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb) die Energieeffizienzklasse A erreicht, in Nutzungskategorie 5 (Büro- und Verwaltungsgebäude über 100 m Höhe) mit den gleichen technischen Eigenschaften nur in Effizienzklasse E eingestuft werden.

Kritisch wird in der VDI 4707 Blatt 1 angemerkt, dass bei der Überprüfung von angegebenen Herstellerkennwerten oder Kennwerten aus früheren Messungen bestehender Anlagen Abweichungen in Größenordnungen von $\pm 20 \%$ auftreten können. Dies kann durch Alterung, verschiedene Wartungsstrategien, Änderungen technischer Details oder Einstellungen und nicht zuletzt durch Streuungen bei der Produktqualität und der Messtechnik bedingt sein.

Tabelle 10: Energieeffizienzklassen nach VDI 4707 Blatt 1 eines Aufzugs mit $Q = 630 \text{ kg}$ und $v = 1 \text{ m/s}$ (Quelle: [43, S. 17])

Energieeffizienzklasse	Spezifischer Energiebedarf [mWh/(kg*m)]				
	Nutzungskategorie				
	1	2	3	4	5
A	$\leq 3,18$	$\leq 1,60$	$\leq 0,89$	$\leq 0,71$	$\leq 0,63$
B	$\leq 6,09$	$\leq 2,91$	$\leq 1,50$	$\leq 1,15$	$\leq 0,97$
C	$\leq 11,75$	$\leq 5,40$	$\leq 2,58$	$\leq 1,88$	$\leq 1,52$
D	$\leq 22,88$	$\leq 10,18$	$\leq 4,54$	$\leq 3,12$	$\leq 2,42$
E	$\leq 44,78$	$\leq 19,38$	$\leq 8,09$	$\leq 5,27$	$\leq 3,86$
F	$\leq 88,15$	$\leq 37,36$	$\leq 14,78$	$\leq 9,14$	$\leq 6,32$
G	$> 88,15$	$> 37,36$	$> 14,78$	$> 9,14$	$> 6,32$

3.3.1.2 Blatt 2

Im Juni 2012 wurde Blatt 2 der Richtlinienreihe VDI 4707 als Entwurf [44] herausgegeben und im Oktober 2013 freigegeben [45]. Der Energiebedarf eines Aufzugs wird hier auf Basis des Energiebedarfs einzelner Komponenten ermittelt. Hierzu werden Anforderungen an die von den Komponentenherstellern zu liefernden Kenndaten sowie deren Ermittlung beschrieben. Aus diesen Angaben lässt sich, im Unterschied zu Blatt 1, der Energiebedarf des Aufzugs ohne Referenzfahrt ausschließlich anhand geeigneter Produktdokumentationen berechnen.

Blatt 2 unterscheidet wie Blatt 1 zwischen Stillstands- und Fahrtbedarf. Zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs werden zusätzlich

sogenannte Betriebsmodi definiert, die sich durch die Aufweckzeiten⁴¹ unterscheiden, nachdem der Aufzug mindestens fünf Minuten stillstand. Es wird zwischen folgenden Modi unterschieden:

- P0: Komponente in Betrieb,
- S0: Komponente aus, jedoch sofort wieder einsatzbereit,
- S1: Komponente aus (Schlafmodus) und nach höchstens drei Sekunden wieder einsatzbereit,
- S2: Komponente aus (Soft-Off-Modus) und nach höchstens 60 Sekunden wieder einsatzbereit.

Für die in Blatt 1 definierten Nutzungskategorien werden nach Blatt 2 Zeitanteile der verschiedenen Betriebsmodi innerhalb der gesamten Stillstandszeit festgelegt (Tabelle 11). Die Hersteller sind nun gefordert, für die Modi S0, S1 und S2 die jeweilige Leistungsaufnahme separat auszuweisen, um den Stillstandsbedarf präzise berechnen zu können.

Tabelle 11: Gewichtung der Betriebsmodi zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs nach VDI 4707 Blatt 2 (Quelle: [44, S. 4])

Nutzungskategorie nach Blatt 1	1	2	3	4	5
Betriebsmodus	Anteil [%]				
S0	1	2	5	7	10
S1	24	33	60	73	85
S2	75	65	35	20	5

Wird von einer Komponente ein Betriebsmodus nicht unterstützt, so ist der Anteil des Betriebsmodus mit der kürzeren Aufweckzeit zum dem des nichtunterstützten zu addieren. Wird gar kein

⁴¹ Die Aufweckzeit wird nach VDI 4707 Blatt 2 definiert als die Zeit, die Komponenten benötigen, um aus dem Energiesparmodus wieder in den Betrieb zurückzukehren. Da sich die Aufweckzeiten mehrerer Komponenten u.U. kumulieren, kann die Reaktionszeit des Aufzugs vom Geben eines Fahrbefehls bis zum Beginn der Fahrt größer sein.

S-Modus unterstützt, so wird angenommen, dass die Komponente dauernd in Betrieb ist und die differenzierten Angaben zu den jeweiligen Leistungsaufnahmen der verschiedenen S-Modi entfallen.

Bei der Berechnung des Fahrtbedarfs für Treibscheibenaufzüge wird zudem zwischen motorischem und generatorischem Betrieb unterschieden, um Energierückspeisung ins Netz erfassen zu können. Hierzu werden im Wesentlichen erfasst:

- der Wirkungsgrad der gesamten Anlage und
- die Entwicklungsstufe der eingesetzten Technologie.

Der Wirkungsgrad der gesamten Anlagen setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Schachtes (Reibungsverluste an den Führungsschienen), dem Wirkungsgrad des Motors (thermische Verluste), dem Wirkungsgrad des Getriebes, sofern nicht getriebeilos (mechanische Verluste), und dem Wirkungsgrad des Umrichters, sofern vorhanden (thermische Verluste).

Die eingesetzte Antriebstechnologie wird, bezogen auf den zusätzlichen Energieverbrauch beim Anfahren und Beschleunigen gegenüber der Konstantfahrt, mit einem Technologiefaktor bewertet. Aus Tabelle 12 geht hervor, dass (bis Ende der 70er Jahre übliche) polumschaltbare Antriebe gegenüber der heute zum Einsatz kommenden Umrichtertechnologie deutliche Effizienzvorteile aufweisen. Antriebe mit Spannungsstellern (Thyristor-Regler bzw. Phasenanschnittsregler) waren ab Anfang der 1980er bis Mitte der 1990er bei Neuanlagen und Modernisierungen üblich und stellen bereits ein fast vierzigprozentiges Einsparpotential (beim Beschleunigen und Verzögern) gegenüber polumschaltbaren Antrieben dar.

Tabelle 12: Technologiefaktoren nach VDI 4707 Blatt 2
(Quelle: [44, S. 21])

Technologie	Technologiefaktor
Umrichter	0,34
Spannungssteller	0,67
Polumschaltung	1,8

Der genaue Rechengang ist Blatt 2 Anhang B zu entnehmen und stellt damit eine Alternative zur Referenzfahrt nach Blatt 1 dar.

3.3.2 DIN EN ISO 25745

Die Normenreihe DIN EN ISO 25745 enthält drei Teile. Für die vorliegende Arbeit sind die Teile 1 und 2 relevant.

3.3.2.1 Teil 1

Im September 2010 wurde der Entwurf der DIN EN ISO 25745-1 herausgegeben [46]. Er stellt im Anhang ergänzend ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Energieverbrauchs von Aufzügen bereit. Es wird dabei betont, dass dieses Verfahren auf Durchschnittsfaktoren und Schätzwerten beruht und zum Einsatz kommen kann, wenn „ein vollständigeres oder geeigneteres Verfahren nicht zur Verfügung steht.“ Es kann angenommen werden, dass dies auch gilt, wenn keine ausreichenden Daten zur Anwendung der VDI 4707 Blatt 1 oder 2 vorliegen.

Unter folgenden Voraussetzungen kann das vereinfachte Verfahren angewandt werden:

- gleichmäßige Belegung des Gebäudes über alle Stockwerke,
- Anzahl der Halte in Aufwärtsrichtung entspricht jener in Abwärtsrichtung,
- keine Energierückspeisung vorgesehen,
- keine Eingriffe einer „Verkehrsfluss-Steuerung“,

- keine signifikante Anzahl an Halten unterhalb der Hauptzugangsebene (z.B Erdgeschoß),
- keine zusätzliche Energie für das Durchfahren einer „Express-Zone“ berücksichtigt.

Es gilt dann folgende Gleichung 3.3 für die während eines Jahres von einem Aufzug verbrauchte Energie E_L in kWh⁴²:

$$E_L = \frac{S \times P \times t_h}{4} + E_{Standby}$$

3.3

Dabei sind:

- S die Anzahl der Fahrten pro Jahr,
- P die Nennleistung des Antriebsmotors in kW,
- t_h die Fahrtzeit⁴³ zwischen der Hauptzugangsebene und dem höchsten angefahrenen Stockwerk,
- $E_{Standby}$ der jährliche Stromverbrauch im Stillstandsbetrieb.

Vorgeschlagen wird im oben genannten Entwurf der Norm, dass der Wert für S vom Planer bzw. dem Architekten bereitgestellt werden oder bei einer vergleichbaren Anlage einem Fahrtenzähler entnommen werden kann. P wird vom Hersteller des Aufzugs bereitgestellt bzw. kann vom Typenschild des Antriebsmotors abgelesen werden. t_h und $E_{Standby}$ können ebenso vom Planer bzw. vom Architekten bereitgestellt oder bei einer vergleichbaren Anlage gemessen werden.

Die Abschätzung des Energieverbrauchs nach Gleichung 3.3 wird auch im CIBSE Guide D: 2010 (Transportation systems in buildings) beschrieben [32, S. 13–5]. Die dortigen Ausführungen

⁴² Bei Gleichung 3.3 ist zu beachten, dass die Energie zunächst in Ws umzurechnen ist, wenn die Fahrtzeit typischerweise in Sekunden angegeben wird.

⁴³ von dem Augenblick an, in dem die Türen geschlossen wurden, bis zu dem Augenblick, in dem sie sich wieder öffnen

verdeutlichen, dass die o.g. Annahmen auch darauf basieren, dass die Kabine regelmäßig mit ca. 40 bis 50 % der Nennlast beladen ist. Ein abwärts fahrender Aufzug mit Halblastausgleich benötigt während der Fahrt bei konstanter Geschwindigkeit (Nenngeschwindigkeit) bei einer Beladung von nur ca. 25 % etwa 50 bis 60 % mehr Energie als bei mindestens halber Ausnutzung der Nennlast. Im Gegenzug blieben bei einer Ausnutzung von ca. 75 % abwärts und geringer Beladung aufwärts jegliche Potentiale einer Energierückspeisung unberücksichtigt. Die Größenordnung der möglichen Energierückspeisung läge in diesem Fall in der Höhe des Energieverbrauchs bei nur hälftiger Ausnutzung der Nennlast.

Die DIN EN ISO 25745-1 wurde im Februar 2013 freigegeben (vgl. [47]) und enthält allgemeine Begriffsdefinitionen sowie Vorgaben zu den Messpunkten für das im folgenden Abschnitt beschriebene Messverfahren nach Teil 2 der Normenreihe. Der oben beschriebene Ansatz (Gleichung 3.3) entfällt. Die Nutzbarkeit bleibt aus Sicht des Autors unter den beschriebenen Randbedingungen jedoch weiterhin gegeben (vgl. [32, S. 13–5]) und wird deshalb an dieser Stelle beibehalten.

3.3.2.2 Teil 2

Im Oktober 2015 wurde die DIN EN ISO 25745-2 freigegeben [48]. Es wird ein zur VDI 4707 Blatt 1 vergleichbarer Ansatz verfolgt, den Energiebedarf des Aufzugs spezifisch über die Energiemenge pro kg Traglast und zurückgelegtem Fahrweg zu ermitteln. Auf Details zur Berechnung wird in diesem Abschnitt deshalb nicht erneut eingegangen.

Ein wichtiger Unterschied zur VDI 4707 Blatt 1 besteht in der Beschreibung der Nutzungskategorien. Während bei VDI 4707 Blatt 1 die wesentliche Definition über die durchschnittliche Fahrt- und Stillstandszeit vorgenommen wird, enthält Anhang A der DIN EN ISO 25745-2 eine typische Anzahl von Fahrten für jede Nutzungskategorie. Zudem wird eine weitere Nutzungskategorie

6 (äußerst hoch) hinzugefügt (vgl. Tabelle 13). Die Nutzungskategorien 1 bis 5 sind mit denen der VDI 4707 Blatt 1 vergleichbar. Es ist somit auf diesem Wege eine Übersetzung der Fahrt- und Stillstandszeiten in die Anzahl der Fahrten pro Tag möglich. Betrachtet werden bei den späteren Auswertungen der Messkampagne die Nutzungskategorien 2 bis 4.

Tabelle 13: Nutzungskategorien für Aufzüge nach DIN EN ISO 25745-2 (Quelle: [48, S. 17])

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5	6
Nutzungsintensität/Häufigkeit	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch
Anzahl der Fahrten je Tag (n_d)	50	125	300	750	1 500	2 500
Typischer Bereich	(< 75)	(75 bis < 200)	(200 bis < 500)	(500 bis < 1 000)	(1 000 bis < 2 000)	(≥ 2 000)
Typische Gebäude und Nutzung (Betriebstage je Jahr)	<ul style="list-style-type: none"> – Wohnhaus mit bis zu 6 Wohneinheiten (360 d) – Pflegeeinrichtung (360 d) – kleines Büro- oder Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb (260 d) – U-Bahn-Stationen (360 d) 	<ul style="list-style-type: none"> – Wohnhaus mit bis zu 20 Wohneinheiten (360 d) – kleines Büro- oder Verwaltungsgebäude mit 2 bis 5 Etagen (260 d) – kleine Hotels (360 d) – Parkplätze von Bürogebäuden (260 d) – allgemeine Parkplätze (360 d) – Bahnhöfe (360 d) – Bibliothek (312 d) – Unterhaltungszentren (360 d) – Stadien (zeitweilig) 	<ul style="list-style-type: none"> – Wohnhaus mit bis zu 50 Wohneinheiten (360 d) – mittelgroßes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit bis zu 10 Etagen (260 d) – mittelgroßes Hotel (360 d) – Flughäfen (360 d) – Universität (260 d) – kleines Krankenhaus (360 d) – Einkaufszentrum (360 d) 	<ul style="list-style-type: none"> – Wohnhaus mit bis zu 50 Wohneinheiten (360 d) – großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit mehr als 10 Etagen (260 d) – großes Hotel (360 d) 	<ul style="list-style-type: none"> – sehr großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit einer Höhe von über 100 m (260 d) 	<ul style="list-style-type: none"> – sehr großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit einer Höhe von über 100 m (260 d)
Typische Nenngeschwindigkeit	0,63 m/s	1,00 m/s	1,60 m/s	2,50 m/s	5,00 m/s	5,00 m/s

Der Energiebedarf für Bereitschaft und Stillstand wird in drei Phasen unterteilt als prozentualer Anteil an der gesamten Stillstandszeit (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Zeitverhältnisse der Stillstandszeiten nach DIN EN ISO 25745-2 (Quelle: [48, S. 12])

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5-6
Betriebsmodus	Anteil [%]				
R _{id} (Bereitschaft)	13	23	36	45	42
R _{st5} (Stillstand nach 5 Minuten)	55	45	31	19	17
R _{st30} (Stillstand nach 30 Minuten)	32	32	33	36	41

Die Abhängigkeit der Stillstandszeiten von der Nutzungskategorie wird in Tabelle 14 deutlich. Während kurze Stillstandszeiten (weniger als fünf Minuten) bei den höher frequentierten Nutzungskategorien (z.B. in Bürogebäuden) besonders häufig auftreten, verhält es sich bei längeren Stillstandszeiten (bis zu 30 Minuten) bei niedriger frequentierten Nutzungskategorien (z.B. in Wohngebäuden) genau umgekehrt. Die durchschnittlichen Stillstandszeiten nach VDI 4707 Blatt 1 geben im Vergleich nur die Tendenz der in Tabelle 14 aufgeführten Anteile von unterschiedlich lang andauernden Stillstandszeiten wieder (vgl. Abschnitt 3.3.1.1).

3.3.3 SIA 380/4

Zur Berechnung des Energiebedarfs von Aufzügen wird in der Richtlinie SIA 380/4 [49] des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) eine Methode vorgeschlagen, die weniger Eingangsdaten als die VDI 4707 benötigt, jedoch nicht so stark vereinfacht wie der oben beschriebene Ansatz im ursprünglichen Entwurf der DIN EN ISO 25745-1.

Nach Gleichung 3.4 ergibt sich der jährliche Energiebedarf E_A eines Aufzugs aus dem durchschnittlichen Energiebedarf pro Fahrt E_F , der Anzahl F der Fahrten pro Jahr und dem elektrischen Energiebedarf für Hilfsbetriebe⁴⁴ E_{AH} . Als wesentlicher Unterschied zu den oben beschriebenen Normen und Richtlinien ist hierin der Energiebedarf für den Stillstand nicht berücksichtigt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Leistungsaufnahme für Hilfsbetriebe im Stillstand 150 bis 200 W und während der Fahrt 400 bis 500 Watt betragen kann.

$$E_A = (F \times E_F) + E_{AH}$$

3.4

Die Anzahl der Fahrten ergibt sich nach Gleichung 3.5 aus der Anzahl der Benutzer B im Gebäude und der Anzahl der Fahrten pro Benutzer pro Jahr F_B . Dabei wird angenommen, dass die Kabine durchschnittlich mit 20 % der maximal zulässigen Personenzahl P_{NL} belegt ist.

$$F = \frac{B \times F_B}{0,2 \times P_{NL}}$$

3.5

Zur Berechnung des Energiebedarfs pro Fahrt E_F ist zunächst die maximale Masse M_K der Kabine (bei voller Beladung, d.h. bei maximal zulässiger Personenanzahl P_{NL}) und die Masse des Gegengewichts M_G zu bestimmen. Diese ergeben sich aus den Gleichungen 3.6 und 3.7, wobei die durchschnittliche Masse pro

⁴⁴ Unter „Hilfsbetriebe“ werden nach SIA 380/4 Steuerung, Magnetbremse und Ventilatoren zur Kühlung dieser Einheiten verstanden.

Person mit 75 kg angenommen wird und das Gegengewicht als Halblastausgleich ausgelegt ist. Der Faktor x wird vom angenommenen Leergewicht der Kabine bestimmt (bei normalen Personenaufzügen zwischen 1,5 und 2, bei Hochgeschwindigkeitsaufzügen zwischen 2 und 3).

$$M_K = P_{NL} \times 75 \times x$$

3.6

$$M_G = M_K + 0,5 \times (P_{NL} \times 75)$$

3.7

Schließlich sind noch Annahmen zu den Wirkungsgraden des Antriebs, der Antriebsregelung, einer evtl. vorhandenen Energierückspeisung (Rekuperation) und der Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der maximalen Förderhöhe h_{max} zu treffen (Tabelle 15 bis Tabelle 18).

Tabelle 15: Wirkungsgrad η_A des Antriebs (Quelle: [49])

Schneckengetriebe + Asynchronmotor	50 %
Planetengetriebe + Asynchronmotor	60 %
getriebelos + Synchronmotor + Frequenzumrichter	65 %
Hydraulikaufzug	50 %

Tabelle 16: Wirkungsgrad η_{Re} der Regelung (Quelle: [49])

Feinabsteller	70 %
Spannungsregelung	80 %
Frequenzumrichter	100 %
Hydraulikaufzug	100 %

Tabelle 17: Wirkungsgrad η_{Re} der Rekuperation (Quelle: [49])

mit Rekuperation	50 %
ohne Rekuperation	0 %

Tabelle 18: Geschwindigkeit v_A in Abhängigkeit der maximalen Förderhöhe h_{max} (Quelle: [49])

hoher Komfort (möglichst kurze Fahrzeit)	$h_{max} / 20 \text{ s}$
mittlerer Komfort	$h_{max} / 25 \text{ s}$
bescheidener Komfort	$h_{max} / 30 \text{ s}$

Gleichung 3.8 ergibt nun den Energiebedarf pro Fahrt E_F für den Treibscheibenaufzug (in der SIA 380/4 auch Traktionsaufzug genannt).

$$E_F = P_{NL} \times 75kg \left[(0,175 \times g_e \times h_{eff}) + \left((x - 0,4) \times \frac{v^2}{2} \right) \right] \times (1 - \mu_{Rk}) / (\mu_{Rk} \times \mu_A)$$

3.8

Die Richtlinie SIA 380/4 wurde 2006 freigegeben. Der darin wiedergegebene Berechnungsansatz wurde gegenüber 1996

vereinfacht. Hinzu gekommen ist zudem eine für alle Berechnungsverfahren hilfreiche Aufstellung der Fahrten pro Benutzer und Fahrten pro m² Geschoßfläche (GF) in Abhängigkeit der Raumnutzung bezogen auf ein Jahr (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Anzahl der Fahrten pro Jahr je nach Benutzung (Quelle: angelehnt an [50, S. 58])

Raumnutzung	Benutzer	Fahrten pro Benutzer	Fahrten pro m ² GF
Wohnraum, Schlafzimmer	Bewohner	1.500	40
Hotelzimmer	Bett	1.000	100
Einzel-, Gruppenbüro	Arbeitsplatz	1.400	100
Großraumbüro	Arbeitsplatz	1.400	140
Sitzungszimmer	Sitzplatz	500	170
Schulzimmer	Sitzplatz	800	270
Hörsaal	Sitzplatz	2.000	2.000
Spezialräume	Sitzplatz	1.200	500
Restaurant	Sitzplatz	2.500	2100
Selbstbedienungsrest.	Sitzplatz	1.600	1.300
Küche zu Restaurant	Arbeitsplatz	600	60
Küche zu Selbstbed.	Arbeitsplatz	500	50
Bettzimmer	Bett	2.900	200
Stationszimmer	Arbeitsplatz	600	600
Produktion (grob)	Arbeitsplatz	1.000	50
Produktion (fein)	Arbeitsplatz	1.000	50
Lagerhalle	Arbeitsplatz	1.000	100
Parkhaus	Parkplatz	800/3.100	30/80

3.3.4 VDI 4707 Blatt 1 vereinfachte Variante

Ergänzend wird vom Autor eine weitere vereinfachte Berechnungsmöglichkeit des Energiebedarfs hergeleitet. Diese ergibt sich durch geeignetes Umformen der Rechenvorschriften aus der Richtlinie VDI 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.3.1.1). Diese nennt Gleichungen für die tägliche Fahrzeit t_{Fahren} , die tägliche zurückge-

legte Fahrstrecke s_{nenn} und den täglichen Energiebedarf für das Fahren E_{Fahren} (Gleichungen 3.9 bis 3.11).

$$t_{Fahren} = \frac{0,5 \times F_H \times A_F}{v}$$

3.9

Die tägliche Fahrzeit ergibt sich damit aus der durchschnittlichen Förderhöhe, der Anzahl der Fahrten pro Tag A_F und der Nenngeschwindigkeit v .

$$s_{nenn} = t_{Fahren} \times v = 0,5 \times F_H \times A_F$$

3.10

Aus der täglichen Fahrstrecke s_{nenn} , dem spezifischen Fahrtbedarf $E_{Fahren, spez}$ und der Nennlast Q ergibt sich der Energiebedarf für das Fahren pro Tag E_{Fahren} .

$$E_{Fahren} = E_{Fahren, spez} \times s_{nenn} \times Q$$

3.11

Mit dem spezifischen Fahrtbedarf $E_{Fahren, spez}$, der sich u.a. aus dem Energiebedarf der Referenzfahrt E_{Ref} nach VDI 4707 Blatt 1 ergibt, lässt sich der tägliche Energiebedarf für das Fahren E_{Fahren} (für einen Aufzug) nach Gleichung 3.12 ermitteln.

$$E_{Fahren} = 0,7 \times E_{Ref} \times \frac{1}{4} A_F$$

3.12

Gleichung 3.12 enthält somit einen anlagenspezifischen Teil, der sich aus der Referenzfahrt der zu betrachteten Anlage ergibt,

sowie einen gebäudespezifischen Teil in Form der Anzahl der Fahrten pro Tag. (0,7 ist der anzunehmende Lastfaktor bei Treib-
scheibenaufzügen mit Halblastausgleich.)

Die Anzahl der Fahrten kann beispielsweise nach DIN EN ISO 25745-2 ermittelt werden (vgl. Abschnitt 3.3.2.2).

Der tägliche Energiebedarf für Standby ergibt sich aus Gleichung 3.13 mit einer angenommenen, täglichen Stillstandszeit.

$$E_{Standby} = L_{Standby} \times t_{Standby} \tag{3.13}$$

Die angenommene, tägliche Stillstandszeit kann beispielsweise der entsprechenden Tabelle in der VDI Richtlinie 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.3.1.1) entnommen werden.

Somit ergibt sich mit der Anzahl der Betriebstage pro Jahr d_{Jahr} der jährliche Energiebedarf in kWh⁴⁵ (Gleichung 3.14):

$$E_{Jahr} = (E_{Fahren} \times E_{Standby}) \times d_{Jahr} / 1.000 \tag{3.14}$$

Zur Anwendung dieses Rechenverfahrens sind folgende Randbedingungen und Einschränkungen zu berücksichtigen:

- a) durchschnittlich halbe Auslastung der Kabine,
- b) durchschnittlicher Fahrweg einer Fahrt entspricht der halben Förderhöhe,
- c) Anzahl der Aufwärts- und Abwärtsfahrten gleichen sich aus,

⁴⁵ Anpassung mit Teilung durch 1.000, da in den vorausgehenden Gleichungen mit Wh gerechnet wird.

d) keine Berücksichtigung unterschiedlicher Stillstandsmodi.

Werden die genannten Annahmen und Einschränkungen berücksichtigt, so ist es möglich, den Jahresenergiebedarf in einer frühen Planungsphase abzuschätzen. Neben den oben genannten Quellen für die Anzahl der Fahrten pro Tag und der täglichen Stillstandszeit ist der Energiebedarf der Referenzfahrt für eine vergleichbare Anlage zu ermitteln. Dieser kann vom Hersteller bzw. Lieferanten des Aufzugs übermittelt oder auf Basis einer Messung bei einer vergleichbaren Anlage angegeben werden. Entscheidend hierfür ist jedoch, dass insbesondere die Technologie (Antriebsart, Regelung, Steuerung) und die Förderhöhe mit jenen der zu planenden Anlage übereinstimmen. Die Anzahl der Fahrten pro Tag und die durchschnittliche Stillstandszeit pro Tag können alternativ zu den oben genannten Tabellen auch aus anderen nachvollziehbaren Quellen stammen (z.B. durch Messungen, Beobachtungen und Zählungen in vergleichbaren Gebäuden).

Die Anwendung der oben hergeleiteten Gleichung 3.14 sei an einem kurzen Beispiel erläutert:

Für einen geplanten Personenaufzug in einem gemischt genutzten Gebäude mit Wohnungen und Arztpraxen (Nennlast 630 kg, Nenngeschwindigkeit 1,0 m/s, 5 Haltestellen bei einer Förderhöhe von 12 m) werden vom Architekten 300 Fahrten pro Tag angenommen. Aus diesen Angaben lässt sich eine tägliche Fahrtzeit von 0,5 Stunden (und damit eine tägliche Stillstandszeit von 23,5 Stunden) abschätzen. Das Szenario fällt somit in die Nutzungskategorie 2 (nach VDI 4707 Blatt 1).

Nach den Angaben des Herstellers wurde bei einer baugleichen Anlage ein Energiebedarf in Höhe von 20 Wh für die Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1 gemessen. Somit ergibt sich nach Gleichung 3.15 der tägliche Energiebedarf für das Fahren:

$$E_{Fahren} = 0,7 \times 20 \times \frac{1}{4} \times 300 = 1.050 \text{ Wh/Tag}$$

3.15

Der Hersteller des Aufzugs gibt für die geplante Anlage eine Leistungsaufnahme im Stillstand von 90 W an. Daraus ergibt sich nach Gleichung 3.16 mit der täglichen Stillstandszeit von oben der tägliche Energiebedarf für den Stillstand:

$$E_{Standby} = 23,5 \times 90 = 2.115 \text{ Wh/Tag}$$

3.16

Bei angenommenen 365 Betriebstagen pro Jahr ergibt sich nach Gleichung 3.17 der geschätzte jährliche Energiebedarf für den geplanten Aufzug in kWh (Ergebnis gerundet):

$$E_{Jahr} = (1.050 + 2.115) \times \frac{365}{1000} = 1.155 \text{ kWh/Jahr}$$

3.17

Das vereinfachte Rechenbeispiel (mit plausiblen Eingangsgrößen innerhalb der Nutzungskategorie 2) wird sich später mit den Ergebnissen aus der Messkampagne (vgl. Abschnitt 3.5.3) plausibilisieren lassen.

3.3.5 Zwischenfazit

Allen in den vorigen Abschnitten beschriebenen Methoden der Normungs- und Richtlinienarbeit ist es gemeinsam, sich auf festgelegte Randbedingungen, insbesondere zur Nutzung, zu stützen. Abweichungen zu den später in der tatsächlichen Nutzungsphase auftretenden Energieverbräuchen sind möglich, weshalb vom Autor alternative Ansätze mit stärkerem Bezug zum

realen Gebäudebetrieb entwickelt wurden und in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Es fällt zudem auf, dass in der SIA 380/4 gegenüber VDI und DIN ein differenziert dargestellter Förderbedarf nach Raumnutzungen und Benutzergruppen angeboten wird (Zusammenfassung siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Wesentliche Eigenschaften und Inhalte relevanter Normen und Richtlinien zur Ermittlung des Energiebedarfs von Aufzügen im Vergleich zu den in dieser Arbeit in Abschnitt 3.4.1 entwickelten Methoden (Quelle: eigene Darstellung)

Norm/ Richtlinie/ Verfahren	Nutzungskategorien nach Fahrzeit	Nutzungskategorien nach Anzahl der Fahren	Berücksichtigung einzelner Komponenten	Unterscheidung von Nutzergruppen	Energieeffizienzklassen	vereinfachtes Verfahren	normierte Randbedingungen	reale Einsatz- bedingungen
VDI 4707 Blatt 1	x				x		x	
vereinfachtes Verfahren nach VDI 4707 Blatt 1 (vom Autor abgeleitet)						x	x	
VDI 4707 Blatt 2			x				x	
DIN EN ISO 25745 Teil 1 - Entwurf						x	x	
DIN EN ISO 25745 Teil 1							x	
DIN EN ISO 25745 Teil 2		x			x		x	(x)
SIA 380/4				x		x	x	
Wochen- messungen nach Abschnitt 3.4.1						(x)		x

3.4 Analyse des realen Gebäudebetriebs

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Methoden bzw. Verfahren zur Ermittlung des Energiebedarfs stützen sich nicht auf vordefinierte Randbedingungen (wie die in den vorigen Abschnitten behandelten Normen und Richtlinien), sondern dokumentieren die im Zeitraum der Methodenanwendung tatsächlich zutreffenden Betriebsbedingungen. Ziel ist es dabei, den realen Gebäudebetrieb bestmöglich abzubilden.

3.4.1 Wochenmessungen

Zwei vom Autor dieser Arbeit zusammen mit dem Industriepartner entwickelten Verfahren (vgl. [23]) ermöglichen es, Messungen über einen Zeitraum von einer Woche auf ein Betriebsjahr hochzurechnen. Die beiden Verfahren unterscheiden sich dadurch, ob zur Datengewinnung nur an Wochentagen mit Normalbelegung oder auch an Wochentagen mit reduzierter Belegung, z.B. am Wochenende, gemessen werden kann.

3.4.1.1 Ausführliches Verfahren (Kennwertebaukasten)

Es ist nicht ausreichend, eine Wochenmessung – insbesondere bei Nichtwohngebäuden – einfach auf die Gesamtwochenzahl eines Betriebsjahres hochzurechnen, da nicht von ganzjähriger Normalbelegung ausgegangen werden kann. Da die Anlagen bei Wenig- oder Nichtnutzung, z.B. in Urlaubszeiten, i.d.R. betriebsbereit gehalten werden, stellt sich die weitere Frage nach der Verteilung und der Höhe des Standby-Stromverbrauchs über das gesamte Betriebsjahr (insbesondere bei Anlagen, die verschiedene Standby-Modi realisieren, vgl. Abschnitt 3.3.1.2). Hierzu können bei Büro- und Verwaltungsgebäuden i.d.R. drei Nutzungsszenarien unterschieden werden:

- Normalbelegung (hier wird von 10 % Abwesenheit ausgegangen),
- Samstage, Sonntage, Feiertage,
- Tage mit reduzierter Belegung (Haupturlaubszeiten).

Dieser Ansatz erfordert dann wiederum zwei weitere zu ermittelnde Größen:

- die Anzahl (Tage) der oben genannten Nutzungsszenarien pro Jahr,
- die Differenzierung der verschiedenen Standby-Modi (z.B. nach VDI 4707 Blatt 2) und ihr Zeitanteil pro Tag eines Nutzungsszenarios.

Hierzu wurde vom Autor ein sogenannter „Kennwertebaukasten“ entwickelt, der das vollständige Nutzungsprofil mit den oben genannten Daten aufnehmen kann und damit den gesamten Jahresenergiebedarf berechnet (z.B. umsetzbar in Excel™, vgl. Anhang A).

Die Anwendung des Kennwertebaukastens erfordert zuvor die realitätsnahe, gebäudebezogene Ermittlung der oben genannten, erforderlichen Daten. Für jeden Anlagen-Gebäude-Typ ist hierzu ein Nutzungsprofil zu erstellen. Bei den Wochenmessungen müssen zusätzlich die Bewegungen des Aufzugs und die Leistungsaufnahmen in den jeweiligen Standby-Modi kontinuierlich geloggt werden. Hiermit wäre das Nutzungsprofil für die Normalbelegung, sowie Samstag und Sonntag erstellt. Für Tage mit reduzierter Belegung sind die anteiligen Wochentage, z.B. beim Betreiber des Gebäudes, zu erfragen und die anteiligen Zeitdauern der Standby-Modi abzuschätzen. Idealerweise sollte auch dieses Fahrprofil im Rahmen von Messungen ermittelt werden.

3.4.1.2 Vereinfachtes Verfahren (ohne Kennwertebaukasten)

Sind Wochenmessungen nur zu Zeiten einer Normalbelegung (hier mit höchstens 10 % angenommener Abwesenheit) und an einem Wochenende möglich, kann ein alternatives Schätzverfahren für Nichtwohngebäude zum Einsatz kommen. Zunächst wird nach Gleichung 3.18 ein durchschnittlicher Tagesenergieverbrauch EV_r für reguläre Werktage mit Normalbelegung ermittelt (arithmetisches Mittel der einzelnen Tagesenergieverbräuche EV_i der fünf Werktage). Die Hochrechnung auf das Jahr (EV_R) erfolgt mit angenommenen 52 Wochen und fünf Werktagen pro Woche abzüglich der Anzahl g von Urlaubs- und Feiertagen⁴⁶ (Gleichung 3.19). Die Urlaubstage werden als Haupturlaubszeiten angenommen, d.h. mit deutlich reduzierter Belegung des Gebäudes.

$$EV_r = \frac{\sum_{i=1}^5 EV_i}{5} \quad \text{mit } i = 1, \dots, 5$$

3.18

$$EV_R = EV_r * 5 * (52 - g)$$

3.19

Zur Berechnung der Jahresenergieverbräuche für Samstag (EV_{SA}) und Sonntag (EV_{SO}) werden zunächst zwei Faktoren (f_{sa} und f_{so}) nach den Gleichungen 3.20 und 3.21 gebildet (Verhältnis der Verbräuche von jeweils einem Samstag und einem Sonntag zu einem durchschnittlichen, regulären Wochentag mit typischen Größenordnungen zwischen 4 und 6 %).

⁴⁶ Diese sind standortspezifisch zu bestimmen, z.B. mit <https://www.schnelle-online.info/Arbeitstage-Lehrer.html> (zuletzt geprüft am 28.06.2018).

$$f_{sa} = EV_{sa}/EV_r \tag{3.20}$$

$$f_{so} = EV_{so}/EV_r \tag{3.21}$$

Die Jahresverbräuche für Samstage (EV_{SA}) und Sonntage (EV_{SO}) ergeben sich nun nach den Gleichungen 3.22 und 3.23 aus dem Jahresverbrauch der Werktage (ohne Berücksichtigung von Haupturlaubszeiten und Feiertagen) sowie dem jeweiligen Faktor (f_{sa} bzw. f_{so}).

$$EV_{SA} = EV_r * 5 * 52 * f_{sa} \tag{3.22}$$

$$EV_{SO} = EV_r * 5 * 52 * f_{so} \tag{3.23}$$

Ein Werktag mit geringerer Belegung wird mit einem Verbrauch (EV_g) als arithmetisches Mittel der Verbräuche von Samstag und Sonntag angenommen (Gleichung 3.24).

$$EV_g = (EV_{sa} + EV_{so})/2 \tag{3.24}$$

Dieser wird nach Gleichung 3.25 mit der entsprechenden Anzahl der belegungsreduzierten Tage (g) auf das Jahr (EV_G) hochgerechnet (z.B. 35 Tage mit 25 Urlaubs- und 10 Feiertagen).

$$EV_G = EV_g * g$$

3.25

Um schließlich zum Jahresgesamtverbrauch (EV_J) zu kommen, ist abschließend folgende Summe zu bilden (Gleichung 3.26):

$$EV_J = EV_R + EV_{SA} + EV_{SO} + EV_G$$

3.26

Wenn sich dann später bei Untersuchungen (wie in Abschnitt 3.5 durchgeführt) signifikante Abweichungen zwischen VDI 4707 Blatt 1 und Wochenmessungen im realen Betrieb ergeben, spielt letztlich auch die Erwartungshaltung, die Fragestellung und die Perspektive des jeweiligen Anwenders der Methoden eine Rolle zur qualifizierten Beurteilung der Ergebnisse. Dazu ist zusammenfassend festzuhalten:

- Wenn es um das Ziel geht, die Effizienz und Qualität von Produkten unter normierten Randbedingungen zu beschreiben und zu vergleichen, z.B. aus Sicht des Herstellers von Aufzugsanlagen bzw. Komponenten, bietet die Richtlinienreihe VDI 4707 ein methodisch nachvollziehbares und anerkanntes Werkzeug zur Erstellung eines Energieeffizienzlabels.
- Wenn es darum geht, den Energiebedarf eines Aufzugs unter realitätsnahen, möglicherweise komplexen, Nutzungsszenarien zu prognostizieren, vor allem aus Sicht des Betreibers, der Energiekosten möglichst präzise, z.B. für die Lebenszykluskostenrechnung, vorhersagen muss, sollen die zuletzt erarbeiteten realitätsnahen Methoden einen

Mehrwert liefern; im Idealfall mit Messungen über alle Wochentage mit normaler und reduzierter Belegung.

3.4.2 Auswertung von Produktdokumentationen

Zur Berechnung von Energiekennwerten auf Basis technischer Daten (u.a. Wirkungsgrade von Komponenten, Energiebedarf verschiedener Standby-Modi etc.) nach VDI 4707 Blatt 2 (vgl. Abschnitt 3.3.1.2) sind technische Dokumentationen der Komponentenhersteller heranzuziehen. Eine Verpflichtung der Hersteller zur Veröffentlichung besteht zur Zeit nicht. Erste Hersteller tragen jedoch bereits zur Anwendbarkeit der VDI 4707 Blatt 2 für die Planung von Aufzügen bei – idealerweise mit sehr hohem Detaillierungsgrad bis hin zu aller kleinsten Komponenten und Bauteilen, wie z.B. Befehlsgeber, Standanzeigen und Quittungsleuchten.⁴⁷

3.4.3 Etablierte Verfahren der Verkehrsplanung

Unter Verkehrsplanung versteht man in diesem Kontext die für das jeweilige Gebäude bedarfsgerechte Planung von Förderanlagen (hier Personenaufzügen) hinsichtlich ihrer Lage im Gebäude, ihrer Anzahl und ihrer Dimensionierung (Nennlast, Fahrgeschwindigkeit etc.). Bei Neubauten sind die Freiheitsgrade insbesondere in frühen Planungsphasen am größten (vgl. [28] [51] [52] und ergänzend z.B. [53] [54]). Hierzu haben sich zur Planung (Neubau) bzw. Anpassung (Bestandsgebäude) der Förderleistung an die zu erwartenden Verkehrsströme (Personenaufkommen) drei wesentliche Verfahren etabliert:

⁴⁷ vgl. <https://www.ws-schaefer.de/de/produkte/norms/vdi-4707-blatt-22013-10/> (ausgewähltes Beispiel, zuletzt geprüft am 02.07.2018)

- Umlaufzeitkalkulation für den Spitzenverkehr aufwärts (up peak), z.B. bei der morgendlichen Befüllung eines Bürogebäudes,
- Umlaufzeitkalkulation für den Spitzenverkehr aufwärts, abwärts und zwischen den Etagen (general analysis), z.B. auch geeignet für Spitzenverkehrszeiten während der Mittagspause in Bürogebäuden,
- Simulation mit Modellierung des gesamten Prozesses für alle denkbaren Verkehrssituationen.

In den folgenden Abschnitten werden diese beschrieben und auf ihre Eignung zur Berechnung des Energiebedarfs geprüft. Ergänzend sei zur Verkehrsplanung und Dimensionierung von Aufzügen auf die Normen DIN 15306 und DIN 15309 hingewiesen ([55] [56]). Hierin werden zur Orientierung u.a. typische Maße, Tragfähigkeiten und Nenngeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Nutzung in Wohn- und Nichtwohngebäuden katalogisiert.

3.4.3.1 Umlaufzeitkalkulation (up peak und general analysis)

Mit der Umlaufzeitkalkulation (up peak) wird die durchschnittliche Fahrzeit (RTT , Umlaufzeit) berechnet, die eine Kabine benötigt, um bei Aufwärtsfahrt alle Haltestellen zu bedienen und anschließend ohne Zwischenhalt wieder zur Haupthaltestelle (Eingang, Lobby) zurück zu kehren. Nach Gleichung 3.27 sind hierfür die Fahrzeit von einer zur nächsten Etage ohne Türöffnung (t_v), die Verlustzeit eines Zwischenhaltes (t_s), die durchschnittlich am höchsten angefahrene Haltestelle (H), die durchschnittliche Anzahl der Zwischenhalte (S), die Anzahl der Personen in der Kabine (P) sowie die Zeit für das Ein- und Aussteigen (t_p) wesentliche Eingangsgrößen (Zeiten in Sekunden).

$$RTT = 2 \times H \times t_v + (S + 1) \times t_s + 2 * P \times t_p$$

3.27

Die Herleitung der RTT sowie die Ermittlung von H und S werden z.B. in [52, S. 99–109] ausführlich beschrieben. Als Ergebnis zur Einschätzung der möglichen Förderleistung wird aus der RTT die 5-Minuten-Förderkapazität ($HC5$) berechnet [52, S. 97–98]. Hierzu ist das Intervall (INT) anhand der Anzahl der in einer Gruppe vorhandenen Aufzüge (L) nach Gleichung 3.28 zu bestimmen. Bei einem Einzelaufzug gilt $INT = RTT$. In anderen Worten ausgedrückt, bedeutet das Intervall den durchschnittlichen Zeitabstand, innerhalb dessen eine Kabine die Lobby verlässt und ist nicht mit der durchschnittlichen Wartezeit zu verwechseln.

$$INT = \frac{RTT}{L}$$

3.28

Mit der durchschnittlichen Personenzahl (P), die von einer Kabine aufgenommen wird, lässt sich bestimmen, wie viele Personen von der Aufzugsanlage in fünf Minuten transportiert werden können (Gleichung 3.29)⁴⁸.

$$HC5 = \frac{300 \times P}{INT}$$

3.29

Bezogen auf die Normalbelegung eines Gebäudes (Anzahl der Personen U) lässt sich bestimmen, wie viel Prozent der Normalbelegung ($\%Pop$) von der Aufzugsanlage innerhalb von fünf Minuten transportiert werden können (Gleichung 3.30).

$$\%Pop = \frac{HC5 \times 100}{U}$$

3.30

⁴⁸ bei durchgängiger Berechnung in Sekunden (5 Minuten = 300 Sekunden)

Werden H und S für Gleichung 3.27 alternativ mit Hilfe der Poisson-Verteilung ermittelt, werden neben dem Spitzenverkehr aufwärts weitere real auftretende Situationen (Spitzenverkehr abwärts und Verkehr zwischen den Etagen) berücksichtigt, was auch als „general analysis“ bezeichnet wird [52, S. 110–112]. Dies wird im Folgenden beschrieben:

Zu betrachten sind dabei, als wesentlicher Unterschied zur vorigen Ermittlung von H und S , beide Fahrtrichtungen, d.h. in einem Umlauf kann ein Stockwerk auch zweimal angefahren werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Aufzug in einem Stockwerk hält, entspricht eins minus der Wahrscheinlichkeit, dass er in einem Stockwerk nicht hält. Vier mögliche Fälle sind dann zu berechnen:

- die Wahrscheinlichkeit eines Haltes in der untersten Haltestelle (Gleichung 3.31),
- die Wahrscheinlichkeiten von Zwischenhalten bei Aufwärtsfahrt (Gleichung 3.32),
- die Wahrscheinlichkeit eines Haltes in der obersten Haltestelle (Gleichung 3.33),
- die Wahrscheinlichkeiten von Zwischenhalten bei Abwärtsfahrt (Gleichung 3.34).

$$pS_1 = 1 - \prod_{a=2}^N P_{a1} \times \prod_{b=2}^N P_{1b}$$

3.31

$$pUS_j = 1 - \prod_{a=1}^{j-1} P_{aj} \times \prod_{b=j+1}^N P_{jb}$$

mit $2 \leq j \leq N-1$

3.32

$$pS_N = 1 - \prod_{a=1}^{N-1} P_{aN} \times \prod_{b=1}^{N-1} P_{Nb}$$

3.33

$$pDS_j = 1 - \prod_{a=j+1}^{j-1} P_{aj} \times \prod_{b=1}^{j-1} P_{jb}$$

mit $2 \leq j \leq N-1$

3.34

Schließlich ergibt sich aus der Addition der Gleichungen 3.31 bis 3.34 die gesamte Anzahl der Halte S (Gleichung 3.35).

$$S = pS_1 + \left(\sum_{j=2}^{N-1} pUS_j + pDS_j \right) pS_n$$

3.35

Es ist unwahrscheinlich, dass ein Aufzug in einem Umlauf immer die oberste und die unterste Haltestelle anfährt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Wahrscheinlichkeit für das Anfahren der obersten und untersten Umkehrhaltestelle zu bestimmen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stockwerk die oberste Umkehrhaltestelle darstellt, ergibt sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten, dass ein Ruf aus einem niedriger liegenden Stockwerk zu diesem Stockwerk vorliegt sowie dass keine Rufe überhalb dieses Stockwerks vorliegen (Gleichungen 3.36 bis 3.38).

$$pH_1 = \prod_{a=1}^N \prod_{b=1}^N P_{ab} \tag{3.36}$$

$$pH_j = \left(1 - \prod_{a=1}^{j-1} P_{aj} \prod_{b=1}^{j-1} P_{jb} \right) \times \left(\prod_{a=1}^N \prod_{b=j+1}^N P_{ab} \prod_{a=j+1}^N \prod_{b=1}^j P_{jb} \right) \tag{3.37}$$

mit $2 \leq j \leq N-1$

$$pH_N = 1 - \prod_{a=1}^{N-1} P_{aN} \prod_{b=1}^{N-1} P_{Nb} \tag{3.38}$$

Aus den Wahrscheinlichkeiten, mit denen jedes Stockwerk angefahren wird, ergibt sich das durchschnittlich am höchsten angefahrene Stockwerk H (Gleichung 3.39).

$$H = \sum_{j=1}^N (j pH_j) \tag{3.39}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stockwerk die unterste Umkehrhaltestelle darstellt, ergibt sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten, dass ein Ruf aus einem höher liegenden Stockwerk zu diesem Stockwerk vorliegt sowie dass keine Rufe unterhalb dieses Stockwerks vorliegen (Gleichungen 3.40 bis 3.42).

$$pL_1 = 1 - \prod_{a=2}^N P_{a1} \prod_{b=2}^N P_{1b} \quad 3.40$$

$$pL_j = \left(1 - \prod_{a=j+1}^N P_{aj} \prod_{b=j+1}^N P_{jb} \right) \times \left(\prod_{a=1}^N \prod_{b=1}^{j-1} P_{ab} \prod_{a=1}^{j-1} \prod_{b=j}^N P_{ab} \right)$$

mit $2 \leq j \leq N-1$

3.41

$$pL_N = \prod_{a=1}^N \prod_{b=1}^N P_{ab}$$

3.42

Aus den Wahrscheinlichkeiten, mit denen jedes Stockwerk angefahren wird, ergibt sich das durchschnittlich am niedrigsten angefahrene Stockwerk L (Gleichung 3.43).

$$L = (N + 1) - \sum_{j=1}^N [(N + 1) - j] pL_j$$

3.43

Generell ist bei den zuvor beschriebenen Verfahren zur Umlaufzeitkalkulation zu berücksichtigen, dass die zur Verfügung stehende Kabinenkapazität (P) als limitierende Größe vorab festzulegen ist. Die in den Gleichungen 3.31 bis 3.43 herangezogenen Wahrscheinlichkeiten basieren gleichermaßen auf der Poisson-Verteilung, wie sie für die im folgenden Kapitel beschriebene Simulation herangezogen wird.

Fazit zur Umlaufzeitkalkulation: Die beiden zuvor beschriebenen Methoden werden bis heute in der Aufzugsplanung genutzt [57], und insbesondere mit der „general analysis“ kann zur Planung der Förderkapazität der ermittelte *HC5*-Wert (Gleichung 3.29) als Zielwert und damit als brauchbarer Anhaltspunkt herangezogen werden. Für die Prognose des Energiebedarfs sind die beiden zuvor beschriebenen Methoden jedoch nicht ausreichend, weil sie keine Aussagen über die Anzahl der Fahrten über einen längeren Betrachtungszeitraum, wie z.B. 24 Stunden, liefern können. Dies ist jedoch mit Simulation möglich, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

3.4.3.2 Simulation der Verkehrsströme

Die Simulation ist ein geeignetes Analyseinstrument, das zur Auslegung der Förderkapazität von Aufzügen bei Neuanlagen sowie zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit bestehender Aufzüge herangezogen werden kann. Simulation kann auch als eine Technik verstanden werden, die den zeitlichen Ablauf in einem realen System imitiert, um Erkenntnisse über interessierende Größe zu erlangen [58, S. 4]. Die Modellierung von Verkehrsströmen in Gebäuden erfordert eine dynamische, diskrete Simulation. Ein in der Industrie weltweit etabliertes und wissenschaftlich dokumentiertes Hilfsmittel steht mit der Simulationssoftware „Elevate™“ von Peters Research Ltd⁴⁹ zur Verfügung.

Simulation setzt die Kenntnis der typischen Verkehrsströme des betrachteten Gebäudes voraus. Verkehrsströme werden durch Zählungen vor Ort erhoben. Neben der manuellen, handschriftlich dokumentierten Zählung ist die softwaregestützte Zählung möglich, die z.B. als zusätzliches Tool in Elevate™ verfügbar ist. Zu erfassen sind die Personenströme am Hauptzugangsbereich (Lobby) und in besonders hochfrequentierten Etagen sowie die

⁴⁹ <https://www.peters-research.com/index.php/elevate/about-elevate> (zuletzt geprüft am 02.07.2018)

Personenströme zwischen den Etagen. Hieraus ist zunächst die Anzahl aller Personen (P_t), die den Aufzug im betrachteten Zeitintervall nutzen, zu bestimmen. Die Anzahl der in den Eingangsbereich hineingehenden Personen (L_i), die Anzahl der hinausgehenden Personen (L_o), aller Personen, die sich in der Kabine befanden (C_t) sowie die Anzahl der Personen, die zwischen den Etagen fahren (It_t) sind nach Gleichung 3.44 in Beziehung zu setzen. [59]

$$P_t = (L_i + L_o) \times \frac{C_t}{C_t - It_t}$$

3.44

Aus P_t werden dann wiederum berechnet der prozentuale Anteil der Personen, die das Gebäude betreten ($I_{\%}$), die das Gebäude verlassen ($O_{\%}$), zwischen den Etagen fahren ($It_{\%}$) sowie der Anteil der Personen ($P_{\%}$) an der Gesamtbelegung (Pop) des Gebäudes, die den Aufzug nutzen (Gleichungen 3.45 bis 3.48).

$$I_{\%} = 100 \times \frac{L_i}{P_t}$$

3.45

$$O_{\%} = 100 \times \frac{L_o}{P_t}$$

3.46

$$It_{\%} = 100 \times \frac{[P_t - (L_i + L_o)]}{P_t}$$

3.47

$$P_{\%} = 100 \times \frac{P_t}{Pop}$$

3.48

Da Zählungen sehr personal- und zeitintensiv sind, kann alternativ in der Literatur auf ausgewählte Templates bereits existierender Zählungen für verschiedene Gebäudetypen zurückgegriffen werden. [52, S. 4-8 - 4-11] [51, S. 545–548]

Es ist allgemein anerkannt, dass das Eintreffen von Fahrgästen einem Poisson-Prozess folgt [60]. Neben den Modellen einer gleichmäßig verteilten sowie einer durch Zufallszahlen (Rand) bestimmten Ankunftsrate bildet die Poisson-Verteilung das Eintreffen der Fahrgäste so realitätsnah wie möglich ab. Ein wesentlicher Unterschied zu den beiden im vorigen Abschnitt beschriebenen Methoden ist die Darstellung des Eintreffens mehrerer Personen gleichzeitig zu einem Zeitpunkt (Stapel, Gleichung 3.49). Bei einer durchschnittlichen Ankunftsrate λ ergibt sich hieraus die Wahrscheinlichkeit, dass n Personen innerhalb einer Periode T eintreffen.

$$P(n) = \frac{(\lambda \times T)^n e^{-\lambda \times T}}{n!}$$

3.49

Bei einer angenommenen, durchschnittlichen Ankunftsrate von $\lambda = 0,2$ Personen pro Sekunde und einer betrachteten Periode von $T = 10$ Sekunden ergeben sich beispielsweise die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten nach Abbildung 3.3.

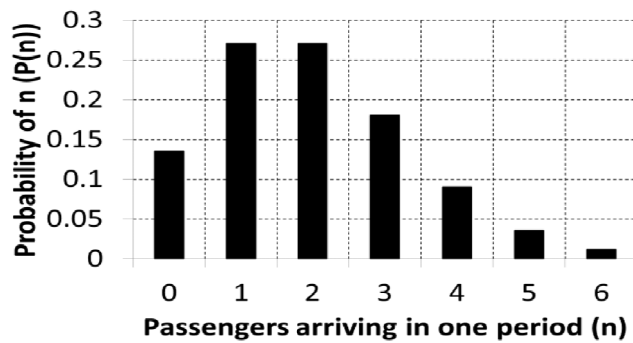


Abbildung 3.3: Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen von 0 bis 6 Personen innerhalb von 10 Sekunden (Quelle: [60])

Gleichung 3.49 kann mit der Wahrscheinlichkeit d_{ij} , dass eine Person einen Fahrbefehl nach Haltestelle j (bei Haltestelle i einsteigend) abgibt, erweitert werden. Es ergibt sich dann die Wahrscheinlichkeit $P_{ij}(n)$, die angibt, wie viele Personen innerhalb einer betrachteten Periode T ankommen, um von i nach j zu fahren (Gleichung 3.50). [61]

$$P_{ij}(n) = \frac{(\lambda \times T \times d_{ij})^n}{n!} e^{-\lambda \times T \times d_{ij}}$$

3.50

Nach [61] ist es einfacher, die Wahrscheinlichkeit für den Fall anzugeben, dass ein Ereignis nicht eintritt. Mit $P_{ij}(0)$ ergibt sich dann Gleichung 3.51.

$$P_{ij} = e^{-\lambda \times T \times d_{ij}}$$

3.51

Zur Generierung möglichst vieler Simulationsdurchläufe sind schließlich die in den Gleichungen 3.49 bis 3.51 erforderlichen Ankunftsdaten bereitzustellen. Hierzu sind zwei Vorgehensweisen möglich:

- Annahme konstanter Ankunftsraten von Personen, die das Gebäude betreten, verlassen und zwischen den Etagen fahren. Diese werden mit den Gleichungen 3.44 bis 3.48 berechnet.
- Annahme individueller, gebäudespezifischer, über den Tagesverlauf sich ändernder Ankunftsraten von Personen, die das Gebäude betreten, verlassen und zwischen den Etagen fahren. Diese werden aus den eingangs erwähnten Zählungen bzw. Templates gewonnen.

Für die Durchführung der Simulation mit dem oben beschriebenen Ansatz ist der Einsatz, z.B. einer schon bereits oben erwähnten, Software unabdingbar. Ausführliche Dokumentationen und theoretische Herleitungen der Simulation des Aufzugsverkehrs sind u.a. in folgenden Dokumenten zu finden: [59] [60] [61].

3.5 Messkampagne – Konzept und Ergebnisse

Wesentliche Voraussetzungen zur Durchführung und Auswertung einer Messkampagne sind eine Zieldefinition, die Festlegung einer Analysemethode sowie die Entwicklung eines Messkonzepts. Herangehensweise (Abschnitte 3.5.1 bis 3.5.3) sowie Ergebnisse (Abschnitt 3.6) wurden vom Autor erarbeitet und bereits vorab veröffentlicht [23].

3.5.1 Zieldefinition und Analysemethode

Ziel der Messkampagne ist, für im Gebäudebestand in Deutschland häufig auftretende Gebäude-/Anlagenkombinationen in Wohn- und Nichtwohngebäuden statistische Energieverbrauchskennwerte (als elektrischer Energieverbrauch pro Jahr pro Anlage) zu

ermitteln, um einerseits als Ergänzung zu den bereits beschriebene Verfahren mit normierten Randbedingungen und andererseits im Kontext dieser Arbeit für den realen Gebäudebetrieb möglichst zutreffende Energiekennwerte zu gewinnen. Im Fokus stehen dabei Neuanlagen sowie modernisierte Anlagen, die nach 1985 errichtet wurden. Die Einteilung der technischen Eigenschaften der untersuchten Anlagen orientiert sich an den möglichen Technologien nach Abschnitt 2.3. Sogenannte „typische Fälle“ wurden für die Messungen ausgewählt, um auf dem Markt besonders häufig vertretene, für die Grundgesamtheit „charakteristische“ und bekannte Konstellationen möglichst repräsentativ abzudecken (Auswahlverfahren nach [62]).

Die Messungen wurden im Rahmen eines öffentlich geförderten und durch den Autor dieser Arbeit koordinierten Forschungsprojektes zusammen mit einem Industriepartner durchgeführt. [23] Vom Industriepartner wurden Messungen von 79 Anlagen geliefert, was nicht der vom Autor ursprünglich vorgesehenen höheren Anzahl entsprach. Die Durchführung einer Regressionsanalyse auf die Energieverbräuche war damit aufgrund zu kleiner Klassengrößen nicht möglich. Es bleibt im folgenden Abschnitt zur Auswertung bei einer rein deskriptiven Analyse der Daten (uni- und multivariat). Zusammenhänge zwischen den technischen Eigenschaften der Anlagen, dem angewandten Mess- und Berechnungsverfahren nach VDI 4707 (vgl. Abschnitt 3.3.1.1) oder als Wochenmessungen mit Hochrechnung nach vereinfachtem Verfahren (vgl. Abschnitt 3.4.1.2) und dem Jahresenergieverbrauch werden schließlich daraus abgeleitet.

3.5.2 Messkonzept

Länger andauernde Messungen an Anlagen im realen Betrieb sind einerseits besonders geeignet, um auf den Energiebedarf vergleichbarer Anlagen und Gebäudetypen zu schließen und ande-

rerseits die Überwachung des Energieverbrauchs im laufenden Gebäudebetrieb zu ermöglichen. Gleichzeitig können Messungen der Erfolgskontrolle und der Erkennung von Fehlern, die erst geraume Zeit nach der Inbetriebnahme auftreten, dienen. Erfolgskontrolle bedeutet festzustellen, ob der mit den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Methoden ermittelte Energiebedarf tatsächlich im realen Betrieb eintritt (Soll-Ist-Vergleich). Ein Erkennen von Fehlern bedeutet, steigenden Energieverbrauch, z.B. verursacht durch defekte Bauteile oder zunehmenden Verschleiß, zu identifizieren. Messungen unterstützen zudem ein systematisches und bei Bedarf auch langfristiges energetisches Monitoring. Voraussetzungen für ein aussagekräftiges, energetisches Monitoring sind u.a.:

- vergleichbare Nutzungsrandbedingungen (Nutzungskategorien, siehe Abschnitte 3.3.1.1 und 3.3.2.2),
- vergleichbare Systemgrenzen (Schnittstelle Gebäude-Aufzug, siehe Abbildung 3.4),
- Durchführung und Dokumentation der Instandhaltung (siehe Abschnitt 4.2).

Die Vergleichbarkeit der Nutzungsrandbedingungen ist i.d.R. durch einen Fahrtenzähler sicherzustellen. Nach VDI 4707 Blatt 1 [43, S. 9] ist die Systemgrenze so festzulegen, dass die Schachtbeleuchtung, Steckdosen im Triebwerksraum, die Triebwerksraumbeleuchtung, gesteuerte Systeme zur Schachtrauchung und -belüftung (siehe auch Anhang D) sowie eine ggf. vorhandene Triebwerksraumklimatisierung nicht gemessen werden. Zu messen ist ausschließlich die für den Betrieb des Aufzugs erforderliche Energie (vgl. Abbildung 3.4). Bei manchen Installationen trifft man jedoch auf die Situation, dass z.B. die Triebwerksraumbeleuchtung und die Steckdosen im Triebwerksraum über den Hauptschalter (bzw. die davor befindliche Hauptsicherungen) des Aufzugs versorgt werden. Bei mobilen Messungen im Rahmen einer Messkampagne lässt sich dies unter Umständen organisato-

risch ausgleichen, indem aufzugsfremde Verbraucher während der Messung nicht eingeschaltet werden. Bei stationären Langzeitmessungen, wie sie im Rahmen des energetischen Monitorings durchgeführt werden, ist dieser mögliche Messfehler nur vermeidbar, wenn bereits bei der Installation des Aufzugs bzw. beim nachträglichen Einbau von Messeinrichtungen das Prinzipschaltbild nach Abbildung 3.4 beachtet wird.

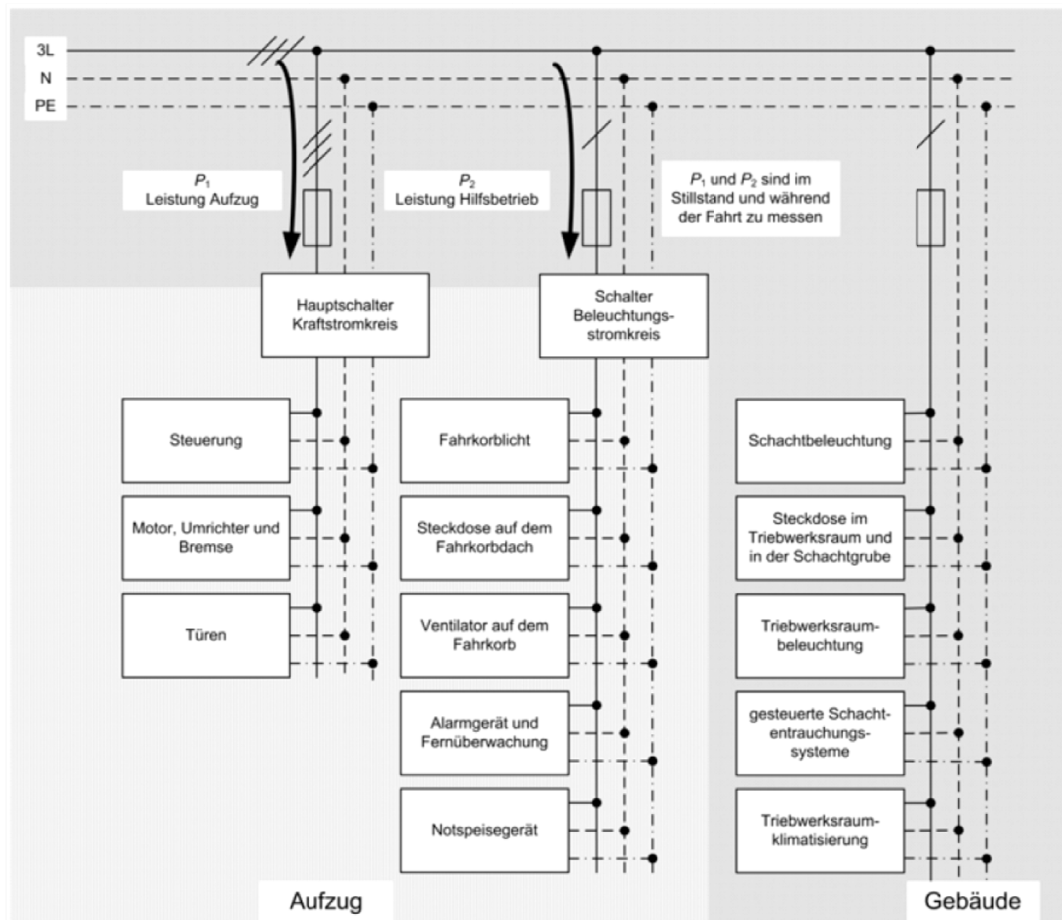


Abbildung 3.4: Prinzipschaltbild zur Messung des Energieverbrauchs bei Aufzügen / Schnittstelle Aufzug-Gebäude (Quelle: [43, S. 9])

Ein großer Unterschied zwischen den in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Wochenmessungen und stationären Langzeitmessungen (Monitoring) ergibt sich bei der Auswahl der Messeinrichtungen. Während bei den Wochenmessungen komplexe Messgeräte mit

hinreichend großem Messbereich für kleine Leistungsaufnahmen im Stillstand bis hin zu sehr großen Leistungsaufnahmen bei Beschleunigungsphasen zum Einsatz kommen, sind für stationäre Dauermessungen handelsübliche „Stromzähler“ zur Erfassung des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs ausreichend, da keine Hochrechnungen durchgeführt werden müssen, die eine hochauflösende Trennung der Stillstands- und Fahrtverbräuche erfordern.

3.5.3 Auswertung

In Tabelle 21 und Tabelle 22 werden sämtliche in diesem Kapitel zur Analyse der Messergebnisse eingeführten Variablen mit ihren Abkürzungen, Einheiten und Ausprägungen erläutert und in allen darauffolgende Tabellen, Schaubildern und erläuternden Texten dieses Kapitels durchgehend und einheitlich verwendet. Tabelle 21 zeigt dabei einen Überblick der metrischen Variablen des gelieferten Datensatzes. Der Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 und der Jahresenergieverbrauch nach hochgerechneten Wochenmessungen (mit vereinfachtem Verfahren nach Abschnitt 3.4.1.2) stellen die wesentlichen Ergebnisvariablen der durchgeführten Messungen dar (in der Tabelle kursiv). Welche Abhängigkeiten zu den restlichen Eingangsgrößen bestehen, wie hoch der Anteil des Standby-Verbrauchs am ermittelten Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 ausfällt und die Abweichungen der beiden Ergebnisvariablen voneinander (VDI vs. Wochenmessung) sind weitere Zusammenhänge, die analysiert werden sollen.

Tabelle 22 fasst die verwendeten kategorialen Variablen zusammen. Neben den gebäudeabhängigen Variablen (Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1 sowie Gebäudetyp) sind die technischen Eigenschaften der gemessenen Anlagen darin festgehalten. Es wird zwischen Antrieben mit Getriebe und getriebeelos unter-

schieden. Geregelt werden diese entweder mit einem Spannungsregler (Phasenanschnittsregler) oder mit einem Frequenzregler. Getriebelose Antriebe können nur mit einem Frequenzregler kombiniert werden. Frequenzregler sind optional mit einer Energierückspeisung (Rekuperation) ausgestattet. Mikroprozessorsteuerungen sind optional mit einer Standby-Optimierung ausgestattet (vgl. Typologie in Abschnitt 2.3). In den folgenden Analysen soll zunächst untersucht werden, ob die Nutzungskategorie (in der Tabelle kursiv) einen entscheidenden Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch hat.

Tabelle 21: Abkürzungen der metrischen Variablen
(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
<i>JVVDI</i>	<i>Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1</i>	<i>kWh</i>
<i>JVWM</i>	<i>Jahresenergieverbrauch nach Hochrechnung der Wochenmessungen</i>	<i>kWh</i>
ASTVDI	Anteil des Standby-Verbrauchs am Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1	%
QVDIWM	Abweichung der Hochrechnung der Wochenmessungen zum Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707	%
BAUJ	Baujahr	
NENNG	Nenngeschwindigkeit	m/s
TRAGF	Tragfähigkeit (Nennlast)	kg
FOERD	Förderhöhe	m
LA_STBY	Leistungsaufnahme Standby (Eingangsgröße für Berechnung nach VDI 4707 Blatt 1)	W
VDI_REF	Energieverbrauch der Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1	Wh
MO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Montag	Wh
DI	Energieverbrauch der Wochenmessung am Dienstag	Wh
MI	Energieverbrauch der Wochenmessung am Mittwoch	Wh
DO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Donnerstag	Wh
FR	Energieverbrauch der Wochenmessung am Freitag	Wh
SA	Energieverbrauch der Wochenmessung am Samstag	Wh
SO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Sonntag	Wh

Tabelle 22: Abkürzungen der kategorialen Variablen
(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Abkürzung	Erläuterung	Ausprägung
NTYP	<i>Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1</i>	1 / 2 / 3 / 4 / 5
GTYP	Gebäudetyp	Wohngebäude (Wohnen) oder Bürogebäude (Buero)
ANTR	Getriebetyp	mit Getriebe (gearing) oder getriebe-los (gearless)
REG	Regelgerät	VVFFOR (Spannungsregler)
		VVFFOR (Frequenzregler ohne Energierückspeisung)
		VVFFMR (Frequenzregler mit Energierückspeisung)
STE	Steuerungstyp	Mikroprozessorsteuerung mit Standby-Optimierung (ja)
		Mikroprozessorsteuerung ohne Standby-Optimierung (nein)

Tabelle 23 und Tabelle 24 beschreiben ohne Bewertung den vollständigen Datensatz, der aus den Messungen hervorging. 75 Anlagen konnten aufgrund des vorliegenden Datenumfangs und der gegebenen Datenqualität zunächst ausgewertet werden. Von den ursprünglich 79 auswertbaren Anlagen wurden zwei hydraulisch betriebene vorab ausgeschlossen, weil diese Technologie in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wird. Zwei weitere Anlagen waren Krankenhäusern zugeordnet. Deren Anzahl ist zu gering, um damit einen Gebäudetyp als Klasse abzubilden; diese Anlagen wurden somit ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen. Die metrischen Variablen in Tabelle 23 werden schließlich beschrieben durch:

- die Anzahl der zunächst verwertbaren Messungen (N),
- das arithmetische Mittel (MEAN),
- die Standardabweichung (STD),
- das Minimum (MIN) und das Maximum (MAX),
- die 25 %- und 75 %-Quartile (Q25 und Q75) sowie

- den Median (Q50).

Tabelle 24 gibt wieder, wie oft die jeweils möglichen Ausprägungen der kategorialen Variablen in der Stichprobe auftraten. Es zeigte sich dabei, dass die Nutzungskategorien 1 und 5 nach VDI 4707 Blatt 1, eine Anlage mit Phasenanschnittsregler sowie fünf Anlagen mit Standby-Optimierung stark unterrepräsentiert sind (in der Tabelle schwarz hinterlegt). Für die folgenden Betrachtungen wurden deshalb weitere 12 Anlagen aus dem Datensatz ausgeschlossen.

Tabelle 23: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

	N	MEAN	STD	MIN	Q25	Q50	Q75	MAX
JVVDI	75	5561	7624	137	1574	2865	7043	45175
JVWM	75	4591	5647	135	1125	2867	5995	31314
ASTVDI	75	51	23	8	33	53	69	99
QVDIWM	75	88	39	24	62	77	107	242
BAUJ	75	2009	6	1990	2010	2011	2012	2014
NENNG	75	1,5	1,0	0,6	1,0	1,0	1,6	6,0
TRAGF	75	907	459	300	630	900	1000	2500
FOERD	75	32	26	8	15	22	42	176
LA_STBY	75	232	220	11	100	150	320	1310
VDI_REF	75	69	71	5	20	42	97	368
MO	75	14384	18243	383	2954	8068	16517	95073
DI	75	12934	17456	376	3262	6908	13553	99167
MI	75	12299	16926	358	2993	5074	13454	95519
DO	75	12456	16808	351	2959	7099	13837	94324
FR	75	12077	15213	351	3150	5818	15723	87523
SA	75	9250	9658	353	2832	5782	11976	46370
SO	75	10056	14315	353	2782	5137	11995	103647

Tabelle 24: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen mit schwarz hinterlegten auszuschließenden Anlagen (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

NTYP		GTYP		ANTR		REG		STE	
Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)
1	3 (4,0)	Buero	34 (45,3)	geared	24 (32,0)	VVFFOR	1 (1,3)	ja	5 (6,7)
2	22 (29,3)	Wohnen	41 (54,7)	gearless	51 (68,0)	VVVFMR	14 (18,7)	nein	70 (93,3)
3	20 (26,7)					VVVFOR	60 (80,0)		
4	27 (36,0)								
5	3 (4,0)								
Σ	75 (100)	Σ	75 (100)	Σ	75 (100)	Σ	75 (100)	Σ	75 (100)

Somit steht ein Datensatz mit insgesamt 63 Anlagen zur Verfügung (reduzierter Datensatz). Aus Tabelle 23 und Tabelle 24 ergibt sich somit der reduzierte Datensatz in Tabelle 25 und Tabelle 26. Sämtliche Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den im Folgenden beschriebenen Analysen sind aufgrund der verbliebenen Stichprobengröße nur für diese Stichprobe zulässig. Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit der existierenden Aufzugsanlagen in Deutschland sind bedingt möglich.

Die Untersuchungen konzentrieren sich damit auf die Nutzungskategorien 2 bis 4 nach VDI 4707 Blatt 1. Dabei sind Wohngebäude etwas häufiger vertreten als Bürogebäude, wobei ein Großteil der Anlagen mit getriebelosen Antrieben ohne Energierückspeicherung ausgestattet ist. Im Sinne der Definitionen nach Abschnitt 2.3 handelt es sich bis auf wenige Ausnahmen um Neuinstallationen (Baujahre 2010 bis 2014).

Tabelle 25: Zusammenfassung der metrischen Daten im reduzierten Datensatz (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

	N	MEAN	STD	MIN	Q25	Q50	Q75	MAX
JVVDI	63	4845	4735	1002	1652	2954	7043	23981
JVWM	63	4217	3967	279	1322	3045	5995	16949
ASTVDI	63	51	21	8	34	54	67	94
QVDIWM	63	90	41	24	62	77	116	242
BAUJ	63	2010	5	1995	2010	2011	2012	2014
NENNG	63	1.4	0.8	0.6	1.0	1.0	1.6	4.0
TRAGF	63	933	459	300	630	975	1000	2500
FOERD	63	30	20	8	15	24	42	86
LASTBY	63	240	222	50	100	170	320	1310
VDIREF	63	65	54	11	21	45	97	268
MO	63	13562	13947	854	3798	9107	16517	62339
DI	63	11461	11785	603	3664	7546	13553	53117
MI	63	10834	11087	840	3441	6653	13454	54011
DO	63	11044	11063	628	3567	7853	13837	49090
FR	63	10992	10327	673	3325	7341	15723	44591
SA	63	10120	10148	564	2909	6972	12103	46370
SO	63	11304	15226	654	3323	6074	13187	103647

Tabelle 26: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen im reduzierten Datensatz (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

NTYP		GTYP		ANTR		REG	
Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)	Kat.	FREQ (%)
2	19 (30,2)	Buero	29 (46,0)	geared	19 (30,2)	VVVFMR	11 (17,5)
3	17 (27,0)	Wohnen	34 (54,0)	gearless	44 (69,8)	VVVFOR	52 (82,5)
4	27 (42,9)						
Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)

Bei den folgenden Analysen wird nun zwischen univariater und multivariater Betrachtung unterschieden – durchweg bezogen auf den zuvor beschriebenen reduzierten Datensatz mit 63 Anlagen.

Univariate Betrachtung

Abbildung 3.5 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der abhängigen metrischen Variablen, d.h. den Jahresenergieverbräuchen nach VDI 4707 Blatt 1 (JVVDI) und auf Basis der Wochenmessungen (JVWM). Zudem dargestellt sind in Abbildung 3.5 die Häufigkeiten der aufgetretenen Abweichungen dieser beiden Größen voneinander (QVDIWM) und die Häufigkeiten der aufgetretenen Anteile des Standby-Verbrauchs am Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 (ASTVDI) – jeweils bezogen auf alle Nutzungskategorien, beide Gebäude- und Antriebstypen sowie beide Ausführungen der Regelgeräte der 63 Anlagen im reduzierten Datensatz. Unterhalb der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen sind die dazugehörigen Boxplots mit den 25 %- und 75 %-Quartilen sowie dem Median aufgetragen. Ausreißer werden sowohl innerhalb des anderthalbfachen als auch des dreifachen Interquartilsabstandes (range) dargestellt.

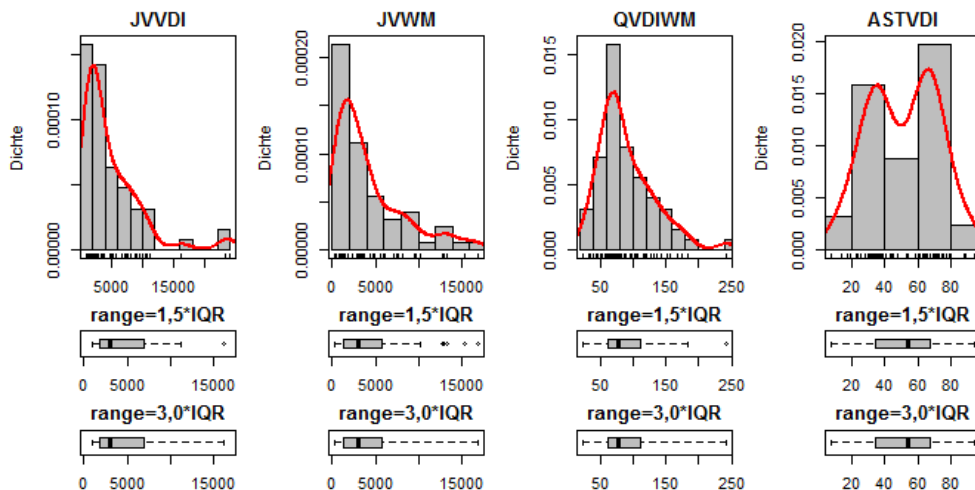


Abbildung 3.5: Häufigkeiten der abhängigen metrischen Variablen (JVVDI und JVWM in kWh/Jahr, QVDIWM und ASTVDI in %) (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Bei beiden Ergebnisvariablen (Jahresenergieverbräuche nach VDI 4707 Blatt 1 und auf Basis der Wochenmessungen) liegt der Median (Q50) jeweils bei ca. 3.000 kWh/Jahr. In beiden Fällen sind innerhalb des dreifachen Interquartilsabstandes ($3,0 \cdot \text{IQR}$) keine Ausreißer zu erkennen. Reduziert man die Bandbreite zur Darstellung von Ausreißern auf den anderthalbfachen Interquartilsabstand ($1,5 \cdot \text{IQR}$), sind bei den Ergebnissen der Wochenmessungen mehr Ausreißer nach oben zu erkennen als bei den Ergebnissen nach VDI 4707 Blatt 1. Die Abweichungen der Wochenmessungen zu den VDI-Ergebnissen verteilen sich jeweils zur Hälfte um einen Wert von 77 % mit größerer Bandbreite nach oben. Der Anteil des Standby-Verbrauchs am Gesamtenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 liefert einen Median von 54 % mit etwas größerer Bandbreite nach unten.

Abbildung 3.6 zeigt die Verteilungen der unabhängigen Variablen, wie Baujahre (BAUJ), Nenngeschwindigkeiten (NENNG), Tragfähigkeiten (TRAGF) und Förderhöhen (FOERD). Die Darstellung der jeweils dazugehörigen Boxplots erfolgt (wie in Abbildung 3.5) mit anderthalbfachem und dreifachem Interquartilsabstand zur Darstellung von Ausreißern.

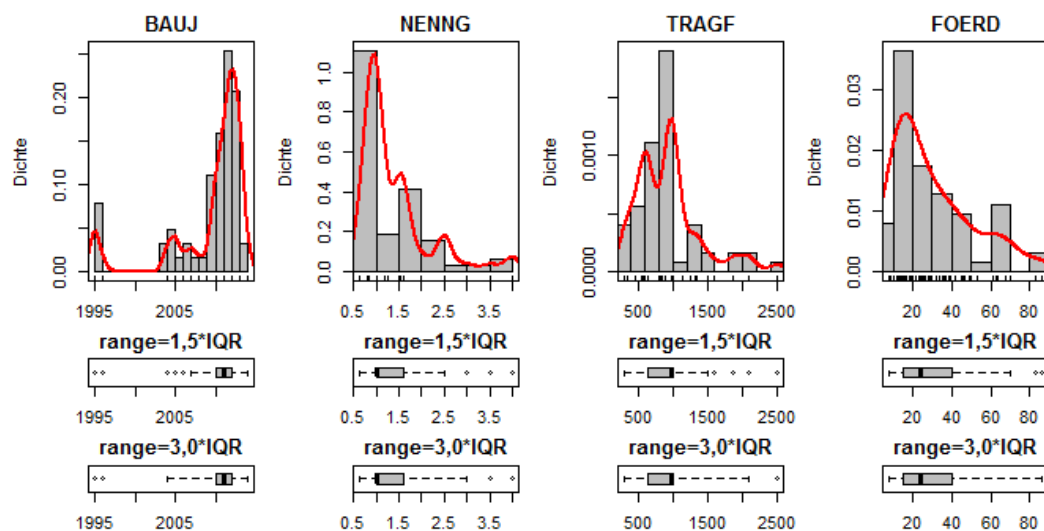


Abbildung 3.6: Häufigkeiten der unabhängigen metrischen Variablen (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Der Median der Baujahre liegt beim Jahr 2011, und ein Großteil der gemessenen Anlagen wurde zwischen 2010 und 2012 installiert (wenige Ausreißer 2005 oder älter). Ein Großteil der gefahrenen Nenngeschwindigkeiten liegt zwischen 1,0 und 1,6 m/s, die Tragfähigkeiten siedeln sich größtenteils zwischen 630 und 1.000 kg an, und bei den Förderhöhen sind Anlagen mit 15 bis 42 m vertreten (jeweils mit wenigen Ausreißern).

Die Leistungsaufnahme im Standby (LASTBY) sowie der Energieverbrauch der Referenzfahrt (VDIREF) sind zwei wesentliche Eingangsgrößen für die Berechnung nach VDI 4707 Blatt 1, die sich aus den Messungen ergeben (Abbildung 3.7).

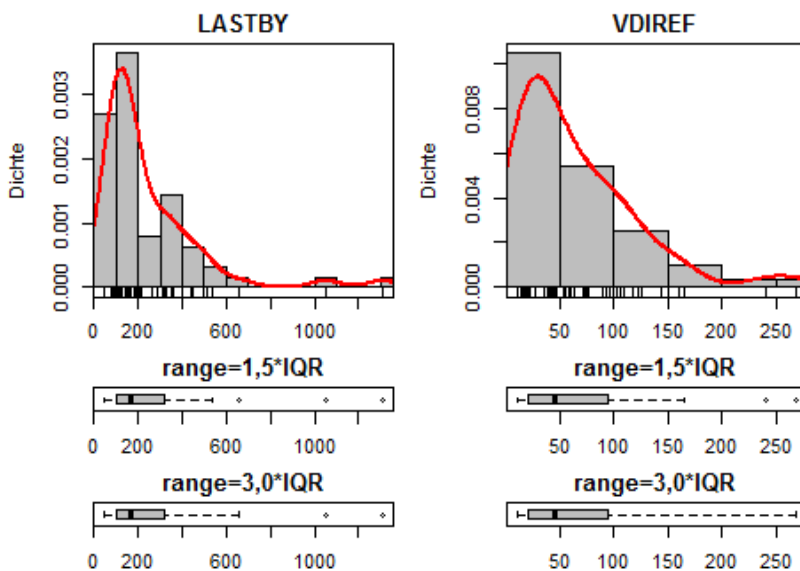


Abbildung 3.7: Häufigkeiten der Größenordnungen von LASTBY in W und VDIREF in Wh (Eingangsgrößen) zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Die gemessenen Leistungsaufnahmen im Standby verteilen sich nach Abbildung 3.7 um einen Median in Höhe von 170 W, und die Energieverbräuche der Referenzfahrten verteilen sich um einen Median in Höhe von 45 Wh. Bei beiden Eingangsgrößen sind

wenige, jedoch starke Ausreißer nach oben erkennbar. Auch die Bandbreiten sind jeweils nach oben größer.

Abbildung 3.8 zeigt die Verteilung der Ergebnisse an den einzelnen Wochentagen (MO bis SO) zur Hochrechnung auf den Jahresenergiebedarf (Eingangsgrößen für die Wochenmessungen).

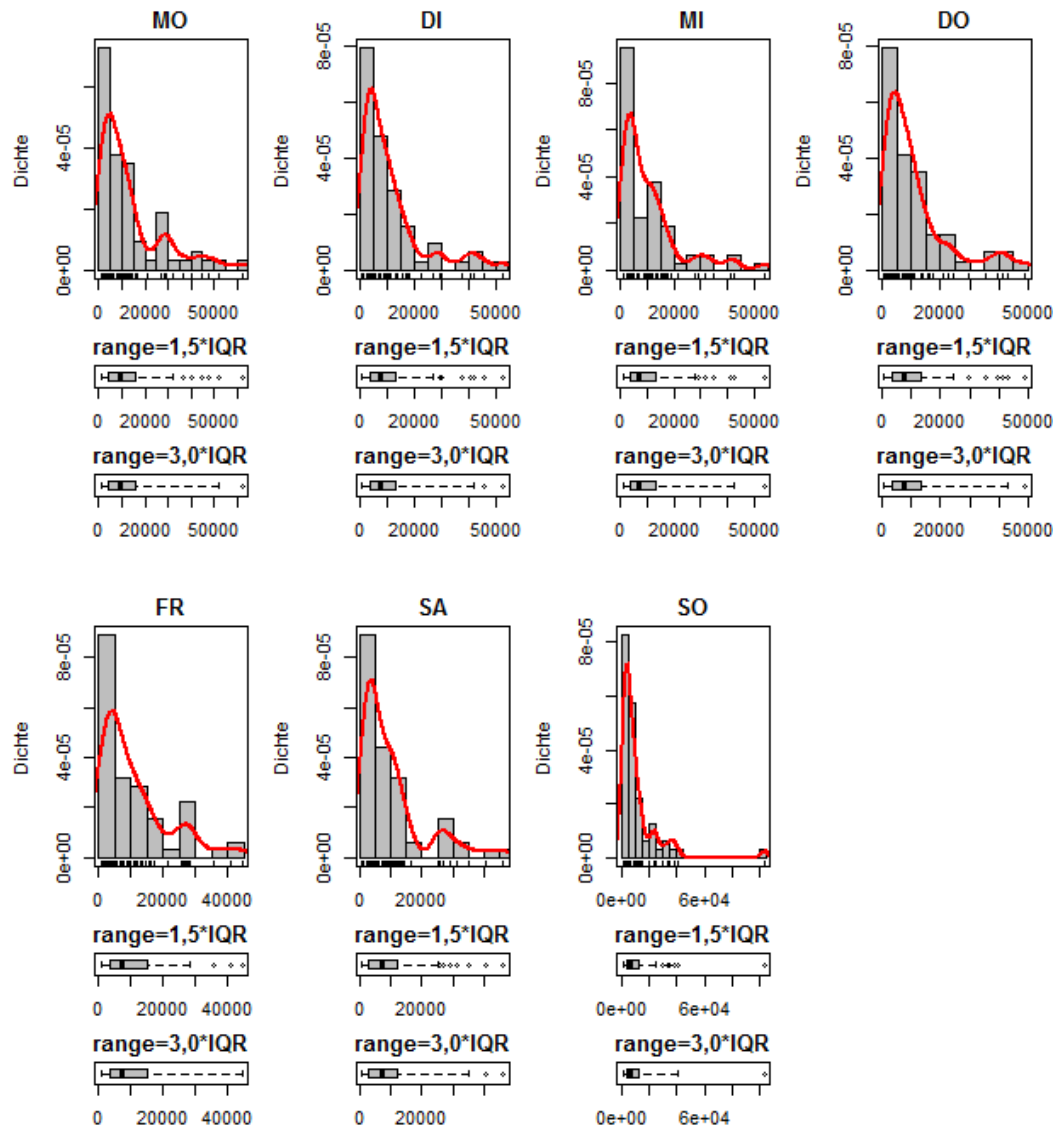


Abbildung 3.8: Häufigkeiten der Größenordnungen täglicher Energieverbräuche zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs auf Basis der Wochenmessungen (pro Wochentag in Wh, Eingangsgrößen) (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die Energieverbräuche an den Wochentagen (Montag bis Freitag) höher ausfallen als am Wochenende. Ein Ausreißer ist bei der Sonntagsmessung einer Anlage festzustellen. Da die restlichen Messungen dieser Anlage dennoch plausibel erscheinen, wurde sie aus der Stichprobe nicht ausgeschlossen, um den geringen Stichprobenumfang nicht noch weiter zu reduzieren.

Abbildung 3.9 fasst schließlich die Häufigkeiten der technischen Eigenschaften der Anlagen grafisch zusammen. Die Nutzungskategorien 1 und 5 nach VDI 4707 Blatt 1 sowie die Unterscheidung der Steuerungen nach Standby-Optimierung werden hier aus den bereits genannten Gründen nicht mehr aufgeführt (reduzierter Datensatz, vgl. Zahlen in Tabelle 25). Wohngebäude sowie getriebelose Antriebe mit Frequenzregler ohne Energierückspeisung überwiegen im Datensatz.

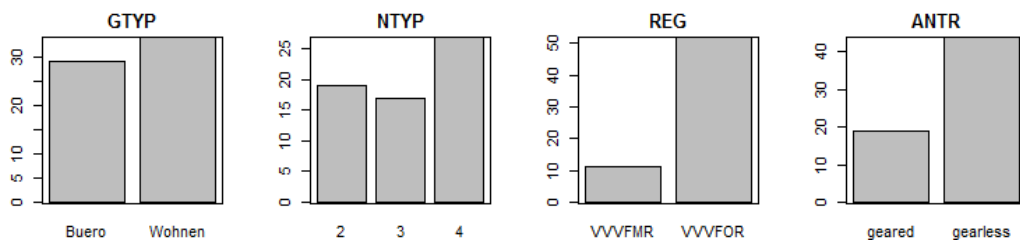


Abbildung 3.9: Häufigkeiten der kategorialen unabhängigen Variablen (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Multivariate Betrachtung

Während die univariate Betrachtung dazu dienen soll, den Datensatz im Überblick zu beschreiben, so ist das Ziel der folgenden multivariaten Betrachtung, Erkenntnisse über mögliche Zusammenhänge zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen zu gewinnen. Es soll dabei festgestellt werden, welche Einflussgrößen sich in welchem Umfang auf die ermittelten Jahresenergieverbräuche auswirken.

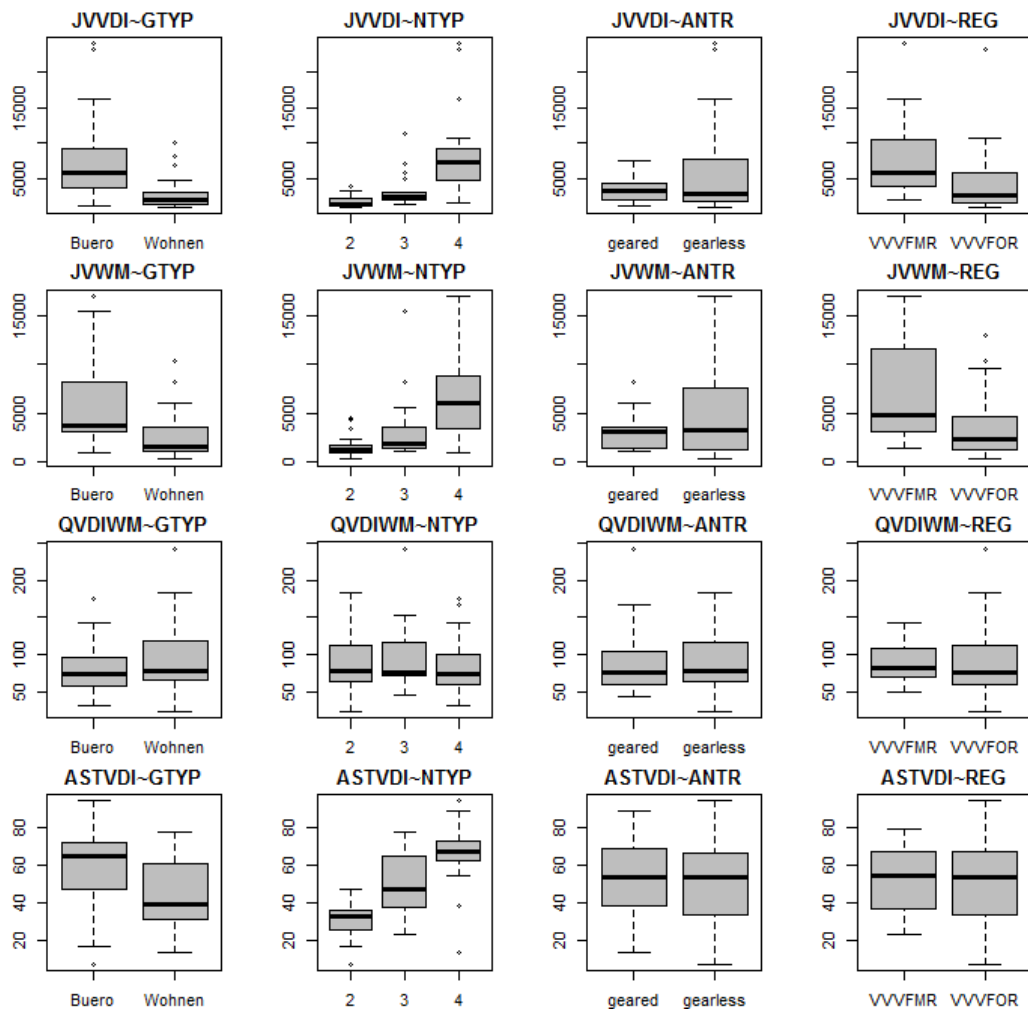


Abbildung 3.10: Abhängige vs. kategoriale unabhängige Variablen (JVVDI und JWWM in kWh, QVDIWM und ASTVDI in %) (Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Abbildung 3.10 trägt die Jahresenergiebedarfskennwerte nach VDI 4707 Blatt 1 (JVVDI) und auf Basis der Wochenmessungen (JWWM) gegen den Gebäudetyp (~GTYP), die Nutzungskategorie (~NTYP), die Antriebsart (~ANTR) sowie die Ausführung des Regelgerätes (~REG) auf - dargestellt jeweils als Boxplots. Gleichmaßen wird dies für die Abweichungen zwischen VDI 4707 Blatt 1 und Wochenmessungen (QVDIWM) sowie für die Anteile der Standby-Verbräuche am Gesamtergebnis nach VDI 4707 Blatt 1 (ASTVDI) gezeigt. Es ist eindeutig feststellbar, dass in dieser

Stichprobe sowohl die Energieverbräuche nach VDI 4707 Blatt 1 als auch auf Basis der Wochenmessungen bei Bürogebäuden höher ausfallen. Gleichermaßen steigen die ermittelten Energieverbräuche bei zunehmender Nutzungsintensität (-kategorie).

Die Abweichungen zwischen JVVDI und JVWM lassen nach Abbildung 3.10 keinen eindeutigen Zusammenhang zu den unabhängigen Variablen (\sim GTYP, \sim NTYP, \sim ANTR und \sim REG) erkennen.

Erstaunlich ist jedoch nach Abbildung 3.10 die Beobachtung, dass die Jahresenergieverbräuche nach beiden Verfahren (JVVDI und JVWM) bei getriebelosen Antrieben (gearless) höher ausfallen als bei Getriebeanlagen (geared), ebenso gilt dies in der Stichprobe erstaunlicherweise für Anlagen mit Rückspeisung (VVVFMR), die höhere Werte liefern als Anlagen ohne Rückspeisung (VVVFOR). Erwartet wurde genau das Gegenteil (vgl. z.B. [63, S. 114]).

Zur näheren Prüfung dieser Beobachtungen zeigt sich mit isolierter Betrachtung der Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1 in Abhängigkeit von Antrieb (\sim ANTR) und Regelung (\sim REG) dieses Phänomen ebenso in der Stichprobe (vgl. Abbildung 3.11, Darstellung in Boxplots wie in Abbildung 3.10). Erwartet hätte man wieder genau das Gegenteil, da beide Technologien (getriebeloser Antrieb und Regelung mit Rückspeisung) zumindest unter stationären Bedingungen niedrigere Verbräuche für das Fahren aufweisen sollten.

Ein weiterer Erklärungsversuch, dass sich die absolut höheren Verbräuche bei getriebelosen Antrieben mit Energierückspeisung deshalb ergeben könnten, weil sie überwiegend in Gebäuden mit höheren Nutzungskategorien installiert sind, lässt sich aus der Stichprobe heraus ebenfalls nicht bestätigen. Nach Abbildung 3.12 sind in allen drei Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 über 50 % der gemessenen Anlagen mit getriebelosen Antrieben (gearless) ausgestattet. Regelungen mit Energierückspeisung

(VVVFMR) sind in Nutzungskategorie 2 erwartungsgemäß nicht vertreten, in den Nutzungskategorien 3 und 4 jedoch auch nur mit ca. 20 bis 30 %.

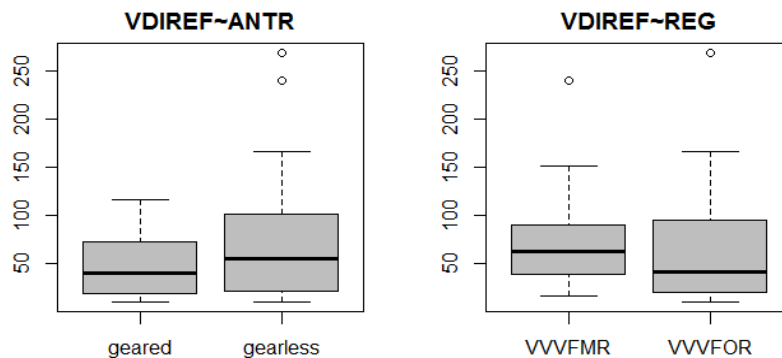


Abbildung 3.11: Verbrauch der Referenzfahrt nach VDI in Abhängigkeit der Ausführung von Antrieb und Regelung (in Wh)
(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

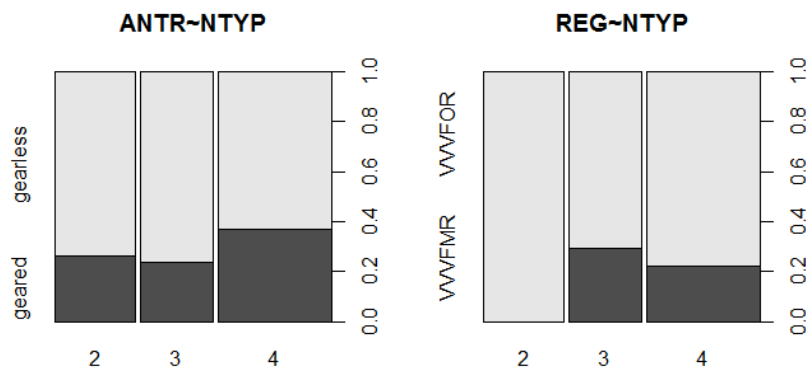


Abbildung 3.12: Anteile der installierten Ausführungen von Antrieb und Regelung innerhalb der Nutzungskategorien (1.0 = 100 %)
(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Auch eine weitere Beobachtung nach Abbildung 3.10 spricht gegen eine typische Annahme (z.B. nach Tabelle 4): Der Anteil des

Standby-Verbrauchs am Gesamtverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 nimmt bei Bürogebäuden sowie bei Gebäuden mit höherer Nutzungskategorie tendenziell zu (anstatt ab). Einerseits könnte dies damit zusammenhängen, dass bei den höheren Nutzungskategorien innerhalb dieser Stichprobe nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Frequenzregler auffällig höhere Standby-Verbräuche verursachen. (Diese Annahme konnte aufgrund der vorliegenden Daten jedoch nicht geprüft werden.) Dass andererseits gleichzeitig die Kabinenbeleuchtungen innerhalb der Stichprobe bei höheren Nutzungskategorien mit veralteten Leuchtmitteln ausgerüstet sind, wäre zudem denkbar. Angaben zur Kabinenbeleuchtung liegen in der Stichprobe jedoch nicht vor, weshalb dies auch nicht prüfbar ist.

Plausibel erscheint nach Abbildung 3.10 letztlich die Beobachtung, dass der Anteil des Standby-Verbrauchs (ASTVDI) am Gesamtverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 nicht von der Ausführung des Antriebs (mit oder ohne Getriebe, ~ANTR) sowie dem Vorhandensein einer Energierückspeisung (~REG) beeinflusst wird.

Abbildung 3.13 zeigt in Boxplot-Darstellung die Zusammenhänge zwischen der Förderhöhe (FOERD), der Tragfähigkeit (TRAGF) sowie der Nenngeschwindigkeit (NENNG) und jeweils dem Gebäudetyp (~GTYP) und der Nutzungskategorie (~NTYP). Bei den Bürogebäuden sind in der Stichprobe erwartungsgemäß die größeren Förderhöhen, Tragfähigkeiten und höhere Nenngeschwindigkeiten anzutreffen. Ein vergleichbares Bild ergibt sich (ebenso erwartungsgemäß) bei zunehmender Nutzungsintensität bzw. -kategorie.

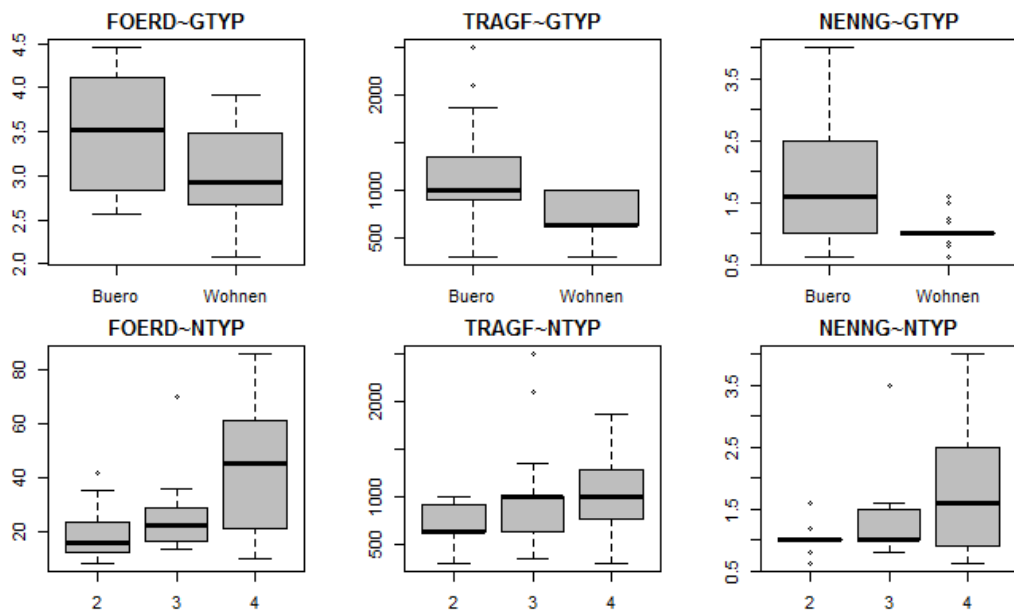


Abbildung 3.13: Förderhöhen (in m), Tragfähigkeiten (in kg) und Nenn-
geschwindigkeiten (in m/s) vs. Gebäudetyp und Nutzungskategorien
(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

3.6 Bereitstellung von Energiekennwerten aus der Messkampagne

Mit den Ergebnissen der Auswertungen im vorigen Abschnitt werden abschließend – als zentrales Ergebnis in Tabelle 27 – Bandbreiten der Energieverbräuche in Abhängigkeit der Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 zusammengefasst. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wird diese Auswertung nicht separat für Wohn- und Bürogebäude erstellt. Die Größe der beiden Klassen wäre dann zu klein. Dennoch ist die Zusammenfassung an dieser Stelle vertretbar, da auch die VDI-Richtlinie innerhalb der Nutzungsklassen nach derzeitigem Stand nicht zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden unterscheidet.

Tabelle 27: Energiekennwerte in kWh pro Jahr für einen Aufzug in Abhängigkeit der Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: eigene Erhebung [23] und Auswertung in Abschnitt 3.5.3)

Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1	Jahresverbrauch nach VDI (in kWh/a pro Aufzug)			Jahresverbrauch nach Wochenmessungen (in kWh/a pro Aufzug)		
	von (Q25)	Median	bis (Q75)	von (Q25)	Median	bis (Q75)
gering (2): Wohngebäude mit bis zu 20 Wohnungen, kleine Büro- und Verwaltungsgebäude	1.103	1.265	2.382	885	1.322	1.841
mittel (3): Wohngebäude mit bis zu 50 Wohnungen, mittlere Büro- und Verwaltungsgebäude	1.886	2.370	2.954	1.402	1.902	3.608
stark (4): Wohngeb. mit mehr als 50 Wohnungen, große Büro- und Verwaltungsgebäude	4.745	7.363	9.448	3.354	5.995	9.502

Hervorgehend aus einem früherem Forschungsvorhaben Dritter [38] wird in Abschnitt 3.2.1 in Tabelle 4 der vorliegenden Arbeit zum Vergleich für Aufzüge mit zeitgemäßer Antriebstechnologie (getriebelos mit Frequenzumformer) in kleinen Wohngebäuden (vergleichbar zu Nutzungskategorie 2) ein Jahresverbrauch von 950 kWh, in mittleren bis großen Wohn- und Bürogebäuden ein Jahresverbrauch von 4.350 kWh (vergleichbar zu den Nutzungskategorien 3 und 4) sowie in sehr großen Bürogebäuden (vergleichbar zu Nutzungskategorie 5) ein Jahresenergieverbrauch in Höhe von 17.700 kWh genannt (alle Werte einschl. Standby-Verbrauch). Nutzungskategorie 5 wird in Tabelle 27 aus den bereits genannten Gründen nicht dargestellt. Der Vergleich der restlichen Größenordnungen in Tabelle 27 mit den Ergebnissen des früheren Forschungsprojektes in Tabelle 4 lassen jedoch insgesamt auf plausible Größenordnungen schließen.

Als Fazit und Anwendungsempfehlung von Tabelle 27 ist schließlich festzuhalten: Für Aufzüge mit zeitgemäßer Technologie (Frequenzumformer mit getriebelosem Antrieb) werden die Median-Werte der VDI-Messungen in Abhängigkeit der Nutzungskategorie als Richtwerte für frühe Planungsphasen empfohlen. Sind über die Kenntnis der Nutzungskategorien hinaus über- oder unterdurchschnittlich viele Fahrten pro Tag zu erwarten, werden die Orientierung an den 25%- bzw. 75%-Quartilen der Wochenmessungen in Abhängigkeit der Nutzungskategorie empfohlen.

Für die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs mehrerer Aufzüge (z.B. in Gruppen) ist schließlich die Anzahl der Aufzüge zu ermitteln. Diese ergibt sich aus den in Abschnitt 3.4.3 behandelten Verfahren der Verkehrsplanung.

Mit Anwendung der obigen Kennwerte soll an dieser Stelle noch ein Anwendungsbeispiel zur weiteren Plausibilisierung gezeigt werden:

Vergleichskennwert aus einer Langzeitmessung

Der elektrische Energieverbrauch eines Personenaufzugs in einem gemischt genutzten Gebäude mit Wohnungen und Büros (gleiche Anlage wie im zweiten Anwendungsbeispiel des später entwickelten Planungshilfsmittels in Abschnitt 9.1.2) wurde über einen längeren Zeitraum (fünf Jahre) bei durchgehender Normalbelegung des Gebäudes mit einem handelsüblichen Zwischenzähler in der Unterverteilung nach dem Prinzipschaltbild (Abbildung 3.4) in Abschnitt 3.5.2 gemessen. Das arithmetische Mittel der Messungen ergab einen jährlichen Energieverbrauch in Höhe von 1.944 kWh. Dieser Wert liegt ca. 50 % über den in Tabelle 27 gemessenen Medianwerten für einen zeitgemäßen Antrieb mit Frequenzumformer (ohne Getriebe). Der Antrieb des Beispiels ist mit einem nicht mehr dem Stand der Technik entsprechenden Spannungsregler (mit Getriebe) ausgestattet, weshalb nach Tabel-

le 12 in Abschnitt 3.3.1.2 insbesondere beim Anfahren und Beschleunigen eine ca. 50 % schlechtere Energieeffizienz zu erwarten ist. Dieses Beispiel soll zeigen, dass die Anwendung von Tabelle 27 in Verbindung mit den Technologiefaktoren in Tabelle 12 neben verschiedenen Nutzungskategorien auch eine Übertragbarkeit auf verschiedene Antriebstechnologien ermöglicht.

Zur Anwendung von flächenbezogenen Energiekennwerten in Verbindung mit Aufzügen soll folgendes Beispiel das Kapitel der Auseinandersetzung mit Energiekennwerten schließen und damit auch die Grenzen der Anwendbarkeit aufzeigen:

Energiekennwerte mit Flächenbezug, Anteil des Aufzugs am gesamten elektrischen Energiebedarf eines Gebäudes

Ein energieoptimiertes Bürogebäude⁵⁰ mit ca. 2.150 m² beheizter Nettogrundfläche (NGF nach DIN 277) benötigt 21 kWh elektrische Energie pro m² NGF pro Jahr für Kühlung, Lüftung und fest eingebaute Beleuchtung. Im Gebäude ist ein Personenaufzug vorhanden, dessen genaue technische Daten nicht bekannt sind. Nimmt man nach Tabelle 27 die Nutzungskategorie 3 an, so wären nach VDI 4707 Blatt 1 ca. 2.370 kWh pro Jahr und nach den Wochenmessungen ca. 1.902 kWh pro Jahr für den Betrieb des Aufzugs anzunehmen. Dies entspricht Energiekennwerten in Höhe von 1,1 bzw. 0,9 kWh pro m² NGF pro Jahr. Der elektrische Energiebedarf für den Betrieb des Aufzugs läge somit zwischen 5,2 und 4,3 % des jährlichen elektrischen Gesamtenergiebedarfs. Bei der Anwendung des flächenbezogenen Energiekennwertes wird einerseits ersichtlich, dass der Anteil des elektrischen Energiebedarfs für den Aufzug am elektrischen Gesamtenergiebedarf des Gebäudes um so höher wird, je energieeffizienter das Gesamtgebäude geplant und ausgeführt wird. Das führt unmittelbar zu der Schlussfolgerung, dass insbesondere bei besonders energieeffizi-

⁵⁰ vgl. Projekt-Steckbriefe in [64, S. 270] (Bürogebäude „Balanced Office Building“)

enten Gebäuden⁵¹ der Anteil des Energiebedarfs von Aufzügen nicht mehr zu vernachlässigen ist.

Es zeigt sich zudem abschließend, dass neben den oben behandelten und ermittelten Energiekennwerten pro Jahr pro Aufzug flächenbezogene Energiekennwerte bei Aufzügen prinzipiell möglich sind. Jedoch kann ein flächenbezogener Energiekennwert im Zusammenhang mit Aufzügen nur Vergleichszwecken dienen. Die umgekehrte Hochrechnung eines nach dieser Methode ermittelten flächenbezogenen Energiekennwertes zur Anwendung auf ein anderes Gebäude für Planungszwecke ist nur stark eingeschränkt möglich und wird vom Autor nicht empfohlen.

⁵¹ im Sinne der Gesamtenergieeffizienz aller technischen Einrichtungen

4 Instandhaltungskosten von Personenaufzügen

Der Instandhaltungsbegriff wird in den folgenden Ausführungen konsequent gemäß DIN 31051 [65] verwendet. Damit steht der Begriff Instandhaltung übergeordnet für (vgl. Abbildung 4.1):

- Inspektion (regelmäßige Kontrolle des Ist-Zustandes einer technischen Anlage),
- Wartung (regelmäßige Kontrolle des Ist-Zustandes und Erhaltung des Soll-Zustandes einer technischen Anlage),
- Instandsetzung (Wiederherstellung des Soll-Zustandes einer technischen Anlage nach Abweichung),
- Verbesserung.

Instandsetzungen werden vom Verfasser in den folgenden Betrachtungen in kleine Instandsetzungen (Reparaturen) und große Instandsetzungen im Sinne von Ersatzinvestitionen unterschieden. Als Verbesserung werden nach DIN 31051 technische und administrative Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit bezeichnet, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu verändern. Unter Funktion wird nach DIN 31051 die bei der Herstellung definierten Anforderungen verstanden. In den folgenden Ausführungen wird die Verbesserung nach DIN 31051 nicht berücksichtigt, da sich Instandhaltungsarbeiten bei bestehenden Personenaufzügen aufgrund der gesetzlichen Vorgaben und dem sich rasch entwickelnden Stand der Technik nicht an den ursprünglichen, bei der Herstellung definierten, Anforderungen orientieren können.

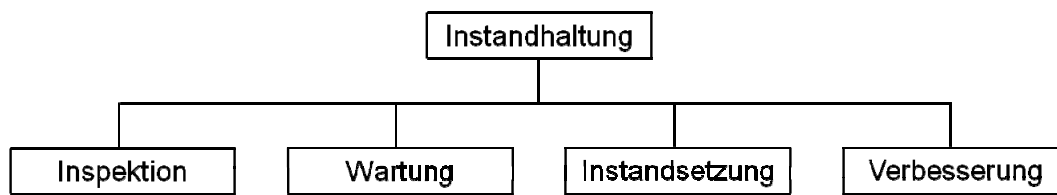


Abbildung 4.1: Unterteilung der Instandhaltung nach DIN 31051
(Quelle: [65, S. 4])

Bei Aufzügen fallen Kosten für folgende Instandhaltungsleistungen an:

- regelmäßige Inspektion und Wartung [66],
- Reparaturen, Austausch von Verschleißteilen sowie Ersatz vollständiger Komponenten,
- jährliche Überprüfung durch eine unabhängige ZÜS (Haupt- und Zwischenprüfung⁵²) [67],
- Abnahmeprüfungen durch eine unabhängige ZÜS nach (wesentlichen) Änderungen [68].

Im weiteren Sinne zur Instandhaltung gehören organisatorische Maßnahmen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs. Wichtigste organisatorische Maßnahme ist sicherzustellen, dass durch Funktionsstörungen im Fahrkorb eingeschlossene Personen zu jeder Zeit und möglichst rasch befreit werden. [66] [69] Eine geeignete Maßnahme, die für Neuanlagen bereits seit Ende der 1990er Jahre und für Bestandsanlagen ab 2020 verpflichtend ist, ist die Aufschaltung des Notrufs mit Sprechverbindung aus der Kabine zu einer ständig besetzten Stelle. [69] Auch hierfür entstehen Kosten sowohl für die Dienstleistung selbst als auch für den Übertragungsweg, z.B. für den notwendigen Telefonanschluss.

In den folgenden Abschnitten werden die durchzuführenden Instandhaltungsarbeiten anhand aufzugsspezifischer Normen und Richtlinien konkretisiert, eine aufzugsspezifische Kostendaten-

⁵² keine Wartung bzw. Inspektion im Sinne der DIN 31051

struktur entwickelt und, wie im vorigen Kapitel bei Energiekennwerten, geeignete Datenquellen erschlossen.

4.1 Stand nationaler und internationaler Normungs- und Richtlinienarbeit

In den TRBS 3121 [66] wird explizit erwähnt, dass nur eine qualifizierte und bedarfsgerechte Instandhaltung nach DIN 13015 [70] den sicheren Betrieb und eine hohe Verfügbarkeit der Anlagen sicherstellen kann. Die VDI-Richtlinie 3810 [71] stellt ein ergänzendes Regelwerk zum Betreiben und Instandhalten von Aufzügen dar. Während die DIN 13015 konkrete, detaillierte Empfehlungen ausspricht, welche Prüfpunkte in Instandhaltungsanweisungen berücksichtigt werden sollen, liefert die VDI-Richtlinie 3810 konkrete Empfehlungen für Wartungsintervalle. Da beide Regelwerke den Stand der Technik in Deutschland zur Durchführung korrekter Instandhaltungsarbeiten wiedergeben und damit einen entscheidenden Einfluss auf die Instandhaltungskosten eines Aufzugs nehmen, werden sie in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet. Nach der aktuellen, am 01.06.2015 in Kraft getretenen und am 18.10.2017 in Details nochmal überarbeiteten Betriebssicherheitsverordnung (BetrSV) sind Aufzüge nach dem Stand der Technik zu betreiben. [13] Den aktuellen Stand der Technik für die Errichtung von neuen Aufzügen, wie sie von Herstellern in Verkehr zu bringen und von den Errichtern zu installieren sind, sind in den Normen DIN EN 81-20 und 50 geregelt [72] [73]. Diese sind auch bei Änderungen und Ersatzinvestitionen anzuwenden, so dass die beiden Normenteile für neue und bestehende Aufzüge sowie zudem auf Instandhaltungsstrategien und -kosten einwirken (vgl. Abbildung 4.2). Die gesetzliche Basis hierfür stellt die Richtlinie 2014/33/EU [74] und das 12. Produktsicherheitsgesetz der Bundesrepublik Deutschland dar [75].

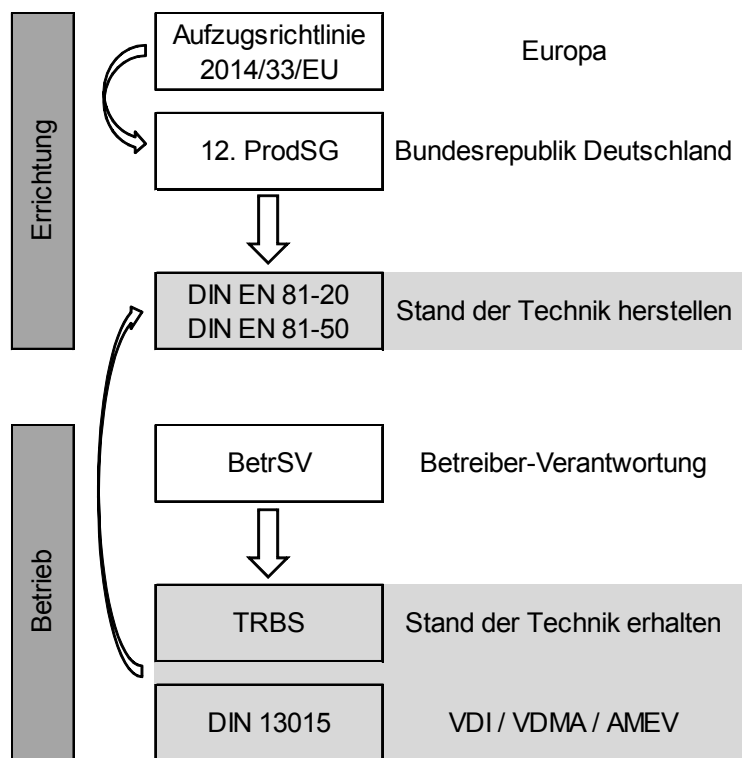


Abbildung 4.2: Gesetzliche und normative Vorgaben für die Instandhaltung von Aufzügen (Quelle: eigene Darstellung)

Forderungen in der aktuellen BetrSV zusammen mit den bisher bestehenden TRBS führten zu Auslegungsschwierigkeiten bei wiederkehrenden Prüfungen. Hintergrund ist, dass § 27 („Bestandsschutzparagraf“) entfallen ist. Der Erfahrungsaustauschkreis der ZÜS (EK ZÜS) beschloss am 20.05.2015, bei allen Anlagen, die nicht dem Stand der Technik nach DIN EN 81-20 entsprechen, den Mangel, dass kein „Konzept zur Anpassung des Betriebs der Aufzugsanlagen an den Stand der Technik“ vorliege, festzuhalten. Wie ein solches Konzept entwickelt, niedergeschrieben und umgesetzt werden könnte, war gesetzlich nicht festgelegt. Deshalb zog der EK ZÜS diesen Beschluss wieder zurück.

Eine neue Basis für die Feststellung möglichen Gefährdungspotentials durch Aufzüge, die nicht dem Stand der Technik entsprechen, wurde, wie schon in Abschnitt 2.3 erwähnt, Ende 2016 durch eine Anwendungsempfehlung des Verband der TÜV (VdTÜV) geschaf-

fen: „Leitfaden zur sicheren Verwendung von Personen und Lastenaufzügen nach dem Stand der Technik“. [31] Es ist zu erwarten, dass dieses Dokument zukünftig einen entscheidenden Einfluss auf Instandhaltungsentscheidungen der Betreiber ausüben wird. Dies gilt ebenso für die in Abschnitt 2.3 bereits erwähnte DIN EN 81-80, die in einem neuen Entwurf von 2016 vorliegt. [30]

Grundaussage des Leitfadens ist (vergleichbar zur DIN EN 81-80), dass bei einer Aufzugsanlage, die nicht dem Stand der Technik entspricht, eine sichere Verwendung ggf. nicht gewährleistet ist. Kann vor diesem Hintergrund eine ZÜS bei einer wiederkehrenden Prüfung feststellen, dass eine Aufzugsanlage nicht nach dem Stand der Technik betrieben wird, liegt ein zu bewertender Mangel vor. Eine Checkliste mit 22 Prüfpunkten listet die mindestens zu betrachtenden Gefährdungen auf. Bei Abweichungen von der DIN EN 81-20 werden mögliche technische bzw. organisatorische Schutzmaßnahmen empfohlen. Wenn die geprüften Anlagen nicht nach den bisherigen Normen DIN EN 81-1 und -2 oder nach den alten Technischen Regeln für Aufzüge (TRA) 200 errichtet wurden, sind diese Empfehlungen als dringend umsetzbar anzusehen. Bei Anlagen, die bereits nach den zuvor genannten Normen und TRA errichtet wurden, ist von einer abgemilderten Dringlichkeit auszugehen. Für solche Anlagen wird mit Hinweisen zum möglichen Risiko konkreter differenziert nach:

- Gefährdung nicht vorhanden,
- niedriges Risiko,
- mittleres Risiko,
- hohes Risiko.

Die Interpretation der Risikoeinschätzung werden die Erfahrungen in den nächsten Jahren zeigen. Für diese Arbeit wird eine aus Sicht des Autors dieser Arbeit sinnvolle Interpretation vorgeschlagen. Bei „Gefährdung nicht vorhanden“ besteht kein Hand-

lungsbedarf, wo hingegen bei „hohem Risiko“ sofortiger Handlungsbedarf besteht. Schwieriger ist der sichere Umgang mit „niedrigem“ und „mittlerem Risiko“. Hierzu sind weitere Randbedingungen, wie z.B. der erwartete Benutzerkreis (Kinder/Jugendliche oder ältere/mobilitätseingeschränkte Menschen) zu berücksichtigen, die den Handlungsbedarf auch bei „niedrigem Risiko“ auslösen sollten. Umzusetzende Maßnahmen führen in jedem Falle zu Instandsetzungskosten im Sinne der in diesem Kapitel eingeführten Begrifflichkeiten.

4.1.1 DIN 13015

Zunächst ist festzustellen, dass in der DIN 13015:2008 (Instandhaltung von Aufzügen und Fahrtreppen – Regeln für Instandhaltungsanweisungen) der Instandhaltungsbegriff eigenständig definiert wird. So werden der Tausch von Hauptkomponenten, der Austausch der Anlage, die Modernisierung der Anlage einschließlich Änderungen ihrer Eigenschaften sowie die Personenbefreiung durch die Feuerwehr nicht als Instandhaltungstätigkeiten gesehen. [70] Tabelle 28 liefert einen Überblick zu den relevanten Punkten. Nach DIN 31051 hingegen ist der Tausch von Hauptkomponenten als Instandsetzung und damit als Bestandteil der Instandhaltung anzusehen. Daran orientieren sich auch die in den folgenden Abschnitten angewandten Kostenzuordnungen. Der in diesem Kapitel dargestellte Unterschied verdeutlicht, dass sich die DIN 13015 als ausschließlicher Leitfaden zur Inspektion und Wartung interpretieren lässt und somit eine Abgrenzung der Begriffe dringend erforderlich ist (Abbildung 4.3). In anderen Worten ausgedrückt, kann die DIN 13015 als „Teilmenge“ der DIN 31051 angesehen werden.



Abbildung 4.3: Abgrenzung des Instandhaltungsbegriffs zwischen DIN 31051 und DIN 13015 (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 28: Prüfpunkte für Instandhaltungsanweisungen (Quelle: [70, S. 16])

Allgemeines	Prüfung aller Komponenten auf Sauberkeit, Staubfreiheit und Korrosionsfreiheit
Schachtgrube	Prüfung auf überschüssiges Öl/Fett am unteren Ende der Führungsschienen Prüfung der Grube auf Sauberkeit, Trockenheit und Schmutzfreiheit
Antisprungvorrichtung und Schalter (falls eingebaut)	Prüfung auf Freigängigkeit und Funktionsfähigkeit Prüfung der Gleichspannung der Seile Prüfung der Schalter, falls eingebaut Prüfung der Schmierung
Puffer	Prüfung des Ölstands Prüfung der Schmierung Prüfung der Schalter, falls vorhanden Prüfung der Befestigungen
Antriebsmotor/Generator	Prüfung der Lager auf Verschleiß Prüfung der Schmierung Prüfung des Zustands des Kommutators
Getriebe	Prüfung des Getriebes auf Verschleiß Prüfung der Schmierung
Treibscheibe	Prüfung des Zustands und der Treibscheibenrillen auf Verschleiß
Bremse	Prüfung des Bremssystems Prüfung der Teile auf Verschleiß Prüfung der Haltegenauigkeit
Steuerung	Prüfung des Steuerschranks auf Sauberkeit, Trockenheit und Staubfreiheit
Geschwindigkeitsbegrenzer und Spannrolle	Prüfung der beweglichen Teile auf Freigängigkeit und Verschleiß Prüfung der Funktionsfähigkeit Prüfung des Schalters
Tragseilablenkrolle(n)	Prüfung der Seilrillen auf Verschleiß Prüfung der Lager auf anormale Geräusche und/oder Schwingungen Prüfung der Abdeckungen Prüfung der Schmierung

Tabelle 28: Fortsetzung von vorheriger Seite

Fahrkorb-/Gegengewichtsführungsschienen	Prüfung des erforderlichen Schmierfilms auf den Oberflächen der Führungen Prüfung der Befestigungen
Fahrkorb-/Gegengewichtsführungsschuhe	Prüfung der Führungsschuhe, -rollen auf Verschleiß Prüfung der Befestigungen Prüfung der Schmierung, falls erforderlich
Elektrische Verkabelung	Prüfung der Isolierung
Fahrkorb	Prüfung der Notbeleuchtung, der Bedienelemente und der Schlüsselschalter Prüfung der Befestigungen von Wänden und Decke
Fangvorrichtung(en)/Schutzeinrichtung für den aufwärts fahrenden Fahrkorb gegen Übergeschwindigkeit	Prüfung der beweglichen Teile auf Freigängigkeit und Verschleiß Prüfung der Schmierung Prüfung der Befestigungen Prüfung der Funktionsfähigkeit Prüfung des Schalters
Tragseile/-ketten	Prüfung auf Verschleiß, Längung und Spannung Prüfung der Schmierung
Seil-/Kettenendbefestigungen	Prüfung auf Verschlechterung des Zustands und Verschleiß Prüfung der Befestigungen
Schachtzugänge	Prüfung der Funktion der Schachttürverriegelung Prüfung der Türen auf Freigängigkeit Prüfung der Türführung Prüfung der Türspalte Prüfung des Drahtseils, der Kette oder des Riemens, falls benutzt, auf Unversehrtheit Prüfung des Notentriegelungsmechanismus Prüfung der Schmierung
Fahrkorbtür	Prüfung des Türschließkontakts oder -verriegelung Prüfung der Türen auf Freigängigkeit Prüfung der Türführung Prüfung der Türspalte Prüfung des Drahtseils oder der Kette, falls benutzt, auf Unversehrtheit Prüfung der Personenschutzeinrichtungen Prüfung der Schmierung
Haltestellen	Prüfung der Anhaltegenauigkeit in der Haltestelle
Notendschalter	Prüfung der Funktionsfähigkeit
Motorschutzeinrichtung	Prüfung der Funktionsfähigkeit
Elektrische Sicherheitseinrichtungen	Prüfung der Funktionsfähigkeit Prüfung der Sicherheitskette Prüfung auf Einbau der richtigen Sicherungen
Notrufeinrichtung	Prüfung der Funktionsfähigkeit
Bedienelemente und Anzeigen in der Haltestelle	Prüfung der Funktionsfähigkeit
Schachtbeleuchtung	Prüfung der Funktionsfähigkeit

4.1.2 VDI 3810

Blatt 6 der VDI-Richtlinie 3810 [71] bezieht sich hinsichtlich Umfang und Qualität von Instandhaltungsarbeiten direkt auf die im vorigen Abschnitt beschriebene DIN 13015. Darüber hinausgehend werden konkrete Empfehlungen für Wartungsintervalle ausgesprochen.

Tabelle 29: Erfahrungswerte für Wartungsintervalle nach VDI-Richtlinie 3810 (Quelle: [71, S. 9])

Aufzugskategorie	Beispiele für Aufzüge	Wartungsintervall
Hochfrequentiert und sicherheitsrelevant	<ul style="list-style-type: none"> • in Krankenhäusern • mit einer Fahrtenzahl von mehr als 40000 Fahrten im Monat 	1 Monat
Stark frequentiert	<ul style="list-style-type: none"> • mit Besonderheiten wie Überecktüren, Glaskabine oder -türen • mit einer Fahrgeschwindigkeit von mehr als 1,2 m/s • die älter als 15 Jahre sind • mit einer Fahrtenzahl von mehr als 6000 Fahrten im Monat 	2 Monate
Normal frequentiert	<ul style="list-style-type: none"> • mit vier bis sechs Haltestellen • in Behörden- und Verwaltungsgebäuden (im Regelfall) • mit einer Fahrtenzahl von bis zu 6000 Fahrten im Monat 	3 Monate
Gering frequentiert	<ul style="list-style-type: none"> • die höchstens zehn Jahre alt sind • in Wohngebäuden mit bis zu vier Haltestellen • mit einer Fahrtenzahl von höchstens 3000 Fahrten im Monat 	6 Monate

Tabelle 29 führt neben der Aufzugskategorie, die Frequentierung und Sicherheitsrelevanz unterscheidet, beispielhafte Eigenschaften, wie z.B. Ausstattungsmerkmale, Anzahl der Haltestellen, Gebäudetyp und Alter der Anlage auf. Es fällt dabei auf, dass das Alter des Aufzugs unabhängig von der Frequentierung als ein Kriterium für den maximalen Zeitabstand zwischen zwei Wartungen angesehen wird.

4.1.3 VDMA 24186

Das VDMA⁵³-Einheitsblatt 24186 (Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden) zählt in Blatt 5 [76] durchzuführende Wartungstätigkeiten von elektrotechnischen Geräten und Anlagen auf, darunter Aufzü-

⁵³ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

ge. Hier fällt im Gegensatz zur VDI-Richtlinie 3810 auf, dass für die genannten Tätigkeiten keine genauen Intervalle vorgegeben werden, sondern lediglich zwischen „periodisch“ und bei „Bedarf“ unterschieden wird (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Wartungstätigkeiten nach VDMA-Einheitsblatt 24186-5 (Quelle: [76, S. 12])

Position	Tätigkeit	Ausführung	
		periodisch	bei Bedarf
Baugruppe/ Bauelement/ Tätigkeit			
7.1 Aufzüge			
7.1.1	Auf Verschmutzung Beschädigung und Korrosion prüfen	X	
7.1.2	Funktionserhaltendes Reinigen		X
7.1.3	Sicherheitskette prüfen (z.B. Anfahrerschutz, Lichtschranke)	X	
7.1.4	Geber auf Funktion prüfen	X	
7.1.5	Anlage auf Funktion prüfen	X	
7.1.6	Anlage schmieren und nachstellen		X
7.1.7	Schaltschrank	siehe Pos. 7.1.3	
7.1.8	Antriebs- und Kraftübertragungselemente nach Herstellervorschrift warten	X	

4.1.4 AMEV

Für die Wartung von haustechnischen Anlagen existieren AMEV⁵⁴-Empfehlungen. Relevant für die Instandhaltung von Aufzügen sind „Aufzug-Service 2010“ [77] sowie „Wartung 2014“ [78]. „Aufzug-Service 2010“ stellt ein Muster für einen Instandhaltungsvertrag

⁵⁴ Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher Verwaltungen

bereit. „Wartung 2014“ spricht sich für die Notwendigkeit von Wartungsverträgen bei Aufzügen aus. Detaillierte Arbeitskarten (im Unterschied zu VDMA wie bei VDI mit konkreten zeitlichen Fristen für die Durchführung) werden ergänzend zu den o.g. Dokumenten für ausgewählte Kostengruppen der Technischen Anlagen angeboten. In der vorliegenden Fassung mit Stand 2017 sind Aufzüge in den Arbeitskarten noch nicht enthalten. Eine zukünftige Eingliederung auf Basis der DIN 13015 erscheint möglich, sinnvoll und bleibt abzuwarten.

4.1.5 LCC Handbuch (CRB)

Im LCC Handbuch der Schweizerischen Zentralstelle für Bau-rationalisierungen (CRB) „Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken“ [79] werden Instandhaltungskostenkennwerte und Nutzungsdauern von Bauwerken aufgeführt. Es werden zwei Ebenen betrachtet: die Bauwerksebene und die Elementebene. Die Bauwerksebene (Hauptgruppe) enthält:

- Konstruktion Gebäude,
- Technik Gebäude,
- Äußere Wandbekleidung Gebäude,
- Bedachung Gebäude,
- Ausbau Gebäude.

Die Hauptgruppe „Technik Gebäude“ enthält u.a. die Element-gruppe „Transportanlagen“. Diese ist unterteilt in:

- Personenaufzug,
- Lastenaufzug,
- Bettenaufzug,
- Fahrtreppe, Fahrsteig,
- Hubtisch, Verladestation, Spezialaufzug,
- Parkieranlage,
- Weitere Transportanlage.

Für Transportanlagen wird eine Nutzungsdauer von 15 bis 40 Jahren genannt (Mittelwert 30 Jahre, bei Personenaufzügen, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen, 20 bis 40 Jahre). Diese Angaben sind für die gesamte Anlage zu sehen. Für Verschleißteile, wie Seile und Führungen bzw. elektrische Einrichtungen, wie Steuerungen, seien kürzere Nutzungsdauern anzusetzen, ohne diese jedoch konkret zu benennen. Zusätzliche Angaben zu Einflussfaktoren, wie Exposition, Beanspruchung und Material/Bauteil, auf die Nutzungsdauern stellen einen Unterschied zur VDI-Richtlinie 2067 dar. Dennoch sind die Nutzungsdauern nicht als absolute Grenzwerte zu verstehen, die in der Realität unter- oder überschritten werden können.

Aufgeführte Prozentwerte, die die zu erwartenden Instandhaltungskosten auf Basis der ursprünglichen, kostengruppenspezifischen Bauwerkskosten abschätzen helfen, werden ausdrücklich als „grobe Orientierungswerte“ deklariert. Im Gegensatz zur VDI-Richtlinie 2067 (vgl. Abschnitt 7.1.1) werden keine separaten Prozentwerte für Wartung und Instandsetzung angeboten.

Ein ergänzendes Kapitel führt sogenannte „Lebenserwartungen“ von Bauteilen auf. Es handelt sich dabei um Angaben vom Hauseigentümerverband Schweiz (HEV) und vom Schweizerischen Mieterinnen- und Mieterverband (MV). Für Aufzugsanlagen wird eine Lebenserwartung von 30 Jahren genannt. Es fällt auf, dass hier Elektroninstallationen zu Aufzugsanlagen mit der gleichen Lebenserwartung wie die gesamte Anlage aufgeführt werden. Eine Überschätzung der Lebenserwartung der Elektroinstallationen bzw. eine Unterschätzung der Lebenserwartung der gesamten Anlage ist damit nicht auszuschließen. In Kapitel 6 soll dies durch eine bauteilscharfe Betrachtung überwunden werden.

4.2 Besonderheiten der Instandhaltung von Aufzügen

In den folgenden Abschnitten werden u.a. besondere Merkmale der Instandhaltung von Aufzügen und darauf abgestimmte Hilfsmittel beschrieben.

4.2.1 Instandhaltungsstrategien

In der Aufzugsbranche etablierten sich typische, im Folgenden beschriebene Instandhaltungsstrategien:⁵⁵

A Reparatur

Die Instandhaltungsstrategie „Reparatur“ schließt die anderen Instandhaltungsstrategien vollständig aus. Der Aufzug wird dabei technisch nicht verändert, und es werden keine Hauptkomponenten getauscht. Reparaturen umfassen die Inanspruchnahme von Ersatzteilen (Austausch von Bauteilen) bzw. die Instandsetzung von Komponenten. Es besteht hierbei eine große Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Ersatzteilen beim Hersteller sowie von der Gestaltung der Reparaturfreundlichkeit von Komponenten und Bauteilen. Diese Strategie kann bei zunehmendem Alter des Aufzugs das Risiko von störungsbedingten Ausfallzeiten erhöhen. Anfallender Reparaturaufwand und damit verbundene Reparaturkosten sind dabei schwer zu prognostizieren.

B schrittweise Teilmodernisierung

Die Strategie der schrittweisen Teilmodernisierung stellt einen Stufenplan über einen längeren Zeitraum (z.B. mehrere Jahre) dar. In der Regel werden Hauptkomponenten, die eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen (z.B. die Steuerung), im ersten

⁵⁵ basiert auf praktischen Erfahrungen des Autors sowie beispielsweise auf [80] und [81]

Schritt getauscht. In den folgenden Schritten werden weitere Komponenten, die einen zukunftsfähigen Betrieb des Aufzugs sicherstellen sollen, wie z.B. der Hauptantrieb und die Tragseile, getauscht. Es ist dabei möglich, dass gewisse Hauptkomponenten, wie z.B. die Führungsschienen oder der Fangrahmen des Fahrkorbs, in der Anlage verbleiben, ohne den sicheren und zuverlässigen Betrieb einzuschränken. Der Vorteil dieser Strategie liegt einerseits darin, möglichen Ausfallzeiten vorausschauend vorzubeugen, und dabei andererseits die hierfür anfallenden Kosten über einen längeren Zeitraum zu verteilen.

C Modernisierung

Die Strategie der Modernisierung verfolgt das gleiche Ziel wie die schrittweise Teilmodernisierung. Der Unterschied besteht darin, alle zukünftig notwendigen Modernisierungsmaßnahmen in einem Schritt durchzuführen (siehe auch Abbildung 4.4). Auch hier ist es üblich, dass gewisse Komponenten weitergenutzt werden. Die Entscheidung für Strategie A oder B hängt u.a. davon ab, welches Budget zur Verfügung steht und welche Stillstandszeiten während der Modernisierungsmaßnahmen in Absprache mit den Nutzern tolerierbar sind (siehe auch Abbildung 4.5).

D Kompletterneuerung

Bei der Strategie der Kompletterneuerung werden alle Komponenten des Aufzugs getauscht. Der Zustand nach Kompletterneuerung entspricht einer Neuanlage. Erkennungsmerkmal dieser Strategie ist, dass vom Hersteller bzw. Errichter Baujahr und Seriennummer des Aufzugs neu vergeben werden. Die Freiheitsgrade in der Planung sind hier am größten und nur durch die baulichen Gegebenheiten, wie z.B. die Schachtmaße, die Lage des Schachtes im Gebäude sowie die Zugangsmöglichkeiten zum Gebäude eingeschränkt. Die Kosten dieser Strategie sind gut

planbar. Bei einer Kompletterneuerung bietet sich zudem die Möglichkeit eines Systemwechsels, z.B. auf eine maschinenraumlose Anlage, oder der Einsatz alternativer Tragmittel, wie z.B. Gurte, in besonderer Form an.

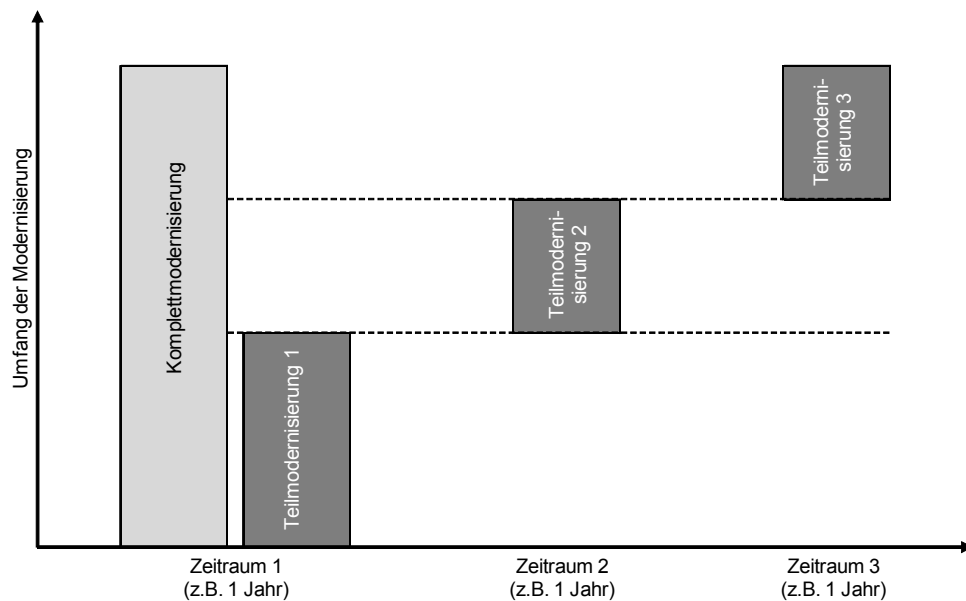


Abbildung 4.4: Vergleich Komplettdesign- und schrittweise Modernisierung (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [81, S. 193])

Die Möglichkeit einer klaren Abgrenzung der vier vorgestellten Instandhaltungsstrategien basiert auf dem modularen technischen Aufbau, der an jedem Treibscheibenaufzug gleichermaßen vorzufinden ist (vgl. Abschnitt 2.3).

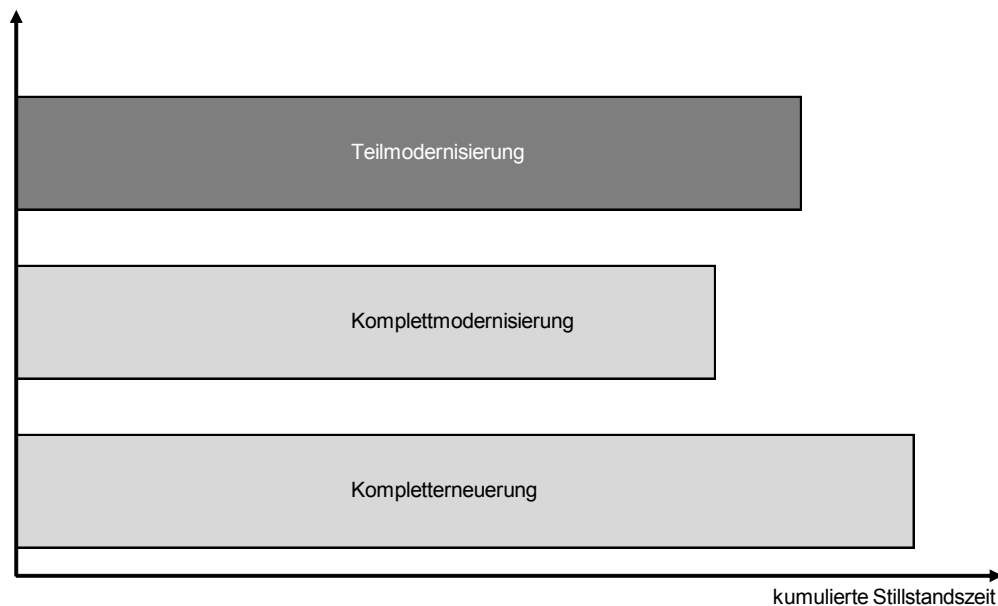


Abbildung 4.5: Planung von Stillstandszeiten in Abhängigkeit der gewählten Instandhaltungsstrategie außer Reparaturstrategie
(Quelle: eigene Darstellung)

Die VDI-Richtlinie 3423 [82] liefert Hinweise zur Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Eine Übertragung auf Aufzüge zur Ermittlung von instandhaltungsbedingten Ausfall- bzw. Stillstandszeiten mit Hilfe von Formblättern zur Erfassung ist möglich.

Da erwartete Lebensdauern von Bauteilen bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie eine entscheidende Rolle spielen, sei auf die entsprechenden Begriffe an dieser Stelle kurz eingegangen. Die Unterscheidung zwischen technischer und wirtschaftlicher Lebensdauer ist zudem entscheidend bei der Einordnung in den Lebenszyklus von Gebäuden. Die technische Lebensdauer von Komponenten hängt ab von (siehe auch Faktorenmethode in Abschnitt 6.1.3.1):

- Qualität der Planung,
- Qualität der Montage,

- Qualität und Eigenschaften des Bauteils bzw. der Komponente,
- Qualität der Instandhaltung,
- Nutzung,
- Umwelteinflüsse.

Es kann weiterhin unterschieden zwischen einer tatsächlichen technischen Lebensdauer (wenn das Bauteil bzw. die Komponenten tatsächlich ausgefallen ist) oder einer angenommenen technischen Lebensdauer. Die Berücksichtigung einer angenommenen technischen Lebensdauer unterstützt eine vorbeugende Instandhaltungsstrategie.

Eine wirtschaftliche Lebensdauer kann deutlich unter der technischen Lebensdauer liegen und wird mittlerweile auch häufig im Bezug zum gesamten Gebäude oder zu Gebäudeteilen betrachtet. [83, S. 55–71]. Sie hängt stark von den Zielen und Handlungsspielräumen des Bauherrn bzw. Betreibers ab, und zwar u.a. von:

- Funktionalität,
- Standort,
- wirtschaftliche Ziele.

Im Rahmen der in den folgenden Abschnitten angewandten und diskutierten Verfahren stehen in der vorliegenden Arbeit keine rein wirtschaftlichen Lebensdauern im Mittelpunkt. Vielmehr werden in Kapitel 6 Verfahren behandelt, die nutzungsabhängige Einflüsse auf die technischen Lebensdauern unter Berücksichtigung der Funktionalität einbeziehen.

4.2.2 Verträge zur Umsetzung von Instandhaltungsstrategien

Die in den vorigen Abschnitten behandelten Besonderheiten bei der Instandhaltung von Aufzügen stehen in unmittelbarem Zu-

sammenhang zu Fragen der organisatorischen und vertragstechnischen Umsetzung. Nach den TRBS 3121 [66] ist bei Aufzügen eine qualifizierte und bedarfsgerechte Instandhaltung durch ein Instandhaltungsunternehmen mindestens nach DIN EN 13015 eine wichtige Voraussetzung für einen sicheren Betrieb und eine hohe Verfügbarkeit. Eine kontinuierliche vertragliche Bindung an den Hersteller oder einen kompetenten Dritten (z.B. herstellernunabhängige Servicefirma oder auch Fremdhersteller), der zur regelmäßigen Pflege verpflichtet ist, kann dies gewährleisten. [84, S. 17]

Instandhaltungsverträge, im Folgenden auch (wie in der Praxis üblich) Wartungsverträge genannt, können nach [84, S. 61–64] in zwei wesentliche Arten eingeteilt werden:

- einfache Wartungsverträge,
- Vollwartungsverträge.

Muster für Vertragsformulare werden zum Beispiel vom AMEV zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 4.1.4). Bei einfachen Wartungsverträgen können feste Wartungsintervalle (z.B. monatlich) oder eine Bedarfswartung (z.B. in Abhängigkeit der Anzahl der Fahrten seit der letzten Wartung) vereinbart werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, „Wartung auf Abruf“ zu vereinbaren. Diese Regelung ist jedoch im Maschinenbau (vergleichbar zu Aufzügen) noch selten. Erste Ansätze zu bedarfsorientierter Wartung in der Aufzugsbranche werden jedoch aktuell vorangetrieben (vgl. z.B. [85]).

Bei Vollwartungsverträgen, die in der Praxis häufig bei neuen oder umfassend modernisierten Anlagen abgeschlossen werden, sind Instandhaltungsunternehmen in der Regel zur Inspektion, Wartung und Instandsetzung verpflichtet (nach DIN 31051). Bei der vertraglichen Ausgestaltung von Vollwartungsverträgen gibt es in der Praxis Unterschiede, die insbesondere den Umfang

durchzuführender Instandsetzungsarbeiten betreffen. Diese können in kleinerem Umfang in Sinne von Reparaturen oder als Ersatzinvestitionen in Form des Austauschs vollständiger Komponenten (z.B. Antriebsmaschine) vertraglich vereinbart sein.

Die Auswahl eines geeigneten Instandhaltungsvertrages im Zusammenhang mit einer geeigneten Instandhaltungsstrategie (vgl. Kapitel 6) hängt auch wesentlich davon ab, wie kritisch Ausfälle und Fehler vom Betreiber des Aufzuges eingeschätzt werden. Die DIN EN 13306 [86] liefert hierzu einen Index für die Schwere eines Ausfalls oder Fehlers im Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit seines Auftretens (Abbildung 4.6). So können beispielsweise geringfügige Fehler, die sehr häufig auftreten, genau so kritisch eingeschätzt werden wie selten auftretende, jedoch schwerwiegende, Fehler.

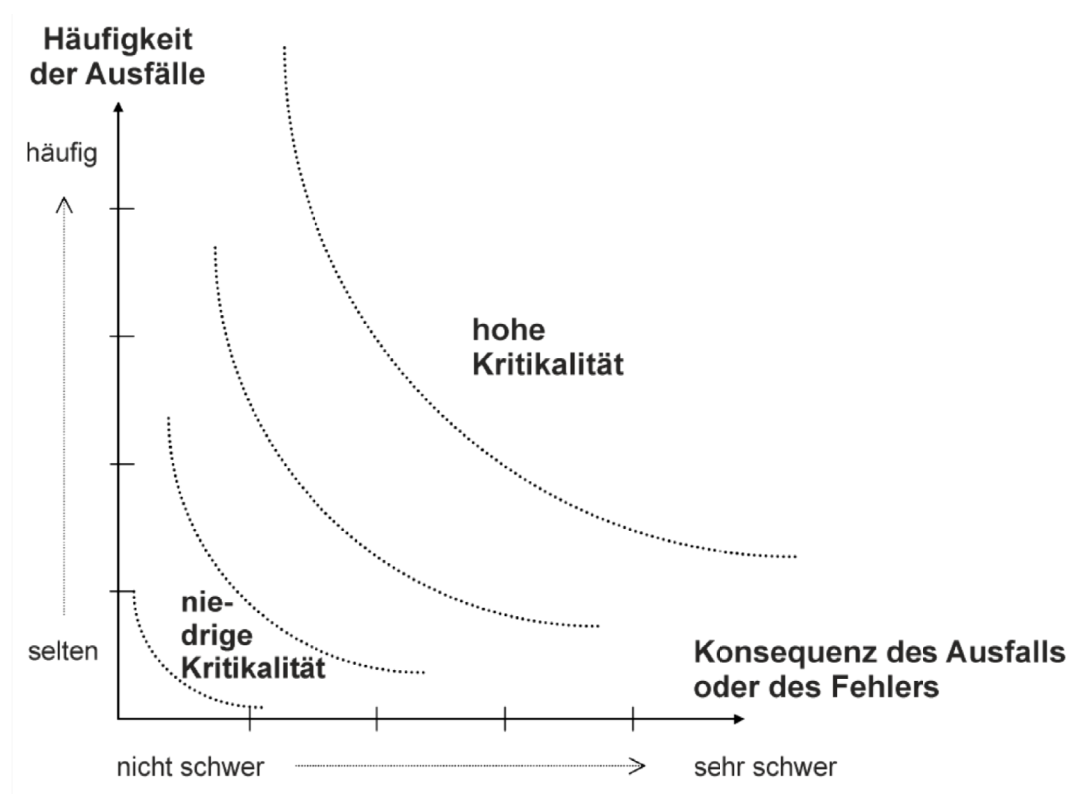


Abbildung 4.6: Kritikalitätsmatrix nach DIN EN 13306 (Quelle: [86, S. 78])

4.2.3 Qualität der Instandhaltung

Vergleichbar zum energetischen Monitoring (vgl. Abschnitt 3.5.2) ist die für den Aufzug ausgewählte Instandhaltungsstrategie auf ihren Erfolg bzw. ihre Wirksamkeit im laufenden Gebäudebetrieb kontinuierlich zu überprüfen. Tabelle 28 in Abschnitt 4.1.1 stellt hierfür – als Checkliste genutzt – eine geeignete Basis dar. Bei der Vergabe von Wartungsdienstleistungen wird vom Autor empfohlen zu vereinbaren, die nach jeder durchgeführten Wartung abgearbeitete Checkliste dem Auftraggeber (Betreiber) auszuhändigen oder digital zu übermitteln. Festgestellte Mängel und notwendige Maßnahmen, die über den Umfang der Checkliste hinausgehen, sollten im Rahmen der vertraglichen Vereinbarungen behoben bzw. durchgeführt und für den Betreiber nachvollziehbar dokumentiert werden.

Die in den beiden vorigen Kapiteln beschriebenen Instandhaltungsstrategien mit den dazu geeigneten -verträgen verfolgen das Prinzip der vorbeugenden Instandhaltung, d.h. der Ersatzzeitpunkt eines Bauteils oder einer Komponente wird vor Ausfall festgelegt. In Kapitel 6 werden drei Methoden zur Bestimmung des Ersatzzeitpunktes behandelt (Fuzzy-Logic, Verschleißgradermittlung aufgrund der Nutzungsintensität und der Einflüsse weiterer Faktoren sowie statische Restlebensdauern aus der Literatur). Ein enger Zusammenhang zwischen dem Instandhaltungsmanagement und der Bestimmung von Ersatzzeitpunkten lässt sich jedoch herstellen, wenn eine ständige Ermittlung des IST-Zustandes durch besonders häufige Inspektionsintervalle oder geeignete Diagnosesysteme erfolgt und somit der Ersatzzeitpunkt tatsächlich bedarfsgerecht ermittelt wird. Entwicklungen in diese Richtung in Verbindung mit Ferndiagnose sind zu beobachten (Stichwort „Internet der Dinge“⁵⁶) und als geeigneter Weg für

⁵⁶ siehe z.B. <http://veranstaltungen.handelsblatt.com/industrie/internet-der-dinge-bei-thyssenkrupp/> (zuletzt geprüft am 16.07.2018) oder [85]

eine Überwachung im laufenden Gebäudebetrieb erkennbar, jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht weit verbreitet. Neben einer geeigneten Sensorik, z.B. für dreidimensionale Beschleunigungsmessungen zur Bestimmung der Fahreigenschaften, sind Datenbanken und Algorithmen zur Interpretation der eingehenden Diagnosedaten erforderlich. Die Datenbanken und Algorithmen basieren einerseits auf eingepflegtem Expertenwissen und andererseits auf einem Lernprozess bisher eingegangener Daten. Dies bedeutet, dass die Entwicklung und Zukunftsfähigkeit solcher Systeme einerseits von der Preisentwicklung komplexer Sensorik und andererseits von der zu erwartenden Datenansammlung abhängt (Stichwort: „Big Data“⁵⁷). Es ist empfehlenswert, diese Entwicklung zu beobachten. Abbildung 4.7 skizziert exemplarisch den Übergang von einem annähernd zu einem tatsächlich bedarfsgerechten Ersatz von Bauteilen und Komponenten in Abhängigkeit der Inspektionsintervalle bis hin zur kontinuierlichen Diagnose. Der oben beschriebene prinzipielle Zusammenhang (Linearität nicht zwingend unterstellt) ist allgemein anzunehmen. Die Steigung des Zusammenhangs kann jedoch bei verschiedenen Komponenten unterschiedlich hoch ausfallen.

⁵⁷ weitere Beispiele für bedarfsgerechte Wartungskonzepte in Verbindung mit der Nutzung großer Datenmengen: <https://www.kone.de/bestandsgebaeude/service-wartung-aufzug-rolltreppe-automatiktuer/dialog-kundendienst/24-7-connected-services.aspx> (zuletzt geprüft am 23.07.2018), <http://www.otis.com/en/uk/service/digital-ecosystem/> (zuletzt geprüft am 23.07.2018) oder <https://www.schindler-ahead.com/> (zuletzt geprüft am 23.07.2018)

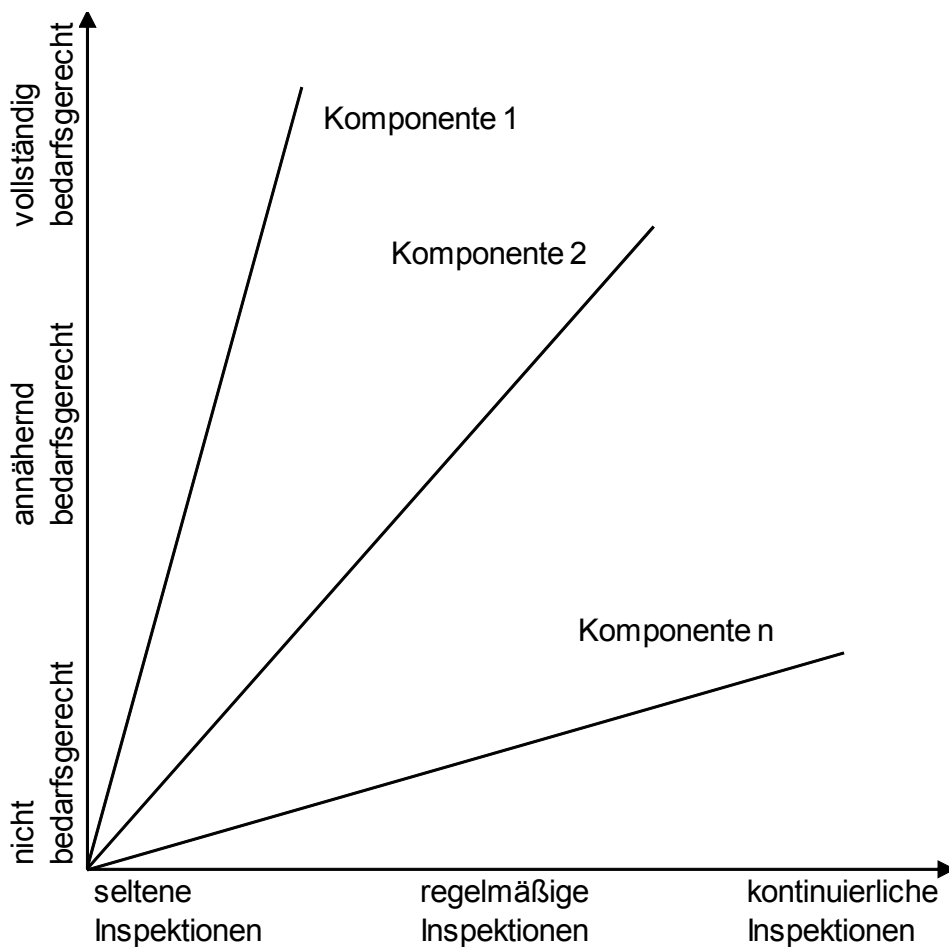


Abbildung 4.7: Zusammenhänge zwischen der Bestimmung von Ersatzzeitpunkten in Abhängigkeit der Inspektionshäufigkeit (Quelle: eigene Darstellung)

Beispiel: Komponenten, die bei zunehmender Nutzungsintensität stärker verschleifen, wie z.B. Tragseile oder Seilrollen (z.B. Komponente 2 in Abbildung 4.7), profitieren von möglichst häufigen Inspektionen zur Bestimmung des Ersatzzeitpunktes. Hingegen statische Komponenten, wie z.B. die Führungsschienen, weisen unter günstigen Bedingungen einen von der Nutzungsintensität weniger abhängigen Verschleiß auf. Eine kontinuierliche Diagnose würde keine wesentliche Genauigkeitsverbesserung zur Bestimmung des Ersatzzeitpunktes erzielen (z.B. Komponente n in Abbildung 4.7).

4.3 Aufzugsspezifische Kostendatenstruktur

Kosten für die Erstellung bzw. Modernisierung und den Betrieb von Aufzügen lassen sich in die im Bauwesen etablierten Kostengruppen für Baukosten und Nutzungskosten einordnen. Die Differenzierung nach Komponenten und aufzugsspezifischen Betriebskostenarten findet jedoch bisher nicht statt. Eine Verfeinerung der Kostengruppen und die Zuordnung zu Datenquellen werden in diesem Kapitel erarbeitet, vorgestellt und diskutiert. Daraus ergeben sich erweiterte Schlüsselnummern für die Kostengruppen.

Vorangestellt sei zudem die Festlegung, dass Investitionen für die Erstellung von Neuanlagen und Ersatzinvestitionen für den Austausch von Komponenten bei bestehenden Anlagen als Baukosten im Sinne der DIN 276 [87] betrachtet werden. Alle übrigen Kosten für Inspektion, Wartung und Reparaturen (im Sinne kleinerer Instandsetzungen mit Ersatzteilen ohne den Tausch von Komponenten) werden der DIN 18960 [88] zugeordnet (vgl. Abbildung 4.8 und Abschnitt 5.2.1).

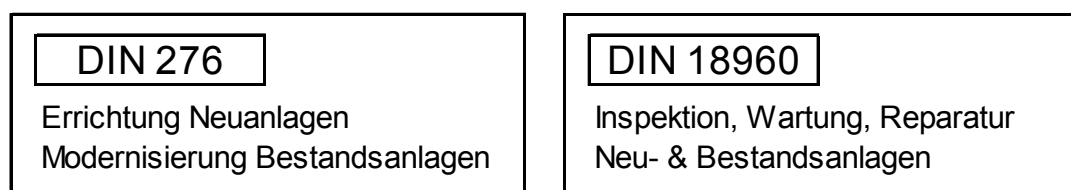


Abbildung 4.8: Abgrenzung DIN 276 / DIN 18960 im Kontext von Aufzügen (Quelle: eigene Darstellung)

4.3.1 Relevante Kostengruppen

Für die Erstellung und Modernisierung von Aufzügen (Investitionen und Ersatzinvestitionen) ist die Kostengruppe 461 nach DIN 276-1 relevant (vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Bei den Nutzungskosten sind die Nutzungskostengruppen 316 (für den Betriebsstrom), 353 (für Inspektion und Wartung) sowie 426 (für die Instandsetzung im Sinne von Reparaturen) relevant (vgl. Abschnitt 5.2.1.3). In der vorliegenden Arbeit wird, darauf aufbauend, für die eindeutige Zuordnung der Kosten vom Autor eine vierte Ebene neu definiert. Die vierte Ebene (vgl. Tabelle 31) bezeichnet eindeutig die jeweilige Komponente des Aufzugs innerhalb der Komponentengruppen Maschinenraum (M), Fahrkorb (F) sowie Schachtausrüstung und Zugänge (S). Da die beiden Normen DIN 276 und DIN 18960 zur Zeit nicht aufeinander abgestimmt sind, ist die Eindeutigkeit bis zur dritten Ebene nicht gewährleistet. Deshalb wird ergänzend zur jeweiligen Kostengruppe für die Ersatzinvestition ein B (Baukosten) und den Nutzungskostengruppen ein N vorangestellt.

Beispiel:

Für die Komponente Steuerung (ID 1 nach Tabelle 31) lassen sich die Kosten nun eindeutigen, aufzugsspezifischen Kostengruppen zuweisen:

- Kosten für den kompletten Austausch (Ersatzinvestition):
B.461.M.1
- Kosten für den elektrischen Energiebedarf bzw. -verbrauch (E):
N.316.E.M.1
- Kosten für Inspektion (I):
N.353.I.M.1
- Kosten für Wartung (W):
N.353.W.M.1

- Kosten für die Instandsetzung im Sinne von Reparaturen (R):
N.426.R.M.1

Kosten für die Prüfung durch eine ZÜS betreffen die Betriebssicherheit des Gesamtsystems Aufzug und werden anstelle einer Komponente mit ZÜS gekennzeichnet (N.353.ZÜS). Für das Notrufsystem entstehen neben den Inspektions- und Wartungskosten regelmäßige Kosten für den Telefonanschluss (Festnetz oder GSM) und ggf. Mietkosten für das Übertragungsgerät, weshalb für diese Komponente eine zusätzliche Nutzungskostenart (N) notwendig wird, die nicht der Instandhaltung zugeordnet werden kann: N.TK.M.9⁵⁸.

Tabelle 31: eindeutige Nummerierung der Komponenten innerhalb der Komponentengruppen M, F und S (Quelle: eigene Darstellung)

		Komp.-ID			Komp.-ID
Maschinenraum (M)	Steuerung	1	Schachtausrüstung und Zugänge (S)	Tragseile mit Aufhängungen	27
	Regelung	2		Führungsschienen Gegengewicht	28
	Antrieb	3		Gegengewicht	29
	Treibscheibe	4		Fangvorrichtung Gegengewicht	30
	Ableitrolle	5		Führungen	31
	Umlenkrolle/n	6		Umlenkrolle(n) Gegengewicht	32
	Geschwindigkeitsbegrenzer Kabine	7		Führungsschienen Fahrkorb	33
	Geschwindigkeitsbegrenzer Gegengewicht	8		Spannvorrichtung Begrenzerseil Kabine	34
	Notrufsystem/Übertragungsgerät	9		Spannvorrichtung Begrenzerseil Gegengewicht	35
Fahrkorb (F)	Fangrahmen	10		Schachtbeleuchtung	36
	Fahrkorbeinsatz	11		Sprechstellen Schachtgrube	37
	Fangvorrichtung	12		Schachttüren 1	38
	Führungen	13		Außentableau 1	39
	Umlenkrolle(n) Fahrkorb	14		Zusatzanzeigen 1	40
	Kabinentür 1	15		Schachttüren 2	41
	Kabinentürantrieb 1	16		Außentableau 2	42
	Kabinentür 2	17		Zusatzanzeigen 2	43
	Kabinentürantrieb 2	18		Puffer Kabine	44
	Innentableau 1	19		Puffer Gegengewicht	45
	Zusatzanzeigen	20			
	Innentableau 2	21			
	Sprechstellen für Notruf	22			
	Beleuchtung	23			
	Lüfter	24			
	Fahrkorbverkleidung (innen)	25			
	Fußbodenbelag	26			

⁵⁸ Telekommunikationskosten (TK) für Komponente 9 im Maschinenraum

4.3.2 Bereitstellung von Kostendaten

In Abhängigkeit der jeweiligen Lebenszyklusphase sind Kostendaten von unterschiedlichsten Akteuren abzufragen bzw. bereitzustellen. Hierzu ist festzustellen, dass objektkonkrete Kostendaten i.d.R. nur über Angebote eingeholt werden können. Dies gilt für den Neubau und die Modernisierung sowie für die Instandhaltung, insbesondere für Wartungsverträge, gleichermaßen. Im Rahmen der Zielstellung dieser Arbeit und im Hinblick auf das Planungshilfsmittel in Kapitel 8 sind plausible Größenordnungen eine Voraussetzung für die korrekte Anwendung. In den folgenden Abschnitten werden hierzu Daten aus verschiedensten Quellen zusammengetragen und aufbereitet. Kosten für die Planung und Beratung werden zunächst nicht explizit berücksichtigt.

4.3.2.1 Baukosten auf Basis der Herstellerangaben von Systemen und Komponenten

Aufzugs- und Komponentenhersteller unterliegen insbesondere beim Neuanlagengeschäft einem scharfen Preiswettbewerb, der so weit geht, dass (außer bei Spezialaufzügen bzw. Sonderanfertigungen) schon seit Jahren nicht mehr kostendeckend gearbeitet werden kann. [12, S. 29] Aus Sicht des Autors dieser Arbeit geht hieraus auch eine zu beobachtende Intransparenz bei der Preisfindung hervor, die eine systematische Ermittlung von Durchschnitts- oder Referenzpreisen erschwert. Großkunden von Aufzugsherstellern prüfen deshalb bereits Möglichkeiten, wie Referenzpreise durch eine Nachbildung des typischen Produktions- und Lieferprozesses gängiger Aufzugstypen im eigenen Hause ermittelt werden könnten, um die Preisvorgaben bei Ausschreibungen konkreter zu gestalten.⁵⁹ Alternativ besteht die Möglichkeit, tatsächlich abgerechnete Modernisierungs- bzw.

⁵⁹ diskutiert in einem Expertengespräch mit Herrn Ralf Altpeter am 09.03.2017 (zu diesem Zeitpunkt Senior Manager bei der Kerkhoff Cost Engineering GmbH)

Neubauprojekte, wie im folgenden Abschnitt dargestellt, auszuwerten.

4.3.2.2 Baukosten auf Basis abgerechneter Projekte von Betreibern und Bestandshaltern

Für Baukosten zur Modernisierung eines Treibscheibenaufzuges können 60 % der Kosten für eine komplette Neuinstallation angesetzt werden unter der Voraussetzung, dass Kabine und Schachttüren erhalten bleiben. In den folgenden Ausführungen werden hierzu die ermittelten Baukosten für neu installierte Aufzüge der öffentlichen Hand am Beispiel der Staatlichen Hochbau- und Vermögensverwaltung des Landes Baden-Württemberg ausgewertet. [89] Die darin enthaltenen Kostendaten für Treibscheibenaufzüge erlauben eine Gliederung nach verschiedenen Ausführungsarten und Anforderungen, was in diesem Fall einer Aufschlüsselung bis zur vierten Ebene nach DIN 276 entspricht. Die ausgewerteten Bruttokosten entsprechen dem Kostenstand 2006 und wurden zur Verwendung in der vorliegenden Arbeit mit dem Faktor 1,28 auf den Kostenstand 2016 umgerechnet (Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes [90, S. 26], Bruttoreihe). Anschließend wurde die aktuell gültige Mehrwertsteuer heraus gerechnet, da in der vorliegenden Arbeit durchgängig Nettowerte herangezogen werden. Baukosten für die Errichtung eines neuen Aufzugs werden in Tabelle 32 in Abhängigkeit der Nennlast aufgeführt (ohne Kosten für die Baumaßnahmen des Schachtes). Dabei werden folgende technische Merkmale zugrunde gelegt:

- oben über dem Fahrschacht angeordneter Triebwerksraum,
- Frequenzregelung, Zweiknopfsammelsteuerung⁶⁰ in Mikroprozessortechnik,

⁶⁰ richtungsempfindliche Sammelsteuerung, die beim Ruf des Aufzugs die Vorwahl der Fahrtrichtung durch den Benutzer an jeder Haltestelle ermöglicht

- zentralöffnende bzw. einseitig öffnende Teleskopschiebetüren,
- Schachttüren in grundierter Ausführung ohne Mauerumfassungsverkleidung,
- Kabinenabschlusstür innen und Fahrkorbwände verkleidet in strukturiertem Edelstahlblech, Beleuchtungsdecke in Edelstahlblech oder opalem Glas mit dahinter liegendem Beleuchtungskörper,
- Notrufeinrichtung an eine ständig besetzte Stelle,
- 4 Haltestellen übereinanderliegend,
- Nenngeschwindigkeit: 1,0 m/s.

Tabelle 32: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet (Quelle: [89])

Nennlast	Preis (netto, Stand 2016)
300 bis 600 kg, 4 bis 8 Personen	43.000 €
630 bis 1.000 kg, 9 bis 15 Personen	64.500 €
1.050 bis 2.000 kg, 16 bis 30 Personen	86.000 €

Die zuvor aufgeführten Baukosten erhöhen sich in Abhängigkeit von Sonderausführungen bzw. Abweichungen vom beschriebenen Standardumfang (Tabelle 33).

Tabelle 33: Baukostenzuschläge Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet (Quelle: [89])

Eigenschaft	Zuschlag auf Baukosten (netto, Stand 2016)
Nenngeschwindigkeit 1,6 m/s	30 %
Nenngeschwindigkeit > 1,6 m/s	60 %
je weitere Haltestelle bis 1.000 kg Nennlast	5.400 €
je weitere Haltestelle über 1.000 kg Nennlast	8.600 €
Zweiergruppe bis 1.000 kg Nennlast	100 % + 4.300 €
Dreiergruppe bis 1.000 kg Nennlast	200 % + 6.500 €
Durchladetür ⁶¹ Kabine bis 1.000 kg Nennlast	3.200 €
Durchladetür ⁶¹ Kabine über 1.000 kg Nennlast	4.300 €
Kabinentür und Schachttüren in Glasausführung mit Edelstahlrahmen bis 1.000 kg Nennlast, je Haltestelle	2.200 €
Schachttüren mit Edelstahl verkleidet (schließt Glas aus)	3 %
Zusatzausstattung für Behinderte bis 1.000 kg Nennlast	4.300 €
Zusatzausstattung für Behinderte über 1.000 kg Nennlast	6.500 €
Maschinenraum unten oder maschinenraumlos	15 %

Zum Vergleich seien im Folgenden Kosten für die Herstellung neuer Aufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden nach BKI ([91] [11]) herangezogen (Tabelle 34 und Tabelle 35). Sämtliche Kostenangaben wurden, wie oben, auf den Stand 2016 bereinigt, und es wurde die Mehrwertsteuer heraus gerechnet.

⁶¹ für Kabine mit zwei Zugängen

Wohngebäude

Tabelle 34: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet
(Quellen: ([91] [11]))

Nennlast, Anzahl Haltestellen	Preis (netto, Stand 2016)
630 kg, 5 Haltestellen	51.500 €
630 kg, 5 Haltestellen	81.000 €
630 kg, 4 Haltestellen	32.800 €
630 kg, 4 Haltestellen	31.600 €
630 kg, 4 Haltestellen	32.500 €
630 kg, 4 Haltestellen	34.100 €
1.000 kg, 5 Haltestellen	70.800 €
630 kg, 6 Haltestellen	35.000 €
675 kg, 4 Haltestellen	34.800 €
800 kg, 9 Haltestellen	81.200 €
1.600kg, 5 Haltestellen, bettengerecht, MRL	82.300 €
1.000 kg, 6 Haltestellen	40.400 €

Büro-/Verwaltungsgebäude

Tabelle 35: Baukosten Treibscheibenaufzug, auf 100 gerundet
(Quellen: ([91] [11]))

Nennlast, Anzahl Haltestellen	Preis (netto, Stand 2016)
630kg, 3 Haltestellen	40.100 €
1.000 kg, 8 Haltestellen	79.200 €
1.050 kg, 12 Haltestellen	196.200 €

Die zuvor aufgeführten Kostendaten stellen Richtwerte für die Planung dar, bevor objektkonkrete Angebote bei Herstellern eingeholt werden können.

4.3.2.3 Wartungskosten auf Basis der Angaben von Instandhaltungsdienstleistern

Als Instandhaltungsdienstleister bzw. Anbieter von Wartungsverträgen kommen, wie schon erwähnt, die Hersteller selbst, Dritthersteller oder reine Dienstleister in Frage. Die Auswertung verschiedener Wartungsverträge und -angebote ergab Kosten-

kennwerte nach Tabelle 36. Diese sind mit der Anzahl der vereinbarten Wartungen (hier zwei bis vier pro Jahr) zu multiplizieren.

Tabelle 37 führt die jährlichen Kosten für die pauschale Beseitigung kleinerer Störungen, für die Aufschaltung des Notrufs auf eine ständig besetzte Leitstelle, für die Miete eines dazu notwendigen Übertragungsgerätes sowie die Nutzung eines Standardtelefonanschlusses auf.

Tabelle 36: Beispielhafte Wartungskosten für einen Treibscheibenaufzug (Quellen: verschiedene Dienstleister)

Umfang	Kosten pro Einheit (netto, Stand 2016)
eine Wartung bei vier Haltestellen (Anbieter A)	95,00 €
eine Wartung bei bis zu sechs Haltestellen (Anbieter B)	60,00 €
eine Wartung bei sieben Haltestellen einschl. Bereitstellung aller Schmiermittel (Anbieter C)	200,00 €
eine Wartung bei vier Haltestellen mit Zusatzleistungen ⁶² (Anbieter A)	160,00 €
eine Wartung bei bis zu sechs Haltestellen mit Zusatzleistungen ⁶² (Anbieter B)	130,00 €
eine Wartung bei bis zu sechs Haltestellen als Vollwartung bei höchstens 10 Jahre alter Aufzugs- anlage (Anbieter B)	200,00 €

⁶² erweiterte Einstellarbeiten

Tabelle 37: Beispielhafte Kosten für Zusatzleistungen und Notrufweiterleitung (Quellen: verschiedene Dienstleister)

Umfang	jährliche Kosten (netto, Stand 2016)
Beseitigung kleinerer Störungen (Anbieter C)	570,00 €
Miete eines Fernnotrufgerätes (Anbieter C)	480,00 €
Aufschaltung eines Fernnotrufgerätes auf eine Leitstelle (Anbieter A)	30,00 €
Aufschaltung eines Fernnotrufgerätes auf eine Leitstelle (Anbieter C)	40,00 €
Telefonanschluss (Standard)	180,00

Bei den genannten Anbietern A bis C handelt es sich um zwei mittelständische und ein großes Unternehmen. Auch hier gilt, wie im vorigen Abschnitt, dass es sich um Richtwerte für die Planung handelt, bevor von den Herstellern bzw. von Wartungsunternehmen konkrete, objektspezifische Angebote eingeholt werden können. In diesen Kosten sind die Gebühren für die wiederkehrenden Prüfungen durch eine ZÜS nicht enthalten.

5 Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus

Ziel dieses Kapitels ist es, einerseits ein Grundverständnis für mögliche Lebenszyklusmodelle von Gebäuden herzustellen und andererseits damit im Zusammenhang stehende Normen und Richtlinien zu beleuchten. Dies schafft die methodische Voraussetzung, um die beim Betrieb von Personenaufzügen entstehenden Kosten (verursacht durch den Energie- und Instandhaltungsaufwand, vgl. Kapitel 3 und 4) innerhalb der gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus (Lebenszykluskosten⁶³) zu verorten. Während in diesem Zusammenhang zunächst allgemein sämtliche Kosten von der Planungs- und Bauphase über die Nutzungsphase bis hin zur Umnutzung oder zum Rückbau angesprochen werden, assoziiert der Begriff Zyklus etwas mehr oder weniger regelmäßig Wiederkehrendes. Der Lebenszyklus stellt sowohl ein zeitliches als auch ein logisches Modell dar. Er ist unterteilbar in Phasen, die wiederum jeweils selbst einen Zyklus darstellen können. [92] Abbildung 5.1 zeigt die über die Lebenszykluskosten hinausgehenden Aspekte einer Lebenszyklusbetrachtung sowie die Einordnung des Betrachtungsgegenstandes „Personenaufzug“. Dabei sind die Ökobilanz und Themen zur Nutzerzufriedenheit neben den Lebenszykluskosten wichtige Bausteine der Lebenszyklusbetrachtung des Gebäudes. Der Energie- und Instandhaltungsaufwand fließt einerseits mit den dadurch verursachten Kosten in die Lebenszykluskostenrechnung des Gebäudes ein und andererseits wird dadurch die Ökobilanz beeinflusst, z.B. durch den Energiebedarf in der Nutzungsphase oder die Schonung von Ressourcen durch die Weiterverwendung von bestehenden Bauteilen und Komponenten bei der Modernisierung. Schließlich

⁶³ im Sprachgebrauch üblicher kompakter Begriff für „gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“

werden durch eine geeignete Instandhaltung die Sicherheit und die Zuverlässigkeit eines Aufzugs aufrecht erhalten, was einen direkten Bezug zur Zufriedenheit der Nutzer des Gebäudes herstellt.

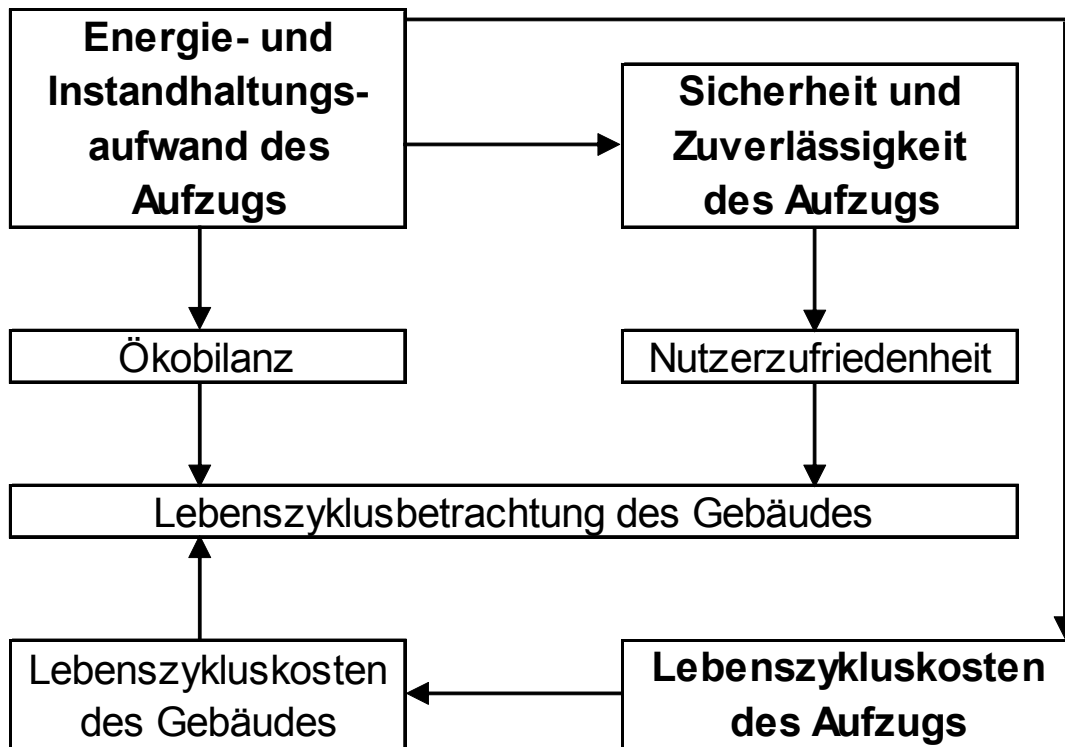


Abbildung 5.1: Lebenszykluskosten als ein Bestandteil einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung (Quelle: eigene Darstellung)

5.1 Lebenszyklusmodelle

Bezogen auf Bauwerke treten u.a. typische Phasen auf, wie die Planung, die Errichtung, die Nutzung und eine spätere Umnutzung sowie schließlich, wenn eine Weiternutzung technisch oder wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll ist, die Verwertung. Eine solche zyklische Sichtweise wird z.B. vom Deutschen Verband für Facility Management (GEFMA) zur Ermittlung von Lebenszykluskosten [93] sowie im GEFMA-Lebenszyklusmodell [94] aufgegriffen. Der Zyklus wird insbesondere daran erkennbar, dass sich jede Phase von der Planung über die Nutzung bis hin zur Verwertung mehr-

fach wiederholen kann (vgl. Abbildung 5.2). Eine abschließende Verwertung wird nicht ausgeschlossen. Bis dahin sind mehrere Phasen möglicher Umnutzungen sowie Sanierungen und Modernisierungen möglich, die den realen Abläufen in Gebäuden entsprechen. Es wird später deutlich, dass bestehende Personenaufzüge nach der „Errichtung“ innerhalb eines klar definierten Ausschnitts des zyklischen Modells verortet werden können, z.B. im Zyklus „Betrieb und Nutzung“ sowie „Sanierung / Modernisierung“ – ggf. mehrmals abwechselnd (vgl. Abschnitt 5.1.1).

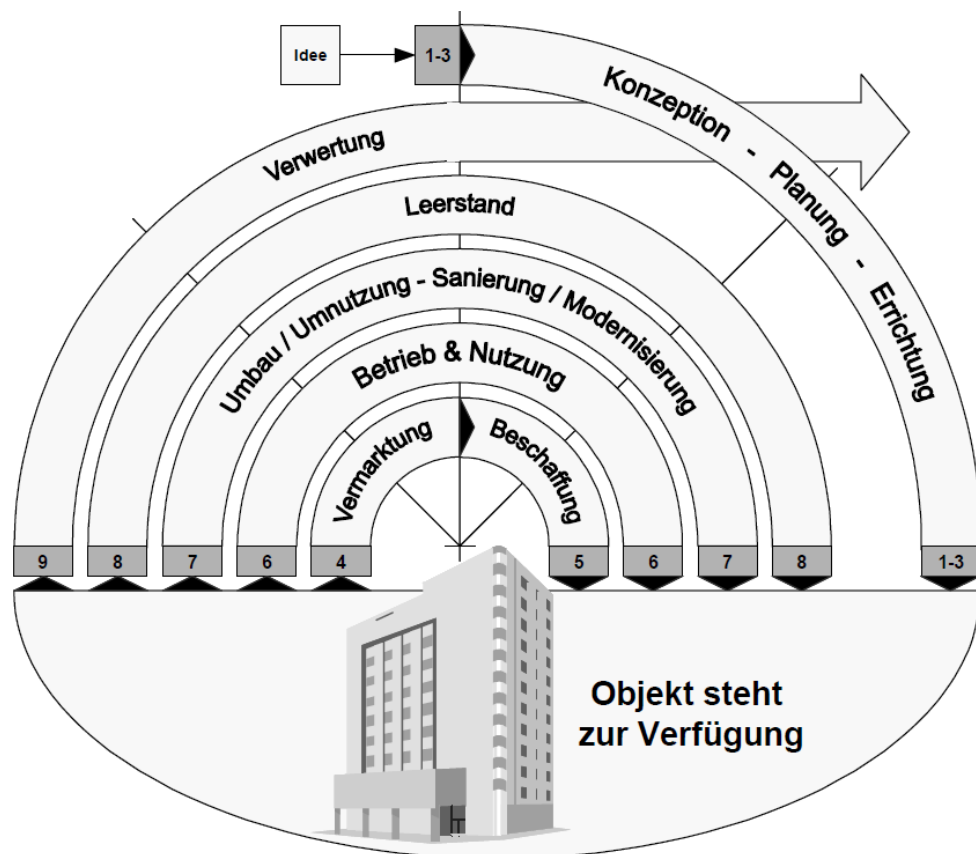


Abbildung 5.2: GEFMA-Lebenszyklusmodell (Quelle: [94, S. 6])

Um der Komplexität des Immobilienlebenszyklus gerecht zu werden, ist nach [95] auch eine mehrdimensionale Sichtweise und Darstellung möglich (vgl. Abbildung 5.3). Die wesentlichen Phasen des Lebenszyklus werden mit den jeweiligen phasenspezifischen

Funktionen beschrieben (z.B. Instandhaltung in der Nutzungsphase oder „Redevelopment“ in der Verwertungsphase). Alle Phasen erfordern gleichermaßen Führungsfunktionen (Management), wie z.B. Planung und Kontrolle sowie die damit verbundene Nutzung spezieller Funktionen, wie z.B. Finanzierung und Bewertung. Insgesamt ergibt sich daraus ein dreidimensionales Modell. „Redevelopment“ bzw. Umwidmung in der Verwertungsphase rechtfertigen auch bei diesem Modell den Begriff Zyklus. Bestehende Aufzugsanlagen lassen sich nach ihrer Entstehungsphase im Bereich Nutzung, Instandhaltung, Modernisierung und „Redevelopment“ einordnen.

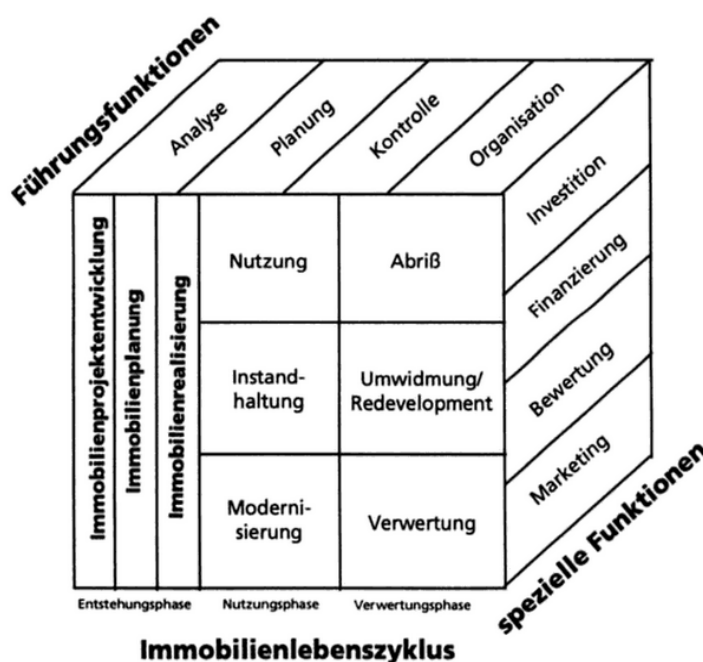


Abbildung 5.3: Komplexität des Immobilienlebenszyklus – mehrdimensionale Darstellung (Quelle: [95])

Die in Abschnitt 3.1 erwähnten Umweltproduktdeklarationen bieten in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, ausgewählte oder alle Lebenszyklusphasen eines Produkts zu erfassen. Nach

DIN EN 15804 [37] werden in diesem Zusammenhang erweiterte Sichtweisen hinsichtlich des Umfangs der betrachteten bzw. erfassten Phasen im Lebenszyklus dargestellt:

- Herstellungsphase „von der Wiege zum Werkstor“ (cradle to gate) mit Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung,
- Herstellungsphase sowie weitere ausgewählte Phasen „von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen, wie z.B. die Entsorgung und/oder Informationen zu Vorteilen und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (hier Gebäude) oder
- alle Phasen im Lebenszyklus (cradle to grave) einschließlich u.a. der Nutzung, der Instandhaltung, dem Ersatz, des Abrisses und der Beseitigung oder Wiederverwendung.

Umweltproduktdeklarationen können auch für einen (zusammenhängenden) Teil der technischen Gebäudeausstattung (z.B. Aufzug) erstellt werden. Wird dabei ein endlicher Lebenszyklus unterstellt (z.B. im Sinne von cradle to grave), ist anstelle Lebenszyklus auch der Begriff „Lebensweg“ zutreffend.

Neben der Einteilung in Phasen wird beim Lebenszyklusmodell nach DIN EN 15804 der jeweils notwendige Datentyp für die entsprechenden Prozesse in den Lebenszyklusphasen aufgeführt (vgl. Tabelle 38).

Tabelle 38: Phasen, Prozesse und Datentypen in Anlehnung an DIN EN 15804 (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [37, S. 27])

Phasen und Prozesse	Herstellungsphase		Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase
	Herstellen von Rohstoffen	Produktion	Einbauprozesse	Nutzungsprozesse	Entsorgungsprozesse
Prozess-typ	vorgelagerte Prozesse (upstream)	Prozesse, auf die der Hersteller einen Einfluss hat	nachgelagerte Prozesse		
Daten-typ	generische Daten	Durchschnittliche oder spezifische Daten des Herstellers	generische Daten		

Unterschieden wird im Wesentlichen zwischen generischen und herstellereigenen Daten. Generische Daten sind als Daten zu Produkten zu verstehen, die der Hersteller nicht beeinflussen kann. Eine wichtige Bedeutung nimmt nach DIN EN 15804 die Referenzlebensdauer ein, die vom Hersteller angegeben werden muss und demzufolge den oben genannten herstellereigenen Daten zugeordnet wird. Diese müssen zusammen mit passenden Szenarien für die Herstellungsphase, die Errichtungsphase und die Nutzungsphase deklariert und ausgewiesen werden. In Abschnitt 6.1.3 wird die in diesem Abschnitt zunächst allgemein eingeführte Referenzlebensdauer in Form der technischen Lebensdauer eine Rolle zur Bestimmung von Instandhaltungsstrategien spielen.

5.1.1 Zusammenhänge zwischen den Lebenszyklusmodellen von Gebäuden und Aufzügen im Bestand

In Abschnitt 1.2 wurde erläutert, warum der Umgang mit Personenaufzügen im Bestand hinsichtlich der Instandhaltung neben der Errichtung von Neuanlagen im Gebäudebestand in Deutschland eine tragende Rolle spielt. Das in Kapitel 8 entwickelte Planungshilfsmittel konzentriert sich deshalb auf Personenaufzüge im Bestand. Als Voraussetzung für die dazu notwendigen Analysen wird zunächst ein Betrachtungszeitraum (T) festgelegt. Dieser stellt einen klar definierten Ausschnitt aus den im vorigen Kapitel beschriebenen allgemeinen Lebenszyklusmodellen dar. Es wird damit, herausgelöst aus der allgemeinen zyklischen Betrachtungsweise, ein Anfangs- und Endzeitpunkt angenommen. In Anlehnung an deutsche Systeme zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden werden für das gesamte System 50 Jahre festgelegt.⁶⁴ Abbildung 5.4 zeigt in diesem Zusammenhang die zeitlichen Zusammenhänge zwischen der Lebensdauer von Komponenten eines Aufzuges im Verhältnis zur Lebensdauer des Gebäudes innerhalb des Betrachtungszeitraums. Dabei wird deutlich, dass sich die Lebensdauer des Aufzuges aus den Lebensdauern seiner Komponenten zusammensetzt und diese in Abhängigkeit einer gewählten Strategie direkt beeinflusst. Bei einer angenommenen technischen Lebensdauer eines Aufzuges von 25 Jahren wäre die Anlage innerhalb von T einmal komplett zu erneuern. Wird nicht komplett erneuert, sondern werden in entsprechenden Zeitabständen Komponenten getauscht, nähert

⁶⁴ Ausgewählte Aspekte des Gebäuderückbaus sollen grundsätzlich berücksichtigt werden, auch wenn sie außerhalb des Betrachtungszeitraums liegen, wobei zu beachten ist, dass der Betrachtungszeitraum nicht mit der maximalen Lebensdauer des Gebäudes oder der Nutzungsdauer übereinstimmen muss [96]. In der vorliegenden Arbeit werden Aspekte des Rückbaus und der Entsorgung nicht berücksichtigt.

sich die Lebensdauer des Aufzugs innerhalb des Betrachtungszeitraums an die Lebensdauer des Gebäudes an.

Ein entscheidender Betrachtungszeitpunkt (t), oder hier treffender Einstiegszeitpunkt der Betrachtung genannt, liegt aus Sicht dieser Arbeit an einem beliebigen Punkt zwischen 0 und T , bei dem der aktuelle Zustand (in Abhängigkeit der Nutzungsrandbedingungen sowie der bisher durchgeführten Instandhaltung) eines (bestehenden) Gesamtsystems Aufzug beurteilt werden soll, um die zukünftig notwendigen Instandhaltungsschritte bzw. -strategien zu bestimmen (ausführlich beschrieben in Abschnitt 4.2.1). Ohne schrittweise Modernisierung des Aufzugs, d.h. es werden einzelne Komponenten in gewissen Zeitabständen nicht ersetzt, wird der oben beschriebene Fall der Kompletterneuerung eintreten. Im Falle der Strategie der schrittweisen Modernisierung kommen die unterschiedlichen erwarteten Lebensdauern der Komponenten 1 bis n des Aufzugs ins Spiel. Komponente 1 könnte in Abbildung 5.4 beispielhaft für die Steuerung, Komponente 2 für den Antrieb und Komponente 3 für die Tragseile stehen. Weitere n Komponenten ergänzen das Gesamtsystem Aufzug schließlich und entscheiden im Zusammenspiel über die mögliche Verlängerung der Gesamtlebensdauer des Aufzugs, die ohne schrittweise Modernisierung beispielsweise 25 Jahre betragen kann. Wesentliche Komponenten (in den später folgenden Ausführungen auch komplexe Komponenten genannt, wie z.B. die Steuerung), deren technische Lebensdauer durch den Austausch einzelner Bauteile⁶⁵ verlängert werden kann, werden auch als „strategisch“ bezeichnet (vgl. [97] [98] [99] [100]). Als „strategisch“ bezeichnet man diese Komponenten auch deshalb, weil deren kompletter Ersatz durch den Austausch einzelner Bauteile zeitlich deutlich verzögert werden kann – unter Umständen bis zum Ende des Betrachtungszeitraums.

⁶⁵ Unter Bauteile werden hier die Einzelteile der Komponenten verstanden, z.B. die Leiterplatten oder Schütze einer Steuerung.

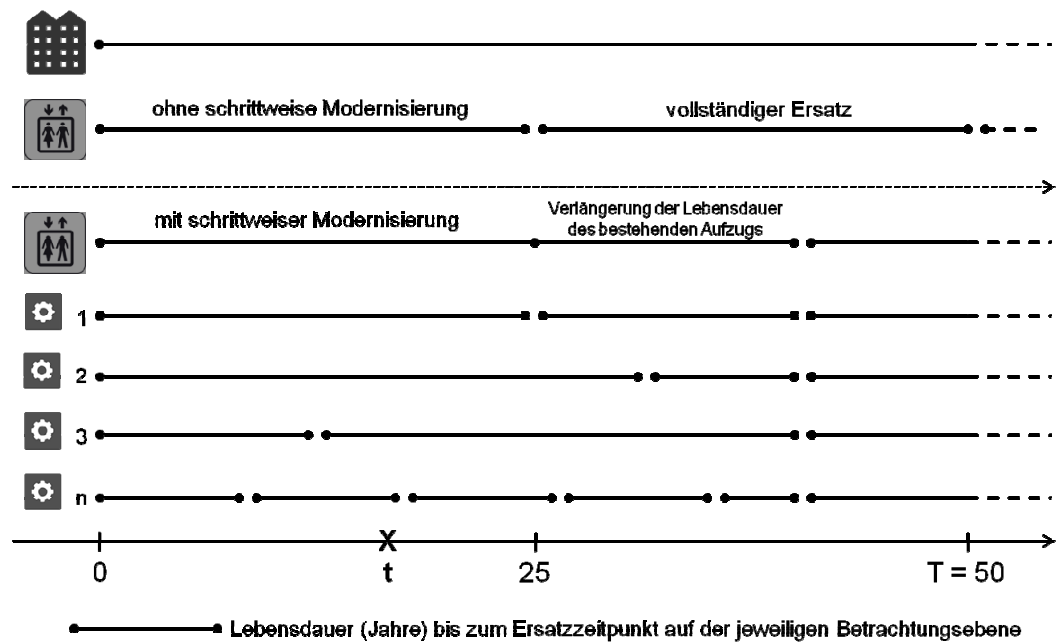


Abbildung 5.4: Lebensdauern des Aufzugs und seiner Komponenten (Anzahl n , Bauteile nicht dargestellt) mit Einordnung in den gebäudebezogenen Lebenszyklus (Quelle: eigene Darstellung)

5.2 Methodischer Rahmen der LZK

Das vorangegangene Kapitel zeigt, wie sich die Lebensdauern des Aufzugs und seiner Komponenten in den gebäudebezogenen Lebenszyklus einordnen lassen. Zusammen mit den für den Betrieb der Komponenten notwendigen Energiekosten sind dies die Verursacher sämtlicher Kosten im Lebenszyklus eines Aufzuges. Im Umgang mit Lebenszykluskosten für die Planung und zur Erfolgskontrolle im laufenden Gebäudebetrieb sind dazu neben den aufzugsspezifischen Methoden allgemeine, für das gesamte Gebäude geltende Methoden sowie nachvollziehbare Konventionen zur Sicherung von Vergleichbarkeit und Transparenz erforderlich. Diese werden in den folgenden Abschnitten behandelt und eingeschätzt. Schließlich sollen die Ergebnisse für eine weitere Verwendung, z.B. für die Bildung von Kennwerten und die Beurteilung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit zur Verfügung

stehen (in der vorliegenden Arbeit mit Anwendung der Annuitätenmethode in Kapitel 7).

5.2.1 Stand nationaler und internationaler Normungs- und Richtlinienarbeit

Nationale und internationale Normen und Richtlinien bilden eine Ausgangsbasis, um die Art der Berechnung von Lebenszykluskosten zu vereinheitlichen oder im Minimum transparent zu beschreiben sowie ihre Ergebnisse interpretierbar vorzustellen und im besten Fall vergleichbar zu machen. Sie beziehen sich überwiegend auf die Gliederung und den Umfang der zu betrachtenden Kostenarten. Normative Festlegungen zu den Berechnungsmethoden sind nur international, u.a. in Österreich, zu finden.

5.2.1.1 VDI 2884

Die VDI-Richtlinie 2884 [101] liefert nützliche Anhaltspunkte zur Informationsbereitstellung. Für den jeweiligen Beschaffungsfall (hier Instandhaltungsleistungen) werden Art, Umfang und mögliche Herkunft benötigter Daten aufgeführt. Dabei werden die Phasen „vor der Nutzung“, „während der Nutzung“ und „nach der Nutzung“ unterschieden. Der Ansatz sieht vor, bereits vor der Nutzung Beschaffungsalternativen zu prüfen und festzulegen, ob die Informationsbeschaffung durch den Betreiber oder den Hersteller erfolgen soll. Laut VDI-Richtlinie sind für den konkreten Entscheidungsprozess die jeweils relevanten Kosten und Faktoren auszuwählen. Eine allgemeine Auswahl und eine tabellarische Struktur werden vorgeschlagen und darauf hingewiesen, dass die Angaben im spezifischen Anwendungsfall ergänzt werden können. Darauf aufbauend zeigt Tabelle 39 einen möglichen methodischen Rahmen der Lebenszykluskosten von Aufzügen, strukturiert nach den Hauptkomponenten des Aufzugs und den Lebenszyklusphasen.

Tabelle 39: Zusammenfassung der Verursacher von Lebenszykluskosten, der jeweiligen geeigneten Datenquellen und der zuständigen Akteure bzw. Verantwortungsbereiche (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [102])

Aufzugskomponente	Lebenszykluskostenbestandteile des Aufzugs für...									Rückbau
	Errichtung	Betrieb								
		Energie	Instandhaltung							
			Stillstand & Fahrt	laufende Kontrollen	Personenbefreiung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Zwischenprüfung	
Antrieb & Tragseile	X	X	(X)	X	X	X	X	X	X	X
Steuerung & Regelung	X	X	(X)	X	X	X	X	(X)	X	X
Befehls- & Signalgeber	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Kabine, Fangrahmen, Gegengewicht	X	(X)			X	X	X	X	X	X
Kabinenausstattung	X	(X)	X		X		X		(X)	X
Kabinenbeleuchtung	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Kabinentür(en)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Schachttüren	X	(X)	X	X	X	X	X	X	X	X
Führungsschienen	X	(X)			X	X	X	X	X	(X)
Sicherheitskomponenten	X	(X)		X	X	X	X	X	X	X
Kommunikationstechnik	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Anlagendokumentation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	(X)
Datenquelle	Kostenfeststellung	Monitoring / Abrechnungen / Verträge								
Akteur im Auftrag des Betreibers	Hersteller	beauftragte Person	Instandhaltungsunternehmen	ZÜS						

Tabelle 39 bietet zudem einen Überblick, welcher Akteur im Auftrag des Betreibers in der jeweiligen Lebenszyklusphase

handelt. Wesentliche Akteure im Auftrag des Betreibers und im Zusammenhang mit der Instandhaltung von Aufzügen sind:

- der Hersteller bzw. Errichter des Aufzugs,
- die vom Betreiber des Aufzugs beauftragte Person für regelmäßige Kontrollen und Personenbefreiung im Störfall,
- das Instandhaltungsunternehmen sowie
- die zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) für die wiederkehrenden Prüfungen.

Die in Abschnitt 4.2 behandelten Instandhaltungsstrategien lassen sich somit direkt organisatorischen Verantwortungsbereichen zuordnen.

5.2.1.2 DIN 276-1

Die DIN 276-1 [87] stellt in Deutschland eine etablierte Basis zur Strukturierung der Kosten im Bauwesen für die Erstellung des Bauwerks (Hochbau) dar. In drei Ebenen erfolgt die Gliederung in Kostengruppen. Die erste Ebene enthält sieben Kostengruppen (erste Gliederungsebene):

- 100 Grundstück
- 200 Herrichten und Erschließen
- 300 Bauwerk — Baukonstruktionen
- 400 Bauwerk — Technische Anlagen
- 500 Außenanlagen
- 600 Ausstattung und Kunstwerke
- 700 Baunebenkosten

Sie umfassen die Kosten für den Neubau, den Umbau und die Modernisierung von Bauwerken sowie die damit zusammenhängenden projektbezogenen Kosten. Bei Bauprojekten im Bestand sollten die Kosten nach Abbruch, Instandsetzungs- und Neubaumaßnahmen unterschieden werden.

Auf zweiter Gliederungsebene umfasst die Kostengruppe 460 die Förderanlagen, die auf dritter Gliederungsebene innerhalb der Kostengruppe 461 Aufzugsanlagen im Kontext der vorliegenden Arbeit (Personenaufzüge) erfasst. Eine Erfassungsstruktur auf Komponentenebene (4. Gliederungsebene) wird in der DIN 276 nicht vorgegeben. Auf die Entwicklung von für Personenaufzüge geeigneten und notwendigen weiteren Gliederungsebenen wurde deshalb bereits in Kapitel 4.3.1 ausführlich eingegangen.

In Deutschland, bereits eingangs erwähnte, etablierte Systeme zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden mit Berechnung der gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus konzentrieren sich zur Zeit überwiegend auf ausgewählte Aspekte der Kostengruppen 300 und 400. Weitere Kostengruppen, wie z.B. Planungs- oder Kapitalkosten werden derzeit i.d.R. nicht berücksichtigt.

Eine überarbeitete DIN 276, als Zusammenfassung von DIN 276-1 (für Hochbau) und DIN 276-4 (für Ingenieurbau) liegt seit Juli 2017 als Entwurf vor. [103] Neben verschiedenen Änderungen, wie z.B. die Einführung einer separaten Kostengruppe 800 für Finanzierungskosten (bisher KG 760), werden nun für die einzelnen Kostengruppen der drei Gliederungsebenen konkrete Bezugsgrößen zur besseren Vergleichbarkeit von Kostenkennwerten genannt. Während für die Kostengruppen 300 und 400 die BGF als übergeordnete Bezugsgröße genannt wird, werden in der zweiten und dritten Gliederungsebene konkrete, zu den jeweiligen Gewerken passende Bezugsgrößen genannt, z.B. die Länge von Rohrleitungen bei Wärmeverteilnetzen (KG 422) oder die Anzahl der Stockwerke bei Personenaufzügen (KG 461).

5.2.1.3 DIN 18960

Die DIN 18960 [88] gliedert die Nutzungskosten im Hochbau und damit vorzugsweise für Gebäude und bauliche Anlagen in drei Ebenen. Die erste Ebene ist unterteilt in:

- 100 Kapitalkosten,
- 200 Objektmanagementkosten,
- 300 Betriebskosten,
- 400 Instandsetzungskosten.

Vergleichbar zu den Baukosten, kann die Betrachtung von Nutzungskosten im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung auf ausgewählte Nutzungskostengruppen (NGK) eingeschränkt werden. Am Beispiel des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB)⁶⁶ sind dies folgende:

NKG 311: Versorgung- Wasser

NKG 312: Versorgung - Öl

NGK 313: Versorgung - Gas

NGK 314: Versorgung - feste Brennstoffe

NGK 315: Versorgung - Fernwärme

NGK 316: Versorgung - Strom

NKG 321: Entsorgung - Abwasser

NKG 331, 332 und 333: Unterhalts-, Glas- und Fassadenreinigung

NKG 352: Inspektion und Wartung der Baukonstruktion

NKG 353: Inspektion und Wartung der TGA

NKG 410: Instandsetzung der Baukonstruktion

NKG 420: Instandsetzung der TGA

Während in der NGK 353 keine Unterscheidung nach Gewerken festzustellen ist, werden in der NGK 420 Förderanlagen explizit genannt (NGK 426). Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, wurde deshalb auf die Entwicklung von für Personenaufzüge geeigneten und notwendigen weiteren Gliederungsebenen bereits in Kapitel 4.3.1 ausführlich eingegangen.

Aus der Norm geht zudem nicht eindeutig hervor, welcher Umfang der Instandsetzungskosten im Rahmen der NGK 410 und 420 erfasst werden soll. Eine mögliche Lösung besteht darin, kleinere

⁶⁶ www.bnb-nachhaltigesbauen.de (zuletzt geprüft am 23.07.2018)

Reparaturen den jeweiligen Nutzungskostengruppen in der DIN 18960 und Ersatzinvestitionen (kompletter Austausch von Bauteilen und Komponenten) den jeweiligen Kostengruppen der Baukosten nach DIN 276-1 zuzuordnen. Diese vorgeschlagene Lösung basiert darauf, dass die Modernisierung in der DIN 276-1 explizit erwähnt wird und somit Ersatzinvestitionen einschließt.

5.2.1.4 Geislinger Konvention

Die Geislinger Konvention⁶⁷ liefert eine Struktur zur Gliederung von Betriebskosten, orientiert an den Besonderheiten des Wohnungsbaus, hier auch Nebenkosten genannt. Sie entstand im gleichnamigen Arbeitskreis, zu dem sich maßgebliche Vertreter der Wohnungswirtschaft zusammenfanden. 14 übergeordnete Kostenarten werden definiert:

- Lfd. Öffentliche Lasten,
- Wasserversorgung und Entwässerung (getrennte Erfassung),
- Wasserversorgung und Entwässerung (verbundene Erfassung),
- Zentrale Heizanlage,
- Zentrale Wasserversorgungsanlage,
- Verbundene Heizungs- und Warmwasserversorgungsanlagen,
- Fahrstuhl / Aufzug,
- Straßenreinigung / Müllgebühren,
- Gebäudereinigung / Ungezieferbekämpfung,
- Gartenpflege / Beleuchtung,
- Schornsteinreinigung,
- Sach- und Haftpflichtversicherung,
- Hauswart.

⁶⁷ vgl. <https://www.hfwu.de/forschung-und-transfer/institute-und-zentren/weitere-einrichtungen-und-forschungsinitiativen/geislinger-konvention/> (zuletzt geprüft am 23.07.2018)

Es fällt auf, dass die Position „Fahrstuhl / Aufzug“ im Vergleich zu den anderen Normen und Richtlinien hier eine zusätzliche aufzugsspezifische Untergliederung in sechs Punkte umfasst:

- Wartung / Bedienung / Reinigung / Pflege,
- Prüfgebühren (TÜV etc.),
- Betriebsstrom,
- Notruf / Telefon,
- Aufzug Gewerbe,
- Sonstige Fahrstuhl- / Aufzugskosten.

Hierzu lässt sich feststellen, dass konsequenterweise keine Instandsetzungskosten in den o.g. genannten Punkten enthalten sind, da diese bei Wohnungsmietverträgen gemäß § 2 der aktuell gültigen Betriebskostenverordnung⁶⁸ (BetrKV) nicht auf die Mieter umlegbar sind.

5.2.1.5 GEFMA 220 und 200

Die GEFMA-Richtlinie 220-1 [104] behandelt Grundlagen zur Lebenszykluskosten-Ermittlung. Darin wird zwischen den Lebenszykluskosten (im engeren Sinne) und dem Lebenszykluserfolg (Lebenszykluskosten im weiteren Sinne) unterschieden. Lebenszykluskosten umfassen alle im Lebenszyklus anfallenden Kosten⁶⁹ und entsprechen damit dem englischen Begriff Life Cycle Cost (LCC). Werden zusätzlich Einzahlungen (z.B. aus Mieterlösen oder Lieferung von Energie an Dritte) berücksichtigt, spricht man auch vom Lebenszykluserfolg. An anderer Stelle (vgl. z.B. [105]) wird der Lebenszykluserfolg auch als Lebenszykluskosten im weiteren Sinne bezeichnet.

Die GEFMA-Richtlinie 200 [106] schlägt eine lebenszyklusübergreifende Kostengliederungsstruktur vor. Darin eingebettet sind

⁶⁸ https://www.gesetze-im-internet.de/betrkv/_2.html (zuletzt geprüft am 23.07.2018)

⁶⁹ Zum Begriff „Kosten“ vgl. Anmerkungen in Abschnitt 1.5.

die Kostengruppen der DIN 276 und DIN 18960. Die Erweiterungen umfassen im Wesentlichen die Berücksichtigung von Kosten in der Konzeptionsphase, Kosten für Support und FM-Leistungen in der Nutzungsphase sowie die abschließende Verwertungsphase. Für die umfangreiche Struktur wurde dazu eine eigenständige Gliederung mit mehrstelliger Ziffernfolge entwickelt. Die erste Ziffer bezeichnet die Lebenszyklusphase (z.B. „6“ für Betriebs- und Nutzungsphase). Der jeweilige FM-Prozess wird mit der zweiten bis fünften Stelle bezeichnet, z.B. „3“ für Objektbetrieb und Objektführung, „2“ für wiederkehrende Prüfungen und an fünfter Stelle eine weitere Ziffer für eine optionale Gliederung (ohne Verwendung mit „0“ belegt). Für Aufzugsanlagen würde die Gliederungsnummer der o.g. Beispielziffern so aussehen: „6.320.461“, wobei die letzten drei Ziffern die Kostengruppe aus der DIN 276 aufnehmen. Neben den wiederkehrenden Prüfungen in der FM-Phase Objektbetrieb und Objektführung werden Aufzüge auch im FM-Prozess Reinigung & Pflege (516) explizit berücksichtigt. An anderen Stellen, wie z.B. bei der Instandsetzung & Erneuerung, werden Aufzüge nicht explizit erwähnt. Sie lassen sich jedoch nach dem gleichen Schema vom Anwender einordnen, so dass diese Struktur eine systematische, lebenszyklusbegleitende Einordnung von Aufzügen zulässt.

5.2.1.6 ISO 15686-5

Die internationale Norm ISO 15686-5 [107] definiert gemäß Abbildung 5.5 die englischen Begriffe Whole-life cost (WLC) und Life-cycle cost (LCC). LCC entsprechen weitestgehend den im vorigen Abschnitt beschriebenen Lebenszykluskosten im engeren Sinne. Ergänzend können jedoch Umweltkosten, z.B. in Form von umweltbezogenen steuerlichen Abgaben, eingerechnet werden. Bei WLC können zusätzlich Einnahmen, Baunebenkosten und externe Kosten einbezogen werden. Hier ist eine Ähnlichkeit zu den im deutschen Sprachraum im vorigen Abschnitt eingeführten Lebenszykluskosten im weiteren Sinne zu erkennen. Insbesondere

re zu den externen Kosten wird in der Norm darauf hingewiesen, dass diese nur eingerechnet werden dürfen, wenn sie explizit nachweisbar sind.⁷⁰ In Deutschland existiert in diesem Zusammenhang eine Methodenkonvention des Umweltbundesamtes (UBA) zur Schätzung von Umweltkosten (ökonomische Bewertung von Umweltschäden).⁷¹

In Anhang E der in diesem Abschnitt behandelten Norm werden verschiedene Ebenen der Lebenszykluskostenanalyse in Abhängigkeit der verfügbaren Daten genannt. Über die Lebenszyklusphasen der Erstellung, Nutzung (mit Energieaufwand), Instandhaltung und End-of-life werden das Gesamtgebäude, Gebäudeteile, Elemente und Komponenten top-down in die o.g. Ebenen gegliedert. Die späteren Ausführungen in dieser Arbeit unterstützen die Datenbereitstellung auf den Ebenen der Elemente und Komponenten von Personenaufzügen.

⁷⁰ ISO 15686-5 wurde überarbeitet (ISO/TC59/SC14, Stand Entwurfsumfrage des ISO-Zentralsekretariats vom 12.08.2016) und liegt mittlerweile als Version 2017-07 vor.

⁷¹https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_methodenkonvention_2.0_-_2012_gesamt.pdf (zuletzt geprüft am 23.07.2018)

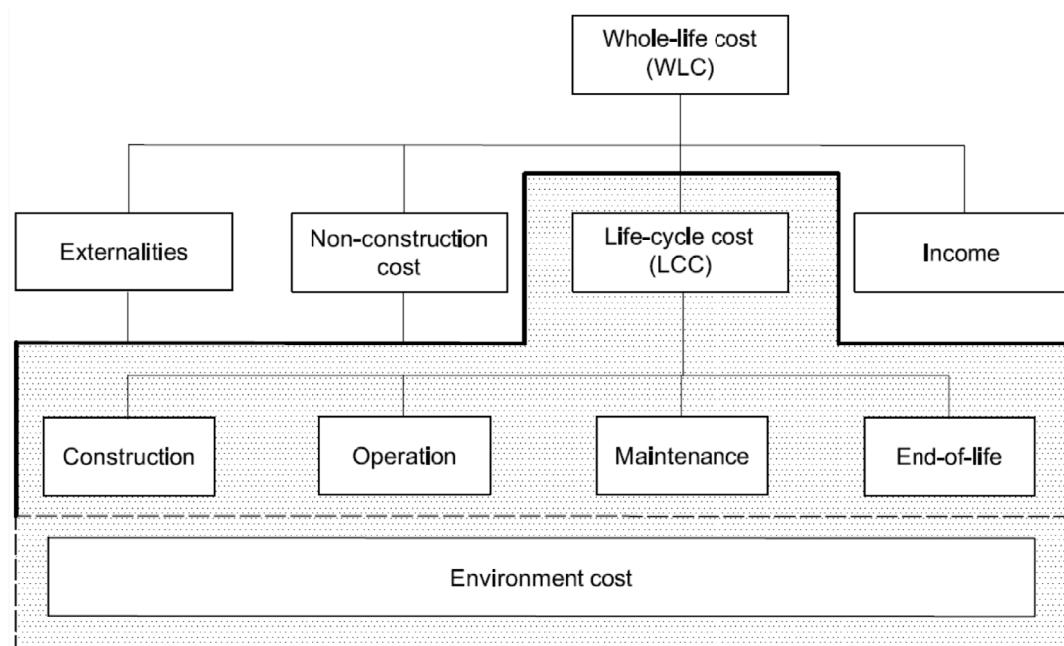


Abbildung 5.5: LCC und WLC nach ISO 15686-5 (Quelle: [107, S. 6])

5.2.1.7 ÖNORM (Österreich)

In Österreich existieren als Pendant zu den deutschen Normen DIN 276 und DIN 18960 die österreichischen Normen ÖNORM B 1801 Teil 1 für die Kosten der Objekterrichtung [108] und Teil 2 für die Objekt-Folgekosten [109]. Die beiden Normteile nehmen aufeinander Bezug.

Teil 1 [108] unterscheidet zwischen einer Baugliederung und einer Leistungsgliederung, die jeweils in drei Ebenen unterteilt sind. Bei der Baugliederung sind diese Ebenen mit den Gliederungsstufen der DIN 276 prinzipiell vergleichbar. Auf der zweiten Ebene finden sich die Grobelemente, auf der dritten die Elemente (zusammen Elementtypen). Die Leistungsgliederung umfasst ebenso drei Ebenen, wobei die zweite als Leistungsebene und die dritte als Unterleistungsebene bezeichnet wird (vgl. Abbildung 5.6).

In der obersten Ebene umfasst die Baugliederung:

- Grund,
- Aufschließung,
- Bauwerk-Rohbau,
- Bauwerk-Technik,
- Bauwerk-Ausbau,
- Einrichtung,
- Außenanlagen,
- Planungsleistungen,
- Nebenleistungen,
- Reserven.

Eine zu Reserven vergleichbare Kostengruppe existiert in der DIN 276 nicht. Gemeint sind hier zum Beispiel Reservemittel für besondere, nicht vorhersehbare Ereignisse, für im Voraus geschätzte Teuerungen oder nicht vorhersehbare Anpassungen.

Die Leistungsgliederung folgt dem gleichen Aufbau wie die Baugliederung und orientiert sich in der zweiten und dritten Ebene an standardisierten Leistungsbeschreibungen.

Vergleichbar zur DIN 276 werden die Stufen der Kostenplanung vom Kostenrahmen bis zur Kostenfeststellung vorgegeben – ergänzt um ein Kostenziel in der Entwicklungsphase (vor der Vorbereitungsphase). Der Umgang mit der Mehrwertsteuer wird nicht vorgegeben, jedoch die Notwendigkeit betont anzugeben, ob sie in den Kostenangaben enthalten ist oder nicht.

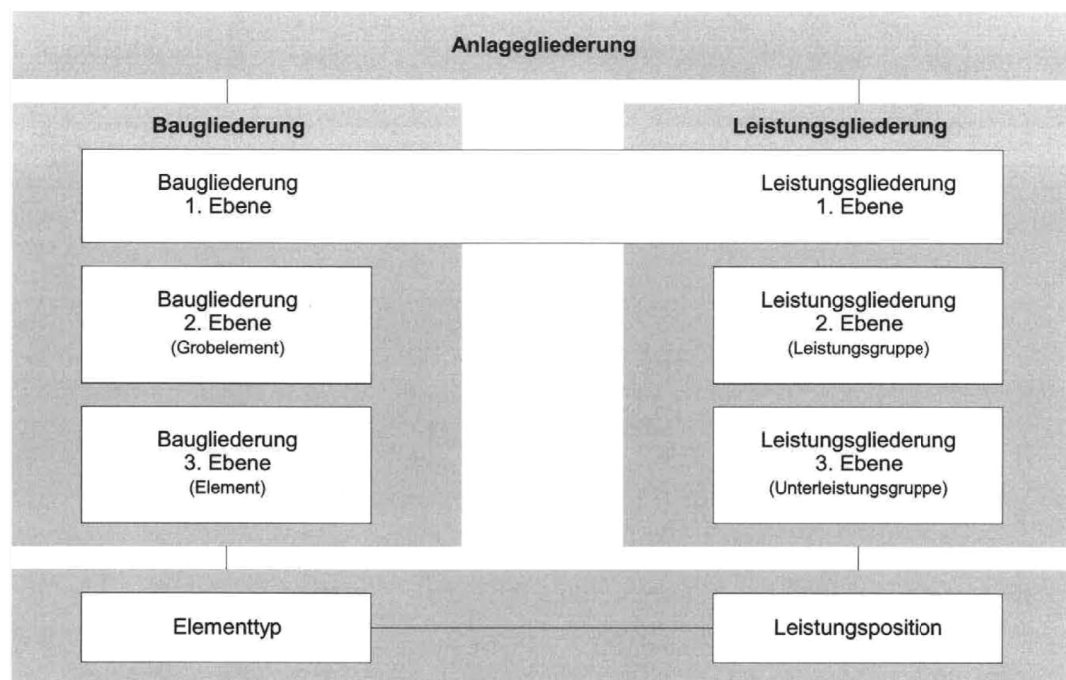


Abbildung 5.6: Gliederungssystem der ÖNORM B 1801-1:2009
(Quelle: [108])

In Teil 2 [109] wird der Begriff der Lebenszykluskosten als Kosten, die sich aus Kosten der Objekterrichtung und den Objekt-Folgekosten zusammensetzen, definiert. Die Objekt-Folgekosten umfassen folgende neun Kostenhauptgruppen für:

- Verwaltung,
- Technischer Gebäudebetrieb,
- Ver- und Entsorgung,
- Reinigung und Pflege,
- Sicherheit,
- Gebäudedienste,
- Instandsetzung, Umbau,
- Sonstiges,
- Objektbeseitigung, Abbruch.

Im Vergleich zur DIN 18960 werden keine Kapitalkosten genannt, zusätzlich enthalten sind jedoch die Kosten für die Objektbeseiti-

gung und den Abbruch. Als weiterer wichtiger Unterschied zur DIN 18960 ist festzuhalten, dass bei Instandsetzung und Umbau explizit auch „große Instandsetzungen“ genannt werden, die bei der Interpretation der deutschen Normen dort eher zu den weiteren im Lebenszyklus auftretenden Baukosten infolge von Ersatzinvestitionen sowie Rückbau und Entsorgung gezählt werden.

Teil 3 (Objekt und Nutzungstypologie) ist für die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit nicht unmittelbar relevant und wird deshalb an dieser Stelle nicht behandelt.

Teil 4 der Normenreihe [110] beschreibt schließlich Methoden zur Berechnung von Lebenszykluskosten und baut auf den Elementtypen und Kostenhauptgruppen der beiden zuvor beschriebenen Teile 1 und 2 auf. Darin wird die Kostengliederung der ISO 15686-5 als zu grob und der Kostenartenbaum der GEFMA 220-1 eher als Handlungsanleitung mit nur wenig normativen Bestimmungen angesehen. Die Barwertmethode wird vergleichbar zu den Vorgehensweisen zu den oben aufgeführten Normen und Richtlinien als Rechenmethode genannt – mit dem Ziel zukünftige Zahlungen auf den Zeitpunkt $t = 0$, an dem die Baukosten in einem Block anfallen, abzuzinsen. Alternativ wird eine Methode zur Berechnung der Lebenszykluskosten mit Berücksichtigung von Abschreibung und Finanzierung angeboten. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Baukosten nicht als Block zum Zeitpunkt $t = 0$ ausgezahlt werden, sondern während des Betrachtungszeitraums abgeschrieben (ohne Grundstückskosten) und finanziert werden (Zins und Tilgung). Abbildung 5.7 stellt den Unterschied zwischen den beiden Methoden dar. Bilanztechnisch bedeutet dies eine Aktivierung der Baukosten. Dabei fällt auf, dass die Kapitalkosten bis zu einem bestimmten Zeitpunkt im Lebenszyklus gegen Null gehen. Der Autor interpretiert dies so, dass hier ausschließlich die Kapitalkosten für die Erstinvestition zum Zeitpunkt $t = 0$ abgebildet sind. Werden für eine spätere Investition (z.B. für Ersatz) erneut fremde Mittel in Anspruch genommen,

würden sich die Kapitalkosten in entsprechender Höhe in Abbildung 5.7 erneut zeigen. Auch eine erneute Abschreibung ersetzter Elemente und Komponenten wäre zu erwarten.

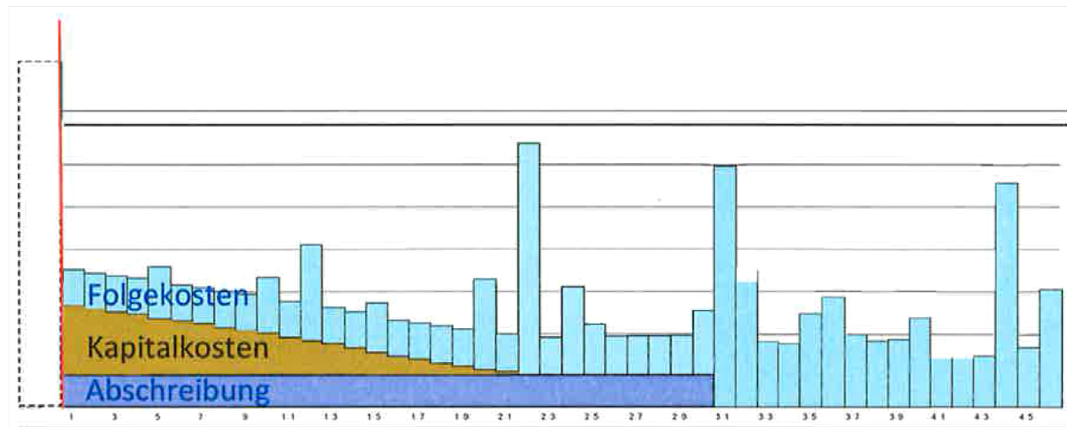


Abbildung 5.7: Lebenszykluskosten mit Abschreibung und Finanzierung nach ÖNORM B 1801-4:2014 (Quelle: [110])

5.2.1.8 SN und SIA (Schweiz)

In der Schweiz existieren, vergleichbar zu Deutschland, keine Normen oder Richtlinien zum Umgang mit Lebenszykluskosten. Die Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierungen (CRB) nennt und beschreibt im LCC Leitfaden „Planung der Lebenszykluskosten“ [111] neben der DIN ISO 15686-5 (vgl. Abschnitt 5.2.1.6) die wichtigsten Schweizer Normen (SN) zur Strukturierung der relevanten Kostenarten:

- SN 506 500 Baukostenplan BKP 2001,
- SN 506 501 Liegenschaftskostenplan,
- SN 506 502 Elementkostengliederung 1995,
- SN 506 511 Baukostenplan Hochbau (2012).

Im Kontext zur Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die SN 506 480 bzw. die Richtlinie SIA 480 vom Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) aufgeführt. Weitere Verweise auf die Richtlinie SIA D 0165 Kennzahlen im Immobilienmanagement

sowie das LCC Handbuch „Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken“ sind im Leitfaden enthalten. Letzterer wurde in Abschnitt 4.1.5 ausführlich behandelt.

Gegenüber der ISO 15686-5 werden Lebenszykluskosten in der Schweiz insbesondere in der Planungs- und Realisierungsphase an schweizerische Besonderheiten angepasst. Wenn neben den Kosten für das Grundstück, den Grundstücksnebenkosten, den Kapitalkosten und der Mehrwertsteuer zusätzlich Erträge, Kosten für Dienste sowie externe Kosten berücksichtigt werden, ist auch von einer „Lebenszykluswirtschaftlichkeit“ die Rede (vgl. Abbildung 5.8). Vergleichbar zur ISO 15 686-5 werden die Kosten am Ende des Lebenszyklus (end-of-life) einbezogen.

Der Betrachtungszeitraum (hier Betrachtungsperiode genannt) solle sich nach der Art des Objektes und nach den Zielsetzungen des Investors richten. Es wird empfohlen, dass der Betrachtungszeitraum üblicherweise 50 Jahre nicht überschreiten soll.

Instandsetzungskosten werden als unregelmäßig wiederkehrend zur Wiederherstellung der Sicherheit und der Gebrauchstauglichkeit betrachtet (aus Sicht des Autors z.B. Reparatur). Von Erneuerung wird gesprochen, wenn Kosten für unregelmäßige Maßnahmen zur Wiederherstellung eines mit dem ursprünglichen Neubau vergleichbaren Zustandes anfallen (aus Sicht des Autors z.B. vollständige Erneuerung einer Komponente). Es wird darauf hingewiesen, dass eine Trennung dieser beiden Kostenarten in der Praxis oft nur schwer möglich ist und sie deshalb oft zusammen betrachtet werden.

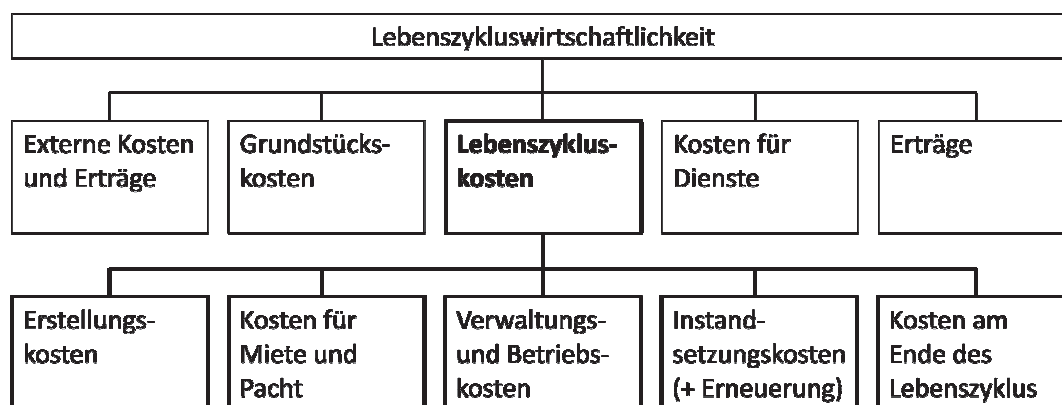


Abbildung 5.8: Umfang der Lebenszykluskosten aus schweizerischer Sicht (Quelle: [111])

Bei Abbildung 5.8 fällt auf, dass innerhalb der Lebenszykluskosten Kosten für Miete und Pacht aufgeführt werden. Aus Sicht des Autors tritt hier ein methodischer Widerspruch auf. Werden die Lebenszykluskosten aus Sicht des selbstnutzenden Bauherrn bzw. Eigentümers betrachtet, fallen i.d.R. keine Kosten für Miete und Pacht an, sondern vielmehr nur die Erträge für die Lebenszykluswirtschaftlichkeit (entfällt i.d.R. beim selbstnutzenden Bauherrn bzw. Eigentümer). Sollen die Lebenszykluskosten eines Mieters bzw. Pächters analysiert werden, so ist die Kostengruppe für Miete und Pacht von Bedeutung. Gleichzeitig geht aus Abbildung 5.8 jedoch nicht hervor, dass in diesem Falle i.d.R. keine Erstellungskosten sowie Kosten am Ende des Lebenszyklus anfallen. Dies ist auch für Verwaltungs- und Instandsetzungskosten fraglich, sofern sie nicht nutzerspezifisch anfallen oder deren Übernahme durch den Mieter vertraglich geregelt ist. Die Höhe der Betriebskosten hängt ebenso stark von den mietvertraglichen Vereinbarungen ab. Eine besondere Situation ergibt sich, wenn der selbstnutzende Bauherr technische Anlagen least. Dann treten an die Stelle entsprechender Erstellungskosten sinngemäß die Kosten für Miete und Pacht. Aus Sicht des Autors der vorliegenden Arbeit wäre es deshalb sinnvoll, für die o.g. Akteursgruppen und -konstellationen im Rahmen einer Weiterentwicklung des o.g. Leitfadens separate Schaubilder zu erstellen.

5.2.2 Zusammenfassung und Zwischenfazit

In Deutschland existiert keine einheitliche Grundlage, die sämtliche Detailfragen der Berechnung von Lebenszykluskosten verbindlich regelt. International existieren hierfür unterschiedliche Ansätze. Bei der Auswahl zu berücksichtigender Kostenarten, bei der Festlegung von Randbedingungen (z.B. Betrachtungszeitraum, Diskontierungszinssatz, Preissteigerungsraten, Art und Detaillierungsgrad der Kostenermittlung, Umgang mit dem technischen Fortschritt während des Lebenszyklus) sowie bei der Wahl der geeigneten Darstellungsart und Ergebnisdokumentation gibt es erhebliche Interpretationsspielräume. Zu nachvollziehbaren und einheitlichen Vorgaben für die Lebenszykluskostenrechnung kommt es bisher nur im Zusammenhang mit Festlegungen in den bereits erwähnten Nachhaltigkeitsbewertungssystemen. Diese berücksichtigen i.d.R. ausgewählte Kostenarten bzw. Zahlungsflüsse.

In Tabelle 40 werden die wesentlichen Unterschiede zwischen den in den vorigen Abschnitten behandelten Normen und Richtlinien zusammenfassend dargestellt. Dabei fällt zudem auf, dass auf eine wesentliche Voraussetzung zum Umgang mit Lebenszykluskosten, die Datenbeschaffung, nur von zwei der behandelten Normen bzw. Richtlinien eingegangen wird.

Tabelle 40: Wesentliche Eigenschaften und Inhalte relevanter Normen und Richtlinien mit Bezug zur Lebenszykluskostenrechnung (Quelle: eigene Darstellung)

Norm/ Richtlinie	Baukosten	Nutzungskosten	FM-Kosten	Ordnungsstruktur	Wirtschaftlichkeit	LZK im engeren Sinne.	LZK im weiteren Sinne.	Betrachtungszeitraum	Datenbeschaffung Darstellung	externe Kosten
VDI 2884				x					x	
DIN 276	x			x						
DIN 18960		x		x						
GEFMA 200	x	x	x	x						
GEFMA 220-1	x	x	x			x	x	x		
ISO 15686-5	x	x			x		x	x	x	x
ÖNORM B 1801 Teil 1	x			x		x				
ÖNORM B 1801 Teil 2		x				x				
ÖNORM B 1801 Teil 4					x	x		x		
SN 506 500	x			x						
SN 506 501	x			x						
SN 506 502	x			x						
SN 506 511	x			x						
SN 506 480					x					x
SIA 480					x					x
SIA D 0165			x	x				x		

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die oben betrachteten Normen und Richtlinien allgemeine methodische Grundlagen für die Strukturierung von Kostendaten und ihrer Verwendung für lebenszyklusbezogene Kostenanalysen auf Gebäudeebene liefern. Teilweise nehmen sie aufeinander Bezug, wie z.B. die GEFMA-Richtlinien zu den Normen DIN 276 und DIN 18960, und erweitern sie aktorenspezifisch, z.B. für das Facility-Management. Auch

die drei behandelten Teile der ÖNORMEN beziehen sich aufeinander.

Darüber hinausgehend ist jedoch die Notwendigkeit angezeigt, gängige (genormte) gebäudebezogene Kostengliederungen auf Bauteil- und Komponentenebene zu erweitern. Hierzu wurde für ein konkretes Anwendungsbeispiel im Bereich der Gebäudetechnik in Abschnitt 4.3 vom Autor eine aufzugsspezifische Kostendatenstruktur entwickelt.

Die Einordnung der Energie- und Instandhaltungskosten von Personenaufzügen (basierend auf dem in den Kapiteln 3 und 4 hergeleiteten Energie- und Instandhaltungsaufwand in der Nutzungsphase) ließen sich dazu in geeigneter Form in die Strukturen der oben behandelten Normen DIN 276 und DIN 18960 integrieren. Deren Strukturen wurden dazu zusammengeführt und um aufzugsspezifische Kostengruppen in tieferen Gliederungsebenen erweitert sowie systematisch bezeichnet bzw. nummeriert (vgl. Abschnitt 4.3.1).

6 Entwicklung einer Systematik zur Entscheidungsfindung im Anlagenbestand

In diesem Kapitel wird für Betreiber bzw. Entscheider eine Systematik entwickelt, um für den jeweiligen Bedarf geeignete Instandhaltungsentscheidungen herzuleiten. Die in den vorigen drei Kapiteln erarbeiteten Grundlagen zum Energie- und Instandhaltungsaufwand von Aufzügen sowie dessen Integration in die lebenszyklusorientierte Betrachtung von Gebäuden werden dazu genutzt. Gängige Praxis in Verbindung mit branchentypischen Gewohnheiten und herstellerepezifischen, wettbewerbsorientierten Entscheidungsempfehlungen sollen hierbei keinen Einfluss haben. Aufgrund hohen Instandhaltungsbedarfs im Anlagenbestand in Deutschland (vgl. Abschnitt 1.2) wird die entwickelte Systematik auf den Anlagenbestand ausgerichtet. Dies beginnt im folgenden Abschnitt mit der Analyse des Zustands einer bestehenden Aufzugsanlage.

6.1 Entscheidungsfindung auf Basis des Ausgangszustandes von Aufzügen

Die in Abschnitt 4.2.1 dargestellten, für Aufzüge typische Instandhaltungsstrategien sowie die in Abschnitt 2.3 typisierten Technologien stellen den Entscheider vor eine komplexe Ausgangssituation mit zahlreichen Entscheidungsalternativen im Zusammenhang mit der Instandhaltung bzw. der Planung von Ersatzinvestitionen. Für eine qualifizierte, systematische Entscheidungsfindung ist es nicht ausreichend, den Aufzug ausschließlich als Gesamtsystem zu betrachten, da der Austausch

einzelner Bauteile und Komponenten alternativ zur Erneuerung der kompletten Anlage oft möglich und sinnvoll ist. Vielmehr ist eine komponentenweise Betrachtung des Ausgangszustandes notwendig, wobei die Praxis oft zeigt, dass eine eindeutige Beurteilung einer Komponente im Sinne von „funktionsfähig“ bzw. „nicht funktionsfähig“ nicht immer möglich und ausreichend ist, sondern zahlreiche äußere Einflussfaktoren über den weiteren Verbleib der Komponenten bzw. ihren weiteren Betrieb entscheiden. Um dieser Ausgangssituation gerecht zu werden, untersucht der Autor dieser Arbeit zunächst die Anwendbarkeit der unscharfen Logik (Fuzzy-Logic) auf den beschriebenen Anwendungsfall. Wo dies an Grenzen der Anwendbarkeit stößt, werden anschließend Verfahren auf Basis von Referenzlebensdauern untersucht. Beiden Verfahren ist die Betrachtung der einzelnen Komponenten gemein. Unterschieden werden dabei mehrteilige, komplexe sowie einfache, einteilige Komponenten. Unter mehrteiligen, komplexen Komponenten versteht der Autor jene, die selbst wiederum aus Unterkomponenten bzw. Bauteilen bestehen, die separat ausgetauscht werden können. Einfache, einteilige Komponenten sieht der Autor als diejenigen an, die nur komplett getauscht werden können.

6.1.1 Unscharfe Logik zur Entscheidungsfindung bei mehrteiligen und komplexen Komponenten

Der Zustand eines bestehenden Personenaufzugs bzw. seiner einzelnen Komponenten lässt sich, wie oben schon angesprochen, nicht immer eindeutig, mit scharf abgegrenzten Begriffen im Rahmen einer zweiwertigen Logik (wahr oder falsch bzw. funktioniert oder funktioniert nicht) beschreiben. Realistischer und auch dem Sprachgebrauch von Experten näher sind dazwischenliegende Aussagen. Eine Aufzugskomponente, wie z.B. die Steuerung, wird selten treffend als „defekt“ oder „nicht defekt“ beschrieben. Eine unscharfe Aussage bzw. Feststellung, wie z.B. „Die

Ersatzteilversorgung ist zur Zeit noch sichergestellt.“, kann durch die Anwendung der Methodik zu der Schlussfolgerung führen, für die Steuerung zur Zeit keinen Austausch zu empfehlen, sondern sie mit einer Reparaturstrategie weiter zu betreiben. Die methodischen Grundlagen für ein Fuzzy-Konzept auf Basis unscharfer Mengen wurden 1965 erstmals mit einer Arbeit über „Fuzzy-Sets“ in der Zeitschrift „Information and Control“ von Lotfi Zadeh veröffentlicht [112]. Zahlreiche weitere Veröffentlichungen des o.g. Autors folgten (vgl. ausgewählte Beiträge in [113]).

6.1.1.1 Methodischer Rahmen der Fuzzy-Logic

Die folgenden Ausführungen stellen den methodischen Rahmen zunächst anwendungsunabhängig dar (siehe auch Begriffsdefinitionen in [114]).

6.1.1.1.1 Fuzzifikation

Als Fuzzifikation bezeichnet man einen Vorgang, in dem scharfe Eingangsgrößen, z.B. das Alter eines Bauteils in Jahren, in unscharfe Größen, die sogenannten „linguistischen Variablen“, übersetzt werden, z.B. „neu“, „schon lange in Betrieb“ oder „alt“. Dies geschieht mittels sogenannter „Fuzzy-Mengen“. Dem Beispiel folgend könnte eine Altersangabe zwischen 0 und 1 „neu“, zwischen 2 und 10 „schon lange in Betrieb“ sowie ab 11 „alt“ zugeordnet werden. Formal ausgedrückt bedeutet dies [115, S. 5]: G sei eine Grundmenge und μ_A eine Funktion, die die Grundmenge G in das Intervall $[0;1]$ abbildet (Funktion 6.1)

$$\mu_A: G \rightarrow [0; 1]$$

6.1

μ_A wird auch als Zugehörigkeitsfunktion bezeichnet. Für die systematische Ermittlung von Zugehörigkeitswerten $\mu_A(x)$ sind verschiedene, häufig auftretende Typen von Fuzzy-Mengen bekannt. Deren Entwicklung ist nicht Sache der Fuzzy-Logic selbst,

sondern basiert auf Erfahrungen, persönlichen Einschätzungen und sprachlichen Gewohnheiten. [115, S. 5] Es werden verschiedene Typen von Zugehörigkeitsfunktionen bzw. Fuzzy-Mengen unterschieden [115, S. 7–8]:

- Typ 1: μ_A monoton steigend linear oder nicht linear quadratisch,
- Typ 2: μ_A monoton fallend,
- Typ 3: μ_A monoton steigend, nimmt genau für ein x den größten Wert $\mu_A(x) = 1$ an und fällt dann wieder monoton ab (triangulär bzw. dreiecksförmig),
- Typ 4: μ_A wie Typ 3, $\mu_A(x) = 1$ wird jedoch für ein Intervall angenommen (trapezförmig).

Die Menge A (Mengendarstellung 6.2) aller Paare $(x, \mu_A(x))$ nennt man eine Fuzzy-Menge (oder auch unscharfe Menge bzw. Fuzzy-Set). Viele Fuzzy-Mengen sind dabei durch ausgesprochen einfache Zugehörigkeitsfunktionen erklärt, und für die meisten Anwendungen genügt ein stückweise linearer und „eckiger“ Verlauf von μ_A , was eine Kombination der oben genannten Typen bedeutet. [115, S. 7]

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in G\}$$

6.2

Für $A = \text{neu}$ (im obigen Beispiel) gilt dann formal geschrieben die Mengendarstellung 6.3, d.h. für ein Alter von bis zu einem Jahr gilt jeweils eine hundertprozentige Zugehörigkeit zu „neu“, was einer zugrundeliegenden Zugehörigkeitsfunktion des Typs 4 entspricht:

$$\text{neu} = \{(0; 1), (1; 1)\}$$

6.3

6.1.1.1.2 Regelwerk und Inferenz

Um mit der Fuzzy-Logic Entscheidungen treffen zu können, ist zunächst ein Regelwerk aufzustellen, das die anwendungsspezifische Entscheidungsgrundlage darstellt. Das Regelwerk basiert direkt auf den Fuzzy-Mengen – in vielen Fällen aus mehreren, z.B. A und B. Diese sind anhand von Bedingungen (WENN) miteinander zu verknüpfen, um Entscheidungen bzw. Schlussfolgerungen abzuleiten (DANN). Eine Verknüpfung kann mit einem logischen UND, das in der Fuzzy-Logic dem Minimum-Operator entspricht, und dem logischen ODER, das in der Fuzzy-Logic einem Maximum-Operator entspricht, vorgenommen werden. [115, S. 22–25]

Bei Anwendung des Minimum-Operators wird die kleinste Zugehörigkeit einer Eingangsvariablen zu einer Fuzzy-Menge als Ergebnis ausgegeben, d.h. die am schlechtesten erfüllte Regel wirkt sich aus (Gleichung 6.4). Umgekehrt ist es bei der Anwendung des Maximum-Operators die größte Zugehörigkeit, bei der die am besten erfüllte Regel die Entscheidung bestimmt (Gleichung 6.5). Weitere Fuzzy-Operatoren, wie das logische NICHT (Gleichung 6.6) oder das PRODUKT (Gleichung 6.7) sind möglich.

$$\mu_C(x) = \min \{(\mu_A(x), \mu_B(x)), x \in X\}$$

6.4

$$\mu_D(x) = \max \{(\mu_A(x), \mu_B(x)), x \in X\}$$

6.5

$$\mu_E(x) = \max \{(1 - \mu_A(x)), x \in X\}$$

6.6

$$\mu_E(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$$

6.7

Mögliche Ergebnisse von Gleichung 6.7 stimmen im Falle der Zugehörigkeitswerte 0 und 1 mit denen der Minimummethode überein. Bei Zwischenwerten sind deutlich abweichende Ergebnisse feststellbar. [116, S. 25–26]

Darauf basierend werden bei der späteren Anwendung in Abschnitt 6.1.2 für definierte Ausgangsvariablen anhand der vorgegebenen Regeln mit UND-Verknüpfungen (Minimum) die Zugehörigkeitsfaktoren bestimmt. [116, S. 30–31] Die Teilresultate werden für jede der Ausgangsvariablen mit ODER-Verknüpfungen (Maximum) zusammengeführt. [117, S. 170–171] Der gesamte Vorgang wird als Inferenz bezeichnet und schafft die Voraussetzung zur Defuzzifikation.

6.1.1.1.3 Defuzzifikation

Das ermittelte Gesamtergebnis ist in einem abschließenden Schritt in eine scharfe Aussage zurück zu übersetzen. Hierzu kommt erneut eine Zugehörigkeitsfunktion, in diesem Fall für den Ausgangswert, zum Einsatz. Ein scharfer Ausgangswert kann als gewichteter Mittelwert der Ausgangsvariablen gebildet werden. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus der Zugehörigkeitsfunktion für den Ausgangswert. Für Ausgangswerte sind Intervalle (Singletons) geeignet. Bei vielen Anwendungen hat sich herausgestellt, dass sich hiermit der Aufwand ohne nachteilige Auswirkungen reduzieren lässt. [116, S. 86–87] Intervalle können im Kontext der vorliegenden Arbeit z.B. belegt sein mit: „reparieren“ oder „austauschen“.

6.1.2 Konzept für ein Fuzzy-System zur Instandhaltungsplanung von Personenaufzügen

Aufbauend auf den methodischen Grundlagen im vorigen Kapitel wird in den folgenden Abschnitten ein Fuzzy-System zur Entscheidungsfindung bei der Instandhaltung der Komponente

Steuerung/Regelung entworfen. Diese wird, wie schon erläutert, als mehrteilige, komplexe Komponente betrachtet.

6.1.2.1 Darstellung der Zusammenhänge in Blockdiagrammen

Voraussetzung für die Modellierung eines Fuzzy-Systems ist die klare Definition i.d.R. mehrerer Inputs (Beobachtungen) sowie Outputs (Ergebnisse). Die Inputs werden durch die linguistischen Variablen bedient; die Outputs, in diesem Fall nur ein Output, liefern die Entscheidungsunterstützung. Ein entsprechendes Blockdiagramm⁷²⁷³ des im Rahmen dieser Arbeit entworfenen Ansatzes zeigt Abbildung 6.1.

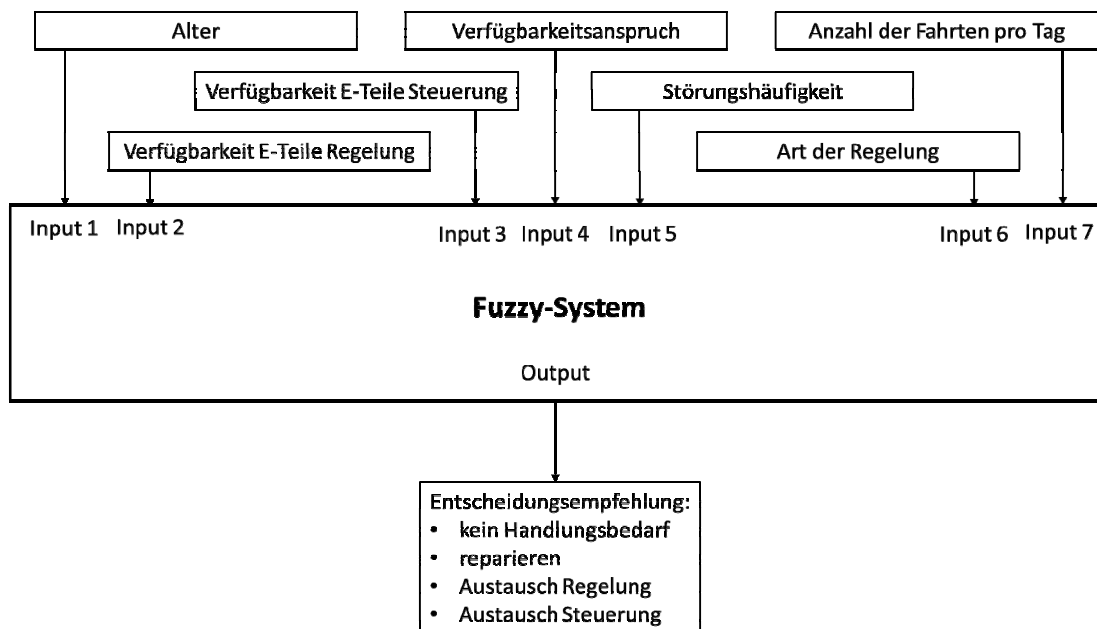


Abbildung 6.1: Blockdiagramm des Fuzzy-Systems zur Unterstützung von Instandhaltungsentscheidungen bei Aufzugsteuerungen und Regelungen (Quelle: eigene Darstellung)

⁷² Abkürzung „E-Teile“ steht für Ersatzteile.

⁷³ Unter „Verfügbarkeitsanspruch“ werden die Anforderungen an die Zuverlässigkeit verstanden, d.h. die maximal tolerierte Anzahl an Störungen innerhalb eines definierten Zeitraums (nicht zu verwechseln mit der Verfügbarkeit von Ersatzteilen).

6.1.2.2 Linguistische Variablen und Zugehörigkeitsfunktionen

Instandhaltungsentscheidungen bei Aufzugsteuerungen sind von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig und daher komplex. Zu unterscheiden sind direkt vom Zustand der Steuerung ausgehende Einflussfaktoren sowie äußere Einflussfaktoren.

Direkt vom Zustand der Steuerung gehen aus:

- Alter,
- Störungshäufigkeit,
- Art der Regelung⁷⁴.

Äußere Einflussfaktoren sind:

- Verfügbarkeitsanspruch (vgl. [118, S. 68] und [119, S. 12]),
- Anzahl der Fahrten pro Tag (vgl. [48, S. 17]),
- Verfügbarkeit von Ersatzteilen für die Steuerung,
- Verfügbarkeit von Ersatzteilen für die Regelung,
- Einflüsse der Umgebung⁷⁵ (Temperatur, Staub).

Dieser Ansatz verzichtet bewusst darauf, scharf messbare Verschleißgrößen, wie z.B. der Abbrand von Schütz- oder Relaiskontakten oder die theoretische, rechnerische Restlebensdauer eines elektronischen Bauteils, einzubeziehen. Gedanklicher Hintergrund der oben genannten linguistischen Variablen ist dabei die Möglichkeit, durch einfache Beobachtungen aus Sicht des Betreibers oder eines Planers auf den Zustand und die weitere Einsatzfähigkeit der Aufzugsteuerung schließen zu können. Entscheidend dabei ist, dass keines der genannten Kriterien isoliert zu einer Entscheidung führen kann. Es sind immer die Ausprägungen aller Kriterien für die Entscheidung heranzuziehen. Es sei an dieser Stelle jedoch keinesfalls ausgeschlossen, dass alternativ eine

⁷⁴ vgl. Abschnitt 2.3

⁷⁵ Extreme Umgebungsbedingungen, wie z.B. industrielle oder chemische, werden aufgrund der betrachteten Gebäudetypen (Wohn- und Bürogebäude) nicht berücksichtigt.

zeitaufwendige und damit kostenintensive Bauteilanalyse im Einzelfall auf den Zustand der Steuerung und damit die technische Restlebensdauer schließen lässt.

Bei der Entwicklung von Zugehörigkeitsfunktionen sind Definitionslücken, d.h. Bereiche, in denen der linguistischen Variable kein Zugehörigkeitsgrad zugeordnet wird, zu vermeiden. Konkret werden die Zugehörigkeitsfunktionen gemäß Abbildung 6.2 bis Abbildung 6.10 für die Komponenten Steuerung und Regelung entwickelt. Die Komponente Regelung wird dabei als fester, jedoch separat austauschbarer Bestandteil der Komponente Steuerung betrachtet.

Die Zugehörigkeitsfunktionen für das Alter von Steuerung und Regelung (Abbildung 6.2) und der Verfügbarkeit von Ersatzteilen für Steuerung und Regelung (Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10) basieren auf herstellerunabhängigen Marktbeobachtungen des Autors. Die Art der Regelung (Abbildung 6.3) kann immer nur eindeutig einem Typ gemäß Abschnitt 2.3 zugeordnet werden. Der Verfügbarkeitsanspruch (Abbildung 6.4) und die Störungshäufigkeit (Abbildung 6.5) orientieren sich an etablierten Einschätzungen, z.B. gemäß VDI 3810 [119]. Die Zugehörigkeit der Anzahl der Fahrten pro Tag (Abbildung 6.6) orientiert sich an der DIN EN ISO 25745 [120]. Umgebungsbedingungen Staub (Abbildung 6.7) und Temperatur (Abbildung 6.8) werden gemäß Hinweisen in der DIN EN 81-20 [72] bzw. typischen Herstellerangaben zugeordnet (vgl. z.B. [121, S. 208])

Alter

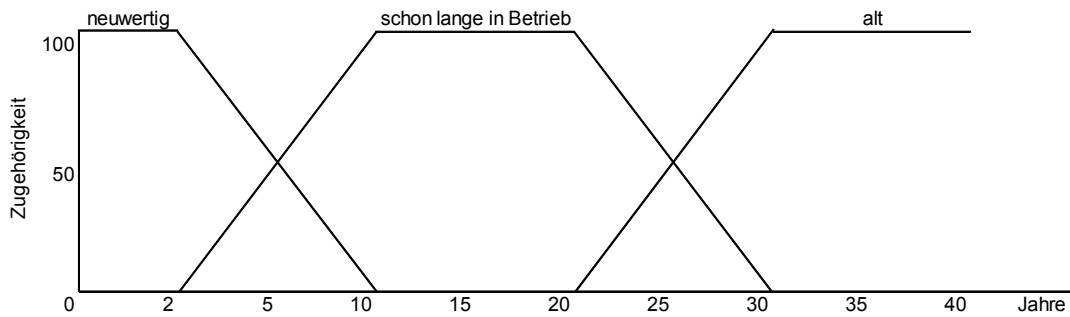


Abbildung 6.2: Zugehörigkeitsfunktionen für das Alter von Steuerung und Regelung (Quelle: eigene Darstellung)

Art der Regelung

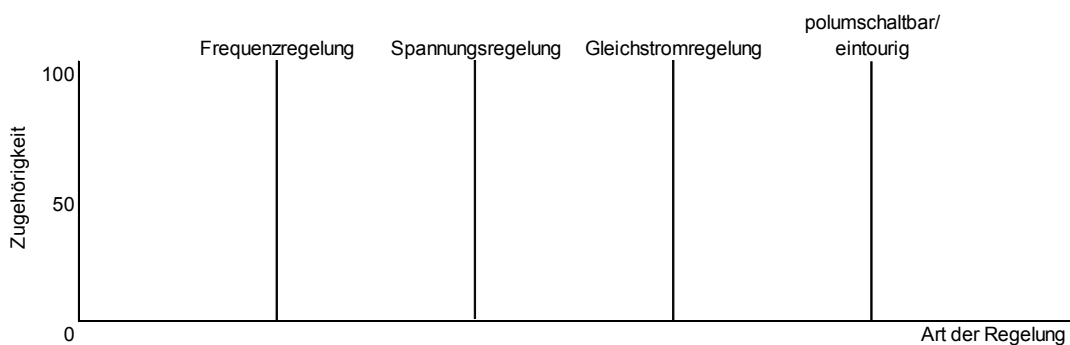


Abbildung 6.3: Zugehörigkeitsfunktionen für die Art der Regelung (Quelle: eigene Darstellung)

Verfügbarkeitsanspruch

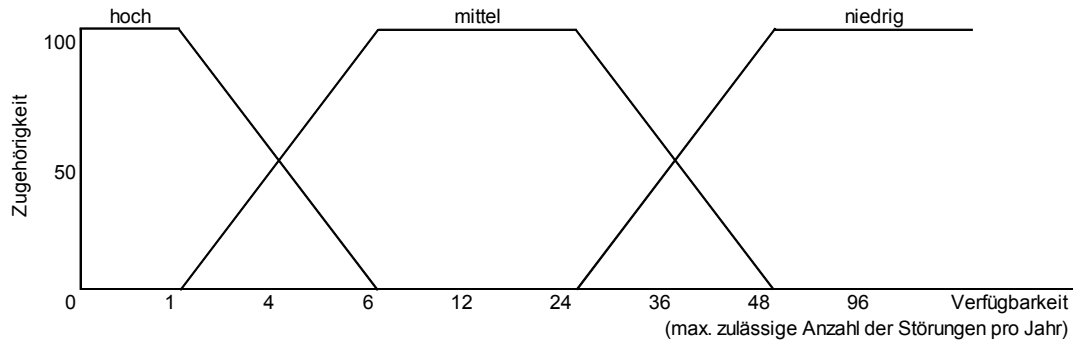


Abbildung 6.4: Zugehörigkeitsfunktionen für den Verfügbarkeitsanspruch – ausgedrückt in einer maximal zulässigen Anzahl der Störungen pro Jahr (Quelle: eigene Darstellung, Einschätzung angelehnt an [119])

Störungshäufigkeit

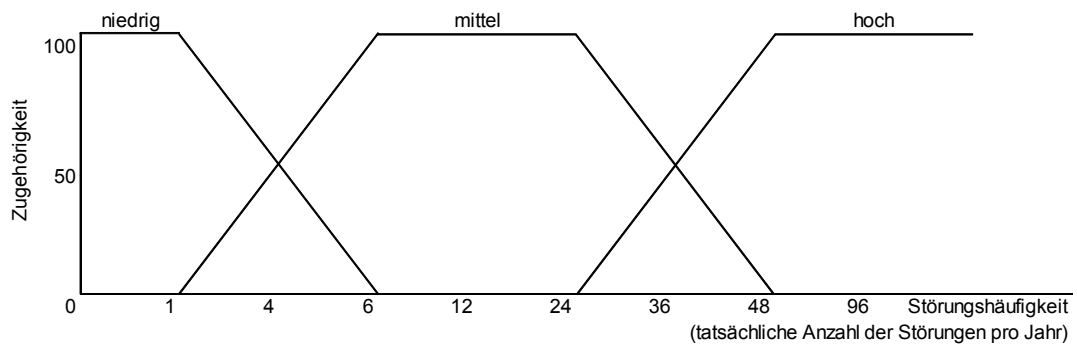


Abbildung 6.5: Zugehörigkeitsfunktionen für die tatsächliche Anzahl der Störungen pro Jahr (Quelle: eigene Darstellung, Einschätzung angelehnt an [119])

Anzahl der Fahrten pro Tag

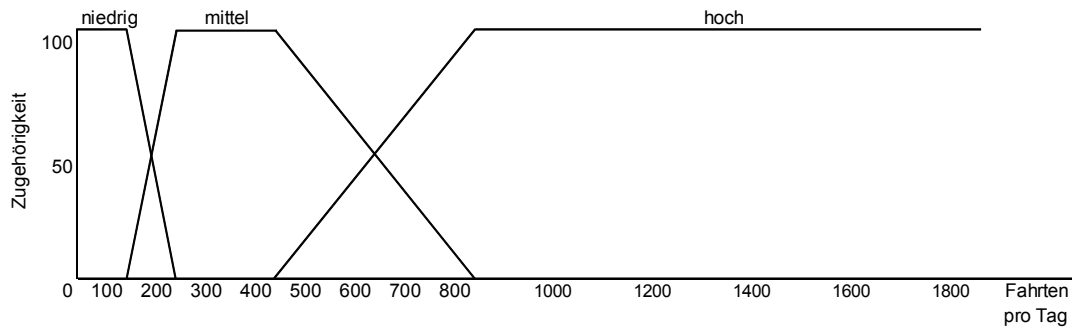


Abbildung 6.6: Zugehörigkeitsfunktionen für die Anzahl der Fahrten pro Tag (Quelle: eigene Darstellung, Einschätzung angelehnt an [120])

Umgebungsbedingungen Staub⁷⁶

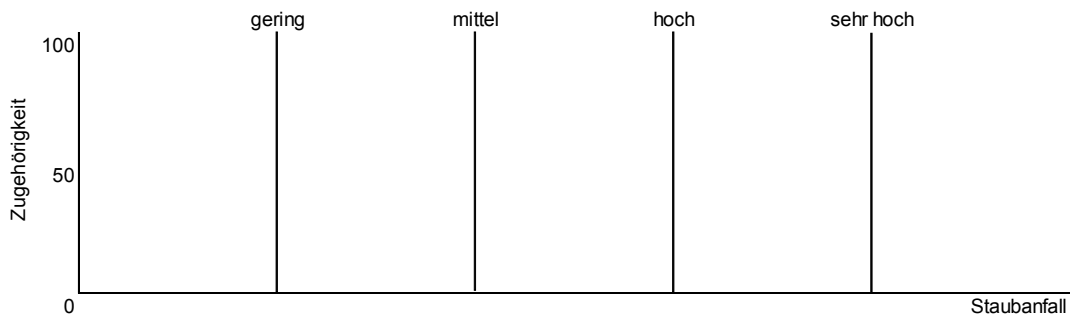


Abbildung 6.7: Zugehörigkeitsfunktionen für den anzunehmenden Staubanfall in Abhängigkeit der Umgebung bzw. dem Standort des Gebäudes (Quelle: eigene Darstellung)

⁷⁶ Staubablagerungen an (elektronischen) Bauteilen vermindern deren Kühlung, lassen u.U. (auch in Verbindung mit Feuchtigkeit) Kriechströme zu und können so deren Lebensdauer verkürzen. Zum Beispiel an Standorten neben stark befahrenen Durchgangsstraßen ist mit erhöhter Staubbelastung zu rechnen.

Umgebungsbedingungen Temperatur

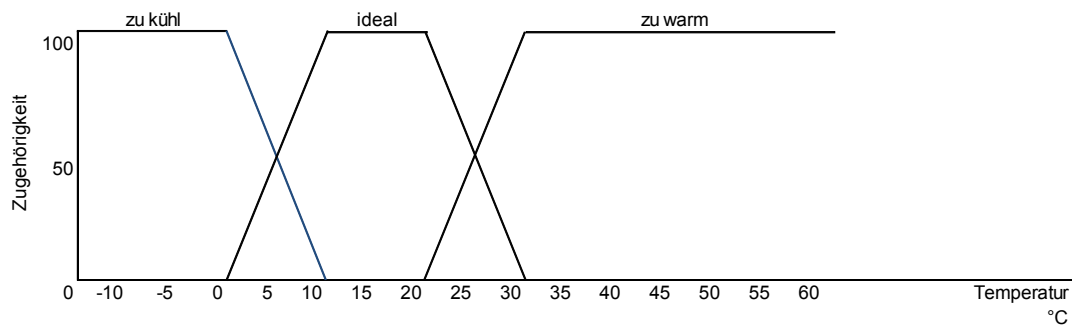


Abbildung 6.8: Zugehörigkeitsfunktionen für die Höhe der Umgebungstemperatur im Schacht und im Maschinenraum (Quelle: eigene Darstellung, Einschätzung angelehnt an DIN EN 81-20-2015)

Verfügbarkeit Ersatzteile zur Steuerung

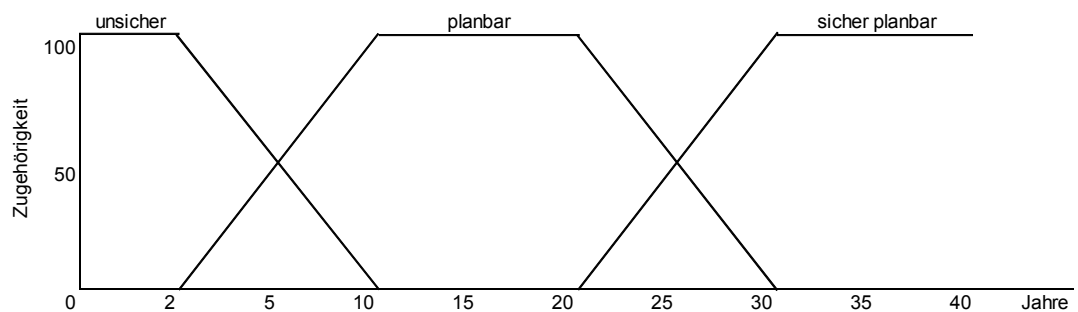


Abbildung 6.9: Zugehörigkeitsfunktionen für die Situation der Ersatzteilversorgung, betrifft herstellereigene Ersatzteile, die nicht auf dem freien Markt verfügbar oder durch solche ersetzbar sind (Quelle: eigene Darstellung)

Verfügbarkeit Ersatzteile zur Regelung

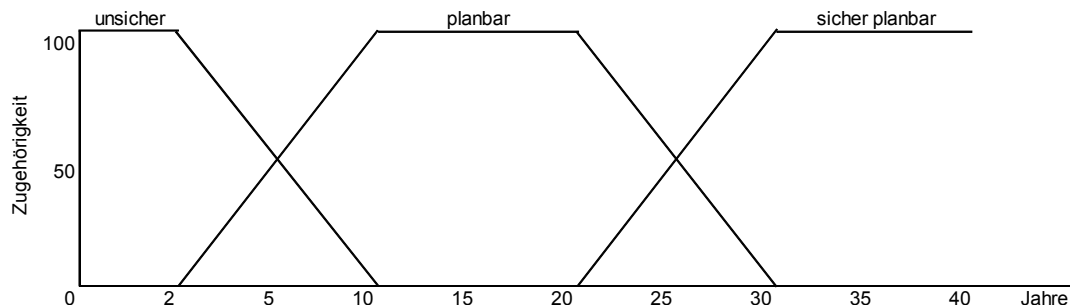


Abbildung 6.10: Zugehörigkeitsfunktionen für die Situation der Ersatzteilversorgung, betrifft herstellereigene Ersatzteile, die nicht auf dem freien Markt verfügbar oder durch solche ersetzbar sind (Quelle: eigene Darstellung)

6.1.2.3 Inferenz und Defuzzifikation

Die in dieser Arbeit entwickelte und auf Expertenwissen⁷⁷ basierende Regelbasis verfolgt den Ansatz, den Austausch einer älteren Steuerung unter Umständen zu vermeiden, wenn die funktionalen Anforderungen des Gebäudebetriebs weiterhin erfüllt werden können und Ersatzteile für die Reparatur und ggf. für die Nachrüstung von Sicherheitsmaßnahmen verfügbar sind. Im umgekehrten Fall kann unter bestimmten Voraussetzungen eine neuere Steuerung für den weiteren Einsatz im Gebäude nicht mehr geeignet und damit ein Austausch sinnvoll sein. Die vollständige Kombination aller oben definierten neun linguistischen Variablen mit den zugehörigen linguistischen Termen ergäben theoretisch maximal 34.992 Entscheidungsregeln.⁷⁸ In der vorliegenden Arbeit werden hieraus zur Reduktion der Komplexität die Anzahl der linguistischen Variablen und damit die Anzahl der linguistischen Terme

⁷⁷ hervorgehend aus eigenen Erfahrungen des Autors sowie zahlreichen Experten-
gesprächen mit Herstellern und Planern

⁷⁸ $3^7 \times 4^2 = 34.992$

eingeschränkt. Dies ist beispielsweise im Rahmen eines Tools auf Basis von Excel™ umsetzbar. Darüber hinausgehend ist der Einsatz von i.d.R. kommerzieller, kostenpflichtiger Spezialsoftware⁷⁹ nicht mehr vermeidbar. Die in dieser Arbeit entwickelte und aus den o.g. Gründen eingeschränkte Regelbasis findet sich in Anhang B. Dabei werden die linguistischen Aussagen zur geforderten Verfügbarkeit (hoch, mittel und niedrig), der tatsächlichen Anzahl auftretender Störungen (hoch, mittel und niedrig), der Ersatzteilversorgung der Steuerung und der Regelung (unsicher, planbar und langfristig gesichert) verknüpft. Als Ergebnisse der Regeln sind möglich:

- zunächst kein Handlungsbedarf, ggf. reparieren,
- Regelung erneuern,
- Steuerung und Regelung erneuern.

Die Möglichkeit, nur die Steuerung zu erneuern und die vorhandene Regelung dabei zu erhalten, ist technisch nicht sinnvoll und in der gängigen Praxis nicht anzutreffen.

Aus den oben genannten linguistischen Aussagen lassen sich 81 Kombinationen ableiten.⁸⁰ Diese werden nach der in Abschnitt 6.1.1.1.2 beschriebenen Methodik verknüpft und damit ein zunächst unscharfes Gesamtergebnis ermittelt. Die drei oben genannten Ergebnisse schließen sich jedoch gegenseitig aus, weshalb als scharfes Gesamtergebnis die maximale Zugehörigkeit des unscharfen Gesamtergebnisses festgelegt wird. Ergeben sich für zwei Varianten gleiche Zugehörigkeiten, d.h. sie sind bei ausschließlicher Betrachtung der Steuerung gleichwertig, so wird die eindeutige Auswahl schließlich durch die spätere betreiber- und nutzerbezogene Bewertung herbeigeführt (vgl. Abschnitt 8.1.5).

⁷⁹ z.B. von INFORM (Institut für Operations Research und Management GmbH), www.fuzzytech.de (zuletzt geprüft am 30.07.2018)

⁸⁰ $3^4 = 81$

Eine geforderte hohe Verfügbarkeit führt bereits bei einer niedrigen Anzahl von Störungen zu Empfehlungen der Erneuerung, wenn die Verfügbarkeit von Ersatzteilen nicht langfristig gesichert ist. Umgekehrt lässt sich bei einer niedrigen geforderten Verfügbarkeit auch bei unsicherer Ersatzteillage die Reparaturstrategie⁸¹ verfolgen, da auch längere Stillstände (ggf. über mehrere Tage) toleriert werden.

6.1.3 Entscheidungsfindung nach eindeutigen Regeln bei einteiligen Komponenten

Komponenten werden in diesem Kontext als einteilig bezeichnet, wenn sie üblicherweise nicht repariert, sondern bei Bedarf komplett ausgetauscht werden. Dies stellt den entscheidenden Unterschied zur Steuerung dar, die selbst aus verschiedensten Bauteilen mit unterschiedlichen Lebensdauern besteht und voneinander unabhängig getauscht oder repariert werden können.

6.1.3.1 Dynamische Anpassung von Referenzlebensdauern (Faktorenmethode)

Beim Verschleißgradansatz werden geschätzte Betriebsparameter herangezogen, um den Abnutzungsvorrat (vgl. [65]) und die Ersatzhäufigkeit zu bestimmen. Vorschläge hierfür werden in der vorliegenden Arbeit von [122, S.112] übernommen und angepasst. Sie folgen dem Verzehr eines vorgegebenen Abnutzungsvorrates bzw. einer Referenzlebensdauer (z.B. maximal mögliche Anzahl von Fahrten N bis zur Verschleißgrenze) in Abhängigkeit der tatsächlichen Anzahl von Fahrten pro Jahr (n) zur Bestimmung der Austauschhäufigkeit (A_i) einer Komponente i innerhalb eines Betrachtungszeitraums T in Jahren (Gleichung 6.8).

⁸¹ Unter Reparieren bzw. Reparaturstrategie wird in dieser Arbeit eine Reparatur von Komponenten und deren Bauteilen mit handelsüblichen Ersatzteilen verstanden, während die Ersatzteillieferung vom Hersteller nicht mehr möglich ist. Das bedeutet höheren Zeitaufwand und damit längeren Stillstand.

$$A_i = \frac{n \times T}{N}$$

6.8

Nach ISO 15686-8 [123, S. 11–17] sowie [124, S. 86] ist die Lebensdauer bzw. Austauschhäufigkeit eines Bauteils neben der Referenzlebensdauer (hier maximal mögliche Anzahl der Fahrten) von weiteren Faktoren abhängig:

- Qualität
 - Qualität der Komponenten
 - Qualität der Konstruktion
 - Qualität der Montag
- Umgebung
 - Inneneinflüsse
 - Außeneinflüsse
- Gebrauchsbedingungen
 - Nutzungsintensität
 - Qualität der Instandhaltung

Die Nutzungsintensität wird dabei mit Gleichung 6.8 unmittelbar berücksichtigt. Zur Berücksichtigung der Annahme, dass die Qualität der Instandhaltung die Lebensdauer einer Komponente beeinflusst, wird der Faktor (f) 1,0 für eine durchschnittliche regelmäßige Wartung, der Faktor 0,9 für eine unregelmäßige oder mangelhafte Instandhaltung sowie der Faktor 1,1 für eine regelmäßige und besonders sorgfältige Wartung angesetzt (vgl. [123, S. 24]). Es ergibt sich somit Gleichung 6.9.

$$A_i = \frac{n \times T}{N \times f}$$

6.9

6.1.3.2 Statische Berücksichtigung von Referenzlebensdauern

Die statische Berücksichtigung von Referenzlebensdauern wird insbesondere bei sicherheitstechnisch relevanten Komponenten gewählt, bei denen ein Austausch in der Regel vorbeugend erfolgt und eine Reparatur nicht zulässig ist bzw. eine erneute Baumusterprüfung erforderlich machen würde. Technische Lebensdauern finden sich z.B. in [125, S. 28] und [126]. Sie können zudem als Referenzlebensdauern für die Herangehensweisen in diesem und dem vorigen Abschnitt herangezogen werden (vgl. Tabelle 41).

Tabelle 41: Technische Lebensdauern ausgewählter Komponenten eines Aufzuges (Quelle: angelehnt an [126, S. 128])

Komponente	Lebensdauer (Jahre)
Fangvorrichtung nach unten/oben	15 bis 27
Geschwindigkeitsbegrenzer	15 bis 27
Antrieb getriebeles	24 bis 27
Antrieb mit Getriebe	24
Treibscheibe	7
Seile	7
Aufsetzpuffer	15
Schachttüren	10
Kabinentüren	10
Türantrieb	10
Notrufsystem	15
Monitoringsystem und Zugangskontrolle	10

Zusammen mit den Kostendaten in Abschnitt 4.3.2 wurden nun in diesem Kapitel die methodischen Voraussetzungen und Datengrundlagen geschaffen, um technisch sinnvolle Instandhaltungsstrategien zu finden. Im folgenden Kapitel wird ein Ansatz entwickelt, wie diese hinsichtlich des Gesamtnutzens für den Betreiber und die Nutzer einzuschätzen ist. Daraus wird dann schließlich die finale Entscheidungsempfehlung abgeleitet.

7 Bewertung von Instandhaltungsstrategien

Im vorangehenden Kapitel wurden Methoden zur Ermittlung von Instandhaltungsstrategien bzw. Austauschzeitpunkten (Ersatzinvestitionen) entwickelt, die zunächst ausschließlich technische Aspekte im Bezug auf die jeweilige Komponente berücksichtigen. In Verbindung mit Kostendaten sowie gebäudebezogenen Anforderungen von Betreibern und Nutzern, wie z.B. möglichst geringe Stillstandszeiten bei Wartungs- und Modernisierungsarbeiten, sollen diese dann einer abschließenden Bewertung unterzogen werden.

7.1 Ökonomische Bewertung mit Nutzung der Annuitätenmethode

Zum direkten Vergleich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit geplanter Instandhaltungsmaßnahmen wird in der vorliegenden Arbeit die auf der Kapitalwertmethode basierende Annuitätenmethode gewählt. Die Auswahl dieser Methode begründet sich in den für den Anwender gut darstellbaren jährlichen Kosten in einer Zahl, der Annuität, über den gewählten Betrachtungszeitraum bei gleichzeitiger Nutzung der Vorteile der dynamischen Investitionsrechnung. Dabei werden innerhalb des Betrachtungszeitraums anfallende, unregelmäßige Zahlungen, z.B. für Ersatzinvestitionen, auf den Betrachtungszeitpunkt $t = 0$ abgezinst (auf Basis eines Kalkulationszinssatzes), anschließend summiert (Barwertbildung) und durch Multiplikation mit dem Annuitätsfaktor zu einer Annuität umgeformt. Der Barwert jährlich regelmäßig anfallender Zahlungen, z.B. für Energie und Wartung, wird mit dem Barwertfaktor ermittelt und anschließend ebenso mit dem

Annuitätsfaktor zu einer Annuität umgeformt. Der Annuitätsfaktor berücksichtigt den Kalkulationszinssatz und den Betrachtungszeitraum, während bei der Barwertbildung zudem noch eine Preissteigerungsrate berücksichtigt wird (vgl. [127, S. 103–108] und [25, S. 150–153]).

7.1.1 VDI 2067 – Anwendung bei Aufzügen

Die VDI-Richtlinie 2067 [125] liegt mit Stand September 2012 vor, einer Fortschreibung und Weiterentwicklung der Fassung aus dem Jahr 2000. Sie behandelt die Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen für alle Gebäudearten. Blatt 1 stellt neben einem Überblick über das Gesamtwerk die Ermittlung sowie eine Einteilung der Kosten zur Verfügung und nutzt die oben beschriebene Annuitätenmethode zur Wirtschaftlichkeitsberechnung. Der Betrachtungszeitraum der Annuitätenmethode ist frei wählbar und bei geeigneter Festlegung als lebenszyklusbezogene Rechenmethode einsetzbar.

Unterschieden werden zwischen den kapitalgebundenen, bedarfsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten. Unter kapitalgebundenen Kosten werden die Kosten für die Erst- und Ersatzinvestitionen verstanden. Der Jahresenergiebedarf wird den bedarfsgebundenen Kosten zugeordnet. Die Kosten für die Instandhaltung (Inspektion, Wartung und Instandsetzung) werden als betriebsgebundene Kosten bezeichnet.

Die VDI Richtlinie 2067 Blatt 1 wurde mit Stand September 2012 in Anhang A um Tabelle A6 für Aufzüge ergänzt. Liegen keine detaillierten Daten vor, so ist zur Anwendung des Rechenverfahrens für Aufzüge eine rechnerische Nutzungsdauer von 15 Jahren, ein jährlicher Aufwand von 9 % der ursprünglichen Herstellungskosten für die Instandhaltung bzw. 3,5 % für Wartung und Inspektion anzusetzen. Ziel dieser Arbeit ist es jedoch, den pauschalen

Ansatz zu überwinden und komponentenscharf zu rechnen (vgl. Kapitel 6).

Aus den in Abschnitt 4.3.2 bereitgestellten Kostendaten für Bau- und Wartungskosten lassen sich im Rahmen dieser Arbeit die o.g. Richtwerte für Wartung und Inspektion überprüfen und weiterentwickeln. Die relevanten Kostendatentabellen in den Abschnitten 4.3.2.2 und 4.3.2.3 zeigen, dass der einheitliche Prozentsatz für Wartung und Inspektion nach Anhang A der VDI Richtlinie eine plausible, jedoch im oberen Bereich angesiedelte Größenordnung darstellt. Je nach Wartungsumfang ist auf Basis der eigenen Auswertung eine signifikante Bandbreite nach unten erkennbar. Entscheidend ist aus Sicht des Autors, ob in den Wartungskosten (z.B. im Rahmen eines Wartungsvertrages) die Kosten für eine Fernnotrufeinrichtung einschl. Telefongebühren enthalten sind oder nicht. Aus den Daten in den Abschnitten 4.3.2.3 und 4.3.2.2 ergeben sich die in Tabelle 42 aufgeführten Bandbreiten.⁸²

Tabelle 42: Jährlicher Aufwand für Wartung und Inspektion eines Aufzugs mit bis zu sechs Haltestellen, bezogen auf die ursprünglichen Herstellkosten (Quelle: eigene Auswertungen auf Basis der Kostendaten in den Abschnitten 4.3.2.3 und 4.3.2.2, Werte gerundet, im Vergleich zu VDI 2067 [125, S. 21–28])

Tragfähigkeit [kg/Personen]	mit Fernnotruf [%] eigene Auswertung	ohne Fernnotruf [%] eigene Auswertung	VDI 2067 [%]
300-600/4-8	3	0,4	3,5
650-100/9-15	2	0,3	
1.050-2.000/16-30	1,5	0,2	

⁸² Wie bereits in Abschnitt 4.3.2.3 erwähnt, sind darin die Gebühren für die wiederkehrenden Prüfungen durch eine ZÜS nicht enthalten.

Die in Anhang B der VDI 2067 beschriebene Beispielrechnung für eine Heizungsanlage kann für den Ansatz in dieser Arbeit und die Umsetzung des in Kapitel 8 Planungshilfsmittels zur Anwendung bei Aufzügen als geeignet angesehen werden. Ein für Aufzüge spezifischer Unterschied besteht in der vorliegenden Arbeit darin, dass die Kosten für die Instandhaltung und den Ersatz aus marktüblichen Herstellerangaben und die rechnerische Lebensdauer zusätzlich aus einem verschleißbasierten Rechenansatz mit einem vorgegebenen Abnutzungsvorrat bzw. aus Entscheidungsregeln einer Fuzzy-Logic übernommen werden (vgl. Kapitel 6).

7.2 Nutzenbewertung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten

Die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Instandhaltungsstrategien sind als Instrumente aufzufassen, die die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit einer bestehenden Aufzugsanlage über die verbleibende Restnutzungsdauer gewähren soll. Diese stehen einerseits in unmittelbarem Zusammenhang mit dem technischen Zustand des Aufzugs (vgl. Kapitel 6) sowie andererseits mit der Nutzung, der Nutzerzufriedenheit (vgl. [4]) und dem Gebäude (vgl. [28]). Orientiert an den drei Säulen (Aspekten) der Nachhaltigkeit, können damit Schutzziele im Interesse von Schutzgütern durch Instandhaltung und Modernisierung (Umsetzung beim Aufzug) erreicht werden (vgl. Tabelle 43 und [96]).

Tabelle 43: Spezifische Umsetzungsmöglichkeiten beim Aufzug zum Erreichen von Schutzziele im Rahmen der Aspekte der Nachhaltigkeit (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [96, S. 16])

	ökologische Aspekte	ökonomische Aspekte	soziale Aspekte
Schutzgüter nachhaltiges Bauen	<ul style="list-style-type: none"> • natürliche Ressourcen • globale und lokale Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapital • Werte 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesundheit • Nutzerzufriedenheit • Funktionalität
Schutzziele nachhaltiges Bauen	<ul style="list-style-type: none"> • Schutz der natürlichen Ressourcen • Schutz des Ökosystems 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Lebenszykluskosten • Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Erhalt von Kapital/Wert 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewahrung von Gesundheit, Sicherheit und Behaglichkeit • Gewährleistung von Funktionalität
Umsetzung beim Aufzug	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung des Energieverbrauchs im Betrieb • Reduzierung bzw. Vermeidung des Einsatzes von Schmiermitteln • Vermeidung der Kompletterneuerung durch Teilmodernisierung oder Reparatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Baukosten • Reduzierung der Nutzungskosten • Sicherstellung der Vermiet- und Vermarktbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit • Überwindung bzw. Verbesserung der Barrierefreiheit durch bessere Zugänglichkeit, Tragfähigkeit und Fahrkorbfläche • Reduzierung von geplanten Stillstandszeiten bei Wartung und Modernisierung sowie Nutzerinfo • Wartungsfreundlichkeit und Fahrkomfort

Alle genannten Umsetzungen beim Aufzug gehen einher mit der Erhaltung bzw. Verbesserung der technischen Qualität einer bestehenden Aufzugsanlage und ihr Zusammenwirken mit dem Gebäudebetrieb und damit der Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3). Die Abstimmung und Planung ggf. notwendiger Stillstandszeiten werden insbesondere von der Qualität der Prozesse beeinflusst. Technische Qualität und Prozessqualität sind als Querschnittsqualitäten zu sehen, die zur Schaffung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Qualität beitragen (vgl. Abbildung 7.1 und [96]).

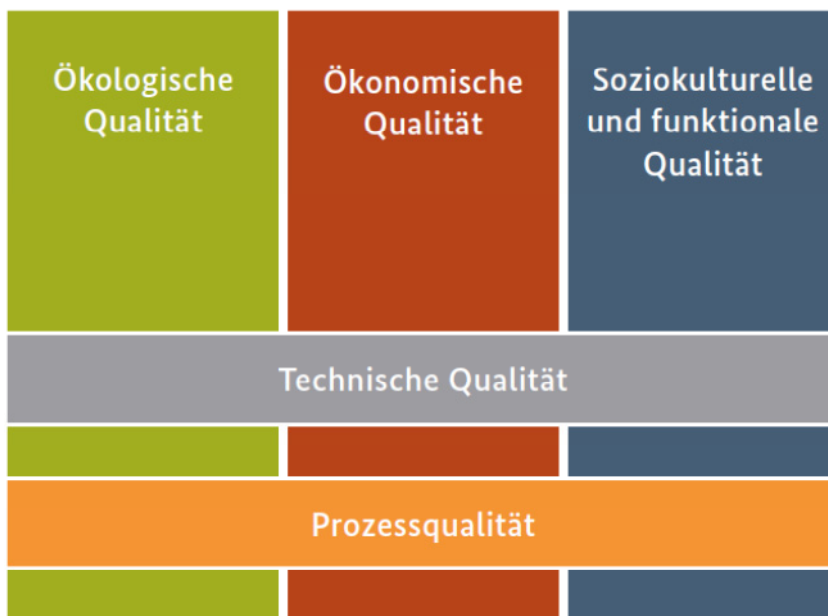


Abbildung 7.1: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit zusammen mit den Querschnittsqualitäten ohne Berücksichtigung der Standortqualität (Quelle: [96, S. 18])

Mögliche Einflüsse der Qualität des Standortes werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Inwieweit die in diesem Abschnitt erarbeiteten, aufzugsspezifischen Schutzziele bei konkreten Projekten tatsächlich erreicht werden, wird im folgenden Kapitel in Abschnitt 8.1.5 mit einer gewichteten Bewertungssystematik überprüft.

8 Entwicklung eines Planungshilfsmittels

Die in den vorigen Kapiteln erarbeiteten Methoden und Datengrundlagen werden in den folgenden Abschnitten in den Rahmen eines praktisch anwendbaren Planungshilfsmittels integriert. Es soll dabei eine Struktur zur Verfügung gestellt werden, die später von einem Anwender auch als programmiertes bzw. softwarebasiertes Tool umgesetzt werden kann.

8.1 Modularer Aufbau des Planungshilfsmittels

Die in den folgenden Abschnitten behandelten Module des Planungshilfsmittels werden vom Autor mit Hilfe der Tabellenkalkulation Excel™ von Microsoft (Version 2007) dargestellt. Eine spätere Umsetzung ist alternativ auch mit höheren Programmiersprachen möglich. Die Module werden (bei einer Darstellung mit Excel™) als separate Tabellen realisiert, die aufeinander aufbauen und Daten übergeben – von der Eingabe der Grunddaten einer zu erfassenden Aufzugsanlage über die Entwicklung möglicher Instandhaltungsvarianten bis hin zur Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von ökonomischen Aspekten sowie der gebäude- und nutzerspezifischen Zukunftsfähigkeit. Abbildung 8.1 zeigt das Planungshilfsmittel im Überblick. Ausgewählte Beispiele für eine mögliche Umsetzung der Module finden sich in Anhang C.

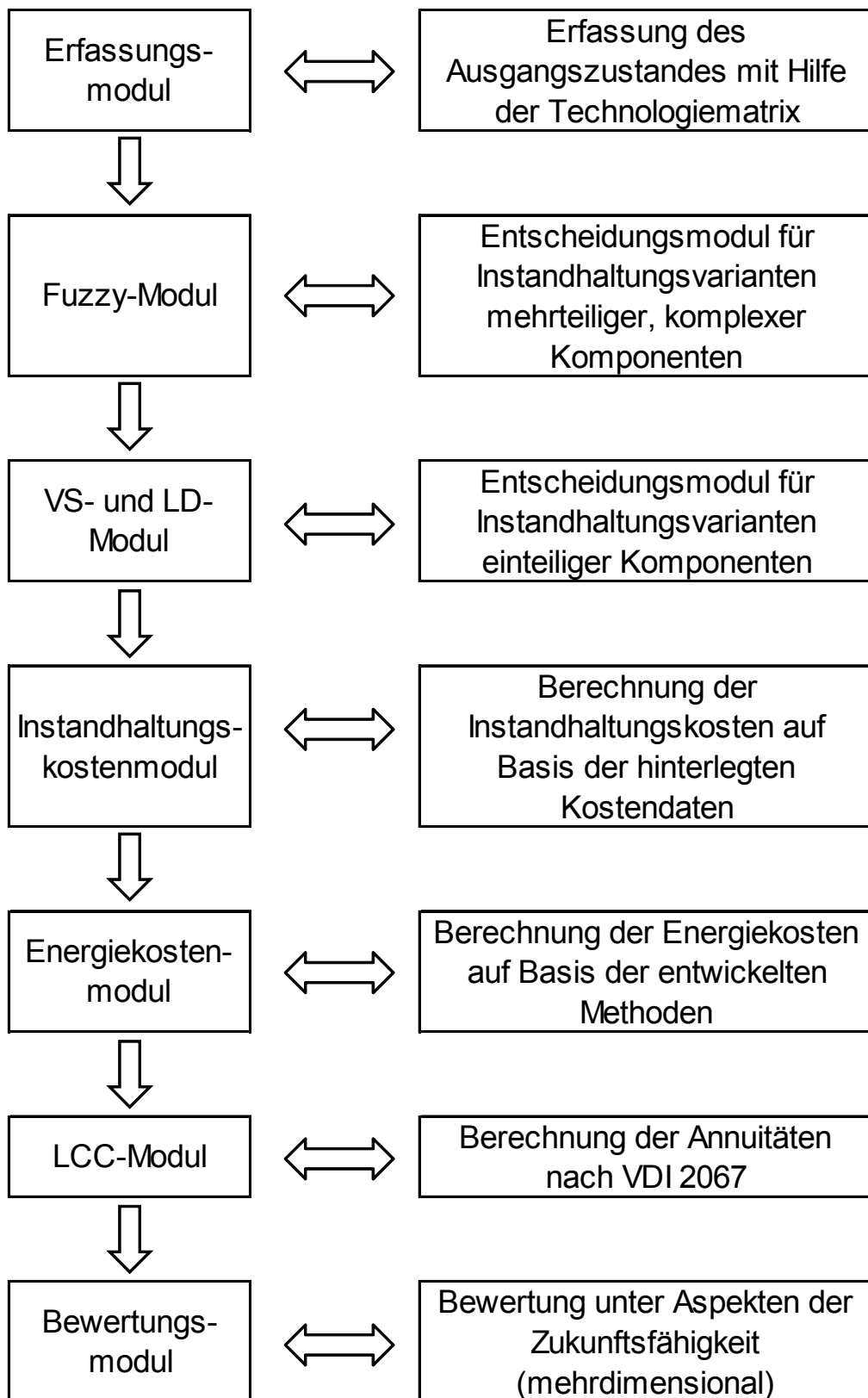


Abbildung 8.1: Planungshilfsmittel – Überblick
(Quelle: eigene Darstellung)

8.1.1 Erfassungsmodul

Das Erfassungsmodul dokumentiert den Ist-Zustand der zu analysierenden Anlage.⁸³ Drei wesentliche Informationsbausteine sind dabei zu erfassen:

- Basisdaten Aufzug,
- Basisdaten Gebäude sowie
- Modernisierungsdaten Aufzug (bis zum Zeitpunkt der Datenaufnahme).

Ergänzend sind u.a. zur Sicherung der Vergleichbarkeit von Ergebnissen Festlegungen für die Lebenszykluskostenrechnung zu treffen. Dazu existieren in verschiedenen Bereichen Konventionen⁸⁴ zum Betrachtungszeitraum, zum Diskontierungszinssatz, zu Preissteigerungsraten und zu Tarifen für den Energiebezug, auf die zurückgegriffen werden kann. Die Auswahlmöglichkeiten für die Angaben zu Aufzug und Gebäude ergeben sich aus vordefinierten Varianten der Technologiematrix (vgl. Abschnitt 2.3). Basisdaten zum Aufzug sind z.B. die Tragfähigkeit, die Anzahl der Etagen und das Baujahr. Anforderungen vom Gebäude an den Aufzug werden u.a. durch den Gebäudetyp, die Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1 bzw. DIN EN ISO 25745-2 (vgl. Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2) sowie die maximal tolerierte Anzahl von Störungen pro Jahr (Verfügbarkeitsanspruch) definiert. Diese sind im Block Basisdaten Gebäude zusammengefasst. Im Block Modernisierungsdaten Aufzug werden detailliert die technischen Eigenschaften der Anlage zum Zeitpunkt der Dateneingabe abgefragt. Betrachtet werden dazu alle wesentlichen Komponenten eines Aufzuges, die in drei Bereiche unterteilt sind:

⁸³ Wie schon in Abschnitt 1.2 beschrieben, kann im Anlagenbestand in Deutschland hoher Modernisierungsbedarf vorausgesetzt werden, weshalb das Planungshilfsmittel auf bestehende Aufzüge ausgerichtet ist.

⁸⁴ z.B. im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung in Deutschland, vgl. www.bnb-nachhaltigesbaeuen.de/bewertungssystem (zuletzt geprüft am 02.08.2018)

- Maschinenraum,
- Fahrkorb,
- Schachtausrüstung und Schachtzugänge.

Wesentliche Komponenten des Maschinenraums sind u.a. der Antrieb, die Regelung und die Steuerung sowie der Geschwindigkeitsbegrenzer. Beim Fahrkorb sind wesentliche Komponenten der Kabinentürantrieb und die Fangvorrichtung sowie bei der Schachtausrüstung und den Schachtzugängen beispielsweise das Gegengewicht, die Führungsschienen und die Schachttüren. Insgesamt werden nach dieser Systematik 45 Komponenten abgefragt, die im Planungshilfsmittel für die Verwendung in den anderen Modulen durchgehend mit einer eindeutigen Komponenten-Identitätsnummer (Komp.-ID) identifiziert werden. Den im Folgenden beschriebenen Modulen steht die Methodenauswahl (in separatem Tabellenblatt umsetzbar) voran. Allen 45 Komponenten werden jeweils eine von vier möglichen Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und der Instandhaltungsstrategie zugeordnet:

- Fuzzy Logic,
- Bestimmung des Verschleißgrades auf Basis eines definierten Abnutzungsvorrates mit Einflüssen von verschleißfördernden Faktoren,
- eine fest vorgegebene rechnerische Lebensdauer oder
- die Annahme, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums kein Austausch erforderlich sein wird.

Die o.g. Methoden bzw. Verfahren wurden in Kapitel 6 hergeleitet und ausführlich beschrieben.

8.1.2 Fuzzy-, VS- und LD-Modul

Das Fuzzymodul basiert auf den Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Logik von Abschnitt 6.1.2 sowie der Regelbasis in

Anhang B. Die Fuzzy-Logic wird auch im Planungshilfsmittel nur für komplexe, mehrteilige Komponenten angewandt. Unter diesen werden die Regelung und die Steuerung verstanden (Komp.-ID 1 und 2). Die linearen Zugehörigkeitsfunktionen können zur Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades auf Basis der Eingaben vom Erfassungsmodul direkt berechnet werden (auch einfach „von Hand“ berechenbar bzw. aus den Schaubildern in Abschnitt 6.1.2.2 ablesbar). Mit Hilfe der in Excel™ verfügbaren Logik-Operatoren kann schließlich die Regelbasis (vgl. Abschnitt 6.1.2.3) direkt abgebildet und umgesetzt werden.

Das Verschleiß- (VS-) und Lebensdauer- (LD-)Modul basiert bei den übrigen einteilig zu betrachtenden Komponenten (Komp.-ID 3 bis 45) auf Formeln zur Verschleißbestimmung sowie vorgegebenen technischen Lebensdauern (vgl. Abschnitt 6.1.3).

Die Anwendung der drei vorgestellten Methoden basiert auf Beobachtungen (z.B. Situation zur Ersatzteilversorgung bei der Steuerung) oder Annahmen (z.B. Anzahl der Fahrten pro Tag) zum Betrachtungszeitpunkt (Einstiegszeitpunkt, vgl. Abschnitt 5.1.1) innerhalb des Betrachtungszeitraums. Sollten sich diese Beobachtungen und Annahmen innerhalb des Betrachtungszeitraums nach Anwendung des Planungshilfsmittels signifikant ändern (z.B. durch eine unerwartete Abkündigung der Ersatzteilversorgung durch einen Hersteller), so ist eine erneute Bewertung mit dem Planungshilfsmittel erforderlich.

8.1.3 Instandhaltungs- und Energiekostenmodul

Das Instandhaltungskostenmodul berechnet über den vorgegebenen Betrachtungszeitraum die Kosten auf Basis der definierten aufzugsspezifischen Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 4.2.1). Diese können mit hinterlegten Kostendaten (vgl. Abschnitt 4.3.2) z.B. in einem separaten Tabellenblatt bei der Anwendung von Excel™ verknüpft oder projektspezifisch eingegeben werden.

Für jede der 45 Komponenten ergibt sich nun für alle Perioden t innerhalb des vorgegebenen Betrachtungszeitraumes T folgende Kostenzusammensetzung, die zu den betriebsgebundenen Kosten nach VDI 2067 Blatt 1 aufsummiert wird:

- Inspektion und Wartung,
- Aufschaltung eines Notrufsystems mit Rufbereitschaft rund um die Uhr,
- Gebühren für die zugelassene Überwachungsstelle⁸⁵ (jährlich abwechselnd Haupt- und Zwischenprüfung),
- Instandsetzung im Sinne von kleineren Reparaturen.

Als kapitalgebundene Kosten nach VDI 2067 Blatt 1 werden die Kosten für Instandsetzungen im Sinne von Ersatzinvestitionen erfasst (Austausch von Hauptkomponenten, wie z.B. der Antrieb oder der Steuerung).

Das Energiekostenmodul berechnet oder bestimmt über den vorgegebenen Betrachtungszeitraum auf Basis der in Kapitel 3 beschriebenen Methoden und Ergebnisse (u.a. nach Tabelle 27) die jährlichen Energiekosten (bedarfsgebundene Kosten nach VDI 2067 Blatt 1). Alternativ zu den Ergebnissen nach Tabelle 27 können auf Basis der VDI 4707 Blatt 1 oder Simulation Angaben zum Energiebedarf des Gesamtsystems Aufzug zur Verfügung gestellt werden; der ermittelte Wert wird bei Komponente 1, stellvertretend für die gesamte Anlage, eingetragen, und die Felder der restlichen Komponenten bleiben leer. Erfolgt eine komponentenscharfe Ermittlung des Energiebedarfs nach VDI 4707 Blatt 2 ist dies für alle 45 Komponenten tabellarisch umsetzbar. Für die Kostenberechnung wird der im Eingabemodul hinterlegbare durchschnittliche⁸⁶ Preis pro Kilowattstunde her-

⁸⁵ können projektspezifisch eingefügt werden

⁸⁶ Unter „durchschnittlich“ wird der Preis pro kWh (Leistungspreis) zuzüglich anteiliger Grundkosten (Anschlusspreis) verstanden. Dieser ergibt sich im Idealfall aus der standort- und anbieterspezifischen Abrechnung des Anwenders.

angezogen. Die Energiebedarfsermittlung nach VDI 4707 kann über separate Tabellenblätter umgesetzt werden („von Hand“ berechenbar). Werden Ergebnisse aus einer Simulation genutzt, sind die Daten aus dem angewandten Softwareprodukt zu übernehmen (z.B. von Elevate™, vgl. Abschnitt 3.4.3.2).

8.1.4 LCC-Modul

Das LCC-Modul (basierend auf der Methodik nach Kapitel 7) bezieht seine Informationen zur Berechnung der Annuitäten direkt aus dem Instandhaltungs- und dem Energiekostenmodul. Für jede Komponente können nun die Annuitäten für die bedarfs-, betriebs- und kapitalgebundenen Kosten errechnet und schließlich über alle Komponenten aufsummiert werden. Die für die bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten erforderlichen dynamischen Barwertfaktoren werden auf Basis der im Eingabemodul verfügbaren Angaben zum Kalkulationszinssatz⁸⁷ und zu den jährlichen Preissteigerungen (wenn für Energie und Dienstleistungen separat ausgewiesen) berechnet. Bei Anwendung einer allgemeinen Preissteigerungsrate ist ein dynamischer Barwertfaktor ausreichend. Der Kalkulationszinssatz bestimmt zudem den Annuitätsfaktor zur Bestimmung des Gesamtergebnisses. Eine entscheidende Rolle spielt in diesem Zusammenhang der Betrachtungszeitraum. Bei einer bestehenden Aufzugsanlage, die beispielweise schon 20 Jahre in Betrieb ist, kann der allgemein auf 50 Jahre festgelegte Betrachtungszeitraum um 20 Jahre reduziert werden, wenn der Anwender seine zukünftigen Zahlungen ausgehend vom Einstiegszeitpunkt innerhalb des Betrachtungszeitraums analysieren möchte bzw. die vorher stattgefundenen Zahlungsflüsse nicht kennt (vgl. Abschnitt 5.1.1).

⁸⁷ z.B. ein auf dem Kapitalmarkt erzielbarer Haben-Zinssatz bei einer risikoarmen Anlage (vgl. [25, S. 144])

8.1.5 Bewertungsmodul

Im Bewertungsmodul wird die systematische Entscheidungsfindung vervollständigt, indem die rein technisch orientierten Ergebnisse der Fuzzy-Logic (bei der Steuerung, vgl. Abschnitt 6.1.2) sowie der Referenzlebensdauer methode mit Faktorenanpassung (bei einteiligen Komponenten, vgl. Abschnitt 6.1.3) darüber hinausgehend aus Sicht der Nutzer und Betreiber sowie im Zusammenhang mit den Wirkungen auf die lokale und globale Umwelt beurteilt werden. Hierzu werden die Vorgehensweise zur ökonomischen Bewertung aus Abschnitt 7.1 sowie Maßnahmen aus Abschnitt 7.2 zur Erlangung der Schutzziele unter den Aspekten der Nachhaltigkeit kombiniert und integriert. Das Schema des Bewertungsmoduls zeigt Abbildung 8.2. Wie in Abschnitt 6.1.2.3 bereits beschrieben, wird durch das Bewertungsmodul eine eindeutige Entscheidungsfindung auch dann ermöglicht, wenn die Fuzzy-Logic bei ausschließlicher Betrachtung der Steuerung zunächst zwei gleichwertige Instandhaltungsstrategien liefern sollte.

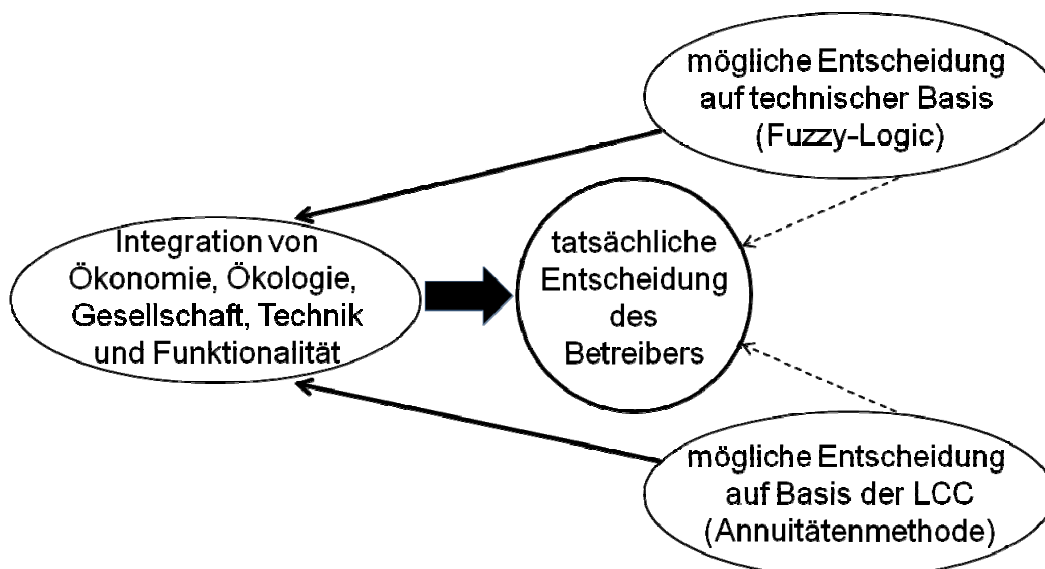


Abbildung 8.2: Zusammenhänge im Bewertungsmodul
(Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 44: Gewichtete Bewertung für verschiedene Varianten, hier im Beispiel zwei Varianten (Quelle: eigene Darstellung)

Kriterium	Gewichtung [%]	Variante 1		Variante 2	
		Bewertung (1-3)	Ergebnis	Bewertung (1-3)	Ergebnis
ökologisch	25				
Energieverbrauch im Betrieb	10				
Vermeidung von Schmiermitteln	5				
Vermeidung des Austauschs von Komponenten	10				
ökonomisch	25				
LCC	12,5				
Unterstützung der Vermiet- und Vermarktbarkeit	12,5				
sozial	25				
Sicherheit	15				
Barrierefreiheit	5				
Verfügbarkeit	5				
technische Qualität	12,5				
Wartungsfreundlichkeit	6,25				
Fahrkomfort	6,25				
Prozessqualität	12,5				
Stillstandszeiten durch Modernisierung	5				
Stillstandszeiten durch Wartung	5				
Information der Nutzer	2,5				
	100				

Tabelle 44 zeigt eine mögliche Gewichtung der relevanten Kriterien. Die übergeordneten Kriterien orientieren sich dabei an der

Strukturierung etablierter deutscher Systeme zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, z.B. des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB⁸⁸). Die Unterkriterien mit den dazugehörigen Gewichtungen sind spezifisch auf das System Aufzug im Gebäude im Zusammenspiel mit dem Nutzer ausgerichtet. Im Gegensatz zum BNB wurden vom Autor die Gewichtungen von technischer Qualität und Prozessqualität bei Aufzügen mit jeweils 12,5 % gleich hoch gewählt. Aus Sicht des Autors ist dies zu rechtfertigen, da der Nutzen einer hohen technischen Qualität durch eine mäßige Prozessqualität stark oder sogar vollständig eingeschränkt werden kann. Dies zeigt sich zum Beispiel an der Durchführung und Organisation der Wartung: Wird die Wartung zu Zeiten hoher Frequentierung ohne Rücksprache mit dem Betreiber oder den Nutzern durchgeführt, zeigt die bestmögliche technische Qualität keine Wirkung mehr, da der Aufzug für den Nutzer nicht verfügbar ist.

Die Kriterien werden schließlich bei der Abfrage mit dem Planungshilfsmittel auf einer Skala von 3 bis 1 bewertet. Zusammen mit der Gewichtung ergibt sich ein Ergebnis (Score) für jedes Kriterium. Die Variante mit dem höheren Gesamtergebnis wird dem Anwender schließlich zur Umsetzung empfohlen. Bewertungsskalen zu sämtlichen Kriterien in Tabelle 44 werden gemäß Tabelle 45 bis Tabelle 57 festgelegt:⁸⁹ Die jeweils bestmögliche Eigenschaft wird mit 3 Punkten bewertet; diese werden ergänzend zu den Tabellen nachfolgend erläutert:

Die Energieeffizienzklassen A und B sind mit der geeigneten Kombination energetisch hochwertiger Komponenten erreichbar (Tabelle 45). Keine Schmiermittel beim Antrieb und bei den

⁸⁸ vgl. Gewichtungstabelle des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) für Büro- und Verwaltungsgebäude – Neubau: https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Buero_Nebau/aktuell/BNB_BN_2015_Gewichtungstabelle.pdf (zuletzt geprüft am 23.10.2018)

⁸⁹ hervorgehend aus eigenen Erfahrungen des Autors sowie zahlreichen Experten-gesprächen mit Herstellern und Planern

Führungen sind realisierbar bei getriebelosem Antrieb sowie mit Rollenführungen an der Kabine und dem Gegengewicht (Tabelle 46).

Tabelle 45: Bewertungsskala zum Energieverbrauch im Betrieb
(Quelle: eigene Darstellung)

3	Energieeffizienzklasse A	nach VDI 4707
	Energieeffizienzklasse B	
2	Energieeffizienzklasse C	
	Energieeffizienzklasse D	
1	Energieeffizienzklasse E	
	Energieeffizienzklasse F	
	Energieeffizienzklasse G	

Tabelle 46: Bewertungsskala zur Vermeidung von Schmiermitteln
(Quelle: eigene Darstellung)

3	keine Schmiermittel beim Antrieb, keine Schmiermittel bei den Führungen von Kabine und Gegengewicht
2	Schmiermittel beim Antrieb, keine Schmiermittel bei den Führungen von Kabine und Gegengewicht
1	Schmiermittel beim Antrieb, Schmiermittel bei den Führungen mit fachgerechter Entsorgung

Wird die Reparaturstrategie verfolgt, werden Ressourcen u.a. zur Produktion und dem Einbau neuer sowie der Entsorgung bzw. Wiederverwertung alter Komponenten geschont (Tabelle 47). Die geringste Annuität steht für die geringsten Lebenszykluskosten innerhalb des Betrachtungszeitraums (Tabelle 48).

Tabelle 47: Bewertungsskala zur Vermeidung des Austauschs von Komponenten zur Schonung von Ressourcen (Quelle: eigene Darstellung)

3	Reparaturstrategie
2	Modernisierungsstrategie
1	Strategie der kompletten Erneuerung

Tabelle 48: Bewertungsskala zu LCC (Quelle: eigene Darstellung)

3	geringste Annuität beim Variantenvergleich
2	mittlere Annuität beim Variantenvergleich
1	höchste Annuität beim Variantenvergleich

Im Idealfall zeigt sich bei einer einwandfreien Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Aufzugs die Zustimmung⁹⁰ von Mietern bei Vertragsverhandlungen (Tabelle 49), und es sind alle Risiken (auch niedrige), die einer sicheren Verwendung des Aufzugs entgegenstehen, ausnahmslos beseitigt (Tabelle 50).

Tabelle 49: Bewertungsskala zur Vermiet- und Vermarktbarkeit (Quelle: eigene Darstellung)

3	Gebäudebetrieb nach Durchführung der Maßnahmen deutlich verbessert
2	Gebäudebetrieb nach Durchführung der Maßnahmen unverändert ohne Einschränkungen
1	Gebäudebetrieb erheblich eingeschränkt

Tabelle 50: Bewertungsskala zur Sicherheit (Quelle: eigene Darstellung)

3	alle Risiken nach LSV ⁹¹ beseitigt
2	niedrige Risiken nach LSV nicht beseitigt
1	mittlere Risiken nach LSV nicht beseitigt

Aufzugstyp 3 ermöglicht im Idealfall die Aufnahme eines Rollstuhlfahrers mit Begleitperson, und der Rollstuhl kann in der

⁹⁰ unter der Voraussetzung, dass keine anderen Eigenschaften des Gebäudes diese mindern oder ausschließen

⁹¹ hier nach dem Leitfaden zur sicheren Verwendung von Personen- und Lastenaufzügen nach dem Stand der Technik [31] oder alternativ nach DIN EN 81-80 [30]

Kabine gewendet werden (Tabelle 51). Im Idealfall treten keine Störungen⁹² oder max. eine Störung pro Jahr auf (Tabelle 52).

Tabelle 51: Bewertungsskala zur Barrierefreiheit
(Quelle: eigene Darstellung)

3	Aufzugstyp 3	nach DIN EN 81-70
2	Aufzugstyp 2	
1	Aufzugstyp 1	

Tabelle 52: Bewertungsskala zur Verfügbarkeit
(Quelle: eigene Darstellung)

3	maximal 1 Störung pro Jahr
2	maximal 3 Störungen pro Jahr
1	mehr als 3 Störungen pro Jahr

Eine optimale Wartung ist u.a. bei uneingeschränktem Zugang zu Ersatzteilen und, wenn notwendig, Diagnosesystemen möglich. Jeder freie Fachbetrieb kann im Idealfall die Wartung durchführen (Tabelle 53). Messungen des Fahrkomforts sind nach objektiven Kriterien möglich, z.B. nach ISO 18738 [128] (Tabelle 54).

Tabelle 53: Bewertungsskala zur Wartungsfreundlichkeit
(Quelle: eigene Darstellung)

3	alle Ersatzteile auf dem freien Markt verfügbar, freier Zugang zu Diagnosesystemen, keine Herstellerbindung
2	Ersatzteile Drittanbietern zugänglich, eingeschränkter Zugang zu Diagnosesystemen, teilweise Herstellerbindung
1	keine freie Verfügbarkeit von Ersatzteilen, kein Zugang zu Diagnosesystemen, Wartung vollständig an Hersteller gebunden

⁹² Hier bezieht sich die Verfügbarkeit auf die gesamte Anlage (als Ergebnis einer Maßnahme). In Abschnitt 6.1.2.2 wurden die Verfügbarkeitsanforderungen bereits zur Instandhaltungsstrategie im Zusammenhang mit der Steuerung unabhängig betrachtet.

Tabelle 54: Bewertungsskala zum Fahrkomfort
(Quelle: eigene Darstellung)

3	Qualitätssicherung durch Messung durchgeführt
2	Qualitätssicherung durch subjektive Einschätzung durchgeführt
1	nur Standardeinstellungen umgesetzt

Ideal sind durch die Auswahl geeigneter Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 4.2.1) geringstmögliche, durch Modernisierungen verursachte (kumulierte) Stillstandszeiten (Tabelle 55). Bei der Wartung lassen sich diese minimieren oder vermeiden, wenn diese idealerweise außerhalb der Hauptnutzungszeiten durchgeführt werden (Tabelle 56). Dies wird unterstützt durch eine aktive und auf den Nutzerkreis abgestimmte Kommunikation durch den Bauherrn oder durch den Betreiber (Tabelle 57).

Tabelle 55: Bewertungsskala zu Stillstandszeiten durch Modernisierung
(Quelle: eigene Darstellung)

3	weniger als 2 Wochen innerhalb von 5 Jahren
2	2 bis 4 Wochen innerhalb von 5 Jahren
1	mehr als 4 Wochen innerhalb von 5 Jahren

Tabelle 56: Bewertungsskala zu Stillstandszeiten durch Wartung
(Quelle: eigene Darstellung)

3	Wartungen werden immer außerhalb der Hauptnutzungszeiten bzw. abends oder am Wochenende durchgeführt.
2	Wartungen werden, wenn möglich, nach Rücksprache mit dem Betreiber durchgeführt.
1	Wartungen werden zu beliebigen Zeitpunkten ohne Rücksicht auf den Gebäudebetrieb durchgeführt.

Tabelle 57: Bewertungsskala zur Information der Nutzer
(Quelle: eigene Darstellung)

3	rechtzeitig durch Aushang an zentraler Stelle und mit Nutzung aller dem Personenkreis zugänglichen Kommunikationskanäle
2	rechtzeitig durch Aushang am Aufzug
1	unmittelbar durch Aushang am Aufzug ohne Vorankündigung

Inhaltliche Überschneidungen der übergeordneten Kriterien sind möglich und werden durch die Zuordnung der Unterkriterien vorab getrennt. So könnte z.B. der Fahrkomfort entweder als soziales Kriterium oder als technisches Kriterium eingeordnet werden. Dies gilt auch für das Unterkriterium „Sicherheit“. Der Autor entschied sich, bei dem obigen Bewertungssystem die Zuordnung nach der überwiegenden Eigenschaft vorzunehmen. So muss sich ein durchschnittlicher Fahrkomfort in einem normalen Büro- oder Wohngebäude nicht unmittelbar auf die Nutzerzufriedenheit auswirken, stellt jedoch im Rahmen des übergeordneten Kriteriums „technische Qualität“ das Maß der Umsetzung gängiger Anforderungen an den Fahrkomfort und somit eine Querschnittsqualität dar. Umgekehrt verhält es sich nach Ansicht des Autors beim Unterkriterium „Sicherheit“, das sich unmittelbar bei drohenden Gefährdungen auf den Nutzer und damit das soziale Umfeld auswirken. Es wird dazu nicht als technische Qualität eingestuft, da diese eine unabdingbare Voraussetzung zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen darstellt und keinem Spielraum unterliegt im Vergleich zur teilweise subjektiven Einschätzung des Fahrkomforts.

9 Anwendungsbeispiele

Als Beispiele zur Anwendung des zuvor entwickelten Planungshilfsmittels werden zwei reale Modernisierungsprojekte herangezogen. Die beiden Beispiele unterscheiden sich u.a. deutlich durch das Alter der Anlagen sowie die Frequentierung (Nutzungskategorie), so dass ein aussagekräftiger Belastbarkeitstest des Planungshilfsmittels durchgeführt werden konnte. Die sich aus dem Planungshilfsmittel ergebenden Instandhaltungsstrategien wurden an den beiden Anlagen auch unmittelbar umgesetzt; eine anschließende Erfolgskontrolle war somit möglich. Daten zum geografischen Standort der beiden Anlagen sowie personenbezogene Angaben zu den Betreibern sind für die folgenden Ausführungen nicht relevant und werden aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht.

9.1 Anwendung des Planungshilfsmittels an real existierenden Anlagen

Die Beispielanlagen werden nachfolgend dokumentiert. Durch Anwendung des Planungshilfsmittels werden geeignete Instandhaltungsstrategien ermittelt und abschließend im letzten Abschnitt dieses Kapitels evaluiert.

9.1.1 Zweiergruppe im Nichtwohngebäude mit Konferenzzentrum

Die folgenden Abschnitte orientieren sich an der im vorigen Kapitel beschriebenen Vorgehensweise und Reihenfolge.

9.1.1.1 Beschreibung der Anlage und der Nutzungsrandbedingungen (Erfassungsmodul)

Betrachtungsgegenstand ist eine Zweiergruppe mit jeweils fünf Haltestellen. Beide Aufzüge sind jeweils mit einer Tragfähigkeit von 1.000 kg bzw. 13 Personen ausgewiesen und wurden im Jahre 2001 von einer mittelständischen Aufzugsfirma errichtet. Optisch ansprechend mit verglasten Schächten und Türen sind die beiden Aufzüge in das architektonische Konzept des Gebäudes integriert. Dabei kamen marktübliche und frei erhältliche Komponenten verschiedener Hersteller zum Einsatz.

Erschlossen werden im Untergeschoss (UG) eine Tiefgarage, das Erdgeschoss (EG, Passage, Hauptzugangsbereich), eine öffentlich zugängliche Gastronomie im 1. Obergeschoss (OG), das Konferenzzentrum im 2. OG sowie ein Gesundheitszentrum im 3. OG. Da die Gastronomie im 1. OG direkt über eine offene Treppe vom Hauptzugangsbereich aus erreichbar ist, sind in der Mittagszeit keine daraus resultierenden Spitzen im Verkehrsaufkommen zu erwarten. Mobilitätseingeschränkte Personen erreichen die Gastronomie jedoch nur über den Aufzug. Die Nutzung im 3. OG lässt in der Regel auf ein über den Tag gleichmäßig verteiltes Verkehrsaufkommen schließen, was auch für die Erschließung der Tiefgarage im UG gilt. Kritisch ist, dass auch das 3. OG teilweise von mobilitätseingeschränkten Personen besucht wird, die auf die beiden Aufzüge vollständig angewiesen sind. Spitzen im Verkehrsaufkommen sind hier bei Gruppenveranstaltungen mit bis zu ca. 40 Personen pro Sitzung zu erwarten. Die Nutzung im 2. OG ist ebenfalls als kritisch zu betrachten. Bei Veranstaltungen im Konferenzzentrum sind insbesondere in den Pausenzeiten sehr hohe Verkehrsaufkommen in beide Fahrtrichtungen zu erwarten. Dies stellt hohe Anforderungen an die Förderleistung der beiden Aufzüge, um insbesondere die durchschnittlichen Wartezeiten in vertretbarem Rahmen zu halten. Direkten Einfluss hierauf nehmen insbesondere die Türverlustzeiten (vgl. Abschnitt 2.2), der

Algorithmus der Gruppensteuerung, die Fahrdynamik sowie die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit der Aufzüge.

Vom Betreiber bzw. Eigentümer der beiden Aufzüge werden schon seit längerer Zeit erhebliche Defizite hinsichtlich der Förderleistung festgestellt. Dies betrifft insbesondere sehr lange Wartezeiten von über einer Minute.⁹³ Lang andauernde, störungsbedingte Stillstandszeiten kommen hinzu. Insbesondere bei Veranstaltungen im Konferenzzentrum führt dies zu erheblichen Beeinträchtigungen des Betriebsablaufs, und regelmäßig können mobilitätseingeschränkte Nutzer das Gesundheitszentrum im 3. OG nicht erreichen. Von Nutzern und Mietern häufen sich deshalb Beschwerden bis hin zur Absage von Veranstaltungen oder zu drohenden Kündigungen von Mietverträgen. Eine unmittelbar schädigende Wirkung dieser Situation auf den Geschäftsbetrieb des Gebäudebetreibers und damit auf die Vermiet- und Vermarktbarkeit des Gebäudes ist erkennbar.

Beide Aufzüge (A und B) sind technisch identisch als Treibscheibenaufzüge ausgeführt. Die folgenden Details beziehen sich deshalb auf einen Aufzug (siehe technische Daten in Tabelle 58). Auch die Anwendung des Planungshilfsmittels bezieht sich auf einen Aufzug, da die Ergebnisse uneingeschränkt auf den jeweils anderen übertragbar sind.

Der Maschinenraum befindet sich unten neben der Schachtgrube. Es kommt ein kompakter, getriebeloser Antrieb mit Synchronmotor zum Einsatz. Kabine und Gegengewicht sind im Verhältnis 2:1 aufgehängt. Zur Realisierung sind bei dem vorgefundenen Konzept zwei Umlenkrollen auf der Kabine, zwei Umlenkrollen im Schachtkopf sowie eine Umlenkrolle auf dem Gegengewicht vorhanden. Der Geschwindigkeitsbegrenzer im Schachtkopf ist mit Fernauslöser ausgestattet. Die Kabine ist im UG von der

⁹³ Durchschnittliche Wartezeiten von 30 bis 45 Sekunden gelten als vertretbar (vgl. [33, S. 4–7]).

gegenüberliegenden Seite (bezogen auf die anderen Geschosse) zugänglich, weshalb auf der Kabine zwei Türantriebe vorhanden sind. Kabinen- und Schachttüren sind verglast und zentral öffnend ausgeführt. Die Beleuchtung der Kabine erfolgt mit LED-Technik und verzögerter Abschaltung bei Stillstand. Kabine und Gegengewicht sind mit Rollenführungen ausgestattet. Die Schachstumweh- rung ist in den Vollgeschossen verglast (bis zum 1. OG vollständig, ab 2. OG nur von der Zugangsseite). Gesteuert wird der Aufzug von einer Mikroprozessorsteuerung mit Gruppenmodul und LON- Bus-Technologie für geringen Verkabelungsaufwand im Schacht und zur Kabine. Die Schachtkopierung erfolgt mittels Absolutwertgeber. Der Antrieb wird von einem Frequenzumrich- ter geregelt. Eine Schutzeinrichtung gegen Übergeschwindigkeit für den aufwärts fahrenden Fahrkorb (SAFÜ) ist über die Be- triebbremse realisiert.

Zur regelmäßigen Instandhaltung der beiden Aufzüge (nach TRBS 3121) wurde ein Wartungsvertrag mit vier Wartungen pro Jahr (nach DIN EN 13015) abgeschlossen; dieser beinhaltet im vorlie- genden Fall:

- Inspektion und Sichtkontrolle,
- Prüfung aller sicherheitsrelevanten Bauteile, Schmierar- beiten, Ein- und Nachstellarbeiten,
- Beseitigung von betriebsbedingten Verschmutzungen,
- Schmier- und Reinigungsmittel einschl. Entsorgung.

Darüber hinausgehende Leistungen, wie z.B. Störungsbeseitigung und Reparaturen sowie Personenbefreiungen, werden nach tatsächlichem Aufwand in Rechnung gestellt. Notrufweiterleitung und Personenbefreiung nach TRBS 3121 werden durch einen externen Dienstleister (Sicherheitsdienst) umgesetzt.

Tabelle 58: Technische Daten der betrachteten Aufzüge
(Quelle: eigene Erhebung vor Ort)

Hersteller	mittelständischer Betrieb
Fabrik-Nr.	Aufzug A: dem Autor bekannt Aufzug B: dem Autor bekannt (aus Datenschutzgründen hier nicht angegeben)
Baujahr	2001
Anzahl Haltestellen	5 (U, E, 1, 2, 3)
Förderhöhe	16,85 m
Tragfähigkeit	1000 kg oder 13 Personen
Schachtkopfhöhe	4.850 mm
Schachtgrubentiefe	1.470 mm
Aufhängung	2:1
Anzahl Umlenkrollen	5
Umlenkrollen Kabine	2 Stück D = 400 mm
Umlenkrolle Gegengewicht	1 Stück D = 400 mm
Umlenkrollen Schachtkopf	1 Stück D = 560 mm 1 Stück D = 400 mm
Tragseile	5 x 10 mm
Lage des Maschinenraums	unten/neben
Geschwindigkeitsbegrenzer	Jungblut HJ 300 mit Fernauslösung
Fangvorrichtung Kabine	Bremsfangvorrichtung Haushahn BF1D-1
Kabinenbreite	1.600 mm
Kabinentiefe	1.400 mm
Kabinenhöhe	2.300 mm
Kabinentüren	2 Stück (zentralöffnend, 2-blättrig, Durchlader, Haltestelle U gegenüberliegend) Sematic 2000 B mit geregeltm Gleichstromantrieb
Schachttüren	5 Stück Sematic 2000 B (zentral öffnend, 2-blättrig)
Türbreite	1.000 mm
Türhöhe	2.100 mm
Führungen Kabine	Rollen
Schienen Kabine	90/75/16
Stichmaß Kabine	1.750 mm
Führungen Gegengewicht	Rollen
Schienen Gegengewicht	45/45/5 und 70/70/9
Stichmaß Gegengewicht	500 mm
Antrieb	Ziehl-Abegg Zetasyn SM 700.12AL-30 (getriebe- los), Bauform MB3, Nennspannung: 360 V (24 Hz), Isol.-Kl.: F, Leistung: 8 kW, Nennstrom: 19 A, Nenndrehzahl: 96 1/min, 180 Fahrten pro Stunde, 60 % ED, Treibscheibe: D = 400 mm
Steuerung	NEW LIFT FST (1. Generation) & GST
Kopierung	Linearkopierung ASM Wegseil-Sensor (absolut)
Regelung	Lust (auf Basis Typ VF 1000L), von Ziehl-Abegg modifiziert (Typ MC 7000), von der FST diskret (parallel) über Vorsteuerplatine angesteuert, Drehgeber im Antrieb

Zur Durchführung der nach TRBS 1201 Teil 4 vorgeschriebenen, jährlich wiederkehrenden Prüfungen (Haupt- und Zwischenprüfungen abwechselnd) wurde keine Rahmenvereinbarung mit einer ZÜS abgeschlossen. Diese werden vom Betreiber einzeln beauftragt.

Bei der Besichtigung der beiden Aufzüge stand Aufzug B störungsbedingt still (defekter Türantrieb). Die Reparatur wurde bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Auftrag gegeben. Eine Probefahrt konnte deshalb nur mit Aufzug A durchgeführt werden. Die Zeiten für das Schließen und Öffnen der Türen beträgt auf beiden Seiten ca. drei Sekunden. Es ist nicht festzustellen, dass die Türen schneller öffnen als sie schließen. Die bereits oben erwähnte Halteverlustzeit beträgt ca. 16 Sekunden (einschl. definierter Tür-Offen-Zeit von ca. 2 Sekunden).⁹⁴

Der Algorithmus der Gruppensteuerung konnte bei der Besichtigung nicht getestet werden. Bei einer früheren Vorabbesichtigung war jedoch zu beobachten, dass eine nicht (voll) besetzte Kabine mit einem Innenkommando einen anliegenden Abwärtsruf in der Vorbeifahrt (abwärts) nicht bediente. Stattdessen wurde dieser Abwärtsruf dann vom anderen Aufzug, dessen Kabine einige Haltestellen weiter unten stand, bedient. Dieser Ablauf ist nicht unmittelbar nachvollziehbar, da keine weiteren Außenrufe anstanden, deren Wartezeiten zu berücksichtigen gewesen wären.

Die Fahreigenschaften des bei der Besichtigung in Betrieb befindlichen Aufzugs wurden subjektiv als angenehm empfunden. Messungen⁹⁵ zeigten, dass sich die Fahreigenschaften (Fahrdynamik) bei Auf- und Abwärtsfahrt nur unwesentlich unterscheiden. Die Nenngeschwindigkeit beträgt ca. 1 m/s bei einer Beschleuni-

⁹⁴ als durchschnittlich einzustufen (vgl. [33, S. 7–20])

⁹⁵ durchgeführt mit RIDEwatcher™ (Ausführung für dreidimensionale Messungen) der Henning GmbH (vgl. <http://www.henning-gmbh.de/index.php5/de/RIDEwatcher-Messtechnik-fuer-Aufzuege/l-KAT92>, zuletzt geprüft am 09.08.2018)

gung/Verzögerung⁹⁶ mit ca. 0,6 m/s². Die 3D-Vibrationsergebnisse ergaben in beiden Fahrtrichtungen über die gesamte Förderhöhe, dass in allen drei Dimensionen über 95 % aller auftretenden Vibrationen unter 0,15 m/s² liegen (A95-Werte) und somit als gering einzustufen sind. Während sich in Fahrtrichtung kaum spürbare Stöße unter 0,15 m/s² messen lassen (Max. Peak to Peak), treten vom Zugang aus gesehen in seitlicher Richtung (x-Achse) Werte von ca. 0,3 m/s² auf, die als spürbar einzustufen sind. Ursachen hierfür könnten u.a. unsaubere Schienenstöße oder schleifende Türschwerg-Durchfahrten sein.⁹⁷

Bei dem in Betrieb befindlichen Aufzug wurden bei der Besichtigung aus der Steuerung 2.471.570 Fahrten (seit Inbetriebnahme) ausgelesen. Unter der Annahme, dass die Aufzüge überwiegend von montags bis freitags genutzt werden, ergibt dies durchschnittlich täglich ca. 650 Fahrten. Nach DIN EN ISO 25745-2 entspricht dies der Nutzungsintensität 4 (hoch) und ist vergleichbar mit der Nutzungskategorie 4 (stark, häufig) nach VDI 4707 Blatt 1.

Die hohe Frequentierung der beiden Aufzüge lässt über die gesamte Betriebsdauer von 16 Jahren auf höheren Verschleiß im Bereich der Türantriebe, Türkontakte, Verriegelungen, Kabinen- und Gegengewichtsführungen, Seile, Umlenkrollen und Treibscheiben schließen. Starker Seilabrieb im Bereich der Umlenkrollen und der Treibscheibe sowie sehr häufig auftretende und dokumentierte Türstörungen untermauern die obige Annahme.

Hauptkomponenten, wie z.B. Steuerung und Antrieb, wurden bis zum Zeitpunkt der Besichtigung noch nicht erneuert; ebenso die Tragseile wurden bisher noch nicht erneuert. Aus den Betriebsbüchern der beiden Anlagen geht hervor, dass bis zum Zeitpunkt der Besichtigung regelmäßig verschiedenste Verschleißteile, wie z.B.

⁹⁶ als durchschnittlich einzustufen (vgl. [33, S. 3–7])

⁹⁷ vgl. <http://www.henning-gmbh.de/index.php5/de/RIDEwatcher-ab-sofort-mit-3D-Faehigkeiten/c-PROMOTION/a-P000497> (zuletzt geprüft am 09.08.2018)

Türantriebe, Führungsrollen, Umlenkrollen sowie die Schachtkopierung wegen Ausfall ausgetauscht wurden. Zu diesen Leistungen, die nicht im Rahmen des Wartungsvertrages erbracht wurden, liegen teilweise die Rechnungen des Wartungsunternehmens vor. Wesentliche, bis zum Zeitpunkt der Besichtigung durchgeführte Maßnahmen werden im Folgenden aufgeführt:

Aufzug A:

- Führungsrollen Gegengewicht erneuert (mehrmals, da offensichtlich nicht sofort den kompletten Satz getauscht),
- Rollen am linken Schwert der Kabinentür erneuert (Seite UG),
- abgebrochenen Kabinentürkontakt erneuert,
- Türverriegelung Fahrkorb erneuert,
- Führungsrollen einer Schachttür erneuert,
- Kabinentürführungen unten gerichtet,
- Türmotor erneuert (Seite UG),
- Türstörung im Notdiensteinsatz behoben,
- Kopierung neu eingestellt und wenige Monate später komplett erneuert,
- Störung Türverriegelung Schachttür EG behoben,
- Störung Türverriegelung Schachttür 1. OG behoben.

Aufzug B:

- Türmotor erneuert (Seite UG),
- Zahnriemen Türantrieb gespannt und gepflegt (Seite EG),
- Spaltmaße der Fahrkorbtüren eingestellt,
- Kurve der Fahrkorbtürverriegelung defekt,
- Rollen einer Fahrkorbtür erneuert,
- Riegel Schachttür linker Türflügel im 2. OG schwergängig,
- Türmotor erneuert (vermutlich Seite EG),
- vier Rollen am Gegengewicht erneuert,

- Kabinentürkontakt unterbrochen (Notdienst),
- defekte Rollen an Schachttüren festgestellt,
- Türmotor erneuert (Seite EG),
- Umlenkrollen am Gegengewicht und im Schachtkopf über Gegengewicht erneuert (schlagende Geräusche),
- Zahnriemen Türantrieb erneuert (Seite EG),
- Türsteuergerät erneuert (vermutlich Seite EG),
- in der Gruppensteuerung (GST) Einstellung „Max. Last“ von 0 auf 50 geändert (Menü „Verkehrskonfig“) mit dem Hinweis, dass „Rufe jetzt alle abgesammelt werden“,
- Türkontakt Fahrkorbtür eingestellt (Seite EG)

Die oben festgehaltenen Aufzeichnungen zeigen deutlich, dass ein Großteil der aufgetretenen Stillstände auf Türstörungen zurückzuführen ist. Zahlreiche Einträge im Fehlerspeicher von Aufzug A, wie z.B. „offener Türkontakt während der Fahrt“, „Tür schließen Fehler“ oder „Riegelwartezeit reicht nicht aus“ korrespondieren mit den oben festgehaltenen Aufzeichnungen. Eine exakte Zuordnung der Einträge im Fehlerspeicher war jedoch nicht möglich, da die Systemuhr der Steuerung nicht korrekt eingestellt war.

9.1.1.2 Anwendung der Fuzzy-Logic für Steuerung und Regelung (Fuzzymodul)

Schritt 1: grafische Fuzzifikation nach den unten zitierten Abbildungen (Zugehörigkeitsfunktionen) aus Abschnitt 6.1.2.2:

Nach obigen Angaben ist das Baujahr der Steuerung 2001, d.h. beim Betrachtungszeitpunkt 2017 ist ein Alter von 16 Jahren festzustellen. Nach Abbildung 6.2 ergibt sich eine Zugehörigkeit von 100 % zu der Eigenschaft „schon lange in Betrieb“, und nach Abbildung 6.3 kann eine Zugehörigkeit von 100 % zur Kategorie „Frequenzregelung“ festgestellt werden. Laut Betreiber werden maximal 4 Störungen pro Jahr toleriert, weshalb nach Abbildung

6.4 der Verfügbarkeitsanspruch zu 50 % als „hoch“ und zu 50 % als „mittel“ eingestuft werden kann. Die Anzahl tatsächlich aufgetretener Störungen liegt jedoch bei durchschnittlich 3 pro Monat, d.h. 36 Störungen pro Jahr, weshalb nach Abbildung 6.5 eine Zugehörigkeit von 50 % zu „mittlerer Störungshäufigkeit“ und von 50 % zu „hoher Störungshäufigkeit“ festzustellen ist. Ca. 650 Fahrten pro Tag entsprechen nach Abbildung 6.6 zu 50 % „mittlerer“ und zu 50 % „hoher“ Nutzung des Aufzugs. Die durchschnittliche Temperatur im Maschinenraum im Sommer und im Winter lag bei wiederholten Begehungen zwischen 10 °C und 20 °C. Nach Abbildung 6.8 ergibt sich mit einer Durchschnittstemperatur von 15 °C zu 100 % eine „ideale“ Temperatur. Die offene Schachtkonstruktion und damit eine vollständige Durchlüftung des Schachtes stellen sicher, dass der o.g. Temperaturbereich auch im Schacht nicht wesentlich überschritten wird. Für die Steuerung ist mit einer Ersatzteilverfügbarkeit nach Angaben des Herstellers von maximal 5 Jahren zu rechnen, weshalb diese Situation nach Abbildung 6.9 jeweils zu 50 % als „unsicher“ und „planbar“ einzustufen ist. Für den Frequenzregler sind keine Ersatzteile mehr verfügbar, weshalb sich nach Abbildung 6.10 eindeutig die Situation „unsicher“ ergibt.

Schritt 2: Verknüpfung der Zugehörigkeitsfaktoren auf Basis der entwickelten Regeln

Mit Hilfe eines Excel™-Kalkulationsblatts (Fuzzymodul in Anhang C) auf Basis der entwickelten Regeln in Anhang B und der Fuzzifikation aus Schritt 1 (vgl. Tabelle 59) werden 50 % für die Strategie „nur Regelung erneuern“ sowie 50 % für die Strategie „Steuerung mit Regelung erneuern“ ermittelt.

Tabelle 59: Zusammenfassung der Fuzzifikation aus Schritt 1

Kriterium	Zugehörigkeit
Alter	100 % „schon lange in Betrieb“
Art der Regelung	Frequenzregelung
Verfügbarkeitsanspruch	50 % „hoch“, 50 % „mittel“
Störungshäufigkeit	50 % „mittel“, 50 % „hoch“
Anzahl der Fahrten pro Tag	50 % „mittel“, 50 % „hoch“
Umgebungsbedingungen Staub	nicht ausgewertet
Umgebungsbedingungen Temperatur	nicht ausgewertet
Ersatzteilverfügbarkeit Steuerung	50 % „unsicher“, 50 % „planbar“
Ersatzteilverfügbarkeit Regelung	100 % „unsicher“

9.1.1.3 Bestimmung des Ersatzzeitpunktes einteiliger Komponenten (VS- und LD-Modul)

Der Verschleißgradansatz und der Einfluss der Wartungsqualität als Faktor (vgl. Abschnitt 6.1.3.1) wird im Folgenden an der Antriebsmaschine, der Treibscheibe, den Umlenkrollen, den Tragseilen und der Türantriebe, die in der vorliegenden Arbeit jeweils als einteilige Komponenten behandelt werden, angewandt.

Der Abnutzungsvorrat N nach Gleichung 6.9 wird bei einer angenommenen maximalen Auslastung des Antriebs von 180 Fahrten pro Stunde⁹⁸ in 25 Jahren und einer täglichen Betriebszeit von acht Stunden bei 20 Tagen im Monat auf 8.640.000 Fahrten festgelegt. Eine festgestellte durchschnittliche Wartung führt zum Faktor $f = 1$. Ca. 650 Fahrten pro Tag (an Werktagen) innerhalb eines Betrachtungszeitraumes von 50 Jahren ergeben nach Gleichung 9.1 eine Austauschhäufigkeit A_i von 0,9, d.h. der Antrieb ist innerhalb des Betrachtungszeitraums noch nicht zu ersetzen.

⁹⁸ Herstellerangaben

$$A_i = 0,9 = \frac{156.000 \times 50}{8.640.000 \times 1}$$

9.1

Für die Treibscheibe, die als separates einteiliges Bauteil des Antriebes betrachtet wird, ergibt sich nach Gleichung 9.2 ein anderes Bild. Bei der gleichen angenommenen maximalen Auslastung und einer Lebensdauer von sieben Jahren ergibt sich ein Abnutzungsvorrat von 2.419.200 Fahrten. Bei einer durchschnittlichen Wartung mit $f = 1$ ergibt sich innerhalb des Betrachtungszeitraums eine Austauschhäufigkeit A_i von 3,2, d.h. die Treibscheibe ist drei Mal zu tauschen.

$$A_i = 3,2 = \frac{156.000 \times 50}{2.419.200 \times 1}$$

9.2

Für die Umlenkrollen wird die doppelte Lebensdauer der Treibscheibe angenommen, d.h. nach Gleichung 9.3 gilt bei gleichem Wartungsfaktor wie oben eine Austauschhäufigkeit A_i von 1,6 innerhalb des Betrachtungszeitraums, d.h. die Umlenkrollen sind ein Mal zu tauschen.

$$A_i = 1,6 = \frac{156.000 \times 50}{4.838.400 \times 1}$$

9.3

Die Tragseile sind nach Gleichung 9.4 drei Mal zu tauschen, d.h. immer in Verbindung mit dem Tausch der Treibscheibe⁹⁹.

⁹⁹ Ein Tausch der Treibscheibe ohne Tausch der Tragseile (und umgekehrt) führt i.d.R. zu erhöhtem Verschleiß von Treibscheibe bzw. Tragseilen (vgl. [80, S. 64]) und sollte deshalb vermieden werden.

$$A_i = 3,2 = \frac{156.000 \times 50}{2.419.200 \times 1}$$

9.4

Die Notwendigkeit des Austauschs der Türantriebe wird durch die Anzahl der Türspiele (zwei pro Fahrt bestimmt). Somit gilt nach Gleichung 9.5 und einer angenommenen zehnjährigen Lebensdauer mit den gleichen Randbedingungen wie oben, dass ein zweimaliger Tausch innerhalb des Betrachtungszeitraums notwendig sein wird.

$$A_i = 2,3 = \frac{2 \times 156.000 \times 50}{6.912.000 \times 1}$$

9.5

9.1.1.4 Zusammenfassung der möglichen Instandhaltungsstrategien

Aus den in den beiden vorigen Abschnitten hergeleiteten bzw. berechneten Strategien ergibt sich nun zum Betrachtungszeitpunkt im Jahr 2017 konkret:

- Austausch der Regelung unter Beibehaltung der vorhandenen Steuerung (Variante 1),
- Austausch von Steuerung und Regelung (Variante 2) einschl. Kopierung und gesamter Elektrik,
- Nachrüstung von SUBF (UCM) einschl. Erneuerung der Betriebsbremsen am Antrieb zur Erlangung der dazu notwendigen Baumusterprüfbescheinigung¹⁰⁰,
- Erneuerung der Tragseile,
- Erneuerung der Treibscheibe,
- Erneuerung aller Umlenkrollen,

¹⁰⁰ Für die vorhandenen Betriebsbremsen liegt nach Aussage des Herstellers keine entsprechende Baumusterprüfbescheinigung vor.

- Erneuerung der Kabinen- und Gegengewichtsführungen.

Bei den oben genannten Maßnahmen handelt es sich teilweise um Änderungen nach TRBS 1121, und sie müssen deshalb vor Inbetriebnahme durch eine ZÜS abgenommen werden (Änderungsprüfung). Die Änderungen müssen dem Stand der Technik (nach DIN EN 81-20 und -50) entsprechen, und die Einbindung in das Sicherheitskonzept des Gebäudes, z.B. Brandfallsteuerung und unabhängige Stromversorgung (USV), ist zu prüfen und ggf. an die aktuellen gesetzlichen Anforderungen anzupassen. Eine darüber hinausgehende Qualitätskontrolle¹⁰¹ bei der Endabnahme durch den Betreiber oder eine von ihm beauftragte fachkundige Person wird vom Autor empfohlen.

Bei der Auswahl der Komponenten, insbesondere von Steuerung und Regelung, ist darauf zu achten, dass auch die energetischen Eigenschaften dem Stand der Technik entsprechen (u.a. Standby-Optimierung und ggf. Energierückspeisung). Für die modernisierten Aufzüge sind vom Hersteller bzw. der Aufzugsfirma mindestens Energieeffizienzklasse B nach VDI 4707 Blatt 1 zu attestieren. Als Alternative zur Referenzfahrt und Messungen vor Ort kann der Energiebedarf der Komponenten auch mittels Herstellerangaben nach VDI 4707 Blatt 2 ermittelt werden (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Bestandteil der Modernisierung ist in jedem Falle auch eine Betriebsoptimierung¹⁰², um den Aufzug an die Anforderungen des Gebäudes bestmöglich anzupassen und die Förderleistung zu verbessern:

- vollständige Überholung der Türen,

¹⁰¹ u.a. umfassende Begehung, Vorführung aller Funktionen, Prüfung der Dokumentation, Messung der Fahreigenschaften

¹⁰² Eine Betriebsoptimierung ist auch ohne Modernisierung möglich, um kurzfristig störungsbedingte Stillstände zu reduzieren. Aufgrund der Ergebnisse in den Abschnitten 9.1.1.2 und 9.1.1.3 wird diese Maßnahme bei den betrachteten Aufzügen jedoch nicht ohne Modernisierung durchgeführt.

- Anpassung der Einstellungen der Gruppensteuerung.

Die vollständige Überholung der Türmechanik ist an allen Kabinen- und Schachttüren durchzuführen. Sie umfasst mindestens:

- den Tausch aller Laufrollen, an denen Verschleiß erkennbar ist,
- den Tausch aller Türkontakte, an denen Verschleiß erkennbar ist,
- den Tausch von Riegeln, an denen Verschleiß erkennbar ist,
- den Tausch der Zahnriemen,
- vollständige Reinigung aller mechanischen Bauteile,
- Prüfung der Justage aller mechanischen Bauteile und der Türblätter, Neujustage bei erkennbaren Abweichungen (wichtigster Punkt),
- optional: Umbau aller vier Türantriebe auf bürstenlose Gleichstrommotoren oder Asynchronmotoren mit Frequenzumrichter.

Darüber hinausgehend sind die Fahrkurven in den Türsteuergeräten sowie die Türzeiten den Erfordernissen anzupassen. Einfahren mit öffnender Tür ist wieder zu aktivieren.

Die Anpassung der Einstellungen der Gruppensteuerung zur Verbesserung der Rufabwicklung ist mit Unterstützung des Steuerungsherstellers vorzunehmen. Vorhandene Lastmesseinrichtungen an den Kabinen sind vorher zu prüfen und ggf. zu kalibrieren.

Für die in diesem Abschnitt beschriebenen Maßnahmen wird ein Arbeitsaufwand von ca. drei Wochen pro Aufzug geschätzt. Die Arbeiten sind abwechselnd nur an einem Aufzug durchzuführen, um den anderen Aufzug in Betrieb zu halten.

9.1.1.5 Ermittlung der Instandhaltungskosten (Instandhaltungskostenmodul)

Insgesamt sind für die o.g. Maßnahmen Kosten in Höhe von ca. € 20.000 (Variante 1) unter Beibehaltung der vorhandenen Steuerung bzw. in Höhe von ca. € 50.000 (Variante 2) bei Erneuerung der Steuerung mit Regelung zu erwarten (netto). Darin enthalten sind auch jeweils die Kosten für die Nachrüstung der Schutzeinrichtung gegen unbeabsichtigte Bewegung des Fahrkorbs (SUBF) und die Betriebsoptimierung. Kosten für weitere Komponenten (Treibscheibe, Seile, Umlenkrollen) fallen in Höhe von ca. € 10.000 an. Für die Erneuerung der Türantriebe werden zusätzlich Kosten in Höhe von ca. € 2.500 (netto) pro Stück veranschlagt (zwei davon erforderlich). Alle Angaben basieren auf konkreten Herstellerangeboten (Stand 2017). Ein bestehender Wartungsvertrag wird zu folgenden, jährlichen Kosten fortgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.2.3):

- Grundpreis vier Wartungen: € 800,00,
- Beseitigung kleiner Störungen: € 570,00,
- Miete Notrufgerät: € 480,00,
- Aufschaltung Notrufgerät auf Leitstelle: € 40,00,
- Telefongebühren: € 180,00.

9.1.1.6 Ermittlung der Energiekosten im Betrieb (Energiekostenmodul)

Nach Abschnitt 3.6 kann von einem jährlichen Energiebedarf in Höhe von 5.995 kWh ausgegangen werden (Nutzungskategorie 4 nach VDI 4707 Blatt 1). Bei einem angenommenen¹⁰³ durchschnittlichen Preis pro Kilowattstunde (Leistungspreis + anteiliger Grundpreis) in Höhe von 0,20 € sind jährliche Energiekosten in Höhe von 1.199 € zu erwarten.

¹⁰³ vgl. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_211.pdf
(zuletzt geprüft am 13.08.2018)

9.1.1.7 Berechnung der Annuitäten (LCC-Modul)

Nach VDI 2067 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 7.1.1) sind im nächsten Schritt auf Basis der zuvor ermittelten Kostendaten die jährlichen bedarfs-, betriebs- und kapitalgebundenen Kosten zu unterscheiden. Für die folgenden Berechnungen werden eine jährliche, allgemeine Preissteigerung von 2,0 % (r) sowie ein Kalkulationszinssatz von 5,5 % (q) angenommen.¹⁰⁴ Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (T) (oder unter bestimmten Annahmen, siehe unten, angepasst als T^*) ergibt sich der Annuitätsfaktor nach Gleichung 9.6. Der Einstiegszeitpunkt des Anwenders, zu dem die Anlage in diesem Anwendungsbeispiel bereits 15 Jahre in Betrieb ist, reduziert¹⁰⁵ den ökonomischen Betrachtungszeitraum um 15 Jahre auf 35 Jahre (vgl. Abschnitt 5.1.1), im Folgenden bezeichnet als T^* .

$$a = 0,065 = \frac{q^{T^*} \times (q - 1)}{q^{T^*} - 1}$$

9.6

Die Barwerte der Ersatzinvestitionen nach n Jahren (vgl. Tabelle 60) ergeben sich nach Gleichung 9.7. Diese sind bezogen auf T^* , d.h. A_0 findet nicht zum Zeitpunkt $t = 0$, sondern zum Einstiegs- bzw. Betrachtungszeitpunkt statt.

$$A_n = A_0 \frac{r^n}{q^n}$$

9.7

¹⁰⁴ http://www.nawoh.de/uploads/pdf/auslegungen/8_Lebenszykluskosten.pdf (zuletzt geprüft am 13.08.2018)

¹⁰⁵ Betrachtet werden hier nur die Zahlungen, die der Anwender des Planungshilfsmittels ausgehend von seinem individuellen Betrachtungszeitpunkt (Einstiegszeitpunkt) bis zum Ende des Betrachtungszeitraums leisten muss. Die zuvor geleisteten Zahlungen sind nicht bekannt.

Für die Berechnung der Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (vgl. Tabelle 61) wird der dynamische Barwertfaktor nach Gleichung 9.8 ermittelt.

$$b = 19,799 = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^{T^*}}{q - r}$$

9.8

Tabelle 60: Barwerte der kapitalgebundenen Kosten (Ersatzinvestitionen) ohne Berücksichtigung des Restwertes nach VDI 2067 Blatt 1

Zeitpunkt	Maßnahme	Variante 1 [€]	Variante 2 [€]
erster Ersatzzeitpunkt nach 15 Jahren Betriebszeit (A ₀)	Regelung	20.000	0
	Steuerung & Regelung	0	50.000
	weitere Komponenten	10.000	10.000
	Türantriebe	5.000	5.000
zweiter Ersatzzeit- punkt nach 30 Jahren Betriebszeit (A ₁₅)	Regelung	0	12.057
	Steuerung & Rege- lung ¹⁰⁶	30.143	0
	weitere Komponen- ten ¹⁰⁷	3.617	3.617
	Türantriebe	0	0
dritter Ersatzzeitpunkt nach 45 Jahren Betriebszeit (A ₃₀)	Regelung	7.269	0
	Steuerung & Regelung	0	18.172
	weitere Komponenten	3.634	3.634
	Türantriebe	1.817	1.817
vierter Ersatzzeit- punkt nach 50 Jahren Betriebszeit (A ₃₅)	Regelung	0	0
	Steuerung & Regelung	0	0
	weitere Komponenten	0	0
	Türantriebe	0	0
Summe		81.480	104.298

¹⁰⁶ spätestens nach jeweils weiteren 15 Jahren erneute Anwendung des Fuzzy-Moduls notwendig, um veränderte Randbedingungen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 8.1.2)

¹⁰⁷ bei diesem Ersatzzeitpunkt (A₁₅) aufgrund der ermittelten Austauschhäufigkeiten ohne Erneuerung der Umlenkrollen

Tabelle 61: Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten
(Energie, Wartung, Notruf) VDI 2067 Blatt 1

regelmäßige Kosten	[€]
bedarfsgebunden	23.739
betriebsgebunden	40.984
Summe	64.723

Die gesamte Annuität für Variante 1 ergibt sich schließlich nach Gleichung 9.9:

$$(81.480 \text{ €} + 64.723 \text{ €}) \times a = 146.203 \text{ €} \times 0,065 = 9.503 \text{ €}$$

9.9

Für Variante 2 ergibt sich die gesamte Annuität nach Gleichung 9.10:

$$(104.298 \text{ €} + 64.723 \text{ €}) \times a = 169.021 \text{ €} \times 0,065 = 10.986 \text{ €}$$

9.10

Aus rein ökonomischer Sicht wäre demzufolge Variante 1 (nur Erneuerung der Regelung ohne Erneuerung der Steuerung beim ersten Ersatzzeitpunkt) zu bevorzugen. Im folgenden Abschnitt werden zur finalen Entscheidung darüber hinausgehende Merkmale in die Entscheidungsfindung eingebunden.

9.1.1.8 Finale Entscheidungsempfehlung (Bewertungsmodul)

Die einzelnen Bewertungen erfolgen gemäß den Einstufungen 1 bis 3 nach Abschnitt 8.1.5 (3 bedeutet bestmöglich) und werden schließlich in Tabelle 62 zusammengefasst. Für beide Varianten wurde vom Hersteller Energieeffizienzklasse B attestiert (jeweils Einstufung 3). Der getriebelose Antrieb sowie die Rollenführungen der Kabine und des Gegengewichtes machen jegliche Schmiermittel bei beiden Varianten unnötig (jeweils Einstufung 3). Bei Variante 1 wird auf die Erneuerung der Steuerung verzichtet, weshalb hier eine höhere Ressourceneffizienz (Einstufung 3) als bei Variante 2 (Einstufung 2) festzustellen ist. Die Annuität von Variante 1 ist nach den Ergebnissen in Abschnitt 9.1.1.7 geringer als bei Variante 2 und wird deshalb mit Einstufung 2 besser bewertet als Variante 2 mit Einstufung 1. Durch die Wiederherstellung einer guten Verfügbarkeit (bisher äußerst unzureichend durch sehr viele Störungen und darauf folgend erheblichen Beschwerden der Mieter und Nutzer) wird durch beide Varianten eine bessere Vermiet- und Vermarktbarkeit erzielt (jeweils Einstufung 3). Bei beiden Varianten wird die Sicherheit an den Stand der Technik angepasst, wobei Variante 1 (Einstufung 2) nicht alle niedrigen Risiken nach LSV beseitigt (gegenüber Variante 2 mit Einstufung 3). Hinsichtlich Barrierefreiheit entspricht der Aufzug bei beiden Varianten dem Typ 2 nach DIN EN 81-70 (jeweils Einstufung 2). Das Risiko möglicher Störungen ist bei Variante 1 (Erhalt der vorhandenen Steuerung) etwas größer (Einstufung 2) als bei Variante 2 (Einstufung 3). Die Wartungsfreundlichkeit ist bei beiden Varianten durch den Einsatz am Markt frei zugänglicher Produkte bestmöglich gegeben (jeweils Einstufung 3), und die Fahrqualität wurde nach Abnahme gemessen und als sehr gut eingestuft. Die Ansteuerung des Reglers ist jedoch in Verbindung mit der alten Steuerung (Variante 1) nicht mit Schnellstart¹⁰⁸

¹⁰⁸ Diese Funktion ermöglicht das verzögerungsfreie Losfahren nach dem Schließen der Türen (vgl. http://de.canopen-lift.org/wiki/Drive_Unit, zuletzt geprüft am 13.08.2018).

realisierbar, weshalb eine geringe Startverzögerung auftritt und Variante 1 mit Einstufung 2 schlechter bewertet wird als Variante 2 mit Einstufung 3. Die Stillstandszeiten für Modernisierungen fallen bei Variante 1 durch den kleineren Umfang innerhalb von fünf Jahren geringer aus (Einstufung 2) als bei Variante 2 (Einstufung 1). Durchzuführende Wartungen werden im Rahmen des abgeschlossenen Wartungsvertrages während der Geschäftszeiten nach vorheriger Absprache mit dem Betreiber durchgeführt (Einstufung 2), wohingegen bei Variante 1 eine etwas höhere Anzahl zu erwartender Störungen Eingriffe ohne vorherige Absprache mit dem Betreiber notwendig macht (Einstufung 1). Es erfolgt bei beiden Varianten eine Information der Nutzer durch Aushang an der Anlage (jeweils Einstufung 2).

Zusammenfassend ist für die betrachtete Aufzugsanlage anhand der in den vorigen Abschnitten durchgeführten Schritte festzustellen: Aus der Fuzzy-Methode geht hervor, dass zum Betrachtungszeitpunkt die Erneuerung der Regelung ohne Erneuerung der Steuerung (Variante 1) aus rein technischer Sicht der Variante 2 (Erneuerung von Steuerung und Regelung) gleichgestellt wird. Die rein ökonomische Betrachtung spricht aufgrund der niedrigeren LCC über den gesamten Betrachtungszeitraum für Variante 1. Werden schließlich im Bewertungsmodul weitere Aspekte (ökologische, funktionale, gesellschaftliche und prozessorientierte) mit einbezogen, kann hingegen dem Betreiber aufgrund des Gesamtergebnisses in Tabelle 62 zum Betrachtungszeitpunkt die Realisierung von Variante 2 empfohlen werden.

Tabelle 62: Gewichtete Bewertung der beiden Varianten

Kriterium	Gewichtung [%]	Variante 1		Variante 2	
		Bewertung (1-3)	Ergebnis	Bewertung (1-3)	Ergebnis
ökologisch	25				
Energieverbrauch im Betrieb	10	3	30	3	30
Vermeidung von Schmiermitteln	5	3	15	3	15
Vermeidung des Austauschs von Komponenten	10	3	30	2	20
ökonomisch	25				
LCC	12,5	2	25	1	12,5
Unterstützung der Vermiet- und Vermarktbarkeit	12,5	3	37,5	3	37,5
sozial	25				
Sicherheit	15	2	30	3	45
Barrierefreiheit	5	2	10	2	10
Verfügbarkeit	5	2	10	3	15
technische Qualität	12,5				
Wartungsfreundlichkeit	6,25	3	18,75	3	18,75
Fahrkomfort	6,25	2	12,5	3	18,75
Prozessqualität	12,5				
Stillstandszeiten durch Modernisierung	5	2	10	1	5
Stillstandszeiten durch Wartung	5	1	5	2	10
Information der Nutzer	2,5	2	5	2	5
	100		238,75		242,5

9.1.2 Einzelaufzug im gemischt genutzten Gebäude (Wohnungen und Büros)

Die folgenden Abschnitte orientieren sich wieder an der beschriebenen Reihenfolge und Vorgehensweise des vorangehenden Kapitels.

9.1.2.1 Beschreibung der Anlage und der Nutzungsrandbedingungen (Erfassungsmodul)

Betrachtungsgegenstand ist ein einzelner Personenaufzug mit sieben Haltestellen, einer Tragkraft von 300 kg (4 Personen) in einem Gebäude mit gemischter Nutzung. Vom UG bis zum 2. OG überwiegt gewerbliche Nutzung (interner Personenverkehr Handel, externer Personenverkehr Büro und Praxen), vom 3. OG bis zum 5. OG überwiegt private Nutzung (Wohnraum). Die Wohnung im 6. OG wird vom Aufzug nicht angefahren, da sich auf diesem Stockwerk der oben liegende Maschinenraum befindet, um einen zusätzlichen Dachaufbau zu vermeiden. Im Durchschnitt absolviert dieser Aufzug ca. 120 Fahrten am Tag, was der Nutzungskategorie 2 nach VDI 4707 Blatt 1 entspricht.

Die 1959 errichtete Anlage wurde bis zum heutigen Betrachtungszeitpunkt schrittweise in den im Folgenden aufgeführten Jahren modernisiert (siehe auch technische Daten in Tabelle 63):

- 1970: Nachrüstung einer automatischen Kabinentür (Falttür),
- 1974: Erneuerung der Führungsschienen des Gegengewichtes,
- 1980: Einbau von Türverriegelungen mit Fehlschließsicherung¹⁰⁹,

¹⁰⁹ Der Sicherheitskreis wird nur dann geschlossen, wenn das Sperrmittel (z.B. der Riegelbolzen bei Drehtüren) tatsächlich mechanisch (in den Türflügel) eingreift (allgemein: zwangsläufiges Mittel zur Prüfung der Stellung des Sperrmittels, vgl. [72, S. 61]).

- 1987: Einbau einer neuen Mikroprozessorsteuerung mit Phasenanschnittsregelung (bisher Relaissteuerung mit polumschaltbarem Antrieb),
- 1992: Erneuerung der Kabinenverkleidung und -beleuchtung sowie Erneuerung der Kabinentür (Teleskopschiebetür),
- 1996: Erneuerung der Antriebsmaschine, der Tragseile sowie der Ableitrolle,
- 2000: Einbau eines Fernnotrufs, Erneuerung der Kabinenbeleuchtung, Einbau eines Spiegels, Einbau eines Handlaufs,
- 2003: Einbau eines geregelten Türantriebes,
- 2009: Grubensteuerstelle und Alarmtaster am Fahrkorb außen nachgerüstet,
- 2016: Erneuerung des geregelten Türantriebes,
- 2017: Nachrüstung von Aufsetzpuffern für Kabine und Gegengewicht.

Vom Hersteller wird die Wartung regelmäßig durchgeführt. Es besteht ein Wartungsvertrag mit drei Wartungen pro Jahr. Darin enthalten sind alle Schmiermittel. Sämtliche erforderliche Reparaturen und eventuelle Personenbefreiungen erfolgen auf Nachweis. Zurückblickend¹¹⁰ auf mindestens zehn vergangene Jahre läuft die Anlage im Durchschnitt mit weniger als einer Störung pro Jahr ohne notwendige Personenbefreiungen.

¹¹⁰ nach Aussage des Betreibers und Auswertung der Anlagendokumentation

Tabelle 63: Technische Daten des betrachteten Aufzugs
(Quelle: eigene Erhebung vor Ort)

Hersteller	Konzern
Fabrik-Nr.	dem Autor bekannt (aus Datenschutzgründen hier nicht angegeben)
Baujahr	1959
Anzahl Haltestellen	7 (U, E, 1, 2, 3, 4, 5)
Förderhöhe	20,02 m
Tragfähigkeit	300 kg oder 4 Personen
Schachtkopfhöhe	3.350 mm
Schachtgrubentiefe	1.300 mm
Aufhängung	1:1
Anzahl Umlenkrollen	1
Umlenkrollen Kabine	0
Umlenkrolle Gegengewicht	0
Umlenkrollen Schachtkopf	0
Tragseile	4 x 8 mm
Lage des Maschinenraums	oben
Geschwindigkeitsbegrenzer	Konzern
Fangvorrichtung Kabine	Gleitfangvorrichtung Konzern
Kabinenbreite	980 mm
Kabinentiefe	980 mm
Kabinenhöhe	2.100 mm
Kabinentüren	1 Stück dreiteilige Teleskopschiebetür (1992)
Schachttüren	7 Stück Drehtüren
Türbreite	700 mm
Türhöhe	1.990 mm
Führungen Kabine	Gleitführungen
Schienen Kabine	70/70/16
Stichmaß Kabine	1.045
Führungen Gegengewicht	Gleitführungen
Schienen Gegengewicht	50/50/9
Stichmaß Gegengewicht	850 mm
Antrieb	Konzern W 149 B (mit Getriebe), links (1996)
Steuerung	Konzern, Mikroprozessor (1987)
Kopierung	Impulskopierung mit Drehgeber
Regelung	Spannungsregler (1987)

9.1.2.2 Anwendung der Fuzzy-Logic für Steuerung und Regelung (Fuzzymodul)

Schritt 1: grafische Fuzzifikation nach den unten zitierten Abbildungen (Zugehörigkeitsfunktionen) in Abschnitt 6.1.2.2

Nach obigen Angaben ist das Baujahr der Steuerung 1987, d.h. zum Betrachtungszeitpunkt 2017 ist ein Alter von 30 Jahren festzustellen. Es ergibt sich nach Abbildung 6.2 eine Zugehörigkeit von 100 % zu der Eigenschaft „alt“. Nach Abbildung 6.3 kann eine Zugehörigkeit von 100 % zur Kategorie „Spannungsregelung“ festgestellt werden. Laut Betreiber werden maximal vier Störungen pro Jahr toleriert, weshalb nach Abbildung 6.4 der Verfügbarkeitsanspruch zu 50 % als „hoch“ und zu 50 % als „mittel“ eingestuft wird. Die Anzahl tatsächlich aufgetretener Störungen liegt jedoch rechnerisch aus den vergangenen Jahren ermittelt bei weniger als einer Störung pro Jahr, weshalb nach Abbildung 6.5 eine Zugehörigkeit von 100 % zu „niedriger Störungshäufigkeit“ festzustellen ist. Ca. 120 Fahrten pro Tag entsprechen nach Abbildung 6.6 zu 100 % „niedriger“ Nutzung des Aufzugs. Die durchschnittliche Temperatur im Maschinenraum im Sommer und im Winter lag bei wiederholten Begehungen zwischen 10 °C und 30 °C. Nach Abbildung 6.8 ergibt sich mit einem Durchschnitt von 20 °C gerade noch zu 100 % eine „ideale“ Temperatur. Für die Steuerung ist mit einer Ersatzteilverfügbarkeit nach Angaben des Herstellers von maximal 5 Jahren zu rechnen, weshalb diese Situation nach Abbildung 6.9 jeweils zu 50 % als „unsicher“ und „planbar“ einzustufen ist. Für den Spannungsregler sind keine Ersatzteile mehr verfügbar, weshalb sich nach Abbildung 6.10 eindeutig die Situation „unsicher“ ergibt.

Schritt 2: Verknüpfung der Zugehörigkeitsfaktoren auf Basis der entwickelten Regeln

Mit Hilfe eines Excel™-Kalkulationsblattes (Fuzzy-Modul in Anhang C) auf Basis der Regeln in Anhang B und der Ergebnisse aus Schritt 1 (Tabelle 64) werden 50 % für die Strategie „nur Regelung erneuern“ sowie 50 % für die Strategie „reparieren“ ermittelt.

Tabelle 64: Zusammenfassung der Fuzzifikation aus Schritt 1

Kriterium	Zugehörigkeit
Alter	100 % „alt“
Art der Regelung	Spannungsregelung
Verfügbarkeitsanspruch	50 % „hoch“, 50 % „mittel“
Störungshäufigkeit	100 % „niedrig“
Anzahl der Fahrten pro Tag	100 % „niedrig“
Umgebungsbedingungen Staub	nicht ausgewertet
Umgebungsbedingungen Temperatur	nicht ausgewertet
Ersatzteilverfügbarkeit Steuerung	50 % „unsicher“, 50 % „planbar“
Ersatzteilverfügbarkeit Regelung	100 % „unsicher“

9.1.2.3 Bestimmung des Ersatzzeitpunktes einteiliger Komponenten (VS- und LD-Modul)

Der Verschleißgradansatz und der Einfluss der Wartungsqualität (vgl. Abschnitt 6.1.3.1) wird im Folgenden nochmals am Beispiel der Antriebsmaschine, der Treibscheibe, der Umlenkrolle, den Tragseilen und des Kabinentürantriebs, die in der vorliegenden Arbeit jeweils als einteilige Komponenten behandelt werden, angewandt.

Der Abnutzungsvorrat N nach Gleichung 6.9 wird bei einer angenommenen maximalen Auslastung des Antriebs von 180 Fahrten

pro Stunde¹¹¹ in 25 Jahren und einer täglichen Betriebszeit von acht Stunden bei 20 Tagen im Monat auf 8.640.000 Fahrten festgelegt. Eine festgestellte überdurchschnittliche Wartungsqualität führt zum Faktor $f = 1,1$. Bei ca. 120 Fahrten pro Werktag und ca. 50 Fahrten pro Samstag bzw. an Sonn- und Feiertagen innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ergeben nach Gleichung 9.11 eine Austauschhäufigkeit von 0,2, d.h. der Antrieb ist innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht zu ersetzen.

$$A_i = 0,2 = \frac{33.600 \times 50}{8.640.000 \times 1,1}$$

9.11

Für die Treibscheibe, die als separates einteiliges Bauteil des Antriebes betrachtet wird, ergibt sich nach Gleichung 9.12 ein anderes Bild. Bei der gleichen angenommenen maximalen Auslastung und einer Lebensdauer von sieben Jahren ergibt sich ein Abnutzungsvorrat von 2.419.200 Fahrten. Bei einer überdurchschnittlichen Wartungsqualität mit $f = 1,1$ ergibt sich innerhalb des Betrachtungszeitraums eine Austauschhäufigkeit von 0,6, d.h. die Treibscheibe ist nicht zu tauschen.

$$A_i = 0,6 = \frac{33.600 \times 50}{2.419.200 \times 1,1}$$

9.12

Für die Umlenkrolle wird die doppelte Lebensdauer der Treibscheibe angenommen, d.h. nach Gleichung 9.13 gilt bei gleichem Wartungsfaktor wie oben eine Austauschhäufigkeit von 0,3 innerhalb des Betrachtungszeitraums, d.h. die Umlenkrolle ist nicht zu tauschen.

¹¹¹ Herstellerangaben

$$A_i = 0,3 = \frac{33.600 \times 50}{4.838.400 \times 1,1}$$

9.13

Die Tragseile sind nach Gleichung 9.14 nicht zu tauschen, d.h. vergleichbar zu dem nicht notwendigen Tausch der Treibscheibe.

$$A_i = 0,6 = \frac{33.600 \times 50}{2.419.200 \times 1,1}$$

9.14

Die Notwendigkeit des Austauschs des Türantriebs wird durch die Anzahl der Türspiele (zwei pro Fahrt bestimmt). Somit gilt nach Gleichung 9.15 und einer angenommenen zehnjährigen Lebensdauer mit den gleichen Randbedingungen wie oben, dass ein Tausch innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht notwendig ist.

$$A_i = 0,4 = \frac{2 \times 33.600 \times 50}{6.912.000 \times 1,1}$$

9.15

9.1.2.4 Zusammenfassung der möglichen Instandhaltungsstrategien

Aus den beiden vorigen Abschnitten ergeben sich nun folgende, mögliche Instandhaltungsstrategien:

Variante 1: Beibehaltung der Steuerung, reparieren bei Bedarf, Erneuerung der Regelung,

Variante 2: Beibehaltung von Steuerung und Regelung, bei Bedarf beide reparieren

9.1.2.5 Ermittlung der Instandhaltungskosten (Instandhaltungskostenmodul)

Variante 1 verursacht einmalige Herstellungskosten in Höhe von € 11.000. Variante 2 verursacht keine Herstellungskosten. Eine evtl. notwendige Reparatur (Überholung) des Regelgerätes wird mit € 1.000 angesetzt, eine evtl. notwendige Reparatur (Überholung) der Steuerung wird mit € 2.500 angesetzt. Die Kosten wurden anhand konkreter Herstellerangebote ermittelt (Stand 2017, alles netto).

Ein neuer Wartungsvertrag wird zu folgenden, jährlichen Kosten abgeschlossen (vgl. Abschnitt 4.3.2.3):

- Grundpreis drei Wartungen: € 600,00,
- Beseitigung kleiner Störungen: € 570,00,
- Miete Notrufgerät: € 480,00,
- Aufschaltung Notrufgerät auf Leitstelle: € 40,00,
- Telefongebühren: € 180,00.

9.1.2.6 Ermittlung der Energiekosten im Betrieb (Energiekostenmodul)

Nach Abschnitt 3.6 kann von einem jährlichen Energiebedarf in Höhe von 1.322 kWh ausgegangen werden (Nutzungskategorie 2 nach VDI 4707 Blatt 1), wenn die Regelung an den Stand der Technik angepasst wird (Variante 1). Bei einem angenommenen¹¹² durchschnittlichen Preis pro Kilowattstunde (Leistungspreis + anteiliger Grundpreis) in Höhe von 0,20 € sind jährliche Energiekosten in Höhe von € 264,40 zu erwarten. Wenn die Regelung beibehalten wird (Variante 2), kann der genau für diese Anlage im Rahmen einer Langzeitmessung ermittelte Energieverbrauch (vgl. Abschnitt 3.6) in Höhe von 1.944 kWh pro Jahr ange-

¹¹² vgl. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_211.pdf
(zuletzt geprüft am 13.08.2018)

setzt werden, was jährliche Energiekosten in Höhe von 388,80 € ergibt.

9.1.2.7 Berechnung der Annuitäten (LCC-Modul)

Nach VDI 2067 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 7.1.1) sind im nächsten Schritt auf Basis der zuvor ermittelten Kostendaten die jährlichen bedarfs-, betriebs- und kapitalgebundenen Kosten zu unterscheiden. Für die folgenden Berechnungen werden eine jährliche, allgemeine Preissteigerung von 2,0 % (r) sowie ein Kalkulationszinssatz von 5,5 % (q) angenommen.¹¹³ Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (T) (oder unter bestimmten Annahmen, siehe unten, angepasst als T^*) ergibt sich der Annuitätsfaktor nach Gleichung 9.16. Der Betrachtungszeitraum wird auf den Zeitraum beginnend mit der ersten vollständigen Erneuerung von Steuerung und Regelung festgelegt. Somit passt¹¹⁴ der Einstiegszeitpunkt des Anwenders, zu dem die Anlage in diesem Anwendungsbeispiel bereits 30 Jahre mit der erneuerten Steuerung und Regelung in Betrieb ist, den ökonomische Betrachtungszeitraum um 30 Jahre auf 20 Jahre an (vgl. Abschnitt 5.1.1), im Folgenden bezeichnet als T^* .

$$a = 0,084 = \frac{q^{T^*} \times (q - 1)}{q^{T^*} - 1}$$

9.16

Die Barwerte der Ersatzinvestitionen nach n Jahren (Tabelle 65) ergeben sich nach Gleichung 9.17. Diese sind bezogen auf T^* , d.h. A_0 findet nicht zum Zeitpunkt $t = 0$, sondern zum Einstiegs- bzw. Betrachtungszeitpunkt statt.

¹¹³ http://www.nawoh.de/uploads/pdf/auslegungen/8_Lebenszykluskosten.pdf (zuletzt geprüft am 13.08.2018)

¹¹⁴ Betrachtet werden auch in diesem Beispiel nur die Zahlungen, die der Anwender des Planungshilfsmittels ausgehend von seinem individuellen Betrachtungszeitpunkt (Einstiegszeitpunkt) bis zum Ende des Betrachtungszeitraums leisten muss.

$$A_n = A_0 \frac{r^n}{q^n}$$

9.17

Für die Berechnung der Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (vgl. Tabelle 66) wird der dynamische Barwertfaktor nach Gleichung 9.18 ermittelt.

$$b = 14,021 = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^{T^*}}{q - r}$$

9.18

Tabelle 65: Barwerte der kapitalgebundenen Kosten (Ersatzinvestitionen) ohne Berücksichtigung des Restwertes nach VDI 2067 Blatt 1

Zeitpunkt	Maßnahme	Variante 1 [€]	Variante 2 [€]
erster Ersatzzeitpunkt nach 30 Jahren Betriebszeit (A ₀)	Regelung	11.000	0
	Steuerung & Regelung	0	0
	Reparatur Regelung	0	1.000
	Reparatur Steuerung	2.500	2.500
zweiter Ersatzzeitpunkt nach 45 Jahren Betriebszeit (A ₁₅)	Regelung ¹¹⁵	0	6.631
	Steuerung & Regelung	0	0
	Reparatur Regelung	603	0
	Reparatur Steuerung	1.507	1.507
Summe		15.610	11.638

Tabelle 66: Barwerte der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (Energie, Wartung, Notruf) VDI 2067 Blatt 1

regelmäßige Kosten	[€]
bedarfsgebunden (Variante 1)	3.707
bedarfsgebunden (Variante 2)	5.451
betriebsgebunden	26.219
Summe (Variante 1)	29.926
Summe (Variante 2)	31.670

¹¹⁵ spätestens nach 15 Jahren nochmalige Anwendung des Fuzzy-Moduls notwendig, um veränderte Randbedingungen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 8.1.2)

Insgesamt ergibt sich nun für Variante 1 folgende Annuität (Gleichung 9.19):

$$(15.610 \text{ €} + 29.926\text{€}) \times a = 45.536 \text{ €} \times 0,084 = 3.825 \text{ €}$$

9.19

Für Variante 2 ergibt sich folgende Annuität (Gleichung 9.20):

$$(11.638\text{€} + 31.670 \text{ €}) \times a = 43.308 \text{ €} \times 0,084 = 3.638 \text{ €}$$

9.20

Aus rein ökonomischer Sicht wäre demzufolge Variante 2 (Reparaturstrategie) trotz höherer Energiekosten zu bevorzugen. Im folgenden Abschnitt werden zur finalen Entscheidung darüber hinausgehende Merkmale in die Entscheidungsfindung eingebunden.

9.1.2.8 Finale Entscheidungsempfehlung (Bewertungsmodul)

Die einzelnen Bewertungen erfolgen gemäß den Einstufungen (1 bis 3) in Abschnitt 8.1.5 (3 bedeutet bestmöglich) und werden schließlich in Tabelle 67 zusammengefasst. Für beide Varianten wurde vom Hersteller keine Energieeffizienzklasse ermittelt. (jeweils Einstufung 1). Der Antrieb mit Getriebe sowie die Gleitführungen der Kabine und des Gegengewichtes machen Schmiermittel bei beiden Varianten erforderlich (jeweils Einstufung 1). Bei Variante 2 wird auf die Erneuerung der Steuerung und der Regelung verzichtet, weshalb hier eine höhere Ressourceneffizienz (Einstufung 3) als bei Variante 1 (Einstufung 2) festzustellen ist. Die Annuität von Variante 2 ist nach den Ergebnissen in Abschnitt 9.1.2.7 geringer als bei Variante 1 und wird deshalb mit Einstufung 3 besser bewertet als Variante 1 mit Einstufung 2. Die Anlage stand auch vor Durchführung der Maßnahmen einer guten Vermiet- und Vermarktbarkeit nicht im Wege. Eine Verschlechterung durch die Maßnahmen ist ausgeschlossen (jeweils Einstu-

fung 3). Bei beiden Varianten wird die Sicherheit gemäß dem Stand der Technik nicht vollständig hergestellt, sondern niedrige Risiken nach LSV wurden nach besonderer Abwägung zusammen mit dem Sachverständigen in Kauf genommen (jeweils Einstufung 2). Der Aufzug entspricht nicht der Barrierefreiheit nach DIN EN 81-70. Eine Anpassung der Anlage ist nicht sinnvoll, da die Haupthaltestelle nicht barrierefrei erreichbar ist (jeweils Einstufung 1). Das Risiko möglicher Störungen ist bei Variante 2 (reine Reparaturstrategie) größer (Einstufung 1) als bei Variante 1 (Einstufung 2). Die Wartungsfreundlichkeit wird bei Variante 1 durch den Einsatz eines am freien Markt bedingt zugänglichen Reglers verbessert (Einstufung 2), wo hingegen bei Variante 1 die proprietäre Technik vollständig erhalten bleibt (Einstufung 1). Nach Abnahme wurde die Fahrqualität bei beiden Varianten gemessen und als gut eingestuft (jeweils Einstufung 3). Die Stillstandszeiten für Modernisierungen fallen bei beiden Varianten gering aus (jeweils Einstufung 3). Durchzuführende Wartungen werden im Rahmen des abgeschlossenen Wartungsvertrages während der Geschäftszeiten nach vorheriger Absprache mit dem Betreiber durchgeführt (jeweils Einstufung 2). Es folgt bei beiden Varianten eine Information der Nutzer durch Aushang an der Anlage (Einstufung 2).

Zusammenfassend ist für die betrachtete Aufzugsanlage anhand der in den vorigen Abschnitten durchgeführten Schritte festzustellen: Aus der Fuzzy-Methode geht hervor, dass zum Betrachtungszeitpunkt die Erneuerung der Regelung ohne Erneuerung der Steuerung (Variante 1) aus rein technischer Sicht der Reparaturstrategie ohne jegliche Erneuerung (Variante 2) gleichgestellt wird. Die rein ökonomische Betrachtung spricht aufgrund der niedrigeren LCC über den gesamten Betrachtungszeitraum für Variante 2. Werden schließlich im Bewertungsmodul weitere Aspekte (ökologische, funktionale, gesellschaftliche und prozessorientierte) mit einbezogen, kann auch aus dieser Sicht dem

Betreiber aufgrund des Gesamtergebnisses in Tabelle 67 die Realisierung von Variante 2 empfohlen werden.

Tabelle 67: Gewichtete Bewertung der beiden Varianten

Kriterium	Gewichtung [%]	Variante 1		Variante 2	
		Bewertung (1-3)	Ergebnis	Bewertung (1-3)	Ergebnis
ökologisch	25				
Energieverbrauch im Betrieb	10	1	10	1	10
Vermeidung von Schmiermitteln	5	1	5	1	5
Vermeidung des Austauschs von Komponenten	10	2	20	3	30
ökonomisch	25				
LCC	12,5	2	25	3	37,5
Unterstützung der Vermiet- und Vermarktbarkeit	12,5	3	37,5	3	37,5
sozial	25				
Sicherheit	15	2	30	2	30
Barrierefreiheit	5	1	5	1	5
Verfügbarkeit	5	2	10	1	5
technische Qualität	12,5				
Wartungsfreundlichkeit	6,25	2	12,5	1	6,25
Fahrkomfort	6,25	3	18,75	3	18,75
Prozessqualität	12,5				
Stillstandszeiten durch Modernisierung	5	3	15	3	15
Stillstandszeiten durch Wartung	5	2	10	2	10
Information der Nutzer	2,5	2	5	2	5
	100		203,75		215

9.2 Zusammenfassung und kritische Betrachtung

Bei der Anwendung des Planungshilfsmittels zeigte sich an zwei verschiedenen Anlagen mit völlig unterschiedlichen Nutzungsszenarien, dass es unter bestimmten Umständen bei einer relativ jungen Anlagen zu einer umfassenden Modernisierung kommen muss, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden, wobei hingegen die ältere Anlage mit deutlich höheren verbleibenden Nutzungsdauern entscheidender Komponenten den Anforderungen des Gebäudebetriebes weiterhin standhält.

Deutlich wird beim ersten Anwendungsbeispiel, dass die rein ökonomische Betrachtung nicht ausreicht, um ein für den Betreiber und den Gebäudebetrieb passendes Konzept zu ermitteln. Bei einer Gesamtbetrachtung, die ökologische, funktionale, gesellschaftliche und prozessorientierte Aspekte mit einbezieht, erweist sich die Variante mit den höheren LCC als geeignetes Konzept für die vorgefundene Konstellation. Umgekehrt verhält es sich beim zweiten Anwendungsbeispiel. Hier wird auch bei der erweiterten Betrachtung im Bewertungsmodul das rein ökonomische Ergebnis bestätigt, d.h. die Variante mit den niedrigeren LCC stellt sich auch als die für das konkrete Projekt geeignete heraus.

Bei der Anwendung des Planungshilfsmittels ist zu beachten, dass die Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung als rein quantitative Methode von der Auswahl der Eingangsgrößen abhängt. Diese sind:

- die Kostendaten,
- der Kalkulationszinssatz,
- Preissteigerungsraten und
- der Betrachtungszeitraum.

Die Kostendaten sind idealerweise durch konkrete Angebote von den Herstellern bis auf Komponentenebene oder mindestens in Form plausibler statistischer Kostendaten, wie in dieser Arbeit aufgeführt, zu gewinnen. Kalkulationszinssatz und Preissteigerungsraten lassen sich u.a. durch Marktbeobachtungen¹¹⁶ ermitteln, der Betrachtungszeitraum kann in Anlehnung an erprobte Systeme zur Bewertung der Nachhaltigkeit gewählt werden (vgl. Abschnitt 5.1.1). Entscheidend ist in diesem Zusammenhang in jedem Falle die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der gewählten Eingangsgrößen, um vergleichbare und möglichst objektive Ergebnisse bei der ökonomischen Bewertung zu erhalten.

Bei einteiligen Komponenten ist durch die Anwendung der Verschleißformeln die Bestimmung von Ersatzzeitpunkten mit relativ geringem Aufwand möglich. Einflussgrößen hierbei sind:

- der Abnutzungsvorrat (z.B. Anzahl der Fahrten),
- die Beanspruchung (z.B. Anzahl der tatsächlichen Fahrten) und
- der Wartungsfaktor.

Herstellerangaben, Erhebungen bei der betrachteten Anlage im Gebäude vor Ort sowie die Einschätzung der Wartungsqualität durch einen unabhängigen Fachplaner lassen eine objektive Gewinnung der o.g. Einflussgrößen und somit ein möglichst objektives Ergebnis, wie bei der ökonomischen Bewertung, zu.

Kritischer hinsichtlich der Objektivität sind die Anwendung des Fuzzy-Moduls bei mehrteiligen komplexen Komponenten sowie die Anwendung der gewichteten Bewertung zur Bestimmung des finalen Ergebnisses zu sehen. Die Vorteile beider Methoden liegen in der Möglichkeit, eine Vielzahl von Kriterien auf den Betrachtungs-

¹¹⁶ vgl. z.B. <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/WirtschaftFinanzen/WirtschaftFinanzen.html> (zuletzt geprüft am 16.08.2018) oder <https://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/statistiken.html> (zuletzt geprüft am 16.08.2018)

tungsgegenstand anzuwenden und diese gleichzeitig dem Anwender als Auswahlmöglichkeiten anzubieten, deren Ausprägungen am Betrachtungsobjekt, dem Aufzug und dem Gebäude, leicht „abzulesen“ sind. Wie in dieser Arbeit jedoch mehrfach erwähnt, basieren beide Methoden auf der Nutzung von Expertenwissen. Der Einfluss subjektiver Meinungen ist als ein möglicher Nachteil dabei nicht auszuschließen, kann jedoch durch geeignete Methoden, wie z.B. eine Delphi-Befragung (mehrstufig mit Rückkopplung), eingegrenzt werden (vgl. [129]).

Die gewichtete Bewertung (Nutzwertanalyse) ist nicht zuletzt hinsichtlich der Sensitivität und Richtungssicherheit kritisch und insbesondere als Ergänzung zu den anderen im Planungshilfsmittel angewandten Methoden zu betrachten. In [25, S. 106] wird in diesem Zusammenhang angemerkt, dass die Nutzwertanalyse eine dimensionslose Ordnungszahl liefert, die sich aus einer Punktebewertung ergibt. Bezogen auf das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungshilfsmittel liegt eine Kopplung von nicht monetären Nutzungsaspekten mit einem als Annuität dargestellten finanziellen Aufwand vor. Die Annuität, die auch als ein kompakter Kennwert nutzbar ist, fließt dabei einerseits selbst in die Bewertung mit ein, kann aber auch daraus herausgelöst betrachtet und dem Gesamtnutzen gegenübergestellt werden (vgl. [25, S. 106]). Es lässt sich somit unter Beibehaltung aller anderen Bewertungsmaßstäbe vorhersehen, wie stark eine eingesparte oder zusätzlich investierte Geldeinheit den Gesamtnutzen beeinflusst oder, anders ausgedrückt, wie sensitiv der Gesamtnutzen darauf reagiert. Im Hinblick auf die Richtungssicherheit der Ergebnisse bei der Anwendung des entwickelten Planungshilfsmittels ist anzumerken, dass diese durch die beiden Anwendungsbeispiele in dieser Arbeit nur eingeschränkt beurteilt werden konnte. Es fällt dabei auf, dass beim ersten Anwendungsbeispiel der Gesamtnutzen nur knapp gegen die rein ökonomisch betrachtete, vorteilhafte Variante spricht, wo hingegen beim zweiten Anwendungsbeispiel auch die ökonomisch als vorteilhaft

betrachtete Variante durch den Gesamtnutzen mit größerem Abstand bestätigt wird. Weitere Studien, die das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept nutzen, werden vom Autor der vorliegenden Arbeit zur Feinabstimmung der Gewichtungen bei der Nutzwertanalyse empfohlen.

Beide Anlagen der dargestellten Anwendungsbeispiele wurden im Nachgang regelmäßig vom Autor dieser Arbeit begutachtet. Die Anforderungen an die beiden Anlagen, die sich aus dem jeweiligen realen Gebäudebetrieb ergeben, werden vollumfänglich erfüllt. Es zeigt sich somit an diesen Beispielen, dass das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungshilfsmittel sowohl aus Sicht der Betreiber (u.a. durch die Prognose der zu erwartenden Lebenszykluskosten) als auch zum Vorteil der Nutzer (u.a. durch die verbesserte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit) geeignete Instandhaltungsstrategien vorgibt. Dabei werden die Eigenschaften einzelner Komponenten berücksichtigt. Eine stetige Anpassung des Planungshilfsmittels an sich wandelnde Anforderungen von Nutzern und Betreibern sowie die Weiterentwicklung der verfügbaren Technologien bei Aufzügen ist aus Sicht des Autors möglich und wünschenswert, was auch die zukünftige Nutzbarkeit des Planungshilfsmittels untermauert.

10 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit und das darin entwickelte Planungshilfsmittel sollen den Leser und Anwender darin unterstützen, geeignete Instandhaltungsstrategien für Personenaufzüge herzuleiten. Zur Entwicklung des Planungshilfsmittels galt es, einerseits aufzugsspezifische Datenquellen zum Energie- und Instandhaltungsaufwand zu erschließen und aufzubereiten sowie andererseits damit korrespondierende Methoden zu deren Prognose und Bewertung anzupassen und neu zu entwickeln.

Konkret wurden dazu die in Abschnitt 1.1 aufgeführten Forschungsfragen mit den nachfolgend zusammengefassten Ergebnissen verfolgt:

1. Am Beispiel von Aufzügen wurde eine fein gegliederte, komponentenscharfe Kostendatenstruktur für Bau- und Nutzungskosten entwickelt. Diese lässt sich in die etablierten Kostengliederungen nach DIN 276 und DIN 18960 für Bauwerke integrieren und schafft somit für einen Teilbereich darin, den Aufzügen, einen Bottom-Up-Ansatz. Hieraus ergibt sich ein Nutzen bei der Datenererschließung für Lebenszykluskosten (LCC) auf Bauwerkebene.
2. Im Rahmen eines Forschungsprojektes (zusammen mit einem Industriepartner) wurden neue Planungskennwerte zum Energiebedarf von Aufzügen generiert sowie ein dazu geeignetes Verfahren entwickelt, das auch für spätere Messkampagnen zur Verfügung steht, um die Planungskennwerte weiter zu detaillieren sowie zukünftige technische Entwicklungen einfließen zu lassen. Neben der

hiermit geschaffenen Methoden- und Datengrundlage zur Ermittlung von Energiekosten wurden Datenquellen für Instandhaltungskosten identifiziert und ausgewertet.

3. Die erschlossenen Datenquellen fließen in ein Planungshilfsmittel ein, das sowohl Betreibern als auch Fachplanern die Möglichkeit eröffnet, geeignete, herstellerneutrale Instandhaltungsstrategien zu ermitteln. Der einerseits damit gewonnene Nutzen und die andererseits verbleibenden Unsicherheiten und das damit verbundene Verbesserungspotential wurden in Abschnitt 9.2 direkt im Zusammenhang mit den Anwendungsbeispielen kritisch beleuchtet.

Das entwickelte Verfahren zur Ermittlung des Energieaufwandes in der Nutzungsphase basiert auf länger andauernden Messungen unter realistischen Bedingungen, mit dessen Hilfe auf den Jahresenergiebedarf geschlossen werden kann. Die Ergebnisse werden für verschiedene Nutzungskategorien dargestellt und als Alternative zu Berechnungsmöglichkeiten aus der Normungs- und Richtlinienarbeit angeboten. Zur weiteren Schärfung der Ergebnisse und zur Begleitung der technischen Weiterentwicklung sieht der Autor zukünftigen Forschungsbedarf in der Durchführung weiterer Messkampagnen nach dem in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ansatz.

In der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) werden Aufzüge hinsichtlich des Energieaufwandes in der Nutzungsphase noch nicht berücksichtigt. [130] Der Autor geht davon aus, dass Aufzüge bei zukünftigen Novellierungen der EnEV enthalten sein werden. Dies lässt sich u.a. dadurch begründen, dass die EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) entsprechende Mindestumfänge den Mitgliedsländern zur Umsetzung vorgibt. [2] Hinzu kommt, dass der Anteil des elektrischen Energiebedarfs von Aufzügen bei Gebäuden mit immer niedriger werdendem elektrischen Gesamt-

energiebedarf zunimmt und somit weiter an Bedeutung gewinnt (vgl. Abschnitt 3.6).

Die Ermittlung des Instandhaltungsaufwandes in der Nutzungsphase erfordert nach dem vorgestellten Ansatz in der vorliegenden Arbeit zunächst die Bestimmung einer oder mehrerer, alternativer Instandhaltungsstrategien. Es wurde dazu ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, das zunächst für die komplexeste Komponente, die Steuerung, eine Instandhaltungsstrategie mit der Option einer Lebensdauererlängerung durch Reparatur und für die restlichen Komponenten Ersatzzeitpunkte auf Basis von Abnutzungsvorräten bestimmt. Nach der Ermittlung des dazu notwendigen finanziellen Aufwandes werden die möglichen Varianten einer abschließenden Bewertung unterzogen, die den Gesamtnutzen für Betreiber, Nutzer und Umwelt mit einbezieht. Die angewandten Verfahren nutzen dazu Expertenwissen. Eine stetige Weiterentwicklung zur Berücksichtigung des technischen Fortschritts wird vom Autor u.a. im Rahmen von Expertenbefragungen als zukünftiger Forschungsbedarf angesehen.

Der finanzielle Aufwand für ausgewählte Instandhaltungsmaßnahmen wurde durch umfangreiche Literaturrecherchen sowie konkrete Herstellerangaben bestimmt. Eine Zusammenfassung der vom Autor ermittelten Kostenkennwerte für Herstellung und Wartung ermöglicht es zudem, Kostenplanungskennwerte für Abschätzungen in frühen Planungsphasen abzuleiten und für zukünftige Richtlinienarbeiten, z.B. im Rahmen der VDI 2067, als Weiterentwicklung anzubieten. Intensive Forschung ist auch in diesem Zusammenhang aus Sicht des Autors zur weiteren Schärfung und zur Berücksichtigung des technischen Fortschritts unabdingbar. Hersteller von Komponenten und Systemen sowie Dienstleister für Instandhaltung sollten daran aktiv beteiligt sein.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz schließt zur Bewertung und Auswahl von Instandhaltungsstrategien - am Beispiel von

Personenaufzügen - eine mögliche Lebensdauererlängerung komplexer Komponenten zur Schonung von natürlichen und finanziellen Ressourcen in besonderem Maße ein. Eine stetige Anpassung der Methodik und ihrer Datengrundlagen an zukünftige Anforderungen wird durch den modularen Aufbau des Planungshilfsmittels und die transparente Darstellung der darin genutzten Daten unterstützt.

Literaturangaben

- [1] Schulte, K.-W., Bone-Winkel, S. u. Schäfers, W. (Hrsg.): Immobilienökonomie. Band I: Betriebswirtschaftliche Grundlagen, Bd I. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2014
- [2] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung). EPBD. 2010
- [3] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz. 2018
- [4] Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Empfehlungen für Planung und Betrieb. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Leitfaden Barrierefreies Bauen, 2016. https://www.dlbb.bundesbau.de/fileadmin/downloads/archiv/barrierefreies_bauen_leitfaden_bf_4-Aufl.pdf, abgerufen am: 08.10.2018
- [6] Schoof, J. u. König, H. (Hrsg.): A life cycle approach to buildings. Principles, calculations, design tools. Detail green books. München: Ed. Detail - Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation 2010
- [7] PROSA Kurzstudie Aufzüge. Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Blepp, M., Marquardt, M. u. Quack, D., 2011
- [8] Norm DIN 1960:2016-09; 2016. *Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen*

- [9] Pelzeter, A.: Lebenszykluskosten von Immobilien. Einfluss von Lage, Gestaltung und Umwelt. Schriften zur Immobilienökonomie, Bd. 36. Köln: Müller 2006
- [10] BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.): BKI Baukosten 2015. Kostenkennwerte für Gebäude. Teil 1. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH 2015
- [11] BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.): BKI Objektdaten: Kosten abgerechneter Bauwerke - Technische Anlagen mit statistischen Kostenkennwerten. G4 Technische Gebäudeausrüstung. Stuttgart 2015
- [12] Aufzugs- und Fahrtreppenbranche in Deutschland. Entwicklungstrends und Herausforderungen, Branchenreport 2015, Dispan, J., Stuttgart 2015
- [13] Bundesregierung: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln. Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV. 2017
- [14] Technische Überwachung. Anlagensicherheitsreport-Report 2018, Mängelstatistik 2018, Stohlmann, A. u. Siegl, A., 2018
- [15] Technische Überwachung. Anlagensicherheitsreport-Report 2013, Mängelstatistik 2013, Roas, D., 2013
- [16] Technische Überwachung. Anlagensicherheitsreport-Report 2016, Mängelstatistik 2016, Stohlmann, A., 2016
- [17] Bauministerkonferenz: Musterbauordnung. MBO. 2012
- [18] Eisele, J. u. Kloft, E.: Hochhaus-Atlas. Typologie und Beispiele; Konstruktion und Gestalt; Technologie und Betrieb. München: Callwey 2002
- [19] Landesbauordnung für Baden-Württemberg. LBO. 2010
- [20] Landesbauordnung Rheinland-Pfalz. LBauO. 1998
- [21] Stoffregen, A., Kreißig, J. u. König, H.: Ökologische Bewertung der Haustechnik. Endbericht.
http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/forschungsprojekte/Endbericht_TGA_20100727.pdf, abgerufen am: 20.08.2018

- [22] Voss, K., Wagner, A., Maas, A., Herkel, S., Kalz, D. u. Lützkendorf, T. (Hrsg.): Performance von Gebäuden. Kriterien, Konzepte und Erfahrungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016
- [23] Unholzer, M., Michl, P. u. Lützkendorf, T. (Hrsg.): Ermittlung von Kennwerten für den Energiebedarf von Personenaufzügen in Wohn- und Nichtwohngebäuden - ein Beitrag zur Vervollständigung der Energiebilanz. Abschlussbericht. Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2958. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015
- [24] Bericht der Baukostensenkungskommission. im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen, Neitzel, M. e. a., 2015
- [25] Möller, D.-A. u. Kalusche, W. (Hrsg.): Planungs- und Bauökonomie. Wirtschaftslehre für Bauherren und Architekten. Berlin/Boston: De Gruyter 2013
- [26] Heinen, E.: Betriebswirtschaftliche Kostenlehre. Kostentheorie und Kostenentscheidungen. Wiesbaden: Gabler Verlag 1983
- [27] Olfert, K.: Kostenrechnung. Herne: Kiehl 2010
- [28] Drewer, S.: Entwicklung von Hilfsmitteln für die Planung und den Variantenvergleich von Beförderungssystemen in Gebäuden am Beispiel von Aufzügen. Karlsruher Schriften zur Bau-, Wohnungs- und Immobilienwirtschaft, Bd. 7
- [29] Jappsen, H. M.: Aufzugsanlagen, München 2002.
https://www.jappsen-ingenieure.com//index.php/downloads/de/1_de.pdf, abgerufen am: 15.05.2017
- [30] Entwurf DIN EN 81-80:2016-12; November 2016. *Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen - Bestehende Aufzüge - Teil 80: Regeln für die Erhöhung der Sicherheit bestehender Personen- und Lastenaufzüge.*
<https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-81-80/263799598>, abgerufen am: 20.08.2018

- [31] Verband der TÜV e.V.: Leitfaden zur sicheren Verwendung von Personen- und Lastenaufzügen nach dem Stand der Technik, 2016.
http://www.vdtuev.de/themen/anlagensicherheit/aufzuege_foerdertechnik/leitfaden-zur-sicheren-verwendung-von-personen-und-lastenaufzuegen-nach-stand-der-technik, abgerufen am: 21.08.2018
- [32] CIBSE (Hrsg.): Transportation systems in buildings. CIBSE Guide D: 2010. Norwich 2010
- [33] CIBSE (Hrsg.): Transportation systems in buildings. CIBSE guide D: 2015. Norwich: Chartered Inst. of Building Services Engineers 2015
- [34] Vornorm DIN 18599-1; Dezember 2011. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*
- [35] Norm DIN EN ISO 14067. *Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für quantitative Bestimmung*. <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-iso-14067/278682230>, abgerufen am: 20.08.2018
- [36] Norm DIN EN ISO 14025:2011-10; Oktober 2011. *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren*.
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14025/144319534>, abgerufen am: 20.08.2018
- [37] Norm DIN EN 15804:2014-07; Juli 2014. *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*.
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15804/195229515>, abgerufen am: 20.08.2018

- [38] Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen. Schlussbericht, Nipkow, J., Zürich 2005
- [39] Intelligent Energy Europe: Energy Efficient Elevators and Escalators, 2010.
<https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/e4>, abgerufen am: 20.08.2018
- [40] Hirzel, S., Fleiter, T. u. Rosende D.: Elevators and Escalators in Germany from an energy perspective, Karlsruhe 2010.
<http://publica.fraunhofer.de/documents/N-133137.html>, abgerufen am: 20.08.2018
- [41] Hirzel, S. u. Böge, C.: Monitoring campaign - Germany, Karlsruhe 2009. <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-133135.html>, abgerufen am: 20.08.2018
- [42] Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen. Schlussbericht, Lindegger, U. u. Bettschen, R., Hergiswil 2010
- [43] Richtlinie VDI 4707 Teil 1; März 2009. *Aufzüge Energieeffizienz*. <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausruestung/richtlinienarbeit/richtlinie-vdi-4707-aufzuege-energieeffizienz/>, abgerufen am: 20.08.2018
- [44] Richtlinie VDI 4707 Teil 2; Juni 2012. *Aufzüge Energieeffizienz Komponenten*.
<https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausruestung/richtlinienarbeit/richtlinie-vdi-4707-aufzuege-energieeffizienz/>, abgerufen am: 20.08.2018
- [45] Richtlinie VDI 4707 Teil 2; Oktober 2013. *Aufzüge Energieeffizienz Komponenten*.
<https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausruestung/richtlinienarbeit/richtlinie-vdi-4707-aufzuege-energieeffizienz/>, abgerufen am: 20.08.2018
- [46] Entwurf DIN EN ISO 25745-1; September 2010. *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen*

- [47] DIN EN ISO 25745-1; Februar 2013. *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen*.
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-25745-1/154770592>, abgerufen am: 21.08.2018
- [48] Norm DIN EN ISO 25745-2; Oktober 2015. *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 2: Energieberechnung und Klassifizierung von Aufzügen*.
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-25745-2/233961398>, abgerufen am: 21.08.2018
- [49] Entwurf SIA 380/4; 1995. *Elektrische Energie im Hochbau*
- [50] Norm SIA 380/4; 2006. *Elektrische Energie im Hochbau*
- [51] Strakosch, G. R. u. Caporale, B.: The vertical transportation handbook. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons 2010
- [52] Barney, G. C.: Elevator traffic handbook. Theory and practice. London, New York: Spon Press 2003
- [53] Al Sharif, L.: Teil I: Bewertung des Fahrgastbedarfs. Gestaltung des modernen Aufzugsverkehrs. Lift Report 40 (2014) 4, S. 4–15
- [54] Al Sharif, L.: Teil II: Gestaltung des modernen Aufzugsverkehrs. Bereitstellung der Versorgung, Berechnung der Rundfahrzeit für den grundlegendsten Fall aller Fälle. Lift Report 40 (2014) 5, S. 4–17
- [55] Norm DIN 15306:2002-06; Juni 2002. *Aufzüge - Personenaufzüge für Wohngebäude Baumaße, Fahrkorbmaße, Türmaße*
- [56] Norm DIN 15309:2002-12; Dezember 2002. *Aufzüge - Personenaufzüge für andere als Wohngebäude sowie Bettenaufzüge - Baumaße, Fahrkorbmaße, Türmaße*
- [57] Aufzug 2017. Hinweise für Planung, Ausschreibung und Verwendung von Aufzugsanlagen in öffentlichen Gebäuden, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, Berlin 2017
- [58] Waldmann, K.-H. u. Helm, W. E. (Hrsg.): Simulation stochastischer Systeme. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin: Gabler 2016

- [59] Peters, R. u. Evans, E.: Measuring and Simulating Elevator Passengers in Buildings, London. <https://www.peters-research.com/index.php/support/articles-and-papers/39-measuring-and-simulating-elevator-passengers-in-buildings>, abgerufen am: 21.08.2018
- [60] Peters, R., Al Sharif, L., Hammoudeh, A. T., Alniemi, E. u. Salman, A.: A Systematic Methodology for the Generation of Lift Passengers under a Poisson Batch Arrival Process. <https://www.peters-research.com/index.php/support/articles-and-papers/163-a-systematic-methodology-for-the-generation-of-lift-passengers-under-a-poisson-batch-arrival-process>, abgerufen am: 21.08.2018
- [61] Peters, R. D.: Lift Traffic Analysis: Formulae for the General Case, London. <https://www.peters-research.com/index.php/support/articles-and-papers/56-lift-traffic-analysis-formulae-for-the-general-case>, abgerufen am: 21.08.2018
- [62] Schnell, R., Hill, P. B. u. Esser, E. (Hrsg.): Methoden der empirischen Sozialforschung. München: Oldenbourg, R 2011
- [63] Ana Maria Lorente Lafuente: Life Cycle Analysis and Energy Modelling of Lifts, Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA). Universidad de Zaragoza Disseratation. Zaragoza 2013
- [64] Voss, K., Löhnert, G., Herkel, S., Wagner, A. u. Wambsganß, M. (Hrsg.): Bürogebäude mit Zukunft. Konzepte, Analysen, Erfahrungen. Informationsdienst Bine. Köln: TÜV-Verl. 2005
- [65] Norm DIN 31051:2012-09; September 2012. *Grundlagen der Instandhaltung*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-31051/154459920>, abgerufen am: 21.08.2018
- [66] Betrieb von Aufzugsanlagen. TRBS 3121. In: Technische Regeln für Betriebssicherheit
- [67] Prüfung von überwachungsbedürftigen Anlagen - Prüfung von Aufzugsanlagen. TRBS 1201 Teil 4. In: Technische Regeln für Betriebssicherheit

- [68] Änderungen und wesentliche Veränderungen von Aufzugsanlagen. TRBS 1121. In: Technische Regeln für Betriebssicherheit
- [69] Schutz vor Gefährdungen beim Eingeschlossensein in Personenaufnahmemitteln. TRBS 2181. In: Technische Regeln für Betriebssicherheit
- [70] Entwurf DIN EN 13015:2017-02; Februar 2017. *Instandhaltung von Aufzügen und Fahrtreppen - Regeln für Instandhaltungsanweisungen*. <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-13015/265540914>, abgerufen am: 21.08.2018
- [71] Richtlinie VDI 3810 Blatt 6; November 2013. *Betreiben und Instandhalten von gebäudetechnischen Anlagen - Aufzüge*. <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaedetechnik/fachbereiche/facility-management/richtlinien/richtlinienreihe-vdi-3810-betreiben-und-instandhalten-von-gebaedetechnischen-anlagen/vdi-38106/>, abgerufen am: 21.08.2018
- [72] Norm DIN EN 81-20:2014-11; November 2014. *Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen Teil 20: Personen- und Lastenaufzüge*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-81-20/200617535>, abgerufen am: 21.08.2018
- [73] Norm DIN EN 81-50:2015-02; Februar 2015. *Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen - Prüfungen Teil 50: Konstruktionsregeln, Berechnungen und Prüfungen von Aufzugskomponenten*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-81-50/227805916>, abgerufen am: 21.08.2018
- [74] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2014/33/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Aufzüge und Sicherheitsbauteile für Aufzüge (Neufassung). 2014

- [75] Bundesregierung: Zwölfte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz. Aufzugsverordnung - 12. Prod SV. 2016
- [76] Einheitsblatt VDMA 24186-5:2002-09; 2002. *Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden Teil 5: Elektrotechnische Geräte und Anlagen*
- [77] Aufzug-Service 2010. Vertragsmuster für Instandhaltung sowie andere Leistungen für Aufzugsanlagen in öffentlichen Gebäuden, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, 2015
- [78] Wartung 2014. Wartung, Inspektion und damit verbundenen kleine Instandsetzungsarbeiten von technischen Anlagen und Einrichtungen in öffentlichen Gebäuden, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, 2017
- [79] LCC Handbuch Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken, Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierungen (CRB), Zürich 2012
- [80] Unger, D.: Aufzüge und Fahrtreppen. Ein Anwenderhandbuch. [s.l.]: Springer 2012
- [81] Aufzugskomponenten. In bester Qualität - Made in Germany, Lift Equip GmbH Elevator Components, 2017
- [82] Richtlinie VDI 3423; August 2011. *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung.*
<https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produktion-und-logistik/fachbereiche/fabrikplanung-und-betrieb/fa202-instandhaltung/vdi-3423-verfuegbarkeit-von-maschinen-und-anlagen/>, abgerufen am: 21.08.2018
- [83] Kalusche, W., Axhausen, K., Held, H. u. Schalcher, H.-R. (Hrsg.): Technische Lebensdauer von Bauteilen und wirtschaftliche Lebensdauer eines Gebäudes // Bauen, Bewirtschaften, Erneuern. Gedanken zur Gestaltung der Infrastruktur ; [Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-

- Rudolf Schalcher ; Kolloquium zum Thema "Bauen, Bewirtschaften, Erneuern - Gedanken zur Gestaltung der Infrastruktur" am 9. Juli 2004 an der ETH Höggerberg]. Zürich: Vdf Hochschulverl. an der ETH Zürich 2004
- [84] Fischer, A.: Wartungsverträge. Inspektion, Wartung und Instandsetzung technischer Einrichtungen. Berlin: Erich Schmidt 2003
- [85] Robert Altmannshofer: Wenn MAX rechtzeitig den Techniker holt. Digitalisierung in der Aufzugswartung. *Der Facility Manager* 24 (2017) 12, S. 42
- [86] Norm DIN EN 13306:2018-02; Februar 2018. *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung*.
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-13306/270274780>, abgerufen am: 22.08.2018
- [87] Norm DIN 276-1:2008-12; Dezember 2008. *Kosten im Bauwesen Teil 1: Hochbau*
- [88] Norm DIN 18960:2008-02; Februar 2008. *Nutzungskosten im Hochbau*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-18960/103673486>, abgerufen am: 22.08.2018
- [89] TGA-KO Version 2. Kosten Technischer Gebäudeausrüstung. Orientierungswerte für die Planung. 2008
- [90] Statistisches Bundesamt (Destatis): Preisindizes für die Bauwirtschaft. Fachserie 17 Reihe 4 Nr. 2170400183224, 2018.
<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Baupreise/BauwirtschaftPreise.html>, abgerufen am: 16.07.2018
- [91] BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.): BKI Objektdaten: Kosten abgerechneter Bauwerke - Technische Anlagen mit statistischen Kostenkennwerten. G3 Technische Gebäudeausrüstung. Stuttgart 2012
- [92] Zehbold, C.: Lebenszykluskostenrechnung. krp-Edition. Wiesbaden: Gabler 1996

- [93] Richtlinie GEFMA 220-2; 2010-09. *Lebenszykluskosten-Ermittlung im FM - Anwendungsbeispiel*
- [94] Entwurf GEFMA 100-1:2004; Juli 2007. *Lebenszykluskosten-Ermittlung im FM - Anwendungsbeispiel*
- [95] Homann, K.: Immobiliencontrolling. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag 2004
- [96] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden, 2016. <http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2015.html>, abgerufen am: 13.03.2018
- [97] Balck, H.: Lebenszyklusorientierte Planungsprozesse, Ausschreibungen und Vergaben. Pilotierung in der Projektbegleitung öffentlicher Bauvorhaben im Hochbau. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Bd. 2960. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2015
- [98] Balck, H.: Technisches Asset Management. Erneuerungsprogramm technischer Anlagen nach „Strategischen Bauteilen“: Hohe Energieeinsparungen und verlängerte Anlagen-Lebensdauer. Facility Management (2015) 1, S. 24–28
- [99] Balck, H.: Methoden und Instrumente für das Lifecycle Benchmarking für Gebäude und technische Anlagen. Endbericht. Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2861. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2013
- [100] Balck, H.: Life-Cycle-Benchmarking. Betreiberwissen als Fundament nachhaltiger Planung und Beschaffung. Facility Management (2012) 6, S. 32–33
- [101] Richtlinie VDI 2884; Dezember 2005. *Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*, <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2884/84228427>, abgerufen am: 22.08.2018

- [102] Unholzer, M., Michl, P. u. Lützkendorf, T.: Wettbewerbsvorteile durch erweiterte Produktdaten für Aufzüge in der Nutzungsphase? Anforderungen und Handlungsempfehlungen. *Lift Report* 42 (2016) 4, S. 17–23
- [103] Entwurf DIN 276:2017-07; Juli 2017. *Kosten im Bauwesen*. <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-276/273933601>, abgerufen am: 22.08.2018
- [104] Richtlinie GEFMA 220-1:2010; September 2010. *Lebenszykluskostenrechnung im FM Einführung und Grundlagen*
- [105] Life Cycle Costs as a Benchmark, Pelzeter, A., ERES Conference Dublin 2005
- [106] Entwurf GEFMA 200; Juli 2004. *Kosten im Facility Management*
- [107] Norm ISO 15686-5:2008; Juni 2008. *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing*
- [108] ÖNORM B 1801-1; 01.06.2009. *Bauprojekt- und Objektmanagement, Teil 1: Objekterrichtung*
- [109] ÖNORM B 1801-2; 01.04.2011. *Bauprojekt- und Objektmanagement, Teil 2: Objekt-Folgekosten*
- [110] ÖNORM B 1801-4; 01.04.2014. *Bauprojekt- und Objektmanagement, Teil 4: Berechnung von Lebenszykluskosten*
- [111] LCC Leitfaden Planung der Lebenszykluskosten, Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierungen (CRB), Zürich 2012
- [112] Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. *Information and Control* (1965) 8, S. 338–353
- [113] Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Systems // Selected papers. *Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*, Bd. 6. Singapore: World Scientific 1996
- [114] Norm DIN EN 61131-7:2001-11; November 2001. *Speicherprogrammierbare Steuerungen Teil 7: Fuzzy-Control-Programmierung*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61131-7/41676777>, abgerufen am: 23.08.2018

- [115] Böhme, G.: Fuzzy-Logik. Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer 1993
- [116] Schulte, U.: Einführung in Fuzzy-Logik. Fortschritt durch Unschärfe. München: Franzis' ©1993
- [117] Biewer, B.: Fuzzy-Methoden. Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen. Berlin u.a.: Springer 1997
- [118] Aufzüge und Gebäudetechnik 2. Betrieb und Instandhaltung. VDI-Berichte Nr. 1856, VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung
- [119] Richtlinie VDI 3810 Blatt 6; November 2006. *Betreiben und Instandhalten von gebäudetechnischen Anlagen Aufzüge*
- [120] DIN EN ISO 25745-2; Juni 2013. *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 2: Energieberechnung und Klassifizierung von Aufzügen*
- [121] Ziehl Abegg: ZAdyn 4C. Betriebsanleitung. R-TBA12_01-D 1815 Index 009. <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/downloads/file/get/11439/>, abgerufen am: 14.09.2018
- [122] Deppenmeier, J.: Lebenszyklusorientierte Planung von Erschließungskonzepten in Hochhäusern am Beispiel von Aufzugsanlagen. Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Lebenszykluskosten mit Hilfe von Verkehrsberechnungs-Simulationen unter Berücksichtigung der Transportstrategie. Schriftenreihe Bauwirtschaft, Bd. 19. Kassel: Kassel Univ. Press 2011
- [123] Norm ISO 15686-8; 2008. *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 8: Reference service life and service-life estimation*
- [124] Lützkendorf, T., König, H., Kohler, N. u. Kreissig, J.: Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge. München: Inst. für Int. Architektur-Dokumentation Ed. Detail 2009

- [125] VDI-Richtlinie VDI 2067 Blatt 1; September 2012. *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung*
- [126] Aufzüge und Gebäudetechnik. VDI-Berichte Nr. 1690, VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung
- [127] Schulte, G.: Investition. Investitionscontrolling und Investitionsrechnung. München: Oldenbourg 2007
- [128] Norm ISO 18738-1:2012-10; Oktober 2012. *Messung des Fahrkomforts - Teil 1: Aufzüge.*
<https://www.beuth.de/de/norm/iso-18738-1/167356414>,
abgerufen am: 23.08.2018
- [129] Häder, M.: Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer VS 2014
- [130] Deutscher Bundestag: Energieeinsparverordnung - zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013. EnEV. 2013
- [131] Allgemeine Ausführungsverordnung des Ministeriums für Verkehr und Infrastruktur zur Landesbauordnung für Baden-Württemberg. LBOAVO. 2015
- [132] Norm DIN 18232-2:2007-11. *Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderung und Einbau.*
<https://www.beuth.de/de/norm/din-18232-2/101330298>,
abgerufen am: 23.08.2018
- [133] Europäische Kommission: NB-LIFTS RECOMMENDATIONS FOR USE SHEETS (RfUs) CONSIDERED AS ENDORSED STATUS ON SEPTEMBER 2016. NB/L. 2016
- [134] Verordnung über Arbeitsstätten
(Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV). 2004

Anhang A: Kennwertebaukasten

Fahrprofile Bürogebäude	Leistungsaufnahme		Zeit min pro Tag	Energieverbrauch Wh pro Tag	Wochentage mit Normalbelegung pro Jahr	Samstage/Sonntage/ Feiertage pro Jahr	Tage mit reduzierter Belegung pro Jahr	Betriebsstage gesamt pro Jahr	Energieverbrauch kWh pro Jahr
	W								
Normalbelegung									
Energieverbrauch Fahrt pro Wochentag									
P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb									
S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit									
S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden									
S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden									
Energieverbrauch pro Wochentag (Normalbelegung)									
Samstag/Sonntag/Feiertag									
Energieverbrauch Fahrt pro Samstag/Sonntag/Feiertag									
P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb									
S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit									
S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden									
S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden									
Energieverbrauch pro Samstag/Sonntag/Feiertag									
Übungsraum									
Energieverbrauch Fahrt pro Tag mit reduzierter Belegung									
P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb									
S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit									
S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden									
S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden									
Energieverbrauch pro Tag mit reduzierter Belegung									

(Quelle: eigene Darstellung, vgl. [23])

Anhang B: Regelbasis

Abkürzungen Regelbasis (eigene Darstellung)

nw	neuwertig
lB	lange in Betrieb
a	alt
hV	hohe geforderte Verfügbarkeit
mV	mittlere geforderte Verfügbarkeit
nV	niedrige geforderte Verfügbarkeit
nSt	niedrige Störungshäufigkeit
mSt	mittlere Störungshäufigkeit
hSt	hohe Störungshäufigkeit
nF	niedrige Anzahl der Fahrten pro Tag
mF	mittlere Anzahl der Fahrten pro Tag
hF	hohe Anzahl der Fahrten pro Tag
nUtS	zu kühle Umgebungstemperatur (Ø Sommerhalbjahr)
iUtS	ideale Umgebungstemperatur (Ø Sommerhalbjahr)
hUtS	zu hohe Umgebungstemperatur (Ø Sommerhalbjahr)
nUtW	zu kühle Umgebungstemperatur (Ø Winterhalbjahr)
iUtW	ideale Umgebungstemperatur (Ø Winterhalbjahr)
hUtW	zu hohe Umgebungstemperatur (Ø Winterhalbjahr)
unS	unsichere Verfügbarkeit von Ersatzteilen Steuerung
plS	planbare Verfügbarkeit von Ersatzteilen Steuerung
lS	langfristige Verfügbarkeit von Ersatzteilen Steuerung
unR	unsichere Verfügbarkeit von Ersatzteilen Regelung
plR	planbare Verfügbarkeit von Ersatzteilen Regelung
lR	langfristige Verfügbarkeit von Ersatzteilen Regelung
VVVF	Frequenzregler
VVCF	Spannungsregler
FV	ungeregelt
r	zunächst kein Handlungsbedarf, bei Bedarf reparieren
R	nur Regelung erneuern
SR	Steuerung mit Regelung erneuern

Ausgewählte Entscheidungsregeln

WENN	UND	UND	UND	DANN
hV	nSt	unS	unR	SR
hV	nSt	unS	plR	SR
hV	nSt	unS	lR	SR
hV	nSt	plS	unR	R
hV	nSt	plS	plR	r
hV	nSt	plS	lR	r
hV	nSt	lS	unR	R
hV	nSt	lS	plR	r
hV	nSt	lS	lR	r
hV	mSt	unS	unR	SR
hV	mSt	unS	plR	SR
hV	mSt	unS	lR	SR
hV	mSt	plS	unR	SR
hV	mSt	plS	plR	SR
hV	mSt	plS	lR	SR
hV	mSt	lS	unR	R
hV	mSt	lS	plR	R
hV	mSt	lS	lR	R
hV	hSt	unS	unR	SR
hV	hSt	unS	plR	SR
hV	hSt	unS	lR	SR
hV	hSt	plS	unR	SR
hV	hSt	plS	plR	SR
hV	hSt	plS	lR	SR
hV	hSt	lS	unR	SR
hV	hSt	lS	plR	SR
hV	hSt	lS	lR	SR
mV	nSt	unS	unR	SR
mV	nSt	unS	plR	R
mV	nSt	unS	lR	R
mV	nSt	plS	unR	r
mV	nSt	plS	plR	r
mV	nSt	plS	lR	r
mV	nSt	lS	unR	r
mV	nSt	lS	plR	r
mV	nSt	lS	lR	r
mV	mSt	unS	unR	SR
mV	mSt	unS	plR	R
mV	mSt	unS	lR	R
mV	mSt	plS	unR	R
mV	mSt	plS	plR	r
mV	mSt	plS	lR	r
mV	mSt	lS	unR	R
mV	mSt	lS	plR	r

WENN	UND	UND	UND	DANN
mV	mSt	lS	lR	r
mV	hSt	unS	unR	SR
mV	hSt	unS	plR	SR
mV	hSt	unS	lR	SR
mV	hSt	plS	unR	R
mV	hSt	plS	plR	R
mV	hSt	plS	lR	r
mV	hSt	lS	unR	R
mV	hSt	lS	plR	r
mV	hSt	lS	lR	r
nV	nSt	unS	unR	r
nV	nSt	unS	plR	r
nV	nSt	unS	lR	r
nV	nSt	plS	unR	r
nV	nSt	plS	plR	r
nV	nSt	plS	lR	r
nV	nSt	lS	unR	r
nV	nSt	lS	plR	r
nV	nSt	lS	lR	r
nV	mSt	unS	unR	SR
nV	mSt	unS	plR	SR
nV	mSt	unS	lR	SR
nV	mSt	plS	unR	R
nV	mSt	plS	plR	r
nV	mSt	plS	lR	r
nV	mSt	lS	unR	R
nV	mSt	lS	plR	r
nV	mSt	lS	lR	r
nV	hSt	unS	unR	SR
nV	hSt	unS	plR	SR
nV	hSt	unS	lR	SR
nV	hSt	plS	unR	R
nV	hSt	plS	plR	r
nV	hSt	plS	lR	r
nV	hSt	lS	unR	R
nV	hSt	lS	plR	r
nV	hSt	lS	lR	r

Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis

Erfassungsmodul (eigene Darstellung)

Tool zur Bewertung der Instandhaltungskosten bestehender Aufzüge (V 1.0)					
Erfassungsmodul: Ist-Zustand					
Basisdaten Aufzug					
Basisdaten	Anzahl der Personen	4	Nenngeschwindigkeit	0,8 m/s	
	Nennlast	320	Förderhöhe	25 m/s	
	Anzahl der Etagen	7	Anlagennummer	69225	
	Durchladung	nicht vorhanden	Konventionen für LCC		
	Trenntüre innen	nicht vorhanden			
	Kabinentür 1	Schiebetür, einseitig öffnend	Betrachtungszeitraum	30 Jahre	
	Kabinentür 2	nicht vorhanden	Kalkulationszinssatz	7 %	
	Schachttüren 1	Drehtüren	Preissteigerung	3 % (Ersatzbeschaffung)	
	Schachttüren 2	nicht vorhanden	Preissteigerung	3 % (Energie)	
	Baujahr	bis 1970	Preissteigerung	2 % (Dienstleistung)	
Referenzfahrt (Wh)	150	Energiepreis (Strom)	0,2 €/kWh (Durchschnitt)		
Leistungsaufnahme Stillstand (W)	100				
Basisdaten Gebäude und Betreiber					
Gebäudetyp	Wohn-/Bürogebäude		Schachtkopf	verkürzt	
Nutzungskategorie	2		Schachtgrube	verkürzt	
Anzahl der Fahrten	100	pro Tag	Schachtgrube	über Fundament	
Anzahl der Störungen tatsächlich	3	pro Jahr	Maschinenraum	oben	
Anzahl der Störungen geduldet	2	pro Jahr	Wartungsart	Basiswartung	
Anzahl der Wartungen	3	pro Jahr			
Modernisierungsdaten Aufzug (bis zum Zeitpunkt der Datenaufnahme)					
Maschinenraum	Steuerung	Relais, vollmechanisch	Komp.-ID	Modernisierungsjahr	Ist-Zustand (nach Modernisierung)
	Regelung	keine Regelung, polumschaltbar	1	bis 1995	Mikroprozessor, Datenbus
	Antrieb	mit Getriebe	2	bis 1995	Phasenanschnittsregelung
	Treibscheibe	ungehärtet	3	bis 1995	mit Getriebe
	Ableitrolle	vorhanden	4	bis 1995	gehärtet
	Umlenkrolle/n	nicht vorhanden	5	bis 1995	vorhanden
	Geschwindigkeitsbegrenzer Kabine	vorhanden	6	keine Maßnahme	nicht vorhanden
	Geschwindigkeitsbegrenzer Gegengewicht	nicht vorhanden	7	bis 1995	vorhanden
	Notrufsystem/Übertragungsgerät	ohne Fernübertragung	8	keine Maßnahme	nicht vorhanden
	Fangrahmen	vorhanden	9	bis 2005	mit Fernübertragung
Fahrkorbeinsatz	Holz	10	keine Maßnahme	vorhanden	
Fangvorrichtung	ohne Fang nach oben	11	keine Maßnahme	Holz	
Führungen	Gleitführungen	12	keine Maßnahme	ohne Fang nach oben	
Umlenkrolle(n) Fahrkorb	nicht vorhanden	13	bis 2010	Gleitführungen	
Kabinentür 1	Falttür	14	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Kabinentürantrieb 1	ungeregelt	15	bis 1995	Schiebetür, einseitig öffnend	
Kabinentür 2	nicht vorhanden	16	bis 2010	geregelt	
Kabinentürantrieb 2	nicht vorhanden	17	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Innentableau 1	Quittierung mit Glühlampen	18	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Zusatzanzeigen	nicht vorhanden	19	bis 1995	Quittierung mit Glühlampen	
Innentableau 2	nicht vorhanden	20	keine Maßnahme	Standortanzeige	
Sprechstellen für Notruf	nicht vorhanden	21	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Beleuchtung	Leuchtstoff	22	bis 2005	im Fahrkorb	
Lüfter	nicht vorhanden	23	bis 2005	Leuchtstoff	
Fahrkorbverkleidung (innen)	Sonstiges	24	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Fußbodenbelag	leicht	25	bis 1995	Edelstahl	
Tragselle mit Aufhängungen	original	26	bis 1995	leicht	
Führungsschienen Gegengewicht	original	27	bis 1995	erneuert	
Gegengewicht	original	28	keine Maßnahme	original	
Fangvorrichtung Gegengewicht	nicht vorhanden	29	keine Maßnahme	original	
Führungen	Gleitführungen	30	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Umlenkrolle(n) Gegengewicht	nicht vorhanden	31	bis 1995	Gleitführungen	
Führungsschienen Fahrkorb	original	32	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Spannvorrichtung Begrenzerschlachse	ohne Spannungswichtschalter	33	keine Maßnahme	original	
Spannvorrichtung Begrenzerschlachse Gegengewicht	nicht vorhanden	34	bis 2005	mit Spannungswichtschalter	
Schachtbeleuchtung	nicht vorhanden	35	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Grubensteuerselle	nicht vorhanden	36	bis 1995	ausreichend	
Sprechstellen Schachtgrube	nicht vorhanden	37	bis 2005	mit Nothalt und Alarm	
Schachttüren 1	Drehtüren	38	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Außentableau 1	Quittierung mit Glühlampen	39	keine Maßnahme	Drehtüren	
Zusatzanzeigen 1	nicht vorhanden	40	bis 1995	Quittierung mit Glühlampen	
Schachttüren 2	nicht vorhanden	41	bis 1995	Weiterfahrtrichtungsanzeige	
Außentableau 2	nicht vorhanden	42	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Zusatzanzeigen 2	nicht vorhanden	43	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Puffer Kabine	nicht vorhanden	44	keine Maßnahme	nicht vorhanden	
Puffer Gegengewicht	nicht vorhanden	45	bis 2010	vorhanden	
		46	bis 2010	vorhanden	
Schachtausrüstung und Zugänge					

Methodenauswahl (eigene Darstellung)

Tool zur Bewertung der Instandhaltungskosten bestehender Aufzüge (V 1.0)								
Methodenauswahl								
		Fuzzy	VS	LD	NA	Komp.-ID		
Maschinenraum	Steuerung	x					1	
	Regelung	x					2	
	Antrieb		x				3	
	Treibscheibe		x				4	
	Ableitrolle		x				5	
	Umlenkrolle/n		x				6	
	Geschwindigkeitsbegrenzer Kabine		x				7	
	Geschwindigkeitsbegrenzer Gegengewicht		x				8	
	Notrufsystem/Übertragungsgerät				15		9	
	Fangrahmen					x	10	
	Fahrkorbeinsatz					x	11	
	Fangvorrichtung		x				12	
	Führungen		x				13	
	Umlenkrolle(n) Fahrkorb		x				14	
Fahrkorb	Kabinentür 1			10			15	
	Kabinentürantrieb 1		x				16	
	Kabinentür 2			10			17	
	Kabinentürantrieb 2		x				18	
	Innentableau 1			7			19	
	Zusatzanzeigen			x			20	
	Innentableau 2			7			21	
	Sprechstellen für Notruf			x			22	
	Beleuchtung			5,5			23	
	Lüfter		x				24	
	Fahrkorbverkleidung (innen)			5,5			25	
	Fußbodenbelag			5,5			26	
	Schachtausrüstung und Zugänge	Tragseile mit Aufhängungen		x				27
		Führungsschienen Gegengewicht				x		28
Gegengewicht					x		29	
Fangvorrichtung Gegengewicht			x				30	
Führungen			x				31	
Umlenkrolle(n) Gegengewicht			x				32	
Führungsschienen Fahrkorb					x		33	
Spannvorrichtung Begrenzerseil Kabine					x		34	
Spannvorrichtung Begrenzerseil Gegengewicht					x		35	
Schachtbeleuchtung				15			36	
Sprechstellen Schachtgrube				x			37	
Schachttüren 1				10			38	
Außentableau 1				7			39	
Zusatzanzeigen 1				x			40	
Schachttüren 2				10			41	
Außentableau 2			7			42		
Zusatzanzeigen 2			x			43		
Puffer Fahrkorb						44		
Puffer Gegengewicht						45		

Fuzzymodul zu Anwendungsbeispiel 1 (eig. Darst.)

WENN	UND	UND	UND	DANN
r				
hV	nSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
hV	nSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
hV	nSt	IS	pIR	
50	0	0	0	0
hV	nSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
mV	nSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
mV	nSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
mV	nSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
mV	nSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
mV	nSt	IS	pIR	
50	0	0	0	0
mV	nSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
mV	mSt	pIS	pIR	
50	50	50	0	0
mV	mSt	pIS	IR	
50	50	50	0	0
mV	mSt	IS	pIR	

50	50	0	0	0
mV	mSt	IS	IR	
50	50	0	0	0
mV	hSt	pIS	IR	
50	50	50	0	0
mV	hSt	IS	pIR	
50	50	0	0	0
mV	hSt	IS	IR	
50	50	0	0	0
nV	nSt	unS	unR	
0	0	50	100	0
nV	nSt	unS	pIR	
0	0	50	0	0
nV	nSt	unS	IR	
0	0	50	0	0
nV	nSt	pIS	unR	
0	0	50	100	0
nV	nSt	pIS	pIR	
0	0	50	0	0
nV	nSt	pIS	IR	
0	0	50	0	0
nV	nSt	IS	unR	
0	0	0	100	0
nV	nSt	IS	pIR	
0	0	0	0	0
nV	nSt	IS	IR	
0	0	0	0	0
nV	mSt	pIS	pIR	
0	50	50	0	0
nV	mSt	pIS	IR	

Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis

0	50	50	0	0
nV	mSt	IS	pIR	
0	50	0	0	0
nV	mSt	IS	IR	
0	50	0	0	0
nV	hSt	pIS	pIR	
0	50	50	0	0
nV	hSt	pIS	IR	
0	50	50	0	0
nV	hSt	IS	pIR	
0	50	50	0	0
nV	hSt	IS	IR	
0	50	50	0	0
Faktor für r				0
R				
hV	nSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
hV	nSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
hV	mSt	IS	unR	
50	50	0	100	0
hV	mSt	IS	pIR	
50	50	0	0	0
hV	mSt	IS	IR	
50	50	0	0	0
mV	nSt	unS	pIR	
50	0	50	0	0
mV	nSt	unS	IR	
50	0	50	0	0
mV	mSt	unS	pIR	

50	50	50	0	0
mV	mSt	unS	IR	
50	50	50	0	0
mV	mSt	pIS	unR	
50	50	50	100	50
mV	mSt	IS	unR	
50	50	0	100	0
mV	hSt	pIS	unR	
50	50	50	100	50
mV	hSt	pIS	pIR	
50	50	50	0	0
mV	hSt	IS	unR	
50	50	0	100	0
nV	mSt	pIS	unR	
0	50	50	100	0
nV	mSt	IS	unR	
0	50	0	100	0
nV	hSt	pIS	unR	
0	50	50	100	0
nV	hSt	IS	unR	
0	50	0	100	0
Faktor für R				50
SR				
hV	nSt	unS	pIR	
50	0	50	0	0
hV	nSt	unS	IR	
50	0	50	0	0
hV	mSt	unS	unR	
50	50	50	100	50
hV	mSt	unS	pIR	

Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis

50	50	50	0	0
hV	mSt	unS	IR	
50	50	50	0	0
hV	mSt	pIS	unR	
50	50	50	100	50
hV	mSt	pIS	pIR	
50	50	50	0	0
hV	mSt	pIS	IR	
50	50	50	0	0
hV	hSt	unS	unR	
50	50	50	100	50
hV	hSt	unS	pIR	
50	50	50	0	0
hV	hSt	unS	IR	
50	50	50	0	0
hV	hSt	pIS	unR	
50	50	50	100	50
hV	hSt	pIS	pIR	
50	50	50	0	0
hV	hSt	pIS	IR	
50	50	50	0	0
hV	hSt	IS	unR	
50	50	0	100	0
hV	hSt	IS	pIR	

50	50	0	0	0
hV	hSt	IS	IR	
50	50	0	0	0
mV	nSt	unS	unR	
50	0	50	100	0
mV	hSt	unS	unR	
50	50	50	100	50
mV	hSt	unS	pIR	
50	50	50	0	0
mV	hSt	unS	IR	
50	50	50	0	0
nV	mSt	unS	unR	
0	50	50	100	0
nV	mSt	unS	pIR	
0	50	50	0	0
nV	mSt	unS	IR	
0	50	50	0	0
nV	hSt	unS	unR	
0	50	50	100	0
nV	hSt	unS	pIR	
0	50	50	0	0
nV	hSt	unS	IR	
0	50	50	0	0
Faktor für SR				50

Fuzzymodul zu Anwendungsbeispiel 2 (eig. Darst.)

WENN	UND	UND	UND	DANN
r				
hV	nSt	pIS	pIR	
50	100	50	0	0
hV	nSt	pIS	IR	
50	100	50	0	0
hV	nSt	IS	pIR	
50	100	0	0	0
hV	nSt	IS	IR	
50	100	0	0	0
mV	nSt	pIS	unR	
50	100	50	100	50
mV	nSt	pIS	pIR	
50	100	50	0	0
mV	nSt	pIS	IR	
50	100	50	0	0
mV	nSt	IS	unR	
50	100	0	100	0
mV	nSt	IS	pIR	
50	100	0	0	0
mV	nSt	IS	IR	
50	100	0	0	0
mV	mSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
mV	mSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
mV	mSt	IS	pIR	

50	0	0	0	0
mV	mSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
mV	hSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
mV	hSt	IS	pIR	
50	0	0	0	0
mV	hSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
nV	nSt	unS	unR	
0	0	50	100	0
nV	nSt	unS	pIR	
0	100	50	0	0
nV	nSt	unS	IR	
0	100	50	0	0
nV	nSt	pIS	unR	
0	100	50	100	0
nV	nSt	pIS	pIR	
0	100	50	0	0
nV	nSt	pIS	IR	
0	100	50	0	0
nV	nSt	IS	unR	
0	100	0	100	0
nV	nSt	IS	pIR	
0	100	0	0	0
nV	nSt	IS	IR	
0	100	0	0	0
nV	mSt	pIS	pIR	
0	0	50	0	0
nV	mSt	pIS	IR	

Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis

0	0	50	0	0
nV	mSt	IS	pIR	
0	0	0	0	0
nV	mSt	IS	IR	
0	0	0	0	0
nV	hSt	pIS	pIR	
0	0	50	0	0
nV	hSt	pIS	IR	
0	0	50	0	0
nV	hSt	IS	pIR	
0	0	0	0	0
nV	hSt	IS	IR	
0	0	0	0	0
Faktor für r				50
R				
hV	nSt	pIS	unR	
50	100	50	100	50
hV	nSt	IS	unR	
50	100	0	100	0
hV	mSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
hV	mSt	IS	pIR	
50	0	0	0	0
hV	mSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
mV	nSt	unS	pIR	
50	100	50	0	0
mV	nSt	unS	IR	
50	100	0	0	0
mV	mSt	50	pIR	

50	0		0	0
mV	mSt	50	IR	
50	0		0	0
mV	mSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
mV	mSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
mV	hSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
mV	hSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
mV	hSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
nV	mSt	pIS	unR	
0	0	50	100	0
nV	mSt	IS	unR	
0	0	0	100	0
nV	hSt	pIS	unR	
0	0	50	100	0
nV	hSt	IS	unR	
0	0	0	100	0
Faktor für R				50
SR				
hV	nSt	unS	pIR	
50	100	50	0	0
hV	nSt	unS	IR	
50	100	50	0	0
hV	mSt	unS	unR	
50	0	50	100	0
hV	mSt	unS	pIR	

Anhang C: Mögliche Umsetzung des Planungshilfsmittels auf Excel™-Basis

50	0	50	0	0
hV	mSt	unS	IR	
50	0	50	0	0
hV	mSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
hV	mSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
hV	mSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
hV	hSt	unS	unR	
50	0	50	100	0
hV	hSt	unS	pIR	
50	0	50	0	0
hV	hSt	unS	IR	
50	0	50	0	0
hV	hSt	pIS	unR	
50	0	50	100	0
hV	hSt	pIS	pIR	
50	0	50	0	0
hV	hSt	pIS	IR	
50	0	50	0	0
hV	hSt	IS	unR	
50	0	0	100	0
hV	hSt	IS	pIR	
50	0	0	0	0

hV	hSt	IS	IR	
50	0	0	0	0
mV	mSt	unS	unR	
50	0	50	100	0
mV	hSt	unS	unR	
50	0	50	100	0
mV	hSt	unS	pIR	
50	0	50	0	0
mV	hSt	unS	IR	
50	0	50	0	0
nV	mSt	unS	unR	
0	0	50	100	0
nV	mSt	unS	pIR	
0	0	50	0	0
nV	mSt	unS	IR	
0	0	50	0	0
nV	hSt	unS	unR	
0	0	50	100	0
nV	hSt	unS	pIR	
0	0	0	0	0
nV	hSt	unS	IR	
0	0	0	0	0
Faktor für SR				0

VS- und LD-Modul (eigene Darstellung)

Tool zur Bewertung der Instandhaltungskosten bestehender Aufzüge (V 1.0)							
Ersatz nach Verschleiß und technischen Lebensdauern							
		Komp.-ID	Ersatzhäufigkeit VS	Ersatzhäufigkeit LD	Ersatz nach DIN EN 81-80		
Maschinenraum	Steuerung	1					
	Regelung	2					
	Antrieb	3	0				
	Treibscheibe	4	0				
	Ableitrolle	5	0				
	Umlenkrolle/n	6	0				
	Geschwindigkeitsbegrenzer Kabine	7	0				
	Geschwindigkeitsbegrenzer Gegengewicht	8	0				
	Notrufsystem/Übertragungsgerät	9			2		
	Fangrahmen	10			LD Gesamtsystem		
Fahrkorb	Fahrkorbeinsatz	11			3		
	Fangvorrichtung	12	1				
	Führungen	13	0				
	Umlenkrolle(n)	14	0				
	Kabinentür 1	15			3		
	Kabinentürantrieb 1	16	0				
	Kabinentür 2	17			3		
	Kabinentürantrieb 2	18	0				
	Innentableau 1	19			4		
	Zusatzanzeigen	20			4		
	Innentableau 2	21			4		
	Sprechstellen für Notruf	22			2		
	Beleuchtung	23			5		
	Lüfter	24	2,16				
	Fahrkorbverkleidung (innen)	25			5		
	Schachtausrüstung und Zugänge	Fußbodenbelag	26			5	
Tragsaile mit Aufhängungen		27	0				
Führungsschienen Gegengewicht		28			LD Gesamtsystem		
Gegengewicht		29			LD Gesamtsystem		
Fangvorrichtung Gegengewicht		30	1				
Führungen		31	0				
Umlenkrolle Gegengewicht		32	0				
Führungsschienen Fahrkorb		33			LD Gesamtsystem		
Spannvorrichtung Begrenzerseil Kabine		34			LD Gesamtsystem		
Spannvorrichtung Begrenzerseil Gegengewicht		35			LD Gesamtsystem		
Schachtbeleuchtung		36			2		
Sprechstellen Schachtgrube		37			2		
Grubensteuerstelle		38					
Schachttüren 1		39			3		
Außentableau 1	Außentableau 1	40			4		
	Zusatzanzeigen 1	41			4		
	Schachttüren 2	Schachttüren 2	42			3	
		Außentableau 2	43			4	
	Zusatzanzeigen 2	44			4		
	Puffer Fahrkorb	45			2		
	Puffer Gegengewicht	46			2		

Anhang D: Systemabgrenzung

Vorab festgestellt, ist die Schachtlüftung und damit verbundene Lüftung des Fahrkorbs notwendig, um den Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atemluft während des normalen Betriebes und bei einem außerplanmäßigen Halt des Fahrkorbs zwischen zwei Haltestellen (z.B. bei einer Störung) zu begrenzen. Die Notwendigkeit einer Schachtrauchung ergibt sich u.a. aus der Tatsache, dass Schachttüren konstruktionsbedingt nie luftdicht sind. Ohne vorhandene Schachtrauchung wird der Aufzugsschacht im Brandfall zu einer möglichen Ursache für eine ungehinderte Ausbreitung von Brandrauch über – im ungünstigsten Fall – alle Stockwerke des Gebäudes.

Ausschlaggebend für Art und Ausführung der Belüftung und Entrauchung von Aufzugsschächten sind u.a. das jeweils gültige Baurecht, Normungen zur Ausführung und zum Betrieb von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) sowie die für Aufzüge relevante Gesetzgebung und Normung zum Stand der Technik. Gesetzliche und baulich sinnvolle Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden sind dabei zu beachten.

Baurecht und Normung für Rauch- und Wärmefreihaltung

Die MBO gibt vor, dass Fahrschächte zu lüften sein müssen und eine Öffnung zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von mindestens 2,5 v.H. der Fahrschachtgrundfläche, jedoch mit mindestens 0,1 m² vorhanden sein muss (§ 39 Abs. 3, [17]). Des Weiteren darf diese Öffnung einen Abschluss haben, der im Brandfall selbsttätig öffnet und von mindestens einer geeigneten Stelle aus bedient werden kann. In 15 Landesbauordnungen werden diese Vorgaben mindestens sinngemäß übernommen. Eine Ausnahme bildet die LBO von Baden-Württemberg [19], in

der Schachtrauchung und -entlüftung nicht erwähnt wird. Die Vorgaben finden sich hier in der Ausführungsverordnung zur Landesbauordnung (LBOAVO, § 14 Abs. 3 [131]). Da Schachtrauchungen insgesamt der Wärme- und Rauchfreihaltung von Gebäuden dienen, ist in diesem Zusammenhang auch die Relevanz der Normenreihe DIN 18232 festzustellen [132]. Spezifische Anforderungen an die Instandhaltung (und damit die Einflussnahme auf deren Kosten) sowie das Zusammenspiel mit Löschanlagen sowie die gebäudeseitige Ansteuerung der RWA-Anlage werden darin behandelt.

Allgemeine Gesetzgebung und Normung für Aufzüge

Die DIN EN 81-20 [72] gibt in Abschnitt 5.4.9 vor, dass Fahrkörbe mit Lüftungsöffnungen versehen sein müssen, deren wirksame Flächen im oberen und im unteren Bereich mindestens 1 % der Fahrkorbgrundfläche betragen müssen. Spezifische Anforderungen zu Art und Ausführung der Belüftung des Schachtes werden in dieser Norm nicht genannt. Vielmehr wird im Anhang E.3 (Schnittstelle zum Gebäude) auf die Notwendigkeit der Belüftung von Schacht und Fahrkorb hingewiesen in Abhängigkeit vielfältiger Einflussfaktoren, wie z.B. einige hier ausgewählte:

- Umgebungstemperatur,
- Luftqualität,
- Querschnitt und Höhe des Schachts,
- Brandbekämpfungs- und Rauchabzugsstrategien,
- Luftdichtheit des Schachts und des Gebäudes.

Zusammenfassend werden dem Errichter des Aufzugs und der für die Arbeiten am Gebäude oder Bauwerk verantwortlichen Person nahegelegt, so wörtlich: „...sich untereinander auf dem Laufenden zu halten und geeignete Schritte zu unternehmen, um den ordnungsgemäßen Betrieb und eine sichere Nutzung und Wartung des Aufzugs in dem Gebäude sicherzustellen.“ In diesem Zusam-

menhang sei auch auf die aktuelle Anwendungsrichtlinie 02/027 (RFU) der Europäischen Kommission hingewiesen, die die Entscheidung für eine geeignete Belüftung des Schachtes als Schnittstelle zwischen Aufzug und Gebäude in die Hände des Errichters legt (enthalten in [133]).

Die mit der aktuellen BetrSichV [13] wieder eingeführte Prüfung vor der erstmaligen Inbetriebnahme soll sicherstellen, dass der Aufzug bis zur nächsten Prüfung sicher verwendet werden kann. Aufzugsexterne Sicherheitseinrichtungen, die für die sichere Verwendung der Aufzugsanlage erforderlich sind, müssen in die Prüfung einbezogen werden. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass sich aus Gesetzgebung und Normung die Notwendigkeit einer Schachtbelüftung und -entrauchung ergibt. Wiederkehrende Prüfungen und die Pflicht zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung gemäß BetrSichV (insbesondere wenn Aufzüge von Arbeitgebern als Arbeitsmittel zur Verfügung gestellt werden) sollen die Aufrechterhaltung des bei Inbetriebnahme als sicher beurteilten Zustandes gewährleisten. Die zuletzt genannten Regelungen sind insbesondere für bestehende Gebäude entscheidend, in denen die ausreichende (natürliche) Belüftung des Schachtes ursprünglich sichergestellt war, jedoch durch nachträgliche Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes durch eine verbesserte Luftdichtheit der Gebäudehülle ein notwendiger Auftrieb der Luft im Schacht mangels nachströmender Luft aus dem Gebäude zunächst nicht mehr sichergestellt ist. In diesem Falle werden unter Umständen sogar erweiterte Lösungen mit kontrollierter Zu- und Abluft im Schacht notwendig.

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [134] regelt in Abschnitt 3.6, dass in Arbeitsräumen während der Nutzungsdauer ausreichend für die Gesundheit zuträgliche Luft vorhanden sein muss. Zudem wird festgehalten, dass, wenn raumluftechnische Anlagen vorhanden sind, diese jederzeit funktionsfähig sein müssen. Obwohl Aufzüge in der ArbStättV nicht explizit genannt

werden, ist ein weiterer sachlicher Zusammenhang erkennbar, der die prinzipielle Notwendigkeit und den Funktionserhalt der Belüftung des Fahrkorbs und damit dem Schacht zeigt, sofern der Aufzug von Arbeitnehmern genutzt wird. Die Nutzung von Arbeitnehmern ist schon alleine durch die Anwesenheit von Servicepersonal einer Wartungsfirma zu unterstellen, weshalb diese Auslegung prinzipiell auf alle Aufzüge, auch in Wohngebäuden, übertragen werden kann – auch dann, wenn der Betreiber nicht selbst der Arbeitgeber ist.

Baulicher Wärmeschutz

Die aktuelle EnEV [130] definiert in Anlage 4 die Anforderungen an die Dichtheit des gesamten Gebäudes. Für den Nachweis ist nach Verfahren B (Prüfung der Gebäudehülle) gemäß DIN EN 13829-2001:02 vorzugehen. Darin steht: „Alle absichtlich vorhandenen Öffnungen in der Gebäudehülle werden entsprechend [...] geschlossen oder abgedichtet.“ Hieraus geht demzufolge nicht hervor, dass vorhandene Öffnungen (z.B. dauernd geöffnete für Schachtenlüftung und -entrauchung) im Normalbetrieb des Gebäudes geschlossen sein müssen und nur bei Bedarf geöffnet werden dürfen. Unabhängig von der hier dargestellten Auslegung der EnEV und der darin angeführten Norm zur Dichtheit gibt es jedoch sinnvolle technische Möglichkeiten, die Öffnungen für Schachtentlüftung und -entrauchung bedarfsgerecht zu steuern und somit Lüftungswärmeverluste in diesem Bereich zu vermeiden bzw. zu reduzieren.

Zu dem im Hauptteil der vorliegenden Arbeit behandelten Energie- und Instandhaltungsaufwand von Aufzügen sollen die in diesem (als Exkurs zu verstehenden) Anhang aufgeführten Zusammenhänge hiermit eindeutig abgegrenzt werden, d.h. die Lüftungstechnische Schnittstelle wurde im Hauptteil der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Die Möglichkeit, diese in spätere Untersuchungen durch Erweiterung der Systemgrenze

mit einzubeziehen, wird an dieser Stelle jedoch nicht ausgeschlossen und bedarf weiterer Diskussion. Abbildung 0.1 zeigt die oben erläuterten Zusammenhänge im Überblick. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Einschätzung vom Deutschen Institut für Bautechnik verwiesen (Zitat¹¹⁷): „Damit kann bei derartigen Öffnungen/Einrichtungen die Dichtigkeit der wärmetauschenden Umfassungsfläche hinreichend sichergestellt werden, obgleich die EnEV dies gesetzlich nicht fordert.“

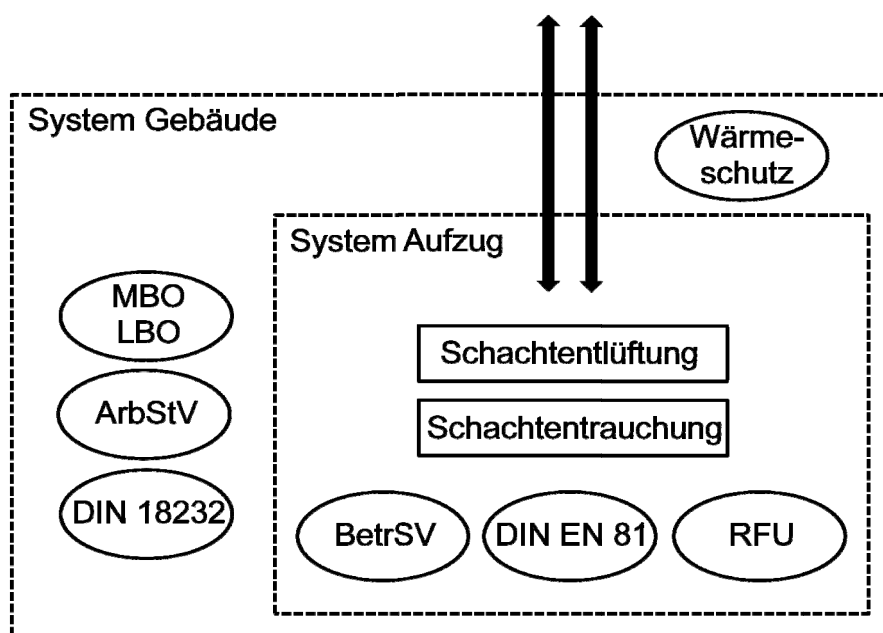


Abbildung 0.1: Schnittstelle Aufzug-Gebäude aus lüftungstechnischer Sicht (Quelle: eigene Darstellung)

¹¹⁷ <https://www.dibt.de/de/Service/Dokumente-Listen-EnEV.html> (21. Staffel, Seite 5, zuletzt geprüft am 20.08.2018)