

MODELLIERUNG UND BEWERTUNG DER RESILIENZ GEKOPPELTER ENERGIESYSTEME

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Anne Senkel

aus Oschatz

2022

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz
2. Gutachterin: Prof. Dr. Irene Peters
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
Tag der mündlichen Prüfung: 01.07. 2022

Autorin: <https://orcid.org/0000-0003-3943-3818>
DOI: <https://doi.org/10.15480/882.4472>
Handle: <http://hdl.handle.net/11420/13170>
URN: <urn:nbn:de:gbv:830-882.0191417>

Creative Commons Lizenz

Diese Arbeit steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY4.0). Das bedeutet, dass sie vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets die Urheberin, die Quelle des Textes und o.g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann unter <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de> aufgerufen werden.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit hätte nicht vollendet werden können ohne die Unterstützung meiner Kolleg:innen, Familie und Freunde.

Besonderer Dank gilt:

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz für die Inspiration, die langjährige Förderung und Betreuung. Vielen Dank für spannende wissenschaftliche Diskussionen, Ihre Offenheit für neue Ideen und Ihr Vertrauen in mich und meine Forschung.
Frau Prof. Dr. Irene Peters für den fruchtbaren Austausch und die intensive Auseinandersetzung mit meiner Dissertation als Zweitgutachterin. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker für die hervorragende Zusammenarbeit im Forschungsprojekt ResiliEntEE und die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.
- Dr.-Ing. Carsten Bode für fünf Jahre gemeinsame Forschungsarbeit und aufschlussreichen Austausch. Jan-Peter Heckel, Dr.-Ing. Oliver Schülting, Jan Westphal und den Mitarbeitern des Fraunhofer UMSICHT, des GWIs und der XRG Simulation GmbH für die beharrliche Zusammenarbeit zur Weiterentwicklung der TransiEnt Library. Des Weiteren sei allen Kolleg:innen am Institut für Technische Thermodynamik für die gemeinsame Zeit gedankt, insbesondere Kathrin Orłowski für ihren Weitblick und ihre stets helfende Hand.
- Jan-Simon Telle, der sich nicht nur um mein seelisches und leibliches Wohl sorgte, sondern mit seiner herausragenden Expertise wertvollen Input zu dieser Thesis beisteuerte. Deine Liebe und dein unerschütterlicher Glaube an mich lassen diese Arbeit unser beider Erfolg werden.
- meinen Eltern für ihr Vertrauen in mich und ihren bedingungslosen Rückhalt, meinen Geschwistern und deren Partnern sowie der gesamten Familie Senger-Telle für Gespräche, Ausflüge und Arbeitseinsätze weit abseits der Energiesystemanalyse. Meinen Neffen und Nichten sei für deren Liebe und Zutrauen gedankt, die mir trotz geografischer Distanz stets präsent und eine große Stütze sind.
- Katharina, Leopold und Bernhard, meinen unvermeidlichen Sozialkontakten, deren liebevolle Unterstützung, Rückhalt und anästhetisches Fachwissen mir die Kraft zur Vollendung dieser Thesis gaben.
- Annalena, Kristina und Claudia, die mir stets Vorbild und Inspiration sind und von denen ich so viel mehr als eine geschmeidige Rückhand lernen durfte.

Des Weiteren sei allen Wegbegleiter:innen, Freund:innen und Familienangehörigen für ihr stetes Interesse und ihre Unterstützung gedankt.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch Megatrends wie Urbanisierung, Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung entwickeln sich Energieversorgungssysteme aktuell rasant weiter. Nicht selten kommt es dabei zu einem tiefgreifenden System- und Strukturwandel. Dabei entstehen dynamische und komplexe Systeme, deren Interaktionen und Reaktionen auf innere und äußere Einflüsse nicht ohne Weiteres vorherzusehen sind. Neben Effizienz und Nachhaltigkeit wird von diesen Energieversorgungssystemen zunehmend Resilienz als Kerneigenschaft gefordert. Dabei wird der Begriff Resilienz jedoch oft als allgemeines Schlüsselwort ohne klar festgelegte Definition verwendet. Dies hat zur Folge, dass unterschiedliche Fachrichtungen Resilienz unterschiedlich definieren und bewerten. Die Energiesystemanalyse steht daher vor der Herausforderung, aus der Vielfalt der vorhandenen Ansätze Analyseinstrumente abzuleiten und in ihre oftmals bereits bestehenden Modelle zu integrieren.

In dieser Arbeit wird eine Bewertungsmethodik präsentiert, die dynamische Simulationsergebnisse nutzt, um die Resilienz gekoppelter Energiesysteme quantifizierbar und somit vergleichbar zu machen. Dafür werden zunächst existierende Sichtweisen und Ansätze verglichen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf dynamische Simulationsergebnisse beurteilt. Die auf der Auswertung des Resilienzdreiecks basierende Bewertungsmethodik von Nan und Sansavini stellte sich hierbei als am besten geeignet dar.

Im zweiten Teil der Arbeit werden zunächst die Besonderheiten der dynamischen Simulation gekoppelter Energiesysteme präsentiert und im Anschluss für die Sektoren Gas, Wärme und Strom die übertragenen Energieströme als geeignete Größen zur Bewertung der Resilienz hergeleitet. Daraufhin werden entsprechende Anpassungen an der Bewertungsmethodik vorgenommen, um dem Einfluss thermischer Trägheiten, dem Vorhandensein mehrerer Verbraucher und weiteren Besonderheiten gerecht zu werden. Außerdem werden Empfehlungen zur Wahl der Normierungs- und Toleranzwerte gegeben.

Im letzten Teil der Arbeit wird anhand eines generischen gekoppelten Energieversorgungssystems die Anwendbarkeit der Methodik demonstriert. Es wird gezeigt, dass der Resilienzindex das physikalische Antwortverhalten des betrachteten Systems wiedergibt. Dabei spiegelt der Resilienzindex einzig die ausreichende Versorgung der Verbraucher wider, weshalb sich vor allem für das elektrische Netz eine ergänzende Stabilitätsbetrachtung empfiehlt. Es wird deutlich, dass sich der Resilienzindex zum Vergleich und zur Bewertung technischer Systeme eignet und sich perspektivisch mit soziologischen und ökonomischen Bewertungsmethoden verbinden lässt, um somit die Resilienz eines Energieversorgungssystems ganzheitlich bewerten zu können.

INHALT

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Hintergrund.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Entwicklung und Verwendung des Begriffs Resilienz.....	3
2.1 Historische Entwicklung und Hintergrund	3
2.1.1 Entwicklung bis 1970	4
2.1.2 Das Resilienzkonzept nach Holling	5
2.1.3 Aktuelle Entwicklungen.....	9
2.2 Verwendung des Resilienzkonzeptes in der Energiesystemanalyse	13
2.2.1 Entwicklung und Verwendung des Begriffes Resilienz in der Energietechnik seit 1970	13
2.2.2 Terminologie und Abgrenzung	15
2.3 Bewertungsmethoden der Resilienz von Energiesystemen.....	20
2.3.1 Qualitative Bewertungsmethoden.....	22
2.3.2 Quantitative Bewertungsmethoden.....	23
2.3.3 Semiquantitative Bewertungsmethoden	27
2.3.4 Resilienzmanagement	29
3 Herleitung der Bewertungsmethodik für dynamische Simulationen	31
3.1 Systemsimulation mit Modelica.....	31
3.2 Auswahl eines geeigneten Measure of Performance.....	37
3.2.1 Wärmesektor	37
3.2.2 Gassektor	41
3.2.3 Stromsektor.....	45
3.3 Anpassungen in der Bewertungsmethodik.....	49
3.3.1 Elemente der Resilienzformel	49
3.3.2 Einfluss des Performanzverlustes	53
3.3.3 Kombination mehrerer Resilienzindizes	55

3.4	Parametrisierung der Bewertungsmethodik	58
3.4.1	Auswahl der Normierungsgrößen	58
3.4.2	Auswahl des Toleranzbereichs	61
4	Anwendung der Bewertungsmethodik.....	65
4.1	Das Referenzsystem	65
4.1.1	Modellaufbau	67
4.1.2	Systemantwort des Referenzsystem.....	72
4.2	Resilienzinterventionsmaßnahmen.....	76
4.2.1	Szenario <i>Speicher</i>	77
4.2.2	Szenario <i>Dispersion</i>	80
4.2.3	Szenario <i>Diversität</i>	83
4.3	Systemantworten der Szenarien.....	86
4.3.1	Systemantwort im Szenario <i>Speicher</i>	86
4.3.2	Systemantwort im Szenario <i>Dispersion</i>	89
4.3.3	Systemantwort im Szenario <i>Diversität</i>	91
4.4	Auswertung der Resilienzindizes.....	94
4.4.1	Auswertung der Sektorenindizes.....	95
4.4.2	Resilienzbewertung der Szenarien.....	97
4.5	Diskussion der Ergebnisse.....	100
5	Fazit und Ausblick.....	103
6	Literaturverzeichnis.....	107

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Symbole

A	Fläche
f	Frequenz
GR	General Resilience
k	Proportionalitätsfaktor
MD	Maximum Deviation / Maximale Abweichung
MOP	Measure of Performance
n	Anzahl
P	Wirkleistung
PL	Performance Loss / Performanzverlust
Q	Systemdienstleistungsfähigkeit; Wärmestrom
R	Resilienz
RAPI	Rapidität; Robustheit
RI	Resilienzindex
RT	Recovery Time / Erholzeit
t	Zeit
TAPL	Time Averaged Performance Loss / Zeitlich gemittelter Performanzverlust
x	charakteristische Größe

Abkürzungen

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
G	Gewerbe
GuD-Kraftwerk	Gas- und Dampfkraftwerk
H	Haushalt
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
L	Landwirtschaft
PV	Photovoltaik
SLP	Standardlastprofil

Indizes

ns	New State / Neuer Zustand (nach Erholung)
r	Recovery / Erholung
0	Startzustand; Sollwert
d	Disturbance / Störung
DP	Disturbance Phase / Störungsphase
el	elektrisch
GCV	Gross Calorific Value / Brennwert
max	Maximal-
min	Minimal-
norm	Norm-
pf	Leistung-Frequenz
RP	Recovery Phase / Erholungsphase
sek	Sektor
soll	Soll-
th	thermisch
tol	Toleranz-
V	Verbraucher

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Historische Entwicklung der Verwendung des Resilienzbegriffs	4
Abbildung 2: Darstellung der <i>Technischen Resilienz</i> mit einem Gleichgewichtszustand nach Holling (1973),	6
Abbildung 3: Darstellung der <i>Ökologischen Resilienz</i> mit mehreren möglichen Gleichgewichtszuständen nach Holling (1973),	7
Abbildung 4: „Black Swan“ Ereignisse seit 1970 nach Taleb (2008)	10
Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl der Publikationen zum Thema "resilience"	12
Abbildung 6: Entgegengesetzte Herangehensweisen des Risikomanagements und der Vulnerabilitätsanalyse	17
Abbildung 7: Vergleich des Top-Down-Ansatz in der Resilienzbetrachtung mit dem Bottom-Up-Ansatz der Risikoanalyse.....	18
Abbildung 8: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien resilienter Systeme	22
Abbildung 9: Allgemeine Systemantwort auf eine Störung inklusive der verschiedenen Vokabeln zur Beschreibung der unterschiedlichen Phasen.....	24
Abbildung 10: Resilienzdreieck	25
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf des "Measure of Performance"	26
Abbildung 12: Hauptkategorien und Schlüsselfähigkeiten resilienter Systeme	28
Abbildung 13: Resilienzmanagementkonzept nach Häring et al. (2017).....	30
Abbildung 14: Vergleich der stationären, quasistationären und dynamischen Modellierung des Wärmebedarfs zum Aufheizen eines Gebäudes	32
Abbildung 15: Verhalten der Vor- und Rücklauftemperaturen bei Ausfall des Wärmeerzeugers	33
Abbildung 16: Struktur der TransiEnt Library	36
Abbildung 17: Modellaufbau eines charakteristischen Heizkreislaufs eines Wohnhauses mit Wärmepumpe	37
Abbildung 18: Reaktion des Heizkreislaufs auf den Ausfall der Wärmepumpe (a-c) und den Ausfall der Umwälzpumpe (d-f).....	40

Abbildung 19: Modellaufbau einer Gasnetzmasche mit Abzweigungen.....	42
Abbildung 20: Reaktion des Gasnetzes auf den Ausfall der Gasleitung	44
Abbildung 21: Zeitliche Einordnung von Phänomenen im elektrischen und thermophysikalischen Energietransport.....	45
Abbildung 22: Modellaufbau des elektrischen Beispielmodells	46
Abbildung 23: Reaktion des elektrischen Systems	48
Abbildung 24: Realer Kurvenverlauf einer charakteristischen Größe (links) und ihr normierter Kurvenverlauf (rechts)	50
Abbildung 25: Störantwort eines Systems mit den für die Berechnung des Resilienzindex relevanten Größen.....	51
Abbildung 26: Grenzfälle in der Resilienzbeurteilung.....	53
Abbildung 27: Generische Systemantworten auf Störfälle (oben) und die sich einstellenden Resilienzindizes in Abhängigkeit zu RT für $MD = 1$	54
Abbildung 28: Beispielmodell zur Kombination der Resilienzindizes mehrerer Verbraucher	56
Abbildung 29: Darstellung der Bestimmung von MD bei nicht konstanten MOP - Verläufen.....	59
Abbildung 30: Darstellung des Normalisierungswertes Δt_{norm}	60
Abbildung 31: Darstellung des Normalisierungswertes A_{norm}	60
Abbildung 32: Einfluss des Toleranzbandes auf die Elemente des Resilienzindex.....	61
Abbildung 33: Resilienzelemente und -indizes in Abhängigkeit von x_{min} für die Toleranzbereiche $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$	62
Abbildung 34: Rechteckige Systemantwort mit von der Breite des Toleranzbandes unabhängigem Resilienzindex 0,5	64
Abbildung 35: Modellübersicht des Referenzsystems. Energiebereitsteller sind blau hinterlegt.	66
Abbildung 36: P-Q-Diagramm des GuD-Kraftwerks	68
Abbildung 37: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Referenzszenario	74
Abbildung 38: Verschiebung des Betriebsbereichs während der Störung.....	75

Abbildung 39: Systemanpassungen im Szenario <i>Speicher</i>	78
Abbildung 40: Resilienzerhöhung durch Speicherintegration pro investierte 100 €	79
Abbildung 41: Verläufe der Raumtemperatur und des übertragenen Wärmestroms für die betrachteten Speichervarianten für den Wärmeverbraucher im Südosten	79
Abbildung 42: Zentrale (oben) und dezentrale (unten) Versorgung des südlichen Wohngebietes	81
Abbildung 43: Vergleich der Wärmeströme Temperaturen für die zentrale und dezentrale Versorgung des südlichen Wohngebietes	82
Abbildung 44: Bestimmung des Bivalenzpunktes nach ökonomischen Kriterien	83
Abbildung 45: Modellaufbau des Szenarios <i>Diversität</i>	85
Abbildung 46: Gegenüberstellung der Resilienzindizes der Sektoren Wärme und Strom für unterschiedlich große Wärmepumpen	86
Abbildung 47: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Szenario <i>Speicher</i>	87
Abbildung 48: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Szenario <i>Dispersion</i>	90
Abbildung 49: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Szenario <i>Diversität</i>	92
Abbildung 50: Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch im entsprechenden Sektor	94
Abbildung 51: Vergleich der Szenarien anhand der Sektorenresilienzindizes	96

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Merkmale der Technischen und Ökologischen Resilienz	8
Tabelle 2: Definition der Resilienz in unterschiedlichen Forschungsfeldern.....	11
Tabelle 3: Vergleich der Termini Resilienz, Vulnerabilität, Risikomanagement und Versorgungssicherheit	15
Tabelle 4: Vergleich der Bewertungsmethoden.....	21
Tabelle 5: Resilienzmatrix nach Roege et al. (2014)	29
Tabelle 6: Parameter des modellierten Heizkreislaufs.....	38
Tabelle 7: Parameter des Gasmodells	43
Tabelle 8: Parameter des elektrischen Systems.....	47
Tabelle 9: Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Verbraucherindizes.....	56
Tabelle 10: Resilienzelemente und -indizes für $x_{min} = 0,3$	63
Tabelle 11: Energetische Kennzahlen der Stadt Oldenburg	66
Tabelle 12: Parameter des Referenzszenarios.....	69
Tabelle 13: Resilienzinterventionsmaßnahmen und deren Einordnung.....	77
Tabelle 14: Parameter und Resilienzindizes der betrachteten Speichervarianten.....	78
Tabelle 15: Resilienzindizes der Verbraucher und Sektoren.....	95

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation und Hintergrund

Durch Megatrends wie Urbanisierung, Dekarbonisierung, Dezentralisierung, steigende Vernetzung und Digitalisierung entwickeln sich Energiesysteme aktuell rasant weiter (Agora Energiewende 2019). Nicht selten kommt es dabei zu einem tiefgreifenden System- und Strukturwandel. Dabei entstehen dynamische und komplexe Systeme, deren Interaktionen und Reaktionen auf innere und äußere Einflüsse nicht ohne Weiteres vorherzusehen sind.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der Bevölkerung vom Energiesektor ist dieser als kritische Infrastruktur zu definieren, also ein System, das „von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung ist“ (Rat der Europäischen Union 23.12.2008, Artikel 2a) und dessen (Zer-)Störung erhebliche Auswirkungen hätte. Jede Entwicklung und Systemänderung bedarf daher sorgfältiger Begleitung, um die ausreichende Versorgung mit lebensnotwendigen Gütern wie Strom, Wärme und Wasser zu jeder Zeit zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Resilienzforschung seit der Jahrtausendwende zunehmend an Bedeutung. Durch sie sollen Energiesysteme geschaffen werden, die flexibel auf Störungen reagieren, sich an Änderungen anpassen und so ihre Dienstleistungen auch unter Störeinflüssen aufrechterhalten. In diesem Zusammenhang wird die Forderung nach einer einheitlichen Definition und damit einhergehend einer einheitlichen Operationalisierung für das Konzept der Resilienz laut. Aufgrund der Neuheit der Forschungsrichtung und der vielschichtigen, interdisziplinären Forschungsansätze existiert jedoch keine einheitliche Sichtweise und somit Bewertungsmethodik. Vielmehr liegt eine Vielzahl an Gestaltungskonzepten, Bewertungsmatrizen und Leitlinien vor, was jedoch nicht bedeutet, dass Betreiber und Entwickler von Energiesystemen nicht bereits jetzt resiliente Systeme realisieren (Petersen et al. 2020).

Dementsprechend ist auch die Energiesystemanalyse gefordert, Resilienzbewertungsmethoden in ihre bestehenden Konzepte zu integrieren. In dieser Arbeit wird daher eine Methodik zur quantitativen Bewertung der Resilienz gekoppelter Energiesysteme anhand von dynamischen Simulationsergebnissen entwickelt und deren Anwendbarkeit demonstriert. Das Ergebnis, der sogenannte Resilienzindex, soll die Quantifizierung und somit Vergleichbarkeit der Resilienz hinsichtlich der technischen Gegebenheiten ermöglichen

und dadurch die Bewertung der Resilienz auch im Vergleich mit weiteren quantitativen Kennzahlen wie CO₂-Emissionen oder Kosten ermöglichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in drei Teile: Zunächst werden der Begriff und das Konzept der Resilienz strukturiert beleuchtet. Dabei wird auf die historische Entwicklung des Begriffs und dessen Verwendung in verschiedenen Disziplinen eingegangen, um anschließend auf dieser Grundlage den Fokus auf die Resilienz von Energiesystemen zu legen. Dazu gehört auch eine Abgrenzung zu den Termini Risikomanagement, Vulnerabilität und Versorgungssicherheit. Den Abschluss des ersten Teils bildet eine Übersicht bestehender qualitativer, quantitativer und semiquantitativer Bewertungsmethoden sowie die Vorstellung eines Resilienzmanagementkonzepts zur ganzheitlichen Nutzung der verschiedenen Ansätze.

Im zweiten Teil wird auf Grundlage der quantitativen Bewertungsmethodik von Nan und Sansavini (2017) eine Methodik für dynamische Simulationsergebnisse entwickelt. Dafür werden die Sektoren Gas, Wärme und Strom untersucht und für jeden ein sogenannter *Measure of Performance* (MOP) ausgewählt, eine charakteristische Größe, die die Systemantwort auf eine Störung widerspiegelt. Bei der Herleitung werden einzelne Effekte anhand von generischen Simulationsbeispielen erläutert, um ein weitreichendes Verständnis für die Entstehung des Resilienzindex zu vermitteln. In diesem Sinne schließt der zweite Teil mit der Untersuchung des Einflusses von Normierungs- und Toleranzgrößen.

Im dritten Teil wird die Bewertungsmethodik anhand eines gekoppelten Energiesystems angewandt. Dafür wird zunächst der Einfluss einer Störung (Ausfall einer Gaspipeline) für ein Referenzsystem analysiert. Darauf basierend werden drei Anpassungsszenarien (*Speicher, Dispersion, Diversität*) vorgeschlagen und mithilfe des Resilienzindex ausgelegt. Für die simulierten Systemantworten werden die jeweiligen Resilienzindizes berechnet und diskutiert und somit die Anwendbarkeit der Methodik demonstriert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung aller Ergebnisse und ihrer Einordnung in das bestehende Forschungsfeld.

2 ENTWICKLUNG UND VERWENDUNG DES BEGRIFFS RESILIENZ

Je nach Kontext und Hintergrund kann Resilienz als Metapher, Kapazität, Fähigkeit, Strategie, Ziel, Leitkonzept, Philosophie, Maß oder Verhalten betrachtet werden (Koslowski und Longstaff 2015). Dementsprechend gestaltet sich der Begriff als sehr vielschichtig und ohne klar umrissene Definition. Im folgenden Kapitel wird daher im Abschnitt 2.1 zunächst die allgemeine Entwicklung des Begriffes betrachtet, um anschließend in Abschnitt 2.2 eine Vertiefung in Bezug auf Energiesysteme vorzunehmen. Abschließend werden in Abschnitt 2.3 vorhandene Methoden zur Bewertung der Resilienz in der Energiesystemanalyse vorgestellt.

2.1 Historische Entwicklung und Hintergrund

Die Entwicklung des Begriffs „Resilienz“ erfolgte in verschiedenen Zeiten in verschiedenen Forschungsfeldern und Kontexten (Abb. 1). Dabei blieb eine gegenseitige Einflussnahme nicht aus, weshalb die Vielschichtigkeit des Begriffes nur unter Berücksichtigung dieser Verkettung unterschiedlicher Herangehens- und Sichtweisen nachzuvollziehen ist (Hellige 2019a).

Die unterschiedlichen Definitionen hängen dabei vor allem davon ab, ob Resilienz als normatives oder analysierendes Konzept aufgefasst wird (Koslowski und Longstaff 2015; Baggio et al. 2015). Während ersteres eine klare, operative Definition voraussetzt, erfasst letzteres ein weites Feld an Merkmalen und Charakteristika aus Kultur, Politik, Wirtschaft etc. (Baggio et al. 2015). Des Weiteren beeinflussen die jeweiligen Traditionen der Forschungsfelder ihre Definitionen der Resilienz, wobei jedoch kein einzelnes Forschungsfeld beanspruchen kann, alle Aspekte und Skalen des Begriffes erfassen zu können (Baggio et al. 2015; Martin-Breen und Anderies 2011).

Eine zentrale Frage, die es daher stets zu beantworten gilt, lautet: „resilience of *what to what?*“ (Carpenter et al. 2001, Seite 1). So leuchtet es ein, dass die Resilienz eines Individuums, einer Organisation, eines technischen Systems oder einer Infrastruktur gegenüber externen oder internen, bekannten oder unbekanntem, wahrscheinlichen oder unwahrscheinlichen Ereignissen unterschiedlich betrachtet werden muss. Für die Definition der Resilienz bedeutet dies, dass sie flexibel genug für diese unterschiedlichen Kontexte gehalten sein muss und gleichzeitig ihre Essenz, ihre Funktion, nicht verlieren darf - in anderen Worten, dass sie selbst resilient sein muss (Martin-Breen und Anderies 2011).

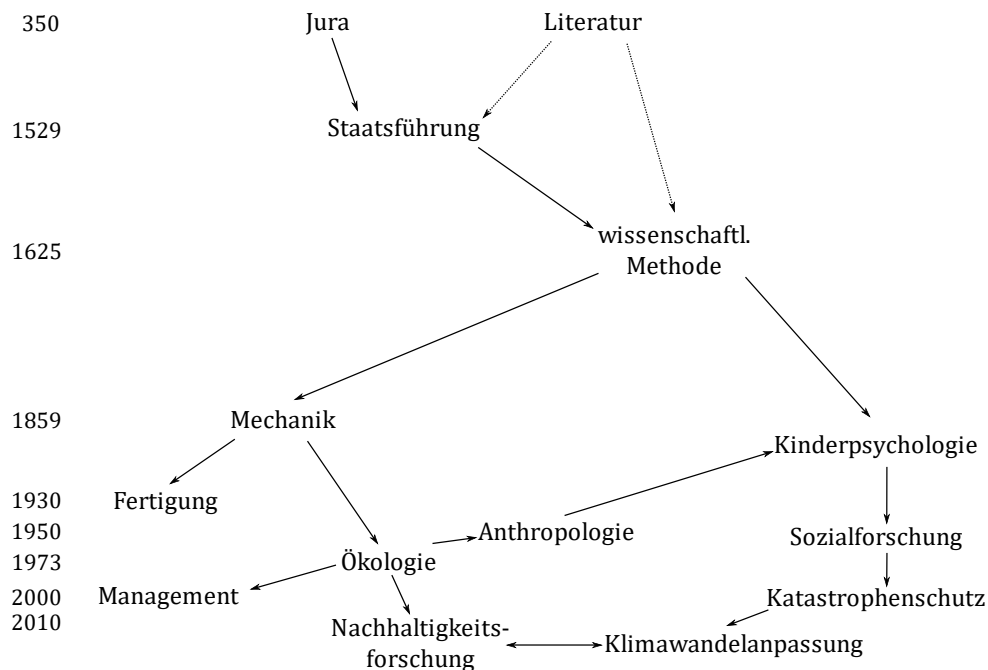


Abbildung 1: Historische Entwicklung der Verwendung des Resilienzbegriffs nach Alexander (2013)

2.1.1 Entwicklung bis 1970

Das lateinische Wort „resilire“ tritt bereits in den Schriften Senecas, Ovids und Ciceros auf und war somit Teil des gebräuchlichen Wortschatzes der römischen Antike (Alexander 2013). Bestehend aus den Wortstämmen „re“ (wieder, zurück) und „salire“ (springen), bedeutet es so viel wie zurückspringen, abprallen. Im wissenschaftlichen Kontext wurde „resilience“ erstmals 1626 von Francis Bacon in seinen naturwissenschaftlichen Betrachtungen „Sylva Sylvarum“ genutzt, um die Erscheinung eines Echos zu beschreiben (Bacon und Rawley 2019; Hellige 2019a).

Im 19. Jahrhundert wurde der Begriff zunehmend in den Materialwissenschaften verwendet. Mithilfe von Resilienz wurde die Widerstandskraft (Wie stark biegt sich ein Material bzw. widersteht es seiner Biegung?), die Elastizität (Wie schnell kehrt das Material in seine ursprüngliche Form zurück?) und die Stabilität (Wie viel Kraft kann das Material aufnehmen ohne zu brechen?) eines Materials bewertet (Martin-Breen und Anderies 2011). Da diese Eigenschaften auf die Anordnung und Eigenschaften der Moleküle zurückzuführen sind, konnte Resilienz in diesem Kontext als messbar und damit quantifizierbar angesehen werden. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Verwendung des Begriffs auf zuverlässig operierende Systeme im Sinne von sich bewegenden mechanischen Kom-

ponenten wie Schlüssel und Schaltwerken ausgeweitet. Dies hatte jedoch eine Reduzierung der Resilienz auf die Schock- und Stresswiderstandsfähigkeit eines Systems zur Folge. (Hellige 2019a)

Unter den Eindrücken des ersten Weltkriegs wuchs in der Psychologie das Interesse an der Fähigkeit der menschlichen Psyche, sich von Kriegs- und Katastrophenerfahrungen zu erholen und die individuelle und sozial-psychologische Stabilität wieder zu erlangen (Hellige 2019a). Für diese Fähigkeit wurde der Begriff Resilienz aus den Materialwissenschaften verwendet, wobei dies nicht die einzige Umfunktionierung war. Wörter wie Stress, Zähigkeit (im Englischen „toughness“) oder Fragilität werden noch heute in beiden Forschungsfeldern verwendet und erinnern an deren analoge Sicht- und Entwicklungsweisen. In der Psychologie erlebte der Begriff der Resilienz vor allem in den 1950ern einen weiteren Beliebtheitsschub, als Garmezy und Werner ihn nutzten, um die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit von Kindern zu beschreiben (Garmezy 1971; Brand 2016). Interessant ist hierbei, dass das betrachtete Subjekt nicht in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt, sondern die Anpassung und die Erhöhung der Widerstandskraft nach der überstandenen Krise betont wird (Jesse et al. 2019).

Vor dem Eindruck der steigenden Umweltbelastung tauchte der Begriff der Resilienz in den 1960ern zunehmend in Debatten über die Belastungsgrenze von Ökosystemen auf. Schon zu diesem Zeitpunkt wurden erste Warnungen vor der exzessiven Ausnutzung der natürlichen Regenerationskraft laut und der Forschungsschwerpunkt der Umweltwissenschaften verlagerte sich zunehmend auf die Dynamik und Komplexität von Ökosystemen (Hellige 2019a). Unter diesen Voraussetzungen veröffentlichte Crawford S. Holling „Resilience and Stability of Ecological Systems“ (Holling 1973), das bis heute von Resilienzforschern aus allen Fachbereichen zitiert und als Grundstein der modernen Resilienzforschung angesehen wird (Hellige 2019a).

2.1.2 Das Resilienzkonzept nach Holling

Als Crawford S. Holling in den 1960ern begann zur Resilienz von Ökosystemen zu forschen, lagen bereits elementare Erkenntnisse zu diesem Konzept vor. Holling war jedoch der Erste, der diese in einem geschlossenen Modell vereinte. Er löste sich von der traditionellen, statischen Betrachtung biologischer Systeme und betonte dagegen die Komplexität und Dynamik von Ökosystemen, deren Ursache er in natürlichen Verzögerungen, Diskontinuitäten und Grenzen sah. Damit prägte er nachhaltig die Wahrnehmung des Begriffes Resilienz und gilt zudem als einer der konzeptuellen Gründer der ökologischen Ökonomie. (Hellige 2019a)

In seinen Betrachtungen unterscheidet Holling zwischen der *Technischen* („engineering“) und der *Ökologischen* („ecological“) Resilienz. Während erstere durch eine ingenieurstechnische Sichtweise bestimmt ist, entwirft Holling zweitens im Hinblick auf ökosystemische Prozesse. Für beide zieht er die Veränderungen der Population von Tier- bzw. Pflanzenarten heran und stellt diese mittels eines Potentialfelds gegenüber. Mit diesem wird in der Ökologie die Anzahl möglicher Optionen definiert und somit auch die Anzahl alternativer Möglichkeiten (Holling und Gunderson 2002). Dementsprechend stellt ein Minimum des Potentialfelds einen Gleichgewichtszustand dar, da hier kleinere Abweichungen immer zum selben Zustand, dem Gleichgewichtszustand, führen.

Mithilfe der *Technischen Resilienz* werden vor allem Systeme beschrieben, denen eine bestimmte Funktion zugeordnet werden kann. Dabei wird von dem System eine persistente Leistung erwartet, Abweichungen sind nur in einem engen Bereich tolerabel. Da die auf das System wirkenden äußeren Einflüsse vorhersehbar sind, ist das System so konzipiert, dass kleineren Schwankungen um den Gleichgewichtszustand durch interne Kontrollmechanismen direkt entgegengewirkt wird. Betrachtet man das Potentialfeld eines solchen Systems für die Populationen X und Y, ergibt sich eine Parabel in zweidimensionaler bzw. ein elliptisches Paraboloid in dreidimensionaler Darstellung. Der vorgegebene Gleichgewichtszustand des Systems liegt dabei im Tal der Parabel/des Paraboloiden (Abb. 2). Dies bedeutet, dass jede Änderung in einer der Populationen unweigerlich zum selben Gleichgewichtszustand und damit zur selben Verteilung der Populationen führt. Wird das System gestört, kann dessen Resilienz durch die Rückkehrzeit in den Gleichgewichtszustand bewertet werden. Eine Betrachtung des transienten Verhaltens fern vom Gleichgewichtszustand ist nicht vorgesehen. (Holling 1973)

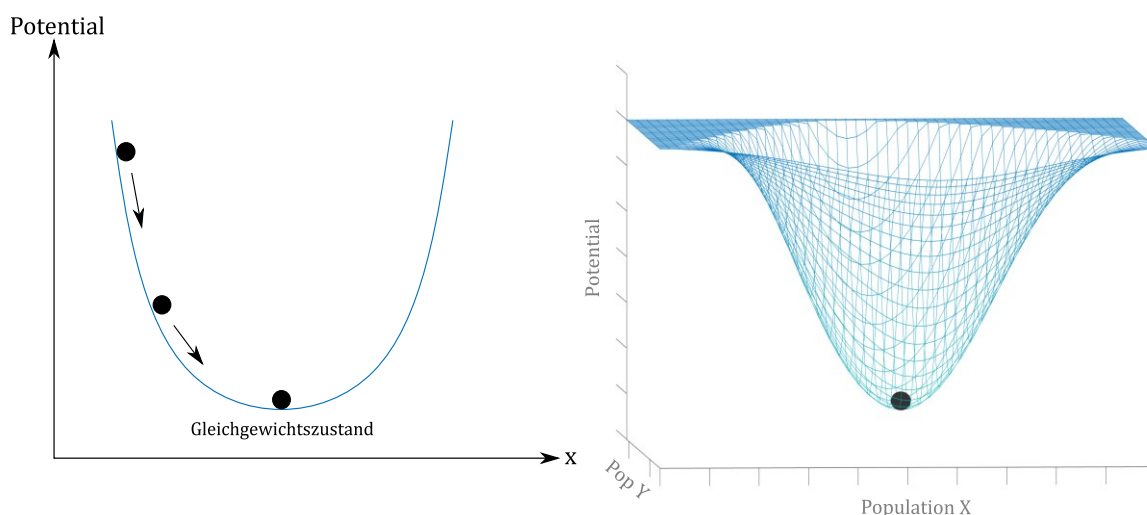


Abbildung 2: Darstellung der *Technischen Resilienz* mit einem Gleichgewichtszustand nach Holling (1973), links: eindimensionale Darstellung, rechts: dreidimensionale Darstellung

Die *Ökologische Resilienz* eignet sich hingegen zur Betrachtung von Systemen, die stark von externen Änderungen beeinflusst werden. Da sie oft mit unerwarteten Ereignissen konfrontiert werden, steht hier die Existenz der Funktion und damit ihre Konsistenz stärker im Fokus als deren Konstanz und Persistenz. Die *Ökologische Resilienz* betrachtet daher die Beständigkeit eines Systems und dessen Fähigkeit, Wandel und Störungen aufzunehmen und dabei seine essentiellen Verbindungen aufrechtzuerhalten. Dabei wird nicht von einem globalem Gleichgewichtszustand ausgegangen, sondern die Existenz mehrerer lokaler Gleichgewichtszustände impliziert. Dementsprechend können Instabilitäten oder unvorhergesehene Ereignisse das System zum Kippen bringen, sodass es in einen neuen Gleichgewichtszustand übergeht. Ähnliche Dynamiken sind auch aus der Forschung zum Klimawandel bekannt. Auch dort kann das Überschreiten bestimmter Kippunkte zur Einstellung eines neuen Gleichgewichtszustand führen, wobei hierbei die betrachteten Parameter u.a. globale Temperatur, Luftzusammensetzung und Vegetation sind. Durch diese Systemdynamik ergeben sich sehr komplexe, dynamische Verhaltensweisen des Systems, wodurch die Resilienz des Systems nicht ohne weiteres quantitativ bewertet werden kann. Deshalb kann oftmals nur eine qualitative Betrachtung vorgenommen werden. Im Falle der von Holling betrachteten Populationen ist es also möglich, dass durch das Vorhandensein mehrerer lokaler Minima im Potentialfeld sich entweder ein Gleichgewichtszustand bei einer hohen Population X und einer niedrigen Population Y oder bei einer hohen Population Y und einer niedrigen Population X einstellt (Abb. 3). (Holling 1973)

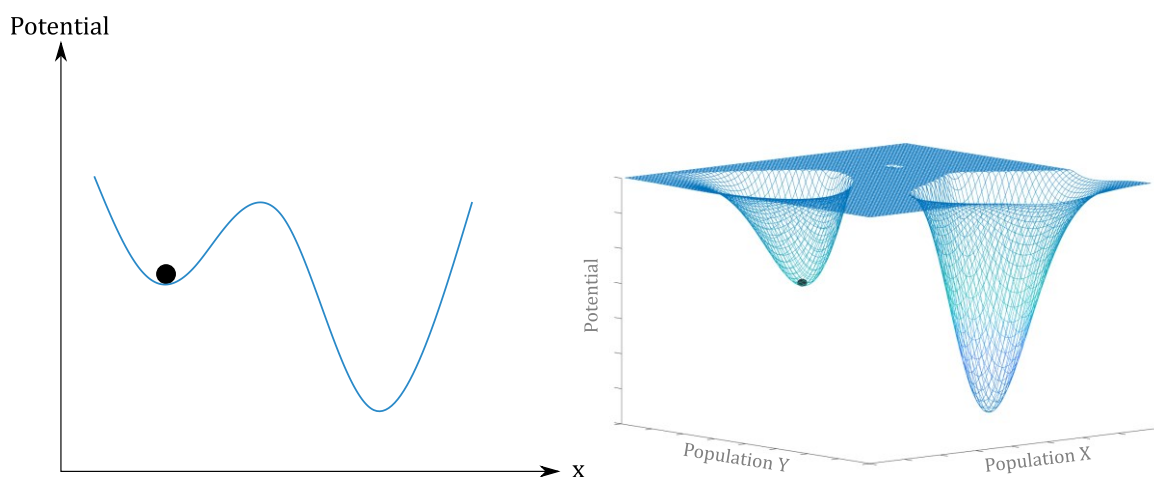


Abbildung 3: Darstellung der *Ökologischen Resilienz* mit mehreren möglichen Gleichgewichtszuständen nach Holling (1973), links: eindimensionale Darstellung, rechts: dreidimensionale Darstellung

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Merkmale der *Technischen* und *Ökologischen Resilienz* gegenübergestellt. Bei beiden Sichtweisen auf die Resilienz von Systemen darf nicht der Fehler gemacht werden, eine der beiden als der anderen überlegen anzusehen (Holling 1996). Vielmehr sind die beschriebenen Unterschiede auf unterschiedliche Herangehensweisen der jeweiligen Forschungsdisziplinen zurückzuführen, wodurch laut Holling paradoxe Bedeutungen von Effizienz und Beharrlichkeit, Konstanz und Wandel sowie Vorhersagbarkeit und Unvorhersagbarkeit in der Resilienz Betrachtung entstehen. Während ein Ingenieur das Ziel hat, Systeme zu entwerfen, die vornehmlich funktionieren und nicht plötzlich ihr Verhalten ändern, kann letztere Fähigkeit in der Natur von großem Vorteil sein. Durch hohe Unsicherheiten und die damit verbundenen Überraschungen können sich hier neue Chancen auftun. Während durch die *Technische Resilienz* ein „fail-safe“, also ein ausfallsicheres Design angestrebt wird, lautet die Maxime der *Ökologischen Resilienz* ein „safe-fail“ Design zu erreichen, mit dem ein gefahrloses Ausfallen von (Teil-)Systemen ermöglicht wird (Holling 1996). Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung *Technische Resilienz* keinesfalls bedeutet, dass alle technischen Systeme mit diesem Ansatz beschrieben werden können. Auch im technischen Bereich finden sich Systeme, deren Komplexität zu Instabilitäten, Nicht-Linearitäten und Kippunkten führen können. Eindrückliche Beispiele sind hierbei die Nuklearkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima.

Die bereits beschriebene Existenz mehrerer Gleichgewichtszustände überführen Walker et al. (2004) später in eine Stabilitätslandschaft. Diese Stabilitätslandschaft wird durch mehrere Zustandsvariablen beschrieben. Für ein Ökosystem kann dies zum Beispiel die Anzahl von Populationen sein. Innerhalb der Stabilitätslandschaften bilden sich Regionen

Tabelle 1: Merkmale der Technischen und Ökologischen Resilienz

	<i>Technische Resilienz</i>	<i>Ökologische Resilienz</i>
Ziel	Persistenz	Konsistenz
Betrachtungsweise	quantitativ	qualitativ
Gleichgewicht	ein globaler GGW-Zustand	Existenz mehrerer GGW-Zustände
Dynamik	statisch, linear	dynamisch, nicht-linear
Unsicherheit	niedrig	hoch
Design	fail-safe	safe-fail

aus, in denen das System vorwiegend verweilt, sogenannte Attraktionsbecken (Walker et al. 2004). Zwischen diesen Becken bilden sich Schwellen aus, die bei der Überschreitung bestimmter Grenzwerte überwunden werden können. Eine solche Stabilitätslandschaft kann sich durch exogene (Mensch, Wetter, etc.) und endogene (Anpassung, Evolution) Treiber verändern. Nicht alle Systeme sind durch eine Stabilitätslandschaft beschreibbar, v.a. wenn verschiedene Konzepte auf verschiedenen lokalen und zeitlichen Skalen wirken. Dennoch ermöglicht diese Betrachtungsweise ein besseres Verständnis des abstrakten Begriffs der *Ökologischen Resilienz*. (Fichter et al. 2010)

2.1.3 Aktuelle Entwicklungen

Ausgehend von Hollings Betrachtungen nahm die Popularität des Begriffs Resilienz in den letzten 50 Jahren stetig zu und wurde auch auf andere Systeme außerhalb der Ökologie und Technik bezogen. Mittlerweile lässt sich der Begriff nicht nur in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen, sondern auch in politischen Grundsatzprogrammen, Lifestyle-Magazinen und Managementseminaren finden. Daher soll im folgenden Abschnitt auf einige allgemeine Entwicklungen eingegangen werden, um die starke Verbreitung und Beliebtheit des Begriffs einzuordnen.

Bereits in den 1970ern traf das Resilienzkonzept auf eine wachsende Umweltbewegung, die nicht zuletzt durch die Ölkrisen 1973 und 1979/1980 und den Nuklearunfall in Tschernobyl 1986 in den folgenden Jahren an Gewicht gewann. Seit den 1990er Jahren wurde Resilienz neben dem Stichwort der Nachhaltigkeit zunehmend in Bezug auf den Klimawandel verwendet. Parallel dazu wurde der Begriff im Bereich kritischer Infrastrukturen etabliert. Grund dafür war u.a. auch das Auftreten höchst unwahrscheinlicher und somit unvorhergesehener Ereignisse mit sehr starken Auswirkungen, sogenannter „Black Swans“ (Taleb 2008), wie der Zerfall der Sowjetunion, die Terroranschläge vom 11. September und die Finanzkrise 2008 (vgl. Abbildung 4).

Um einen Überblick über die unterschiedlichen Definitionen der verschiedenen Forschungsdisziplinen zu geben, ist eine Auswahl in Tabelle 2 dargestellt. Trotz der breiten Verwendung des Begriffes lassen sich auch Gemeinsamkeiten finden, die bei allen unterschiedlichen Definitionen den Kern des Begriffs Resilienz widerspiegeln. So wird in allen Disziplinen ein alternativer Fokus auf den Umgang mit Unsicherheiten und Gefahren gelegt (Koslowski und Longstaff 2015). Seit dem 20. Jahrhundert wird Resilienz nicht nur als Zurückkehren in den Normalzustand angesehen, da zusätzlich die Duktilität, also die

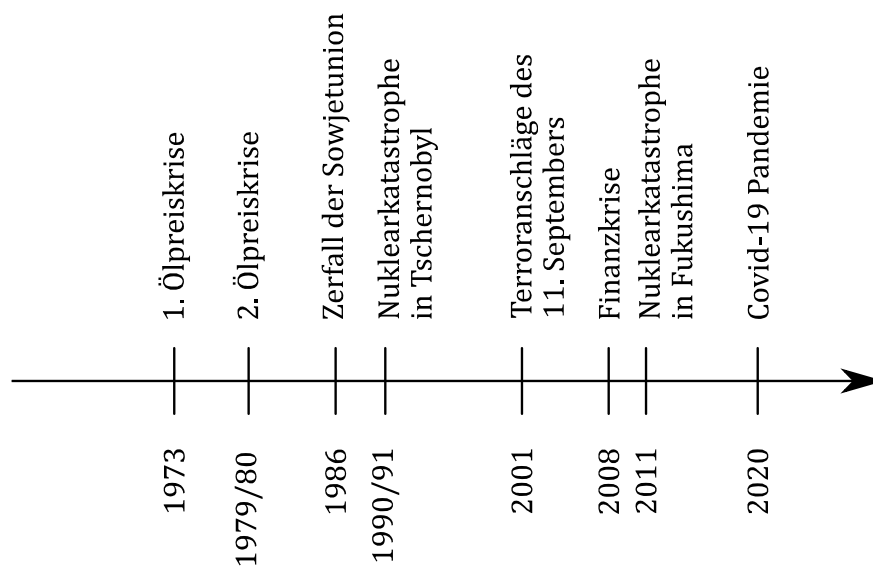


Abbildung 4: „Black Swan“ Ereignisse seit 1970 nach Taleb (2008)

dauerhafte Veränderung von Systemen, Eingang in das Resilienzkonzept fand (Alexander 2013). Dementsprechend kann Resilienz auch als Brückenkonzept zwischen der statischen Betrachtung der Widerstandskraft und der dynamischen Betrachtung von Anpassungs- und Umwandlungsfähigkeit verstanden werden (Alexander 2013). Weiterhin ist zu erkennen, dass sich bei der Betrachtung der Resilienz auf Systeme mit hoher Komplexität und Vernetztheit bezogen wird. In solchen Systemen sind Risiken impliziert, die durch konventionelle Regelstrategien nicht abgefangen werden können und somit zu vermeiden sind (Koslowski und Longstaff 2015). In allen Disziplinen wird in diesem Kontext zudem die Dynamik solcher Systeme betont (Alexander 2013; Koslowski und Longstaff 2015).

Das wachsende Interesse am Begriff der Resilienz spiegelt sich auch in einem starken Anstieg der Publikationen zu diesem Thema wider (Web of Science 2021). Gleichzeitig hält der Begriff als Synonym für mentale Stärke und Widerstandskraft Einzug in die Umgangssprache und erweckt auch außerhalb der Forschung das Interesse der Bevölkerung, was an einem Anstieg der Google-Abfragen zum Begriff „resilience“ erkennbar ist. Beide Entwicklungen sind in Abbildung 5 dargestellt. Da die Daten zu den jeweiligen Suchanfragen stets im Verhältnis zur höchsten Anfragenzahl (100 %) veröffentlicht werden, lohnt sich der Vergleich mit den ebenfalls zur Beurteilung eines Systems genutzten Begriffen „efficiency“ und „sustainability“ (Google 2022). Dabei lässt sich erkennen, dass Effizienz zwar weiterhin von größtem Interesse ist, Nachhaltigkeit und Resilienz jedoch an Bedeutung

gewinnen, wobei letztere den stärksten Zuwachs an Suchanfragen zu verzeichnen hat. Besonders interessant ist hierbei der rasante Anstieg im März 2020 zu Beginn des weltweiten Ausbruchs von Covid-19.

Tabelle 2: Definition der Resilienz in unterschiedlichen Forschungsfeldern

Disziplin	Definition
Ingenieurwesen	„Die Stabilität nahe eines Gleichgewichtszustands, wobei Widerstandsfähigkeit gegenüber der Störung und die Geschwindigkeit der Rückkehr zum Gleichgewicht als Maß (...) genutzt werden.“ (Holling 1996, Seite 33)
Psychologie	„Der Prozess, die Fähigkeit oder das Resultat erfolgreicher Anpassung trotz herausfordernder oder bedrohlicher Lebensumstände.“ (Masten et al. 1990, Seite 426)
Ökologie	„Der Erhalt von Beziehungen innerhalb eines Systems und somit ein Maß für die Fähigkeit eines Systems, Wandel aufzunehmen (...) und weiterhin zu bestehen.“ (Holling 1973, Seite 17)
Ökonomie	„Die Fähigkeit eines Wirtschaftssystems Arbeitsplätze und Wohlstand in Krisenzeiten zu sichern.“ (Baggio et al. 2015, Seite 2)
Soziologie	„Die Fähigkeit eines sozio-ökologischen Systems Störungen aufzunehmen, sich während eines Wandels zu restrukturieren und dabei im Wesentlichen dieselben Funktionen, Strukturen, Identitäten und Rückkopplungen zu bewahren.“ (Walker et al. 2004, Seite 2)
Sicherheitsforschung	„Die Fähigkeit eines Systems, einer Gemeinschaft oder Gesellschaft einer Bedrohung zu widerstehen, sie aufzunehmen, sich an sie anzupassen und sich von ihr zeitnah und effizient zu erholen, u.a. durch den Erhalt und den Wiederaufbau essentieller Grundstrukturen und -funktionen.“ (United Nations International Strategy for Disaster Reduction 2009, Seite 24)
Anthropologie	„Das Überleben menschlicher Organisationen trotz unerwarteter, widriger Umstände, die entweder aus weiträumigen Beeinträchtigungen oder der Akkumulation mehrerer kleinerer Störungen resultieren.“ (Koslowski und Longstaff 2015, Seite 4)

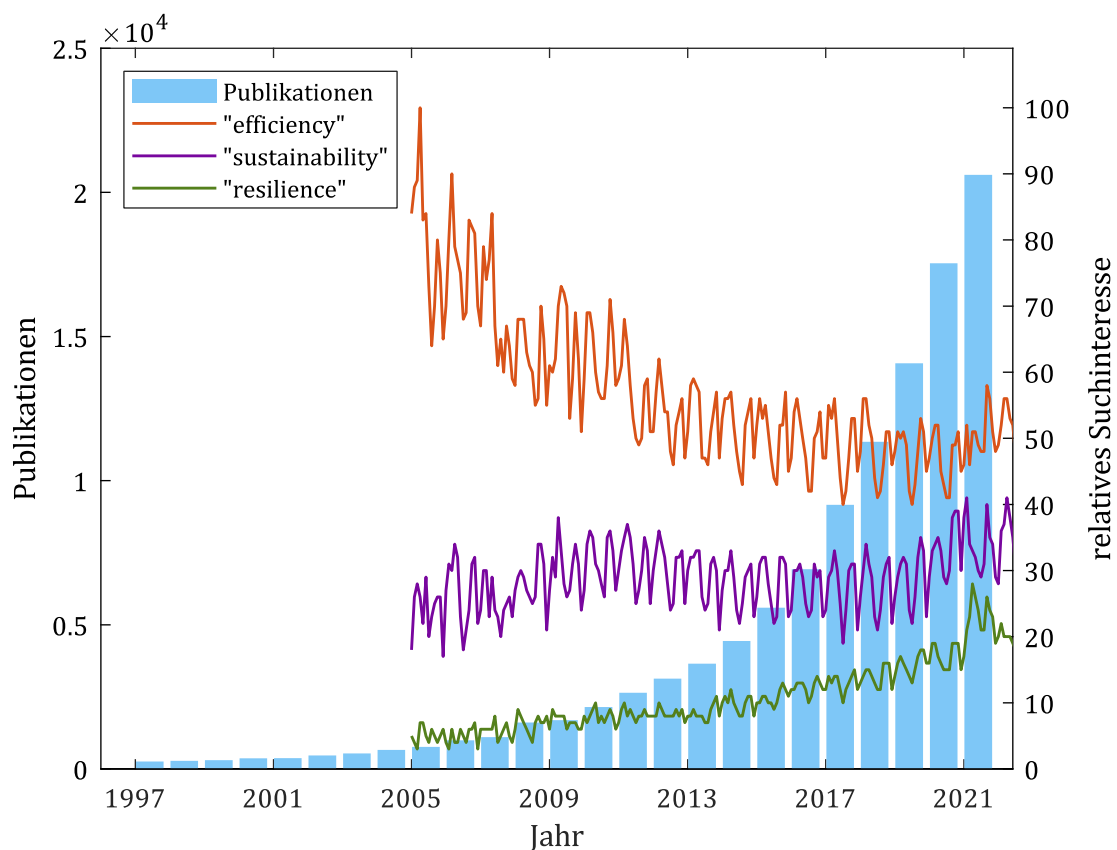


Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl der Publikationen zum Thema "resilience" (blau). Entwicklung der Google-Suchanfragen der Begriffe "efficiency", "sustainability" und „resilience“. (Web of Science 2021; Google 2022)

Die Verbreitung des Begriffes trägt allerdings auch zu dessen Unschärfe bei. So kritisiert Thoma (2014), dass die Definition der Resilienz so stark ausgeweitet wurde, dass es mittlerweile als Modewort „ohne Hintergedanken und sicher ohne fundierten theoretischen Unterbau als Adjektiv in Presseartikeln über Hunde, Sportler, Terroristen, Schimmel und Ähnliches genutzt wird.“ (Thoma 2014, S. 53). Auch Koslowski und Longstaff (2015) warnen vor einem Verkommen des Begriffes zum bloßen Schlagwort, merken aber gleichzeitig an, dass nicht auf die perfekte Definition gewartet werden kann, bevor entsprechende Konzepte zum Umgang mit Unsicherheiten und Gefahren erarbeitet werden. Eine Vielfalt an Definitionen sei demnach zulässig, solange man sich dieser bewusst sei (Koslowski und Longstaff 2015). An dieser Stelle sei nochmals auf die eingangs erwähnte Fragestellung „resilience of *what* to *what*?“ (Carpenter et al. 2001) verwiesen, die am Anfang jeder Resilienzbeurteilung beantwortet werden sollte.

Abschließend sei angemerkt, dass Resilienz nicht ausnahmslos als positive Systemeigenschaft aufgefasst werden muss (Gunderson und Holling 2002). So könnte zum Beispiel ein auf fossilen Brennstoffen basierendes Energiesystem, das auf den Klimawandel nur

schleppend oder gar nicht reagiert, durchaus als resilient gegenüber der andernorts stattfindenden Umstellung auf erneuerbare Energien definiert werden. Ob dies eine wünschenswerte Systemantwort ist, bleibt in einem solchen Falle allerdings fraglich.

2.2 Verwendung des Resilienzkonzeptes in der Energiesystemanalyse

Im folgenden Abschnitt soll die Verwendung und Entwicklung des Begriffes der Resilienz in der Energiesystemanalyse erörtert werden. Grundlegend lassen sich dabei zwei Betrachtungsweisen erkennen: eine qualitative, die Resilienz oftmals als Leitbild betrachtet, und eine quantitative, die Resilienz als Metrik definiert. Für Energiesysteme kann dies auf mehreren Ebenen geschehen. Dementsprechend unterscheiden sich auch hier die Betrachtungsweisen und Konzepte, je nachdem ob das System aus politischer, sozio-ökonomischer oder technologischer Sicht betrachtet wird. Obwohl das Hauptaugenmerk dieser Dissertation auf der Quantifizierbarkeit der Resilienz liegt, wird an dieser Stelle auch auf qualitative Bewertungsmethoden eingegangen, um basierend darauf entsprechende Szenarien in Abschnitt 4.2 herzuleiten. Um die Entwicklung der unterschiedlichen Sichtweisen auf das Thema Resilienz in der Energietechnik nachvollziehbar zu machen, wird zunächst dessen Entwicklung nach 1970 kurz umrissen.

2.2.1 Entwicklung und Verwendung des Begriffes Resilienz in der Energietechnik seit 1970

Obwohl Holling in seiner Arbeit nur auf die Resilienz von Ökosystemen einging, wurde sein Konzept bereits in den 1970er Jahren auf Energiesysteme übertragen. Interessanterweise wurde sein Ansatz dabei in sehr unterschiedliche Richtungen weiterentwickelt.

So verstand Wolf Häfele, mit dem Holling am International Institute for Applied System Analysis (IIASA) zusammenarbeitete, Resilienz als dritte Ebene der Gefahrenabwehr, neben der Sicherheitstechnik und probabilistischen Methoden (Häfele 1975). Sein Ziel war es, eine präzise mathematische Definition für die Resilienz zu finden und das Konzept zur Planung ausfallsicherer, zentralisierter, nuklearer Energiesysteme zu nutzen (Hellige 2019a). Dieses Verständnis war jedoch nicht im Einklang mit Hollings Grundidee, dass Resilienz nicht das Ausfallen oder Zusammenbrechen von Systemen verhindert, sondern als Systemeigenschaft die Absorption der damit einhergehenden Effekte beschreibt.

Demgegenüber stand der Physiker und Umweltaktivist Amory Lovins, der Hollings Konzept als Begründung für dezentrale, erneuerbare Energiesysteme interpretierte. Dementsprechend entwickelte er in den 1970ern und 1980ern gemeinsam mit seiner Frau Hunter

Lovins den ersten Kriterienkatalog für resiliente (elektrische) Energiesysteme (Hellige 2019a; Lovins und Lovins 1982); dieser beinhaltet als Kriterien:

- Modularer Systemaufbau,
- Frühe Erkennung und Isolation fehlerhafter Komponenten,
- Redundante und möglichst kurze Verbindungen,
- Diverse, aber untereinander kompatible Komponenten,
- Hierarchischer Komponentenaufbau, sodass jedes Level möglichst wenig von Fehlern auf den unteren Levelen beeinflusst wird,
- Pufferspeicher zur Dämpfung von Ausfällen und
- Einfache, wartbare, reproduzierbare Komponenten, die weiterentwickelt werden können und sozial kompatibel sind.

Holling selbst, der bis auf eine Veröffentlichung nie zu Energiesystemen publizierte, fand sich zwischen beiden Seiten wieder. Er war der Ansicht, dass sowohl kleine, dezentralisierte als auch große, zentralisierte Systeme resilient gestaltet werden können. Wichtig sei dabei jedoch, die vorliegende Komplexität der Umwelteinflüsse und des Systemantwortverhaltens bei der Systemauslegung zu beachten und dass das System somit weiterhin flexibel auf Störungen reagieren kann. (Hellige 2019b)

Basierend auf der Arbeit von Lovins und Lovins entwickelte die Homeostatic Control Group am MIT zwischen 1978-82 ein elektrisches „Smart Grid“, das die dezentralen Ansätze von Lovins und Lovins integrierte und gleichzeitig durch Reservekapazitäten, Abkopplungsmöglichkeiten und eine stets gesicherte Minimalversorgung die Resilienz des Systems erhöhte (Schweppe et al. 1982). Während unter US-Präsident Carter solche Forschungsarbeiten zur Dezentralisierung und erneuerbaren Energien gefördert wurden, führte die Wahl Reagans 1982 zu einer erneuten Fokussierung auf fossile und nukleare Brennstoffe in den USA, weshalb das Konzept „Smart Grid“ bis zur Jahrtausendwende keine weitere Beachtung fand. Zwar unterstützte Bill Clinton während seiner Präsidentschaft erneut die Entwicklung erneuerbarer, dezentraler Energiesysteme, aber auch dieser Prozess wurde durch die Präsidentschaft von George W. Bush beendet.

Da die Debatte um die Dekarbonisierung und Dezentralisierung des Energiesystems stets mit der Betrachtung der Resilienz einherging, konnte durch ihre phasenweise Unterdrückung kein kontinuierlicher wissenschaftlicher Prozess zur Weiterentwicklung des Resilienzkonzeptes für Energiesysteme entstehen. Erst seit 2010 ist eine systematische Bestrebung, resiliente Energiesysteme zu schaffen, zu erkennen. (Hellige 2019b)

2.2.2 Terminologie und Abgrenzung

Der Begriff Resilienz wird in der Energiesystemanalyse oftmals als Synonym oder Gegenteil bereits etablierter Ausdrücke wie Vulnerabilität, Risiko(-management) oder Versorgungssicherheit verwendet. Aufgrund der sich entwickelnden Definition der Resilienz, aber auch der nicht fest umrissenen Grenzen anderer Begrifflichkeiten, kommt es hierbei jedoch zu Überlappungen und teilweise fälschlichen Gleichsetzungen. Im folgenden Abschnitt soll daher der Begriff „Resilienz“ in Bezug auf die genannten Termini abgegrenzt werden. Dies soll nicht nur zu einem besseren Gebrauch der Begriffe beitragen, sondern hilft zudem bei dem Verständnis des vielschichtigen Begriffs Resilienz. Ein Überblick über die mit den Begriffen assoziierten Eigenschaften und Merkmale wird in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Vergleich der Termini Resilienz, Vulnerabilität, Risikomanagement und Versorgungssicherheit anhand der mit ihnen assoziierten Eigenschaften und Merkmale (Clark-Ginsberg 2016; Fichter et al. 2010; Gheorghe et al. 2018; Linkov und Palma-Oliveira 2017; Praktijnjo 2013; Madni und Jackson 2009; McLellan et al. 2012)

Resilienz	<ul style="list-style-type: none">- Widerstandskraft- Adaptionfähigkeit, Flexibilität- Erholungsfähigkeit- Gestaltungsfähigkeit- Vorlaufende Indikatoren
Vulnerabilität	<ul style="list-style-type: none">- Empfindlichkeit/Sensitivität- Exposition/Anfälligkeit- Anpassungskapazität/Fähigkeit zu überleben
Risiko(-management)	<ul style="list-style-type: none">- Wahrscheinlichkeit des Ereignisses- Schwere der Konsequenzen- Konservativ/systemerhaltend- Stärkung der Widerstandskraft
Versorgungssicherheit	<ul style="list-style-type: none">- Fähigkeit Funktion im gewünschten Zeitraum mit gewünschter Qualität zur Verfügung zu stellen- Binäre Sichtweise- Nachlaufende Indikatoren

Vulnerabilität

Oftmals als Gegenteil zur Resilienz wird der Begriff Vulnerabilität (lat. vulnus: Wunde) verwendet. Gheorghe et al. (2018) vergleichen mehrere Definitionen zur Vulnerabilität und fassen diese als die Gesamtheit der Eigenschaften eines Systems zusammen, die eine potentielle Gefährdung darstellen unabhängig vom auftretenden Stressor oder des vorhandenen Risikos. Auch die Fähigkeit des Systems zu überleben und seine Dienstleistungen zu erbringen, während es von innen oder außen attackiert wird, schließen Gheorghe et al. (2018) in ihre Definition mit ein. Damit ist ihr Vulnerabilitätsbegriff sehr nah an dem im Abschnitt 2.1 vorgestellten Verständnis von Resilienz. Dementsprechend definieren Gheorghe et al. (2018) Vulnerabilität als Funktion von Resilienz und Sensitivität, wobei die Resilienz über die Erholungsfähigkeit und die Sensitivität über die Empfindlichkeit des Systems Aufschluss gibt. Dadurch sei es möglich ein empfindliches System mit einer hohen Resilienz und somit einer akzeptablen Vulnerabilität zu entwerfen (Gheorghe et al. 2018).

Dem entgegen steht die Abgrenzung, die McLellan et al. (2012) vornehmen. Ihr Verständnis der Vulnerabilität wird anhand dreier Merkmale beschrieben:

1. Empfindlichkeit gegenüber Stressoren,
2. Anpassungs- und Bewältigungskapazitäten,
3. Exposition gegenüber Störungen.

Resilienz dagegen werden die Fähigkeit zur selbstständigen Reorganisation und Adaption an die sich ändernden Umstände zugeordnet. Dabei wird Resilienz als Ausmaß an Veränderung, die ein System aufnehmen kann, während es weiterhin seine Funktion und Struktur aufrecht erhält, definiert (McLellan et al. 2012). Auch hier kann man erkennen, dass eine klare Abgrenzung der Begriffe nach aktuellem Forschungsstand nicht möglich ist, da genau diese Eigenschaften von Gheorghe et al. (2018) der Vulnerabilität zugeschrieben werden.

Fichter et al. (2010) definieren Vulnerabilität ähnlich wie McLellan et al. als Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität. Resilienz dagegen wird als Funktion von Anpassungs-, Widerstands- und Gestaltungsfähigkeit beschrieben. Hier wird Vulnerabilität als analytische Kategorie und Resilienz als Leitkonzept genutzt. Dementsprechend wird angemerkt, dass eine Erhöhung der Resilienz meist zu einer Verringerung der Vulnerabilität führt, eine Verringerung der Vulnerabilität aber nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der Resilienz führen muss. Vielmehr besteht die Gefahr die Starrheit des Systems zu erhöhen. (Fichter et al. 2010)

Übergreifend betrachtet stimmen alle angeführten Nachweise darin überein, dass im Gegensatz zur Vulnerabilität die Betrachtung der Resilienz die Erholung des Systems nach einem Schock mit einbezieht (Gheorghe et al. 2018; McLellan et al. 2012; Fichter et al. 2010). Die Vulnerabilität eines Systems kann also zusammenfassend durch dessen Empfindlichkeit und Exposition gegenüber Gefahren und Störungen sowie dessen Anpassungsfähigkeit beschrieben werden.

Risiko(-management)

Das Risikomanagement hat sich als Methode zur Minimierung von negativen Konsequenzen verschiedener Risiken so sehr etabliert, dass deren allgemeine Herangehensweise mittlerweile international normiert ist (ISO 31000:2018). Für den Begriff Risiko selbst existieren jedoch unterschiedliche Interpretationen, wodurch sich auch hier verschiedene Abgrenzungsmöglichkeiten zur Resilienz ergeben. Gheorghe et al. (2018) definieren den Begriff Risiko als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses verbunden mit der Schwere der zu erwartenden Konsequenzen. Dabei betonen sie die Assoziation mit der Unsicherheit. Für die Bewertung des Risikos schlagen Gheorghe et al. (2018) die Auswahl eines Stressors und die damit einhergehende Identifikation der Konsequenzen vor. Diese Herangehensweise ist damit der Vulnerabilitätsanalyse, bei der zunächst das System auf Schwachstellen in Bezug auf mögliche Gefahren geprüft wird, entgegengesetzt (Abb. 6). Als Unterscheidungsmerkmal zur Resilienz nennen Gheorghe et al. (2018) auch hier das Fehlen der Betrachtung der Systemerholung im klassischen Risikomanagement.

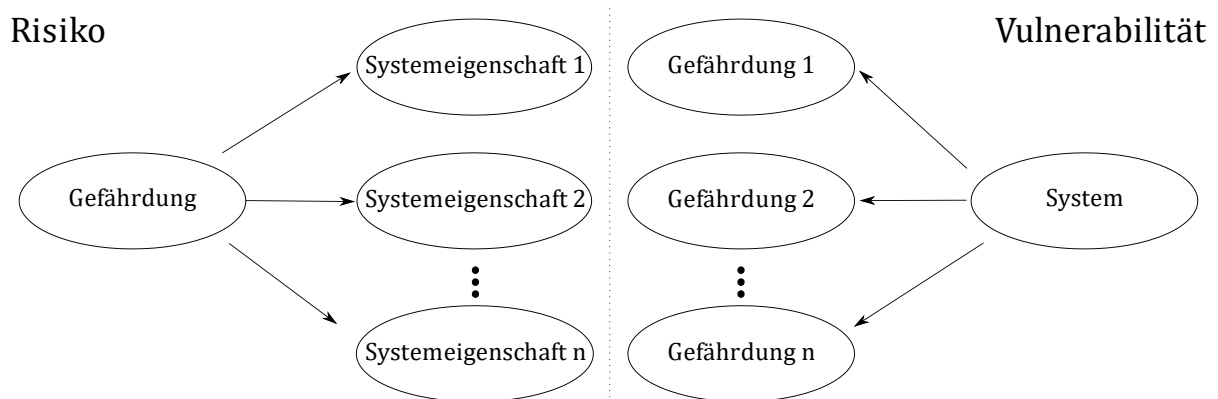


Abbildung 6: Entgegengesetzte Herangehensweisen des Risikomanagements und der Vulnerabilitätsanalyse nach Gheorghe et al. (2018)

Ausführlicher unterscheiden Linkov und Palma-Oliveira (2017) zwischen Resilienz und Risiko: Trotz desselben philosophischen Hintergrunds setzen beide Konzepte unterschiedliche Akzente und komplementieren sich so gegenseitig. So fällt vor allem der unterschiedliche Umgang mit Wahrscheinlichkeiten und die Beurteilung der Konsequenzen von Störungen ins Gewicht. Während das klassische Risikomanagement eine Gewichtung nach Wahrscheinlichkeiten vornimmt, beschäftigt sich die Resilienz ausdrücklich auch mit der Vorbereitung auf das Unbekannte, Unsichere und Unerwartete. Um dies zu erreichen, ist das Hauptziel des Resilienzkonzeptes das Erreichen von Flexibilität und Adaptionsfähigkeit, wohingegen eine klassische Risikoanalyse weitaus konservativer vorgeht und v.a. die Widerstandskraft des Systems stärkt. Dementsprechend ist der betrachtete Zeithorizont einer Resilienzbewertung für gewöhnlich bedeutend länger als der des Risikomanagements. Dabei wird zur Beschreibung der Resilienz das Verhalten des gesamten Systems beobachtet und beurteilt, wohingegen die Risikoanalyse vor allem einzelne Systemkomponenten, deren Verhalten und Ausfallwahrscheinlichkeit betrachtet. Dementsprechend ergibt sich für erstere ein Top-Down-Ansatz, für letztere dagegen ein Bottom-Up-Ansatz (Abb. 7). (Linkov und Palma-Oliveira 2017)

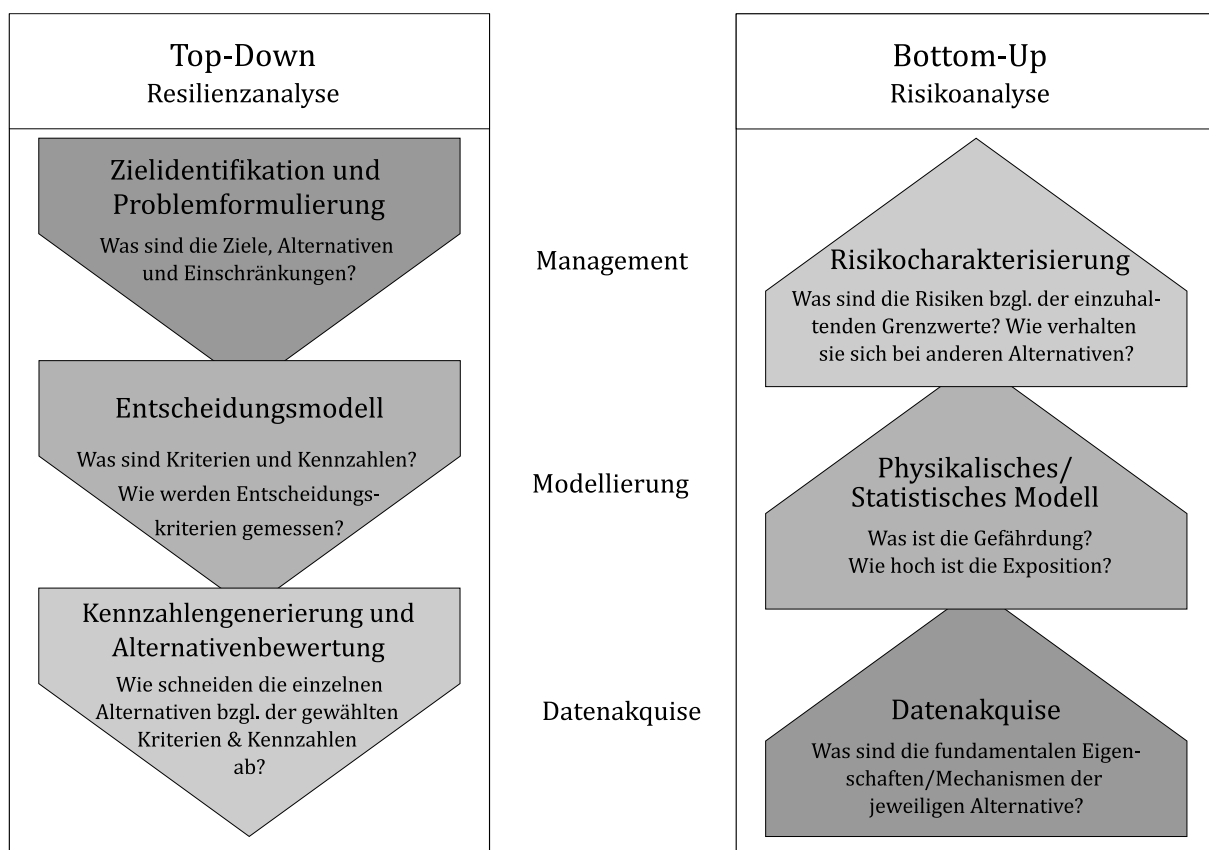


Abbildung 7: Vergleich des Top-Down-Ansatz in der Resilienz Betrachtung mit dem Bottom-Up-Ansatz der Risikoanalyse nach Linkov und Palma-Oliveira (2017)

Dementsprechend empfehlen Linkov und Palma-Oliveira (2017) das Risikomanagement als Vorstufe zur Resilienzbewertung, sehen diese daher aber nicht als überlegen an. Vielmehr ist das etablierte Risikomanagement geeigneter für bekannte und weniger heftige Stressoren, während die Resilienzanalyse sich als komplexer und systemorientierter gestaltet (Linkov und Palma-Oliveira 2017). Es ist also festzuhalten, dass sich das klassische Risikomanagement vor allem an der Wahrscheinlichkeit des Auftretens bekannter Stressoren und der Schwere der Konsequenzen orientiert und durch eine konservative Betrachtung v.a. auf Komponentenebene die Widerstandskraft des Systems geprägt ist.

Versorgungssicherheit

Vor allem im Kontext von Energiesystemen spielt das Thema Versorgungssicherheit eine Rolle. Deren Ursprung liegt im militärischen Kontext, da v.a. während Kriegszuständen die ausreichende Versorgung mit Ressourcen wie Öl und Kohle kritisch ist (Praktiknjo 2013). Dementsprechend definiert sich die Versorgungssicherheit im energietechnischen Sinne als ausreichendes physisches Angebot an Energie (Winzer 2011), wobei je nach Kontext die Bedingung ökonomischer und klimafreundlicher Konditionen hinzugefügt wird (Praktiknjo 2013).

Madni und Jackson (2009) definieren Versorgungssicherheit in einem weiteren Sinne als die Fähigkeit eines Systems, eine bestimmte Funktion unter gegebenen Umständen und während einer spezifizierten Zeit bereitzustellen. Als Bewertungswerkzeug empfehlen sie das bereits beschriebene Risikomanagement. Dies ermöglicht die Kontrolle des täglichen Betriebs, unterstellt jedoch weitgehende Unabhängigkeit der einzelnen Komponenten voneinander. Da hier jedoch Kopplungseffekte auftreten können, bedarf es laut Madni und Jackson (2009) eines zusätzlichen kontinuierlichen Monitorings, eingebettet in eine Resilienzanalyse. Diese kann zwar keinen zuverlässigen, „versorgungssicheren“ Betrieb garantieren, erhöht aber die Chancen hierfür.

Interessant ist hierbei die Unterscheidung der Indikatoren der beiden Konzepte, die Madni und Jackson (2009) vornehmen. So eignen sich für die Versorgungssicherheit sogenannte „nachlaufende“ (engl. trailing) Indikatoren, also Indikatoren, die im Nachhinein erhoben werden, wie z.B. die jährliche Minutenanzahl von Betriebsstörungen pro Kunde (European Network of Transmission System Operators for Electricity 2019; Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society 2012). Für die Bewertung der Resilienz empfehlen Madni und Jackson (2009) hingegen „vorlaufende“ (engl. leading) Indikatoren, die antizipierend erhoben werden und somit eine bessere Aussage zur aktuellen Situation liefern können.

Die Messbarkeit durch nachlaufende Indikatoren führt auch Clark-Ginsberg (2016) als Merkmal der Versorgungssicherheit an. Zudem zeichne sich das Konzept der Versorgungssicherheit durch eine binäre Sichtweise aus: Ein System kann entweder die vorgesehene Dienstleistung in der gewünschten Menge und Qualität bereitstellen oder nicht. Durch die Resilienz hingegen kann laut Clark-Ginsberg (2016) ein flexibles Kontinuum zwischen diesen beiden Grenzfällen beschrieben und damit die sich stets ändernden äußeren und inneren Umstände dargestellt werden. Folglich ist die Versorgungssicherheit als finales Ziel des Systems zu verstehen, Resilienz hingegen als Kompromiss bzw. Komponente der Versorgungssicherheit. (Clark-Ginsberg 2016)

2.3 Bewertungsmethoden der Resilienz von Energiesystemen

Im Allgemeinen lassen sich die Bewertungsmethoden der Resilienz von Energiesystemen in qualitative, quantitative und semiquantitative Ansätze unterteilen (Tab. 4). Für eine ganzheitliche Bewertung und Integration der Resilienz in den Betrieb von Energiesystemen bietet sich ein Resilienzmanagement an, das sowohl qualitative als auch quantitative Ansätze vereint.

Qualitative Ansätze verwenden keine numerischen Daten, Formeln oder Modelle, sondern analysieren das entsprechende System mittels Stakeholder-Befragungen, Experteninterviews und -workshops sowie der Recherche entsprechender Literatur (Gasser et al. 2019). Dadurch kann Resilienz zwar nicht quantifiziert werden, es lassen sich aber Leitlinien, konzeptionelle Frameworks und Best-Practice-Beispiele ableiten (Lin und Bie 2016; Hosseini et al. 2016). Diese können sowohl als Grundlage zur Formulierung entsprechender energiepolitischer Zielstellungen dienen als auch zur Vorbereitung einer quantitativen Analyse (Gasser et al. 2019; Lin und Bie 2016).

Quantitative Bewertungsmethoden dagegen basieren auf numerischen Daten, mathematischen Modellen oder Indikatoren (Gasser et al. 2019). Durch sie kann die Wirksamkeit einer Maßnahme bewertet und dementsprechend mit anderen Alternativen verglichen werden (Lin und Bie 2016). Dabei kann zwischen performanzbasierten und strukturbasierten Ansätzen unterschieden werden. Während erstere die Leistungsfähigkeit eines Systems vor und nach einer Störung mithilfe von deterministischen oder probabilistischen Methoden bewertet, stellt letztere die Resilienz anhand bereichsspezifischer Komponenten dar. (Hosseini et al. 2016)

Beide methodischen Ansätze werden in der semiquantitativen Bewertung kombiniert. Üblich ist dabei die Bewertung von Resilienzaspekten durch Experten und Stakeholder

anhand einer entsprechenden Skala oder die Nutzung von Modellen basierend auf der Fuzzy-Logik (Gasser et al. 2019).

Im Folgenden werden Beispiele für die drei Ansätze präsentiert, wobei das Hauptaugenmerk auf der quantitativen Analyse liegt, da sich diese zur Auswertung von dynamischen Simulationsergebnissen am besten eignet. Abschließend wird ein von Linkov und Palma-Oliveira (2017) eingeführtes Resilienzmanagementkonzept vorgestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Bewertungsmethoden nach Lin und Bie (2016) und Charani Shandiz et al. (2020)

Ansatz	Kennzahlen/-größen	Bewertungsmethodik
Qualitativ	<ul style="list-style-type: none"> - Konzeptionelle Frameworks - „Best-Practice“ - Leitlinien/-konzept - Narrative Szenarien 	<ul style="list-style-type: none"> - Checklisten - Fragebögen - Analytische Hierarchieprozesse - Stakeholder-Befragungen
Quantitativ	<ul style="list-style-type: none"> - Probabilistische Verteilung von Kosten - Fläche zwischen Soll- und Ist-Performanz - Wahrscheinlichkeit, dass das System seine Leistung erbringt - Erholzeit nach Ausfall - Verlust der Verbindung zwischen Quelle und Senke - Leistungsbasierter Resilienzindex 	<ul style="list-style-type: none"> - Leistungsflussbasierte Performanzsimulation - Graphentheoretische Verfahren - Probabilistische Verfahren - Schätzungen basierend auf historischen Daten - Nutzen-Kosten-Analyse
Semi-Quantitativ	<ul style="list-style-type: none"> - Scoringverfahren basierend auf qualitativer Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bewertungsmatrizen - Fuzzy-Logik

2.3.1 Qualitative Bewertungsmethoden

An der Universität Bremen wurde innerhalb der Projekte „Nordwest 2050“ (Fichter et al. 2010) und „Resystra“ (Brand et al. 2017) das Leitkonzept „Resiliente Systeme“ erstellt. Dieses gibt konkrete Handlungsanweisungen im Rahmen eines vorsorgeorientierten Ansatzes (Gößling-Reisemann et al. 2015). Dadurch soll der klassische „Was-wäre-wenn“ Ansatz durch das Prinzip „Fast-egal-was-kommt“ ersetzt werden. Das Auftreten von Störungen wird dementsprechend als Normalfall aufgefasst. Ziel ist daher nicht die alleinige Vermeidung von Störungen, sondern ein angemessener Umgang mit diesen. Basierend auf dem Grundsatz der *Ökologischen Resilienz* wird auch hier der Erhalt von Systemdienstleistungen und nicht von Strukturen in den Mittelpunkt gestellt. Zusätzlich werden die untersuchten Systemadaptionen und -transformationen anhand ihrer Sozialverträglichkeit bewertet und entsprechend begrenzt (Fichter et al. 2010). Gößling-Reisemann et al. (2015) zufolge zeichnet sich ein resilientes System durch dessen Anpassungs-, Widerstands-, Improvisations- und Innovationsfähigkeit aus. Daraus leiten sich Gestaltungselemente wie Dispersion, Zellularität und Speicherkapazitäten ab, die diese Fähigkeiten erhöhen (Abb. 8). Resilienz wird somit als normative Kategorie verwendet. Als analytische Kategorie wird auf eine struktur- und ereignisbezogene Vulnerabilitätsanalyse zurückgegriffen (Fichter et al. 2010).

Fähigkeiten und Eigenschaften			
Widerstand	Anpassung	Innovation	Improvisation
Gestaltungsprinzipien und -elemente			
Ressourcenverfügbarkeit und -diversität unverplante Ressourcen, zeitliche, finanzielle und organisatorische Puffer	Subsidiarität polyzentrische Governance, Direktvermarktung, lokale Kapazitäten, vor-Ort-Kenntnisse	Zellularität, lose, optionale Kopplungen dezentrale Steuerung und Regelung, optimierte Sektorkopplung, Power-to-X, interagierende Knoten, bivalente Speisung	
Redundanz, Modularität physisch, funktional, n-1-Kriterium, bivalente Systeme, Reservekraftwerke, Power-to-X, austauschbare Elemente mit Standard-Schnittstellen, Vermeidung monolithischer Strukturen	Effizienz Einfachheit, Komplexitätsreduktion	Selbstorganisation, Akteursnetzwerke Genossenschaften, Entrepreneur, Task Forces, neue Geschäftsmodelle und Produkte, Versorgungssicherheitstarife, unabhängige Kommunikation, Backbones, Notfallübungen	
Rückkopplung Homöostase Ausgleich von verstärkenden und begrenzenden Feedback-Mechanismen	Speicher, Puffer, Dämpfer Strom-, Wärme- und Gasspeicher, Power-to-X, Lastmanagement	Diversität, Variabilität, Dispersion diverse Erzeugungs- und Übertragungssysteme, gleichmäßige geographische Verteilung, vielfältige Ressourcenbasis, Substituierbarkeit	

Abbildung 8: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien resilienter Systeme nach Brand (2016)

Eine andere Vorgehensweise wurde in der acatech-Analyse „Das Energiesystem resilient gestalten“ gewählt (Renn 2017). Hier werden anhand von sechs narrativen Bedrohungsszenarien (Anschläge, Wetterextrema, Rohstoffverknappung Erdgas/Metall, Governance-Versagen und Akzeptanzentzug) die Risiken einer nicht resilienten Energieversorgung beleuchtet. Zur Bewältigung dieser Krisen werden drei Interventionsarten vorgestellt:

- Stressoren abbauen,
- Verwundbarkeit verringern und
- Negative Folgen bewältigen.

Anhand dieser Ansätze werden Interventionen für die einzelnen Szenarien entwickelt. Diese stehen allerdings teilweise untereinander im Zielkonflikt. Vor allem Aspekte der Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit spielen in diesem Kontext eine Rolle. Allem voran nennen die Autoren den Konflikt zwischen Resilienz und Effizienz, der auch von Gößling-Reisemann et al. (2015) betont wird.

2.3.2 Quantitative Bewertungsmethoden

Die performanzbasierten Ansätze zur quantitativen (und semiquantitativen) Bewertung der Resilienz stützen sich auf die Beobachtung, dass ein System auf eine Störung im Allgemeinen, wie in Abbildung 9 dargestellt, reagiert: Auf einen steilen Einbruch der Systemantwort folgt eine graduelle Erholung bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustands. Bruneau et al. (2003) prägten in diesem Zusammenhang den Begriff des Resilienzdreiecks, das sich durch einen meist rapiden Abfall der Leistungsfähigkeit und einer anschließenden graduellen Erholung des Systems ergibt (vgl. Abb. 10). Bei der Betrachtung des finalen Zustands ergeben sich vier typische Erholungsverhalten (Gasser et al. 2019):

- Robustes Verhalten: Das System kann seine ursprüngliche Leistungsfähigkeit wiederherstellen.
- Adaptives Verhalten: Das System erreicht eine höhere Leistungsfähigkeit als die ursprüngliche.
- Duktiles Verhalten: Das System kann seine ursprüngliche Leistungsfähigkeit nicht wiederherstellen.
- Kollabierendes Verhalten: Das System kann sich nicht erholen und verliert komplett seine Leistungsfähigkeit.

Die verschiedenen Forschungsansätze ordnen entsprechende Eigenschaften und Kapazitäten eines resilienten Systems den unterschiedlichen Phasen seiner Systemantwort zu

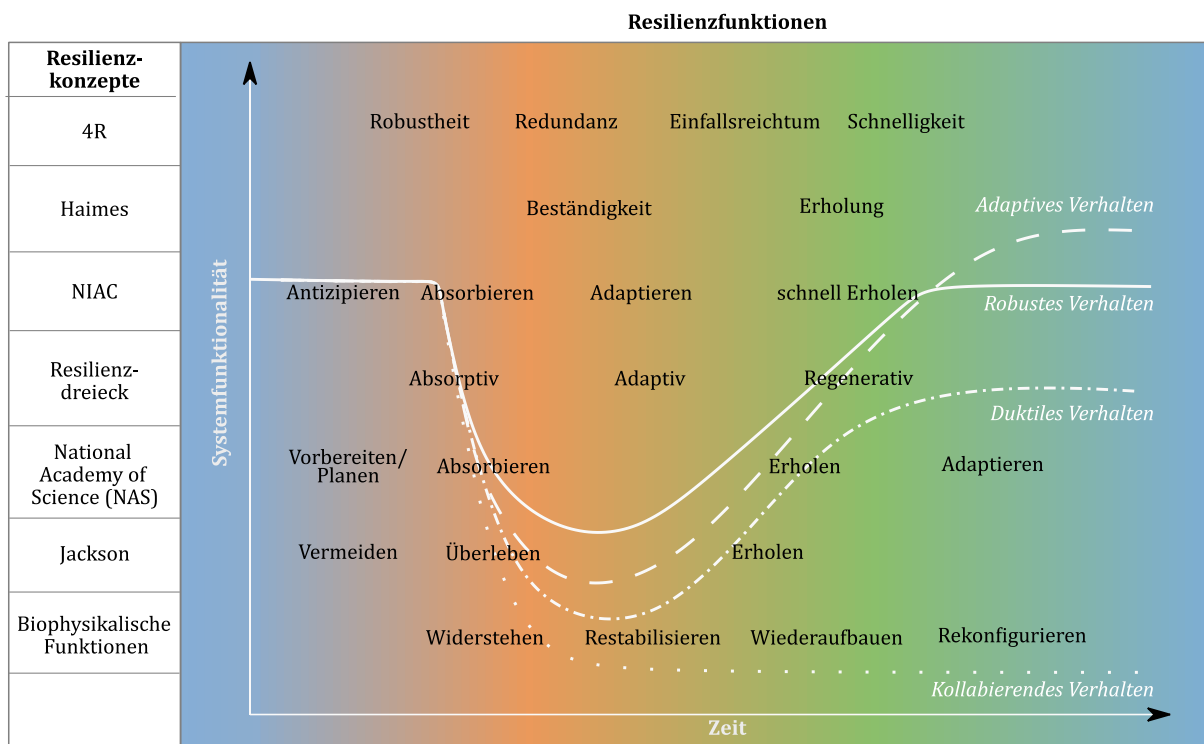


Abbildung 9: Allgemeine Systemantwort auf eine Störung inklusive der verschiedenen Vokabeln zur Beschreibung der unterschiedlichen Phasen nach Gasser et al. (2019)

(Abb. 9). Dabei mag das Vokabular verschieden sein, die Schlüsse und Handlungsempfehlungen, die sich daraus ziehen lassen, stimmen jedoch überein (Gasser et al. 2019).

Durch den Vergleich der erwarteten und der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des Systems ergeben sich unterschiedliche Bewertungsmethoden. Bruneau et al. (2003) messen die Resilienz R durch die aufgespannte Fläche zwischen gewollter (100 %) und tatsächlicher Systemleistungsfähigkeit $Q(t)$ zwischen Störungsbeginn t_0 und vollständiger Erholung t_1 (Abb. 10):

$$R = \int_{t_0}^{t_1} 100\% - Q(t) dt \quad (1)$$

Nan und Sansavini (2017) wenden ein detaillierteres Konzept zur Auswertung des Resilienz-dreiecks an. Da ihr Konzept im weiteren Verlauf der Arbeit angepasst und auf dynamische Simulationsergebnisse angewandt wird, wird es im Folgenden etwas ausführlicher vorgestellt. Nan und Sansavini (2017) definieren zunächst drei Fähigkeiten, die ein resilientes System aufweist:

- **Absorptive Fähigkeit:** Das System kann negative Einflüsse einer Störung reduzieren. Diese Fähigkeit kann zum Beispiel durch Redundanzen, die einen alternativen Betrieb des Systems ermöglichen, erhöht werden.

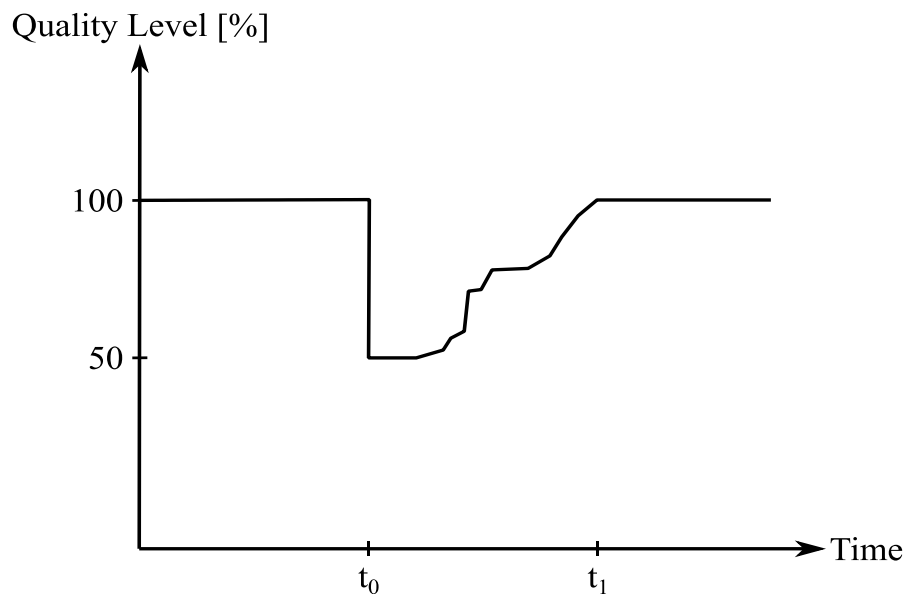


Abbildung 10: Resilienzdreieck nach Bruneau et al. (2003)

- Adaptive Fähigkeit: Das System kann sich an Störungen durch Selbstorganisation anpassen. Diese Fähigkeit kann bspw. durch Notfallpläne erhöht werden.
- Regenerative Fähigkeit: Das System ist fähig sich selbst zu reparieren und zur alten Leistungsfähigkeit zurückzukehren. Diese Fähigkeit überlappt mit der Adaptiven Fähigkeit, weshalb für beide ähnliche Maßnahmen förderlich sind.

Diese drei Fähigkeiten lassen sich durch Kennzahlen quantifizieren. Diese wiederum ergeben sich aus dem Verlauf des *Measure of Performance MOP* (Abb. 11) in den unterschiedlichen Phasen der Systemantwort. Diese werden unterschieden in die Phase des Ausgangszustand 0 (engl. original steady phase), die zum Zeitpunkt t_d beginnenden disruptive Phase DP, die sich anschließende zum Zeitpunkt t_r beginnende Erholungsphase RP (engl. recovery phase) und der sich abschließend zum Zeitpunkt t_{ns} einstellenden Phase des neuen (stationären) Zustand (engl. new steady phase).

Über die Absorptive Fähigkeit eines Systems gibt die *Robustheit R* Auskunft. Sie ist das Minimum des *MOP* im betrachteten Zeitraum:

$$R = \min(MOP) \quad (2)$$

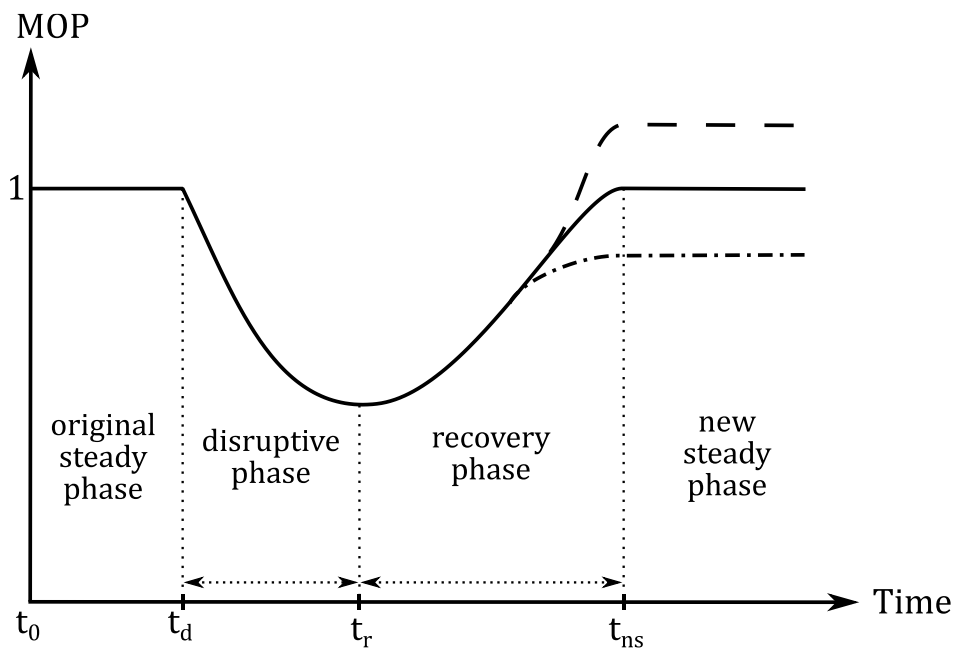


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf des "Measure of Performance" nach Nan und Sansavini (2017)

Die durchschnittliche Steigung des *MOP*, die sogenannte *Rapidität RAPI*, kann je nach Betrachtungszeitraum Auskunft über die absorptive ($RAPI_{DP}$) oder die adaptive bzw. regenerative ($RAPI_{RP}$) Fähigkeit geben:

$$RAPI = \frac{\Delta MOP}{\Delta t} \quad (3)$$

Das gleiche gilt für den *Performanzverlust TAPL* (engl. Time-Averaged Performance Loss), der die Fläche zwischen dem Sollwert des *MOP* (Wert des *MOP* vor der Störung zum Zeitpunkt t_0) und seinem Istwert $MOP(t)$ zwischen Störungsbeginn t_d und vollständiger Erholung t_{ns} wiedergibt. Um einen zeitunabhängigen Wert zu erhalten, wird dieses Integral zusätzlich durch die betrachtete Zeitdifferenz $t_{ns} - t_d$ geteilt:

$$TAPL = \frac{\int_{t_d}^{t_{ns}} (MOP(t_0) - MOP(t)) dt}{t_{ns} - t_d} \quad (4)$$

Als letzter Wert wird die *Erholungsfähigkeit RA* (engl. Recover Ability), also das Verhältnis des *MOP* vor und nach der Störung berechnet, womit berücksichtigt werden kann, dass das System durch die Bewältigung einer Krise einen Lerneffekt durchlaufen kann, der zu einem erhöhten Leistungsniveau nach der Störung führt:

$$RA = \frac{|MOP(t_{ns}) - MOP(t_r)|}{|MOP(t_0) - MOP(t_r)|} \quad (5)$$

Die vorgestellten Kennzahlen werden nun in die Resilienz Kennzahl *General Resilience GR* überführt:

$$GR = R \cdot \frac{RAPI_{RP}}{RAPI_{DP}} \cdot TAPL^{-1} \cdot RA \quad (6)$$

Für ein nicht resilientes System wird GR null, dies ist der Fall, wenn

- Der *MOP* durch die Störung auf null fällt ($R = 0$, keine absorptive Fähigkeit),
- Nach der Störung der *MOP* unmittelbar auf sein niedrigstes Niveau fällt ($RAPI_{DP} \rightarrow \infty$, keine absorptive Fähigkeit),
- Der *MOP* nach Erreichen seines Minimums nicht mehr ansteigt ($RAPI_{RP} = 0$, keine adaptive/restorative Fähigkeit).

Dieses Resilienzmaß kann für verschiedene Störfälle und Systemkonfigurationen berechnet werden, um ein detailliertes Bild des komplexen Verhaltens eines Systems zu erhalten und Änderungen in der Systemarchitektur in Bezug auf die Resilienz vergleichbar zu machen.

2.3.3 Semiquantitative Bewertungsmethoden

Fisher et al. (2010) schlagen zur Quantifizierung von Resilienz die Aggregation von Informationen aus fünf Ebenen vor. Dabei wird Resilienz zunächst auf drei Hauptkonzepte aufgeteilt: Robustheit, Improvisationsfähigkeit und Erholung (Abb. 12). Jedes dieser Konzepte kann auf einzelne Schlüsseigenschaften und -funktionen heruntergebrochen werden. Für Robustheit sind dies zum Beispiel Redundanzen, Prävention und das Aufrechterhalten von Hauptfunktionen. Diese werden wiederum auf der dritten Ebene anhand einzelner Subsysteme (Strom, Gas, Wasser etc.) kategorisiert. Da Fisher et al. (2010) die Resilienz von Energiesystemen als kritische Infrastruktur betrachten, werden hier auch u.a. Telekommunikations-, Wasser- und Abwassersysteme aufgeführt. Auf der vierten Ebene werden die konkreten Eigenschaften der betrachteten Systeme und die damit verbundenen individuellen Abhängigkeiten (Reservekapazitäten, Verbindungen, unterbrechungsfreie Versorgung etc.) kategorisiert und durch Rohdaten aus der fünften Ebene bewertet. Bei den Rohdaten handelt es sich dabei vor allem um Ja/Nein-Antworten, die von den Betreibern der einzelnen Systeme eingeholt wurden. Die Aggregation auf den einzelnen Ebenen erfolgt durch Gewichtungsfaktoren, die zuvor durch Expertengruppen anhand der Wichtigkeit der einzelnen Kategorien definiert wurden. Somit erhält man für jede Komponente der einzelnen Ebenen einen Index zur Beurteilung der Resilienz. Gleichzeitig ergibt sich für das gesamte System ein Resilienzindex zwischen 0 und 100, der sich

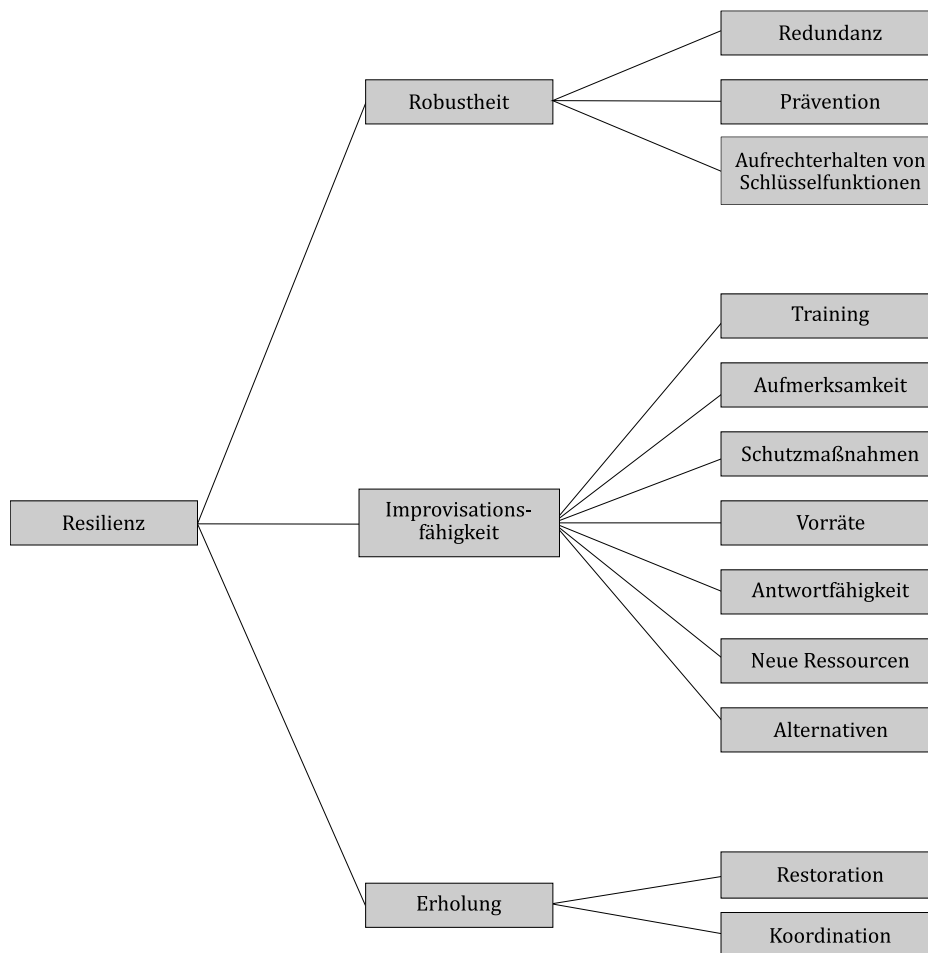


Abbildung 12: Hauptkategorien und Schlüsselfähigkeiten resilienter Systeme (Fisher et al. 2010)

zum Vergleich mit anderen Systemen und zur Priorisierung von Investitionen zur Verbesserung der Resilienz anbietet. (Fisher et al. 2010)

Roeger et al. (2014) wählen eine ähnliche Herangehensweise, indem sie auf Basis verschiedener Forschungsarbeiten zur Resilienz eine Matrix mit den Kategorien Planung/Vorbereitung, Absorption, Erholung und Anpassung entwerfen. In diesen Kategorien werden Kennzahlen aus den Bereichen Physik, Information, Kognition und Gesellschaft verwendet. Anschließend können diese gewichtet und in eine Kennzahl überführt werden. Ein Ausschnitt der Matrix ist in Tabelle 5 dargestellt. Dabei sind die vorgeschlagenen Elemente recht allgemein gehalten und müssen auf die jeweilige Anwendung angepasst werden. (Roeger et al. 2014)

Tabelle 5: Resilienzmatrix nach Roege et al. (2014)

	<i>Planung & Vorbereitung</i>	<i>Absorbieren</i>	<i>Erholen</i>	<i>Anpassung</i>
<i>Physikalisch</i>	Energiespeicher	Redundante Komponente	Backup-Kommunikation	Erneuerung obsoleter Anlagen
	Autarkie	Inselnetzfähigkeit	Brennstoffflexibilität	Integration alternativer/ neuer Energien
<i>Information</i>	(Antiviren-)Schutz des Kontrollsystems	Notfallplan vorhanden	Tracking des Erholungsprozesses	Identifikation des Störungsverlaufs
	Verfügbarkeit von Anlagendaten	Überwachung kritischer Systemdaten	Verfügbarkeit von Informationen zur Einsetzbarkeit	Nutzung gesammelter Daten zur Vorhersage
<i>Kognitiv</i>	Regelmäßiges Training	Nutzen von Entscheidungshilfen	Improvisation	Implementierung resilienterer Systeme
	Förderung von Expertise	Proaktive Haltung	Umgang mit Energieknappheit	Integration von „lessons learned“
<i>Sozial</i>	Stakeholderanalyse	Agiles Betriebsmanagement	Proaktive Nachbarschaften	Aufklärung der Stakeholder
	Robuste Risikoanalyse	Individuelles und institutionelles Engagement	Koordination der Hilfsangebote	Informationskultur

2.3.4 Resilienzmanagement

Abschließend sei noch auf Häring et al. (2017) verwiesen, die als Erweiterung zum bestehenden Risikomanagement ein Resilienzmanagementkonzept entwerfen und darin mehrere Resilienzbewertungsmethoden kombinieren. Ihr Konzept besteht aus neun Schritten, welche iterativ durchlaufen werden und in Abbildung 13 dargestellt sind. Dabei werden für die Bewertung der Resilienz Modellarten auf drei Ebenen vorgeschlagen:

- Ebene 1: Screening-Modelle und Indizes zur Identifizierung von Untersuchungs- und Verbesserungsbedarf für die weitere Analyse.
- Ebene 2: Detaillierte Modelle und formelle Entscheidungsanalysen mit Fokus auf dem Zusammenspiel von Komponenten und kritischen Funktionen, welche die Beurteilung des Investitionsbedarfs ermöglichen.
- Ebene 3: Komplexere Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Systemen und Subsystemen durch robuste Szenarienanalysen für mehrere Störfälle und Stressoren.

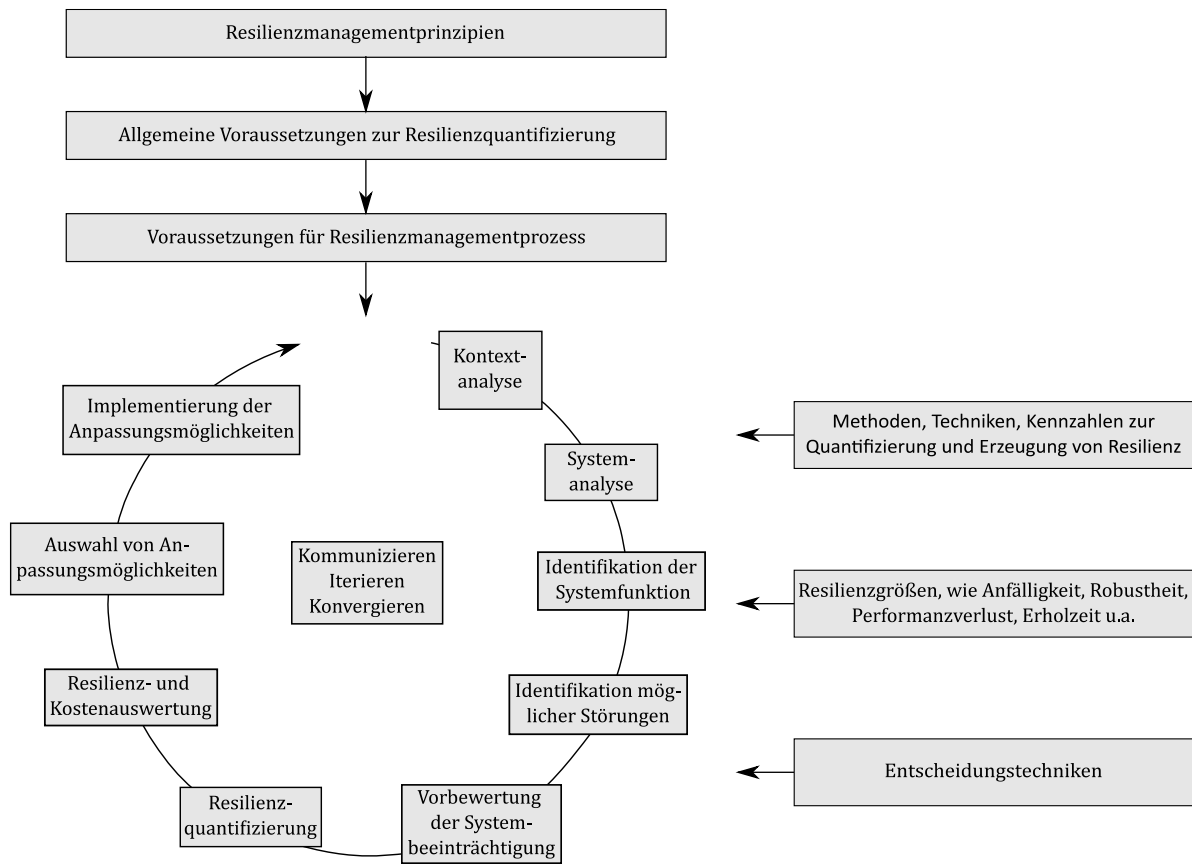


Abbildung 13: Resilienzmanagementkonzept nach Häring et al. (2017)

3 HERLEITUNG DER BEWERTUNGSMETHODIK FÜR DYNAMISCHE SIMULATIONEN

Für die Auswertung dynamischer Simulationsergebnisse bietet sich die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Methodik von Nan und Sansavini (2017) an. Diese Methodik wurde von ihnen bereits für ein elektrisches Energiesystem angewandt und getestet. Für integrierte Energiesysteme und deren dynamische Simulation ergeben sich jedoch einige Bewertungsmethodik vonnöten. Bevor dies geschehen kann, wird jedoch in Abschnitt 3.2 zunächst ein geeigneter *Measure of Performance* für jeden Sektor ermittelt. Basierend auf dessen charakteristischem Verhalten, werden in Abschnitt 3.3 entsprechende Anpassungen an der Methodik vorgenommen. Im letzten Abschnitt werden passende Parameter für die so hergeleitete Methode ermittelt. Zur Veranschaulichung der betrachteten Aspekte werden in diesem Kapitel generische Modelle und Systemmodelle der einzelnen Sektoren verwendet, bevor im vierten Kapitel die hergeleitete Bewertungsmethodik auf ein gekoppeltes Energiesystem angewandt wird.

3.1 Systemsimulation mit Modelica

Ein System ist im Allgemeinen die Verbindung mehrerer Teilsysteme zu einem Gesamtsystem, das wiederum Teil eines übergeordneten Systems ist (Dhar 2017). Daher ist bei der Betrachtung von Systemen die genaue Definition der jeweiligen Systemgrenzen Voraussetzung für belastbare und reproduzierbare Ergebnisse. Die im System befindlichen Komponenten sind miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig (Sadoun 2000). Oftmals entwickeln sich dadurch unter ihnen Abhängigkeiten.

Ziel der Systemsimulation ist die Vorhersage des Systemverhaltens unter vorgegebenen Bedingungen (Dhar 2017). Dafür werden einzelne Komponentenmodelle unter Berücksichtigung physikalischer Grundsätze miteinander verbunden. Um ein rechenfähiges, effizientes Modell zu erhalten, müssen diese auf die für das Gesamtsystem und dessen internen Wechselwirkungen wichtigen Eigenschaften und Verhaltensweisen reduziert werden (Dhar 2017). Je nach betrachtetem System entsteht so ein multiphysikalisches Modell, das auch die Inklusion von Regelungs- und Automationsprozessen erlaubt. Mithilfe der Systemsimulation kann ein besseres Verständnis des Systemverhaltens und dessen internen Wechselwirkungen erreicht werden (Sadoun 2000). Daher wird diese auf verschiedenen Entwicklungsstadien angewandt, um neue Designs zu testen und die Auswirkungen von Änderungen in der Systemarchitektur abzuschätzen (Sadoun 2000). Wird die Systemsimulation zur Modellierung von Störungen genutzt, ergibt sich zudem die

Möglichkeit, die Effizienz entsprechender Schutzmaßnahmen zu testen, ohne das reale System durch Experimente zu gefährden. Für diese Arbeit wurden Systemsimulationen in der Modellersprache Modelica (Modelica Association 2021) durchgeführt. Diese dient zur dynamischen Simulation komplexer Systeme und erlaubt eine physikalisch basierte, akausale sowie objekt-orientierte und fachgebietsübergreifende Simulation. Durch diese Eigenschaften eignet sich Modelica besonders für die Simulation von Störfällen innerhalb gekoppelter Energiesysteme.

Bereits in Kapitel 2 wurde darauf eingegangen, dass Störungen und die Antwort auf sie stets dynamischer Natur sind. Von besonderem Interesse sind dabei die transienten Vorgänge im System beim Eintreten der Störung und während der Systemerholung. Dank des dynamischen Simulationsansatzes von Modelica können diese simuliert und im Anschluss bewertet werden. Eine stationäre oder quasistationäre Betrachtung würde dagegen wichtige Elemente vernachlässigen. So kann anhand von Abbildung 14 nachvollzogen werden, wie die Wärmeproduktion für einen vorgegebenen Wärmebedarf durch eine stationäre bzw. quasistationäre Modellierung unterschätzt werden kann. Die stationäre Simulation vernachlässigt zeitliche Veränderungen innerhalb eines Systems und errechnet somit eine über den betrachteten Zeitschritt konstante Heizleistung zur Deckung des gegebenen

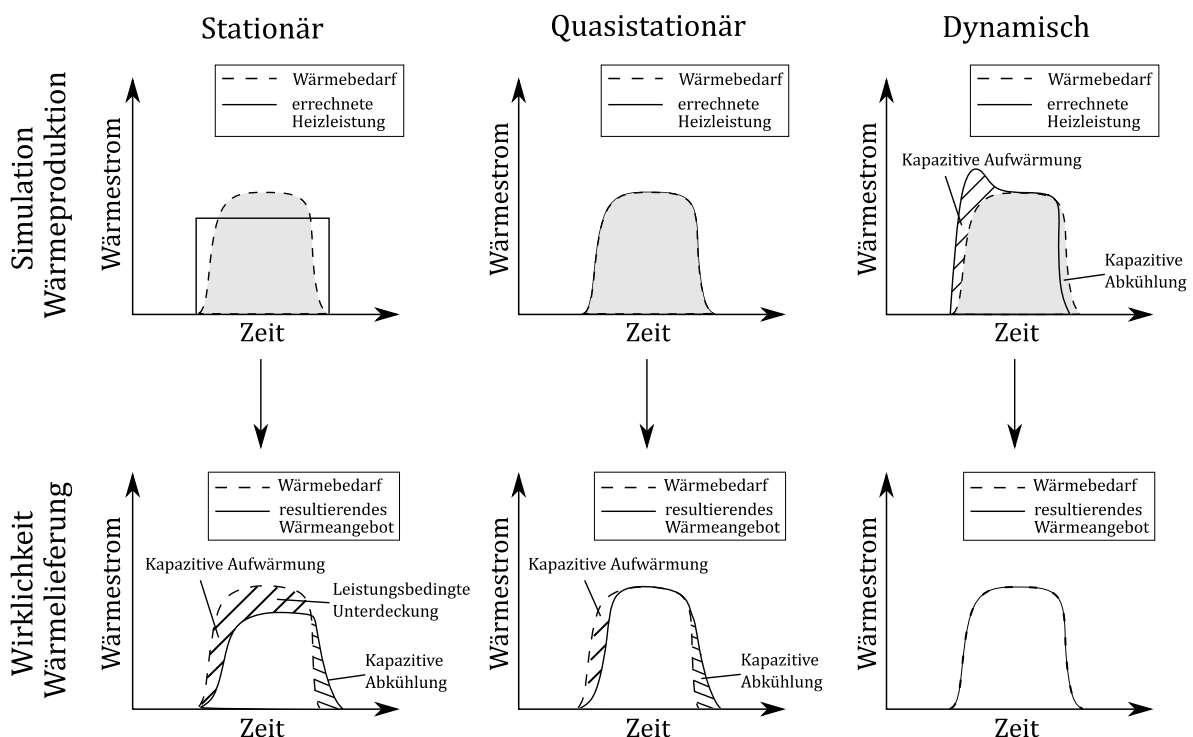


Abbildung 14: Vergleich der stationären, quasistationären und dynamischen Modellierung des Wärmebedarfs zum Aufheizen eines Gebäudes nach Wischhusen (2005)

Wärmebedarfs. Der im betrachteten Zeitraum übertragene Energieinhalt stimmt so zwar mit dem benötigten überein, da nicht-stationäre Effekte, wie die im System vorhandenen thermischen Kapazitäten und die tatsächliche Größe des aktuellen Wärmebedarfs nicht berücksichtigt werden, wird der benötigte Wärmestrom jedoch unterschätzt. Des Weiteren kommt es beim Abfallen des Wärmebedarfs zu einem Überangebot an Heizleistung, da in der stationären Betrachtung die verzögerte Abkühlung der thermischen Kapazitäten nicht berücksichtigt wird. Die quasistationäre Simulation betrachtet die Vorgänge im System als eine Abfolge von Gleichgewichtszuständen. Dadurch stimmt die berechnete Heizleistung zwar mit dem aktuellen Wärmebedarf überein, die Wärmekapazitäten bleiben aber beim Aufheiz- und Abkühlvorgang weiterhin unberücksichtigt. Diese werden nur in der dynamischen Simulation abgebildet, die den durch die vorhandenen Kapazitäten abweichenden Wärmeverbrauch bei der Aufheizung und Abkühlung berücksichtigt und so eine entsprechende Wärmeproduktion vorgibt, um den vorhandenen Wärmebedarf stets zu decken. (Wischhusen 2005)

Üblicherweise wird bei der Modellierung von Energiesystemen auf Kennfelder und Lastprofile zurückgegriffen. Für ein System, das im vorgegebenen Betriebsbereich arbeitet, kann so das Verhalten der einzelnen Komponente effizient beschrieben werden. Diese Herangehensweise stößt jedoch beim Auftreten von Störungen an ihre Grenzen. Dies kann anhand von Abbildung 15 nachvollzogen werden. Hier wurde der Ausfall des Wärmeerzeugers in einem Heizkreislauf anhand von Wärmeprofilen (links) bzw. physikalisch basiert (rechts) simuliert. Durch die Verwendung von Lastprofilen wird die Annahme implementiert, dass die im Profil geforderte Wärme dem Heizwasser stets entzogen werden

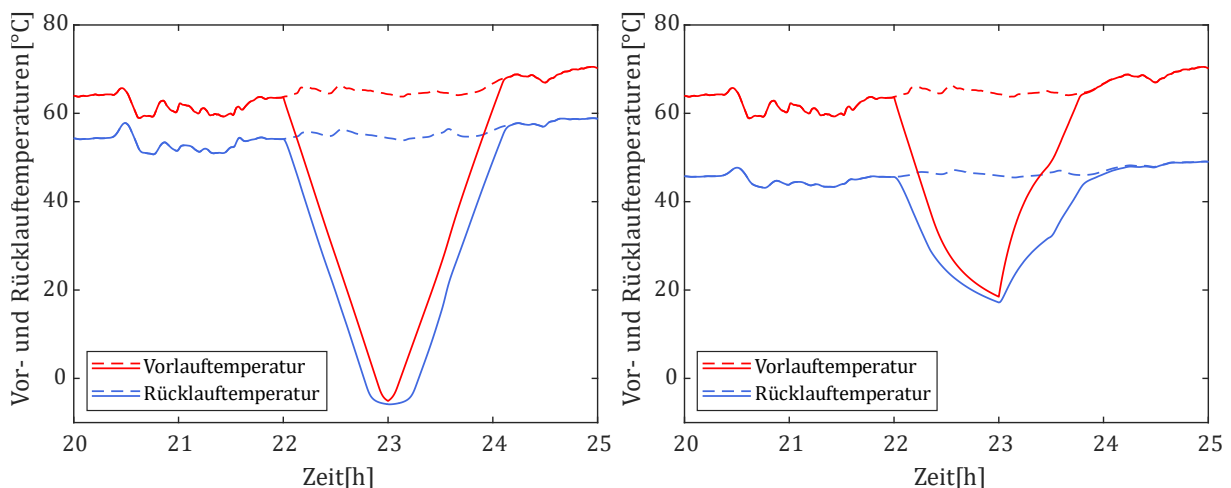


Abbildung 15: Verhalten der Vor- und Rücklauftemperaturen bei Ausfall des Wärmeerzeugers simuliert durch die Verwendung von Lastprofilen (links) bzw. physikalisch-basierter Modellierung (rechts). Die gestrichelten Linien entsprechen dem Verlauf ungestörten Fall, die durchgezogenen dem Verlauf im Störfall.

kann. Fällt nun der Wärmeerzeuger im Kreislauf aus, erfolgt jedoch keine Wiedererhitzung des Wassers. Da trotzdem der regulär geforderte Wärmestrom entzogen wird, kommt es zu einer starken Abkühlung des Heizwassers bis unterhalb des Nullpunktes – ein nicht-physikalisches und somit unrealistisches Verhalten. Bei der physikalisch basierten Simulation werden hingegen die thermodynamischen Prozesse im entsprechenden Gebäude beachtet. Der aus dem Heizwasser entzogene Wärmestrom wird somit u.a. durch die Raumtemperatur begrenzt und fällt auf circa 18 °C ab. Es wird also deutlich, dass durch die physikalisch basierte Simulation die Beschreibung des Systems außerhalb seines Betriebsbereiches ermöglicht wird. Ein weiterer Vorteil des physikalisch basierten Modellansatzes ergibt sich im Hinblick auf die Validierung des Systemmodells. Diese ist für die Darstellung von bisher nicht aufgetretenen Störfällen aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Die Simulationsergebnisse können somit nur auf ihre Plausibilität geprüft werden. Durch die Verwendung physikalischer Modelle kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Simulationsergebnisse eine bessere Wiedergabe des Verhaltens im Störfall ermöglichen als Kennfelder und Lastprofile.

Durch die akusale Modellierung in Modelica kann die Flexibilität des Modells weiter erhöht werden, da keine explizite Festlegung von Ein- und Ausgangsgrößen erfolgen muss. Wird zum Beispiel ein Gas- oder Fernwärmenetz simuliert, müssten bei der Verwendung eines kausalen Simulationsansatzes die Strömungsrichtungen innerhalb der Rohre und damit der Signalfluss innerhalb des Systems festgelegt werden. Treten in solchen Netzen jedoch Störungen wie der Ausfall eines Rohrstranges auf, kann es je nach Struktur und Druckverhältnissen zu einer Strömungsumkehr kommen. Ähnliches kann im Stromnetz beim Ausfall einer Leitung in einem vermaschten System beobachtet werden. Durch eine akusale Modellierung können die damit einhergehenden Prozesse abgebildet und untersucht werden.

Selbst ohne Sektorenkopplung ist zur Modellierung eines Energiesystems die Betrachtung mehrerer Systembereiche notwendig. So ist zum Beispiel das Heizsystem eines Hauses durch thermodynamische, hydraulische und regelungstechnische Prozesse charakterisiert. Modelica ermöglicht dabei die Verarbeitung logischer, mathematischer und symbolischer Beziehungen und somit die Integration unterschiedlicher Fachgebiete in einem Modell. Dieses Prinzip ist von noch größerer Bedeutung bei der Betrachtung gekoppelter Energiesysteme, in denen die unterschiedlichen Sektoren und deren Eigenheiten beachtet werden müssen. Durch die hohe Komplexität der betrachteten Energiesysteme kann deren Modellierung nicht mehr nur durch eine Person allein vorgenommen werden. Vielmehr müssen Kooperationen mit Fachleuten aus den angrenzenden Ingenieurbereichen eingegangen werden, um die Eigenschaften der einzelnen Sektoren darzustellen und

gleichzeitig das Gesamtsystem erfassen zu können. Dabei ist es wichtig, auf die Arbeit anderer aufbauen zu können. Durch die Objektorientierung Modelicas wird dies erleichtert. So können beispielsweise bereits existierende Modelle erweitert werden, ohne dass deren Funktionalität in anderen Systemmodellen beeinflusst wird. Auch die Kombination einzelner Modelle zu einem neuen System wird dadurch erleichtert. In dieser Arbeit werden daher Modelle aus den Forschungsprojekten TransiEnt.EE (Andresen et al. 2017) und ResiliEntEE (Bode et al. 2021) genutzt und erweitert und somit ein doppelter Modellieraufwand vermieden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass sowohl der Quelltext der Programmiersprache Modelica als auch der der genutzten Modellbibliothek TransiEnt Library öffentlich und frei zugänglich sind (Technische Universität Hamburg 2021). Dies erleichtert nicht nur die wissenschaftliche Kooperation und Weiternutzung der Modelle, es erhöht auch die Nachvollziehbarkeit und Einordnung der Modelle und ihrer Simulationsergebnisse.

Die TransiEnt Library

Die TransiEnt Library ist das Ergebnis der vom BMWi geförderten Forschungsprojekte TransiEnt.EE (FKZ: 03ET4003) und ResiliEntEE (FKZ: 03ET4048). In TransiEnt.EE wurden verschiedene Entwicklungspfade des Energiesystems der Stadt Hamburg anhand ihrer Kosten und CO₂-Emissionen untersucht und bewertet. Im Nachfolgeprojekt ResiliEntEE wurde das untersuchte Gebiet auf die Region Norddeutschland (Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein) erweitert und zusätzlich die Resilienz als Bewertungskriterium betrachtet.

In beiden Forschungsprojekten wurden auf Basis der vorgegebenen Kriterien Modelle für Erzeuger, Verbraucher, Speicher, Wandlungstechnologien und Netzkomponenten entwickelt. Mit der TransiEnt Library können dynamische Interaktionen zwischen den einzelnen Sektoren und deren Einfluss auf die Flexibilität und Stabilität des Gesamtsystems untersucht werden. Im Rahmen dessen können Sensitivitätsanalysen durchgeführt und verschiedene Integrations- und Regelstrategien bewertet werden. Alle Modelle sind in der TransiEnt Library veröffentlicht, welche kontinuierlich aktualisiert und ergänzt wird.

Um die Zahl ähnlicher Modelle mit dem gleichen Modellierungsansatz zu reduzieren, nutzt die TransiEnt Library Komponenten aus der ClaRa Library (Hamburg University of Technology et al. 2021), der TILMedia Library (TLK-Thermo et al. 2020) und der Buildings Library (Wetter et al. 2014). Mithilfe der ClaRa Library kann das transiente thermische Verhalten von Kraftwerken und ähnlichen auf Fluidkreisläufen basierenden Anlagen simuliert werden. Dementsprechend umfasst sie eine Vielzahl grundlegender Kompo-

nente wie Rohre, Ventile oder Wärmeübertrager, die auch in der TransiEnt Library verwendet werden. Aus der TILMedia Library werden Stoffdaten mehrerer Fluide wie Wasser und Erdgas verwendet. Die Buildings Library wiederum umfasst Modelle zur Modellierung transienter Effekte in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, welche in der TransiEnt Library genutzt werden, um Abkühl- und Aufheizvorgänge darzustellen. In Abbildung 16 ist die Struktur der TransiEnt Library abgebildet.

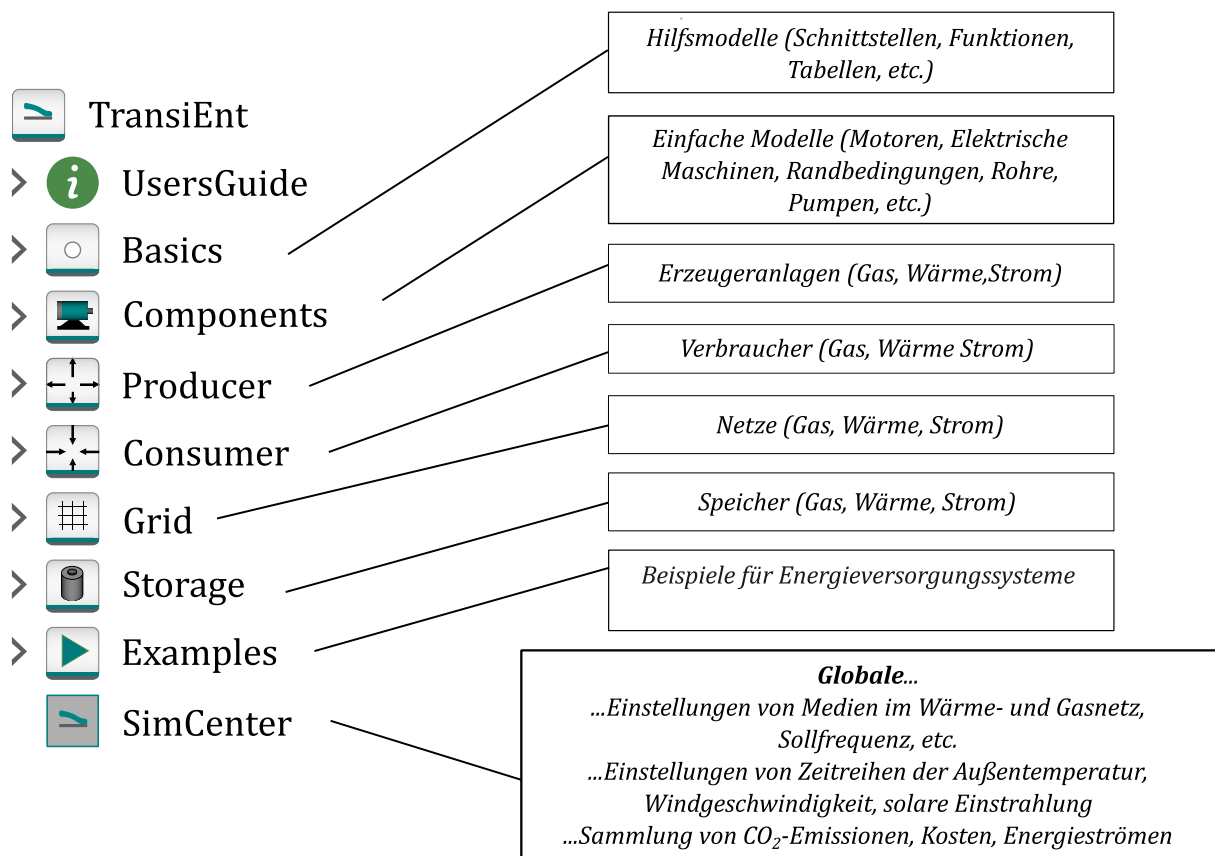


Abbildung 16: Struktur der TransiEnt Library

3.2 Auswahl eines geeigneten Measure of Performance

Wie in Abschnitt 2.3.2 vorgestellt, schlagen Nan und Sansavini (2017) die Betrachtung eines *Measure of Performance (MOP)* zur Bewertung der Resilienz vor. Dieser *MOP* spiegelt die Funktionalität des Systems wider und muss je nach betrachtetem System und dessen Dienstleistungen ausgewählt werden. In ihrem Fallbeispiel nutzen Nan und Sansavini (2017) daher u.a. das Verhältnis zwischen verfügbaren und vorhandenen Stromleitungen oder das Verhältnis zwischen verfügbarer und benötigter elektrischer Leistung für die Bewertung der Resilienz eines elektrischen Netzes. Im folgenden Abschnitt soll nun für die Sektoren Wärme, Gas und Strom ein *MOP* ausgewählt werden. Dafür werden übliche Regelgrößen und Leistungsströme sowie deren Verhalten im Störfall betrachtet. Bei der anschließenden Auswahl soll nicht nur Wert auf die Aussagekraft der einzelnen *MOPs* in Bezug auf den betrachteten Sektor gelegt werden, sondern auch auf die Vergleichbarkeit der *MOPs* innerhalb eines gekoppelten Energiesystems.

3.2.1 Wärmesektor

Für den Wärmesektor soll anhand des in Abbildung 17 dargestellten Modells eines Heizkreislafs eines Wohnhauses ein geeigneter *Measure of Performance* ausgewählt werden. Als mögliche Größen werden hierfür die Raumlufttemperatur, die Vorlauftemperatur und der übertragene Wärmestrom untersucht. Die Raumlufttemperatur spiegelt direkt den Komfort der Bewohner wider, ihr Verlauf gibt dementsprechend den direkten Einfluss ei-

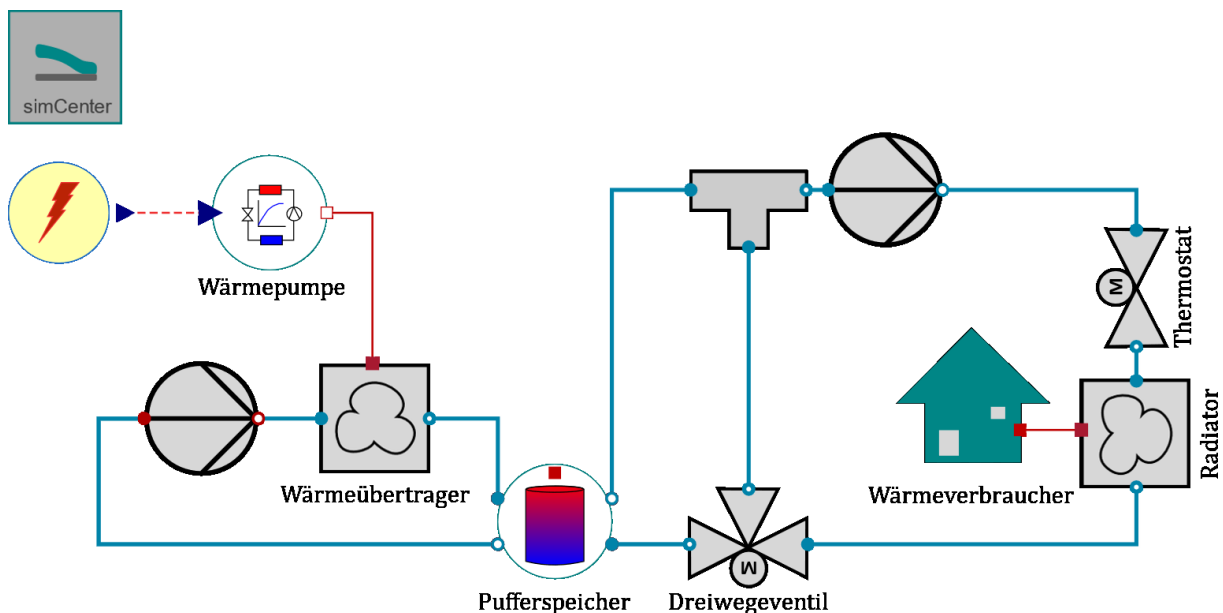


Abbildung 17: Modellaufbau eines charakteristischen Heizkreislafs eines Wohnhauses mit Wärmepumpe

ner Störung im System auf dessen Verbraucher wider. Die Vorlauftemperatur ist eine übliche Regelgröße, nicht nur innerhalb des Heizkreislaufs eines einzelnen Gebäudes, sondern auch in Fern- und Nahwärmenetzen. Der übertragene Wärmestrom ergibt sich aus dem Massenstrom des Wassers und dessen Temperaturunterschied im Vor- und Rücklauf und kann in der Praxis nur indirekt gemessen werden.

Der betrachtete Heizkreislauf besteht aus zwei Teilkreisläufen, dem Produzenten- und dem Verbraucherkreislauf. In ersterem wird das Heizwasser durch eine Wärmepumpe erhitzt und anschließend in einen Pufferspeicher geführt. Der Massenstrom wird durch die installierte Pumpe so reguliert, dass die Austrittstemperatur der Wärmepumpe 55 °C nicht überschreitet. Die Leistung der Wärmepumpe wird wiederum in Abhängigkeit zur Temperatur im oberen Teil des Speichers geregelt, deren Sollwert bei 50 °C liegt. Auf der Verbraucherseite wird dem Speicher im oberen Bereich heißes Wasser entnommen und mit Rücklaufwasser gemischt, um die von einer Außentemperaturabhängigen Heizkurve vorgegebene Vorlauftemperatur zu erreichen. Durch ein Thermostat wird der Massenstrom in Abhängigkeit zur Raumtemperatur gedrosselt. In der Heizkurve ist eine maximale Vorlauftemperatur von 45 °C hinterlegt. Für die Raumtemperatur wurde nach EN 15251 ein Sollwert von 22 °C gewählt. Die Wärme wird über einen Radiator an den thermischen Verbraucher übertragen. Für diesen wurde ein reduziertes Modell erstellt, in dem die Transmissions- und Lüftungsverluste sowie die Wärmezufuhr durch solare Einstrahlung und innere Lasten aggregiert modelliert werden (Senkel et al. 2019). Ebenso wurden die thermischen Kapazitäten der Wände und der Raumluft implementiert. In Tabelle 6 sind die verwendeten Parameter aufgelistet.

Tabelle 6: Parameter des modellierten Heizkreislaufs

Parameter	Wert
Max. Vorlauftemperatur	45 °C
Sollraumtemperatur	22 °C
Therm. Nennleistung Wärmepumpe (A2/W35)	8,33 kW _{th}
Gebäudestandard	EnEV 2014
Grundfläche	100 m ²
Fensterfläche	16 m ²
Volumen des Pufferspeichers	200 l

Zur Bewertung der Resilienz werden nun zwei Störfälle simuliert, die die Wärmeversorgung des Hauses beeinträchtigen: Im ersten Szenario fällt die Wärmepumpe aus, im zweiten die Pumpe im Verbraucherkreislauf. Die Dauer beider Störfälle wird auf jeweils 12 Stunden festgesetzt. Der Beginn der Störung ist der 1. Februar 2012 8 Uhr, da an diesem Tag sehr kalte Außentemperaturen vorlagen und die Auswirkungen einer solchen Störung entsprechend deutlich werden. In Abbildung 18 ist der Verlauf der Raumlufttemperatur, der Vorlauftemperatur und des übertragenen Wärmestroms für beide Störfälle dargestellt. Dabei werden die störungsfreien Verläufe (grün, gestrichelt) den Verläufen unter den jeweiligen Störeinflüssen (blau, durchgezogen) gegenübergestellt.

Durch den Ausfall der Wärmepumpe kann der Speicher nicht geladen werden. Dadurch sinkt dessen Temperatur so stark, dass die von der Heizkurve vorgegebene Vorlauftemperatur nicht erreicht werden kann (Abb. 18b). In Folge dessen fällt auch die Raumtemperatur ab (Abb. 18a). Erst nachdem die Wärmepumpe wieder in Betrieb genommen werden kann, steigen Vorlauf- und Raumtemperatur wieder auf ihr Sollniveau an. Bei Betrachtung des Wärmestroms (Abb. 18c) ist zu erkennen, dass dieser zunächst erwartungsgemäß abfällt und nach der Störung auf ein höheres Niveau als im störungsfreien Verlauf ansteigt. Dieses Verhalten resultiert aus der gleichzeitigen Abkühlung der Raumluft und der Wände. Nach der Störung müssen daher nicht nur die Luft sondern auch die Wände wieder erwärmt werden. Da deren Wärmekapazität ein Vielfaches von der der Luft beträgt, dauert dieser Vorgang länger als er im Verlauf der Raumlufttemperatur ablesbar ist. Zudem kann am Verlauf des Wärmestroms der Einfluss des Speichers abgelesen werden. Seitwegen kann trotz des Ausfalls der Pumpe für kurze Zeit die Wärmezufuhr aufrechterhalten werden, bevor diese graduell abnimmt. Gleichzeitig kühlt das in ihm befindliche Wasser ebenfalls ab und muss nach Behebung der Störung ebenfalls erwärmt werden, was die Übertragung der maximalen Wärmeleistung an das Gebäude verzögert.

Fällt die Umwälzpumpe im Verbraucherkreislauf aus, kann keine Wärme an das Gebäude übertragen werden. Im Unterschied zum ersten Szenario ist hier der fehlende Massenstrom durch den Radiator die Ursache. Da dadurch das Wasser nicht zirkulieren kann und nun weniger Wärme abgibt, sinkt die Vorlauftemperatur im geringeren Maße als im ersten Störfall (Abb. 18e). Die Raumlufttemperatur, die das Gleichgewicht zwischen zu- und abgeführter Wärme wiedergibt, sinkt im ähnlichen Maße wie beim Ausfall der Wärmepumpe (Abb. 18d). Dabei ist jedoch zu Beginn der Störung ein stärkerer Abfall zu beobachten, was seine Ursache in der abrupten Unterbrechung des Massenstroms und somit der Wärmezufuhr hat. Da während der Pumpenstörung weiterhin heißes Wasser im Speicher vorliegt, kann der Radiator nach Behebung der Störung direkt mit entsprechend heißem Wasser versorgt werden, weshalb der Wärmestrom sprunghaft auf seinen Maximalwert

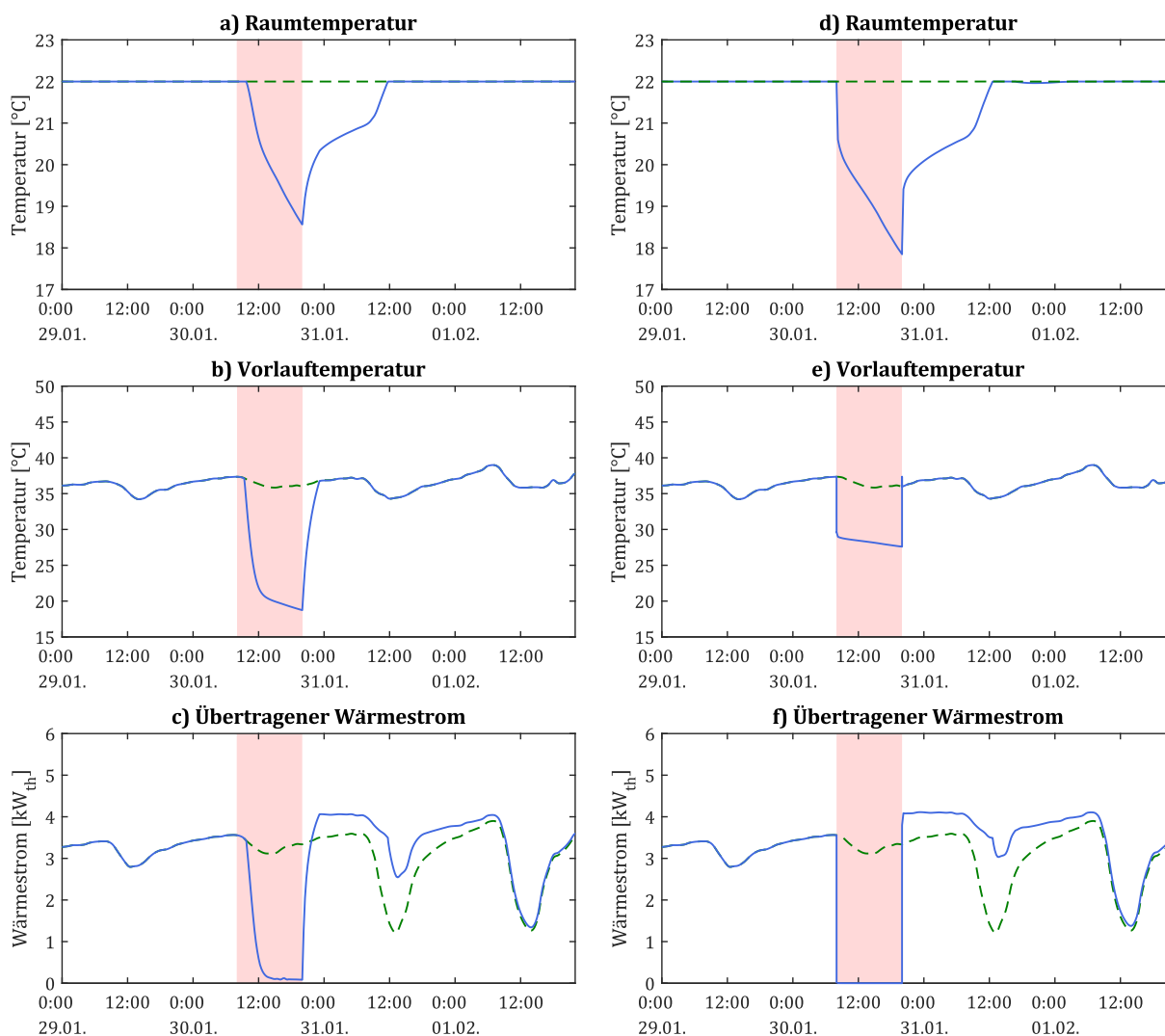


Abbildung 18: Reaktion des Heizkreislaufs auf den Ausfall der Wärmepumpe (a-c) und den Ausfall der Umwälzpumpe (d-f). Grüne gestrichelte Linie: ungestörter Verlauf, blaue durchgezogene Linie: gestörter Verlauf.

ansteigt. Die anschließende Bereitstellung von zusätzlicher Wärme erfolgt wiederum ähnlich wie im ersten Störfall, weil Raum- und Außentemperatur in beiden Szenarien ähnlich bzw. identisch sind (Abb. 18f).

Für die Auswahl einer der drei betrachteten Größen als *MOP* ergibt sich aus diesen Beobachtungen, dass der übertragene Wärmestrom am besten geeignet ist. Während die Raum- und Vorlauftemperaturen kurze Zeit nach Störungsende suggerieren, dass sich das System bereits wieder im Gleichgewicht befindet, kann am Wärmestrom abgelesen werden, dass das System sich tatsächlich noch in der Erholungsphase befindet und somit anfälliger für weitere Störungen wäre (Abb. 18c und f). Außerdem zeigt der Vergleich der

beiden Störszenarien, dass im Gegensatz zur Vorlauftemperatur der Wärmestrom auch eine Beeinträchtigung des Systems durch ein Aussetzen der Wasserzirkulation abbildet. Für die Betrachtungen des Wärmesektors wird daher der übertragene Wärmestrom als *MOP* genutzt.

3.2.2 Gassektor

Analog zur Vorlauftemperatur und zur übertragenen Wärmeleistung im Wärmesektor soll nun die Eignung des Gasdrucks an der jeweiligen Abnahmestelle und der dort übertragenen Gasleistung, also des Enthalpiestroms, im Gassektor als *MOP* bewertet werden. Bei ersterem handelt es sich, ähnlich wie die Vorlauftemperatur im Wärmesektor, um eine übliche Regelgröße im Gasnetz, letzterer stellt analog zum übertragenen Wärmestrom den Energiefluss zum Gasverbraucher dar. Zur Bewertung der beiden Größen wird das in Abbildung 19 dargestellte Modell einer Masche mit Abzweigungen in einem Gasnetz verwendet.

In diesem generischen Modell wird das Gasnetz durch eine Quelle im Südwesten (SW) gespeist. Diese wird so geregelt, dass an ihrem Austritt ein konstanter Druck von 12,5 bar vorliegt. Im Nordwesten (NW) befindet sich ein Gasverbraucher, der während der gesamten Simulationszeit konstant $160 \text{ MW}_{\text{GCV}}$ bezieht. Dieser konstante Verbrauch liegt oft bei industriellen, kontinuierlich betriebenen Anlagen wie z. B. in der Chemieindustrie vor. Im Osten befinden sich dagegen zwei Konsumenten mit zeitlich veränderlichem Verlauf. In Wohngebieten liegt in den Morgen- und Abendstunden typischerweise ein erhöhter Gasbedarf vor. Dieser wird im vorliegenden Modell vereinfachend in Form einer Sinuskurve mit einer 12-stündigen Periodendauer implementiert. Beim Verbraucher im Nordosten (NO) schwingt der Gasverbrauch zwischen 100 und $200 \text{ MW}_{\text{GCV}}$, beim Verbraucher im Südosten (SO) zwischen 80 und $120 \text{ MW}_{\text{GCV}}$. Die Quelle und die Verbraucher sind durch acht Rohrleitungen miteinander verbunden, wobei vier von ihnen eine Masche bilden. Das Gas kann somit theoretisch jeweils auf zwei unterschiedlichen Wegen von der Quelle zu den Verbrauchern strömen. Die sich einstellenden Wege hängen dabei von den vorliegenden Druckverhältnissen ab und sind in Abbildung 19 für den störungsfreien Fall eingezeichnet. Die Berechnung des Druckverlustes innerhalb der Rohre basiert auf den entsprechenden physikalischen Gleichungen (Cerbe und Lendt 2017). Innerhalb der Rohrleitungen und Verbindungsstücke werden dynamische Massenbilanzen für das Gas und die einzelnen Gaskomponenten sowie eine dynamische Energiebilanz verwendet, wobei angenommen wird, dass die Strömung isotherm ist (Bode 2021). Als Medium innerhalb der Rohre wird Erdgas verwendet, die entsprechenden Stoffwerte stammen aus der TILMedia Bibliothek (TLK-Thermo et al. 2020). Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 7 aufgelistet.

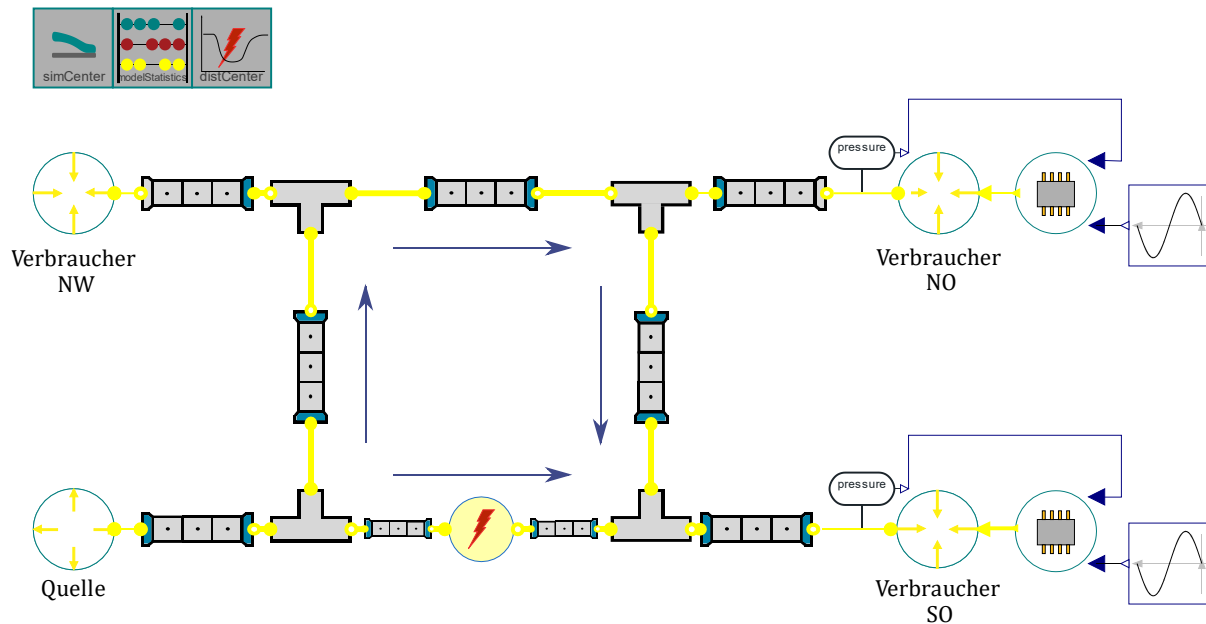


Abbildung 19: Modellaufbau einer Gasnetzmasche mit Abzweigungen

Je nach Aufbau und Einsatzart gibt es Anlagen, für die es notwendig ist, dass im Gasnetz ein bestimmter Mindestdruck vorliegt. Wird dieser unterschritten, wird die Anlage heruntergefahren, da ihr ordnungsgemäßer Betrieb bzw. der ihrer Komponenten nicht mehr gewährleistet werden kann. Um den Effekt einer solchen Regelung darzustellen, werden die Störauswirkungen anhand von zwei Simulationen untersucht. In der ersten wird ein solcher Abschaltdruck nicht berücksichtigt, in der zweiten wird von einem Abschaltdruck von 8 bar ausgegangen. Durch den Ausfall einer Regelung oder von Komponenten oder durch einen Rohrbruch kann es dazu kommen, dass der Gasstrom durch ein Rohr abgeriegelt werden muss. Im vorliegenden Modell soll dies für das südliche Rohr der Fall sein. Analog zum betrachteten Störfall im Wärmesektor beginnt auch hier die Störung 8 Uhr und dauert 12 Stunden an. In Abbildung 20 ist die entsprechende Reaktion auf eine solche Störung anhand der Verläufe der Drücke und Enthalpieströme abgebildet.

Bei der Betrachtung des Enthalpiestroms (Abb. 20d) im ersten Szenario fällt auf, dass die Gasversorgung fortwährend gewährleistet werden kann, wenn auch bei einem beträchtlich niedrigeren Druck (Abb. 20a-c). Dieser fällt während der Störung an allen Messorten ab, wobei am Verbraucher im Südosten der niedrigste Druck vorliegt, da dieser am weitesten von der Quelle entfernt ist. Bei einer Regelung mit integriertem Abschaltdruck hingegen fällt der Druck zunächst ebenfalls ab. Unterschreitet er aber im Südosten 8 bar, reagiert die Regelung mit dem Ausschalten des Verbrauchers, wodurch ab diesem Zeitpunkt an dieser Stelle dem Netz kein Gas mehr entnommen wird (Abb. 20h). Dadurch steigt der

Tabelle 7: Parameter des Gasmodells

Parameter	Wert
Einspeisedruck	12,5 bar
Abschaltdruck an Verbrauchern	0/8 bar
Gesamte Rohrlänge	47 km
Gesamtes Gasnetzvolumen	4.400 m ³
Durchschnittlicher Verbrauch NO	156 MW _{GCV}
Durchschnittlicher Verbrauch SO	104 MW _{GCV}
Konstanter Verbrauch NW	160 MW _{GCV}

Druck wieder an (Abb. 20e-g). Um zu gewährleisten, dass die vom Netz genommenen Verbraucher erst wieder Gas entnehmen, wenn das Netz sich vollständig erholt hat, wurde in der Regelung der Verbraucher hinterlegt, dass diese nach Unterschreitung des Abschalt-drucks erst eine Stunde nach Störungsende wieder hochgefahren werden. Daher wird die Anlage im Südosten trotz des Überschreiten des Mindestdrucks nicht sofort wieder in Betrieb genommen. Da direkt nach Störungsende im nicht mehr unterbrochenen Gasnetz weniger Verbraucher Gas entnehmen, kommt es zu einem kurzzeitig leicht erhöhten Druck. Im Norden wurde der Abschaltdruck nicht unterschritten, wodurch hier die Enthalpieströme mit denen des ungestörten Szenarios übereinstimmen, während der Enthalpiestrom zum Verbraucher im Südosten während der Störung und kurz danach null ist (Abb. 20h).

Bei der Resilienzbewertung anhand des Drucks für dieses Beispielsystem würde das Szenario mit integriertem Abschaltdruck positiver bewertet werden, obwohl der Verbraucher im Südosten nicht mit Gas versorgt werden kann. Diese Tatsache kann nur aus dem Verlauf des Enthalpiestroms abgelesen werden, weshalb dieser als *MOP* für den Gassektor ausgewählt wird. Ein weiterer Vorteil dieser Auswahl besteht darin, dass dadurch eine sehr gute Vergleichbarkeit mit der übertragenen Wärmeleistung gegeben ist.

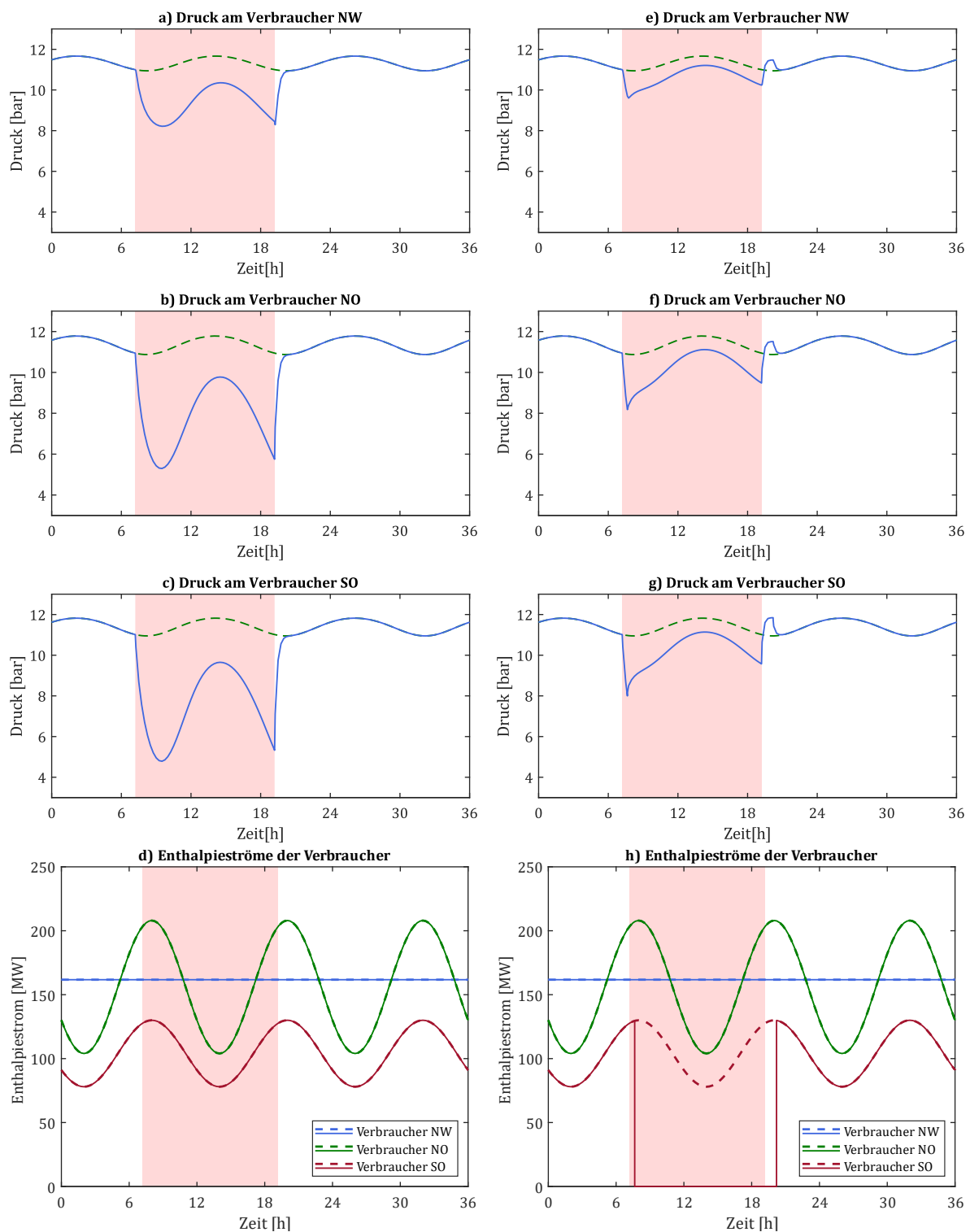


Abbildung 20: Reaktion des Gasnetzes auf den Ausfall der Gasleitung. a-d: ohne integrierten Ausschalt-
druck, e-h: mit einem Ausschalt-
druck von 8 bar

3.2.3 Stromsektor

Der Transport elektrischer Energie findet im Gegensatz zum Gas- und Wärmetransport nicht stoffgebunden statt. Dadurch ergeben sich erhebliche Unterschiede zu den bisher betrachteten Systemen. So verfügt das elektrische Netz im Vergleich zu Gas- und Wärmesystemen nur über geringe inhärente Puffer- und Speichermöglichkeiten, wie z.B. die Trägheiten der Turbosätze von Kraftwerken. Dementsprechend ist es notwendig, zu jedem Zeitpunkt den vorhandenen Bedarf durch die aktuelle Stromerzeugung oder durch zusätzlich integrierte Speicher zu decken. Durch die geringeren Trägheiten im elektrischen Netz ergeben sich zudem Unterschiede in den Zeitkonstanten der betrachteten Effekte (Abb. 21). Diese umfassen im elektrischen Netz den Millisekunden- bis Sekundenbereich, während thermophysikalische Zeitkonstanten im Bereich von Minuten bis Stunden liegen. Bei der Auswahl des *MOPs* für den Stromsektor ist daher nicht nur dessen Repräsentationsfähigkeit für die Vorgänge im elektrischen Netz zu beachten, sondern auch dessen Vergleichbarkeit zu den *MOPs* des Gas- und Wärmesektors.

Im elektrischen Netz wird unter anderem die Netzfrequenz als Stabilitätskriterium genutzt. Diese spiegelt das Wirkleistungsgleichgewicht wider und gibt somit Auskunft über die aktuelle Versorgungsstabilität im Netz. Im europäischen Verbundnetz werden 50 Hz als Sollwert für die Netzfrequenz verwendet. Die im Netz befindlichen Betriebsmittel sind

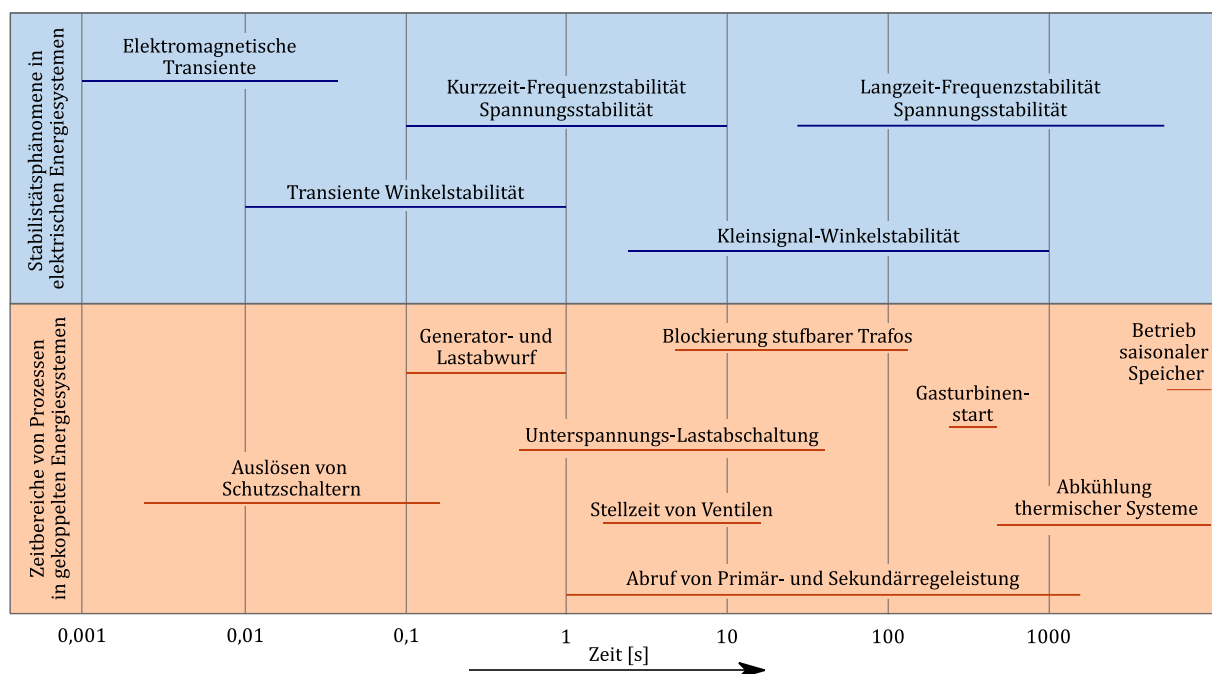


Abbildung 21: Zeitliche Einordnung von Phänomenen im elektrischen und thermophysikalischen Energietransport (Bode et al. 2021)

auf diesen Wert ausgelegt. Da bei größeren Schwankungen aufgrund nicht-linearer Effekte die Stabilität des Netzes erheblich schwerer aufrechterhalten werden kann, werden bereits bei kleinen Abweichungen Maßnahmen zur Regulierung des Netzes durchgeführt. Auch die ans Netz angeschlossenen Lasten reagieren auf Schwankungen in der Netzfrequenz. Diese Abhängigkeit soll im Folgenden genutzt werden, um zu zeigen, dass analog zum Wärme- und Enthalpiestrom für das elektrische Netz die vom Verbraucher abgenommene Wirkleistung als *MOP* genutzt werden kann.

Für den Stromsektor wird ein Modell der sogenannten N5-Area verwendet (Abb. 22). Dieses Modell wurde von Tirtashi et al. (2014) als Vereinfachung des NORDIC32-Testsystems entwickelt, ein System zur Modellierung von Spannungseinbrüchen im schwedischen Netz (Stubbe und Amorouayeche 1995). Es besteht aus drei Stromproduzenten im Norden (G1-G3) und fünf Stromverbrauchern, die an den Enden (L1-L2) und im Zentrum (La-Lc) an das Netz angeschlossen sind. Die Leistungsabnahme P der Verbraucher wurde in Abhängigkeit von der Frequenz f modelliert (Price et al. 1993):

$$\frac{P - P_0}{P_0} = k_{pf} \cdot (f - f_0) \quad (7)$$

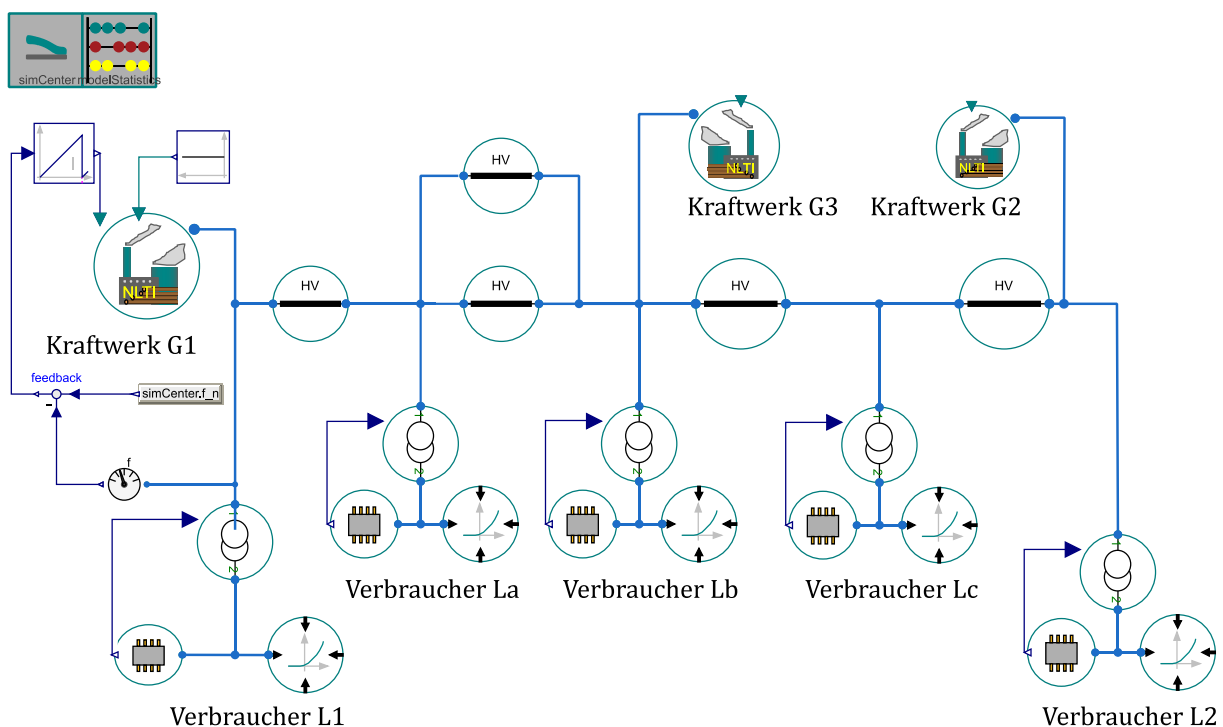


Abbildung 22: Modellaufbau des elektrischen Beispielsmodells

Um den Einfluss dieser Abhängigkeit im Falle einer Störung darzustellen, wurden die jeweiligen Proportionalitätsfaktoren k_{pf} zwischen 0 und 2,5 variiert. Jeder Verbraucher ist über einen stufbaren Transformator mit dem Stromnetz verbunden. Die darin befindlichen Stromleitungen werden quasistationär und basierend auf dem Pi-Ersatzschaltbild modelliert. Dabei werden sowohl Wirk- als auch Blindleistungsverluste berücksichtigt. Das östliche Kraftwerk dient als Referenzknoten und stellt außerdem Sekundärregelung bereit. In Tabelle 8 sind die entsprechenden Parameter aufgelistet.

Für dieses Stromnetz wird ein einstündiger Ausfall des Kraftwerks G3 simuliert. Der Verlauf der Netzfrequenz und der von den Verbrauchern entnommene elektrische Leistung

Tabelle 8: Parameter des elektrischen Systems

Parameter	Wert
Leistungsbedarf:	
- Verbraucher L1	203,0 MW _{el}
- Verbraucher L2	126,9 MW _{el}
- Verbraucher La	101,5 MW _{el}
- Verbraucher Lb	1.522 MW _{el}
- Verbraucher Lc	101,5 MW _{el}
Proportionalitätsfaktoren der Frequenzabhängigkeit:	
- Verbraucher L1	1,0 s
- Verbraucher L2	1,5 s
- Verbraucher La	0,0 s
- Verbraucher Lb	2,5 s
- Verbraucher Lc	2,0 s
Nennleistungen:	
- Kraftwerk G1	1,8 GW _{el}
- Kraftwerk G2	100 MW _{el}
- Kraftwerk G3	400 MW _{el}
Gesamtleitungslänge	1.600 km
Nennspannung	380 kV
Nennfrequenz	50 Hz

sind in Abbildung 23 dargestellt. Durch den Ausfall des Kraftwerks G3 werden die Turbosätze der Kraftwerke abgebremst und die Frequenz sinkt. Aufgrund der bereitgestellten Primärregelleistung der Kraftwerke G1 und G2 und der Frequenzabhängigkeit der Lasten stellt sich ein minimaler Wert von 49,91 Hz ein. Im Anschluss ist anhand eines geringen Frequenzanstiegs das Bereitstellen von Sekundärregelleistung durch das Kraftwerk G1 zu beobachten. Da diese aber nicht ausreichend groß ist, um den Ausfall des Kraftwerks G3 auszugleichen, verbleibt die Frequenz unterhalb ihres Sollwertes. Die Verbraucher reagieren aufgrund ihrer Frequenzabhängigkeit entsprechend mit einer verminderten Leistungsaufnahme. Dabei wird die Aufnahme von Wirkleistung am stärksten am Verbraucher L_b reduziert, weil hier der größte Proportionalitätsfaktor integriert wurde. Die anderen Verbraucher, deren Verbrauch im dreistelligen Megawattbereich liegt, reagieren entsprechend ihrer Frequenzabhängigkeiten, wobei der Bedarf von Verbraucher L_a vollständig gedeckt wird, da dieser frequenzunabhängig implementiert wurde. Nach dem Wiedereinschalten des Kraftwerkes G3 kann genügend Leistung zur Deckung des Bedarfs bereitgestellt werden. Dementsprechend wird durch die Bereitstellung von Sekundärregelleistung von Kraftwerk G1 die Netzfrequenz wieder auf ihren Sollwert von 50 Hz geregelt, wodurch auch die von den Verbrauchern entnommenen Leistungen wieder ihren Sollwerten entspricht.

Es wird also deutlich, dass sich trotz der Unterschiede zu Gas- und Wärmenetzen auch im Stromsektor Schwankungen im Netz auf die von den Verbrauchern abgenommenen Energieströme auswirken. Die übertragene elektrische Wirkleistung kann dementsprechend analog zum Wärme- und Enthalpiestrom genutzt werden, um die Resilienz eines elektrischen Systems zu bewerten und mit der Resilienz verbundener Gas- und Wärmesysteme

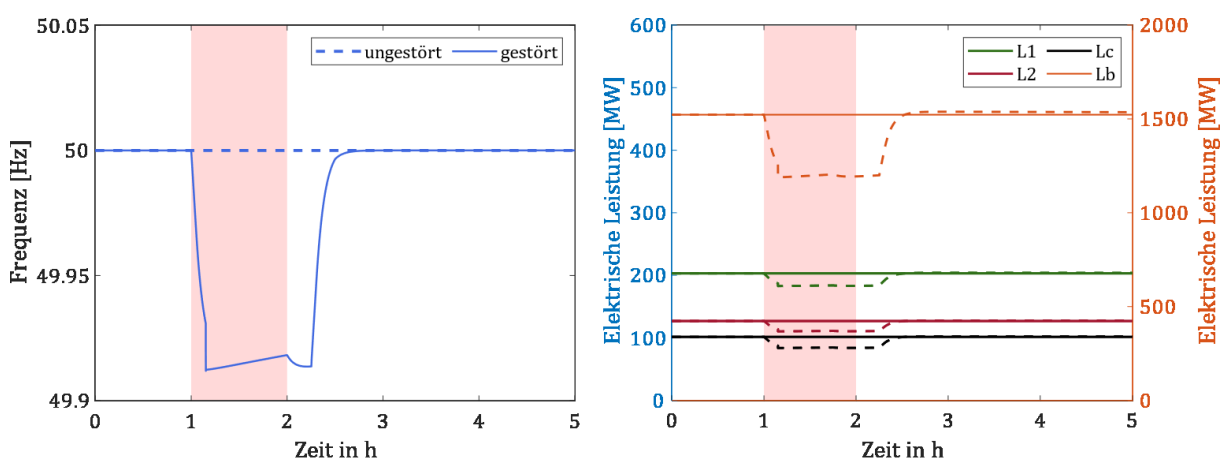


Abbildung 23: Reaktion des elektrischen Systems

zu vergleichen. In diesem Zusammenhang soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Vorgehensweise vor allem für die Betrachtung gekoppelter Energiesysteme geeignet ist, da hier die Vergleichbarkeit sehr gegensätzlicher Systeme gewährleistet werden muss. Für Stabilitätsbetrachtungen, die das elektrische Netz isoliert untersuchen, sei auf die Arbeit von Heckel und Becker (2019) verwiesen, in der die Netzspannung und -frequenz als charakteristische Größen detaillierter untersucht werden.

3.3 Anpassungen in der Bewertungsmethodik

Aufgrund der Auswahl der charakteristischen Energieströme der einzelnen Sektoren (Enthalpiestrom, übertragener Wärmestrom und übertragene elektrische Leistung) muss die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Bewertungsmethode nach Nan und Sansavini (2017) angepasst werden, um plausible Ergebnisse zu erzeugen. Zur besseren Unterscheidung wird daher ab diesem Punkt der Begriff charakteristische Größe x anstelle des Measure of Performance *MOP* verwendet.

3.3.1 Elemente der Resilienzformel

Nan und Sansavini (2017) benutzen für ihre Arbeit ausschließlich normalisierte Werte, vor allem das Verhältnis zwischen geforderter und tatsächlich verfügbarer Menge oder Anzahl. Dieser Ansatz könnte theoretisch auch auf die charakteristische Größe x übertragen werden. Allerdings kann es vor allem bei Energieströmen vorkommen, dass diese zu lastschwachen Zeiten oder aufgrund von Regelmechanismen einen Sollwert von null einnehmen, was die Normalisierung für einen solchen Zeitpunkt unmöglich machen würde. Des Weiteren würde eine Normalisierung mit dem jeweiligen Sollwert zu einer Verringerung des Informationsgehalts der charakteristischen Größe führen, da somit auch der natürliche Verlauf der Energieströme egalisiert würde, wie in Abbildung 24 beispielhaft dargestellt ist. In der normalisierten Abbildung (Abb. 24, rechts) sind keine Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Störfall ablesbar, obwohl, wie in der nicht-normierten Abbildung (Abb. 24, links) zu erkennen ist, der zweite Störfall während eines höheren Bedarfs auftritt und somit negativer zu bewerten ist. Daher wird die charakteristische Größe als Eingangsgröße für die Auswertung nicht normalisiert. Um dennoch einen dimensionslosen Resilienzindex zu erhalten, werden die einzelnen Elemente des Index normalisiert. Hinweise zur Wahl der entsprechenden Normalisierungswerte finden sich in Abschnitt 3.4.1.

Aufgrund von Wettereinflüssen, Regelmechanismen und systeminternen Trägheiten kann es auch im Normalbetrieb und ohne das Auftreten von Störungen zu leichten Abweichun-

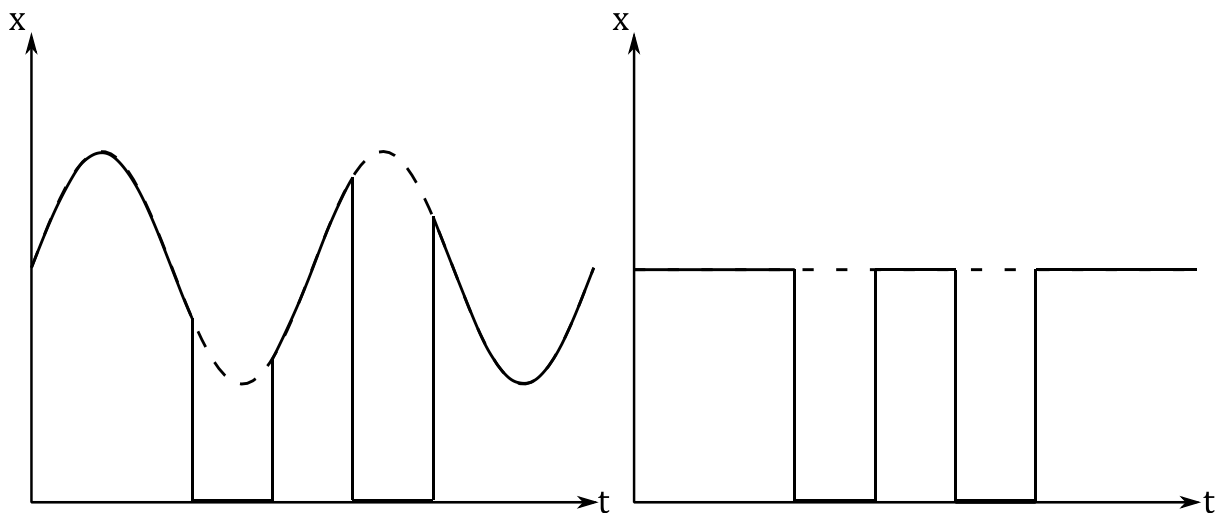


Abbildung 24: Realer Kurvenverlauf einer charakteristischen Größe (links) und ihr normierter Kurvenverlauf (rechts) während Störungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

gen und Schwankungen zwischen Ist- und Sollwert kommen. Diese werden bei der Auslegung von Energiesystemen berücksichtigt und haben in der Regel keinerlei negative Auswirkungen auf die vom System abhängigen Verbraucher. So stellt beispielsweise ein kurzzeitiges Unterschreiten des Sollwärmestroms keine direkte Einbuße für den thermischen Komfort der Bewohner eines Hauses dar, da die thermische Kapazität des Gebäudes ein schnelles Auskühlen verhindert. Dementsprechend sollten diese kleineren Abweichungen keinen negativen Effekt auf den sich einstellenden Resilienzindex haben. Aufgrund dessen wird, wie in Abbildung 25 dargestellt, ein Toleranzband mit den Grenzen $x_{tol,max}$ und $x_{tol,min}$ in die Methodik eingeführt und nur die Abweichungen Δx außerhalb dieses Bandes bei der Berechnung des Resilienzindex berücksichtigt:

$$\Delta x = \begin{cases} x - x_{tol,max} & \text{wenn } x \geq x_{tol,max} \\ 0 & \text{wenn } x_{tol,min} < x < x_{tol,max} \\ x_{tol,min} - x & \text{wenn } x \leq x_{tol,min} \end{cases} \quad (8)$$

Im Abschnitt 3.4.2 werden Besonderheiten bei der Definition des Toleranzbandes beschrieben.

Von maßgeblichem Interesse zur Einordnung der Systemantwort ist der minimale Wert an Funktionalität, der aufgrund einer Störung erreicht wird. Nan und Sansavini (2017) integrieren hierfür den Minimalwert des *MOP* in die Berechnung ihrer Resilienzgröße. Dies impliziert, dass ein hoher Wert eine hohe Resilienz des Systems bedeutet. Da dies jedoch nicht für die anderen Elemente des Resilienzindex gilt, wird im Folgenden die ma-

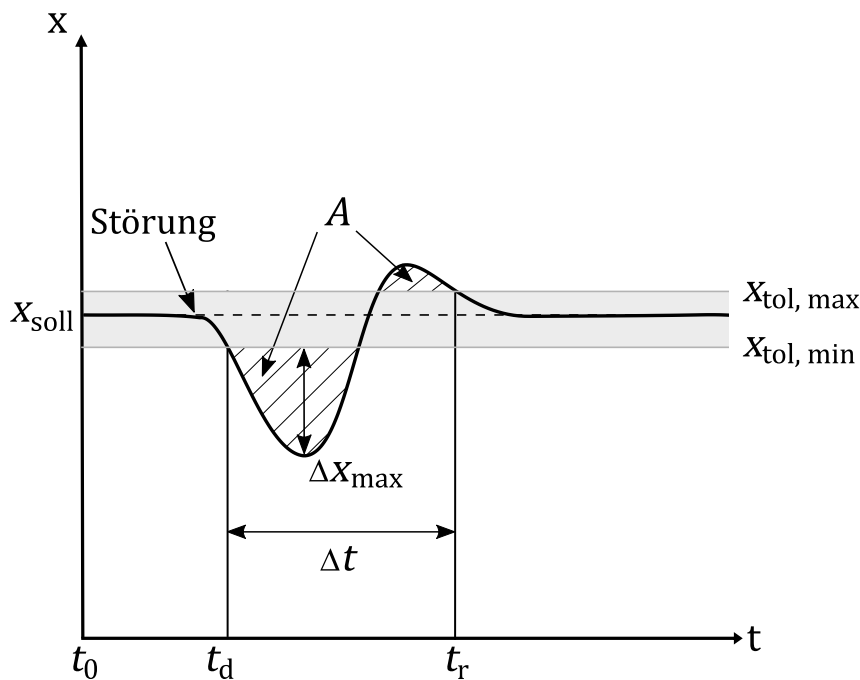


Abbildung 25: Störantwort eines Systems mit den für die Berechnung des Resilienzindex relevanten Größen

ximale Abweichung der charakteristischen Größe vom Toleranzband Δx_{\max} benutzt, so dass für alle drei Elemente gilt, dass ein hoher Betrag auf eine geringe Resilienz hindeutet. Um eine problemlose Übertragung in das Englische zu gewährleisten, wurden für die Elemente des Resilienzindex englische Formelzeichen gewählt, weshalb die *Maximale Abweichung* im Folgenden als *MD* für Maximum Deviation verwendet wird:

$$MD = \frac{\Delta x_{\max}}{\Delta x_{\text{norm}}} \quad (9)$$

Auch bei der Integration der zeitlichen Komponente ist eine Abweichung von der Bewertungsmethodik von Nan und Sansavini (2017) sinnvoll, da die von ihnen genutzte durchschnittliche Steigung während der Stör- und Erholungsphase z.B. nicht auf den in Abschnitt 3.2.1 dargestellten Vorgang des Aufheizens nach Störfällen im Wärmesektor anwendbar ist. Während Nan und Sansavini (2017) in ihren Betrachtungen stets von einem zunächst fallenden und danach wieder ansteigenden *MOP* ausgehen konnten, gilt dies, wie in Abbildung 18 zu sehen, nicht für den Wärmestrom als charakteristische Größe. Vielmehr fällt dieser am Ende der Erholphase abermals ab, bis er den Sollwert wieder erreicht. Eine Auswertung des Anstiegs würde sich daher als unnötig kompliziert erweisen, weshalb die aussagekräftigere *Erholzeit* (engl.: Recovery Time, *RT*) genutzt wird. Diese umfasst die Zeitspanne zwischen dem Punkt t_d , an dem die charakteristische Größe

erstmalig das Toleranzband verlässt und dem Punkt t_r , an dem sie permanent in das Toleranzband zurückkehrt:

$$RT = \frac{t_r - t_d}{\Delta t_{\text{norm}}} \quad (10)$$

Als weiteres Element nutzen Nan und Sansavini (2017) den über die Zeit gemittelten *Performanzverlust* (engl.: Performance Loss, *PL*). Dieses Element wird unverändert übernommen, wobei die Entkopplung von der Zeit durch den Normalisierungswert A_{norm} erreicht wird:

$$PL = \frac{\int_{t_d}^{t_r} \Delta x \, dt}{A_{\text{norm}}} \quad (11)$$

Durch die Wahl eines Energieflusses als charakteristische Größe spiegelt der *Performanzverlust* die (dimensionslose) nicht übertragene Energiemenge wider, wobei im Wärmesektor die zeitlich versetzt anfallende Energie zum Wiederaufheizen ebenfalls in den *Performanzverlust* eingeht.

Die ebenfalls von Nan und Sansavini (2017) genutzte *Erholungsfähigkeit* wird nicht in die angepasste Bewertungsmethodik integriert, da diese voraussetzt, dass eine Erhöhung des *MOPs* bzw. von x nach der Störung einen Lerneffekt des Systems wiedergibt. Vor diesem Hintergrund zeigt der Verlauf des Wärmestroms als charakteristische Größe jedoch abermals, dass diese Annahme nicht auf Aufheizvorgänge übertragbar ist (vgl. Abschnitt 3.2.1). Generell wird durch den hier verwendeten rein physikalisch-technischen Modellieransatz der Lerneffekt eines Energiesystems nicht dargestellt, weshalb zur Darstellung eines möglichen Lerneffekts weitere Simulationen und Betrachtungen unter Berücksichtigung soziologischer, politischer und wirtschaftlicher Einflüsse notwendig sind.

Abschließend werden die drei Elemente *MD*, *RT* und *PL* zu einem Resilienzindex kombiniert. Dafür werden sie zunächst multipliziert. Da der Betrag des Index mit wachsender Resilienz ebenfalls steigen soll, ist eine Implementierung als Reziproke notwendig. Zusätzlich soll der Wert des *RI*s zur besseren Vergleichbarkeit stets zwischen 0 und 1 liegen, weshalb im Nenner eine 1 addiert wird:

$$RI = \frac{1}{1 + MD \cdot RT \cdot PL} \quad (12)$$

Auf diese Weise ergeben sich folgende Grenzfälle:

- $RI = 1$... der charakteristische Wert zeigt auch während der induzierten Störung nur geringe Abweichungen innerhalb des Toleranzbandes. Die Funktionalität des Systems ist deshalb zu jeder Zeit gewährleistet (Abb. 26, links).
- $RI = 0$... der charakteristische Wert verlässt aufgrund der Störung das Toleranzband. Das System ist während des Betrachtungszeitraums nicht fähig seine Funktionalität wiederherzustellen, weshalb der Wert dauerhaft außerhalb des Toleranzbandes verbleibt (Abb. 26, rechts, vgl. hierzu auch das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene kollabierende Verhalten).

Für Systemantworten, bei denen die charakteristische Größe zwar das Toleranzband verlässt, im Laufe der Simulation jedoch wieder in dieses zurückkehrt, stellen sich Resilienzindizes zwischen 0 und 1 ein (Abb. 25) und können bei gleichen Normalisierungs- und Toleranzwerten miteinander verglichen werden.

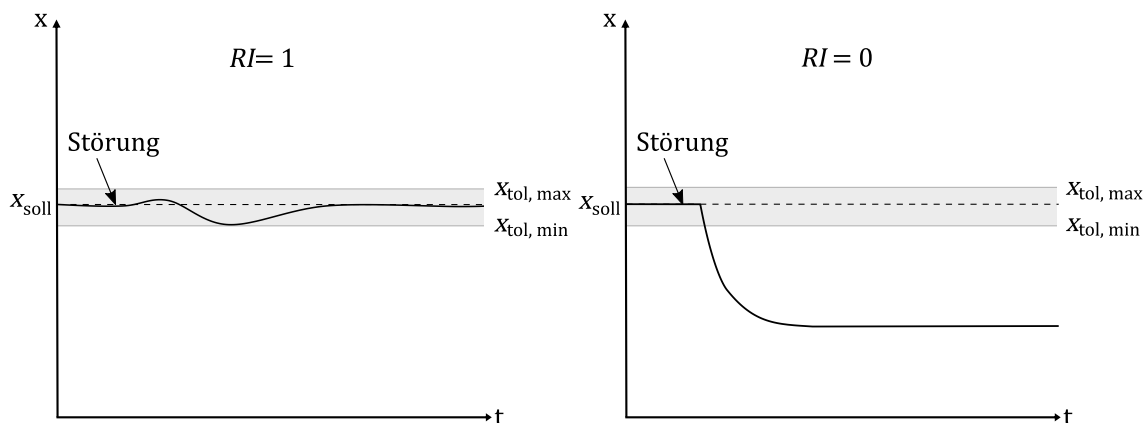


Abbildung 26: Grenzfälle in der Resilienz Betrachtung

3.3.2 Einfluss des Performanzverlustes

Nachdem die Bewertungsmethodik nun hergeleitet wurde, soll in diesem Abschnitt detaillierter auf den Einfluss des Performanzverlustes PL auf den Resilienzindex RI eingegangen werden. Da dieser durch die aufgespannte Fläche zwischen Toleranzband und Kurvenverlauf definiert ist, hängt er auch direkt von der *Maximalen Abweichung* MD und der *Erholzeit* RT ab. Daher stellt sich die Frage, ob die Integration des *Performanzverlustes* überhaupt einen Vorteil darstellt oder diese Größe redundante Informationen wiedergibt.

Zur Illustration der folgenden Überlegungen sind in Abbildung 27 zwei generische Systemantworten dargestellt. Erstere ist angelehnt an das in Abschnitt 2.3.2 bereits erwähnte Resilienzdreieck, ein abrupter und starker Einbruch der Systemfunktionalität mit anschließender gradueller Erholung. Auch das zweite System reagiert mit einem abrupten Funktionalitätseinbruch. Anders als beim ersten System erfolgt hier die Erholung nach einiger Zeit jedoch ebenfalls schlagartig, weshalb ein rechteckförmiger Verlauf der Systemantwort entsteht. In der Realität kann diese schlagartige Erholung zum Beispiel dann beobachtet werden, wenn nach einer Störung entsprechende Reparaturmaßnahmen vorgenommen werden und erst nach deren vollständigem Abschluss das entsprechende (Teil-)System wieder in Betrieb genommen wird. Um den Einfluss des *Performanzverlustes* darzustellen, werden die Systemantworten so konstruiert, dass die *Maximale Abweichung MD* der *Erholzeit RT* entspricht, solange beide kleiner 1 sind. Für die Fälle, in denen die *Erholzeit* ihren Normierungswert übersteigt, bleibt die *Maximale Abweichung MD* = 1, während die *Erholzeit RT* weiter ansteigt.

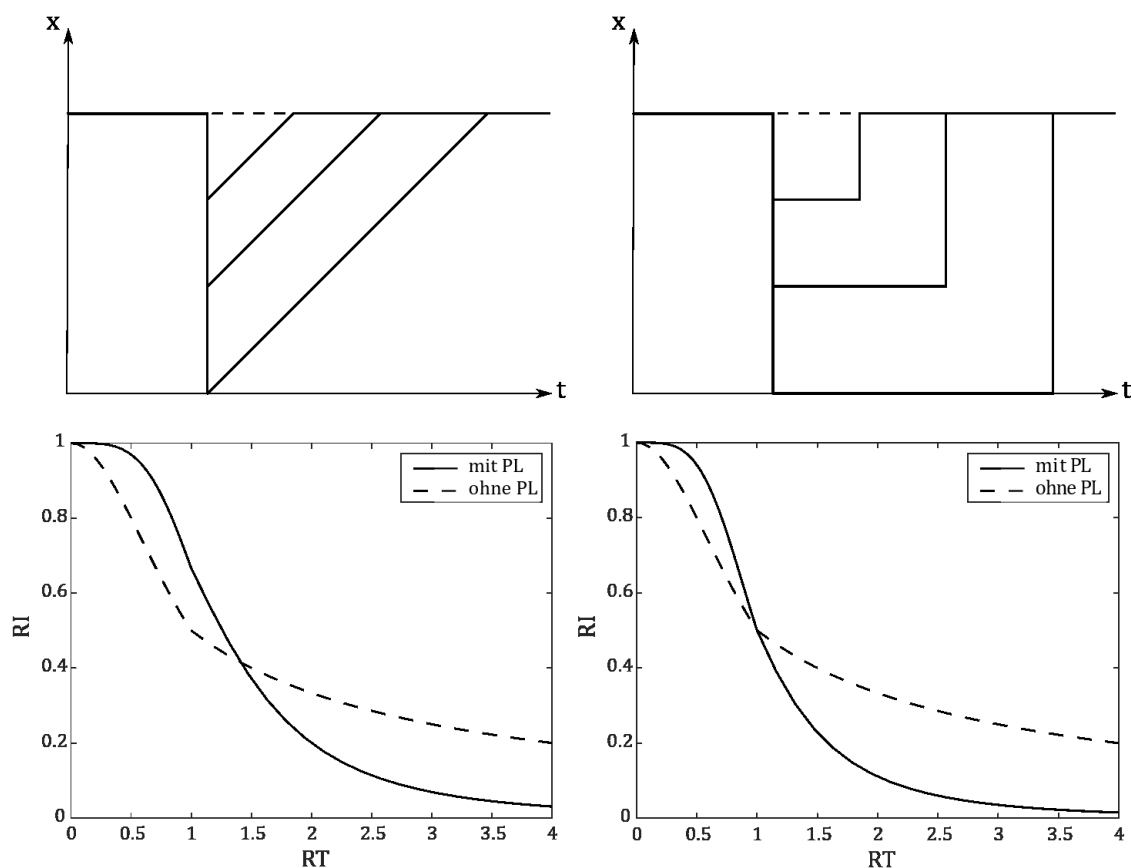


Abbildung 27: Generische Systemantworten auf Störfälle (oben) und die sich einstellenden Resilienzindizes in Abhängigkeit zu RT für $MD = 1$ (links bei dreiecksförmiger Systemantwort, rechts: bei rechteckförmiger Systemantwort)

In Abbildung 27 sind die sich einstellenden Resilienzindizes in Abhängigkeit von der Erholzeit dargestellt. Dabei wurde bei der jeweils durchgezogenen Kurve bei der Indexberechnung der Performanzverlust berücksichtigt, bei der jeweils gestrichelten Kurve nicht. Hierbei wird deutlich, dass das unterschiedliche Erholverhalten der beiden Systeme bei einer Berechnung ohne Performanzverlust nicht im Resilienzindex wiedergegeben wird.

3.3.3 Kombination mehrerer Resilienzindizes

Mit der beschriebenen Bewertungsmethodik kann für jeden Verbraucher im System ein Resilienzindex berechnet werden. Daher stellt sich die Frage, wie die einzelnen Resilienzindizes zu einem Gesamtindex RI_{sek} für den jeweiligen Sektor vereint werden können. Dafür kommt sowohl die Bildung des Mittelwertes der Indizes als auch deren Multiplikation in Frage. Außerdem muss geprüft werden, ob eine Gewichtung der einzelnen Indizes von Vorteil ist. Bei der Wahl der Kombinationsmethodik ist außerdem zu berücksichtigen, dass der resultierende Gesamtindex unabhängig von einer möglichen Aggregation der Verbraucher ist. Aggregationen sind ein übliches Werkzeug in der Modellierung um die Recheneffizienz zu steigern. Da auch aus einem aggregierten Modell Schlüsse für das reale System gezogen werden können sollen, ist der Anspruch einer jeden Aggregation, ein Systemmodell zu erzeugen, dass in den wesentlichen Eigenschaften weiterhin mit dem ursprünglichen System übereinstimmt. Dies soll daher auch für die Resilienzindizes der unterschiedlich stark aggregierten Systeme gelten.

Zur Verdeutlichung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden ist in Abbildung 28 auf der linken Seite ein beispielhaftes Energiesystem dargestellt (ob es sich hierbei um ein Gas-, Strom- oder Wärmesystem handelt ist für die folgenden Betrachtungen zweitrangig). In diesem System versorgt eine zentrale Quelle auf verschiedenen Wegen die Verbraucher V1...V5 mit Energie. Die jeweiligen Anteile am gesamten Verbrauch sind prozentual angegeben. Durch eine Störung im System kommt es zur Unterbrechung in der Versorgung und es stellen sich die abgebildeten Resilienzindizes ein. Zudem ist auf der rechten Seite in Abbildung 28 eine mögliche Aggregationsstufe des Systems dargestellt, in der Verbraucher V3 und V4 zu einem Verbraucher V34 zusammengefasst werden.

In Tabelle 9 sind die Werte für die vier in Frage kommenden Kombinationsmöglichkeiten aufgelistet. Dabei fällt auf, dass der Wert der Multiplikation sehr niedrig ist. Dies liegt daran, dass eine Multiplikation von Werten zwischen 0 und 1 stets zu einem kleineren Produkt als dem Betrag der einzelnen Faktoren führt. Somit sind stets niedrige Resilienzindizes zu erwarten, die mit zunehmender Verbraucherzahl umso niedriger ausfallen, wodurch eine Vergleichbarkeit nur begrenzt gewährleistet werden kann. Abhilfe hierfür kann die Potenzierung der Faktoren mit einem Wert kleiner 1 schaffen, wodurch die Anzahl der Verbraucher keinen Einfluss auf den Betrag des Gesamtindex mehr nimmt. Dafür

bietet sich der Anteil des Einzelverbrauchs E_V am Gesamtverbrauch E_{sek} an, da die Verbräuche durch eine Aggregation nicht beeinflusst werden. Die sich ergebenden Werte sind in der zweiten Zeile der Tabelle aufgelistet.

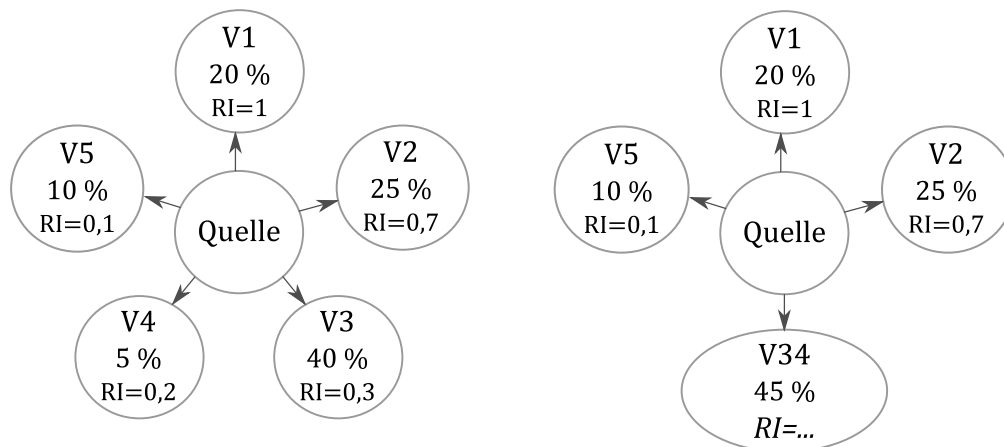


Abbildung 28: Beispielmodell zur Kombination der Resilienzindizes mehrerer Verbraucher (Links: Originalsystem, rechts: System nach Aggregation)

Tabelle 9: Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Verbraucherindizes; o: originales System, a: aggregiertes System, n entspricht der Anzahl der Verbraucher V . Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus dem Verhältnis des jeweiligen Energiebedarfs E_V zum gesamten Sektorenergiebedarf E_{sek} .

Methoden	Berechnung	Wert
Multiplikation	$RI_{\text{sek}} = \prod_V RI_V$	o: 0,004 a: 0,004
Potenzierte Multiplikation	$RI_{\text{sek}} = \prod_V RI_V \frac{E_V}{E_{\text{sek}}}$	o: 0,414 a: 0,414
Mittelwert	$RI_{\text{sek}} = \sum_V \frac{1}{n} \cdot RI_V$	o: 0,460 a: 0,506
Gewichteter Mittelwert	$RI_{\text{sek}} = \sum_V \frac{E_V}{E_{\text{sek}}} \cdot RI_V$	o: 0,515 a: 0,515

Ein entscheidender Nachteil der Multiplikation wird jedoch erst deutlich, wenn sich z.B. für Verbraucher V1 ein Resilienzindex von null einstellen würde. Obwohl dies nur eine kleine Änderung darstellt, würde der Gesamtindex ebenfalls null ergeben, was auf einen totalen Zusammenbruch des Systems schließen lassen würde. Dass dies nicht der Fall ist, zeigt sich aber weiterhin mit Blick auf die anderen Verbraucher. Die Verwendung der Multiplikation führt also beim Auftreten von Nullen in den Einzelindizes stets zu einem Gesamtindex von null, unabhängig davon, wie viele Einzelindizes null werden und wie die Indizes der anderen Verbraucher ausfallen. Eine Unterscheidung zwischen dem Totalausfall der Versorgung eines einzelnen Verbrauchers oder dem Totalausfall des gesamten Systems wäre unter Verwendung jeder Form der Multiplikation daher nicht möglich.

Dementsprechend stellt sich die Frage, ob die Verwendung des Mittelwerts eine geeignetere Kombinationsmöglichkeit darstellt. Für das nicht aggregierte System in Abbildung 28 ergibt sich als Mittelwert 0,460. Unter der Annahme, dass die Versorgung aller im System befindlichen Verbraucher gleich wichtig ist, gibt dieser Wert die Resilienz des Systems ausreichend wieder. Betrachtet man jedoch auch hier die Aggregation von Verbraucher V3 und V4, stellt sich hier ein Gesamtindex von 0,506 ein. Um dieses Problem zu lösen, werden die Summanden des Mittelwerts vor der Addition gewichtet. Auch hierfür wird der Anteil des Einzelverbrauchers am Gesamtverbrauch genutzt. Dementsprechend beeinflusst der Resilienzindex des Verbrauchers V34 im aggregierten Modell stärker den Gesamtindex, wodurch die Aggregation den Betrag des Gesamtindex nicht mehr verändert. Ein weiterer Vorteil der Gewichtung nach dem Verbrauch ist, dass dieser indirekt die Menge der von der Störung betroffenen Konsumenten widerspiegelt. Dementsprechend erfolgt die Berechnung des Gesamtindizes RI_{sek} für den jeweiligen Sektor aus mehreren Einzelindizes RI_V nach Gleichung (13):

$$RI_{sek} = \sum_V \frac{E_V}{E_{sek}} \cdot RI_V \quad (13)$$

3.4 Parametrisierung der Bewertungsmethodik

In der vorgestellten Bewertungsmethodik werden für die Berechnung des Resilienzindex Normierungswerte sowie Minimal- und Maximalwerte für das Toleranzband verwendet. Da dadurch ebenfalls der Resilienzindex beeinflusst wird, wird im folgenden Abschnitt dieser Einfluss untersucht und Empfehlungen für die Auswahl dieser Größen gegeben.

3.4.1 Auswahl der Normierungsgrößen

Bei der Auswahl der Normierungsgrößen ist das Ziel, diese so festzulegen, dass die gleichen Störfälle in vergleichbaren Systemen vergleichbare Resilienzindizes erzeugen. Daher müssen sie in Relation zum betrachteten System und Störfall ausgewählt werden. Feste Absolutwerte können dagegen den Resilienzindex verzerren.

Für den Normierungswert Δx_{norm} wird daher der Wert gewählt, den die Sollgröße zum Zeitpunkt der maximalen Abweichung einnimmt. Dadurch erfolgt eine Entdimensionierung des Differenzwertes. Für ein völliges Systemversagen zu einem beliebigen Zeitpunkt wird MD eins und somit maximal. Bleibt die betrachtete Größe trotz eines Störfalls innerhalb des Toleranzbandes, wird MD null, was zum bereits erläuterten Grenzfall $RI = 1$ führt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Alle weiteren Abweichungen zwischen diesen Grenzfällen werden entsprechend linear gewichtet.

Für charakteristische Größen mit einem nicht konstanten Verlauf ist es wichtig aus einer Simulation ohne Störfall den eigentlichen Verlauf der charakteristischen Größe zu bestimmen. Aus dieser und der Simulation mit Störfall kann anschließend der Zeitpunkt der maximalen Abweichung bestimmt werden und somit Δx_{norm} . In Abbildung 29 ist auf der linken Seite ein Störfall bei einem solchen nicht konstanten Verlauf in Form einer Sinuswelle dargestellt und der Normierungswert Δx_{norm} sowie die maximale Abweichung Δx_{max} gekennzeichnet. Dabei wird deutlich, dass je nach Störungsbeginn und Erholdauer Δx_{max} und somit auch Δx_{norm} nicht zwingend am niedrigsten Punkt des gestörten MOP -Verlaufs abzulesen sind.

Auf der rechten Seite von Abbildung 29 sind die maximalen Abweichungen Δx_{max} für zwei Störfälle zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingetragen. Dabei ist zu erkennen, wie die Schwere eines Vorfalles anhand der nicht erbrachten Leistung bewertet wird. Für beide abgebildeten Störzeitpunkte ist es dem System möglich eine gleichgroße Restleistung zu erbringen. Da jedoch zum ersten Zeitpunkt im System ein viel höherer Bedarf vorhanden ist als zum zweiten, fällt MD höher aus und der Störfall wird somit härter bestraft. In der Realität kann so ein Verhalten z.B. beim Vergleich der Wärmeversorgung im Sommer und

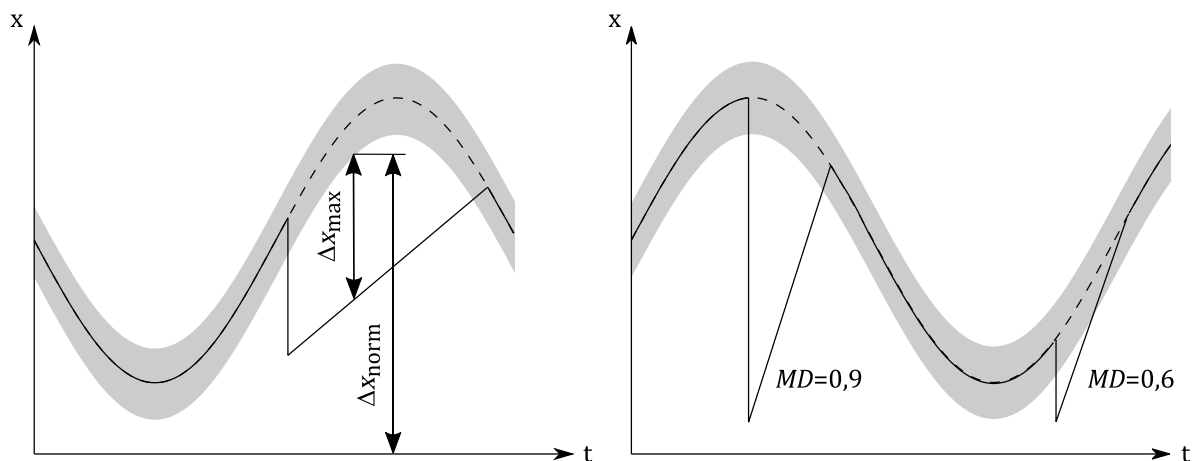


Abbildung 29: Darstellung der Bestimmung von MD bei nicht konstanten *MOP*-Verläufen. Links: Δx_{\max} tritt unabhängig vom Minimum der betrachteten Größe auf. Rechts: MD wird anhand der nicht erbrachten Leistung bestimmt.

Winter beobachtet werden. Auch hier würde ein Störfall an kalten Tagen mit hohem Wärmebedarf als schwerwiegender eingeordnet werden als an warmen Sommertagen. Ein weiterer Vorteil dieser Normierung ist die Möglichkeit, die absorptive Fähigkeit des Systems unabhängig von der Größe des betrachteten Verbrauchers zu bewerten. Letztere wird erst im Anschluss durch die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellte Kombination der einzelnen Verbraucherindizes integriert. Eine doppelte Bewertung wird somit vermieden.

Für die Normierungszeit Δt_{norm} bietet sich die Dauer der induzierten Störung an. Dadurch wird die Erholzeit RT von der Störzeit entkoppelt und die Regenerierfähigkeit des Systems besser dargestellt. Dementsprechend sind in Abbildung 30 drei Grenzfälle dargestellt, in denen die charakteristische Größe direkt zu Störungsbeginn das Toleranzband verlässt. Basierend auf diesem Systemverhalten können die folgenden Regenerationseigenschaften hergeleitet werden:

- $RT < 1$: Das System ist trotz anhaltender Störung fähig, sich zu regenerieren. Daher kann es vor Ende der Störung bereits vollständig seine Dienstleistung erbringen.
- $RT = 1$: Das System ist erst nach Ende der Störung fähig, seine Funktionen vollständig wiederherzustellen. Allerdings geschieht dies ohne weitere Verzögerungen.
- $RT > 1$: Das System kann sich während der Störung nicht regenerieren. Darüber hinaus erholt es sich aufgrund von Trägheiten oder anderen Einflüssen nach Störungsende verzögert.

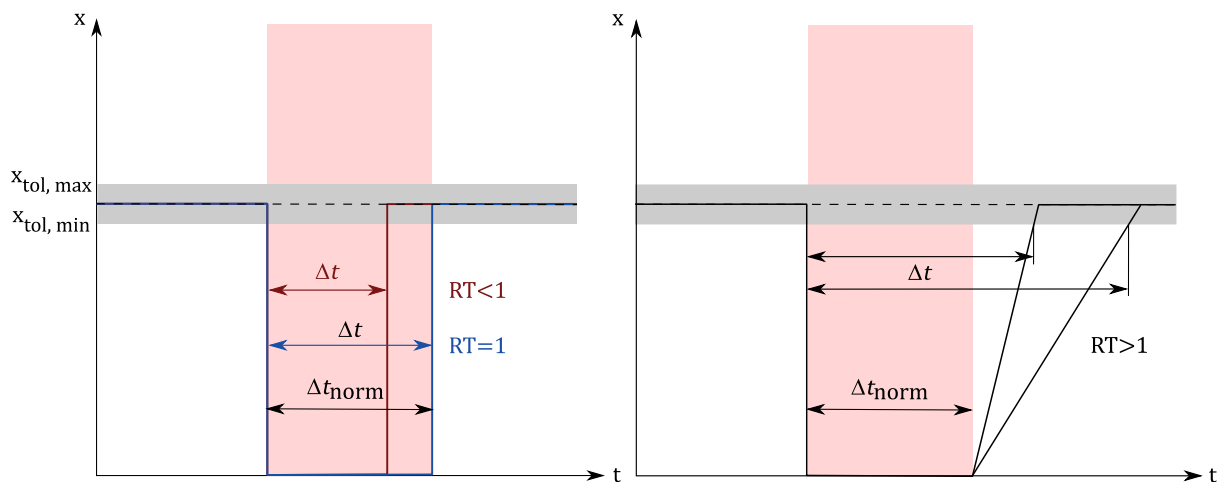


Abbildung 30: Darstellung des Normalisierungswertes Δt_{norm}

Als letzte Normierungsgröße ist A_{norm} zu definieren. Da hierfür eine entsprechende Fläche benötigt wird, bietet es sich an $A_{norm} = \Delta x_{norm} \cdot \Delta t_{norm}$ zu verwenden. Dies ergibt die Fläche des in Abbildung 31 dargestellten grünen Rechteckes. Entspricht die zwischen Kurvenverlauf und Toleranzband eingeschlossene Fläche dieser, ergibt sich als *Performanzverlust* $PL = 1$.

Durch diese einheitliche Normierung ergibt sich zusätzlich zu den in Abschnitt 3.3.1 in Abbildung 26 vorgestellten Grenzfällen ein neuer Referenzfall. So beträgt der Resilienzindex für ein System, dessen Energieversorgung für die gesamte Stördauer vollständig einbricht, 0,5. Auf diese Systemantwort wird im folgenden Abschnitt weiter eingegangen, da diese zusätzlich unabhängig vom gewählten Toleranzband stets zu einem Resilienzindex von 0,5 führt.

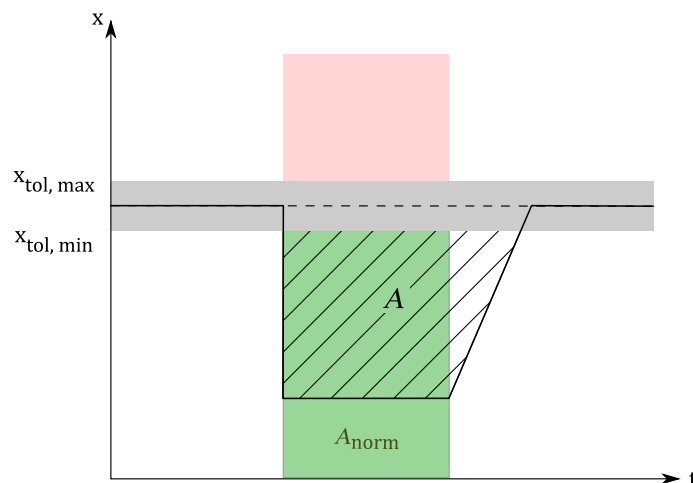


Abbildung 31: Darstellung des Normalisierungswertes A_{norm}

3.4.2 Auswahl des Toleranzbereichs

Für die Auswahl der Breite des Toleranzbereiches ist eine genaue Kenntnis des Systems notwendig, um Abweichungen in tolerabel und intolerabel zu unterteilen. Ein breites Toleranzband führt zu hohen Werten des Resilienzindex, während ein enges Toleranzband kleine Werte verursacht. Je nach betrachtetem System birgt die Wahl des Toleranzbandes daher die Gefahr der Verzerrung der Ergebnisse, weshalb es ratsam ist, Systeme zu vergleichen, für die Toleranzbänder derselben Breite verwendet werden. Dabei sollte die Definition des Toleranzbandes relativ zum Sollwert der charakteristischen Größe gesetzt werden, um sowohl große als auch kleine Verbraucher miteinander vergleichen zu können. Darüber hinaus ist es auch wichtig, die Relevanz der jeweiligen Verbraucher zu beachten. So gestaltet sich eine Stromunterbrechung eines Krankenhauses als gravierender als die eines Familienhauses. Dementsprechend kann es unter Umständen ratsam sein, für unterschiedliche Verbraucher unterschiedliche Toleranzbänder zu definieren.

Für alle Systeme und Verbraucher gilt, dass die Breite des Toleranzbandes einen signifikanten Einfluss auf die Größe des Resilienzindex hat. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 32 das Resilienzdreieck als Systemantwort dargestellt. Während Δt_{norm} der Stördauer entspricht und somit unabhängig vom Toleranzband ist, hängen die Werte für Δx_{max} , Δx_{norm} und Δt von der Breite des Toleranzbandes ab. Dadurch wird auch die Normalisierungsfläche A_{norm} sowie die Fläche zwischen Toleranzband und Kurvenverlauf A

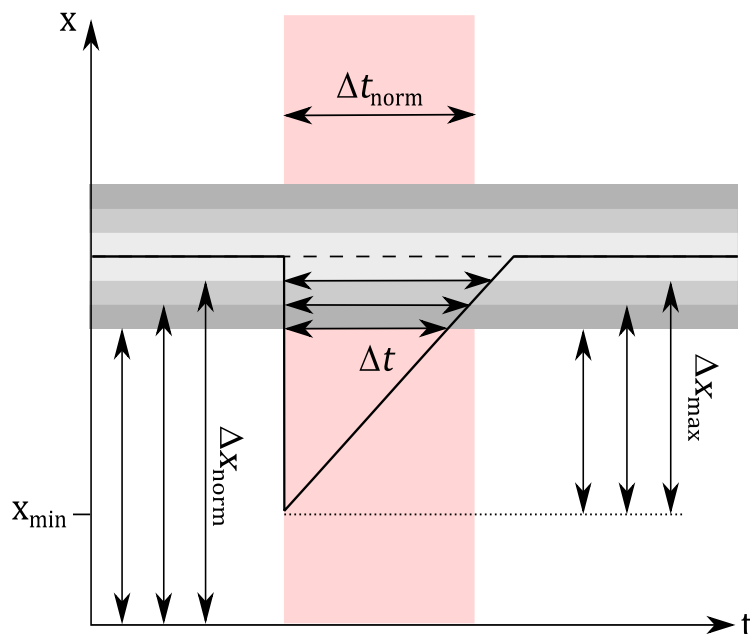


Abbildung 32: Einfluss des Toleranzbandes auf die Elemente des Resilienzindex

beeinflusst. Dementsprechend zeigt sich, dass alle Elemente des Resilienzindex (MD , RT , PL) durch die Breite des Toleranzbandes beeinflusst werden.

Zur Veranschaulichung des Einflusses des Toleranzbandes wurde für die abgebildete Systemantwort deren Minimalwert x_{\min} variiert und die Resilienzelemente sowie Resilienzindizes für die Toleranzbereiche $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$ berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt. In Tabelle 10 sind die entsprechenden Werte für $x_{\min} = 0,3$ aufgelistet. Wie zu erwarten verringert sich der Betrag aller Resilienzelemente mit zunehmendem Toleranzbereich. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Vergleich der Unterschiede in Abhängigkeit zum variierten x_{\min} . In Abbildung 33 wird deutlich, dass der Toleranzbereich bei großen und kleinen x_{\min} nur einen geringeren Einfluss auf den Resilienzindex hat im Vergleich zu den Werten im mittleren Bereich. Dies ist damit zu begrün-

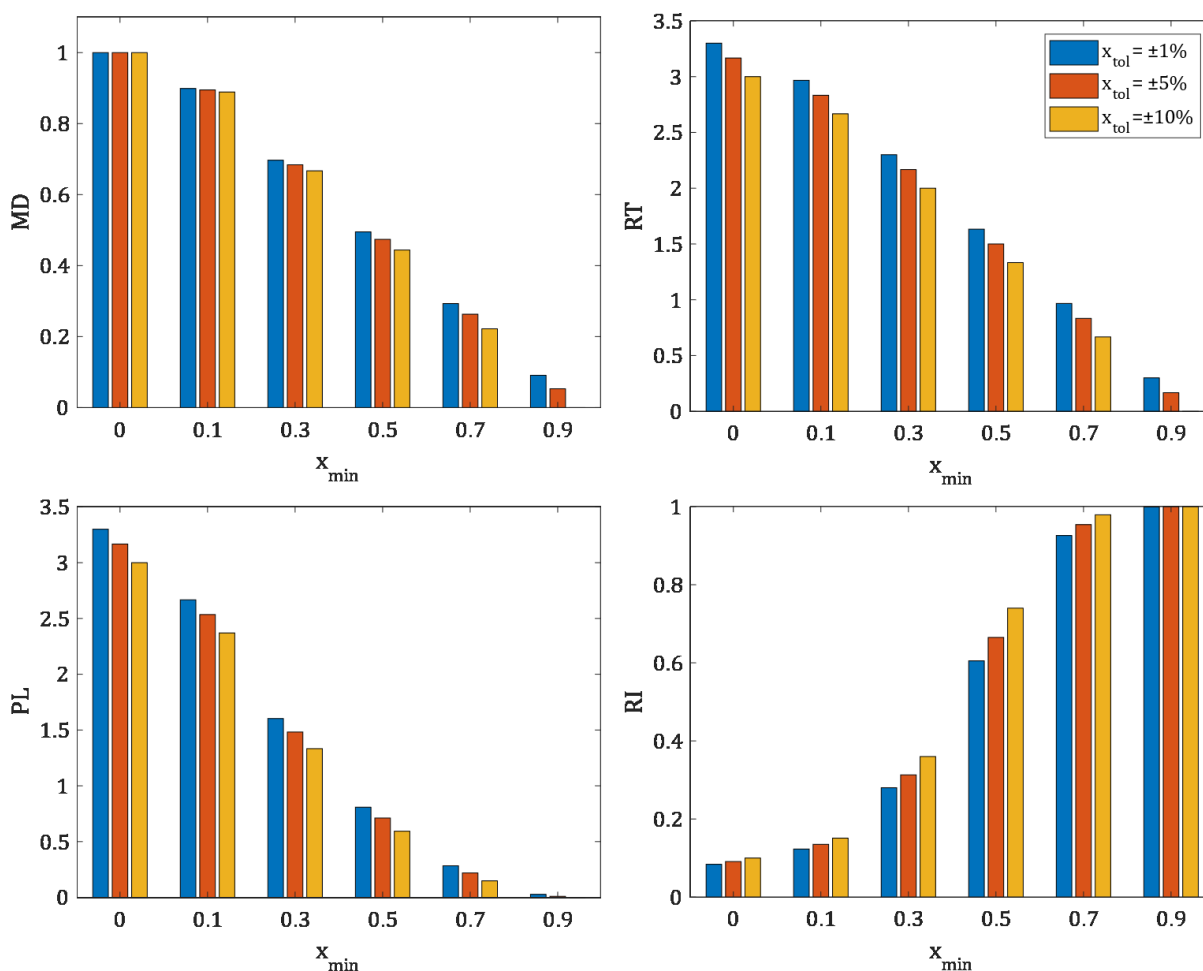


Abbildung 33: Resilienzelemente und -indizes in Abhängigkeit von x_{\min} für die Toleranzbereiche $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$

den, dass für hohe x_{\min} , und somit niedrige *Maximale Abweichungen*, alle drei Resilienzelemente niedrige Werte nahe null annehmen. Durch die Multiplikation der Elemente beeinflussen daher die Differenzen, die durch die unterschiedlichen Toleranzbereiche erzeugt werden, den Resilienzindex kaum und dieser fällt für alle Toleranzbereiche sehr hoch aus. Für niedrige Werte von x_{\min} nähert sich Δx_{\max} immer stärker Δx_{norm} an, daher hat der Toleranzbereich auf beide Werte einen ähnlichen Einfluss, der sich in ihrem Verhältnis aufhebt. Für die *Maximale Abweichung MD* ergeben sich daher kaum Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Toleranzbereichen. Da die Toleranz somit nur noch Einfluss auf die *Erholzeit* und den *Performanzverlust* hat, verringert sich somit auch hier ihr Einfluss auf den Resilienzindex.

Aus diesen Betrachtungen lässt sich eine Systemantwort ableiten, bei der die Breite des Toleranzbereiches keinen Einfluss auf die Resilienzelemente und den -index hat. Für die *Maximale Abweichung*, also dem Verhältnis zwischen Δx_{norm} und Δx_{\max} gilt dies bei einem Totalausfall, weil hier Δx_{\max} gleich Δx_{norm} und *MD* somit 1 wird. Dies geschieht unabhängig vom Toleranzband, weshalb in diesem Fall dessen Breite keinen Einfluss auf die *Maximale Abweichung MD* hat. Für die *Erholzeit RT* ist dies der Fall, wenn sich eine Rechteckantwort des Systems ergibt, da dann die Zeitpunkte, an denen die charakteristische Größe den Toleranzbereich verlässt, für alle Bandbreiten identisch sind. Gleiches gilt für die Zeitpunkte des Wiedereintretens in das Toleranzband. Entspricht nun auch die Fläche außerhalb des Toleranzbereiches ihrer Normierungsgröße, wird auch der *Performanzverlust* 1

Tabelle 10: Resilienzelemente und -indizes für $x_{\min} = 0,3$ für die Toleranzbereiche $\pm 1 \%$, $\pm 5 \%$ und $\pm 10 \%$

Toleranzbereich	$\pm 1 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$
Δx_{\max}	0,690	0,650	0,600
Δx_{norm}	0,990	0,950	0,900
<i>MD</i>	0,697	0,684	0,667
Δt	9,900	9,500	9,000
Δt_{norm}	3,000	3,000	3,000
<i>RT</i>	3,300	3,167	3,000
<i>A</i>	3,416	3,088	2,700
A_{norm}	1,485	1,425	1,350
<i>PL</i>	2,300	2,167	2,000
<i>RI</i>	0,159	0,176	0,200

und somit der bereits in Abschnitt 3.4.1 beschriebene und in Abbildung 34 dargestellte Grenzfall erreicht. Für diese Systemantwort ergibt sich unabhängig vom Toleranzbereich stets der Resilienzindex 0,5. Dementsprechend lassen sich die absoluten Werte des Resilienzindex nicht nur in Bezug auf ihren minimal bzw. maximal möglichen Wert beurteilen, sondern auch in Bezug auf ihr Verhältnis zum mittleren Wert der *RI*-Skala.

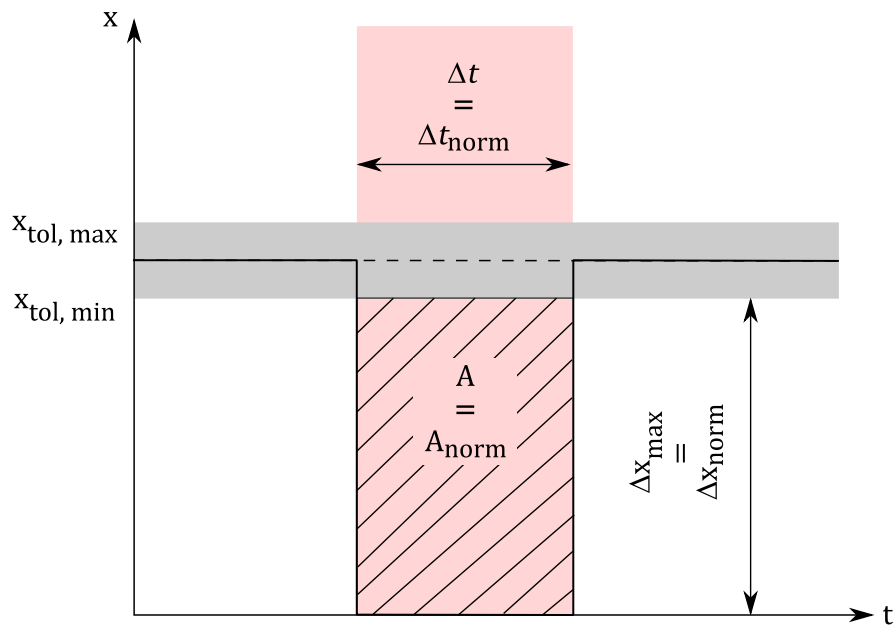


Abbildung 34: Rechteckige Systemantwort mit von der Breite des Toleranzbandes unabhängigem Resilienzindex 0,5

4 ANWENDUNG DER BEWERTUNGSMETHODIK

Im folgenden Kapitel werden anhand eines gekoppelten Energiesystems die Anwendungsmöglichkeiten des Resilienzindex dargestellt. Dazu wird zunächst in Abschnitt 4.1 ein Referenzsystem präsentiert und dessen Verhalten während einer Störung analysiert. Basierend auf den in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Gestaltungselementen der Resilienz werden anschließend drei Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz untersucht (Abschnitt 4.2). Dabei werden zunächst mithilfe des Resilienzindex Änderungen im Systemaufbau bewertet und ausgewählt. Im Anschluss werden in Abschnitt 4.3 die Systemantworten der so entworfenen Systeme untereinander und mit dem Referenzsystem verglichen und in Abschnitt 4.4 mithilfe des Resilienzindex bewertet. Die dabei gewonnenen allgemeinen Erkenntnisse über die Bewertungsmethodik werden abschließend in Abschnitt 4.5 diskutiert.

Für die folgenden Simulationen wurden alle Modelle in Dymola mit einer zeitlichen Auflösung von 900 s und dem Solver `EsDirk45a` für den Zeitraum vom 30. Januar bis zum 9. Februar 2012 simuliert. In diesem Zeitraum traten sehr niedrige Temperaturen (zwischen -2 und -16 °C (Lange 2014)) sowie eine geringe Einspeisung erneuerbarer Energien auf. Dadurch werden die zu beobachtenden Effekte hinsichtlich der Resilienz des Systems verstärkt, da im Wärmesektor ein hoher Wärmebedarf besteht und im Stromsektor weniger Produzenten zur Verfügung stehen. Für jedes Szenario wird die Systemantwort durch den Verlauf des Gasdrucks, des Enthalpiestroms, der Raumtemperatur, des übertragenen Wärmestroms, der Netzfrequenz und der übertragenen elektrischen Leistung dargestellt und erläutert. Dabei wurde jeweils eine Simulation mit und ohne Störung durchgeführt und die jeweiligen Verläufe mit gestrichelten (störungsfrei) bzw. durchgezogenen (gestört) Linien dargestellt. In jedem Diagramm ist zudem der Zeitraum der Störung rot hinterlegt.

4.1 Das Referenzsystem

Im in Abbildung 35 dargestellten Referenzmodell werden die Sektoren Gas, Wärme und Strom miteinander gekoppelt. In jedem Sektor befinden sich Produzenten (blau hinterlegt), Verbraucher und Leitungen sowie entsprechende Regelungsmechanismen. Dabei entspricht die Größenordnung der einzelnen Verbräuche der einer mittelgroßen norddeutschen Stadt (vgl. dazu die Kennzahlen Oldenburgs in Tabelle 11). Das Modell als solches wurde entworfen, um typische (dynamische) Kopplungseffekte und deren Auswirkungen in den einzelnen Sektoren darzustellen und zu untersuchen. Dementsprechend eignet es sich trotz seiner generischen Natur als Testumgebung für die in Abschnitt 3.3

vorgestellte Bewertungsmethodik. Im Folgenden wird jeder Sektor und dessen Bestandteile vorgestellt, um im Anschluss die Reaktion des Systems auf die induzierte Störung besser nachvollziehen zu können.

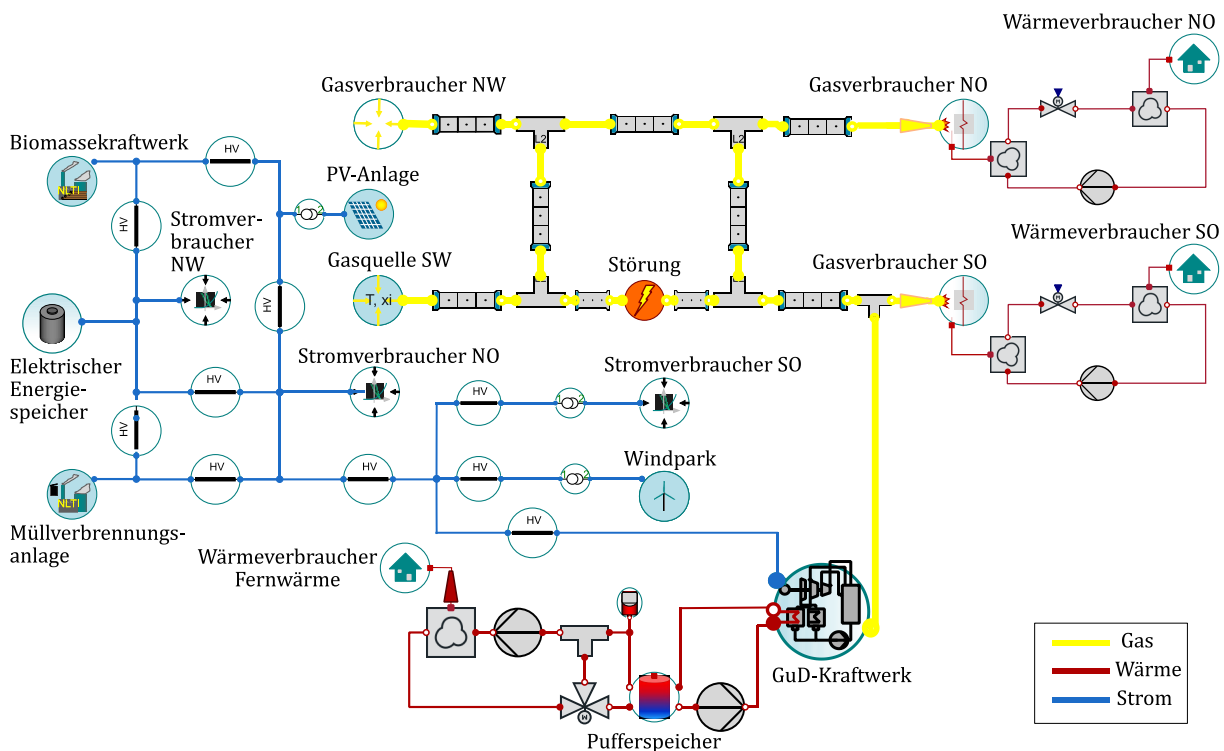


Abbildung 35: Modellübersicht des Referenzsystems. Energiebereitsteller sind blau hinterlegt.

Tabelle 11: Energetische Kennzahlen der Stadt Oldenburg (Stadt Oldenburg, Amt für Umweltschutz und Bauordnung 2019; Stadt Oldenburg, Fachdienst Geoinformation und Statistik 2019)

Privathaushalte in der Stadt Oldenburg (2017)	91.214
Endenergieeinsatz – Strom (2015)	704 GWh _{el}
Endenergieeinsatz – Nahwärme (2015)	128 GWh _{th}
Endenergieeinsatz – Erdgas (2015)	1.542 GWh _{GCV}

4.1.1 Modellaufbau

Die verwendeten Komponentenmodelle entstammen zum Großteil der in Abschnitt 3.1 vorgestellten TransiEnt Library (Technische Universität Hamburg 2021). Die Parameter der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Gas

Für den Gassektor wird das Gasnetz aus Abschnitt 3.2.2 verwendet. Daher werden auch für dieses Gasnetz die Strömungsverhältnisse in den Rohren basierend auf den entsprechenden physikalischen Gleichungen berechnet, weshalb die sich einstellenden Strömungen vom Druckabfall abhängig sind. Ebenso befindet sich auch hier eine Quelle im Südosten, die das Gas mit einem Druck von 12,5 bar einspeist. Die generischen Verbraucher im Osten werden nun jedoch gegen Gaskessel ausgetauscht, die je nach Wärmebedarf der Haushalte in diesem Bereich dem Netz Gas entnehmen. Der Gasbedarf im Osten ist somit u.a. von der Außentemperatur abhängig. Zudem befindet sich im Südosten eine Schnittstelle zum Wärme- und Stromsektor in Form eines Gas- und Dampfkraftwerks (GuD-Kraftwerk). Dessen Gasbedarf wird nicht nur durch den Strombedarf im elektrischen Netz bestimmt, sondern auch durch den Wärmebedarf der Häuser im Fernwärmenetz. In Abbildung 36 ist der Betriebsbereich des GuD-Kraftwerks durch ein P-Q-Diagramm dargestellt, darin kann der Wärmestrom Q , der bei der aktuell erzeugten elektrischen Leistung P ausgekoppelt werden kann, abgelesen werden. Der Betrieb im Nordwesten hat einen konstanten Bedarf, da die dort befindlichen Anlagen kontinuierlich laufen. Für die Gaskessel wurde wie in Abschnitt 3.2.2 ein Abschaltdruck von 2 bar festgesetzt, gleiches gilt für das GuD-Kraftwerk.

Wärme

Im vorliegenden Energiesystem gibt es drei Regionen, in denen Haushalte mit entsprechendem Raumwärmebedarf angesiedelt sind (Abb. 35). Ein industrieller oder gewerblicher Bedarf wird nicht betrachtet. Im Nord- und Südosten befinden sich Haushalte, die über individuelle Gaskessel mit Wärme versorgt werden. Ein südlich gelegenes Wohngebiet ist an ein Fernwärmenetz angeschlossen, das durch das GuD-Kraftwerk mit Wärme versorgt wird. Dementsprechend erfolgt für alle Haushalte die Wärmebereitstellung durch das Verbrennen von Gas, wobei diese im Falle der Gaskessel dezentral und im Fernwärmenetz zentral erfolgt. Die maximale Leistungsfähigkeit der Wärmeerzeuger wurde für eine minimale Außentemperatur von -16 °C ausgelegt. Der Wärmebedarf der Verbraucher wird mit demselben physikalischen Modell wie in Abschnitt 3.2.1 modelliert und somit vor allem durch die aktuelle Außentemperatur und Solareinstrahlung bestimmt. Bei der Betrachtung gekoppelter Energiesysteme sind meist mehrere Haushalte und deren Wärmeverbrauch von Interesse. Eine Berechnung jedes einzelnen Wärmekreislaufs

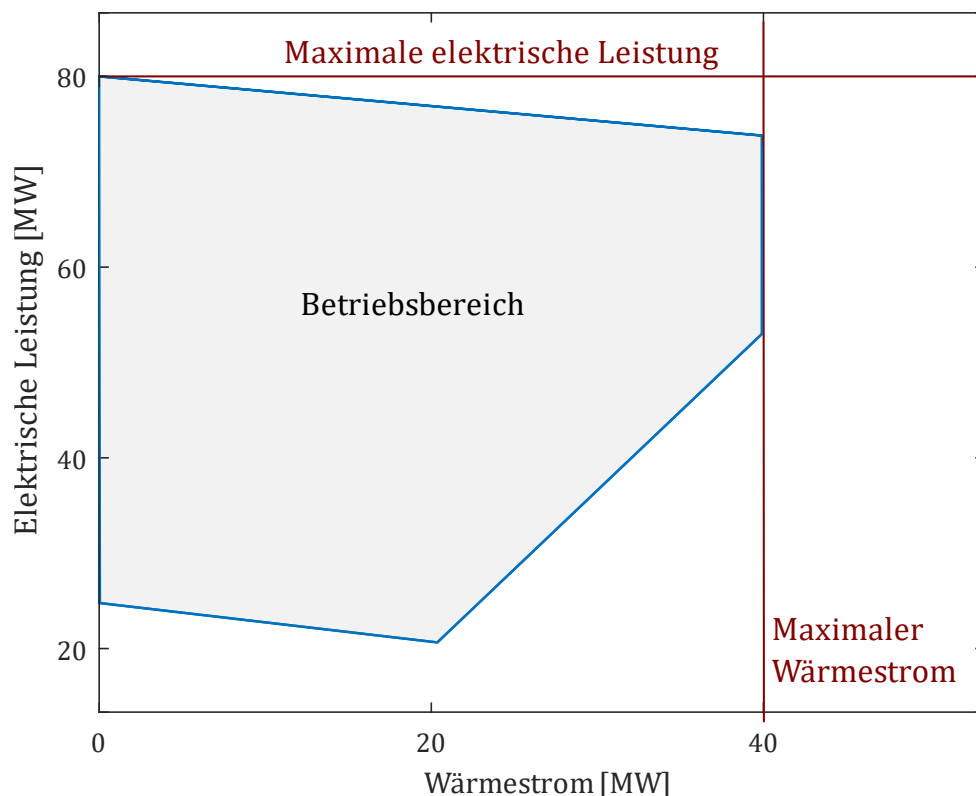


Abbildung 36: P-Q-Diagramm des GuD-Kraftwerks

würde jedoch einen zu hohen numerischen Aufwand erfordern, weshalb diese aggregiert werden müssen. Unter der Annahme eines ähnlichen regionalen Baubestandes kann daher ein charakteristischer Haushalt definiert und dessen Wärmebedarf entsprechend zusammengefasst werden. Im Allgemeinen wird der Wärmefluss zum Verbraucher an mehreren Instanzen im Modell berechnet bzw. weitergegeben, weshalb sich je nach Versorgungssystem unterschiedliche Schnittstellen zur Aggregation anbieten. In Wärmenetzen werden mehrere Haushalte von einem zentralen Wärmeerzeuger versorgt. Dementsprechend bietet sich hier eine Aggregation innerhalb des Fluidkreislaufs und somit eine Hochskalierung des Wärmebedarfs an. In Modelica geschieht dies durch das Modell `HeatFlowMultiplier`, welches den mit einem Faktor multiplizierten Wärmestrom und die an der Schnittstelle vorliegende Temperatur weitergibt. Bei einer dezentralen Wärmeversorgung durch einen Gaskessel im jeweiligen Haushalt ist es dagegen vorteilhaft, die Aggregation an der Schnittstelle zum Gasnetz vorzunehmen, da hier der gesamte Wärmekreislauf inklusive Wärmeerzeuger als charakteristische, zu skalierende Einheit fungiert. Dementsprechend wird hier das Modell `GasFlowMultiplier` verwendet, welches den skalierten Gasmassenstrom und den an der Schnittstelle vorliegenden Gasdruck weitergibt.

Tabelle 12: Parameter des Referenzszenarios

Parameter	Wert
Gas	
Einspeisedruck der Gasquelle	12,5 bar
Abschaltdruck Gaskessel	2 bar
Abschaltdruck GuD-Kraftwerk	2 bar
Gesamtlänge der Gasrohre	47 km
Gesamtvolumen des Gasnetzes	4 400 m ³
Wärme	
Anzahl der Haushalte im Nordosten	60 000
Anzahl der Haushalte im Südosten	22 000
Anzahl der ans Wärmenetz angeschlossenen Haushalte	8 345
Max. Wärmestrom der Gaskessel	5 kW _{th}
Max. Wärmestrom des GuD-Kraftwerks	40 MW _{th}
Speichervolumen im Fernwärmenetz	3 500 m ³
Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes	80 °C
Strom	
Nennleistung Biomassekraftwerk	80 MW _{el}
Nennleistung Müllverbrennungsanlage	100 MW _{el}
Nennleistung Windpark	60 MW _{el}
Peakleistung PV-Anlage	17,5 MW _{el}
Nennleistung GuD-Kraftwerk	60 MW _{el}
Maximale Entladeleistung des elektrischen Energiespeichers	50 MW _{el}
Maximale Ladeleistung des elektrischen Energiespeichers	70 MW _{el}
Speicherkapazität des elektrischen Energiespeichers	0,4 GWh _{el}
Proportionaler Lastfaktor NW	2,6
Proportionaler Lastfaktor NO	2,5
Proportionaler Lastfaktor SO	0,8
Jahresverbrauch NW	343,8 GWh _{el}
Jahresverbrauch NO	171,9 GWh _{el}
Jahresverbrauch SO	171,9 GWh _{el}

Im Heizkreislauf der durch die Gaskessel versorgten Haushalte werden die Wärmeübertrager direkt mit dem vom Gaskessel erhitzten Wasser durchströmt. Die Raumtemperatur wird durch die Regelung des Massenstroms durch den Radiator auf 22 °C eingestellt. Die von der Heizkurve vorgegebene Vorlauftemperatur wird dagegen durch die Regelung der Leistung des Gaskessels eingestellt.

Im Fernwärmenetz erfolgt die Regelung analog zum im Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Heizsystem: die Haushalte werden nicht direkt vom GuD-Kraftwerk mit Heizwasser versorgt, sondern aus einem großen, zentralen Speicher, der vom GuD-Kraftwerk beheizt wird. Dieser Speicher entkoppelt Wärmebedarf und Erzeugung und erlaubt somit eine flexiblere Fahrweise des Kraftwerks. Das Speichervolumen von 3 500 m³ reicht dabei aus, um für drei Stunden die maximale Wärmeleistung des Wärmenetzes zu decken. Die Vorlauftemperatur laut Heizkurve wird durch eine entsprechende Mischung des heißen Speicherwassers und des abgekühlten Rücklaufwassers in Abhängigkeit zur Außentemperatur eingestellt. Die Raumlufttemperatur wird durch die Regulierung der Pumpleistung und somit des Massenstroms bei 22°C gehalten. Die Wärmeabgabe des GuD-Kraftwerks wird entsprechend der Solltemperatur von 85°C im oberen Speicherteil geregelt und ist zusätzlich durch den Betriebsbereich, der vom aktuellen Strombedarf bestimmt wird, begrenzt (vgl. Abb. 36).

Die Wärmekreisläufe im System werden unter Vernachlässigung der Wärme- und Druckverluste in den darin befindlichen Rohren modelliert, da diese im Vergleich zur Größe des betrachteten Gas- und Stromnetzes nur einen geringen Einfluss haben. Für die Modellierung von Fernwärmenetzen und den darin befindlichen Rohren sei auf van der Heijde et al. (2017) verwiesen. Wie in Heizsystemen für die Regelung üblich, werden in beiden Systemen P-Regler verwendet.

Strom

Im Stromsektor befinden sich fünf Erzeuger und drei Verbraucher sowie ein Pumpspeicher, die durch ein Verteilnetz auf Hochspannungsebene (110 kV) miteinander verbunden sind. Für die Hochspannungsleitungen wird ein quasistationäres Modell, basierend auf dem Pi-Ersatzschaltbildes einer Leitung, mit konzentrierten Elementen simuliert. Dabei werden sowohl die Blind- als auch Wirkleistungsverluste sowie der Spannungsabfall über den Leitungen berücksichtigt. Ein Anschluss an die Übertragungsnetzebene wird im vorliegenden Modell nicht modelliert. Dementsprechend handelt es sich bei dem hier betrachteten elektrischen System um ein Inselnetz.

Bei den Erzeugern handelt es sich zum einem um fluktuierende, vom Wetter abhängige Photovoltaik- und Windkraftanlagen und zum anderen um eine Müllverbrennungsanlage

und ein Biomassekraftwerk sowie das bereits erwähnte GuD-Kraftwerk. Außerdem kann durch das Entladen des elektrischen Speichers ebenfalls elektrische Leistung bereitgestellt werden. Innerhalb der Einsatzregelung wird der aktuelle Strombedarf mit der aktuell verfügbaren Leistung abgeglichen und entsprechend die ins Netz einzuspeisende, individuelle Kraftwerksleistung vorgegeben. Dabei werden die Anlagen in der Reihenfolge GuD-Kraftwerk, Entladen des Speichers, Müllverbrennungsanlage, Biomassekraftwerk zugeschaltet. Zum Ausgleich kleinerer Frequenzschwankungen ist in allen Kraftwerken zusätzliche Regelleistung proportional zur Frequenzabweichung vorgesehen. Darüber hinaus wird durch das Biomassekraftwerk mittels eines Integralreglers die Netzfrequenz stabilisiert. Dadurch wird die Netzfrequenz auf einen Sollwert von 50 Hz geregelt. Der Speicher wird bei hoher Produktion regenerativer Energien aufgeladen.

Für die Lastkurven der drei Stromverbraucher wurden die Standardlastprofile (SLP) des BDEW (Meier et al. 1999) genutzt, wobei dem Verbraucher im Südosten das Haushaltskundenprofil H0, dem Verbraucher im Nordosten das Landwirtschaftskundenprofil L0 und dem Verbraucher im Nordwesten das Gewerbekundenprofil G0 zugeordnet wurde. Die Profile sind normiert und werden mit dem entsprechenden Jahresverbrauch multipliziert (Tab. 12). Dabei entfallen 50 % des gesamten Strombedarf auf den Gewerbesektor und jeweils 25 % auf den Landwirtschafts- und Haushaltssektor. In den Modellen wurde außerdem eine lineare Frequenzabhängigkeit der Last implementiert. Die entsprechenden Proportionalitätsfaktoren wurden Price et al. (1993) entnommen. Da der Landwirtschaftssektor hier nicht einzeln aufgeführt wird, wird angenommen, dass der Strom zu 50 % für Heizzwecke und jeweils 25 % für elektrische Motoren und weitere Elektronik genutzt wird.

Störung

Als Störung wird die Unterbrechung der Gasleitung im Süden des Gasnetzes induziert (vgl. Abschnitt 3.2.2). Eine solche Unterbrechung kann durch menschliches Versagen, einen technischen Fehler oder einen gezielten Angriff entstehen. Ein Beispiel ist die Explosion einer Erdgasverteilstation in Baumgarten, Österreich, am 12. Dezember 2017. Durch einen technischen Fehler in einer Gasfilteranlage kam es zu einer Explosion und einer anschließenden Unterbrechung der Gasversorgung Südeuropas. Trotz der Tatsache, dass diese Unterbrechung nach 14 Stunden behoben werden konnte, reagierte der Markt mit rasant ansteigenden Gaspreisen. In Italien wurde zudem der Notstand ausgerufen, was das Ausmaß einer solchen Störung zeigt. (Gas Connect Austria GmbH 2017; Bros 2018)

Für die Simulation wurde der Zeitraum der Störung auf den 4. Februar 2012 von 7:15 bis 21:15 datiert. Dieser Tag wurde aufgrund seiner kalten Temperaturen und der geringen

Einspeisung aus erneuerbaren Energien und den damit zu erwartenden starken Auswirkungen im Strom- und Wärmesektor ausgewählt. Die Uhrzeit entspricht dem ungefähren Zeitpunkt der Explosion in Baumgarten (Gas Connect Austria GmbH 2017).

4.1.2 Systemantwort des Referenzsystem

Durch das Schließen der südlichen Gasleitung wird die Gasversorgung der Verbraucher im Südosten und die des GuD-Kraftwerks unterbrochen. Dadurch kommt es zum Einbruch der Wärmeversorgung in diesen Regionen und zu einer geringeren Stromproduktion. Die Systemantworten in den Sektoren Gas, Wärme und Strom sind in Abbildung 37 dargestellt.

Gas

Da der Wärmebedarf der Wohngebiete im Osten von der Außentemperatur abhängt, schwankt deren Gasbedarf und somit der Gasenthalpiestrom an deren Abnahmestellen entsprechend (Abb. 37b). Dem gegenüber steht der als konstant angesetzte industrielle Gasbedarf im Nordwesten und der Enthalpiestrom zum GuD-Kraftwerk im Südosten. Letzteres nutzt das Gas zur Erzeugung von Wärme und Strom, wobei die erzeugte elektrische Leistung doppelt so hoch ist wie die thermische (siehe Abb. 38). Außerdem werden durch den installierten Pufferspeicher die Schwankungen im Wärmebedarf des Netzes gedämpft, weshalb der Enthalpiestrom zum KWK-Kraftwerk vor allem vom aktuellen Strombedarf im elektrischen Netz abhängt. Der schwankende Gasbedarf im Osten ist auch im Verlauf des Gasdrucks zu erkennen, der im ungestörten Betrieb bei geringem Gasbedarf steigt bzw. bei hohem Gasbedarf sinkt (Abb. 37a). Mit zunehmender Entfernung zur Gasquelle sinkt der Gasdruck aufgrund des Druckverlusts innerhalb der Rohre, daher ist er am nahe zur Quelle gelegenen Verbraucher im Nordwesten höher als an den anderen beiden Abnehmern im Osten.

Wird nun die südliche Gaspipeline blockiert, reagiert das System ähnlich wie in Abschnitt 3.2.2 bereits beobachtet: Der Druck fällt stark ab und unterschreitet im Südosten den implementierten Abschaltdruck. Dadurch werden die dort befindlichen Verbraucher und das GuD-Kraftwerk durch die entsprechenden Regelvorrichtungen vom Gasnetz getrennt. Dies verringert wiederum den gesamten Gasbedarf im Netz und führt somit zu einem Anstieg des Gasdrucks. Da bei einem Wiederanschalten der Verbraucher im Südosten jedoch ein erneuter Druckabfall unterhalb von 2 bar zu erwarten ist, wird die Versorgung dieser Region erst eine Stunde nach Störungsende wieder freigegeben, wenn feststeht, dass sich das Gasnetz erholt hat und wieder vollständig einsatzbereit ist. Dies führt zu einem kurzzeitigen Druck-Peak, weil das Gasnetz für kurze Zeit wieder intakt ist, jedoch nicht alle Verbraucher bereits wieder Gas entnehmen.

Nach der Störung bleibt der Gasdruck weiterhin unterhalb des ungestörten Gasdruckes, da im Wärmesektor zusätzlich Gas benötigt wird, um die abgekühlten Gebäude wieder aufzuwärmen. Dies lässt sich auch an den erhöhten Enthalpieströmen nach der Störung ablesen (Abb. 37b). Während der Gasbedarf des südöstlichen Wohngebietes im Störfall durchgängig über dem des ungestörten Verlaufes liegt, weist der Gasbedarf des GuD-Kraftwerkes nur in den Nachtstunden einen erhöhten Verlauf auf. Dies ist auf eine Verschiebung des Betriebsbereichs zurückzuführen, wie in Abbildung 38 dargestellt. In den laststarken Zeiten am Tag führt die zusätzliche Wärmebereitstellung zu einer Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades, weshalb hier kein zusätzlicher Gasbedarf zu beobachten ist. In der Nacht sinkt der Strombedarf im elektrischen Netz, wodurch sich der Brennstoffausnutzungsgrad verringert. Dementsprechend spiegelt sich hier die zusätzlich benötigte Wärme zum Wiederaufheizen des Systems in einem erhöhten Gasbedarf wider. Da im Norden der Mindestdruck nicht unterschritten wird, kommt es hier zu keiner Abschaltung und die Enthalpieströme der Verbraucher stimmen für den ungestörten und gestörten Fall überein.

Wärme

In den Wohngebieten wird die Raumtemperatur auf 22 °C geregelt. Die in den Wärmekreisläufen implementierten P-Regler verursachen hierbei auch im ungestörten Zustand eine bleibende, geringe Regelabweichung (Abb. 37c). Bei der Betrachtung des Wärmestroms ist der sich ändernde Wärmebedarf zur Aufrechterhaltung der Raumtemperatur erkennbar (Abb. 37d). Im Laufe des Tages benötigt das Gebäude durch höhere Außentemperaturen und solare Einstrahlung weniger Wärme als in den Abend- bis Morgenstunden.

Bei den Wärmeverbrauchern im Osten, die durch die Gaskessel mit dem Gasnetz verbunden sind, verhalten sich die Wärmeströme analog zu den Enthalpieströmen (Abb. 37b und d). So bleiben im Nordosten beide Energieströme während des Störungszeitraums unverändert, wohingegen im Südosten der Gasstrom zu den Gaskesseln während der Störung unterbrochen wird und somit ebenfalls der Wärmestrom zu den Gebäuden. Dies wird durch einen rapiden Abfall des übertragenen Wärmestroms auf null und der damit einhergehenden sinkenden Raumtemperatur auf bis zu 16,6 °C deutlich (Abb. 37c).

Die an das Wärmenetz angebotenen Verbraucher wiederum werden in den ersten Stunden der Störung durch den Pufferspeicher versorgt. Der Abfall des Wärmestroms wird dadurch gedämpft, weshalb im Mittel mehr Wärme an die Gebäude abgegeben werden kann als im Südosten. Dadurch sinkt auch die Raumtemperatur weniger stark und erreicht in ihrem Minimum eine Temperatur von 18,5 °C.

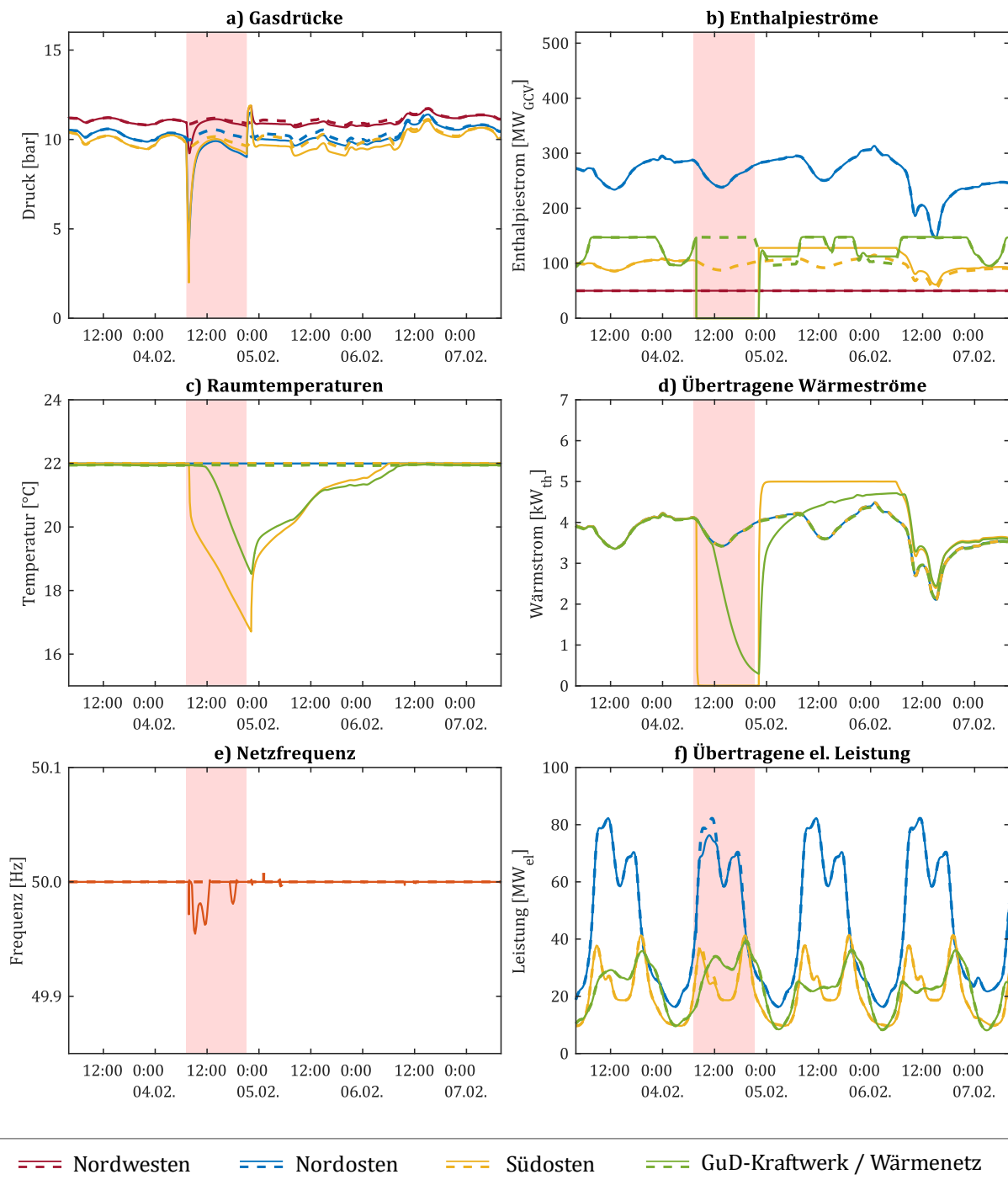


Abbildung 37: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Referenzszenario, gestrichelt: ungestörter Kurvenverlauf, durchgezogen: Kurvenverlauf unter Störeinfluss.

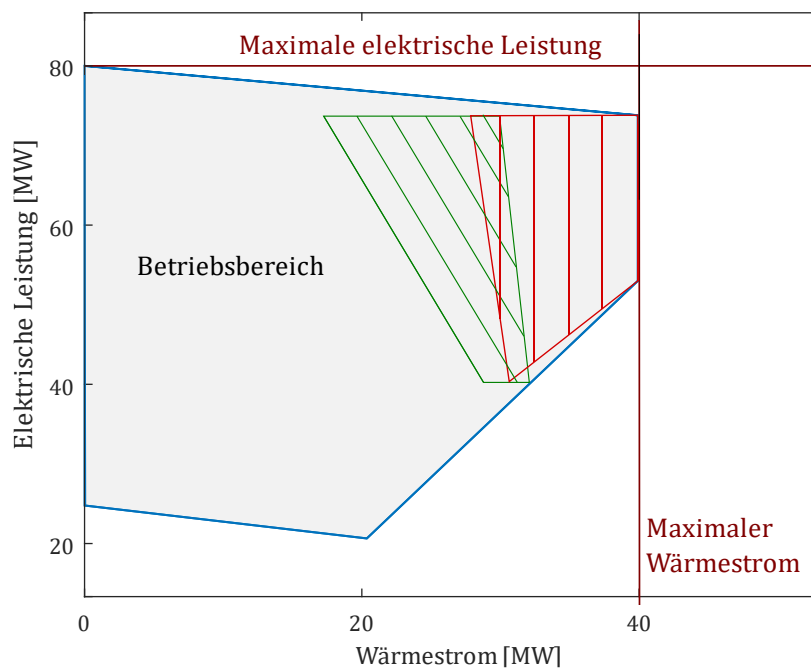


Abbildung 38: Verschiebung des Betriebsbereichs während der Störung. Grün: Betriebsbereich im ungestörten Betrieb. Rot: Betriebsbereich im gestörten Betrieb.

Nach der Störung müssen alle Gebäude, deren Wärmeversorgung unterbrochen wurde, zunächst wieder auf ihre Solltemperatur von 22 °C aufgeheizt werden. Dafür werden die Gaskessel auf ihre thermische Nennleistung geregelt und somit der maximal mögliche Wärmestrom an die Haushalte im Südosten übertragen. Auch am GuD-Kraftwerk wird der maximal mögliche Wärmestrom entnommen, um den Speicher und die angeschlossenen Gebäude wieder aufzuwärmen. Da hier jedoch nicht nur die Gebäude, sondern auch die durch den Pufferspeicher bedeutend größeren Wassermassen im System abgekühlt sind, erfolgt hier eine zeitlich verzögerte Versorgung der Gebäude mit der maximal möglichen thermischen Leistung. Allerdings sind die Gebäude und deren thermische Massen in dieser Region nicht so stark abgekühlt wie im Südosten, weshalb trotz des geringeren Wärmestroms in der Aufheizphase beide Wärmesysteme ca. 36 Stunden benötigen, um sich wieder zu erholen und zum ungestörten Wärmebedarf zurückzukehren (Abb. 37d).

Strom

Im Stromsektor liegt im ungestörten Fall eine nahezu konstante Netzfrequenz von 50 Hz vor (Abb. 37e), was bedeutet, dass das System fähig ist, kleinere Schwankungen im Verbrauch und der Erzeugung entsprechend auszugleichen. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der übertragenen Leistung (Abb. 37f), die bei allen drei Verbrauchern dem vom Lastprofil vorgegebenen Sollwert entspricht.

Wird die Gasversorgung des GuD-Kraftwerks unterbrochen, kann dieses auch keinen Strom mehr erzeugen und einspeisen. Durch die Erhöhung der Produktion der anderen Stromproduzenten kann diese fehlende Leistung teilweise ausgeglichen werden, jedoch stehen Erzeugung und Bedarf nicht mehr im Gleichgewicht, weshalb die Stromfrequenz zu Zeiten hohen Verbrauchs sinkt. Parallel dazu ist zu erkennen, dass die frequenzabhängigen Verbraucher auf diesen Abfall reagieren und entsprechend weniger Leistung dem Netz entnehmen. Dabei lässt sich bei der Betrachtung der übertragenen Leistungen erkennen, dass die Verbraucher, je nach Stärke ihrer Frequenzabhängigkeit, unterschiedlich stark betroffen sind: Während die ausreichende Stromversorgung der Haushalte im Südosten gewährleistet werden kann, kann die der gewerblichen Verbraucher im Nordwesten nur zu 92 % gedeckt werden. Gegen Ende des Störungszeitraums, in der Nacht vom 4. auf den 5. Februar, wird weniger Strom benötigt, weshalb hier die verbliebenen Kraftwerke ausreichend elektrische Energie erzeugen, um die Frequenz noch vor Störungsende auf ihr Sollniveau anzuheben (Abb. 37e und f).

4.2 Resilienzinterventionsmaßnahmen

Um die Resilienz des vorgestellten Referenzsystems zu verbessern, bieten sich zahlreiche Systemänderungen an. Die trivialste wäre bei der betrachteten Störung das Verlegen einer parallelen Ersatzleitung. Dies würde aber im Umkehrschluss bedeuten, dass für jede Gasleitung eine entsprechende zweite Rohrleitung zu verlegen wäre. Dagegen sprechen zum einen die daraus resultierenden stark erhöhten Kosten für das Gasnetz, zum anderen widerspräche eine solche Lösung dem Grundgedanken der Resilienz, der stets Flexibilität sowie Anpassungs- und Erholungsfähigkeit in den Vordergrund stellt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Im folgenden Abschnitt werden daher drei repräsentative Resilienzinterventionsmaßnahmen vorgestellt, durch die auf unterschiedliche Arten die Resilienz einzelner Verbraucher bzw. Sektoren gestärkt wird (Tab. 13). Im Rahmen eines Resilienzmanagementkonzeptes (vgl. Abschnitt 2.3.4) können diese z.B. durch eine qualitative Analyse mithilfe von Experteninterviews und -workshops erarbeitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie anhand der von Brand (2016), Nan und Sansavini (2017) und Roege et al. (2014) genannten Aspekte, die in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.3 vorgestellt wurden, ausgewählt.

Im Szenario *Speicher* werden zusätzliche Speichermöglichkeiten im Wärmesektor ausgeschöpft. Durch die Installation eines zweiten GuD-Kraftwerks erfolgt im Szenario *Dispersion* eine Erhöhung der geographischen Dispersion und Dezentralisierung. Im Szenario *Diversität* wiederum erhöhen Wärmepumpen die Diversität der Wärmebereitstellung. Um die Anwendungsmöglichkeiten des Resilienzindex zu illustrieren, wird im Folgenden zunächst jede Maßnahme mithilfe der Verbraucherindizes ausgelegt (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Tabelle 13: Resilienzinterventionsmaßnahmen und deren Einordnung nach Brand (2016), Nan und Sansavini (2017) und Roege et al. (2014)

Szenario	Speicher	Dispersion	Diversität
Maßnahme	Speicher im SO	2. KWK	Wärmepumpe im SO
Gestaltungsprinzip nach Brand	- Puffer - Subsidiarität	- Dispersion - Zellularität	- Redundanz - Diversität
Fähigkeit nach Sansavini	- Absorptiv - Adaptiv	- Absorptiv - Regenerativ	- Absorptiv - Adaptiv
Kategorie nach Roege	- Planen, Vorbereiten - Absorbieren	- Anpassung - Erholen	- Anpassung - Absorbieren

4.2.1 Szenario Speicher

Im Szenario *Speicher* wird im Heizkreislauf der Wärmeverbraucher im Südosten ein Pufferspeicher implementiert. Dadurch werden einige strukturelle Veränderungen und zusätzliche Komponente im Kreislauf nötig. Die generelle Struktur gleicht dabei dem Kreislauf, der schon im Wärmenetz im Süden und in Abschnitt 3.2.1 verwendet wird, auch die Regelung erfolgt hier analog. Die Leistung des Gaskessels wird anhand der Speichertemperatur festgelegt, die Vorlauftemperatur abhängig von der Außentemperatur anhand der Heizkurve über das Rücklaufventil eingestellt und die Raumlufttemperatur über die Regelung des Heizwassermassenstroms reguliert. Die Systemanpassungen sind in Abbildung 39 gekennzeichnet.

Im Zuge dieser Maßnahme kann die Resilienz als weiteres Auswahlkriterium des zu installierenden Speichers genutzt werden. In Tabelle 14 sind Kosten und Größen des handelsüblichen Speichers Vitocell 100-E (Viessmann Climate Solutions SE 2022a) aufgelistet. Für diese Modelle wurde der Einfluss der ausgefallenen Gasversorgung auf den Wärmekreislauf der südöstlichen Wohngebiete simuliert. Der Verlauf der resultierenden Raumtemperaturen und Wärmeströme sind in Abbildung 41 dargestellt. Wie zu erwarten, erhöht die Speichergröße die Möglichkeit des Systems, die damit einhergehende Unterbrechung der Wärmeversorgung zu überbrücken und reduziert damit den Abfall der Raumtemperatur. Mit zunehmender Speichergröße steigt somit auch der Resilienzindex

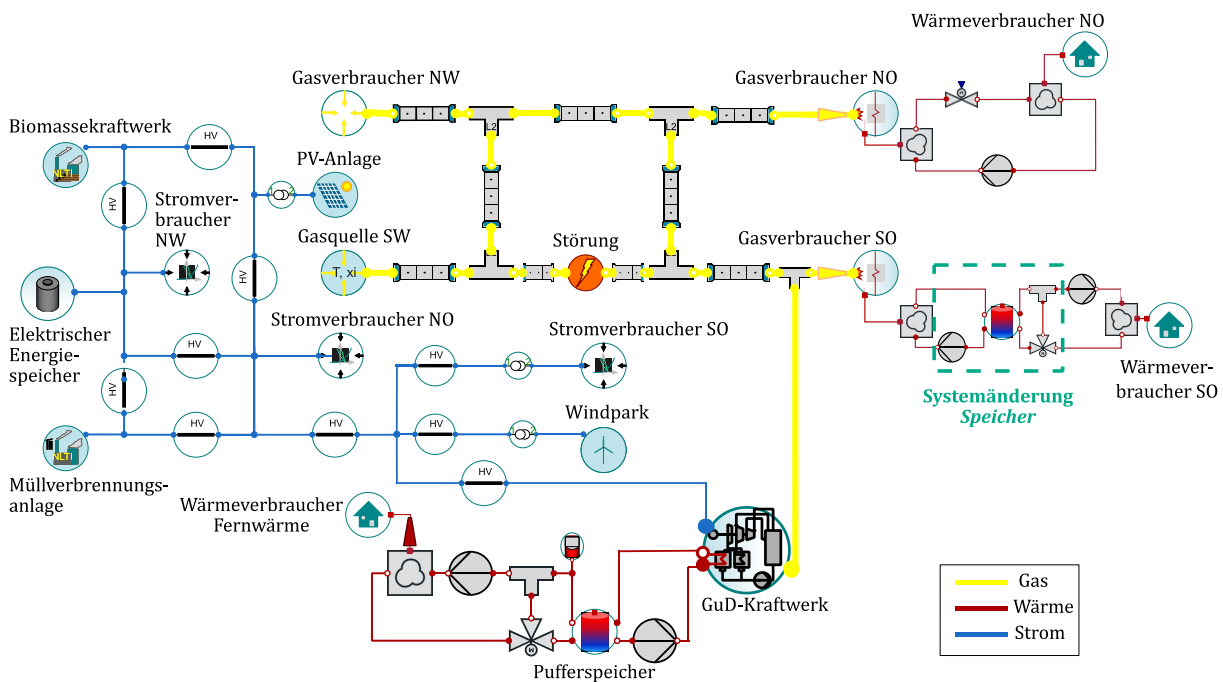


Abbildung 39: Systemanpassungen im Szenario Speicher

für die betrachtete Störung (Tab. 14). Infolge dessen steigen jedoch auch die Kosten. In Abbildung 40 sind die zu erwartenden Resilienzsteigerungen über die Investitionskosten des Speichers aufgetragen. Dabei wird deutlich, dass die höchste Resilienzsteigerung pro investierten Euro für einen Speicher mit $0,6 \text{ m}^3$ Speichervolumen erreicht wird. Daher wird ein solcher Speicher für dieses Szenario für die anschließende Simulation des Gesamtsystems ausgewählt.

Tabelle 14: Parameter und Resilienzindizes der betrachteten Speichervarianten (Haustechnik GmbH Heizung-Sanitär-Gas 2022)

Volumen in m^3	Kosten in €	Resilienzindex
0,2	749	0,356
0,4	889	0,609
0,6	1 062	0,854
0,75	1 232	0,940
0,95	1 432	0,987
1,5	1 893	1

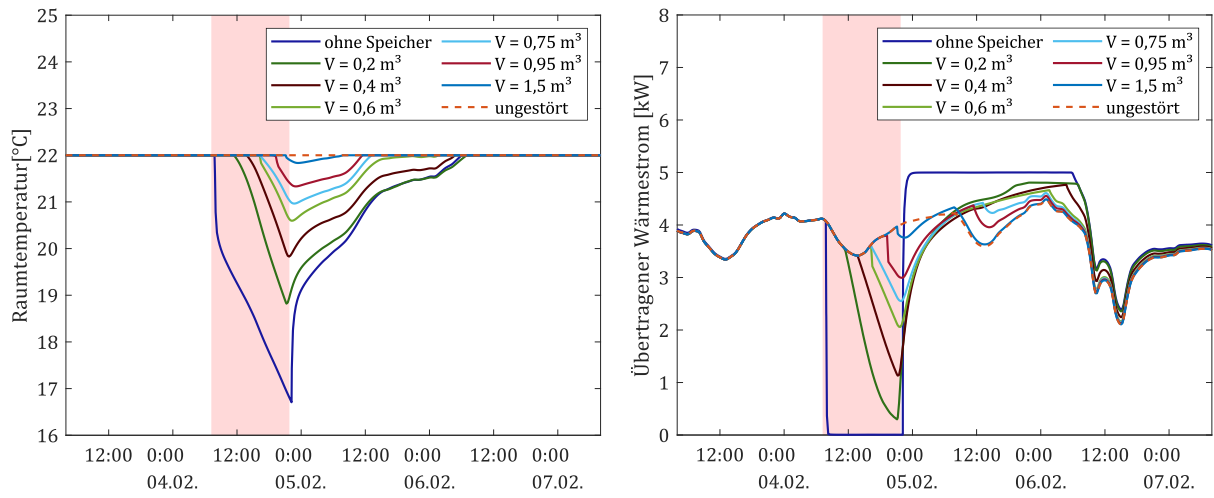


Abbildung 41: Verläufe der Raumtemperatur und des übertragenen Wärmestroms für die betrachteten Speichervarianten für den Wärmeverbraucher im Südosten

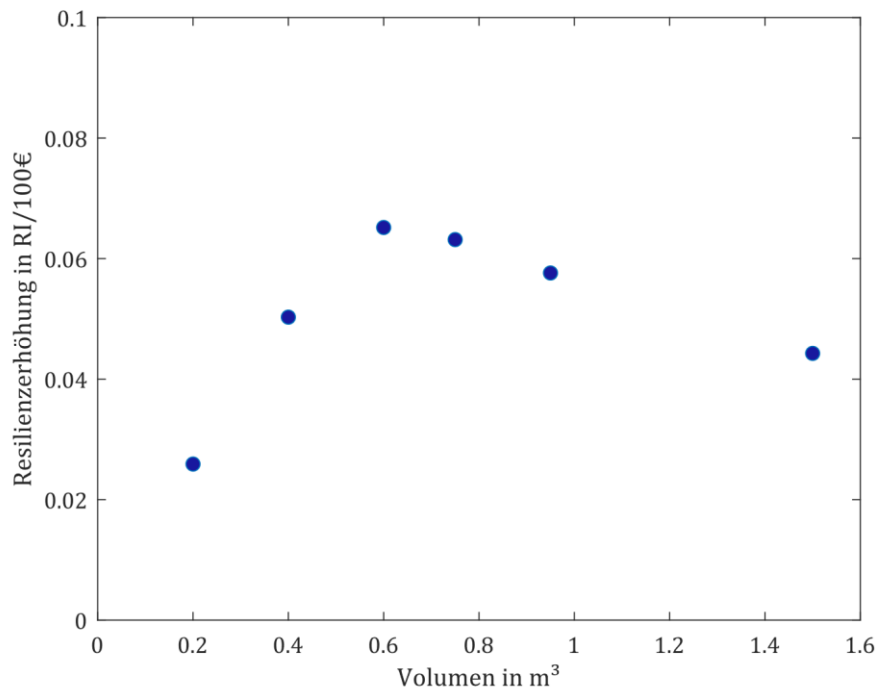


Abbildung 40: Resilienzzerhöhung durch Speicherintegration pro investierte 100 €

4.2.2 Szenario *Dispersion*

Im Szenario *Dispersion* wird das GuD-Kraftwerk im Südosten des Gasnetzes durch zwei kleinere GuD-Kraftwerke ersetzt. Dabei entspricht der Standort des ersten GuD-Kraftwerks dem der Referenzanlage, während das zweite GuD-Kraftwerk im Südwesten des Gasnetzes installiert wird. Für beide GuD-Kraftwerke wird ein Pufferspeicher installiert. Die Leistungen der kleineren Kraftwerke und die Volumina der Pufferspeicher entsprechen jeweils der Hälfte der Leistungen der Referenzanlage. Dementsprechend werden auch sämtliche Massenströme und Volumina der hydraulischen Komponenten im Vergleich zum Fernwärmenetz im Referenzsystem halbiert. Alle weiteren Parameter entsprechen denen des Referenzszenarios (vgl. Tab. 12). In der Einsatzregelung der elektrischen Leistungsabgabe wird weiterhin zuerst das südöstliche GuD-Kraftwerk angesteuert, das südwestliche an zweiter Stelle. Die weitere Reihenfolge entspricht der im Referenzmodell. Die Regelung der Komponente im Wärmenetz und der Gaskraftwerke erfolgt ebenfalls analog zum Referenzsystem. Zu beachten ist hierbei, dass durch diese Systemänderung keine direkte Redundanz entsteht, da beide Gaskraftwerke jeweils nur die Hälfte der benötigten Leistung bereitstellen können. Allerdings wird die Energieerzeugung geografisch verteilt (dispergiert).

Bei der Integration des zweiten GuD-Kraftwerks in das Wärmenetz bieten sich zwei Möglichkeiten an. Zum einen kann das zu versorgende Wohngebiet in zwei unabhängige Versorgungseinheiten aufgeteilt werden, von denen beide zentral vom jeweiligen GuD-Kraftwerk versorgt werden (Abb. 42, oben). Im Modell muss dazu das thermische Verbrauchermodell an zwei Stellen implementiert und die Skalierungsfaktoren der damit verbundenen `HeatFlowMultiplier` halbiert werden. Zum anderen können die beiden GuD-Kraftwerke dezentral in denselben Wärmekreislauf einspeisen (Abb. 42, unten). Mittels einer hydraulischen Weiche werden die Massenströme vereint und versorgen somit gemeinsam das Wohngebiet. Das thermische Verbrauchermodell muss hierfür nicht geteilt werden. Die Wärmeversorgung des Wohngebietes wurde für beide Systeme simuliert. Die Reaktion der beiden Systeme ist anhand der sich einstellenden Wärmeströme und Temperaturen in Abbildung 43 dargestellt.

Bei beiden Versorgungsvarianten wird beim Ausfall der Wärmeversorgung auf die im System gespeicherte Wärme zurückgegriffen. Dabei kann bei der zentralen Versorgung jedoch nur auf den östlichen Wärmespeicher zurückgegriffen werden, da die beiden Wärmekreisläufe voneinander hydraulisch getrennt sind. Dementsprechend wird der westliche Speicher nicht entladen und die Solltemperatur von 85 °C liegt weiterhin vor, während die Speichertemperatur im Osten stark sinkt (Abb. 43a). Bei der dezentralen Versorgung werden hingegen beide Speicher entladen, wodurch deren Temperaturen sinken. Da

in den westlichen Pufferspeicher weiterhin Wärme vom westlichen GuD-Kraftwerk eingespeist wird, sinkt dessen Temperatur dabei nicht so stark wie die des östlichen Speichers (Abb. 43a). Da bei der zentralen Versorgung keine Entladung des westlichen Speichers erfolgt, arbeitet das westliche Kraftwerk im Normalbetrieb weiter und koppelt nur so viel Wärme aus, wie zur Aufrechterhaltung der Speichertemperatur benötigt wird, was dem Bedarf des westlichen Wärmeverbraucher entspricht. Bei der dezentralen Versorgung registriert die Regelung des westlichen Kraftwerks dagegen die Abkühlung des Wärmespeichers und gibt daher die maximal mögliche Wärmeauskopplung als Sollwert vor. Infolge dessen wird hier dem System insgesamt mehr Wärme übertragen als bei der zentralen Versorgung (Abb. 43b).

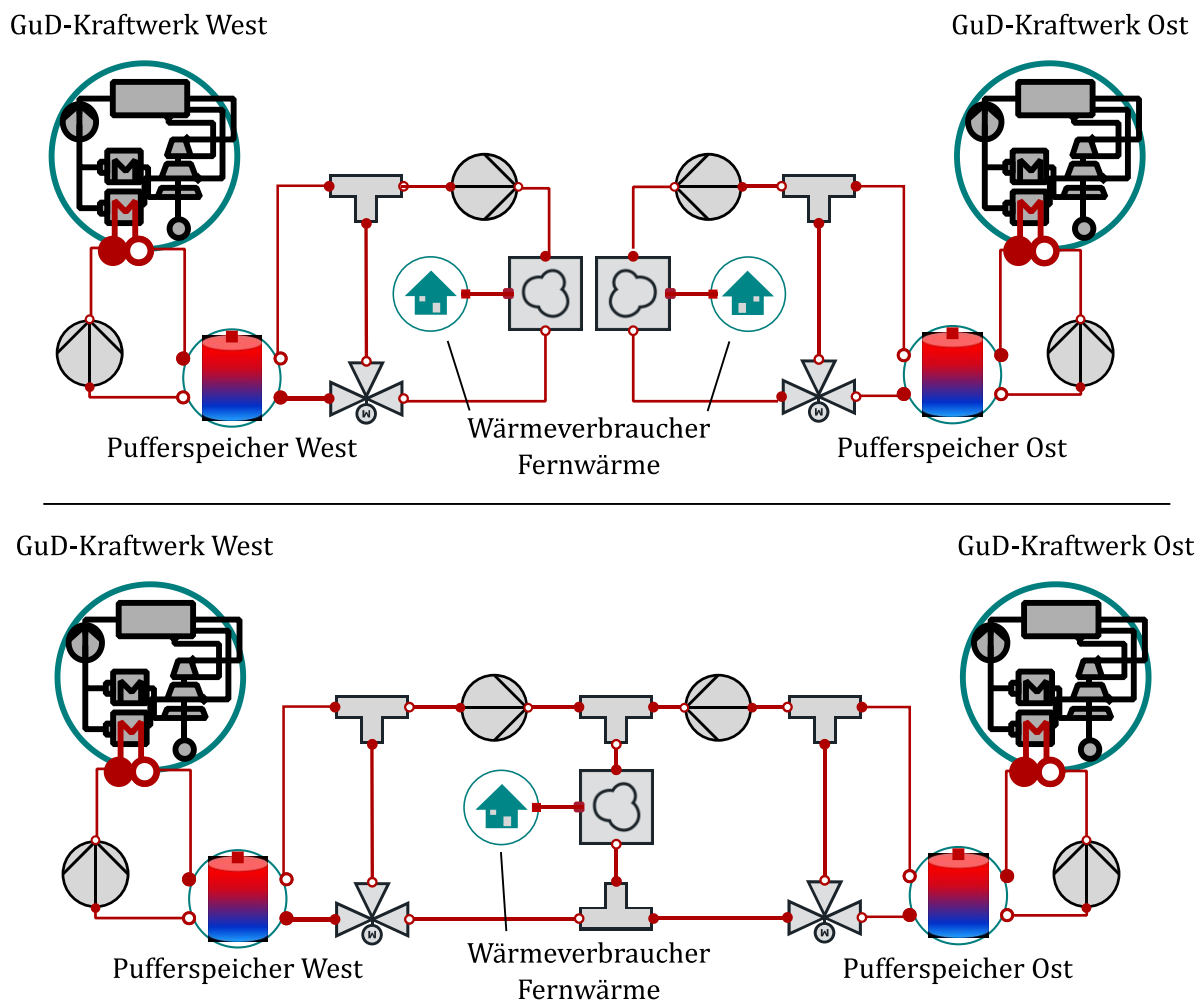


Abbildung 42: Zentrale (oben) und dezentrale (unten) Versorgung des südlichen Wohngebietes

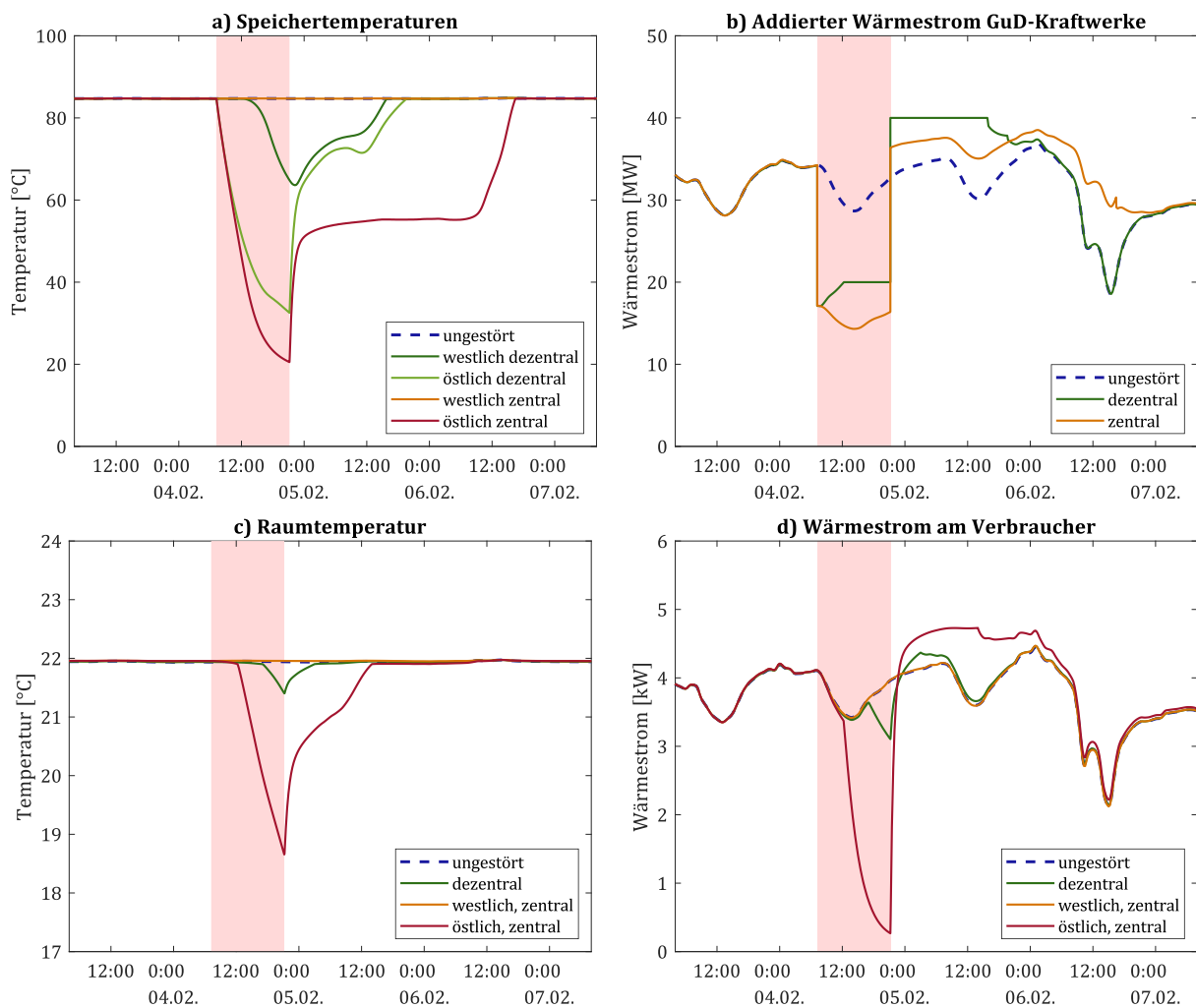


Abbildung 43: Vergleich der Wärmeströme und Temperaturen für die zentrale und dezentrale Versorgung des südlichen Wohngebietes

Bei der dezentralen Versorgung werden die im System vorhandenen Speicher besser ausgenutzt und dem System mehr Wärme zugeführt. Dadurch kann der Wärmebedarf des Wohngebietes über mehrere Stunden gedeckt werden, bevor ein leichter Einbruch zu beobachten ist (Abb. 43d). Für die zentrale Versorgung ergibt sich dagegen eine unterbrechungsfreie Wärmeversorgung im westlichen und eine stark gestörte Wärmeversorgung im östlichen Teil des Wohngebietes (Abb. 43d). Die sich einstellenden Raumtemperaturen spiegeln dieses Systemverhalten wider. Während im zentralen Szenario die Raumtemperatur im westlichen Teil dank der ununterbrochenen Wärmeversorgung weiterhin ihren Sollwert von 22 °C erreicht, sinkt die Raumtemperatur im östlichen, vom Störfall betroffenen Teil auf 18,7° C. Bei der dezentralen Versorgung kann durch die Nutzung aller im System befindlichen Reserven die Temperatur auf einem hohen Niveau gehalten werden und fällt nur auf eine Minimaltemperatur von 21,4 °C.

Anhand dieser Auswertungssituation wird nochmals der Vorteil der gewichteten Mittelwertbildung zur Kombination mehrerer Resilienzindizes deutlich (vgl. Abschnitt 3.3.3). Nur so können die Wärmeverbraucher, die in beiden Modellen unterschiedlich implementiert und aggregiert wurden, miteinander verglichen werden. Dies lässt sich auch an den berechneten Sektorenindizes für diesen Bereich ablesen: Während die dezentrale Implementierung einen sehr hohen Wert von 0,999 erzeugt, ist der Resilienzindex der zentralen Implementierung nur 0,741 (1 für den westlichen und 0,482 für den östlichen Teil). Aufgrund dieser Ergebnisse wird für die Simulation des Gesamtsystems die dezentrale Implementierung verwendet.

4.2.3 Szenario *Diversität*

Im Szenario *Diversität* werden die Haushalte im Südosten des Gasnetzes, die bisher einzig durch Gaskessel versorgt werden, zusätzlich mit elektrischen Wärmepumpen ausgestattet. Dadurch entsteht eine hybride Wärmeversorgung im bivalenten Betrieb für die Verbraucher in diesem Gebiet. Dabei übernimmt die Wärmepumpe die Versorgung bei Außentemperaturen oberhalb einer festzulegenden Außentemperatur (Bivalenzpunkt), während bei Temperaturen unterhalb dieses Bivalenzpunktes der Gaskessel das Gebäude

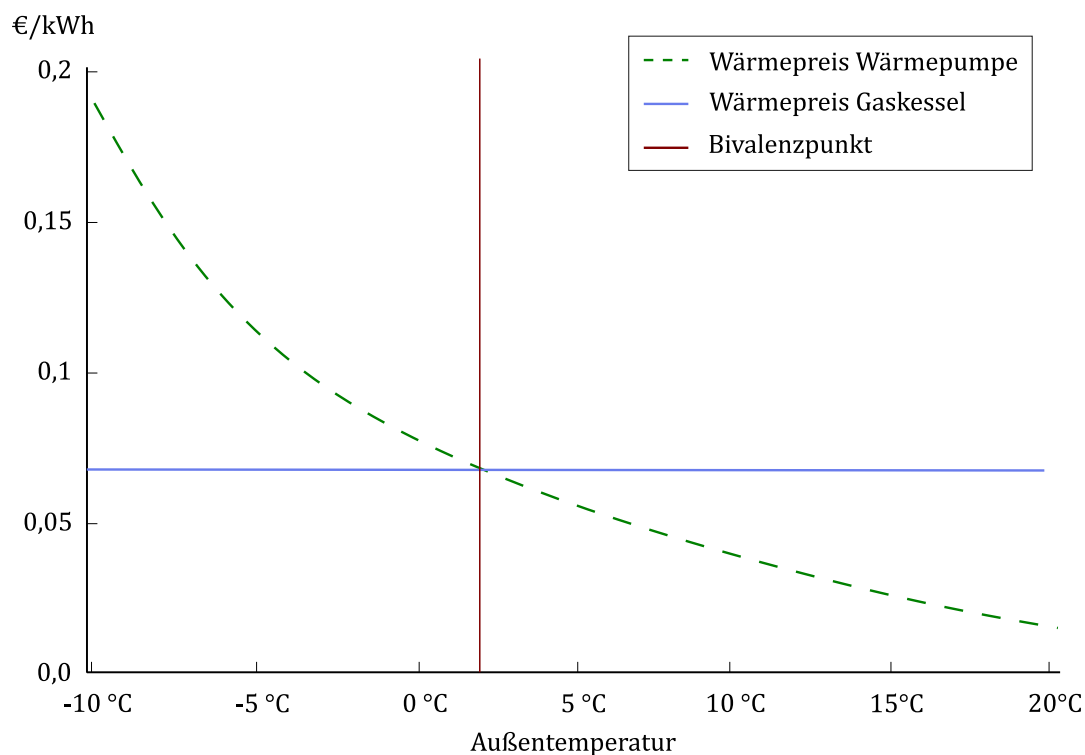
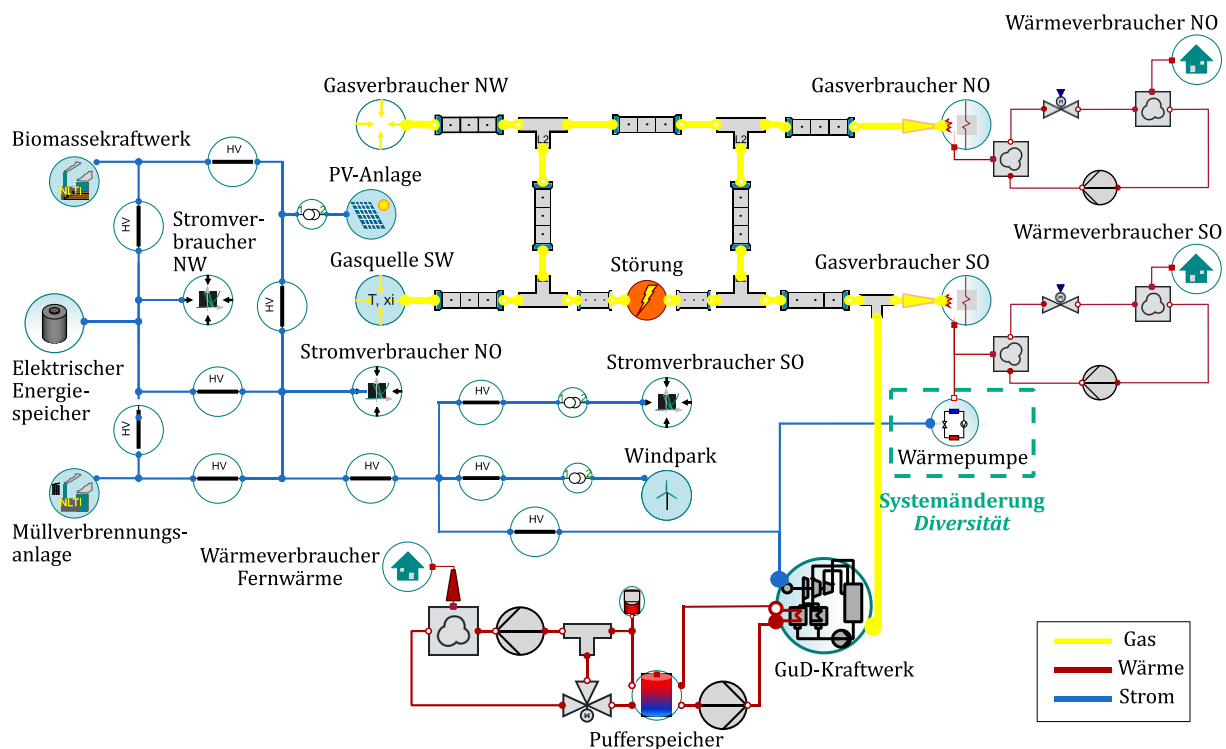


Abbildung 44: Bestimmung des Bivalenzpunktes nach ökonomischen Kriterien nach Viessmann Deutschland GmbH (2020)

mit Wärme versorgt. Der Bivalenzpunkt kann dabei aus ökonomischen Gründen in Abhängigkeit der Gas- und Strompreise festgelegt werden (siehe Abb. 44) oder nach ökologischen Gesichtspunkten in Abhängigkeit von der mit der Wärmeerzeugung verbundenen CO₂-Emission (Viessmann Climate Solutions SE 2022b). Dabei ist es möglich nur den Gaskessel oder beide Wärmeerzeuger jeweils auf den maximalen Wärmebedarf auszulegen. Außerdem ermöglicht ein solches System nicht nur die aktuell kosteneffizienteste Betriebsweise der Wärmeversorgung, sondern erhöht zudem deren Flexibilität.

Im vorliegenden Modell wurde der Bivalenzpunkt auf 2 °C festgelegt. Im Simulationszeitraum werden durchgehend Werte unterhalb von 2 °C erreicht, weshalb die Wärmeversorgung im störungsfreien Betrieb weiterhin vom Gaskessel übernommen wird. Durch eine entsprechende Regelung wird jedoch im Störfall die Wärmepumpe zur Versorgung herangezogen. Im Modell wird hierzu der Wärmestrom des Gaskessels gemessen und beim Abfallen auf null die Wärmepumpe angeschaltet. Ist der Gaskessel wieder einsatzbereit, wird die Wärmepumpe entsprechend ausgeschaltet. Die weiteren Komponenten des Wärmekreislaufs entsprechen denen des Referenzsystems. Der Stromanschluss der Wärmepumpen erfolgt im Südosten des elektrischen Netzes. Dafür wird analog zu dem `Gas-` und `HeatFlowMultiplier` ein `PowerMultiplier` in das Modell integriert, der die elektrische Leistung der Wärmepumpe hochskaliert und somit eine entsprechende Leistungsentnahme des gesamten Wohngebiets am Abnahmepunkt darstellt. Die entsprechenden Änderungen im Modell sind in Abbildung 45 dargestellt.

Die Größe der Wärmepumpe soll nun ebenfalls abhängig von ihrem Einfluss auf die Resilienz des Systems bestimmt werden. Dazu wurden Geräte mit den Nennwärmeleistungen von 3, 3,6 und 5,6 kW_{th} ausgewählt (Viessmann Climate Solutions SE 2022c). Da die Wärmepumpe für ihren Betrieb Strom benötigt, müssen nicht nur die Auswirkungen auf die Resilienz des Wärmesektors, sondern auch auf die des Stromsektors in die Betrachtung aufgenommen werden. Aus diesem Grund wird das Verhalten beider Sektoren für unterschiedliche Wärmepumpengrößen simuliert und die sich ergebenden Resilienzindizes berechnet und bewertet. In Abbildung 46 ist der Wärmeresilienzindex über den Stromresilienzindex für die verschiedenen Wärmepumpengrößen dargestellt. In Grün sind zudem die Punkte gekennzeichnet, an denen beide Sektoren gleich große Resilienzindizes aufweisen. Oberhalb dieser Linie reagiert der Wärmesektor resilienter auf die betrachtete Störung, unterhalb der Linie der Stromsektor.

Abbildung 45: Modellaufbau des Szenarios *Diversität*

Es wird deutlich, dass die Resilienzgewinne im Wärmesektor mit Resilienzverlusten im Stromsektor einhergehen. Während der Stromsektor ohne Wärmepumpe den Maximalwert von 1 erreicht, führt der Einbau einer Wärmepumpe zwar zu geringen Einbußen auf der Stromseite, jedoch zu noch stärkeren Gewinnen auf der Wärmeseite. Der Grund dafür ist, dass eine Wärmepumpe stets auch einen Teil der Umgebungsenergie nutzt. Somit kann die im Stromnetz nicht zur Verfügung stehende Leistung nicht mit der im Wärmesektor zusätzlich bereitgestellten Wärme gleichgesetzt werden. Außerdem verringert die (anteilig) bereitgestellte Wärme die Auskühlung des Gebäudes, wodurch die anschließende Aufheizphase ebenfalls verkürzt wird, was einen positiven Effekt auf den Wärmeresilienzindex hat, ohne den Resilienzindex des Stromsektors zusätzlich negativ zu beeinflussen. Es zeigt sich also, dass das Ausmaß intersektoraler Auswirkungen nicht direkt vorhergesagt werden kann, sondern erst mithilfe der dynamischen Simulation und der anschließenden Resilienzbewertung quantifizierbar wird. Für das betrachtete System ergibt die Resilienzbewertung, dass die Wärmepumpe mit der nominalen Wärmeleistung von 3 kW_{th} gleich große Resilienzindizes für Wärme- und Stromsektor erzeugt (Abb. 46). Daher wird diese für die Simulation des Gesamtsystems genutzt.

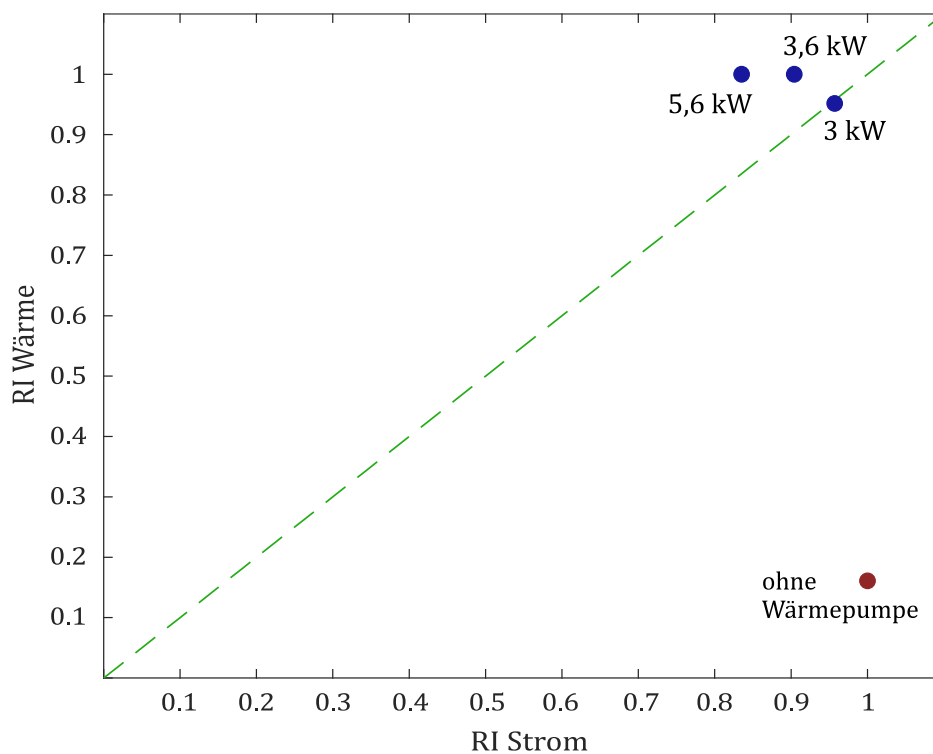


Abbildung 46: Gegenüberstellung der Resilienzindizes der Sektoren Wärme und Strom für unterschiedlich große Wärmepumpen. Die grüne, gestrichelte Linie stellt die Punkte dar, an denen die Resilienzindizes für beide Sektoren übereinstimmen

4.3 Systemantworten der Szenarien

Für den folgenden Abschnitt wurden die Systemantworten der vorgestellten Szenarien simuliert. Bevor die Reaktionen in den einzelnen Sektoren besprochen werden, wird für jedes Szenario zunächst ein kurzer Gesamtüberblick gegeben.

4.3.1 Systemantwort im Szenario *Speicher*

Durch die Installation von Pufferspeichern in den südöstlichen Haushalten kann hier ähnlich wie im Fernwärmenetz der Einbruch der Wärmeversorgung abgedämpft werden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Im Gassektor wird dagegen der zusätzliche Gasbedarf für die Aufwärmung des Pufferspeichers deutlich. Im Stromsektor können keinerlei Auswirkungen beobachtet werden. Die Systemantworten in den Sektoren Gas, Wärme und Strom sind in Abbildung 47 dargestellt.

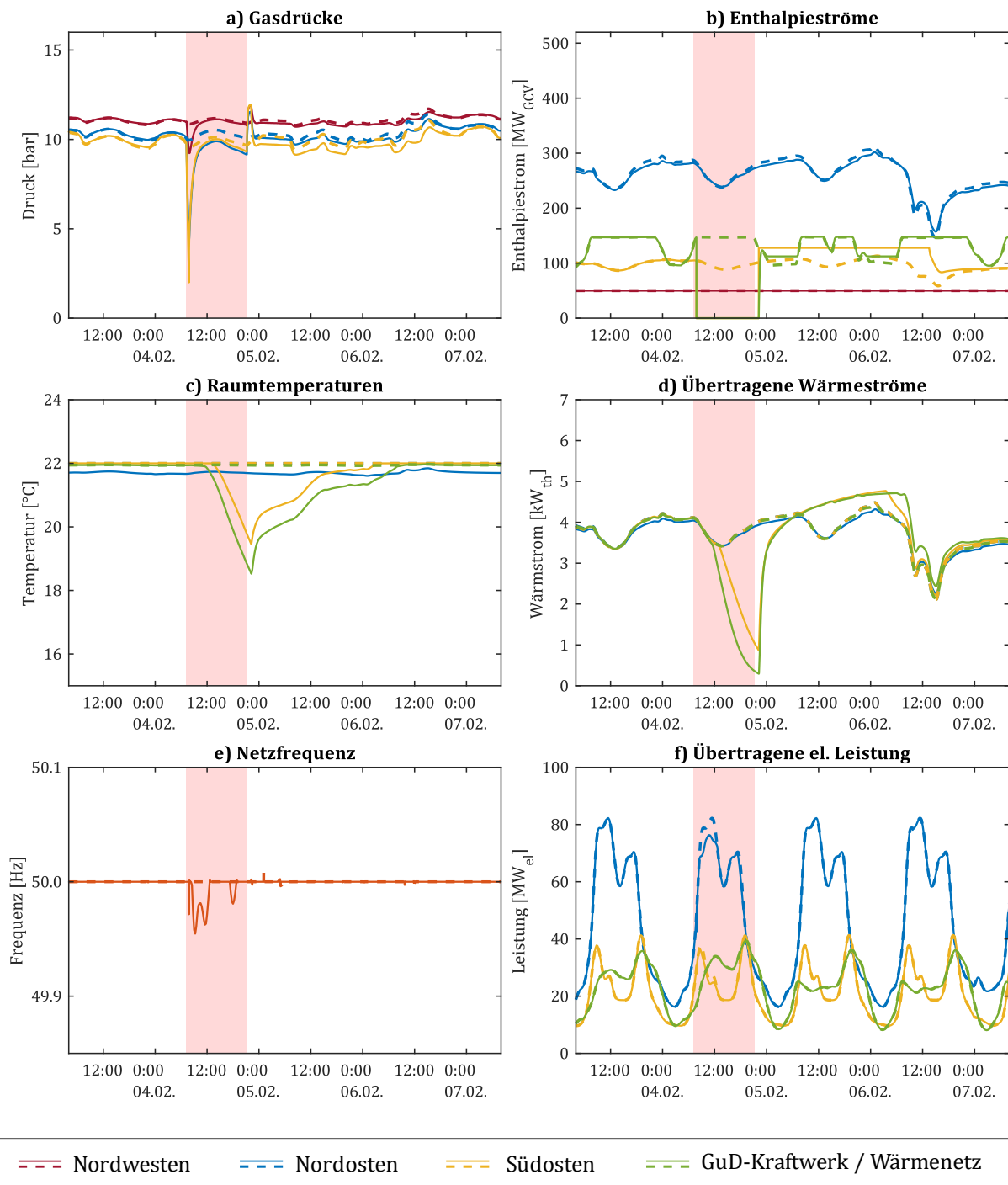


Abbildung 47: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Szenario *Speicher*

Gas

Die Verläufe der Gasdrücke und -enthalpieströme (Abb. 47a-b) in diesem Szenario unterscheiden sich kaum von denen des Referenzszenarios. Nur die Gasabnahme des Wohngebietes im Südosten ist nach der Störung länger erhöht als im Referenzszenario. Der Grund dafür ist, dass die im Südosten installierten Wärmespeicher für eine Verschiebung des Wärmebedarfs sorgen. So wird bei der Unterbrechung des Gasbedarfs die Abkühlung der Gebäude zwar verzögert, dennoch müssen die dafür verwendete Energieinhalte der Speicher im Anschluss an die Störung diesen wieder zugeführt werden, weshalb die Gaskessel nach Störungsende sechs Stunden länger bei maximaler Wärmeleistung betrieben werden müssen. Durch diesen verlängerten erhöhten Gasbedarf ist auch der Gasdruck an dieser Abnahmestelle innerhalb dieser sechs Stunden etwas geringer als im Referenzszenario.

Wärme

Bei den Wärmeverbrauchern im Südosten ist durch die Installation der Pufferspeicher nun ein ähnliches Verhalten zu beobachten wie bei den Haushalten im Wärmenetz. Für einige Stunden kann zunächst der Wärmebedarf durch die Pufferspeicher gedeckt werden und der darauffolgende Abfall des übertragenen Wärmestroms wird gedämpft (Abb. 47d). Bei der Betrachtung der Raumtemperaturen und Wärmeströme wird deutlich, dass bezogen auf den Wärmebedarf im Fernwärmenetz ein geringeres Speichervolumen vorliegt als in den Haushalten im Südosten, wodurch die Wärmeversorgung im südöstlichen Wohngebiet etwas länger aufrechterhalten werden kann. Dadurch weisen die Werte der Raumtemperaturen und Wärmeströme eine geringere Abweichung zum ungestörten Kurvenverlauf auf als die an das Fernwärmenetz angeschlossenen Haushalte (Abb. 47c-d).

Nach der Störung werden im Südosten nicht nur die Gebäude, sondern auch das sich in den Speichern befindliche Wasser wieder erwärmt, weshalb nicht sofort die maximal mögliche Wärmeleistung an die Gebäude übertragen werden kann. Auch hier ist das verhältnismäßig größere Speichervolumen und die damit einhergehenden geringeren Abweichungen erkennbar (Abb. 47d).

Strom

Die Installation des Pufferspeichers beeinflusst die Wärmeversorgung der südöstlichen Haushalte und somit deren Gasversorgung. Allerdings besteht in diesem Szenario keine Kopplung der südöstlichen Wärmeversorgung zum Stromsektor. Aufgrund dessen haben die beschriebenen Effekte im Wärme- und Gassektor keinen Einfluss auf die Netzfrequenz und die übertragenen elektrischen Leistungen, weshalb deren Verläufe mit denen des Referenzszenarios übereinstimmen (Abb. 47e-f).

4.3.2 Systemantwort im Szenario *Dispersion*

Die Aufteilung des GuD-Kraftwerks in ein südöstliches und ein südwestliches Kraftwerk verändert die Höhe der Gasabnahme im Südosten und -westen des Gasnetzes. Wärmeseitig verbessert sich die Versorgung des Wärmenetz durch die Aufteilung seiner Versorgung. Der Stromsektor profitiert von der unterbrechungsfreien Stromeinspeisung durch das südwestliche Kraftwerk. Die entsprechenden Reaktionen sind in Abbildung 48 dargestellt.

Gas

Durch die Halbierung der Kraftwerksleistung im Südosten ändert sich auch die Fahrweise dieses GuD-Kraftwerks. Während die Stromeinspeisung im Referenzszenario in lastschwachen Zeiten verringert werden musste, kann das südöstliche GuD-Kraftwerk nun konstant bei seiner Nennleistung betrieben werden. Infolgedessen halbiert sich auch der Gasbedarf und somit der durchschnittliche Enthalpiestrom (Abb. 48b). Dementsprechend sinkt der gesamte Gasbedarf an der südöstlichen Abnahmestelle. Somit verzögert sich hier auch der Druckabfall (Abb. 48a), wodurch sowohl das südöstliche GuD-Kraftwerk als auch die im Südosten angeschlossenen Gaskessel 18 Minuten später als im Referenzszenario abgeschaltet werden.

Nach Störungsende muss das südöstliche GuD-Kraftwerk zusätzliche Wärme zum Aufheizen der angeschlossenen Gebäude und des entladenen Pufferspeichers bereitstellen. Da der Pufferspeicher und das GuD-Kraftwerk im Vergleich zum Referenzszenario jedoch halbiert wurden, geschieht dies nun allein durch die Verschiebung des Betriebspunkts im PQ-Diagramm (vgl. Abschnitt 4.1.2). Ein erhöhter Gasbedarf während der lastschwachen Zeiten ist bei diesem Kraftwerk daher nicht zu erkennen (Abb. 48b). Die zu beobachtende Abweichung im Gasdruck im Südosten ist somit nur auf den erhöhten Gasbedarf zur Wiederaufheizung der Haushalte im Südosten zurückzuführen und fällt geringer aus als im Referenzszenario (Abb. 48a). Das südwestliche GuD-Kraftwerk wird direkt an der Quelle angeschlossen, weshalb hier der Druck dem Einspeisedruck von 12,5 bar entspricht (Abb. 48a). Dadurch wird dieses Kraftwerk nicht vom Ausfall der südlichen Gasleitung beeinflusst und kontinuierlich mit Gas versorgt. Da das Gaskraftwerk während und nach der Störung allerdings zusätzlich Wärme für die Versorgung der Gebäude und die anschließende Aufheizphase zur Verfügung stellt, ist in lastschwachen Zeiten ein erhöhter Gasbedarf zu beobachten (Abb. 48b). Dabei sei auf die Morgenstunden des 5. Februars verwiesen, an denen im ungestörten Fall das südwestliche Kraftwerk vom Netz geht, weil die Strom- und Wärmenachfrage zu klein für einen wirtschaftlichen Betrieb ist. Im gestörten Fall steigt hier aufgrund des Aufheizvorgangs der Wärmebedarf, weshalb das Kraftwerk weiterhin betrieben wird. Auf den Kurvenverlauf des Enthalpiestroms zu den Gaskesseln im Nordosten hat die Aufteilung des GuD-Kraftwerks keinen Einfluss.

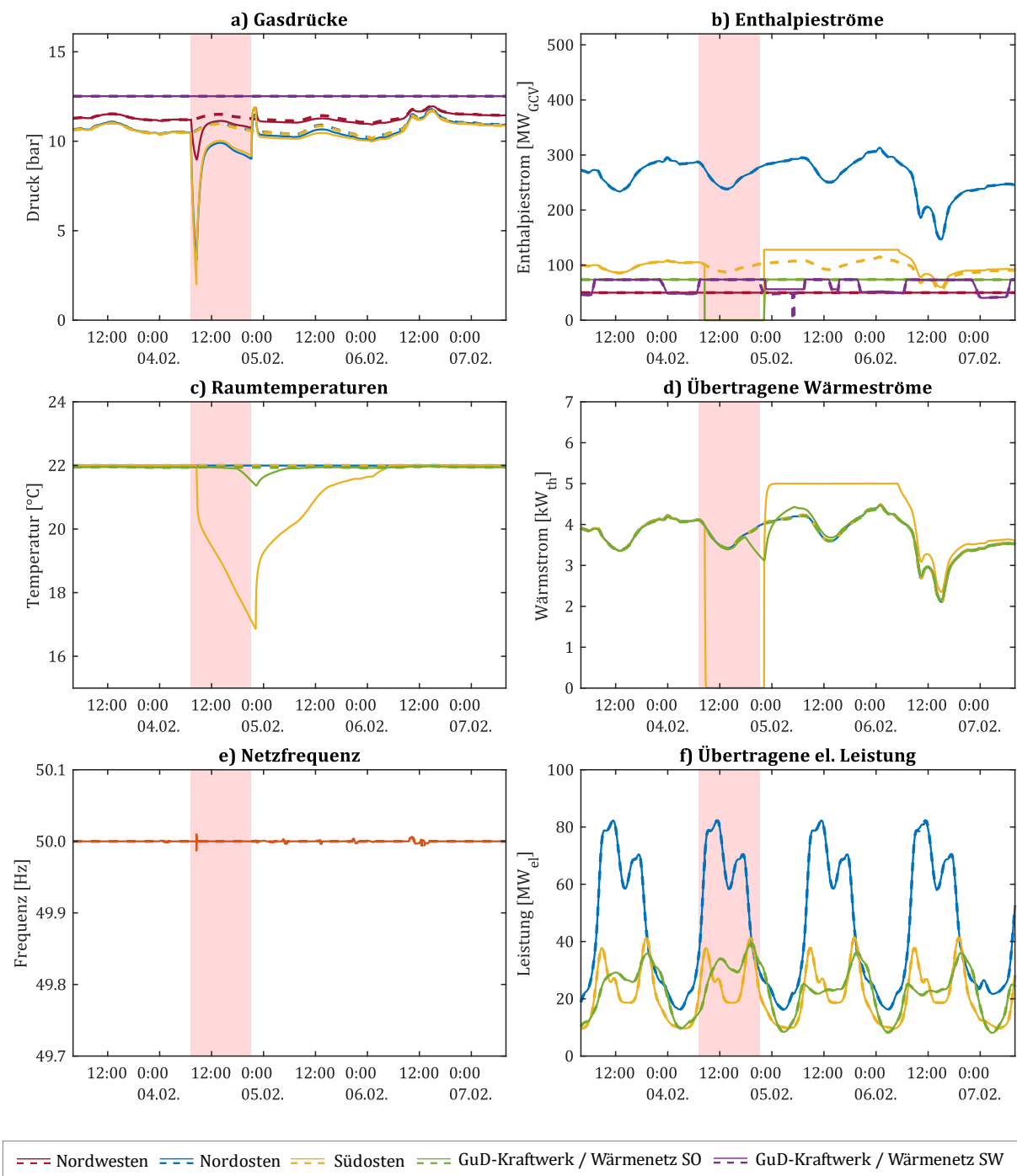


Abbildung 48: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragene Leistungen im Szenario *Dispersion*

Wärme

Durch den ungestörten Betrieb des südwestlichen Kraftwerks und das Entladen der Pufferspeicher kann die Wärmeversorgung im Fernwärmenetz nahezu vollständig aufrechterhalten werden. Erst nach zehn Stunden ist ein Abfallen des übertragenen Wärmestroms zu beobachten (Abb. 48d). Dementsprechend kann die Raumtemperatur in den angeschlossenen Gebäuden innerhalb dieser zehn Stunden auf ihrem Sollwert von 22 °C gehalten werden (Abb. 48c). Ausgelöst durch die verzögerte Abschaltung der Gasversorgung wird die Wärmeversorgung der Verbraucher im Südosten 18 Minuten später unterbrochen, wodurch der übertragene Wärmestrom hier ebenfalls später als im Referenzszenario abfällt (Abb. 48d). Dies hat jedoch kaum Einfluss auf den Kurvenverlauf von Raumtemperatur und Enthalpiestrom, weshalb auch hier die Wärmeversorgung der südöstlichen Verbraucher komplett ausfällt und die Raumtemperatur bis auf 16,7 °C fällt (Abb. 48c).

Strom

Aufgrund der unterbrechungsfreien Gasversorgung des GuD-Kraftwerks im Südwesten kann dieses auch während der Störung Strom in das Netz einspeisen. Infolgedessen steht dem Stromsektor während des gesamten Störungszeitraums mehr Produktionskapazität zur Verfügung als im Referenzszenario, wodurch die Frequenz auf ihrem Sollwert gehalten werden kann (Abb. 48e). Durch den zusätzlichen Produzenten können jetzt auch während laststarker Zeiten alle Verbraucher mit ausreichend elektrischer Leistung versorgt werden, sodass die entsprechenden Kurvenverläufe für den gestörten und ungestörten Fall übereinstimmen (Abb. 48f).

4.3.3 Systemantwort im Szenario *Diversität*

Durch die Aktivierung der implementierten Wärmepumpen kann der Wärmebedarf der Haushalte im Südosten nahezu vollständig gedeckt werden. Dies verringert gleichzeitig den Gasbedarf nach der Störung, da ein Aufheizen der Gebäude nicht mehr nötig ist. Allerdings wird das Stromnetz durch den weiteren Verbraucher zusätzlich belastet. Die entsprechenden Systemantworten sind in Abbildung 49 dargestellt.

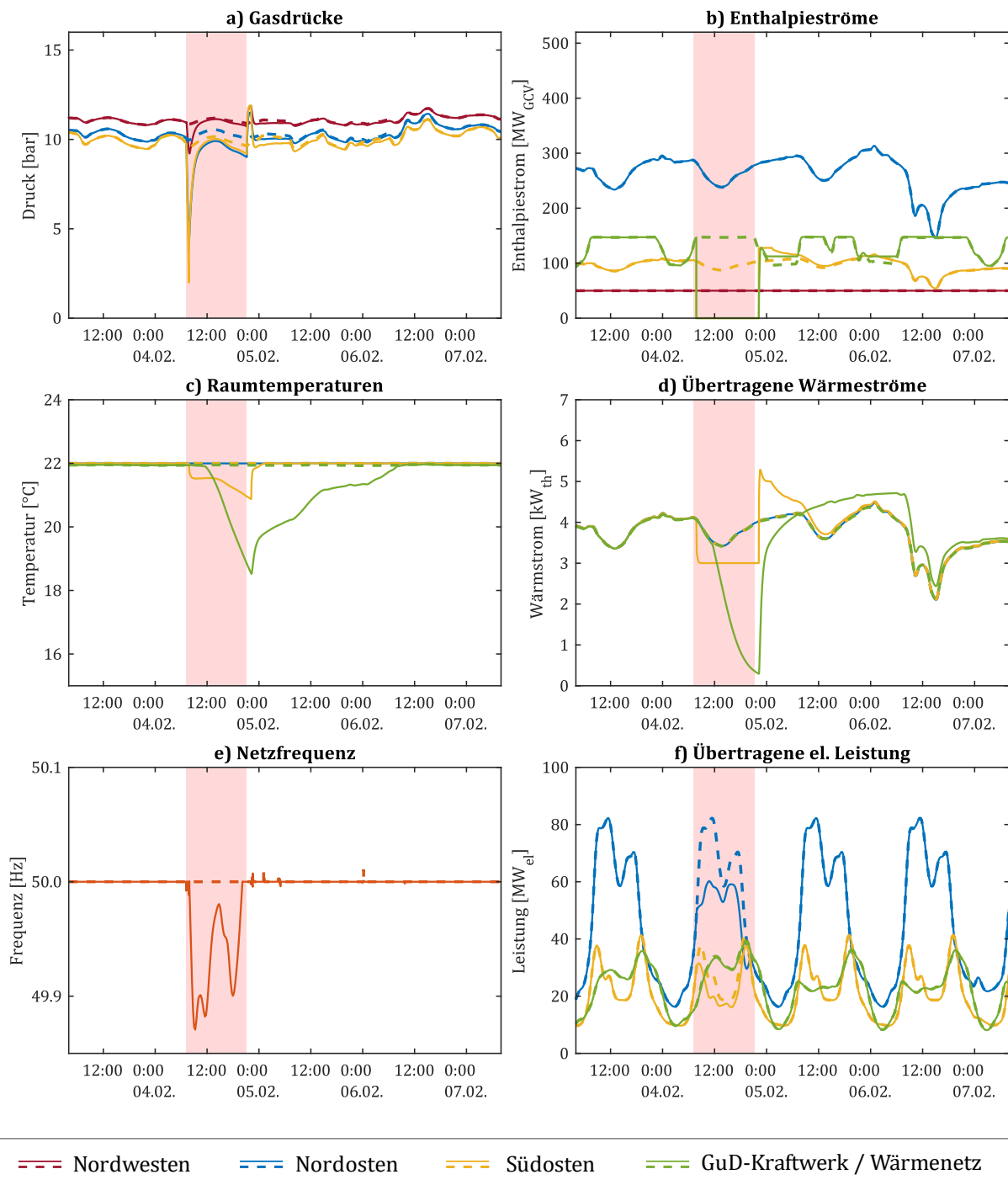


Abbildung 49: Verläufe der Gasdrücke, Enthalpieströme, Raumtemperaturen, Wärmeströme, Netzfrequenz und übertragenen Leistungen im Szenario *Diversität*

Gas

Aufgrund der Nutzung der sonst bei diesen Außentemperaturen inaktiven Wärmepumpen im Südosten ist die Aufheizphase der Gebäude kürzer, da ihre Wärmeversorgung nicht vollständig unterbrochen wird. Dadurch entspricht der Enthalpiestrom für dieses Wohngebiet 16 Stunden nach der Störung wieder dem des ungestörten Verlaufs (Abb. 49b). Auf die Gasversorgung des GuD-Kraftwerks hat diese alternative Wärmeversorgung keine Auswirkung, weshalb dessen Enthalpiestromverlauf dem des Referenzszenarios entspricht. Der geringere Gasbedarf nach Störungsende führt zu einer schnelleren Erholung der Drücke im Gasnetz und einer geringeren Abweichung vom ungestörten Niveau als im Referenzszenario (Abb. 49a).

Wärme

Im Wärmesektor können die Wärmepumpen im Südosten die Wärmeversorgung während des Ausfalls der Gaskessel fast vollständig decken (Abb. 49d). Dementsprechend fällt die Raumtemperatur nur leicht auf 20,9 °C (Abb. 49c). Dadurch kühlen die Gebäude kaum aus und die Aufheizphase umfasst nur 16 Stunden. Auf die anderen Wärmeverbraucher hat diese Betriebsweise keine Auswirkung, weshalb deren Kurvenverläufe denen des Referenzszenarios entsprechen.

Strom

Im Stromnetz führt der zusätzliche Stromverbrauch der Wärmepumpen zu einer zusätzlichen Belastung des Netzes. Daher bricht die Frequenz im Störungszeitraum stärker ein und erreicht einen Minimalwert von 49,87 Hz (Abb. 49e). Die priorisierte Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpen führt zu deutlich größeren Lastausfällen bei den Verbrauchern im Nord- und Südwesten als im Referenzsystem, bis zu 33 % für den Verbraucher im Nordwesten und bis zu 17 % für den Verbraucher im Nordosten (Abb. 49f). Zudem treten nun auch Ausfälle während der lastschwachen Zeiten auf, in denen im Referenzszenario die Last gedeckt werden konnte. Nach der Störung werden die Wärmepumpen aus- und das GuD-Kraftwerk wieder angeschaltet, wodurch ausreichend Produktionskapazitäten zur Verfügung stehen, um die Frequenz auf ihren Sollwert von 50 Hz anzuheben (Abb. 49e).

4.4 Auswertung der Resilienzindizes

Im folgenden Abschnitt werden die Resilienzindizes der einzelnen Szenarien anhand der übertragenen Enthalpieströme, Wärmeleistungen und elektrischen Leistungen nach der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Methode ermittelt und miteinander verglichen. Dazu müssen zunächst Toleranzen für die Versorgung der einzelnen Sektoren definiert werden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Für den Stromsektor wurde für die elektrische Leistung eine Toleranz von $\pm 1\%$ gewählt, für den Gas- und Wärmesektor für den Wärme- bzw. Enthalpiestrom ein Toleranzbereich von $\pm 10\%$, da hier aufgrund der höheren Kapazitäten etwas größere Abweichungen als im Stromsektor tolerierbar sind. Die so berechneten Resilienzindizes wurden entsprechend Abschnitt 3.3.3 gewichtet. Dafür wurde der Energiebedarf für jeden Verbraucher während des Simulationszeitraums (30.01.-09.02.2012) und dessen Anteil am Gesamtenergiebedarf ermittelt. Die daraus resultierenden Gewichtungsfaktoren sind in Abbildung 50 dargestellt. Im Stromsektor ist der Energiebedarf der industriellen Verbraucher im Nordwesten am höchsten, während der größte Anteil der Wärme und des Gases von den Haushalten im Nordosten bezogen wird.

Die für die zuvor vorgestellten Szenarien ermittelten Verbraucher- und Sektorenindizes sind in Tabelle 15 aufgelistet. Im Folgenden sollen zunächst die Sektorenindizes diskutiert werden. Danach werden für jedes Szenario weitere Details der einzelnen Verbraucher besprochen. Im Anschluss werden die gewonnen Erkenntnisse genutzt, um eine Einordnung der Bewertungsmethode vorzunehmen.

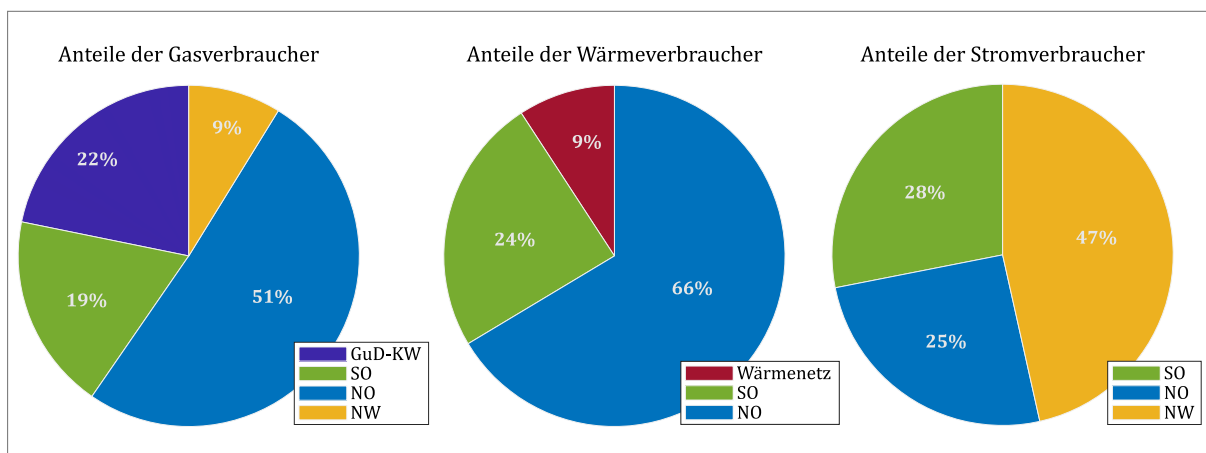


Abbildung 50: Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch im entsprechenden Sektor

Tabelle 15: Resilienzindizes der Verbraucher und Sektoren

	NW	NO	SO	GuD/ Wärme- netz	GuD2/ Wärme- pumpe	Total
<i>Referenz</i>						
Gas	1,000	1,000	0,163	0,373		0,708
Wärme		1,000	0,164	0,366		0,738
Strom	0,999	1,000	1,000			0,999
<i>Speicher</i>						
Gas	1,000	1,000	0,138	0,373		0,703
Wärme		1,000	0,619	0,367		0,849
Strom	0,999	1,000	1,000			0,999
<i>Dispersion</i>						
Gas	1,000	1,000	0,172	0,499	0,977	0,789
Wärme		1,000	0,175	0,999		0,799
Strom	1,000	1,000	1,000			1,000
<i>Diversität</i>						
Gas	1,000	1,000	0,411	0,373		0,754
Wärme		1,000	0,955	0,368		0,931
Strom	0,953	0,979	1,000		1,000	0,978

4.4.1 Auswertung der Sektorenindizes

Zur besseren Visualisierung werden die Resilienzindizes der Sektoren für die einzelnen Szenarien in Abbildung 51 miteinander verglichen. Es fällt auf, dass die Sektorenindizes sehr hoch ausfallen. Dies liegt zum einen daran, dass die durch die Störungen beeinträchtigten Gas- und Wärmeverbraucher einen geringen Anteil des Gesamtverbrauches (31 bzw. 33 %) ausmachen. Zum anderen lassen sich die sehr hohen Resilienzindizes für den

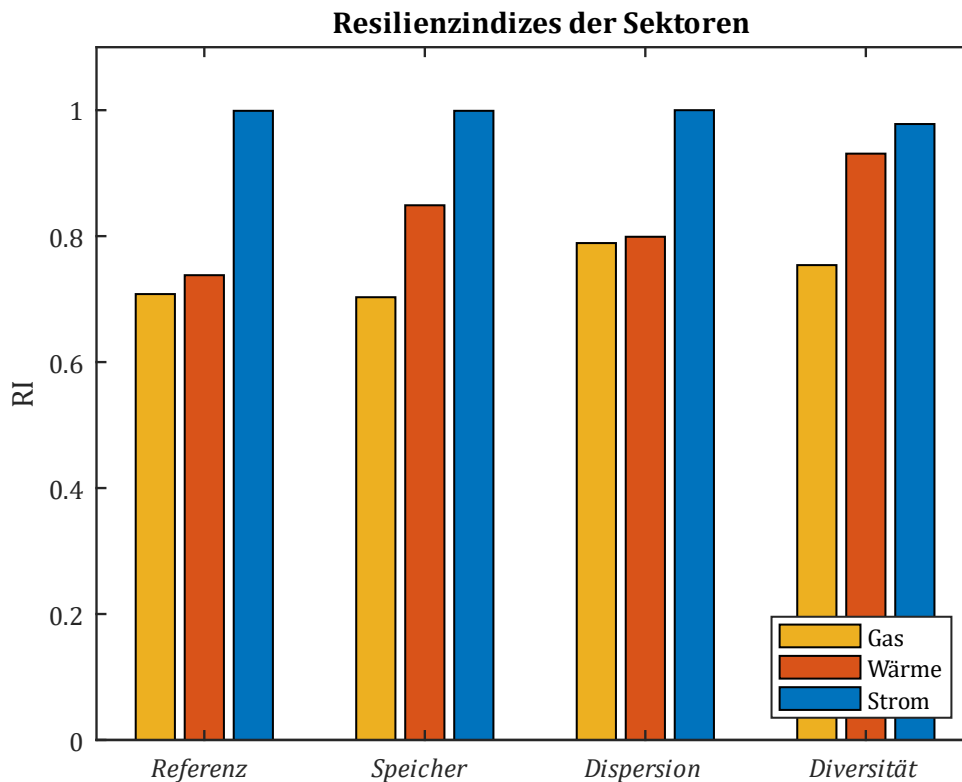


Abbildung 51: Vergleich der Szenarien anhand der Sektorenresilienzindizes

Stromsektor auf die im Vergleich zum Wärme- und Gassektor höhere Anzahl an Energieerzeugern zurückführen.

Generell überwiegen die positiven Auswirkungen der implementierten Systemänderungen in den Szenarien *Speicher*, *Dispersion* und *Diversität*, wobei diese interessanterweise nicht in allen Sektoren zu einer Erhöhung aller Resilienzindizes führen. Im Szenario *Speicher* belastet das Wiederaufladen der Pufferspeicher das Gasnetz zusätzlich, weshalb hier der Resilienzindex für den Gassektor etwas geringer ausfällt als im Referenzszenario. Im Szenario *Diversität* wiederum tritt durch die zusätzliche Belastung eines weiteren Stromverbrauchers eine Reduzierung des Stromsektorindex auf. Es wird daher deutlich, dass die intersektoralen Konsequenzen der jeweiligen Maßnahmen in die entsprechenden Planungen einbezogen werden müssen.

Da in den Szenarien *Diversität* und *Speicher* für den Großteil der betroffenen Haushalte eine Überbrückung der Wärmezufuhr während der Störung ermöglicht wird, stellen sich hier die höchsten Wärmeindizes ein. Für das Szenario *Dispersion* wird der Resilienzindex des Stromsektors maximal, weil hier der Strombedarf durch den zusätzlich implementierten, nicht von der Störung betroffenen Stromerzeuger gedeckt werden kann. Für den

Gassektor wird im Szenario *Dispersion* der höchste Sektorresilienzindex erreicht. Grund dafür ist die geografische Umverteilung der Gasentnahme und die daraus resultierende Verringerung des zu deckenden Gasbedarfs im Südosten.

Im Referenzszenario und im Szenario *Dispersion* wird der südöstliche Wärmeverbraucher direkt durch die Verbrennung von Gas mit Wärme versorgt, daher verhalten sich die Resilienzindizes dieser Szenarien für den Gas- und Wärmesektor ähnlich. Im Szenario *Diversität* ermöglicht dagegen eine alternative Wärmeversorgung und im Szenario *Speicher* die im Heizsystem gespeicherte Wärme die teilweise Deckung des Wärmebedarfs. Dadurch findet eine Entkoppelung der Wärmeversorgung des südöstlichen Verbrauchers von dessen Gasversorgung statt, die auch in den Resilienzindizes dieser Sektoren zu sehen ist. Auf diesen Effekt wird im folgenden Abschnitt detaillierter eingegangen.

4.4.2 Resilienzbewertung der Szenarien

Im Folgenden werden die Resilienzindizes der einzelnen Szenarien betrachtet und mit den Systemantworten aus Kapitel 4.1.2 und 4.3 verglichen. Dabei wird auf die Verbraucher, deren Kurvenverlauf nicht von der Störung beeinflusst wurde und deren Resilienzindex daher eins ist, nicht gesondert eingegangen.

Referenzszenario

In den südöstlichen Haushalten wird die gesamte nach der Verbrennung des Gases bereitstehende Wärme ohne Zwischenspeicherung direkt dem Wohnraum als Wärme zur Verfügung gestellt. Für diesen Verbraucher stimmen daher Gas- und Wärmeindex beinahe überein (0,163 und 0,164), kleinere Abweichungen ergeben sich nur aufgrund der Wärmekapazität des sich im Kreislauf befindlichen Heizwassers. Beim GuD-Kraftwerk ist dagegen der Pufferspeicher zwischen Erzeuger und Verbraucher geschaltet und kann zumindest für kurze Zeit die Wärmeversorgung des Wärmenetzes nach dem Abschalten des GuD-Kraftwerks übernehmen. Dementsprechend ergibt sich hier ein deutlich höherer Index für die ans Wärmenetz angeschlossenen Verbraucher (0,366) als im Südosten (0,163). Mit 0,373 zu 0,366 ist hier das Verhältnis zwischen Gas- und Wärmeindex zudem höher als im Südosten (Tab. 15). Dies ist zum einen durch den bereits erwähnten Einfluss des Pufferspeichers zu begründen. Zum anderen findet nach der Störung eine Verschiebung des Betriebsbereiches des GuD-Kraftwerkes im P-Q-Diagramm statt (vgl. Abb. 38). Dadurch kann die Wärmeabgabe bei gleichbleibender Stromproduktion erhöht werden, wodurch der Gasbedarf des GuD-Kraftwerks im Vergleich zum ungestörten Fall gleichbleibt. Aufgrund dessen wird hier nur kurz nach der Störung, während des nächtlichen Herabsenkens der Kraftwerksleistung, mehr Gas benötigt und somit das Toleranzband

verlassen. Die Variabilität des Betriebsbereiches bewirkt dabei eine erhöhte Adaptivität des GuD-Kraftwerks und verbessert somit die Erholungsfähigkeit des Systems.

Im Stromsektor ist der gewerbliche Verbraucher im Nordwesten aufgrund seiner höheren Frequenzabhängigkeit am stärksten beeinträchtigt. Allerdings treten hier nur kurze und geringe Abweichungen innerhalb des Störungszeitraums auf, weshalb der Resilienzindex dieses Verbrauchers einen hohen Wert von 0,999 erreicht. Die an die anderen beiden Verbrauchern übertragenen Leistungen weisen keine Abweichungen außerhalb des Toleranzbandes auf, weshalb deren Resilienzindizes den Maximalwert von 1 aufweisen (Tab. 15).

Speicherszenario

Im Südosten führt die Implementierung des Wärmespeichers und dessen zusätzlicher Wassermasse zu einer höheren thermischen Trägheit im System, wodurch es zu einer stärkeren Entkopplung zwischen Erzeugung und Verbrauch und somit zwischen Gas- und Wärmeindex kommt. Während der Resilienzindex im Wärmesektor im Vergleich zum Referenzszenario auf 0,619 steigt, sinkt dieser im Gassektor auf 0,138. Der verringerte Index im Gassektor ist auf einen erhöhten Energie- und somit erhöhten Gasbedarf zum Aufheizen der zusätzlichen Wassermenge nach der Störung zurückzuführen. Auf die Indizes des GuD-Kraftwerks bzw. Wärmenetzes hat die Implementierung des Speichers keine Auswirkung. Diese weisen infolgedessen dieselben Werte wie im Referenzsystem auf (Tab. 15). Auch der Index des Verbrauchers im Nordosten wird durch die installierten Wärmespeicher nicht beeinflusst. Da die Implementierungen der Wärmespeicher keinen Einfluss auf den Stromsektor haben, ergeben sich auch hier dieselben Werte wie im Referenzszenario.

Dispersionsszenario

Durch die Dispersion der Kraftwerksleistung und das Ausnutzen der Pufferspeicher im Fernwärmenetz kann der Wärmebedarf der daran angeschlossenen Verbraucher nahezu durchgängig gedeckt werden. Dementsprechend wird für diese Wärmeverbraucher ein Resilienzindex von 0,999 erreicht (Tab. 15). Die damit ausbleibende Abkühlung der Gebäude führt dazu, dass das südöstliche GuD-Kraftwerk nach Störungsende nur für das Aufladen des Pufferspeichers zusätzliche Wärme bereitstellen muss. Dementsprechend verringert sich dessen Erholzeit und ist nur noch etwas größer als die Störungszeit. Da auch in diesem Szenario die Gasversorgung während der gesamten Störungszeit zusammenbricht, nähert sich der Gasindex des südöstlichen GuD-Kraftwerks dem Wert 0,5 (vgl. Abschnitt 3.4.2). Die Gasversorgung des südwestlichen Gaskraftwerkes ist zwar nicht von der Schließung der Gaspipeline betroffen. Allerdings wird hier während und nach der Störung zusätzlich Wärme ausgekoppelt, weshalb sich ein Wert von 0,977 als Resilienzindex für dieses Kraftwerk einstellt.

Auch die Verbraucher im Südosten profitieren von der Aufteilung der Kraftwerke. Am Abnahmepunkt im Südosten wird weniger Gas entnommen, wodurch der Druck hier etwas langsamer sinkt, woraufhin sich die Abschaltung der Gaskessel verzögert. Aufgrund dieser Verzögerung steigt der Resilienzindex sowohl für den Gas- und den Wärmesektor im Vergleich zum Referenzszenario um jeweils 0,009 bzw. 0,011 (Tab. 15).

Nicht zuletzt führt die Implementierung des zweiten GuD-Kraftwerkes, das aufgrund seiner geografischen Lage auch während der Störung unterbrechungsfrei betrieben werden kann, zu einem zusätzlichen nicht von der Störung betroffenen Stromproduzenten im Netz. Dadurch kann die benötigte Stromversorgung zu jeder Zeit gewährleistet werden und die Indizes aller Stromverbraucher erreichen den Maximalwert 1.

Diversitätsszenario

In diesem Szenario kann die Wärmeversorgung im Südosten nahezu vollständig über die Wärmepumpe gedeckt werden, wodurch sich für diesen Wärmeverbraucher ein Resilienzindex von 0,955 ergibt. Die Wärmepumpe hat dabei nicht nur einen positiven Effekt auf den Wärmesektor. Da die Gebäude nicht so stark abkühlen, wird nach der Störung weniger zusätzliches Gas zum Aufheizen benötigt, wodurch der Gasindex für diese Region nahe 0,5 liegt (vgl. Abschnitt 3.4.2).

Wie im Szenario *Speicher* wird auch hier das GuD-Kraftwerk und somit auch das Wärmenetz und deren Resilienzindizes durch den Betrieb der Wärmepumpen in den südöstlichen Haushalten nicht beeinflusst, wodurch ihre Resilienzindizes mit denen des Referenzszenarios und des Szenarios *Speicher* übereinstimmen. Allerdings belasten die Wärmepumpen als zusätzliche Stromverbraucher das elektrische Netz. Aufgrund ihrer priorisierten Versorgung erreichen diese zwar den Maximalwert von 1, die Resilienzindizes der gewerblichen und landwirtschaftlichen Stromverbraucher sinken jedoch und fallen im Vergleich zu den anderen Szenarien mit 0,953 und 0,979 am niedrigsten aus (Tab. 15). Allerdings bleibt festzuhalten, dass der Resilienzindex des Wärmesektors stärker steigt als der Index im Stromsektor sinkt. Dieser Umstand ist auf die Nutzung der Umgebungsenergie durch die Wärmepumpe und die verkürzte Aufheizphase zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.5 Diskussion der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass sich das physikalische Antwortverhalten der einzelnen Systeme und Subsysteme im Wert des Resilienzindex widerspiegelt. Sowohl starke Veränderungen in der Systemantwort, wie durch das Einbringen der Wärmepumpen im Szenario *Diversität*, als auch kleine Effekte, wie das verzögerte Abschalten der Gasverbraucher im Szenario *Dispersion*, konnten am jeweiligen Resilienzindex des Verbrauchers abgelesen werden.

Durch den Resilienzindex sind die Auswirkungen der untersuchten Systemänderungen auf die Resilienz des Systems quantifizierbar. Dies bedeutet zum einen, dass die Resilienz der Subsysteme untereinander verglichen werden kann. Dies kann zum Beispiel im Szenario *Diversität* durch den Vergleich der verringerten Resilienz im Stromsektor mit der erhöhten Resilienz der Wärmeverbraucher im Südosten getan werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch den fachgebietsübergreifenden Ansatz der Modelliersprache Modelica (vgl. Abschnitt 3.1) nicht nur intrasektorale, sondern auch intersektorale Konsequenzen darstellbar und somit bewertbar sind. Zum anderen können die erzielten Resilienzindizes nun mit Kenngrößen aus anderen Bewertungskriterien verglichen werden. Somit lässt sich zum Beispiel, wie im Szenario *Speicher* geschehen, ein Preis für die Resilienzsteigerung festlegen oder damit einhergehende Änderungen in den CO₂-Emissionen bewerten. Analog dazu kann der Resilienzindex genutzt werden, um Betriebsweisen und Systemarchitekturen hinsichtlich ihrer Resilienz miteinander zu vergleichen. Dabei wird deutlich, dass Faktoren wie Kosten, Systemaufbau und Intersektoralität, aber auch die betrachteten Resilienzverbesserungsmaßnahmen, die in Abschnitt 2.1.2 beschriebene Stabilitätslandschaft des betrachteten Energiesystems formen und beeinflussen.

Außerdem wird durch die Quantifizierbarkeit der Resilienz nun ebenfalls eine multikriterielle Auslegungsoptimierung möglich, um zum Beispiel die ideale Komponentengröße in einem System hinsichtlich Resilienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu ermitteln. Dementsprechend lässt sich die vorgestellte Bewertungsmethodik in das in Abschnitt 2.3.4 vorgestellte Resilienzmanagementkonzept zur Resilienzquantifizierung und -bewertung integrieren. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass die betrachteten Systemänderungen nicht nur anhand ihrer Auswirkungen auf die Störantwort, also ihren Resilienzindizes, zu bewerten sind. Zu einem ganzheitlichen Resilienzmanagement gehört auch die Bewertung der damit verbundenen Kosten und sozialen Verträglichkeit. In den vorliegenden Szenarien könnte zum Beispiel die soziale Akzeptanz der Installation von Wärmepumpen bzw. Pufferspeichern in den Haushalten und die damit verbundene Aufteilung der Kosten bewertet werden. Als Fortführung dieser Arbeit muss für eine vollstän-

dige Betrachtung der Resilienz die hier vorgestellte Methodik für weitere Störfälle durchgeführt werden. Nur so können weitere Schwachstellen im System identifiziert und diesen entgegengewirkt werden. Dadurch wird das System nicht nur resilienter gegenüber erwartbaren Störungen, sondern auch gegenüber den in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten *black swans*.

Die Ergebnisse des Anwendungsbeispiels zeigen jedoch auch die Grenzen des Resilienzindex auf. So deckt die hergeleitete Methode ein sehr großes Spektrum möglicher Systemantworten ab – vom totalen Zusammenbruch der Energieversorgung bis zur kompletten Deckung des Energiebedarfs durch alternative Energiequellen. Infolgedessen ergeben sich für das betrachtete System sehr hohe Resilienzindizes im Stromsektor, da hier die Versorgung nicht nur von einer Anlage abhängt und entsprechende Redundanzen vorliegen. Die basierend auf den übertragenen elektrischen Leistungen errechneten Indizes geben zwar Auskunft über die Fähigkeit des Systems, die von ihm abhängigen Verbraucher mit der benötigten elektrischen Energie zu versorgen, allerdings werden hierbei Belastungen, die im elektrischen Netz auch durch z.B. Spannungs- und Frequenzschwankungen sichtbar werden, nicht inkludiert. Im Regelfall werden bei solchen Erscheinungen den Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber entsprechend bereits Maßnahmen wie die Aktivierung von Leistungsreserven ergriffen, um das Netz zu schützen und einem Leistungsausfall am Verbraucher vorzubeugen (Berndt et al. 2007). Im Resilienzindex wird dieser hohe Aufwand zur Versorgung der Verbraucher nicht sichtbar. Es bietet sich daher an, die Resilienzbewertung im elektrischen Netz durch eine Betrachtung der Frequenz- und Spannungsstabilität inklusive des dafür erforderlichen Aufwands zu komplementieren (Bode et al. 2021).

Des Weiteren soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass wie bei jeder simulationsgestützten Bewertungsmethode auch der Resilienzindex in seiner Aussagefähigkeit von dem zugrundeliegenden Modell abhängig ist. Dies impliziert, dass die Ergebnisse nicht beliebig verallgemeinert werden können. Mit Blick auf die hier vorgestellten Ergebnisse könnte zum Beispiel geschlussfolgert werden, dass der Stromsektor stets resilienter reagiert als der Wärme- und Gassektor. Diese Folgerung würde aber das Vorhandensein mehrerer Energiebereitsteller und den hohen Anteil kontinuierlich arbeitender Kraftwerke im betrachteten System nicht berücksichtigen. Die Systemantworten elektrischer Systeme mit höherem Anteil fluktuierender Energieanlagen, geringeren Speichermöglichkeiten oder Redundanzen würden dementsprechend geringere Resilienzindizes erzeugen, weshalb von einer solch pauschalen Bewertung abgesehen werden muss. Beim Vergleich verschiedener Systemarchitekturen muss daher die Basis dieser verschiedenen Systeme gleichbleiben und Randbedingungen und Referenzpunkte dementsprechend genau definiert werden. Dabei ist es hilfreich, darauf zu achten, dass der Endenergiebedarf

im System für alle betrachteten Szenarien derselbe ist. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf den Einfluss der Normierungs- und Toleranzwerte verwiesen, die in den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2 untersucht wurden. Nur bei übereinstimmenden Werten ist eine Vergleichbarkeit der Resilienzindizes gegeben.

Außerdem zeigt sich bei der Betrachtung der Wärmesektorenindizes in den Szenarien *Dispersion* und *Diversität*, dass Maßnahmen, die die Resilienz von großen Verbrauchergruppen beeinflussen, einen stärkeren Einfluss auf den Sektorindex haben. Bei dem vorliegenden Modell ist dies durchaus zulässig, da die betrachteten Wärmeverbraucher allesamt Wohngebiete darstellen. Dagegen sollte in einem System, in dem auch kritische Infrastrukturen wie z.B. ein Krankenhaus vorliegen, eine zusätzliche Priorisierung dieser Verbraucher implementiert werden. Dies ließe sich durch Anpassen der in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten Gewichtungsfaktoren leicht in die Bewertungsmethodik integrieren.

5 Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Methodik zur Bewertung der Resilienz gekoppelter Energiesysteme anhand dynamischer Simulationsergebnisse zu entwickeln. Zu diesem Zweck erfolgte eine Darstellung der aktuellen Resilienzforschung, auf deren Basis die entsprechende Methodik hergeleitet wurde. Abschließend wurde anhand eines beispielhaften gekoppelten Energiesystems die Anwendbarkeit der Methodik demonstriert.

Die in dieser Arbeit erfolgte Einordnung verdeutlicht, dass Resilienz sich als vielschichtiger Begriff darstellt. Je nach Forschungsrichtung werden unterschiedliche Aspekte in den Vordergrund gestellt. Es wurde jedoch gezeigt, dass allen gemein die Betonung der flexiblen und mitunter kreativen Reaktion auf eine Störung und die damit verbundene Aufrechterhaltung der Grundfunktionen des betrachteten Systems ist. Dadurch hebt sich Resilienz auch in der Energiesystemanalyse von Schlagwörtern wie Versorgungssicherheit und Risikomanagement ab. Während sich diese Konzepte auf die Erhaltung des Systems fokussieren, ist das zentrale Element des Resilienzkonzeptes die Erhaltung der Systemfunktion. Aus dieser Vielzahl der Definitionsmöglichkeiten ergibt sich eine ebenso große Auswahl an Bewertungsmethoden. In diesem Kontext wurde demonstriert, dass bei der Analyse eines Energiesystems unterschiedliche Forschungsrichtungen unterschiedliche Schwerpunkte setzen und die Frage „resilience of *what* to *what*?“ am Anfang jeder Analyse zu beantworten ist. Ziel muss es daher sein, diese Pluralität gewinnbringend zu nutzen und in einem ganzheitlichen Resilienzmanagementkonzept zu vereinen - anstatt nach einer allumfassenden Definition oder Methodik zu suchen. Nur so können resiliente Systeme innerhalb der technischen Möglichkeiten sozial verträglich, wirtschaftlich und nachhaltig realisiert und betrieben werden.

Um die technische Realisierbarkeit und die technischen Folgen von Resilienzverbesserungen in einem gekoppelten Energiesystem abzubilden und zu bewerten, bietet sich Modella als geeignetes Werkzeug der Systemsimulation an, da diese Programmiersprache die gekoppelte dynamische Simulation unterschiedlicher Sektoren ermöglicht. Als geeignete charakteristische Größen für das Verhalten und somit die Resilienz der einzelnen Sektoren konnten die Energieflüsse zu den Verbrauchern identifiziert werden. Diese machen die Hauptdienstleistung eines Energiesystems, nämlich die ausreichende Energieversorgung zu jedem Zeitpunkt, sichtbar. In dieser Arbeit erfolgte eine detaillierte Herleitung des Resilienzindex zur Bewertung gekoppelter Energiesysteme. Dabei wurden die dafür verwendeten Elemente (*Maximale Abweichung*, *Erholzeit* und *Performanzverlust*) und die verwendeten Normierungs- und Toleranzgrößen hergeleitet sowie deren Einfluss auf den

Resilienzindex untersucht. Darauf basierend wird eine Empfehlung zur Auswahl der entsprechenden Werte gegeben, sodass eine Vergleichbarkeit von Systemen mit unterschiedlichen Systemarchitekturen gewährleistet werden kann.

Anhand eines gekoppelten Energiesystems (bestehend aus Gas-, Wärme- und Stromsektor) wurde demonstriert, dass der Resilienzindex das physikalische Antwortverhalten des betrachteten Systems widerspiegelt und dabei auch sensitiv gegenüber geringen Unterschieden im Antwortverhalten ist. Somit werden die Auswirkungen von Störungen und die Systemantworten darauf quantifizierbar und dadurch aussagekräftig vergleichbar. Es konnte gezeigt werden, dass der Resilienzindex in Verbindung mit anderen quantitativen Kriterien, wie z.B. Kosten, genutzt werden kann, um eine multikriterielle Bewertung des Energiesystems zu realisieren. Des Weiteren wurde veranschaulicht, dass nicht nur intra-sektorale, sondern auch intersektorale Konsequenzen durch den Resilienzindex abbildbar und somit vergleichbar gemacht werden. Der durch eine Systemänderung realisierte Resilienzgewinn in einem Sektor kann somit direkt mit einem eventuellen Resilienzverlust in einem anderen Sektor verglichen werden. Der Resilienzindex eignet sich dementsprechend sehr gut zur Bewertung verschiedener Systemarchitekturen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Resilienz des Gesamtsystems.

Bei der Überprüfung der Anwendbarkeit der entwickelten Bewertungsmethodik wurden auch die Grenzen des Resilienzindex sichtbar. So spiegelt dieser allein die Aufrechterhaltung der Dienstleistung wider, egal wie widrig die Begleitumstände sind. Deutlich wird dies vor allem bei der Betrachtung des elektrischen Systems. Dies ist zwar unter den simulierten Umständen fähig, weiterhin seine Verbraucher zu versorgen. In den Simulationen wurde allerdings auch deutlich, dass dabei starke Belastungen des Netzes auftreten. Diese werden im Resilienzindex nicht sichtbar, weshalb hierfür eine entsprechende Stabilitätsanalyse der Netzfrequenz und -spannung notwendig ist. Des Weiteren sollte, wie bei allen modellbasierten Bewertungsmethoden, darauf geachtet werden, nur Resilienzindizes miteinander zu vergleichen, die unter denselben Modellannahmen ermittelt wurden, da sonst keine direkte Vergleichbarkeit gegeben ist. In diesem Kontext ist auch die Notwendigkeit gleicher Normierungs-, Toleranz- und Gewichtungswerte sowie einer gleichbleibenden Verteilung des Endenergiebedarfs zu nennen. Nur so ist die Vergleichbarkeit bei der Betrachtung unterschiedlicher Systemarchitekturen gewährleistet.

Trotz des generischen Charakters des betrachteten Systems können aus den ermittelten Resilienzindizes einige allgemeine Erkenntnisse abgeleitet werden. So zeigen die sehr hohen Resilienzindizes im Stromsektor, dass das Vorhandensein mehrerer Produzenten (Dezentralisierung) sich positiv auf die Resilienz des Systems auswirkt. Dies wird auch beim Vergleich von zentral und dezentral versorgten Wärmenetzen im Szenario *Dispersion* deutlich. In diesem Zusammenhang sei auf das Forschungsfeld der LowEx-Wärmenetze

verwiesen, die die dezentrale Wärmeeinspeisung von Abwärme und regenerativen Energien ermöglichen (Robbi 2013). Diese Dezentralisierung der Wärmezeugung führt nicht nur zu verminderten CO₂-Emissionen, sondern durch die Vielzahl an Erzeugern auch zu einer erhöhten Resilienz. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Kopplung der Sektoren zwar das Risiko einer intersektoralen Fehlerfortpflanzung birgt, jedoch auch die Chance, Störungsauswirkungen in einem Sektor mit Hilfe anderer Sektoren auszugleichen. Für Wohngebiete ist es daher förderlich, die Kopplung der Sektoren bereits auf Haushaltsebene zu erleichtern. Für eine solche Entwicklung bieten sich sogenannte EnergyHubs an, die den Anschluss der Haushalte an alle drei Sektoren und eine flexible und somit resiliente Energieversorgung ermöglichen (Geidl et al. 2007).

Abschließend lässt sich festhalten, dass der hier entwickelte Resilienzindex zur Bewertung gekoppelter Energiesysteme hinsichtlich ihrer technologischen Aspekte dient. Dementsprechend kann er in Verbindung mit entsprechenden Bewertungsmethoden aus Soziologie, Wirtschaft und Politik genutzt werden, um die Vielschichtigkeit der Resilienz abzubilden und zu bewerten. Ein solches interdisziplinäres Resilienzmanagementkonzept stellt ein geeignetes Werkzeug zur Erfassung der Komplexität und Dynamik aktueller und zukünftiger Energieversorgungssysteme dar und kann dabei helfen, aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen zu begegnen und dabei weder die Effizienz, Nachhaltigkeit oder Resilienz der Energiesysteme zu gefährden.

6 LITERATURVERZEICHNIS

Agora Energiewende (2019): European Energy Transition 2030: The Big Picture. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/european-energy-transition-2030-the-big-picture/>. Unter Mitarbeit von Matthias Buck, Andreas Graf und Patrick Graichen. Berlin (153/01-I-2019/EN), zuletzt geprüft am 04.01.2022.

Alexander, D. E. (2013): Resilience and Disaster Risk Reduction: an Etymological Journey. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (11), S. 2707–2716, DOI: 10.5194/nhess-13-2707-2013.

Andresen, Lisa; Dubucq, Pascal; Peniche Garcia, Ricardo; Ackermann, Günter; Kather, Alfons; Schmitz, Gerhard (2017): Transientes Verhalten gekoppelter Energienetze mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien, Abschlussbericht des Verbundvorhabens. Laufzeit des Verbundvorhabens: 01.05.2013 bis 30.04.2017. Hamburg, DOI: 10.2314/GBV:1002659345.

Bacon, Francis; Rawley, William (2019): *Sylva Sylvarum. A Natural History, in Ten Centuries*. Nachdruck der Ausgabe von 1670. Norderstedt: Hansebooks GmbH.

Baggio, Jacopo A.; Brown, Katrina; Hellebrandt, Denis (2015): Boundary Object or Bridging Concept? A Citation Network Analysis of Resilience. In: *Ecology and Society* 20 (2), DOI: 10.5751/ES-07484-200202.

Berndt, Holger; Hermann, Mike; Kreye, Horst D.; Reinisch, Rüdiger; Scherer, Ulrich; Vanzetta, Joachim (2007): TransmissionCode 2007 - Netz und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Verband der Netzbetreiber VDN e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.vde.com/resource/blob/937758/14f1b92ea821e9e19ee13fc798c1ee0e/transmissioncode-2007--netz--und-systemregeln-der-deutschen-uebertragungsnetzbetreiber-data.pdf>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.

Bode, Carsten (2021): Simulation of Integrated Energy Systems with a Focus on Gas Grids and Heating Technologies. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg. Institut für Technische Thermodynamik.

Bode, Carsten; Heckel, Jan-Peter; Schülting, Oliver; Senkel, Anne; Becker, Christian; Kather, Alfons; Schmitz, Gerhard (2021): Resilienz gekoppelter Energienetze mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien. Abschlussbericht des Verbundvorhabens. Technische Universität Hamburg. Hamburg.

- Brand, Urte (2016): Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesysteme. Dissertation. Universität Bremen, Bremen. Institut für Produktionstechnik.
- Brand, Urte; Giese, Bernd; Gleich, Arnim von; Heinbach, Katharina; Petschow, Ulrich; Schnülle, Christian et al. (2017): RESYSTRA Schlussbericht. Auf dem Weg zu Resilienten Energiesystemen! Resiliente Gestaltung der Energiesysteme am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“. Universität Bremen; Institut für Ökologische Wirtschaftsförderung. Bremen. Online verfügbar unter <http://www.resystra.de/>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.
- Bros, Thierry (2018): Reflection on the Baumgarten Gas Explosion. Markets are Working. The Oxford Institute for Energy Studies. Oxford. Online verfügbar unter <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/01/Reflection-on-the-Baumgarten-Gas-Explosion-Comment.pdf>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.
- Bruneau, Michel; Chang, Stephanie E.; Eguchi, Ronald T.; Lee, George C.; O'Rourke, Thomas D.; Reinhorn, Andrei M. et al. (2003): A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In: *Earthquake Spectra* 19 (4), S. 733–752, DOI: 10.1193/1.1623497.
- Carpenter, Steve; Walker, Brian; Anderies, J. Marty; Abel, Nick (2001): From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? In: *Ecosystems* 4 (8), S. 765–781, DOI: 10.1007/s10021-001-0045-9.
- Cerbe, Günter; Lendt, Benno (Hg.) (2017): Grundlagen der Gastechnik. Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung. Unter Mitarbeit von Klaus Brüggemann, Martin Dehli und Frank Gröschl. 8., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser.
- Clark-Ginsberg, Aaron (2016): What's the Difference between Reliability and Resilience? Stanford University. Stanford, USA.
- Dhar, P. L. (2017): Thermal System Design and Simulation. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo: Academic Press, DOI: 10.1016/B978-0-12-809449-5.00005-X.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (2019): Continental Europe Significant Frequency Deviations – January 2019. Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/news/2019/190522_SOC_TOP_11.6_Task%20Force%20Significant%20Frequency%20Deviations_External%20Report.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2022.
- Fichter, Klaus; Gleich, Arnim von; Pfriem, Reinhard; Siebenhüner, Bernd (2010): Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien. Hg. v. Projektkonsortium

„nordwest2050“. Bremen. Online verfügbar unter <https://uol.de/innovation/forschung/abgeschlossene-forschungsprojekte/nordwest2050/klimaanpassung-theoretische-grundlagen>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.

Fisher, R. E.; Bassett, G. W.; Buehring, W. A.; Collins, M. J.; Dickinson, D. C.; Eaton, L. K. et al. (2010): Constructing a Resilience Index for the Enhanced Critical Infrastructure Protection Program. Argonne National Laboratory, Argonne, IL. Decision and Information Sciences. Argonne, Illinois, DOI: 10.2172/991101.

Garmezy, Norman (1971): Vulnerability Research and the Issue of Primary Prevention. In: *American Journal of Orthopsychiatry* 41 (1), S. 101–116, DOI: 10.1111/j.1939-0025.1971.tb01111.x.

Gas Connect Austria GmbH (Hg.) (2017): Vorfall Baumgarten - Chronologie. Online verfügbar unter <https://www.gasconnect.at/vorfall-baumgarten/chronologie>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.

Gasser, Patrick; Lustenberger, Peter; Cinelli, Marco; Kim, Wansub; Spada, Matteo; Burgherr, Peter et al. (2019): A Review on Resilience Assessment of Energy Systems. In: *Sustainable and Resilient Infrastructure*, S. 1–27, DOI: 10.1080/23789689.2019.1610600.

Geidl, Martin; Koepfel, Gaudenz; Favre-Perrod, Patrick; Klöckl, B.; Andersson, Göran; Fröhlich, Klaus-Jochen (2007): The Energy Hub: A Powerful Concept for Future Energy Systems. In: Proceedings of the Third Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry. Pittsburgh, 13.-14.03.2007. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Energy-Hub%3A-A-Powerful-Concept-for-Future-Geidl-Koepfel/3cee9d3447acd0d27bce0489c2f2f0b0fe48a61#citing-papers>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.

Gheorghe, Adrian V.; Vamanu, Dan V.; Katina, Polinapilinho F.; Pulfer, Roland (2018): Critical Infrastructures, Key Resources, Key Assets. Cham, Schweiz: Springer International Publishing (34), DOI: 10.1007/978-3-319-69224-1.

Google (Hg.) (2022): Google Trends for "efficiency", "sustainability" and "resilience". Online verfügbar unter <https://trends.google.de/trends/explore?date=all&q=efficiency,sustainability,resilience>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Gößling-Reisemann, Stefan; Stürmann, Sönke; Wachsmuth, Jakob; Gleich, Arnim von; Blöthe, Thomas (2015): Klimaanpassung und Resilienz in der Energiewirtschaft. In: Joachim Lohse: Regionale Klimaanpassung im Küstenraum. Hg. v. Arnim von Gleich und Bernd Siebenhüner. Marburg: Metropolis-Verlag (Ökologie und Wirtschaftsforschung, Band 95), S. 187–211.

Gunderson, Lance H.; Holling, Crawford S. (Hg.) (2002): *Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington, DC: Island Press.

Häfele, Wolf (1975): *Objective Functions*. IIASA Working Paper. Hg. v. International Institute for Applied System Analysis. Laxenburg, Österreich (WP-75-025). Online verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/33891875.pdf>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Häring, Ivo; Sansavini, Giovanni; Bellini, Emanuele; Martyn, Nick; Kovalenko, Tatyana; Kitsak, Maksim et al. (2017): *Towards a Generic Resilience Management, Quantification and Development Process: General Definitions, Requirements, Methods, Techniques and Measures, and Case Studies*. In: Igor Linkov und José Manuel Palma-Oliveira (Hg.): *Resilience and Risk. Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains*, Bd. 6. Dordrecht: Springer Netherlands (NATO Science for Peace and Security Series), S. 21–80.

Haustechnik GmbH Heizung-Sanitär-Gas (2022): *Vitocell 100-E*. Online verfügbar unter <https://www.allner-haustechnik.de>. Gräfenhainichen, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Heckel, Jan-Peter; Becker, Christian (2019): *Dynamic Simulation of an Integrated Energy System for Northern Germany with Improved Resilience*. In: VDE Verlag (Hg.): *Proceedings of the International ETG Congress 2019*. Esslingen am Neckar, Germany. Online verfügbar unter <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/454954029.html>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Hellige, Hans Dieter (2019a): *The Metaphorical Processes in the History of the Resilience Notion and the Rise of the Ecosystem Resilience Theory*. In: Matthias Ruth und Stefan Gössling-Reisemann (Hg.): *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*. Cheltenham, UK, Northampton, MA: Edward Elgar Publishing, S. 30–51.

Hellige, Hans Dieter (2019b): *The Reception of the Resilience Concept in the Energy Discourse, and Genesis of the Theory of Resilient Energy System Design*. In: Matthias Ruth und Stefan Gössling-Reisemann (Hg.): *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*. Cheltenham, UK, Northampton, MA: Edward Elgar Publishing, S. 296–315.

Holling, C. S.; Gunderson, Lance H. (2002): *Resilience and Adaptive Cycles*. In: Lance H. Gunderson und Crawford S. Holling (Hg.): *Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington, DC: Island Press, S. 25–62.

Holling, Crawford S. (1973): *Resilience and Stability of Ecological Systems*. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1), S. 1–23, DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

Holling, Crawford S. (1996): Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In: Peter Schulze (Hg.): Engineering Within Ecological Constraints. Washington, D.C.: National Academies Press.

Hosseini, Seyedmohsen; Barker, Kash; Ramirez-Marquez, Jose E. (2016): A Review of Definitions and Measures of System Resilience. In: *Reliability Engineering & System Safety* 145, S. 47–61, DOI: 10.1016/j.ress.2015.08.006.

EN 15251, 2007-08: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

Jesse, Bernhard-Johannes; Heinrichs, Heidi Ursula; Kuckshinrichs, Wilhelm (2019): Adapting the Theory of Resilience to Energy Systems: a Review and Outlook. In: *Energy, Sustainability and Society* 9 (1), S. 1, DOI: 10.1186/s13705-019-0210-7.

Koslowski, Thomas G.; Longstaff, Patricia H. (2015): Resilience Undefined: A Framework for Interdisciplinary Communication and Application to Real-World Problems. In: Anthony Masys (Hg.): Disaster Management: Enabling Resilience. Cham, Schweiz: Springer International Publishing (Lecture Notes in Social Networks), S. 3–20.

Lange, Ingo (2014): Außentemperaturen, Hamburg Billwerder, 900s, 2012. Online verfügbar unter <https://wettermast.uni-hamburg.de/>. Universität Hamburg, Meteorologisches Institut, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Lin, Yanling; Bie, Zhaohong (2016): Study on the Resilience of the Integrated Energy System. In: *Energy Procedia* 103, S. 171–176, DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.268.

Linkov, Igor; Palma-Oliveira, José Manuel (Hg.) (2017): Resilience and Risk. Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains. NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructure Safeguarding. Dordrecht: Springer Netherlands (NATO Science for Peace and Security Series).

Lovins, Amory B.; Lovins, L. Hunter (1982): Brittle Power. Energy Strategy for National Security. Andover, Mass.: Brick House Pub. Co.

Madni, A. M.; Jackson, S. (2009): Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. In: *IEEE Systems Journal* 3 (2), S. 181–191, DOI: 10.1109/JSYST.2009.2017397.

Martin-Breen, Patrick; Anderies, J. Marty (2011): Resilience: A Literature Review: IDS. Online verfügbar unter <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/20.500.12413/3692>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

- McLellan, Benjamin; Zhang, Qi; Farzaneh, Hooman; Utama, N. Agya; Ishihara, Keiichi N. (2012): Resilience, Sustainability and Risk Management. A Focus on Energy. In: *Challenges* 3 (2), S. 153–182, DOI: 10.3390/challe3020153.
- Meier, Hermann; Fünfgeld, Christian; Adam, Thomas; Schieferdecker, Bernd (1999): Repräsentative VDEW-Lastprofile. Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Frankfurt (Main) (VDEW Materialien, M-32/99).
- Modelica Association (2021): Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling. Language Specification Version 3.5. Tech. rep. Linköping: Modelica Association. Linköping, Sweden. Online verfügbar unter <https://modelica.org/documents/MLS.pdf>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Nan, Cen; Sansavini, Giovanni (2017): A Quantitative Method for Assessing Resilience of Interdependent Infrastructures. In: *Reliability Engineering & System Safety* 157, S. 35–53, DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.013.
- Petersen, L.; Lange, D.; Theocharidou, M. (2020): Who Cares What It Means? Practical Reasons for Using the Word Resilience with Critical Infrastructure Operators. In: *Reliability Engineering & System Safety* 199, S. 106872, DOI: 10.1016/j.ress.2020.106872.
- Praktiknjo, Aaron (2013): Versorgungssicherheit im Kontext von Klimaschutz und Kernenergieausstieg. In: Aaron Praktiknjo (Hg.): Sicherheit der Elektrizitätsversorgung. Das Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Wiesbaden: Springer, S. 119–128.
- Price, W. W.; Chiang, H. D.; Clark, H. K.; Concordia, C.; Lee, D. C.; Hsu, J. C. et al. (1993): Load Representation for Dynamic Performance Analysis (of Power Systems). In: *IEEE Transactions on Power Systems* 8 (2), S. 472–482, DOI: 10.1109/59.260837.
- Rat der Europäischen Union (23.12.2008): Richtlinie 2008/114/EG des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern. 2008/114/EG Artikel 2a. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0114&from=DE>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Renn, Ortwin (Hg.) (2017): Das Energiesystem resilient gestalten. Szenarien - Handlungsspielräume - Zielkonflikte. München, Halle (Saale), Mainz: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V; Union der Deutschen Akademie der Wissenschaften e.V (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).
- ISO 31000:2018, 2009: Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien.

- Robbi, Steffen (2013): LowEx-Fernwärme. Vergleichende Bewertung von Maßnahmen für eine effiziente, multifunktionale Fernwärmeversorgung. Dissertation. TU Dresden, Dresden. Institut für Energietechnik. Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1068154632/34>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Roege, Paul E.; Collier, Zachary A.; Mancillas, James; McDonagh, John A.; Linkov, Igor (2014): Metrics for Energy Resilience. In: *Energy Policy* 72, S. 249–256, DOI: 10.1016/j.enpol.2014.04.012.
- Sadoun, B. (2000): Applied System Simulation: a Review Study. In: *Information Sciences* 124 (1-4), S. 173–192, DOI: 10.1016/S0020-0255(99)00079-1.
- Schweppe, F. C.; Tabors, R. D.; Kirtley, J. L. (1982): Homeostatic Control for Electric Power Usage. In: *IEEE Spectrum* 19 (7), S. 44–48, DOI: 10.1109/MSPEC.1982.6366943.
- Senkel, Anne; Bode, Carsten; Schmitz, Gerhard (2019): Evaluating the Resilience of Energy Supply Systems at the Example of a Single Family Dwelling Heating System. In: Proceedings of the 13th International Modelica Conference. Regensburg, Germany, March, 4–6, 2019. Linköping: Linköping University Electronic Press, S. 655–662.
- Stubbe, M.; Amorouayeche, M. (1995): Long Term Dynamic. Phase II, Final Report. Hg. v. CIGRE. Great Britain. Online verfügbar unter <https://e-cigre.org/publication/102-long-term-dynamics-phase-ii-final-report>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Taleb, Nassim Nicholas (2008): Der schwarze Schwan. Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse. München: Hanser, DOI: 10.3139/9783446419377.
- Technische Universität Hamburg (2021): TransiEnt Library. Online verfügbar unter <https://www.tuhh.de/transient-ee/>. Hamburg, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Thoma, Klaus (2014): acatech STUDIE Resilien-Tech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. Hg. v. acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2014. Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_RT_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- Tirtashi, M. Reza Safari; Samuelsson, Olof; Svensson, Jorgen (2014): Long-Term Voltage Collapse Analysis on a Reduced Order Nordic System Model. In: Universitatea Tehnică (Hg.): Proceedings of the 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Cluj-Napoca, Romania, 2 - 5 Sept. 2014. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6.
- TLK-Thermo et al. (2020): TILMedia. Online verfügbar unter <https://www.tlk-thermo.com/index.php/en/software/tilmedia-suite>. Braunschweig, zuletzt geprüft am 10.01.2022.

Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society (2012): IEEE guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

van der Heijde, B.; Fuchs, M.; Ribas Tugores, C.; Schweiger, G.; Sartor, K.; Basciotti, D. et al. (2017): Dynamic Equation-Based Thermo-Hydraulic Pipe Model for District Heating and Cooling Systems. In: *Energy Conversion and Management* 151, S. 158–169, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.072.

Viessmann Climate Solutions SE (2022a): Heizwasser-Pufferspeicher | Viessmann. Online verfügbar unter <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/warmwasserbereiter/heizwasser-pufferspeicher.html>. Allendorf (Eder), zuletzt geprüft am 10.01.2022.

Viessmann Climate Solutions SE (2022b): Hybrid-Lösungen. Technologie-Broschüre. Online verfügbar unter <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/hybridheizung.html>. Allendorf (Eder), zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Viessmann Climate Solutions SE (2022c): Vitocaldens 222-F Gas-Hybrid-Kompaktgerät | Viessmann. Online verfügbar unter <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/hybridheizung/gas-hybridgeraete/vitocaldens-222-f.html>. Allendorf (Eder), zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Walker, Brian; Holling, C. S.; Carpenter, Stephen R.; Kinzig, Ann (2004): Resilience, Adaptability and Transformability in Social– Ecological Systems. In: *Ecology and Society* 9 (2). Online verfügbar unter <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>, zuletzt geprüft am 10.01.2022.

Web of Science (Hg.) (2021): Analyze Search Results for "resilience". Online verfügbar unter <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/2056114b-2241-4607-8bfb-6f1dae29a093-01024455>. Web of Science, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Winzer, Christian (2011): Conceptualizing Energy Security. University of Cambridge, Cambridge. Electricity Policy Research Group.

Wischhusen, Stefan (2005): Dynamische Simulation zur wirtschaftlichen Bewertung von komplexen Energiesystemen. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier.