

Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Resilienz von elektrischen Energiesystemen

**Soziotechnische Betrachtung eines Fallbeispiels:
Resilienz des Energiesystems der Technischen
Universität München am Campus Garching**

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Master of Science
an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München.

Betreut von Dr.-Ing. Philipp Kuhn
Prof. Dr. Thomas Hamacher
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme

Eingereicht von B.Sc. Edwin Sauer
edwin.sauer@tum.de

Eingereicht am 23. September 2019

Kurzfassung

Die Vernetzung innerhalb von und zwischen Gesellschaften der entwickelten Nationen nimmt seit geraumer Zeit auf praktisch allen Ebenen des täglichen Lebens unaufhaltsam zu. Im Zuge dessen sehen sich Staaten, Unternehmen und Bevölkerungen mehr und mehr gezwungen, neben den immensen Chancen auch die potentiellen Risiken dieser Entwicklung einzukalkulieren. Dies fällt umso schwerer, als dass die extreme Durchdringung des Alltags durch neueste Technologien viele Organisationen und Individuen vor teilweise noch gänzlich unbekannte oder unvorhersehbare Herausforderungen stellt, die mit herkömmlichen Vermeidungsstrategien nicht mehr zu bewältigen sind.

Bei den Überlegungen zum richtigen Umgang mit Risiken und Gefahren erfreut sich ein Begriff seit der Jahrtausendwende zunehmender Popularität. Um widrige Ereignisse – ob bekannt oder unbekannt – bestmöglich zu überstehen, wird die Stärkung der „Resilienz“ von Individuen, Organisationen und sonstigen Gesellschaftsstrukturen auf verschiedenen Ebenen als neuartiges Ziel kommuniziert. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang kritischen Infrastrukturen und dabei vor allem einer „resilienten Energieversorgung“ zu.

Obwohl mittlerweile verschiedene, allgemeingültige Standards und politische Positionspapiere zur Etablierung von Resilienz existieren, fallen die Übertragung und Umsetzung im (Arbeits-) Alltag den betroffenen Personen und Organisationen nach wie vor schwer. Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Im Anschluss an allgemeine Einführungen und genauere Begriffsbestimmungen folgt die Entwicklung eines mehrstufigen Konzepts zur Bewertung der Resilienz in elektrischen Energiesystemen auf soziotechnischer Ebene.

Die Resilienz Betrachtung eines Energiesystems eröffnet insbesondere für Unternehmen die Möglichkeit, die eigenen, oftmals essentiellen Energiestrukturen und -einrichtungen in Anbetracht heutiger, oftmals unbekannter Risiken oder Herausforderungen zu analysieren, anzupassen und damit abzusichern. Die Bewertungsmethodik kann – bei angemessenem Aufwand – fundierte, quantitative Ergebnisse aus organisationaler sowie technischer Sicht liefern, mit deren Hilfe (insbesondere ökonomische) systemspezifische Potentiale identifiziert und in zukünftigen Überlegungen zur Betriebsführung und/oder -erweiterung berücksichtigt werden können.

Das eingeführte Konzept wird anschließend anhand des Energiesystems der Technischen Universität München am Campus Garching als Fallbeispiel auf Praxistauglichkeit überprüft. Hier liefert die Bewertungsmethodik sowohl auf organisationaler als auch auf technischer Ebene relevante, nachvollziehbare Erkenntnisse und zeigt konkrete Anknüpfungspunkte auf, um die Resilienz des Energiesystems am Campus Garching ökonomisch sinnvoll zu steigern.

Abstract

In the wake of the ongoing incremental interconnection on every level of daily life within and between societies of the developed countries, nations, companies and people increasingly find themselves forced to take into account not only the immense chances but also potential risks of said trend. This turns out to become more difficult with the extreme penetration of newest technologies within organizations as well as in life of individuals, imposing some completely unknown or unforeseeable challenges that cannot be dealt with by relying on traditional avoidance strategies alone.

Within discussions and deliberations about the right approach to risks and hazards, one term enjoys increasing popularity since the turn of the millennium. To optimally cope with adverse events – whether known or unfamiliar – strengthening “resilience” of individuals, organizations and other social structures is often being communicated as a novel target. Therein, critical infrastructures and especially a „resilient energy supply” seem to be of particular importance.

Although more and more general standards and political policy papers on establishing resilience are being published, transferring and implementing the idea in daily (work) life proves to be difficult for people and organizations concerned with the matter. After general inaugurations along with precise definitions, the hereafter presented thesis provides a multi-step concept for assessing resilience in electrical energy systems from a sociotechnical standpoint.

For companies in particular, resilience considerations in energy systems create new opportunities to analyze, consequently adapt and thus establish long term hardening and security of essential structures and facilities in the light of today’s often unexpected risks and hazards. With reasonable effort, the assessment method can offer profound quantitative results from an organizational and technical perspective in order to identify system specific (especially economic) potentials that may inform future deliberations on system operation and extension.

The propounded resilience concept is subsequently being evaluated for practical usability by applying the theoretical approach in a case study on the energy system of the Technical University of Munich at the Campus Garching. Here, the proposed method provides pertinent and comprehensible findings from an organizational as well as a technical standpoint and discloses concrete starting points for economically reasonable resilience improvements within the analyzed energy system.

Rechtserklärung

Hiermit erkläre ich,

Name: Sauer
Vorname: Edwin
Matrikelnummer: 0xxxxxxx

dass ich die beiliegende Masterarbeit zum Thema

Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Resilienz von elektrischen Energiesystemen

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlichen und sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet und die entsprechende Quelle angegeben habe.

Ich bestätige, die „TUM Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und für den Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der Technischen Universität München, 2015“, wie sie auf der Internetseite der Stabsstelle Chancengleichheit nachzulesen sind, anzuerkennen.

Vom Lehrstuhl und seinen Mitarbeitern zur Verfügung gestellte Hilfsmittel, wie Modelle oder Programme, sind ebenfalls angegeben. Diese Hilfsmittel sind Eigentum des Lehrstuhls bzw. des jeweiligen Mitarbeiters. Ich werde sie nicht über die vorliegende Arbeit hinaus weiterverwenden oder an Dritte weitergeben.

Einer weiteren Nutzung dieser Arbeit und deren Ergebnisse (auch Programme und Methoden) zu Zwecken der Forschung und Lehre, stimme ich zu.

Ich habe diese Arbeit noch nicht zum Erwerb eines anderen Leistungsnachweises eingereicht.

München, 23.09.2019

(Bearbeiter: Sauer, Edwin)

Erklärung zur Weitergabe der Arbeit

Ich erkläre mich einverstanden mit der Weitergabe der vorliegenden Arbeit an:

- Aktuell oder zukünftig am Lehrstuhl wissenschaftliche Arbeit schreibende Studierende
 - ☐ Pauschal durch Mitarbeitende
 - ☐ Nur nach jeweiliger vorheriger Rücksprache.
- Aktuell oder zukünftig am Lehrstuhl wissenschaftliche Mitarbeitende
 - ☐ Pauschal durch andere Mitarbeitende
 - ☐ Nur nach jeweiliger vorheriger Rücksprache.

Mein Urheberrecht und persönliches Nutzungsrecht bleiben davon unberührt.

München, 23.09.2019

(Bearbeiter: Sauer, Edwin)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract.....	3
Rechtserklärung.....	4
Erklärung zur Weitergabe der Arbeit.....	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1. Einleitung und Ausgangslage	11
2. Resilienz als omnipräsentes Gesellschaftskonstrukt.....	14
2.1. Definitionen, Abgrenzung und gesellschaftliche Relevanz.....	14
2.1.1. Historische Entwicklung des Resilienzbegriffs.....	14
2.1.2. Resilienz im interdisziplinären Kontext	16
2.1.3. Abgrenzung zu anderen Begriffen	22
2.1.4. Gesellschaftliche Relevanz von Resilienz	23
2.2. Modelle zur Beschreibung von Resilienz.....	25
2.3. Kriterien zur Bewertung von Resilienz.....	28
3. Bewertung von Resilienz in Energiesystemen	30
3.1. Relevante Einflussfaktoren für die Resilienzbewertung in Energiesystemen.....	30
3.2. Festlegungen für die Resilienzbewertung in dieser Arbeit	33
3.3. Bewertungsmethodik für organisationale Resilienz.....	37
3.4. Bewertungsmethodik für technische Resilienz	42
4. Anwendung der Bewertungsmethodik auf ein Fallbeispiel	51
4.1. Überblick des Energiesystems der TUM am Campus Garching	51
4.2. Organisationale Resilienz am Campus Garching.....	54
4.2.1. Analyse von Expertenansichten durch den <i>Resilienzfragebogen</i>	55
4.2.2. Quantitative Einordnung der Antworten	55
4.2.3. Zusammenfassung der Antworten und Resilienzbewertung.....	56
4.3. Technische Resilienz am Campus Garching.....	58
4.3.1. Bezugsgrößen für die technische Resilienz am Campus	58
4.3.2. Definition von Schockereignissen	60
4.3.3. Herleitung der jährlich zu erwartenden Ausfallkosten für Schadensereignisse ..	62
4.3.4. Zusammenfassung der Einzelergebnisse.....	75
4.4. Status Quo der Resilienz am Campus Garching - August 2019	83
4.5. Optionen für eine optimierte Systemresilienz am TUM Campus Garching	86
4.6. Einschränkungen und Grenzen der angewandten Methodik.....	90
5. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	93
Anhang.....	95
Literaturverzeichnis.....	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Resilienz-Zyklus nach (Edwards, 2009) und (Thoma, 2014), eigene Darstellung.....	18
Abbildung 2: Reaktion resilienter und weniger resilienter Systeme auf ein Schockereignis, eigene Darstellung nach Kröger aus (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014, S. 73)	19
Abbildung 3: Schematische Übersicht zur Definition einer geeigneten Anzahl an Kriterien zur Bestimmung von Resilienz.....	28
Abbildung 4: Unterscheidung von Aspekten der Resilienzbetrachtung und deren gegenseitigen Verknüpfungen	30
Abbildung 5: Übersicht über die Rahmenbedingungen der Resilienzbetrachtung in der vorliegenden Arbeit	35
Abbildung 6: Die drei Kriteriencluster und ihre zugehörigen Kriterien zur Bewertung von Resilienz in Energiesystemen.....	37
Abbildung 7: Hierarchische Übersicht über (Nicht-) Verfügbarkeiten von Bezugsgrößen, eigene Darstellung nach (VGB, 2016)	46
Abbildung 8: Mögliche, qualitative Unterscheidung des Schadensmaß' nach einem Schockereignis.....	48
Abbildung 9: 3D-Gebäudeerfassung am Campus Garching, TUM-zugehörige Gebäude in blau gekennzeichnet, angepasst nach (ENS, 2018).....	52
Abbildung 10: Darstellung der räumlichen Nähe zwischen Umspannwerk (Vordergrund), Heizkraftwerk und Leitzentrale (zwei Schornsteine im Hintergrund links) und TUM Feuerwehr (Turm mit zwei Antennen im Hintergrund rechts)	53
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen der technischen Zentrale und Verbrauchern des Energiesystems am TUM Campus Garching.....	54
Abbildung 12: Technische Zentrale: Büro- & Werkstattgebäude des TUM Referats 45 - Gebäudemanagement Campus Garching mit dahinterliegendem Heizkraftwerk	54
Abbildung 13: Ergebnisse der campusinternen, organisationalen Resilienzerhebung im Energiesystem am TUM Standort Garching, aufgeschlüsselt auf die Resilienzkriterien ..	56
Abbildung 14: Ergebnis der organisationalen Resilienzbewertung des Energiesystems am TUM Campus Garching	57
Abbildung 15: Wertschaffende Effekte von Hochschulen, eigene Darstellung angelehnt an (Schubert & Kroll, 2013).....	59
Abbildung 16: Ergebnis der linearen Optimierung für Strom im Falle eines Ausfalls der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz im Sommer für 24 Stunden.....	63
Abbildung 17: Qualitative Unterteilung des Schadensausmaß' für schädliche Ereignisse im Energiesystem des TUM Campus Garching für Strom, Wärme und Kälte	69

Abbildung 18: Jährlich zu erwartende Kosten durch Komponentenausfälle im Energiesystem des TUM Campus Garching, basierend auf vorangegangenen Annahmen und der linearen Optimierung mit <i>urbs</i>	77
Abbildung 19: Resilienzfunktion zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads eines Energiesystems	81
Abbildung 20: Ergebnis der technischen Resilienzbewertung des Energiesystems am TUM Campus Garching	82
Abbildung 21: Die jeweiligen Ergebnisse der Resilienzbetrachtungen aus technischer sowie organisationaler Sicht, unterteilt in die drei Kriteriencluster	83
Abbildung 22: Gesamtbetrachtung der Resilienzbewertung am TUM Campus Garching, aufgeteilt auf die Kriteriencluster Konnektivität, Flexibilität und Diversität im Status Quo (Stand: August 2019)	84
Abbildung 23: Aggregierter Resilienzgrad über alle Kriteriencluster am TUM Campus Garching	85
Abbildung 24: Schematische Darstellung der zur Diskussion stehenden Erweiterungsoptionen (grün) des TUM Campus Garching zur resilienzbasierten Systemoptimierung	87
Abbildung 25: Resilienzfunktion zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads des optimierten Energiesystems am TUM Campus Garching.....	89
Abbildung 26: Optimiertes Ergebnis der technischen Resilienzbetrachtung des Energiesystems am TUM Campus Garching, aufgeteilt auf die drei Kriteriencluster	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fähigkeiten eines resilienten Systems, eigene Darstellung nach (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014).....	26
Tabelle 2: Vergleich zwischen hauptberuflich angestelltem Hochschulpersonal, hochschulbedingtem Zuwachs des Bruttoinlandsprodukts und der monetären Wertschöpfung durch Hochschulen pro Stunde im Jahr 2013 (Schubert & Kroll, 2013), (Statistisches Bundesamt, 2014), (Technische Universität München, 2014).....	60
Tabelle 3: Die zwölf in der linearen Optimierung zugrunde gelegten Schockereignisse aufgeteilt auf die drei Cluster	62
Tabelle 4: Faktorisierung <i>fZeitpunkt, Dauer</i> der durch einen Schock ausgelösten Kosten am Campus Garching, in Abhängigkeit von Ausfallzeitpunkt und -dauer sowie der Jahreszeit, in der ein Schockereignis auftritt	66
Tabelle 5: Darstellung der (lt. Modellierung) ausgefallenen Energiemenge in MWh für den Ausfall der technischen Zentrale im Frühling bei verschiedenen Ausfallzeiträumen	70
Tabelle 6: Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ausfallzeiten von einer Stunde, einem Tag und einer Woche für jedes Cluster.....	72
Tabelle 7: Jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ausfalls in Abhängigkeit der Ausfalldauer und betroffenem Cluster	72
Tabelle 8: Berechnung der jährlich zu erwartenden Ausfallkosten für einen Ausfall der technischen Zentrale im Frühling bei verschiedenen Ausfallzeiträumen	73
Tabelle 9: Jährlich zu erwartende Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung in den 12 potentiellen Schockereignissen	75
Tabelle 10: Zusammensetzung und Anzahl der linear optimierten Schockereignisse für das Energiesystem des TUM Campus Garching	76
Tabelle 11: Verteilung der jährlichen Kostenstruktur des Energiesystems am Campus Garching	77
Tabelle 12: Verhältnis zwischen voraussichtlichen, jährlichen Kosten für die alternative Energieerzeugung und den zu erwartenden jährlichen Kosten für die ausgefallene Energie insgesamt in Abhängigkeit der drei Cluster	78
Tabelle 13: Jeweilige Anteile der zu erwartenden Ausfallkosten pro Jahr der drei Kriteriencluster in Abhängigkeit der jährlichen Gesamtsystemkosten	80
Tabelle 14: Punktpaare zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads eines Energiesystems und Annäherungsergebnis der Resilienzfunktion.....	81
Tabelle 15: Übersicht über die Veränderungen zwischen Status Quo und resilienzoptimiertem Energiesystem hinsichtlich der zu erwartenden Ausfallkosten und den Gesamtsystemkosten pro Jahr	88

1. Einleitung und Ausgangslage

Heutige Gesellschaften gelten als höchst komplexe, auf allen Ebenen vernetzte Systeme des menschlichen Zusammenlebens. Der daraus erwachsende Nutzen ist nahezu unbestritten und trägt in vielen Teilen der Welt kontinuierlich und entscheidend zum Anstieg von Wohlstand und Lebensqualität bei (Nationaler IT-Gipfel, 2015). Gleichzeitig verdeutlichen die schwerwiegenden, teils unvorhersehbaren Folgen von Naturkatastrophen wie dem Tōhoku-Erdbeben 2011 oder Hurrikan Katrina 2005, aber auch die Terroranschläge der vergangenen Jahre in New York, London, Madrid, Paris und Berlin die hohe Vulnerabilität dieser modernen Systeme mit sich stetig wandelnden, immer undurchsichtigeren Zusammenhängen (Hollnagel, 2014), (Hirschl B. et al., 2018).

Entsprechend sehen Staaten, Unternehmen und Individuen in der zunehmenden Vernetzung neben den immensen Chancen auch ernstzunehmende Risiken und fordern mit steigender Abundanz angemessene Strategien zum richtigen Umgang mit neuen Gefahren und Unsicherheiten. Immer häufiger erscheint im politischen, wirtschaftlichen und sozialen Diskurs bei der Auseinandersetzung mit diesen und ähnlichen Herausforderungen der Begriff der „Resilienz“, z.B. in (Florin & Linkov, 2016), (Digital-Gipfel, 2018), (Rolfe, 2019).

Während der Terminus bereits vor ca. 200 Jahren erstmalig im wissenschaftlichen Kontext geprägt wurde, entwickelt er sich seit der Jahrtausendwende zu einer omnipräsenten und übergeordneten Bezeichnung für erstrebenswerte Fähigkeiten von staatlichen Gefügen, Organisationen, Einzelpersonen und sonstigen Organismen (von Freyberg, 2011). Resilienz beinhaltet allgemein die Widerstands- und Improvisationsfähigkeit sowie die kontinuierliche Anpassung im Angesicht widriger Ereignisse jeglicher Art, die ein System potentiell negativ beeinflussen (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014).

Im Hinblick auf die gesellschaftlichen Herausforderungen der Neuzeit tritt der Begriff zunehmend bei Fragen der Sicherheitsforschung (zivil und militärisch) in Erscheinung. Eine fundamentale Bedeutung kommt dabei den kritischen Infrastrukturen zu, also „[...] Anlage[n], [Systemen oder Teilen] davon, die von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung sind [...]“¹

Die Europäische Kommission bezeichnet in ihrem Rahmenprogramm zur Bekämpfung vielfältiger Gefahren (englisch „hybrid threats“) Resilienz als essentielle Grundlage (Europäische Kommission, 2018). Auch die North Atlantic Treaty Organization (NATO) bezieht sich in ihrer Vorgehensweise zur Sicherstellung des Schutzes ihrer Mitgliedsstaaten auf Resilienz als zentrales Ziel, insbesondere im Hinblick auf Cybersicherheit und Verteidigung kritischer Infrastrukturen (NATO, 2016).

¹ (Rat der Europäischen Union, 2008), Artikel 2 - Begriffsbestimmungen

In besonderem Maße gilt die Versorgung mit elektrischer Energie als einer der Hauptpfeiler des täglichen, öffentlichen Lebens in den entwickelten Nationen (Bie, Lin, & Li, 2017). Speziell in Deutschland steht dieses Herzstück der Gesellschaft vor großen Herausforderungen und neuen Unbekannten. Die deutsche Energiewende stellt das historisch gewachsene Energiesystem hierzulande auf die Probe (Henning & Palzer, 2013). Die Dezentralisierung der Stromerzeugung durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien erfordert neben dem umfassenden Ausbau des Stromnetzes einen geeigneten Ansatz bei der Steuerung und Überwachung der betreffenden Anlagen zur Erhaltung der hochgradig vernetzten Infrastruktur (Hirschl B. et al., 2018).

Vor diesem Hintergrund wird zunehmend die Notwendigkeit von resilienten Kommunen und Organisationen sowie (in den Sozialwissenschaften) ebenso resilienten Individuen hervorgehoben (Edwards, 2009), (Coaffee, 2013), (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014). Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, dass eine konkrete, praxisorientierte Vorgehensweise für die Etablierung und Analyse von Resilienz im (Arbeits-) Alltag nur selten verfügbar ist. Häufig werden überwiegend allgemeine Leitfäden und Standards veröffentlicht, siehe unter anderem (Thoma, 2014) und (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017). Gleichwohl dieses Vorgehen ermöglicht, den Begriff flexibel auf verschiedene Anwendungsbereiche, Branchen oder Fachgebiete zu übertragen, ist zu hinterfragen, inwieweit dies für die tatsächliche Umsetzung bzw. eine effektive Steigerung der Resilienz ausreichend ist. Die somit von Organisationen erforderliche Eigeninitiative beansprucht teilweise erhebliche Ressourcen, um die Bedeutung des Begriffs von den allgemeinen Grundüberlegungen auf die eigenen Strukturen zu übertragen und greifbare Optimierungsmaßnahmen umzusetzen (Digital-Gipfel, 2018).

Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Problematik an. Zunächst werden in Kapitel 2 einige allgemeinen Ausführungen zur Historie gebracht. Es folgen konkrete Begriffsbestimmungen und -abgrenzungen für die in dieser Arbeit erforderliche Argumentation sowie die ingenieurtechnische Analyse der heutigen Relevanz von Resilienz im gesellschaftlichen Diskurs. Anschließend beleuchtet ein Überblick über gängige Vorgehensweisen zur Einschätzung und Bewertung der Resilienz von Systemen die Schwierigkeiten, die sich bei der Umsetzung von Resilienzstrategien ergeben.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 eine mehrstufige Methodik im konkreten Bezug auf Energiesysteme entwickelt. Um dem komplexen, mehrdimensionalen Charakter heutiger Gesellschaftsstrukturen gerecht zu werden, betrachtet die vorliegende Arbeit moderne Energiesysteme als soziotechnische Gefüge. Aus diesem Grund berücksichtigt das eingeführte Konzept neben der technischen, weitgehend statischen Dimension der installierten Infrastruktur (Ebene 1) auch die dynamischen Strukturen auf organisationaler Ebene, das heißt Organisationsgefüge sowie Art und Formen der internen und externen Zusammenarbeit (Ebene 2).

Im zweiten Hauptteil dieser Arbeit wird das vorgestellte Bewertungskonzept auf das Fallbeispiel des Energiesystems der Technischen Universität am Campus Garching angewen-

det (Kapitel 4). Mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells sowie eines eigens entwickelten Resilienzfragebogens ergeben sich in beiden Betrachtungsebenen relevante und nachvollziehbare Erkenntnisse. Diese können im Hinblick auf eine angestrebte resilientere Betriebsführung sowie für potentielle Erweiterungen des Energiesystems Entscheidungen durch quantitative Ergebnisse genutzt werden.

Abschließend werden in Kapitel 5 die Schlussfolgerungen der dargelegten Vorgehensweise sowie Ansätze für mögliche Konzepterweiterungen und die weitere Forschung zusammengefasst.

2. Resilienz als omnipräsentes Gesellschaftskonstrukt

Im Zuge verschiedenster Herausforderungen der Gegenwart, mit denen die Menschen (insbesondere in Industrienationen) konfrontiert werden und bestmöglich umgehen sollen, fällt mit stark steigender Tendenz immer öfter der Begriff der Resilienz. Während (von Freyberg, 2011) den Terminus bereits Anfang des Jahrzehnts als „Modewort“ bezeichnete, ist mittlerweile ein noch stärkerer Anstieg in Gebrauch und Relevanz zu verbuchen. Lieferte eine Google-Suche nach „Resilienz“ 2011 laut von Freyberg „lediglich“ 70.000 Einträge, sind es im August 2019 bereits ca. 1,8 Millionen. Bezieht man sich auf den englischen Ausdruck, ergeben sich über 100 Millionen Einträge. Diese Zahlen bekräftigen die vielfache und offensichtlich vielseitige Verwendung der Resilienz in verschiedenen Situationen und Fachbereichen.

Zunächst soll anhand der historischen Entwicklung nachvollzogen werden, was der „All-Round-Begriff“ tatsächlich impliziert, welche Forschungsansätze und Betrachtungsweisen sich etabliert haben und wie Resilienz letztlich die heutige Popularität erreichen konnte.

2.1. Definitionen, Abgrenzung und gesellschaftliche Relevanz

Etymologisch stammt „Resilienz“ vom lateinischen Verb „resilire“, was sinngemäß mit „zurückspringen“ oder abprallen“ übersetzt werden kann (McAslan, 2010). In den vergangenen Jahren hat sich dieser Terminus zunehmend zu einem omnipräsenten Begriff im gesellschaftlichen Diskurs entwickelt. Die genaue Definition der Resilienz variiert dabei mitunter erheblich, was auf die scheinbar universelle Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Begriffs auf verschiedene Wissenschaftsgebiete und Gesellschaftsbereiche hinweist (Walker & Cooper, 2011), (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014). Entsprechend sollen zunächst die Ursprünge des Begriffs näher beleuchtet werden.

2.1.1. Historische Entwicklung des Resilienzbegriffs

Nach derzeitigem Kenntnisstand erwähnte der britische Physiker und Arzt Thomas Young zu Beginn des 19. Jahrhunderts „Resilienz“ erstmals in einer wissenschaftlichen Arbeit über die Elastizität von Festkörpern. Er definierte darin Resilienz als Eigenschaft eines (Stahl-) Balkens, die Krafteinwirkung eines bestimmten Körpers, z.B. durch einen Auf- oder Anprall, zu absorbieren ohne zu brechen (Young, 1807). Diese Deutung griffen unter anderem auch (Tredgold, 1818) in Experimenten zur Eignung bestimmter Holzarten für den britisch-königlichen Schiffbau und (Mallet, 1856) bei der Beschreibung von Ermüdungserscheinungen von stark belasteten Artilleriegeschützen auf.

Ab Mitte der 1950er Jahre wurde der Begriff in der Psychologie eingeführt. In mehreren Veröffentlichungen über das Entwicklungsverhalten von etwa 500 Kleinkindern über einen

Zeitraum von 30 Jahren beschreiben Emmy Werner und Ruth Smith Resilienz als positives Gegenteil von Vulnerabilität bzw. der Störungsanfälligkeit von Individuen. Dabei weisen sie außerdem auf konkrete Faktoren hin, die eine Person mehr oder weniger resilient erscheinen lassen (Werner & Smith, 1982), (Werner & Smith, 1992). (Bonanno, 2004) definiert den Begriff als "Fähigkeit von Erwachsenen in ansonsten normalen Umständen, die einem isolierten, hoch-disruptiven Ereignis [...] ausgesetzt sind, ein relativ stabiles, gesundes Level an psychologischer und physischer Funktion beizubehalten."² (Welter-Enderlin & Hildenbrand, 2006) bezeichnen Resilienz als das „Gedeihen unter widrigen Umständen“.

Dem Umstand, dass manche Individuen in derartigen Zuständen nicht nur überleben, sondern sogar gedeihen können, während andere daran zugrunde gehen, widmete sich auch der Ökologe Crawford Holling. Dieses Verhalten bewies er anhand von Populationsbeständen unterschiedlicher Tierarten, die in gewissen Zeiten hohe Vermehrungsraten zeigen, in anderen dagegen quasi verschwinden (Holling, 1973). Im Vergleich zur Resilienz beschreibt Stabilität laut Holling, dass ein System nach einer temporären Störung wieder in sein Ursprungsgleichgewicht zurückfinden kann. Resilienz interpretiert er im Gegensatz dazu als Fähigkeit, Veränderungen zu absorbieren, ohne dadurch bleibende Schäden zu erfahren (Holling, 1986).

Mit der Übertragung der „Resilienz“ in die Entwicklungspsychologie und zur Beschreibung von Ökosystemen ging ein gewisser Verständniswandel einher, denn erstmals wurde Resilienz nicht mehr als statische Materialeigenschaft, sondern vielmehr als dynamische Fähigkeit von Individuen bzw. sogar ganzen Systemen betrachtet (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014). Mittlerweile hat sich der Begriff über diese Ursprünge hinaus auch in verschiedenen anderen Bereichen etabliert, unter anderem in der Finanz-, Wirtschafts- und Entwicklungspolitik, im Gesundheitswesen, der Stadtplanung, sowie in der nationalen Sicherheit (Walker & Cooper, 2011).

In Folge von schweren, oft medienwirksamen Ereignissen – z.B. Naturkatastrophen, Terroranschläge, durch technisches und/oder menschliches Versagen hervorgerufene Unfälle oder ähnliches – gilt Resilienz mittlerweile insbesondere in der Sicherheitsforschung als Schwerpunktthema für erfolgreiches Risiko- und Krisenmanagement von Staaten, Regionen und Unternehmen (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014). Beispiele hierfür finden sich u.a. in (Köhler & Schulze, 2016), (Florida Division of Emergency Management, 2017), (Europäische Kommission, 2018) und (Cabinet Office UK, 2019).

Die Bevölkerung erhebt zunehmend den Anspruch nach möglichst vollständiger Sicherheit und Versorgung, sowohl für das eigene Leben als auch für den dauerhaften Zugang zu essentiellen Bedürfnissen wie Bildung, medizinische Versorgung, Energie und weiteren. Dieser Wunsch kann in der globalisierten, sich verändernden und extrem vernetzten Welt des 21. Jahrhunderts jedoch nicht mehr nur mit „Stabilität“ befriedigt werden (Walker & Salt, 2006) (Hollnagel, 2009). Die durch Resilienz erhoffte Fähigkeit, Herausforderungen

² (Bonanno, 2004, S. 102)

und Krisen verschiedenster Art zu widerstehen oder sich rasch von ihnen zu erholen, verspricht enormes Potential, souveräner mit den komplexen Problemstellungen der Gesellschaft umgehen zu können.

Aus dieser neuen Popularität erwächst jedoch im selben Zug eine Unstimmigkeit über die exakte Begriffsbestimmung. Durch die sich immer weiter ausbreitende Verwendung des Terminus hat sich ein heterogenes Feld an Definitionen für Resilienz gebildet.

Dies ermöglicht zwar eine individuelle Anpassung des Resilienz-Verständnisses für den jeweiligen Forschungszweck, allerdings könnte es auch das wissenschaftliche Vorgehen in diesem Bereich hemmen, da in jedem Fall eine ausführliche Herleitung der verwendeten Definition in fast jeder wissenschaftlichen Arbeit vorzusehen ist. Um dieser Problematik gerecht zu werden, soll im Folgenden eine Übersicht über bestehende Definitionen dargestellt und die im Kontext dieser Arbeit vielversprechendste Definition ausgewählt werden.

2.1.2. Resilienz im interdisziplinären Kontext

Basierend auf den vorangegangenen Erläuterungen ergeben sich vier übergeordnete Bedeutungen als „Systemparameter“ (Hollnagel, 2014):

- Resilienz als *Materialeigenschaft* bzw. statische Qualität
- Resilienz als *psychologische Fähigkeit*, aufbauend auf Erlebnissen & Erfahrungen
- Resilienz als *Fähigkeit von dynamischen, reaktiven Ökosystemen*
- Resilienz als *Fähigkeit von dynamischen, geplanten Systemen mit aktiver Anpassung an (un-) vorhersehbare Veränderungen*

Je nach wissenschaftlicher Domäne wird der Begriff entsprechend auch heute noch verschieden verwandt. Während Resilienz als Materialeigenschaft eindeutig definierbar ist, ergibt sich bei der Betrachtung der „Fähigkeiten“ die Fragestellung, welche Funktionen resiliente Organismen oder ökologische bzw. technische Systeme im Allgemeinen erfüllen bzw. welche Ergebnisse sie erzielen sollen. Dies resultiert in der grundsätzlichen Überlegung, ob Resilienz nicht auch als übergeordnete *Strategie* für ein „sicheres“ Systemdesign dienen kann (Longstaff, Armstrong, Perrin, Parker, & Hidek, 2010).

Seine eigenen Forschungen zu Systemresilienz vorantreibend, regte (Holling, 1996) an, Resilienz als Fähigkeit vordergründig auf zwei unterschiedlichen Ebenen zu betrachten: Einerseits die „ökologische Resilienz“ (englisch *Ecological Resilience*), wonach ein System in der Lage ist, sich nach einer Störung selbstständig zu reorganisieren und gegebenenfalls auf anderem Level einen neuen stabilen Zustand zu erreichen, um systemrelevante Strukturen oder Funktionen zu erhalten (Systemerhalt). Auf der anderen Seite steht demnach

der „traditionellere Weg der ingenieurtechnischen Resilienz“³ (englisch *Engineering Resilience*), in dem ein System um einen Gleichgewichtspunkt existiert und durch Störungen in seiner Funktionsweise beeinträchtigt wird (Funktionserhalt). Hier definieren Resistenz gegenüber Beeinträchtigung und die Geschwindigkeit der Rückkehr in einen stabilen Zustand das Maß für Resilienz (Holling, 1996). Dieser Unterscheidung folgten später u.a. (Vugrin, Warren, Ehlen, & Camphouse, 2010), (Hollnagel, 2014) und (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014), geben allerdings zu bedenken, dass gerade in soziotechnischen Systemen, die Grenzen zwischen Funktions- und Systemerhalt verschwimmen. Als soziotechnische Systeme gelten dabei (technische) Konstrukte menschlichen Ursprungs, die neben physischen Anlagen („Artefakten“) ebenso Wissen, Kapital, Arbeit, kulturelle Bedeutung, etc. in sich vereinen (Geels, 2004). Essentiell für diese Systeme sei demnach, dass sie nicht autonom funktionieren, sondern als Folge von menschlichem Handeln gesehen werden sollten.

Wie (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010) bemerken, wird Resilienz selbst in der Fachliteratur in einigen Fällen mit nur einem ihrer Teilaspekte – der Resistenz – gleichgesetzt, was jedoch ein sehr lineares und simples Verständnis des weitaus umfassenderen Begriffs der Resilienz nach sich zieht. Diese Interpretation ermöglicht es in der Folge einigen Modellen, scheinbar stichhaltige und leicht berechenbare Quantifizierungen der Resilienz von Systemen vorzunehmen. Da somit jedoch lediglich ein Teilaspekt des Terminus im allgemeinen Verständnis abgedeckt würde, erweist sich diese Interpretation für eine umfassende und entsprechend komplexere Systembetrachtung als nicht zielführend.

Aus der Mehrdimensionalität der Resilienz ergibt sich somit die Problematik, ein geeignetes Modell für eine konkrete, quantifizierbare Bestimmung von Resilienz zu erarbeiten. Nicht nur gilt es, alle Facetten des Begriffs selbst zu beachten, sondern auch die zahlreichen Interaktionen einzelner Systemkriterien untereinander einzuarbeiten. Zuletzt kann jedes Modell, insbesondere im Rahmen einer klassischen Risikoanalyse, nur eine Betrachtung der mehr oder weniger *bekannten* Schockereignisse bieten, wenngleich ein System, das *unbekannten* Ereignissen womöglich nicht standhalten kann, nicht als „resilient“ bezeichnet werden kann (Hirschl B. et al., 2018).

Zur genaueren Betrachtung der vielfältigen Dimensionen von Resilienz wird das Modell des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI) herangezogen, in dem die Phasen der Resilienz zyklisch dargestellt werden (vgl. Abbildung 1). Nach Ansicht des EMI besteht dieser Zyklus aus den Phasen „prevent“ (verhindern), „protect“ (beschützen, abfangen), „respond“ (antworten), „recover“ (adaptieren, anpassen, lernen) und „prepare“ (vorbereiten). Dieses iterative Konzept leitet sich von den Überlegungen aus (Edwards, 2009) ab und findet in der Literatur weite Verbreitung (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014).

³ (Holling, 1996, S. 33)



Abbildung 1: Resilienz-Zyklus nach (Edwards, 2009) und (Thoma, 2014), eigene Darstellung

Unterzieht man die in der Literatur zu findenden Definitionen von Resilienz einer eingehenden Prüfung gemäß dieser fünf Abschnitte, so ist festzustellen, dass sich ein Teil der bestehenden Begriffserklärungen vordergründig auf die beiden ersten Phasen „prevent“ und „protect“ bezieht, (siehe z.B. (Pflüger, 2013)). Bei genauerer Betrachtung unterscheidet sich dieses Verständnis kaum von den bekannten Definitionen für „Resistenz“ oder „Stabilität“. Laut Duden beschreiben diese Begriffe die „Widerstandsfähigkeit eines Organismus gegenüber äußeren Einwirkungen“⁴ bzw. etwas „in sich konstant bleibend[es], gleichbleibend[es], relativ unveränderlich[es]“⁵. Dies entspricht einem Zustand, in welchem ein System kaum oder keine Auswirkungen einer Katastrophe zu verkraften hat, da es die möglichen Folgen bereits vermieden oder abgefangen hat. Im Gegensatz dazu stehen Herangehensweisen, welche die Phase vor dem Ausbruch einer Katastrophe weitestgehend ignorieren und sich vollkommen auf die Fähigkeit des Systems stützen, sich nach einem bereits eingetretenen Schock wieder zu erholen (z.B. (Bürkner, 2010)).

Bestehende Definitionen für Resilienz können demnach grob unterschieden werden mit auf der einen Seite der Annahme, Resilienz komme erst zu tragen, nachdem ein Schockereignis bereits eingetreten ist oder aber Resilienz als Erweiterung der Resistenz, welche nur die Widerstandsfähigkeit vor dem Schock mitberücksichtigt. Natürlich gibt es neben diesen Extremen zahlreiche Definitionen, die für ihre Betrachtungen einen Mittelweg einschlagen, bspw. (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010) und (Zhang, Yuan, Li, & Lin, 2018).

In aktuellen Publikationen mangelt es mitunter an einer präzisen Unterscheidung zwischen Resistenz und Resilienz, der Begriff „Resilienz“ wird teilweise synonym zur Resistenz ge-

⁴ <https://www.duden.de/rechtschreibung/Resistenz>, abgerufen am 24. Mai 2019

⁵ <https://www.duden.de/rechtschreibung/stabil#Bedeutung-1a>, von Stabilität, abgerufen am 24. Mai 2019

nutzt (siehe dazu auch Kapitel 2.1.3). Die grundsätzlich wesentlich komplexeren Fähigkeiten und Zusammenhänge, die Resilienz beschreibt, werden bei dieser Herangehensweise außer Acht gelassen (Thoma, 2014). Beispielsweise sollte die Innovations- und Improvisationsfähigkeit eines Systems nach einem Schock miteinbezogen werden (vgl. dazu u.a. (Gößling-Reisemann, 2016)). Ungeklärt bleibt zudem, ob die Phase vor dem Eintritt eines Schockereignisses die Resilienz eines Systems überhaupt beeinflusst, oder weiterhin als Resistenz, zunächst unabhängig von Resilienz, zu gelten hat. Einige Autoren ziehen hier eine klare Grenze und rechnen alles, was dem Vermeidungs- und Widerstandsvermögen von Systemen dient, der Resistenz zu. Laut dieser Sichtweise spielt Resilienz erst ab dem Moment eine Rolle, in dem Schäden im System eintreten und zeigt dann die Fähigkeit, wie sich das System von eben diesen Schäden wieder erholen kann. Es wird argumentiert, dass dieser Ansatz sich stärker an der ursprünglichen, lateinischen Bedeutung des Zurückspringens (englisch *to rebound*) orientiert, z.B. laut (Rose, 2016).

Der Wissenschaftler und ehemalige Direktor des Risk Center der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Wolfgang Kröger, entwickelte im Rahmen des Workshops "International Perspectives on Resilience" 2014 die folgende Darstellung über die Reaktion resilienter bzw. weniger resilienter Systeme auf ein Schockereignis.

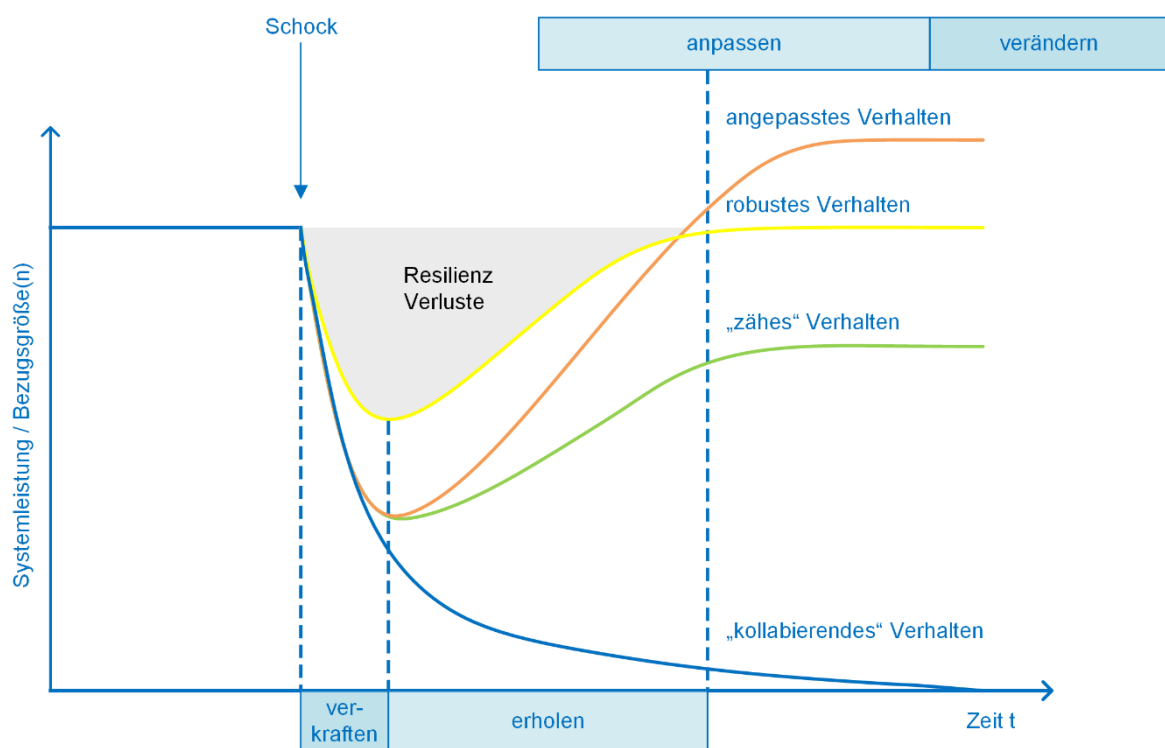


Abbildung 2: Reaktion resilienter und weniger resilienter Systeme auf ein Schockereignis, eigene Darstellung nach Kröger aus (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014, S. 73)

Gleichwohl diese Kurvendarstellung zu einem besseren Verständnis der Resilienzthematik in Systemen beitragen kann, ist sie auch mit Schwachpunkten verbunden. So wird nicht deutlich, dass Schockereignisse, Krisen oder Unfälle keine Einzelfälle sind, sondern wiederkehrend auftreten können. Es ist hervorzuheben, dass Ausfälle oder andere disruptive

Ereignisse in praktisch jedem realen System im Laufe der Zeit aus unterschiedlichen Gründen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten und in unterschiedlichem Ausmaß immer wieder auftreten. Weiterhin erscheint diese Darstellung zur Betrachtung größerer bzw. komplexerer Systeme nur bedingt nützlich, da oftmals vielerlei Interdependenzen und Kaskadeneffekte innerhalb eines Systems, aber auch zwischen verschiedenen Systemen auftreten, was in diesem Schema unzureichend abgebildet ist. Die Messung einer spezifischen Systemleistung (vgl. vertikale Achse) ist demzufolge nur bedingt tragfähig. Umso mehr rücken die Wahl der Systemgrenzen, der „Schock“-Ereignisse und der Bezugsgrößen in entscheidende Positionen für die Validität konkreter Bewertungskonzepte.

Bei der Erörterung von Schockreaktionen legt Kröger insbesondere Wert auf den Teilaspekt der möglichst nachhaltigen Erholung durch Adaption als eine "integrierte Fähigkeit zur Weiterentwicklung"⁶ des Systems. Darüber hinaus unterscheidet er in seinen Ausführungen zwischen einem rein technischen Verständnis von Resilienz sowie soziotechnischen Systemen, wobei letztere zusätzlich an Komplexität gewinnen, da hier "technologische, wirtschaftliche, soziale und juristische Gesichtspunkte gleichermaßen [zu] berücksichtigen und integrieren"⁷ seien. Eine ähnliche Unterscheidung nehmen auch (Fichter, von Gleich, Pfiem, & Siebenhüner, 2010) vor, indem sie zwischen Ökosystemresilienz und technischer Resilienz differenzieren. Erstere zielt laut Fichter et al. auf die Aufrechterhaltung der Systemfunktion ab, während technische Resilienz eine hohe Effizienz der Systemvorgänge in den Vordergrund stellt.

Aus diesen Überlegungen erwächst die zentrale Fragestellung, wie und zu welchem Zeitpunkt der „Status Quo“ eines Systems zu definieren ist. Demnach sollten zur angemessenen Beschreibung eines resilienten Systems zunächst zu betrachtende Parameter zur Bestimmung der Systemfunktion (die Ordinatenachse in Abbildung 2) definiert werden (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014).

Dies erscheint jedoch umso schwieriger, sobald man die Komplexität heutiger Systeme in Betracht zieht. Es wird zum aktuellen Zeitpunkt in der betrachteten Literatur vermieden, allgemein gültige Parameter oder Kriterien für die Systemfunktion zu definieren, häufig wird lediglich auf eine jeweils individuelle, szenarien- und annahmenbasierte Gültigkeit verwiesen. Darüber hinaus differenzieren einige wissenschaftliche Arbeiten Resilienz über das zu erreichende Funktionsniveau infolge eines Schockereignisses. Während bspw. Holling das reine „Überleben“ einer Population bereits als resilient bezeichnet (Holling, 1973), tendieren aktuellere Arbeiten eher dazu, adaptives, über das Ursprungsniveau hinausgehendes Systemverhalten als resilient zu bezeichnen (vgl. z.B. (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014), (Vugrin, Critical Infrastructure Resilience, 2016)). Dieser Unterschied wird in Abbildung 2 anhand der vier grundlegenden Muster im letzten Drittel verdeutlicht.

Auf welchem Niveau sich der Systemzustand nach einem Schockereignis wieder einzuordnen hat, um als resilient zu gelten, hängt von der Herangehensweise an die

⁶ (Thoma, 2014, S. 73)

⁷ (Thoma, 2014, S. 73)

Problematik ab. Aus dem psychologischen Ursprung der Resilienz geht der Anspruch an ein Einpendeln auf ein im Vergleich zum Ausgangsniveau höheres Level hervor („Gedeihen“ trotz Widrigkeiten, (Welter-Enderlin & Hildenbrand, 2006)). So findet ein organisches System wie der Mensch erfahrungsbasiertes Entwicklungspotential innerhalb seiner selbst und besitzt eine Fähigkeit des selbstständigen Lernens, die ihm ermöglicht, ohne externe Ressourcen einen optimierten Status zu erreichen (Werner & Smith, 1992). Wird diese Definition auf die Technik übertragen, ist diese Annahme jedoch kaum haltbar, da ein (häufig aktiv menschlich geplantes) technisches System nur durch externe Einwirkung, bspw. gesteigerten Ressourcen- oder Energieaufwand, ein höheres Niveau erreichen kann (Hollnagel, 2014).

Eine weitere Herausforderung stellen die Art und Schadensschwelle des eintretenden Ereignisses dar: Ausgehend von der ursprünglichen psychologischen Verwendung des Begriffs ist Resilienz erst nach dem Eintritt eines widrigen Ereignisses auszumachen (Werner & Smith, 1992), wohin gegen im soziotechnischen Betrachtungshorizont die vorausschauende Systemoptimierung einen wichtigen Aspekt in Resilienzüberlegungen darstellt (vgl. u.a. (Wink, 2011), (Hollnagel, 2014), (Europäische Kommission, 2018)). Welche Ereignisse als widrig zu bezeichnen und wie schädlich diese jeweils seien, ist in der Literatur ebenfalls umstritten. Teils basieren Bewertungen lediglich auf retrospektiven Betrachtungen von Erlebnissen katastrophalen Ausmaßes, während andere jegliche „schädigenden“ Ereignisse einbeziehen (vgl. u.a. (Bürkner, 2010), (Brand & von Gleich, 2015)). Insbesondere aus sicherheitspolitischer Sicht erscheint es jedoch nicht von Vorteil, sich ausschließlich auf Resilienzfeststellungen *nach* Eintritt von Schocks und Krisen zu beschränken, sondern zusätzlich vorbereitende Maßnahmen zu treffen, um insbesondere Schäden mit geringeren Auswirkungen von vornherein wirksam zu vermeiden (Berg, et al., 1995), (Briguglio, Cordina, Farrugia, & Vella, 2009) (BMBF, 2018).

Anhand der vorangestellten Ergebnisse wird deutlich, dass der Begriff der Resilienz schwierig zu fassen ist und in der aktuellen Literatur zwar einander ähnliche Eigenschaften und Fähigkeiten diskutiert werden, sich jedoch bis dato keine einheitliche Definition findet. Neben dem abzuschätzenden Umfang einer Resilienzbeurteilung erweisen sich somit die Feststellung eines systemischen Status Quo sowie der zu erreichende „resiliente“ Endzustand als zu hinterfragende und im Vorhinein festzulegende Faktoren, die einer Konkretisierung im Einzelfall bedürfen. Dass Resilienz von verschiedenen Quellen unterschiedlich definiert wird, wirkt einerseits einem genauen Verständnis entgegen und erschwert die Übertragbarkeit, führt gleichzeitig aber zu einer fortwährenden Auseinandersetzung mit dem positiv besetzten Begriff in einer Vielzahl von Forschungsgebieten, die zu begrüßen ist (Brand & Jax, 2007).

In den vergangenen Jahren (in Deutschland insbesondere seit 2010) wurden mehrere Forschungsprojekte und -Studien zur Resilienzthematik erarbeitet. Beispielfhaft zu nennen sind die auch in der vorliegenden Arbeit zitierten Studien „*Resilien-Tech:» Resilience-by-Design«*“ (Thoma, 2014), der „*Resource Guide on Resilience*“ (Florin & Linkov, 2016), sowie „*Vulnerabilität und Resilienz des digitalen Stromsystems*“ (Hirschl B. et al., 2018).

Diese und weitere Publikationen stellen die Tatsache heraus, dass eine „eindimensionale“ Resilienz Betrachtung der Komplexität der Thematik im Rahmen des heutigen gesellschaftlichen Zusammenlebens nur unzureichend Rechnung trägt. So sei es nicht ausreichend, sich lediglich auf einen Teilaspekt (bspw. technisch, ökologisch, ökonomisch, organisational, juristisch, usw.) von Systemen zu beschränken. Vielmehr seien sinnvolle Verknüpfungen und gegenseitiger Bezug der Strukturen trivial, um heutige, oftmals sehr komplexe Systeme auf ihre Resilienz zu untersuchen (vgl. z.B. (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010) und (Binder, Mühlemeier, & Wyss, 2017)). Dies gilt nicht nur, aber insbesondere für wirtschaftlich orientierte Unternehmen oder sonstige Rechtsformen der modernen Gesellschaft, da nur unter Einbezug der übergreifenden Kausalitäten und Interdependenzen ein möglichst umfassendes Modell des realen Systems abgebildet werden kann. Nur mit Hilfe eines solchen, übergeordneten Konzepts können fundierte, sinnstiftende und wirklichkeitsnahe Resilienzmaßnahmen erarbeitet und letztlich in das tägliche Leben und Arbeiten übernommen werden (Lee, Vargo, & Seville, 2013), (Hollnagel, 2014).

2.1.3. Abgrenzung zu anderen Begriffen

Wie oben erwähnt, besteht in der aktuellen Forschungslandschaft Unklarheit über die Trennung zwischen Resilienz und verwandten Begriffen bezüglich des Systemverhaltens. Am häufigsten tritt dabei der Fall auf, Vulnerabilität als Gegenteil zur Resilienz zu verstehen (vgl. z.B. (Werner & Smith, 1992), (Berkes, Colding, & Folke, 2003)). Zwar sind beide Begriffe eng miteinander verknüpft – so kann ein hohes Maß an Vulnerabilität beispielsweise eine sehr geringe Resilienz bedeuten – jedoch sollten sie nicht als gegenläufige Ausprägungen derselben Dimension gesehen werden. Eine geringere Vulnerabilität kann auch durch z.B. erhöhte Starrheit und damit gegebenenfalls geringerer Resilienz erreicht werden (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010), (Gößling-Reisemann, 2016).

Nachhaltigkeit als ein durch Resilienz bedingter oder mit ihr zusammenhängender Begriff, wird mitunter ebenso als die der Resilienz übergeordnete Dimension gesehen, in anderen Fällen wiederum als Voraussetzung für ein resilientes System. Auch hier fehlt ein einheitliches Begriffsverständnis, was zu ungenauen Abgrenzungen zwischen wissenschaftlichen Arbeiten führt, die sich mit ähnlichen Inhalten auseinandersetzen (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014). In der vorliegenden Arbeit soll nachhaltige Entwicklung im Sinne der von den Vereinten Nationen verwendeten Definition verstanden werden, als „jede Entwicklung, die aktuelle Bedürfnisse deckt, ohne dabei die Möglichkeit kommender Generationen einzuschränken, ihre Bedürfnisse zu decken.“ (vgl. (World Commission on Environment and Development, 1987)). Hier wird der Unterschied zur Resilienz deutlich, wonach ein System seine Resilienz durch den Verbrauch von für künftige Generationen wichtigen Ressourcen erzielen könnte, dadurch allerdings entgegen des Nachhaltigkeitsgedankens wirkt.

Da es sich bei Resilienz übergeordnet um die Fähigkeit der Vermeidung bzw. Reduzierung von potentiellen, negativen Ereignissen handelt, liegt gerade im Rahmen wirtschaftlicher Betrachtungsweisen eine gewisse Nähe zum Risikomanagement vor. Diese Zusammenhänge werden unter anderem in (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017),

(Clarke, et al., 2015) und (Scharte & Thoma, 2016) thematisiert. Dabei wird herausgestellt, dass Resilienz nicht etwa mit Risikomanagement gleichzusetzen sei, sondern vielmehr eine Erweiterung des Begriffs sei. (Vollmer, et al., 2016) stellen sogar zur Diskussion, in „Resilienz einen vollumfänglichen und gleichermaßen transformativen Ansatz der Risikobewertung“ und dem angemessenen Umgang damit zu sehen.

Schließlich sei der Unterschied zwischen Resilienz und Resistenz erläutert, wobei Resistenz als Synonym für Widerstandsfähigkeit, Robustheit und ähnliches verwendet wird. Diesen Begriffen ist gemein, dass sie sich auf die Phase vor Eintritt eines Schockereignisses und dessen bedingter Schäden beziehen und lediglich Aussagen darüber treffen können, inwiefern das System widrigen Umständen von vornherein trotzen oder sie vermeiden kann. Die Erholung und Weiterentwicklung nach dem Schock, also die vier Phasen „aus dem Modell in Abbildung 2 werden dabei vernachlässigt. Resistenz sollte demnach eher als Teil der Resilienz gesehen werden, da die Dynamik der Entwicklungen nach Eintritt von Schocks oder widrigen Ereignissen nicht mehr Teil der Resistenz ist, sondern dem Gesamtkonzept der Resilienz zuzuordnen wäre.

2.1.4. Gesellschaftliche Relevanz von Resilienz

Vielfach bestätigen Beiträge und Studien, dass die heutige Gesellschaft durch die voranschreitende Digitalisierung, den demographischen Wandel und den Klimawandel längst nicht nur positiv beeinflusst, sondern vielmehr ebenfalls mit weitreichenden, oft noch völlig unbekannten Risiken konfrontiert wird (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014), (Leyh & Bley, 2015), (BSI, 2018). Vor diesem Hintergrund kann das übergeordnete Konzept der Resilienz helfen, die steigenden Erwartungen der Bevölkerung in Bezug auf Sicherheit im täglichen Leben und Antizipation von widrigen Ereignissen zu erfüllen.

Die Tragweite von technischen Neuerungen bzw. gesellschaftlichen Veränderungen hat mittlerweile ein globales Level erreicht, sodass Entscheidungen für oder gegen bestimmte Technologien, politische Maßnahmen oder Lebensweisen einen immensen Einfluss auf alle Ebenen des Zusammenlebens weltweit haben können. Die voranschreitende Vernetzung innerhalb all dieser Ebenen, aber auch der zunehmend fließende Übergang zwischen verschiedenen Gesellschaftsbereichen eröffnet gleichermaßen neue Chancen und Risiken. Resilienz verknüpft dabei den Anspruch, dass verschiedene Interessengruppen diese Chancen nutzen und sich im selben Moment vor etwaigen Risiken schützen können (Walker & Salt, 2006).

Dieser Zusammenhang wird, wie einleitend erwähnt, etwa seit der Jahrtausendwende zunehmend auch von der Politik und in der Wirtschaft erkannt, was dem Resilienzbegriff in den letzten Jahren zu erheblicher Prominenz im gesellschaftlichen Diskurs verhalf. Insbesondere der Verwendung in Bezug auf die kritischen Infrastrukturen kommt dabei eine Sonderrolle zu (BMI, 2009), (Hirschl B. et al., 2018), (BMBF, 2018).

Auffallend different ist dabei das Betrachtungsfeld einiger Resilienzforscher*innen: Teilweise zielen Resilienzüberlegungen ausschließlich auf den Umgang mit drastischen Krisen, bspw. Extremwetterereignissen oder Naturkatastrophen ab (vgl. u.a. (National Research Council, 2012), (Cutter, et al., 2013), (Orencio & Fujii, 2013), (Florida Division of Emergency Management, 2017)). Demgegenüber steht der Ansatz, dass Resilienz sowohl den Schutz vor Extremereignissen, wie auch eine Optimierung des alltäglichen Lebens umfassen sollte (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014), (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014), (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017)). Ein möglicher, wenn auch nicht bestätigter Grund hierfür könnte in der räumlichen Trennung und damit verschiedenen öffentlichen Wahrnehmungen der Autoren liegen. Auf der einen Seite Forscher*innen in Regionen der Welt, die zuletzt häufiger Opfer von außerordentlichen und katastrophalen Ereignissen wurden (bspw. USA & Japan: „Resilienz als Schutz vor Katastrophen“), andererseits Wissenschaftler*innen in seltener betroffenen Gebieten (v.a. Mitteleuropa: „Resilienz als ganzheitlicher Optimierungsansatz“). (Brand, Hoheisel, & Kirchhoff, 2011) kritisieren den Resilienzansatz als durch seine historische Entwicklung teilweise kulturell beeinflusst und einseitig, was im weiteren Verlauf dieser Arbeit jedoch nicht weiterverfolgt wird, da der Fokus im europäischen Kulturkreis und darin konkret auf der Resilienz von Energiesystemen liegen soll.

Die vielschichtige deutsche Energiewende – und damit verbunden auch die Energiesicherheit in den kommenden Jahrzehnten – erscheint geradezu prädestiniert für Resilienzbeachtungen, was nicht zuletzt an der hohen Zahl von Veröffentlichungen in diesem Forschungsgebiet erkennbar ist (u.a. (Pflüger, 2013), (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014), (Thoma, 2014), (Binder, Mühlemeier, & Wyss, 2017), (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017)). Die Richtigkeit und Wichtigkeit der Energiewende und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Umsetzung von Maßnahmen für den Umweltschutz stehen mittlerweile kaum noch zur Debatte (AEE, 2018). Dies bestätigt sich nicht zuletzt durch das Aufkommen der aktuellen, weltweiten Klimademonstrationen („Fridays For Future“).⁸ Gleichzeitig offenbaren sich allerdings neue, dringende Fragen darüber, wie tiefgreifende Veränderungen, z.B. digitale, vernetzte Systeme, einen positiven Beitrag leisten und gleichzeitig die von ihnen ausgehenden Risiken minimal gehalten werden können (Hirschl B. et al., 2018). Nach Ansicht verschiedener Experten bietet Resilienz mit seinem interdisziplinären und branchenübergreifenden Ansatz hier einen essentiellen Vorteil (z.B. (Scharte & Thoma, 2016), (Vugrin, Critical Infrastructure Resilience, 2016)). (Hollnagel, 2014) und (Rose, 2016) argumentieren, dass (insbesondere ingenieurstechnische) Resilienzbeachtungen für jegliche Systeme menschlichen Ursprungs vorgenommen werden können, unabhängig von deren Größe oder Ausmaß.

Wie (Edwards, 2009), (Baban, 2014) und (MTRS, FAC, TCD, UoW, 2015) allerdings darlegen, herrscht in der Bevölkerung, aber auch in Politik und Wirtschaft – trotz verschiedenster Konzepte zur praktischen Anwendung von Resilienzstrategien – Unsicherheit, wie die oft eher allgemein formulierten Potentiale konkret in das tägliche Leben und die tägliche

⁸ <https://www.tagesschau.de/inland/klimastreiks-friday-for-future-105.html>, abgerufen am 21.09.2019

Arbeit integriert werden können. Unterstützend können dabei vorausschauende Modelle und möglichst trennscharfe Bewertungskriterien wirken, die im nächsten Abschnitt näher beleuchtet werden.

2.2. Modelle zur Beschreibung von Resilienz

Eine Reihe von Modellen beschäftigt sich vordergründig mit den unterschiedlichen Phasen der Resilienz eines Systems. Eine der ersten Darstellungen durch (Holling, 1986), (Holling, 2001) beschreibt unterschiedliche Resilienz-Stufen im Zusammenhang mit Ökosystemen. Dabei durchläuft das System iterativ vier Phasen, die vordergründig durch die beiden Dimensionen „Potential“ und „Verbundenheit“ beschrieben werden. Basierend auf diesem „Adaptive Cycle“ erarbeitete (Edwards, 2009) später ein häufig aufgegriffenes Modell mit seiner Darstellung des „Social Resilience Cycle“. Demnach wird Resilienz durch die vier Phasen „Mitigation“, „Preparedness“, „Response“ und „Recovery“ beschrieben, also Schadensminimierung, Katastrophenvorsorge, Aktivitäten während und kurz nach dem Schockereignis, sowie die Erholungs- und Wiederaufbauphase. Diese Darstellung forciert eine zyklische, kontinuierliche Vorstellung der Resilienz und ermöglicht die Vorstellung, dass ein System aus Erfahrungen lernen und das Gelernte nach der „Recovery“-Phase in einer neuen „Mitigation“-Phase umsetzen kann.

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, bedient sich das Fraunhofer Institut für Kurzzeiddynamik in (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014) einer aus fünf Phasen bestehenden Abwandlung, die in der Dimension „Mitigation“ eine Unterscheidung zwischen „Prevent“ und „Protect“ vornimmt. Diese Modellgruppe kann insofern kritisch betrachtet werden, da sie Resilienz als über Phasen hinweg statische Eigenschaft darstellt, während (Edwards, 2009) selbst argumentiert, Resilienz vielmehr als dynamisches Konstrukt anzusehen.

Damit ein System in Bezug auf seine Resilienz überprüft werden könne, sei es zunächst von großer Wichtigkeit, festzustellen, „welche Subsysteme aus welchen Gründen gegenüber welchen Gefahren in welchem Maße anfällig und verwundbar“ seien, argumentieren (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, Resilienz - Internationale Perspektiven, 2014).

(Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014) bieten Unterscheidungsmöglichkeiten für Schockereignisse, die für die Resilienzbetrachtung von Bedeutung sind und leiteten daraus vier entscheidende Teilaspekte von Resilienz ab.

So differenzieren die Autoren Schock- bzw. Stressfaktoren in:

- *Bekannte* oder erwartete, die ein System bereits in der Vergangenheit erlebte und Voraussagen für die Zukunft bereits vorhanden sind
- *Unbekannte* oder unerwartete, die ein System noch nie oder extrem selten erlebte und es keine Voraussagen für zukünftige Vorkommen getroffen werden können

- *Schleichende* oder allmähliche, die sich langsam entwickeln und potentiell länger unentdeckt bleiben
- *Abrupte* oder plötzliche, die ohne Warnung und unerwartet auftreten.

Daraus ergeben sich vier zentrale Fähigkeiten, die jeglichem System ermöglichen sollen, besser mit vielfältigen Stressfaktoren umzugehen, namentlich Anpassungsfähigkeit, Innovationsfähigkeit, Improvisationsfähigkeit und Resistenz bzw. Widerstandsfähigkeit (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014).

Stressfaktor	Bekannt	Unbekannt
Langsam/schleichend	Anpassungsfähigkeit	Innovationsfähigkeit
Abrupt/plötzlich	Widerstandsfähigkeit	Improvisationsfähigkeit

Tabelle 1: Fähigkeiten eines resilienten Systems, eigene Darstellung nach (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014)

Daneben stehen Modelle, die Resilienz aus völlig anderer Sicht beschreiben, wie beispielsweise als „Brückenkonzept“ (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014) oder die wellenhafte Entwicklung des Resilienzkonzepts, das sich im Lauf der Zeit in seinem Begriffsverständnis ändert (Coaffee, 2013). Zudem bieten (Walker, Holling, Carpenter, & Kinzig, 2004) eine unkonventionelle Darstellung, indem sie eine „Resilienzlandschaft“ mit Hilfe von vier Dimensionen kreieren („Latitude“, „resistance“, „precariousness“, und „panarchy“).

Im Hinblick auf die Resilienz kritischer Infrastrukturen benennt (Pflüger, 2014) „Sieben Gefahren für die Energiesicherheit“⁹ und beschreibt anschließend „Sieben Maßnahmen für resiliente Energiesysteme“¹⁰. (Lovins & Lovins, 1982) beschreiben ebenso zwölf Faktoren, die zu einer hohen Fehleranfälligkeit von heutigen Energiesystemen führen und somit gemindert werden müssten. (Linkov, et al., 2014) schlagen eine schematische Darstellung vor, mit der die Systemresilienz auf Basis unterschiedlich ausgeprägter Auswirkungen von Schockereignissen differenziert werden kann. All diesen Betrachtungen ist eine stark qualitative Ausrichtung bzw. ein relativ unspezifischer Umgang mit der Resilienz gemein. Zwar werden häufiger Dimensionen identifiziert, diese jedoch anschließend kaum durch messbare Größen und Variablen beschrieben.

Mit Hilfe des „Territorial Resilience Index“ des Haut Comité Français pour la Défense Civile (HCFDC) wurde ein ansatzweise quantifizierbares Maß für Resilienz entwickelt, das eine Bewertung der beiden Dimensionen „Gravity“ und „Reactivity“, basierend auf einem Online-Fragebogen mit über 350 Fragen, ermöglicht. Diese erschließen sich aus acht Variablen, die beide Dimensionen beschreiben und selbst wiederum durch messbare Indikatoren definiert werden. Deren Ausprägungen können mit Hilfe des Fragebogens erhoben werden. Das Vorgehen liefert im Endeffekt jedoch keinen Wert für das Maß der Resilienz eines

⁹ (Pflüger, Resilience - Der Schlüssel zur Energiesicherheit, 2014, S. 116 - 118)

¹⁰ (Pflüger, 2014, S. 118 - 120)

Systems, sondern eine mehr oder weniger quantitativ begründete Aussage, ob das betrachtete System resilient ist oder nicht.

Einen komplexeren Ansatz zur Quantifizierung des Begriffs liefert (Chand, 2006) mit dem „Index of Economic Resilience“. Auch er nutzt die Herangehensweise, identifizierte Dimensionen der Resilienz mit messbaren Variablen zu quantifizieren. Im Falle des von (Briguglio, Cordina, Farrugia, & Vella, 2009) vorgeschlagenen, alternativen „Index of Economic Resilience“ werden ökonomische Kenngrößen wie das Bruttoinlandsprodukt, Inflationsrate und Staatsschulden genauso herangezogen wie soziale (Arbeitslosigkeit und Human Development Index). Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden die Systeme schließlich anhand der Dimensionen Vulnerabilität und Resilienz in den Quadranten „Worst-Case“, „Self-Made“, „Prodigal Son“ (englisch „verlorener Sohn“) und „Best-Case“ verortet.

Weitere Pilotprojekte wie der „Critical Infrastructure Resilience Index“, der „Resilience Policy Index“, der „Community Disaster Resilience Index“ oder der „Baseline Resilience Index“ versuchen ebenso einen quantifizierbaren Ansatz für die Messung von Resilienz zu bieten, was ihnen für den jeweils untersuchten Einzelfall auch gelingt (u.a. (Mayunga, 2007), (Bara & Brönnimann, 2011)). (Pant, Barker, & Zobel, 2013) nutzen zur Bestimmung von Resilienz ein dynamisches Verhältnis zwischen Funktionsverlust („Loss of Function“) und der Dauer bis zur Systemerholung („Time to Recovery“). Es sei nach Aussage der Autoren jedoch davon abzuraten, die dort eingeführten Kriterien beliebig auf andere Bereiche auszuweiten, da Resilienz bis dato häufig einer auf den Einzelfall angepassten Betrachtung bedarf. Die Organisation Internationale de Normalisation (ISO) geht genau den entgegengesetzten Weg und hat insbesondere mit ihren Normen ISO 22300 (Security and Resilience) und ISO 27000 (Information Security Management Systems, ISMS) Rahmenwerke vorgestellt, in denen explizit auf die universelle Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Konzepte hingewiesen wird.¹¹ Gleichzeitig wird dieser universale Ansatz skeptisch gesehen, da die Anwendung auf spezifische Systeme ggf. wichtige Zusammenhänge oder besondere Eigenschaften nicht hinreichend berücksichtigt (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014).

Dieser schematische Überblick über einige der in der Literatur vorgeschlagenen Modelle zeigt vor allem eines: Ein universelles Konzept zur Beschreibung oder sogar Berechnung von Resilienz zu finden, ist nicht wirklich möglich. Nach Ansicht von (Bara & Brönnimann, 2011) kann die Quantifizierung eines so komplexen Konzepts wie der Resilienz mitunter sogar kontraproduktiv sein, da die „Messbarkeit“ nur durch eine Vereinfachung des Begriffs möglich wird. Dies führe wiederum zu einer Verzerrung des Ausgangskonzepts liefere und nur in einem speziellen Kontext oder unter vielen Prämissen verwertbare Ergebnisse.

Auch (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010) kommen zu dem Ergebnis, dass Modelle nur Sinn machen, wenn sie auf ein bestimmtes System unter konkreten Umständen maßgeschneidert werden, um die Wahl der Charakteristika auf den Einzelfall abzustimmen und die jeweiligen Einflussfaktoren realitätsnah zu definieren.

¹¹ Iso.org, abgerufen am 03.09.2019

2.3. Kriterien zur Bewertung von Resilienz

Resilienz kann als spezifische Umgangsform mit Risiko bezeichnet werden, wobei „Risiko“ nach Angaben des Bundesinstituts für Risikobewertung dem Produkt aus Ausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens entspricht (Scheer, Gold, Benighaus, Benighaus, & Renn, 2010). Der Umgang mit Risiken in immer komplexeren, vernetzten Systemen ist dabei für Unternehmen ein wichtiges, doch oft schwieriges und ressourcenaufwendiges Unterfangen (Henschel, 2010). Laut einer Studie des Bundesverbands der Deutschen Industrie e.V. (BDI) und der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft PricewaterhouseCoopers AG (PwC) waren weniger als 300 von über 1.000 befragten mittelständischen Unternehmen 2011 mit dem internen Risikomanagement zufrieden, insbesondere in den Bereichen Risikobewertung, -vermeidung und -reduzierung besteht demnach Handlungsbedarf (BDI & PwC, 2011).

Die triviale Nutzung von Kriterien zur Unterscheidung von Systemen offenbart im Falle der Resilienz – je nach Anwendungsgebiet – differente Konkretisierungsstufen. Für eine praktikable Resilienzbewertung in einem System erscheint es im Vorfeld sinnvoll, einen konkreten Rahmen bzw. Gültigkeitsbereich zu definieren, der einerseits die Potentiale und Ausmaße eindeutig bestimmt, andererseits jedoch auch Grenzen und Herausforderungen festlegt (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014).

Es ist hervorzuheben, dass eine Ausweitung oder Eingrenzung bestimmter Faktoren erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse sowie die generelle Bewertungsmethodik haben kann. Um jedoch aus der reinen Theorie eine praxisnahe Modellierung mit realitätsbezogener Anwendbarkeit abzuleiten, ist eine Fokussierung auf bestimmte Gesichtspunkte unumgänglich. In Kapitel 2.2 wurde deutlich, dass eine Vielzahl der in der Literatur vorgeschlagenen Modelle zur Resilienzbetrachtung auf bestimmten, mehr oder weniger universellen Systemeigenschaften beruht. Die jeweilige Ausprägung dieser Charakteristika bildet dabei die Grundlage zur Bestimmung der Resilienz eines Systems. Je nach Ziel und gewünschtem Ressourcenaufwand können bei der Definition und Auswahl von Kriterien zwei Extreme unterschieden werden. Einerseits ermöglichen wenige, übergeordnete Kriterien eine einfache, zeitsparende Einschätzung der Systemresilienz, können aber kaum für wichtige Erkenntnisse, bspw. konkrete Investitionsentscheidungen oder Veränderungsprozesse, zu Rate gezogen werden. Auf der anderen Seite ermöglichen viele Kriterien zwar eine realitätsnahe Abbildung der Wirklichkeit, erfordern aber bei komplexeren Systemen einen erheblichen Zeit- bzw. Ressourcenaufwand. Zudem ist eine Resilienzbetrachtung mit einer Vielzahl von spezifischen Kriterien oft schwerer auf andere Systeme übertragbar.

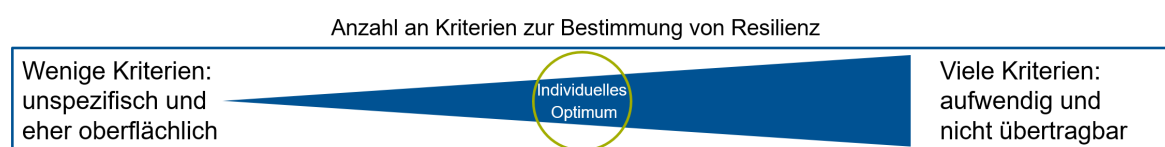


Abbildung 3: Schematische Übersicht zur Definition einer geeigneten Anzahl an Kriterien zur Bestimmung von Resilienz

Zur Quantifizierung der Resilienz eines Systems sollten zunächst einige Rahmenbedingungen festgelegt werden. Zentral ist die Festlegung konkreter Ergebnisse, die durch eine Resilienz Betrachtung erzielt werden sollen. Weiterhin sollten auch individuelle Systemeigenschaften und der Betrachtungshorizont festgelegt bzw. berücksichtigt werden. Je nach Bedarf ist es mitunter ratsam, neben allgemeingültigen Resilienz-Kriterien weitere spezifische Charakteristika, die essentiellen Einfluss auf die individuelle Systemperformance haben, zur Bewertung hinzuzufügen (Scharte & Thoma, 2016).

Insgesamt wurde in der Literaturrecherche deutlich, dass verschiedene wissenschaftliche Arbeiten eine große Zahl von Kriterien anführen, die für eine Vielzahl von Systemen Aussagen über das Resilienzmaß liefern sollen. Zum Teil lassen sich diese auf verschiedene (technische, ökonomische, gesellschaftliche, ökologische, usw.) Systeme anwenden, zum Teil nur auf sehr spezielle. So bieten beispielsweise (Fichter, von Gleich, Pfriem, & Siebenhüner, 2010) dehnbare Begriffe wie „Vielfalt“, „Redundanzen“ oder „Innovationsfähigkeit“, während andere Autoren eher spezifisch zu „einfacher Identifizierung und Isolierung von versagenden Komponenten“ oder einem funktionierenden „Dialog zwischen Energieimporteuren und -Exporteuren“ raten (u.a. (Lovins & Lovins, 1982), (Pflüger, 2013)).

Die Inkonsistenz bzw. das Fehlen einer einheitlichen Vorgehensweise zur Bewertung des Resilienzkonzepts bezeichnen (Hatton, et al., 2018) als Folge des verhältnismäßig kurzen Zeitraums, seit dem sich die Resilienzforschung mit dem Bereich der kritischen Infrastrukturen auseinandersetzt. Hier setzt die vorliegende Arbeit mit Hilfe der zuvor eingeführten theoretischen Konzepte an, um eine fundierte und zweckdienliche Methodik zur Bewertung von Resilienz in Energiesystemen zu erarbeiten und diese anhand eines Fallbeispiels praktisch anzuwenden. Dafür werden die zuvor überwiegend allgemeinen Ausführungen und vermittelten Erkenntnisse im Folgenden auf Energiesysteme übertragen.

3. Bewertung von Resilienz in Energiesystemen

Die Relevanz eines „sicheren“ Energieversorgungssystems ist in der heutigen Gesellschaft unangefochten und bildet den Hauptgrund für die Vielzahl wissenschaftlichen und praktischen Auseinandersetzungen mit diesem Thema. Im spezifischen Kontext von Energiesystemen bieten Resilienz Betrachtungen hervorragende Möglichkeiten zur Sicherstellung funktionierender Systemprozesse und deren Optimierung, sowohl in Bezug auf die Versorgungssicherheit, ökonomische Erhebungen als auch alltägliche Arbeitsweisen.

3.1. Relevante Einflussfaktoren für die Resilienzbewertung in Energiesystemen

Potentielle Risiken, Definitionen zum Schadensausmaß und Ansätze zur Monetisierung von Schäden variieren je nach Anwendungsgebiet und lassen teilweise erheblichen Spielraum bei der Konkretisierung für bestimmte Betrachtungshorizonte (Berg, et al., 1995). Für die Bewertung einer sicheren und kontinuierlichen Energieerzeugung und -versorgung wird im Folgenden ein Geflecht vorgeschlagen, dass – bewusst vereinfacht – relevante Aspekte und deren gegenseitige Verknüpfung im Hinblick auf eine resilienzbezogene Schadensbetrachtung veranschaulichen soll. Den Ausgangspunkt bilden dabei die Auslöser für einen potentiellen Systemschaden, sogenannte Stressfaktoren. Die benannten Aspekte und deren Verknüpfungen leiten sich von den in Kapitel 2 eingeführten Konzepten, Begrifflichkeiten und Zusammenhängen ab.

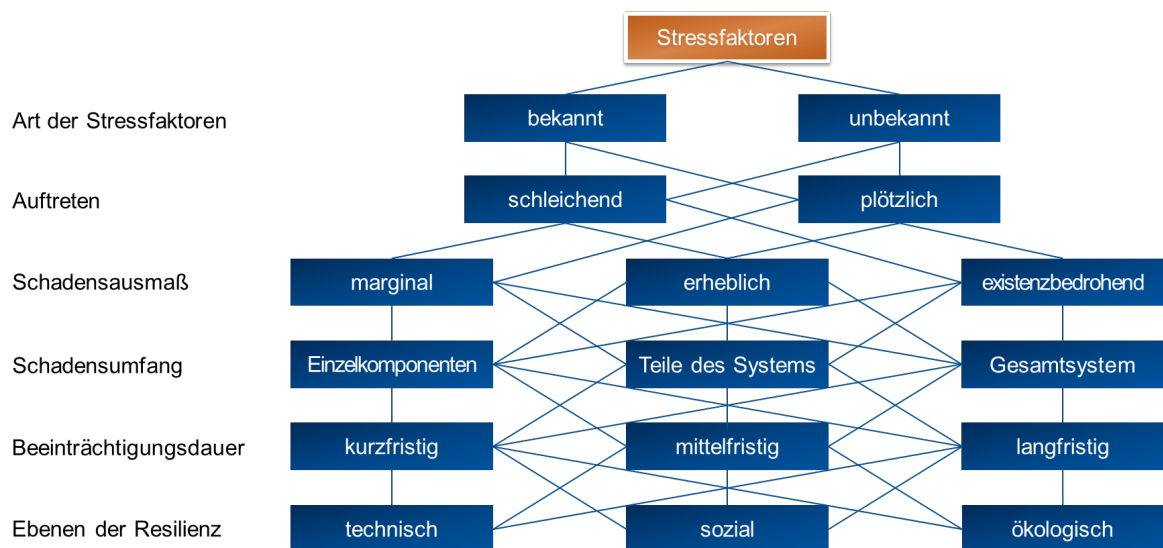


Abbildung 4: Unterscheidung von Aspekten der Resilienz Betrachtung und deren gegenseitigen Verknüpfungen

Wie (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014) beschreiben, können Stressoren bei ihrem Auftritt bereits bekannt, oder gänzlich unbekannt sein und sowohl

schleichend, aber auch sehr abrupt auftreten. Ein Beispiel für „bekannte“ Stressoren wäre ein Sturmgewitter, das bspw. durch umstürzende Gegenstände „plötzlich“ Stromleitungen zerstört. Hier können, bspw. anhand von regionalen Klimadaten, Eintrittswahrscheinlichkeiten angenommen und vorausschauende Maßnahmen getroffen werden. Unbekannte Stressfaktoren können praktisch nicht mit Eintrittswahrscheinlichkeiten taxiert werden, da sie unvorhersehbar auftreten (siehe oben). Aufgrund ihrer „Unbekanntheit“ werden hier keine konkreten Beispiele genannt, doch sei bspw. auf die bis dato nicht vollständig abschätzbaren Folgen des Klimawandels verwiesen (Buth, Greiving, & Zebisch, 2015).

Da Energiesysteme einen integralen Teil der kritischen Infrastrukturen bilden, erfolgt die konkrete Unterscheidung von zu betrachtenden, widrigen Ereignisse im vorliegenden Konzept auf Grundlage des Standards 100-4 – *Notfallmanagement* des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Der BSI Standard 100-4 bietet für die „Unterbrechung von Geschäftsprozessen“¹² vier Differenzierungen:

- *Störungen*, in denen Prozesse oder Ressourcen im Normalbetrieb nicht wie geplant funktionieren mit geringen Auswirkungen können zeitnah behoben werden.
- Bei *Notfällen* kann dem BSI zufolge die Funktion von Prozessen oder Ressourcen über einen längeren Zeitraum nicht vollumfänglich wiederhergestellt werden, sodass der Geschäftsbetrieb mitunter erheblich beeinträchtigt wird.
- *Krisen* sind vom Normalzustand abweichende Situationen, die nicht durch bestehende Ablaufpläne behoben werden können, sondern für die lediglich grobe Weisungen im Rahmen des Krisenmanagements bestehen – häufig einmalige Ereignisse, die mitunter die Existenz des Systems gefährden können.
- Final wird eine *Katastrophe* als zeitlich und räumlich kaum abzugrenzendes Großschadensereignis definiert, wobei die Systemexistenz oder die Gesundheit von Personen gefährdet sind und die Situation nicht mehr durch die Organisation allein bewältigt werden kann (BSI, 2008).

Diese Unterscheidung spiegelt sich in Abbildung 4 wider, mit der Differenzierung des Schadensausmaß in marginale (entspricht *Störungen* im BSI Standard 100-4), erhebliche (*Notfälle*) und existenzbedrohende (*Krisen* und *Katastrophen*) Schäden, die entweder Einzelkomponenten, Teile des Systems oder das Gesamtsystem betreffen können.

Die Dauer der Beeinträchtigung des Systems durch einen Stressfaktor ist ein weiterer, essentieller Aspekt bei der Evaluierung von Schadensauswirkungen, basierend auf der Annahme, dass kurzfristige Beeinträchtigungen des Systems in der Regel verhältnismäßig geringere Schäden verursachen als langfristige. Hier setzt das BSI zur Erfassung der Funk-

¹² (BSI, 2008, S. 4 - 5)

tionalitätsrückgewinnung nach einem Schockereignis auf die Festlegung von Wiederanlaufparametern, die sicherstellen, dass die Überlebensfähigkeit eines Systems nicht mittel- oder langfristig gefährdet wird (BSI, 2008).

Zuletzt ist die Betrachtungsperspektive – in Abbildung 4 als „Ebenen der Resilienz“ bezeichnet – von entscheidender Bedeutung. Die Beschränkung oder Erweiterung der zu eruiierenden Teilbereiche einer Organisation bei der Resilienzbewertung hat erheblichen Einfluss auf den Umfang, aber auch auf die Übertragbarkeit der erarbeiteten Erkenntnisse in die Realität. (BMBF, 2015), (Thoma, 2014), (Hirschl B. et al., 2018) und weitere Autoren argumentieren, dass die ausschließliche Betrachtung einzelner Teilaspekte kaum praktischen Nutzen hat, da die vielfältigen gesellschaftlichen Verknüpfungen der verschiedenen Ebenen damit außer Acht gelassen würden. Insbesondere der zuletzt stark wachsende Anspruch an eine nachhaltige Entwicklung auf allen Ebenen des Zusammenlebens solle sich daher auch in Resilienzüberlegungen widerspiegeln (BMBF, 2015). Die „Drei Dimensionen der Nachhaltigkeit“ für Innovation und nachhaltiges Wachstum von Organisationsstrukturen, namentlich ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit, bieten hier einen guten Ausgangspunkt (aus: (World Commission on Environment and Development, 1987), (Deutscher Bundestag, 1998)). Politische Nachhaltigkeitsdiskussionen und Positionspapiere rücken im Zuge des allgegenwärtigen Klimawandels vor allem die sozioökologische Perspektive von Resilienz in den Vordergrund (BMBF, 2015), (BMW, 2018). Durch den internationalen Wettbewerb sehen sich (v.a. ökonomisch orientierte) Unternehmen darüber hinaus zusätzlich einem enormen Innovations- und Effizienzdruck ausgesetzt, der insbesondere in der deutschen Wirtschaft zu großen Teilen auf technischen Neuerungen und Prozessoptimierungen basiert (Henzelmann & Büchele, 2009), (Kube, et al., 2017).

Für die Bewertung der Resilienz von Energiesystemen aus wirtschaftlicher Sicht werden des Öfteren quantitative Kosten-Nutzen-Analysen vorgeschlagen, die vielfach auf Risikoanalysen aufbauen (Zhang, Yuan, Li, & Lin, 2018), (Gößling-Reisemann, 2016). Solche Risikoanalysen haben sich im unternehmerischen und politischen Kontext bereits vor dem Aufkommen der interdisziplinären Resilienzforschung etabliert (Renn, 2008) und bilden nach Ansicht verschiedener Experten valide Grundlagen für bzw. sogar Erweiterungen von Resilienzbetrachtungen. Im selben Zuge weisen diese Autoren jedoch darauf hin, dass es gerade für die Bewertung von seltenen oder unvorhersehbaren Schäden nur begrenzte Anhaltspunkte gibt (Scharte & Thoma, 2016), (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017). Eine ausschließlich quantitative, leistungsorientierte Vorgehensweise bei Kosten-Nutzen-Analysen beinhaltet laut (Vugrin, 2016) außerdem häufig komplexe, computerbasierte Systemmodelle, die den Erhebungsaufwand mitunter erheblich steigern oder Kaskadeneffekte von Ereignissen oft nur begrenzt berücksichtigen.

Adam Rose unterscheidet in seinen Ausführungen zur Bewertung von (ökonomischer) Resilienz einerseits in inhärente Resilienz (das heißt dem System an sich eigene Resilienz, bspw. Möglichkeit der Benutzung verschiedener Brennstoffe in einer Energieerzeugungs-

einheit) und adaptive Resilienz (aktive Anpassung, z.B. neue Vorgehensweisen oder Erweiterungen).¹³ Außerdem argumentiert er, dass diese Arten der Resilienz sowohl in der mikroökonomischen (z.B. in Unternehmen, Haushalten, Regierungsabteilungen), der mesoökonomischen (u.a. in Branchen und Märkten), als auch in der makroökonomischen Ebene (in der Gesamtwirtschaft) auftreten und gefördert werden können (Rose, 2016).

Ebenso ist Gegenstand von Diskussionen, inwieweit Systemschäden mit Berechnungen von Kosten (z.B. Opportunitätskosten, Reparaturkosten, Kosten alternativer Energiebereitstellung, usw.) aufgewogen werden können bzw. welche Einflussfaktoren hierbei einzubeziehen sind (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014). Spätestens bei der Berücksichtigung von Personenschäden oder Menschenleben stößt ein solcher, ausschließlich monetärer Ansatz an ethische Grenzen und erfordert möglicherweise weitere Bewertungsparameter (Berg, et al., 1995).

Trotz dieser Hindernisse und ungelöster Konflikte stimmen Autoren darin überein, dass der monetäre Vergleich von Risiken, Kosten und Nutzen einen entscheidenden Faktor zur tatsächlichen Umsetzung von Resilienzmaßnahmen zur Verbesserung von Systemen bildet (National Research Council, 2012), (Lee, Vargo, & Seville, 2013).

Modelle und Vorschläge für konkrete Resilienzsteigerungen finden sich bis dato vielfach in Bezug auf lokale, nationale oder transnationale Stromnetze als Grundpfeiler der Versorgungssicherheit (Bie, Lin, & Li, 2017) (Chanda & Srivastava, 2016) (Panteli, Trakas, Mancarella, & Hatziaargyriou, 2017). Die Resilienz von Energiesystemen in Unternehmen wird demgegenüber bis dato überwiegend in allgemeinen Richtlinien behandelt und selten konkretisiert (siehe oben), was vor allem mit der heterogenen Struktur innerhalb der Wirtschaft erklärt werden könnte. Um derartige Betrachtungen vermehrt in die Agenda von wirtschaftlich orientierten Organisationen aufzunehmen, argumentieren (Lee, Vargo, & Seville, 2013) und (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014), dass Investitionen in resilienzfördernde Maßnahmen ökonomische Vorteile ermöglichen müssten.

Die vorliegende Arbeit bietet ein Bewertungskonzept, um insbesondere in Unternehmen oder öffentlichen Einrichtungen mit mittleren bis hohen Energieverbräuchen sowie in Betrieben mit eigenen Energieversorgungsanlagen betriebsinterne Kennzahlen zur Resilienz zu erheben. Darauf basierend können anschließend gegebenenfalls ökonomisch nachhaltige, systemspezifische Optimierungspotentiale identifiziert und umgesetzt werden.

3.2. Festlegungen für die Resilienzbewertung in dieser Arbeit

Die Funktionalität der Energieversorgung einer Organisation, bspw. eines Unternehmens, bildet eine integrale Basis für dessen nachhaltige Geschäftstätigkeit. Um dem Anspruch

¹³ (Rose, 2016, S. 199 - 200)

einer aussagekräftigen, gleichzeitig aber aufwandsgerechten Resilienzbewertung zu genügen, werden im weiteren Verlauf einige Grenzen der Betrachtung festgelegt.

Es gibt mittlerweile – auch durch stetig erweiterte gesetzliche Rahmenbedingungen – eine Vielzahl von Standards und Richtlinien zum Verhalten im Krisen- oder Katastrophenfall, die sowohl branchenspezifische als auch allgemeine Aussagen und Empfehlungen beinhalten (z.B. (BSI, 2008), ISO 22316:2017, ISO/IEC 22301, (Hirschl B. et al., 2018)). Vielen ist dabei gemein, dass sie auf die Notwendigkeit einer unternehmensinternen Spezifizierung hinweisen, ohne konkrete Maßnahmen oder Anknüpfungspunkte dafür zu benennen. Der Fokus des folgenden Resilienzkonzepts liegt daher in der Unterstützung von Unternehmen, eigenständig unternehmensrelevante Schadensszenarien, deren Auswirkungen sowie Optimierungspotentiale zu identifizieren.

Auf Basis der in (BSI, 2008) gegebenen begrifflichen Definitionen von Schadenssituationen werden existenzbedrohende Ereignisse mit Auswirkungen auf das Gesamtsystem nicht näher betrachtet, um die Relevanz von Resilienzbetrachtungen im täglichen Betrieb gegenüber gravierendsten und extrem seltenen Ausnahmesituationen in den Vordergrund zu stellen. Dieses Vorgehen folgt den Ausführungen von (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014), die angeben, dass Organisationen der Privatwirtschaft in der Regel kurzfristiger planen als bspw. der Staat. Entsprechend dieser Logik spielen langfristige, systemübergreifende katastrophale Auswirkungen aufgrund ihrer relativen Seltenheit für die praktische Betrachtung im alltäglichen Arbeitsumfeld von Unternehmen keine Rolle.

Wie zuvor eingeführt, kann und sollte die Resilienz eines Systems aus verschiedensten Perspektiven beleuchtet werden, um der Komplexität heutiger, oftmals vernetzter Systeme gerecht zu werden. Gleichzeitig stellen verschiedene Autoren vor allem im Hinblick auf energiesystemische Betrachtungen die bilaterale, soziotechnische Dimension in den Vordergrund (vgl. (Lee, Vargo, & Seville, 2013), (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014) (Vollmer, et al., 2016), (Hidalgo Rodríguez, Hofmann, Adelt, Myrzik, & Weyer, 2017), u.a.).

(Ferreira & Simoes, 2015) ziehen den direkten Vergleich zwischen einer wachsenden Systemkomplexität und Sicherheitskritikalität aus technischer Sicht zur steigenden Abhängigkeit von den Fähigkeiten und Kompetenzen von menschlichem Bedienpersonal, also organisationalen Gesichtspunkten. Auch (Brandt, Tschiersch, & Henning, 2000) sehen in der Triade aus Technologie, Menschen und Organisation die wichtigsten Aspekte für eine sinnhafte Beschreibung von soziotechnischen Systemen. (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014) argumentieren, dass Unternehmen Resilienz vordergründig als einen Beitrag zu ihrer Aufgabe wahrnehmen, Dienstleistungen zu erbringen, Produkte zu erzeugen und wirtschaftliche Gewinne zu erzielen. Als Haupttreiber gelten dabei funktionierende technische Prozesse, die Identifikation von potentiell systemkritischen Ereignissen sowie aufmerksame und engagierte Mitarbeiter*innen (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014).

Diesem Standpunkt folgend beschränkt sich das vorgestellte Konzept auf die Betrachtung der technischen sowie der organisationalen Ebene. Letztere wird für diese unternehmens-

orientierte Methodik bewusst so bezeichnet, um die extreme Abhängigkeit einer Organisation von seinen Angestelltenstrukturen sowie den Fähigkeiten der einzelnen Mitarbeiter*innen aufzuzeigen. Damit sei auf die Abgrenzung vom Begriff „organisatorisch“ hingewiesen, um das Zusammenspiel von gegebenen Strukturen und den darin agierenden Menschen hervorzuheben, anstatt auf ausschließlich „organisatorische“ Fähigkeiten zu verweisen.

Die daraus resultierenden Festlegungen sind in Abbildung 5 veranschaulicht.

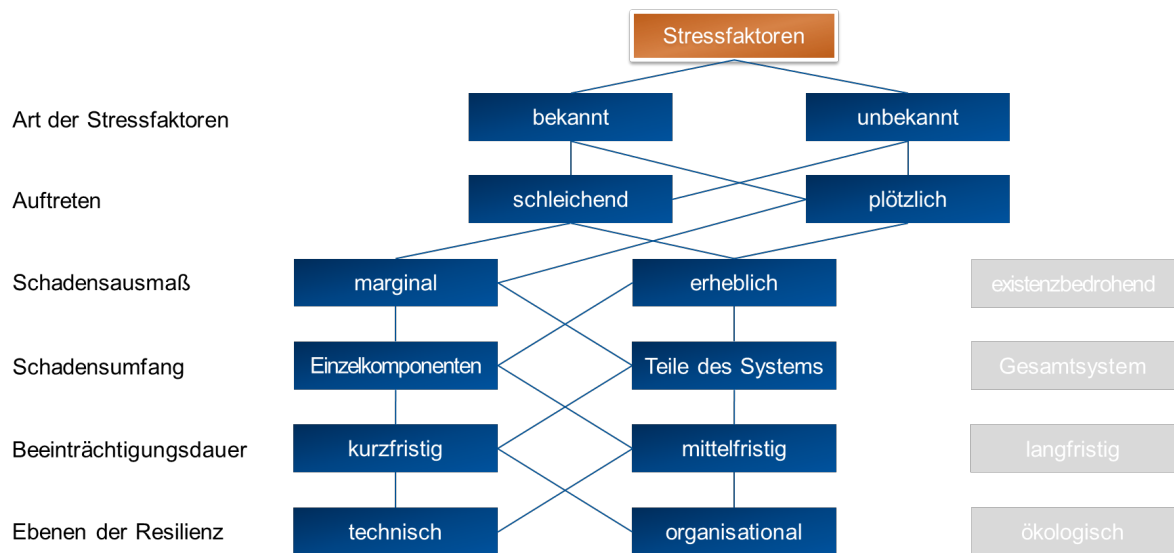


Abbildung 5: Übersicht über die Rahmenbedingungen der Resilienz Betrachtung in der vorliegenden Arbeit

Ausgehend von den zuvor vermittelten, theoretischen Grundlagen des Terminus wird im folgenden Abschnitt ein schrittweiser Ansatz zur Bestimmung der Resilienz von Energiesystemen entwickelt. Dabei ist vorgesehen, die Ansprüche des „Gesamtkonzepts Resilienz“ zu berücksichtigen und insbesondere durch Kosten-Nutzen-Betrachtungen auf Basis des Business Continuity Managements sinnstiftende Erkenntnisse über die Resilienz von Energiesystemen zu gewinnen (vgl. z.B. (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014), ISO 22301).

Die Grundlage für die weiteren Ausführungen im Hinblick auf die Resilienz von Energiesystemen bildet die von (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014) und (Scharte, Hiller, Leismann, & Thoma, 2014) abgeleitete und leicht angepasste, folgende Definition:

Resilienz beschreibt die Fähigkeit, sich auf ein tatsächliches oder potentiell widriges Ereignis vorzubereiten, dessen Auswirkungen zu vermeiden oder zu verkraften, sich von den Folgen zu erholen und sich immer erfolgreicher an künftige Schockereignisse anzupassen.

Es sei für die hier erarbeitete Methodik darauf hingewiesen, dass der Grad der Resilienz eines Systems nicht einmalig festgestellt werden kann, sondern vielmehr in regelmäßigen

Abständen überprüft werden sollte. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass ein System immer wieder – egal, ob vorbereitet oder nicht – neuen Schockereignissen ausgesetzt wird (Gößling-Reisemann & Thier, 2019), was Resilienz betrachten praktisch keine zeitlichen Grenzen setzt und sie somit als nie abgeschlossen gelten können (vgl. dazu den Resilienzyklus nach (Edwards, 2009)).

Um sowohl messbare Ergebnisse für ein Energiesystem zu ermitteln, als auch dem Anspruch der „unvorhersehbaren“ Schockereignisse der Resilienz gerecht zu werden, soll der folgende Ansatz quantitative und qualitative Erhebungen vereinen. Weiterhin wurde festgelegt, dass neben der technischen auch die organisationale Ebene bei der Resilienzbeurteilung berücksichtigt werde, um dem soziotechnischen Aspekt resilienter Organisationen gerecht zu werden. Nichtsdestotrotz bleibt das Ziel weiterhin, die Methodik hinsichtlich des Ressourcenaufwands in angemessenem Rahmen zu halten.

Entsprechend dieser Vorgaben wird ein Mittelweg vorgeschlagen, der die Auswahl von bestimmten Resilienzkriterien vorsieht. Diese sollten möglichst konkrete Systemeigenschaften aufgreifen, gleichzeitig aber sowohl in organisationaler als auch technischer Dimension hinreichend definiert werden können und möglichst auf eine Vielzahl von Organisationen anwendbar sein.

Die Kriterien zur Bestimmung der Resilienz in Energiesystemen sollten in ihrer Art und ihrer Anzahl so gewählt werden, dass sie den technischen und organisationsstrukturellen Aufbau des Systems möglichst realitätsgetreu widerspiegeln und mit angemessenem Aufwand zu ermitteln bzw. zu bewerten sind. Zur Auswahl und Definition der Kriterien wurde einmal mehr einschlägige Literatur genutzt, um treffende Schlagworte zu finden, die in ihrer Begrifflichkeit auf Energiesysteme übertragbar sind. Die gewählten Items stützen sich insbesondere auf die Konzepte von (McManus, Seville, Brunsdon, & Vargo, 2007), (Hill, Wial, & Wolman, 2008), (Mendonça & Wallace, 2015) und (Binder, Mühlemeyer, & Wyss, 2017). Die jeweiligen Ansätze dieser und weiterer Autoren wurden in einem iterativen Diskussionsprozess zu drei Hauptgruppen, im Folgenden Kriteriencluster genannt, verknüpft:

- **Konnektivität** (vor allem interne & externe Vernetzung einzelner Systemkomponenten)
- **Flexibilität** (v.a. Anpassungs- & Handlungsfähigkeit bei ungeplanten Ereignissen)
- **Diversität** (v.a. Verschiedenartigkeit der Komponenten, die das Gesamtsystem bilden).

Diese drei Cluster bilden die Grundlage der präsentierten Bewertungsmethodik und werden im weiteren Verlauf immer wieder aufgegriffen. Um von den umfassenden, relativ unspezifischen Begriffen auf präzisere Systemkonstellationen zu schließen, werden acht zugehörige *Resilienzkriterien* eingeführt, die entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den Kriterienclustern in Abbildung 6 dargestellt sind. Bei der Erarbeitung der Kriterien wird in besonderem Maße Wert auf die Eindeutigkeit und Unterscheidbarkeit der einzelnen Merkmale gelegt.

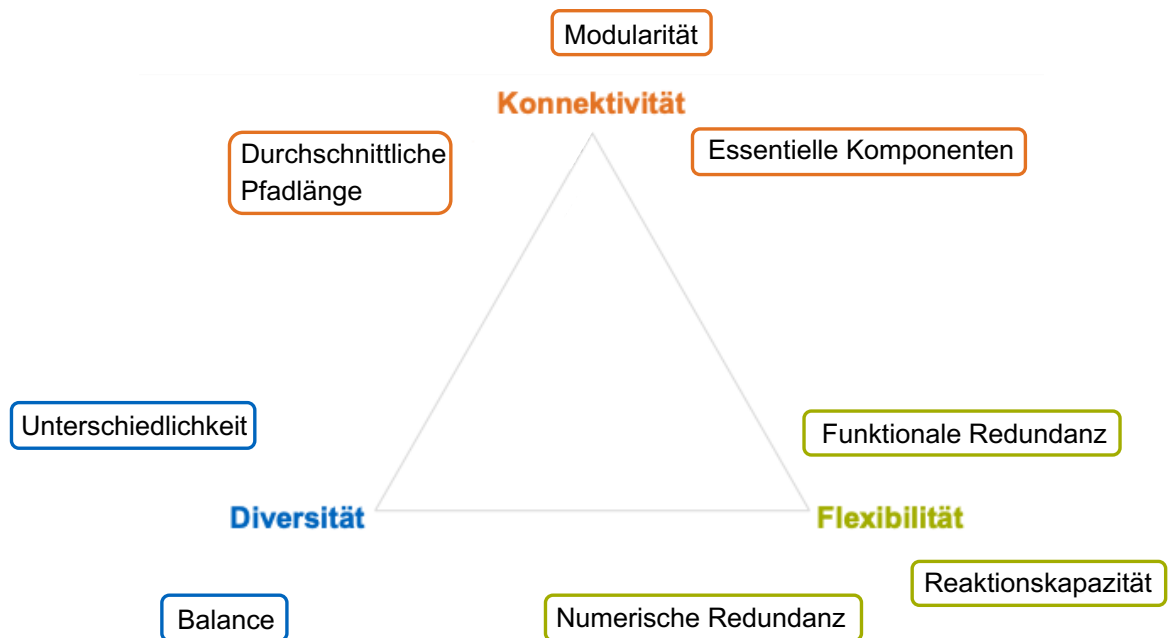


Abbildung 6: Die drei Kriteriencluster und ihre zugehörigen Kriterien zur Bewertung von Resilienz in Energiesystemen

Die eingeführten Cluster und jeweiligen Kriterien bilden den Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen zur Bewertung von Resilienz in Energiesystemen aus organisationaler und technischer Sicht. Die acht Kriterien werden in den folgenden Kapiteln jeweils für den Anwendungsfall in der organisationalen bzw. technischen Resilienzbewertung definiert.

3.3. Bewertungsmethodik für organisationale Resilienz

Laut (Hollnagel, 2014) basiert der Forschungsgegenstand der ingenieurstechnischen Resilienz (engl. Resilience Engineering) auf der Annahme, dass Systeme menschlichen Ursprungs deshalb funktionieren, weil Menschen individuell oder gemeinsam Anpassungen ihres Handelns vornehmen können, um Arbeitsbedingungen zu erfüllen.¹⁴

Diese Aussage untermauert die in Kapitel 3.2 beschriebene Auffassung, dass in einem (Energie-) System neben technischen Anlagen auch Personalstrukturen sowie Fähigkeiten und Kompetenzen der Arbeitskräfte eine entscheidende Rolle für die Resilienz einer Organisation spielen. Gleichwohl stehen Analysen dieser Strukturen und daraus resultierende Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz gerade im Umfeld ökonomisch orientierter Unternehmen vor der besonderen Herausforderung, sich in wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit anderen, profitgenerierenden Aktivitäten zu messen (Kay & Goldspink, 2012). Beispielsweise wäre der konkrete (monetäre) Mehrwert einer Notfallmanagementübung im Vergleich zu den dafür entstehenden Kosten kurzfristig nur schwer zu ermitteln und möglicherweise nicht aussagekräftig.

¹⁴ (Hollnagel, 2014, S. 6)

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, schlagen (Lee, Vargo, & Seville, 2013) vor, dass mit geeigneten Messmethoden die Erfolge und Fortschritte innerhalb der Organisation im Hinblick auf die Resilienz quantitativ dargestellt werden. So könnten bspw. Veränderungen der organisationalen Resilienz auf bestehende Indikatoren für die Wettbewerbsfähigkeit oder ökonomische Kennzahlen übertragen werden.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, das Spektrum der organisationalen Resilienz noch weiter zu unterteilen, um Unterstrukturen bewusster zu differenzieren. (Di Bella, 2014) bzw. (Rolfe, 2019) nutzen die bereits zuvor erwähnten Unterscheidungen in Mikro-, Meso-, und Makroebenen, um sie auf die organisationale Perspektive zu übertragen. Sie definieren auf der Mikroebene die Resilienz von Individuen, auf der Mesoebene die Resilienz von Untersystemen (bspw. Abteilungen) und zuletzt auf der Makroebene die Resilienz der gesamten Organisation.

(Heller, et al., 2019) beziehen sich in ihrer Bewertungsmethode mit Hilfe eines Fragebogens auf die DIN ISO Norm 22316:2017. Darin werden neun Elemente für die organisationale Resilienz näher beleuchtet: *Veränderung antizipieren, Geteilte Vision, Umfeld verstehen, Ermutigende Führungskräfte, Resilienzfördernde Kultur, Geteiltes Wissen, Verfügbare Ressourcen, Koordinierte Bereiche* und *stetige Verbesserung*. Das Ergebnis ist ein 83 Items – das heißt 83 Fragen – umfassender Fragenkatalog.

(McManus, 2008) beschreibt ein fünfstufiges Konzept zur Feststellung und Verbesserung von organisationaler Resilienz, basierend auf qualitativen Erkenntnissen mehrerer Fallstudien aus der Wirtschaft Neuseelands. Dieses Konzept bildet die Grundlage für mehrere seitdem veröffentlichte Studien und Ansätze zur organisationalen Resilienzbewertung (u.a. (Stephenson, 2010), (Lee, Vargo, & Seville, 2013)). Zentraler Bestandteil der McManus-Methodik ist ein Interviewleitfaden mit insgesamt 42 Fragen, die von ausgewählten Mitarbeiter*innen der im Rahmen der Studie untersuchten Organisationen beantwortet wurden. Da die analysierten Unternehmen sich auf verschiedene Art und Weise voneinander unterscheiden (u.a. Branche, Größe, Ort), ist es naheliegend, dass nicht jede der 42 Fragen uniform sinnvoll beantwortet werden kann. Auch spielen die verschiedenen Unternehmensmerkmale eine wichtige Rolle bei der Feststellung individueller Ausprägungen hinsichtlich der organisationalen Resilienz (McManus, 2008). McManus konstruiert ihren Fragenkatalog mit Hilfe der drei Überkategorien *Situatives Bewusstsein* (z.B. Rollen und Verantwortung, Verständnis von Gefahren und Konsequenzen, Wiederaufbauprioritäten), *Entscheidende Systempfeiler* (u.a. Notfallplanung und Übungen, Verständnis und Kapazität interner/ externer Ressourcen) und *Anpassungsfähigkeit* (z.B. Kommunikation und Beziehungen, Vision und Ergebniserwartung, Information und Wissen, Management und Steuerungsstrukturen).

Für die hier zu erarbeitende Resilienzbetrachtung von Energiesystemen wird der von (McManus, 2008) eingeführte Interviewleitfaden zur Basis genommen und entsprechend eigener Annahmen und Vorgaben für die Verwendung in Bezug auf ein Energiesystem in einer Organisation angepasst. Die gesellschaftliche Ausrichtung (bspw. profitorientiert,

staatliche Einrichtung, gemeinnützig) ist dabei nicht ausschlaggebend. Da es sich bei einem Energiesystem in der Regel lediglich um einen Teilbereich einer größeren Institution handelt, werden die in unterschiedenen Ebenen der organisationalen Resilienz in einem gemeinsamen Fragebogen behandelt und nicht einzeln aufgearbeitet.

Analog zur in Kapitel 2.3 dargestellten Problematik einer möglichst „optimalen“ Anzahl von Bewertungskriterien ergibt sich auch bei der Ausgestaltung der Fragen für die organisationale Resilienz Betrachtung die Herausforderung eines geeigneten Mittelwegs zwischen zu vielen und zu wenigen interrogativen Elementen. Während eine Vielzahl von Fragestellungen den Detailgrad der Bewertung steigern kann, erfordert ihre Entwicklung einen verhältnismäßig hohen Aufwand, um die Fragen möglichst sinnstiftend und überschneidungsfrei zu formulieren. Auch kann eine hohe Summe an Fragen potentielle Interviewpartner abschrecken oder im Laufe der Befragung ermüden lassen, sodass geringe Antwortraten und/oder nur bedingt repräsentative Aussagen erreicht werden.

Qualitativ hochwertige Fragebögen zeichnen sich durch die drei mehrdimensionalen Eigenschaften („Hauptgütekriterien“) Objektivität, Reliabilität und Validität aus. Eine Möglichkeit, eine vergleichbar hohe Güte zu erzielen, besteht in der Nutzung von Multi-Item-Skalen, also Erhebungsbögen, in denen mehrere Fragen auf dasselbe Konstrukt (z.B. ein Resilienz Kriterium) abzielen, wobei deren Beantwortung gemittelt oder aufsummiert wird (Rammstedt, 2004).

Eine solche Multi-Item-Skala bietet sich auch für das zu erarbeitende Resilienzkonzept an, wobei die acht zuvor eingeführten Kriterien jeweils anhand von mehreren Items (Fragen) bewertet werden. Dafür ist zunächst die konkrete Definition jedes Kriteriums aus organisationaler Sicht geboten.

Die Kriterien im Cluster **Konnektivität** (organisational) sind

- *Modularität* (Intensität der Interaktion zwischen verschiedenen Abteilungen sowie innerhalb derselben Abteilung, z.B. zeitnahe Kommunikation einer Fehlfunktion)
- *Essentielle Komponenten* (Kenntnis über Relevanz von Personen und Interessengruppen innerhalb der Organisation, z.B. Wissen über vorgesetzte Entscheidungsträger, auch in anderen Abteilungen)
- *Durchschnittliche Pfadlänge* („soziale Distanz“ zwischen Personen verschiedener interner oder externer Interessengruppen, z.B. direkte Absprache mit externen Reparaturdienstleistern)

Die Kriterien im Cluster **Flexibilität** (organisational) lauten

- *Funktionale Redundanz* (Verfügbarkeit und Anzahl relevanter Personen/ Interessengruppen in der Organisation, z.B. ausreichende Besetzung eines Arbeitsplatzes auch für Urlaubs- oder Krankenzeiten)

- *Numerische Redundanz* (Verfügbarkeit & Anzahl von Akteuren mit ähnlichen Kenntnissen, Kompetenzen & Erfahrungen in der Organisation, z.B. Stellvertreterregelungen und genügend Arbeitsplätze)
- *Reaktionskapazität* (Aufwand, um Handlungsmöglichkeiten auszuführen, auch Befehlkettenlänge und Antizipationsfähigkeit, z.B. umständliche Freigaben zur Umstellung auf Ersatzbetrieb von vier Entscheidungsträgern)

Die Kriterien im Cluster **Diversität** (organisational) sind

- *Balance* (Verhältnis an Akteuren in relevanten Abteilungen in Relation zur Gesamtzahl der Akteure im Energiesystem, z.B. gleichmäßige Verteilung von Mitarbeiter*innen über alle (ähnlich wichtigen) Organisationsbereiche)
- *Unterschiedlichkeit* (Verschiedenheit und Wissensstand einzelner Akteure & Interessengruppen, z.B. Zeithorizont der Ziele, Funktion, Erfahrung, Kompetenz, usw.).

Für eine aussagekräftige und nachvollziehbare organisationale Betrachtungsweise wird jedes Resilienz Kriterium anhand von drei Items untersucht, woraus sich ein Gesamtfragenkatalog von 24 Items ergibt. Um eine einheitliche, quantitative Bewertung für alle Kriterien zu ermitteln, werden jeweils fünf geschlossene Antwortmöglichkeiten vorgegeben (*Stimme voll zu – Stimme gar nicht zu*). Diese Bedingung unterscheidet sich vom Ansatz bei (McManus, 2008) und verringert den Entscheidungsspielraum bei der Bewertung, ähnelt aber dem von (Heller, et al., 2019). Während sich dadurch die Resilienzbetrachtung vereinfacht, erfordert dieses Vorgehen eine einheitliche Formulierung der zu beantwortenden Items. Entsprechend geht die vorgegebene Fragestellung von einem möglichst „resilienten Systemzustand“ aus, welcher durch die subjektive Beantwortung auf das vorliegende Energiesystem übertragen und entsprechend abgestuft wird. Die Items sind vor diesem Hintergrund nicht als Frage-, sondern als Aussagesatz formuliert, den es zu bewerten gilt. Es ist hervorzuheben, dass nach eigener Erkenntnis und einer eingehenden Literaturrecherche bis dato kein Fragebogen explizit die organisationale Resilienz von Energiesystemen erforscht. Im Vergleich zu den zugrundeliegenden, allgemeineren Fragenkatalogen wurden dementsprechend einige Anpassungen vorgenommen, um dem organisationsbezogenen Anspruch im Hinblick auf ein Energiesystem gerecht zu werden. Der so entwickelte *Resilienzfragebogen* ist im Anhang zu finden.

Bezüglich der Beantwortung und damit der konkreten Bewertung muss eine zufriedenstellende, aussagekräftige Anzahl an „Experten“ im spezifischen Bereich des Energiesystems eines Unternehmens gefunden werden. Als Experten können sowohl interne Personen wie z.B. leitende Angestellte, Facharbeiter*innen oder sonstige Mitarbeiter*innen (auch extern, bspw. von Dienstleistern) gelten. Diese Gruppe sollte nach Möglichkeit alle Teilgebiete des Energiesystems entsprechend des Organigramms umfassen und in ihrer Anzahl gegebenenfalls die Relevanz der einzelnen Teilbereiche widerspiegeln, um ein angemessenes Bild über die organisationale Resilienz des gesamten Energiesystems zu vermitteln. Gleichwohl es von Vorteil wäre, eine Beantwortung durch möglichst viele Beschäftigte zu

erzielen (vgl. Validität aus (Rammstedt, 2004)), kann vermutlich bereits mit einer kleineren Zahl von Befragungen ein sinnstiftendes und realitätskonformes Bild der organisationalen Resilienz ermittelt werden. Dennoch sollten insbesondere die Bewertungen von Führungskräften der einzelnen Teilbereiche aufgenommen (und ggf. stärker gewichtet) werden, da diesen Personen eine besondere Verantwortung und Entscheidungsgewalt zukommt, die mitunter erheblichen Einfluss auf die restliche Organisation hat. Um jedoch auszuschließen, dass die Beteiligung an der Erhebung bzw. die (ggf. kritische) Beantwortung einzelner Teilaspekte auf einzelne Mitarbeiter*innen zurückzuführen ist, wird der Fragebogen anonym erhoben. Dabei ist darauf zu achten, dass nach gängiger Vorgehensweise mindestens 5 Personen an einer solchen Befragung teilnehmen und eine Auswertung ansonsten zu unterlassen ist (vgl. bspw. (Hinrichs, 2009)).

Es ist zu beachten, dass diese Vorgehensweise die in den vorangegangenen Kapiteln vermittelte Komplexität der organisationalen Resilienz Betrachtung reduziert und möglicherweise nicht alle relevanten Teilaspekte vollumfänglich berücksichtigt. Gleichzeitig bietet sie einen guten Näherungswert mit angemessenem Aufwand und bezieht eine Reihe von als essentiell charakterisierten Attributen und Fragestellungen mit ein (vgl. (Stephenson, 2010), (Lee, Vargo, & Seville, 2013), (Rolfe, 2019), (Binder, Mühlemeier, & Wyss, 2017) und (Heller, et al., 2019)).

Insgesamt kann das Vorgehen zur Bewertung der organisationalen Resilienz in drei Schritten zusammengefasst werden:

1. Qualitative Erhebung von Expertenansichten mit Hilfe des *Resilienzfragebogens*
2. Quantitative Einordnung der Antworten
3. Zusammenfassung der Antworten (ggf. Gewichtung nach Abteilung oder Position) und Resilienzbewertung.

Als Ergebnis bietet sich eine nachvollziehbare Aufbereitung der Resilienzwerte aus organisationaler Sicht an, beispielsweise unterteilt auf die acht Kriterien oder die drei übergeordneten Cluster **Konnektivität**, **Flexibilität** und **Diversität**. Basierend auf den Erkenntnissen der initialen Erhebung können mit Hilfe angemessener Konzepte Maßnahmen erarbeitet und durchgeführt werden, welche die Resilienz des Energiesystems vor dem Hintergrund der Personalstrukturen und/oder den Kompetenzen und Fähigkeiten der Mitarbeiter*innen optimieren.

3.4. Bewertungsmethodik für technische Resilienz

Ungeachtet ihrer wirtschaftlichen Ausrichtung (z.B. gewerbsmäßig, gemeinnützig, öffentliche Einrichtung) ist in den heutigen Gesellschaften der Industrienationen praktisch jede Organisation auf eine funktionierende Versorgung mit (vor allem elektrischer) Energie angewiesen. Gerade bei energieintensiven Betrieben ergeben sich mitunter ökonomische Vorteile aus dem Betrieb von Eigenenergieversorgungsanlagen, die ein Unternehmen unabhängiger von der Versorgung aus dem öffentlichen Netz machen (Reitsam, Sauer, & Kuhn, 2019). Damit ein *Energiesystem* seine Funktion als „Produzent“ und Verteiler von Energie erfüllen kann, sind physische Infrastrukturen und geeignete Vernetzungen mit der Umwelt, z.B. Energieverbrauchern, erforderlich.

Bei einem solchen System handelt es sich um ein menschengemachtes und geplantes Konstrukt, das mehr oder weniger dynamisch angepasst werden kann, bspw. durch Redundanzen, Erweiterungen oder Rückbauten. (Hollnagel, 2014) beschreibt die Resilienz eines geplanten/gebauten Systems (englisch „Built System“) als Qualität der Systemfunktionalität, die unabhängig von Parametern wie Ausmaß, Beschaffenheit oder Lebensdauer ermittelt werden kann.¹⁵ Daraus erwächst für ihn der Gedanke, dass allein das statische Vorhandensein eines geplanten Systems noch keine Resilienzüberlegungen zulässt. Vielmehr argumentiert er, dass die Funktionalität eines Systems erst durch (bis dato ausschließlich) menschliche Ansprüche, Wahrnehmung und Logik beschrieben wird, die eine Dynamik im technischen Konstrukt initiieren (Hollnagel, 2014). Mit anderen Worten ermöglicht nach Hollnagels Ausführungen erst eine menschliche Agenda, welche die Funktion und Parameter des Systems festlegt, die Resilienz Betrachtung aus technischer Sicht.

Zur Definition dieser Systemfunktionalität und zur Übertragung in greifbare Eigenschaften werden die bereits erarbeiteten Resilienz Kriterien der drei Hauptcluster **Konnektivität**, **Flexibilität** und **Diversität** in den technischen Kontext eingeführt.

Die Kriterien im Cluster **Konnektivität** (technisch) sind

- *Modularität* (Autonomie-Maß bestimmter Teile des Systems, z.B. "Inselfunktionalität" von lokalen BHKW gegenüber zentralem Kraftwerk)
- *Essentielle Komponenten* (Anzahl, Relevanz und Absicherung einzelner, kritischer Komponenten, z.B. zentrales Umspannwerk, Leitzentrale, Reaktoren)
- *Durchschnittliche Pfadlänge* (Länge zwischen Netzknoten oder Netzknoten, z.B. Entfernung zwischen Produktion und Verbrauch)

¹⁵ (Hollnagel, 2014, S. 3 - 4)

Die Kriterien im Cluster **Flexibilität** (technisch) lauten

- *Funktionale Redundanz* (Verfügbarkeit und Anzahl verschiedener Elemente in der Organisation, mit derselben Funktion, z.B. Photovoltaikanlagen und Dieselgeneratoren zur Erzeugung von elektrischer Energie)
- *Numerische Redundanz* (Verfügbarkeit und Anzahl von identischen technischen Elementen mit gleicher Funktion, z.B. redundante Auslegung von Stromkabeln)
- *Reaktionskapazität* (Fähigkeit und Dauer bis zur Aktivierung alternativer Funktionsweisen, z.B. Automatisierungsgrad von Anlagen gegenüber händischer Bedienung)

Die Kriterien im Cluster **Diversität** (technisch) sind

- *Balance* (Anteil jeder Technologiegruppe an der gesamten Energieproduktion/-verbrauch, z.B. Ungleichverteilung zwischen Eigenerzeugung und Netzbezug)
- *Unterschiedlichkeit* (Ähnlichkeit der Charakteristika von Anlagen, z.B. Produktionskosten, Anfahrdauer, Effizienz, Platzbedarf, Brennstoff, usw.).

Diese Kriterien – nun im technischen Kontext – bilden die Grundlage für eine quantitative Bewertung der technischen Resilienz. Das vorliegende Konzept orientiert sich dafür am Vorgehen zur Durchführung einer klassischen Risikoanalyse, in denen die potentiellen Auswirkungen von zuvor definierten Szenarien in Bezug auf ihre jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit untersucht und ihnen ein ökonomischer Wert zugewiesen wird.

Die konkrete Vorgehensweise unterteilt sich in vier Schritte, die in den folgenden Unterkapiteln umfassend erläutert werden:

1. Festlegung von Bezugsgrößen für die Funktionalität des Systems
2. Bestimmung und Definition von potentiell relevanten Schockszenarien
3. Modellgestützte Bestimmung des Schadensausmaß` für jedes Ereignis
4. Zusammenfassung der Einzelergebnisse und Bewertung der technischen Resilienz

Schritt 1: Festlegung von Bezugsgrößen für die Funktionalität des Systems

Wie in Kapitel 3.2 erläutert, bezieht die vorliegende Methodik nicht Auswirkungen auf das Gesamtsystem, sondern lediglich auf Teile des Systems mit ein. Um ein Schadensausmaß durch Fehlfunktionen bzw. Ausfälle einer oder mehrerer Systemkomponenten greifbar zu machen, bedarf es einer fundierten und nachvollziehbaren Herangehensweise. Uniform dieselbe Art und Anzahl von Parametern und Bewertungsgrößen auf jede beliebige Organisation anzuwenden, wird der Komplexität der Zusammenhänge nicht gerecht.

Unabhängig vom zu bewertenden Teilsystem (z.B. Energieversorgung) ist es zwingend erforderlich, zunächst ein genaues Verständnis über den konkreten Mehrwert zu entwickeln, den das Gesamtsystem des Betrachtungsobjekts liefert, sei es ein Unternehmen, eine öffentliche Einrichtung oder jede andere Rechts- bzw. Gesellschaftsform.

Die Unterschiedlichkeit generierter Mehrwerte ergibt wirtschaftliche, ökologische oder soziale Besonderheiten und Alleinstellungsmerkmale, auf denen letztlich die Daseinsberechtigung für die oben genannten Sozialstrukturen beruht. Insbesondere bei Unternehmen mit kommerziellem Interesse ist es möglich, den Nutzenzuwachs in Form von wirtschaftlicher Wertschöpfung darzustellen. So können z.B. produzierte Einheiten, vertraglich vereinbarte Dienstleistungen oder Verschmelzungen beider insbesondere monetär bewertet werden, insbesondere anhand des produzierten Warenwerts, der benötigten Arbeitszeit oder der zur Herstellung verwendeten Ressourcen.

Sofern es aufgrund von Fehlfunktionen bzw. Schockereignissen zum Ausfall oder zur Verschiebung der Produktion/Dienstleistung kommt, kann der quantitative Wert solcher „mehrwertgenerierenden“ Bezugsgrößen als Kostenfaktor für einen Ausfall gegengerechnet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht, zahlenbasiert und nachvollziehbar die betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen von teilweisen oder vollständigen Systemausfällen darzustellen. Damit bleibt Resilienz kein theoretisches Gedankenkonstrukt, sondern kann aktiv als Optimierungswerkzeug durch die Unternehmensführung eingesetzt werden.

Ein *Energiesystem* konsumiert und/oder produziert Energie, vor allem elektrische, Wärme- oder Kälteenergie, und versorgt damit praktisch alle anderen systemtechnischen Anlagen. Da sie vor allem in Industrieländern praktisch dauerhaft bereitsteht, besitzt Energie hierzu einen integralen Anteil am Wertschöpfungsprozess jeder Einrichtung bzw. jedes Systems (Bie, Lin, & Li, 2017). Damit bildet die physikalische Größe Energie eine naheliegende Kenngröße für die Funktionalität eines Energiesystems und damit zur hier durchgeführten Resilienz Betrachtung.

Für eine realitätsnahe Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Systemresilienz bietet sich außerdem an, Kennzahlen aus dem Energiesystem (z.B. Energie in Megawattstunden) einen Geldwert zuzumessen (z.B. Kosten in € pro MWh). Mit einer solchen Umrechnung kann der Einfluss dieser „Resilienzmaßnahmen“ direkt mit derselben Bezugsgröße berechnet und im Vergleich zu nötigen Investitionen bewertet werden. Dieser Anspruch einer monetären Analyse wird u.a. von (Rose, 2016) und (Lee, Vargo, & Seville, 2013) bekräftigt, damit solche Resilienz Betrachtungen für Unternehmen einen greifbaren Mehrwert bieten.

Schritt 2: Bestimmung von potentiell relevanten Schockszenarien

Für eine pragmatische, aber dennoch möglichst umfassende Berücksichtigung von relevanten Schockereignissen bietet sich die Betrachtung des Energiesystems im Kontext der in Kapitel 3.2 eingeführten Kriterien und ihrer Übergruppen an. Die vorgestellten Cluster

Konnektivität, Diversität und Flexibilität stellen einen essentiellen Bestandteil zur Bestimmung der „Ausfallszenarien“ dar. Mit Hilfe dieser Cluster und ihren jeweiligen Kriterien können Schockereignisse definiert werden, die entscheidende Auswirkungen auf die Funktionsweise des Energiesystems haben können und damit die in Schritt 1 festgelegten Bezugsgrößen erheblich negativ beeinflussen.

Wie unter anderem (Gößling-Reisemann, Stührmann, Wachsmuth, & von Gleich, 2014) und (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014) verdeutlichen, hat eine Resilienzbewertung nicht den Anspruch, ein System zu schaffen, das konkret für eine bestimmte Zahl oder Art von Schockereignissen gewappnet ist. Insbesondere unbekannte Schockereignisse sind der Bezeichnung nach bis zu ihrem Eintritt nicht vorhersehbar und können daher nicht mit einem konkreten Schockereignis (bspw. Brand/Flut/Blitzschlag/Anschlag auf Komponente xyz) bewertet werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erscheint es sinnvoll, sich vordergründig auf „einflussunabhängige“ Ausfälle von wichtigen Systemkomponenten zu konzentrieren. Konkret bedeutet dies, dass nicht der Grund des Ausfalls (bspw. „Brand im Turbinenraum“) das Ereignis definieren sollte, sondern die potentiellen Auswirkungen auf das System (z.B. „Ausfall der Turbine“). Dieses Vorgehen soll verdeutlichen, dass ein System nicht unbedingt resilienter wird, weil es zusätzliche Brandschutzanlagen baut, sondern wenn – egal wie – die Turbine seltener ausfällt. Die Aggregation verschiedener Szenarien, die zu einem Ausfall führen, kann sodann ggf. auch plausibler mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit belegt werden.

(Berg, et al., 1995) argumentieren außerdem, dass bei der Bewertung von Risiken im Energiebereich aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht die Grundhaltung der subjektiven Risikoaversion durchaus Berechtigung findet. Ein solches Verhalten impliziert, dass die Vermeidung von seltenen, aber gravierenden Schäden höhere Priorität genießt als die Reduzierung von wahrscheinlicheren Ereignissen mit deutlich geringeren Auswirkungen. Dies deckt sich mit Ausführungen von (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014), dass in der Praxis der Fokus von Unternehmen eher auf Risiken mit höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten liegt, da die Behandlung von äußerst unwahrscheinlichen Ereignissen oftmals als ökonomisch nicht sinnvoll angesehen wird. Entsprechend sollten für die Gewährleistung eines angemessenen Erhebungsaufwands nicht jegliche potentiellen Ereignisse mitberücksichtigt, sondern die voraussichtlich gravierendsten Szenarien identifiziert und sinnvoll zusammengefasst werden.

Der VGB hat in seinem Standard „Technische und kommerzielle Kennzahlen für Kraftwerksanlagen“ eine hierarchische Übersicht über (Nicht-) Verfügbarkeiten von Systembezugsgrößen vorgeschlagen (VGB, 2016). Die Zuordnung veranschaulicht die Zielsetzung der auszuwählenden Schockszenarien.

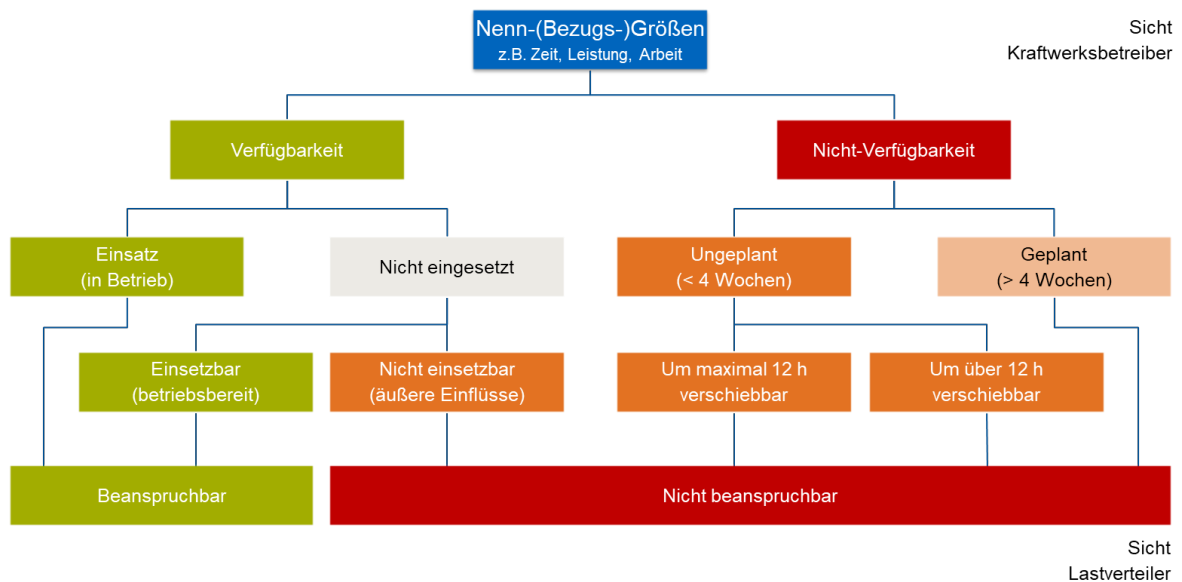


Abbildung 7: Hierarchische Übersicht über (Nicht-) Verfügbarkeiten von Bezugsgrößen, eigene Darstellung nach (VGB, 2016)

Demnach ist für die Lastverteilung bzw. deren Deckung nicht relevant, weshalb eine Anlage oder ein System nicht beanspruchbar ist, sondern lediglich, dass dies überhaupt der Fall ist. Eine umfassende Resilienz Betrachtung sollte sich also – anstatt auf einzelne Gründe – auf die übergeordnete Problematik bzw. die Dauer der Nicht-Benutzbarkeit von Anlagen fokussieren und bei der Optimierung der generellen Beanspruchbarkeit eines Systems ansetzen.

Die erarbeiteten „Ausfallszenarien“ basieren auf der Sicht der Lastverteiler (Beanspruchbar – Nicht beanspruchbar) und sollten bspw. die in Abbildung 7 gezeigten Einflüsse widerspiegeln, wonach Systeme oder Teilanlagen nicht beanspruchbar sind. Dies entspricht Auswirkungen durch

- äußere Einflüsse (z.B. Wetter, Angriffe Dritter)
- geplante Nicht-Verfügbarkeiten (z.B. Revisionen, Instandsetzungen)
- ungeplante, kaum verschiebbare Nicht-Verfügbarkeiten (z.B. Defekte von nicht-redundanten Leitungen)
- ungeplante, aber verschiebbare Nicht-Verfügbarkeiten (z.B. Defekte von Teilkomponenten, die zeitlich flexibel behoben werden können).

Das Ergebnis des zweiten Schrittes ist also eine bestimmte Anzahl an Schockszenarien, die im weiteren Verlauf für alle Systemauslegungen (bspw. Status Quo, optimierter Status Quo, etc.) beibehalten und in den folgenden Schritten ausgewertet werden.

Schritt 3: Modellgestützte Bestimmung des Schadensausmaß‘ für jedes Ereignis

In diesem Konzeptschritt wird der entstehende Schaden quantifiziert. Dafür wird der Zusammenhang zwischen der „Wertschöpfung“ des Gesamtsystems und den definierten Schadensereignissen hergestellt. Nach Analyse und Auswahl zu betrachtender „mehrwertgenerierender“ Objekte, Produktionseinheiten oder Dienstleistungen (Schritt 1) wird nun das Systemverhalten überprüft, wenn diese Leistungen aufgrund von bestimmten Schockereignissen (Schritt 2) nicht mehr erbracht werden. Mit Hilfe von geeigneten Modellen wird dabei abhängig vom vorliegenden Szenario beurteilt, wie groß die jeweiligen Auswirkungen auf das System sind.

Bei der Betrachtung eines Gesamtsystems erscheint es verhältnismäßig einfach, den „Mehrwert“ bzw. die Wertschöpfung klar auszumachen – eine Zuckerfabrik produziert Zucker, eine Beratung verkauft ihre Dienstleistungen für Stunden- oder Tagessätze usw. Sofern aus Komplexitätsgründen lediglich ein Teil des gesamten Systems näher betrachtet wird, ist es naheliegend, die Wirkbeziehungen zwischen Teil- und Gesamtsystem zu erörtern. So kann die Relevanz des Teilsystems auf Basis des insgesamt generierten Mehrwerts eingeschätzt werden. Bezogen auf das Zuckerfabrikbeispiel ist es z.B. sehr wahrscheinlich, dass im Falle einer Störung des Energiesystems der Fabrik kein Zucker produziert wird, obwohl andere Systeme nicht betroffen und genügend Arbeiter*innen verfügbar wären. Somit ist eindeutig, dass das Energiesystem entscheidenden Anteil an der „Wertschöpfung“ der Gesamtfabrik hat. Solche Kausalitäten gilt es in Abhängigkeit des betrachteten Systems nachvollziehbar und sinnvoll zu quantifizieren, um letztlich die konkreten Kosten eines Schockereignisses im Energiesystem zu definieren.

Eine Möglichkeit, um in einem technischen System betrieblich sinnvolle Maßnahmen zur Resilienzsteigerung vorzunehmen, ist die monetäre Bewertung der „entgangenen Wertschöpfung“. Dazu muss ein angemessener „Preis“ für die Bezugsgröße aus Schritt 1 festgelegt werden. Im produzierenden Gewerbe kann bspw. die Menge des produzierten Zuckers zumindest grob mit der dafür benötigten Menge Energie in Verbindung gebracht werden (z.B. „Produktion von einer Tonne Weißzucker benötigt ca. xyz MWh Energie“).

Bei erbrachten Dienstleistungen ist dies komplexer, doch lassen sich beispielsweise über Vertrags- oder Investitionssummen gewisse Zusammenhänge bezüglich des ökonomischen Mehrwerts erstellen. Bei der Resilienzbetrachtung von Rechtsformen ohne spezifisch kommerzielles Interesse, z.B. staatliche Einrichtungen, Stiftungen oder Vereine, ist diese Verknüpfung undurchsichtig. Denkbar wäre, den Einfluss zu erörtern, den eine solche Sozialstruktur auf bestimmte (Wirtschafts-) Parameter oder Personengruppen besitzt, die leichter einer „monetären Wertschöpfung“ zuzuordnen sind. So kann bspw. der Stundenlohn von Mitarbeiter*innen Aufschluss darüber geben, welche monetären Schäden entstehen, wenn Arbeitszeit ausfällt. Unabhängig davon sind materielle Schäden an Gebäuden, Anlagen und sonstiger Infrastruktur zu berücksichtigen, ebenso wie die dafür nötigen Reparaturen und damit verbundene Kosten. Hier sei erneut auf Kapitel 3 verwiesen, in der

auf die Risikoaversion bei der Beachtung von Personenschäden oder Menschenleben eingegangen wird.

Neben differenten monetären Auswirkungen können Schockereignisse auch zeitlich unterschieden werden. So ist es naheliegend, dass ein tagelanger Ausfall der Gas- oder Stromversorgung voraussichtlich größere Auswirkungen hätte als ein einstündiger Ausfall usw. Insbesondere bei saisonalen Betrieben kann die Jahreszeit des Komponentenausfalls einen entscheidenden Faktor darstellen (z.B. Unternehmen des sekundären Sektors für die Weiterverarbeitung von landwirtschaftlichen Erzeugnissen, Tourismusbranche).

Angelehnt an (Linkov, et al., 2014) wird in dieser Thesis das folgende Darstellungskonzept vorgeschlagen, um die qualitativen Auswirkungen von Schockereignissen zu konkreter zu unterscheiden.

Je nach Betrachtungsweise können ereignisbasierte Schäden variieren und bspw. milde, erhebliche oder katastrophale Auswirkungen nach sich ziehen. Abbildung 8 zeigt drei exemplarische Klassifizierungen (grüne, blaue und rote Flächen) von Auswirkungen durch Schockereignisse (rote Pfeile) in einem Energiesystem. Das links abgebildete System zeigt die Differenzierung des Schadensausmaßes in Abhängigkeit der zeitlichen Auftrittsdauer des Schocks. Der Schaden steigt, je länger ein Schock anhält bzw. das Systemverhalten negativ beeinflusst wird. In der Bildmitte spielt die Ausfalldauer eine untergeordnete Rolle, milde, erhebliche oder katastrophale Schäden werden über den Einfluss des Schockereignisses auf die Bezugsgröße (entspricht der Systemfunktion auf der Ordinatenachse) definiert. Auf der rechten Seite ist ein System abgebildet, in dem lediglich milde Auswirkungen zu erwarten sind, solange ein bestimmter Schwellenwert der Systemfunktion nicht unterschritten wird. Unterschreitet die Systemfunktion den Schwellenwert, ist entscheidend, wie lang dieser Zustand anhält, um gravierendere Folgen konkreter zu differenzieren.

Obwohl weitere, deutlich vielfältigere Unterscheidungsmöglichkeiten denkbar sind, erscheinen die hier vorgestellten Schaubilder für eine qualitative Darstellung verschiedener Auswirkungen für diese Arbeit suffizient.

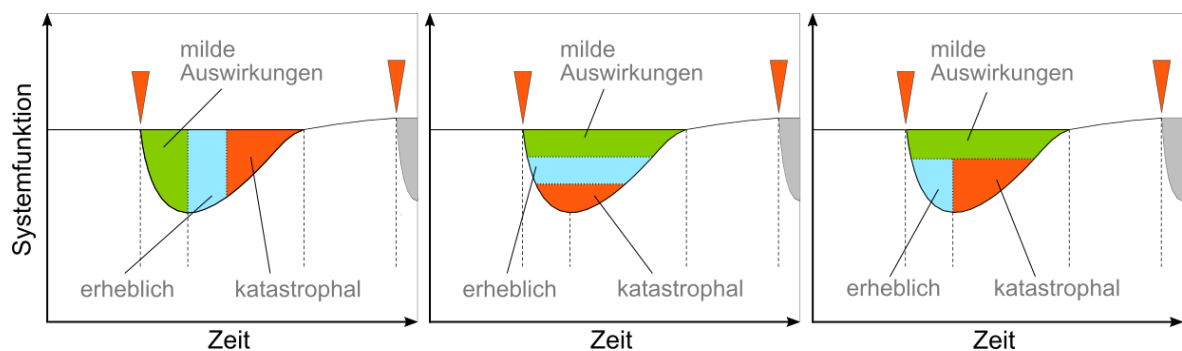


Abbildung 8: Mögliche, qualitative Unterscheidung des Schadensmaßes nach einem Schockereignis

Das Ergebnis des dritten Schrittes ist eine konkrete Kostensumme für jedes betrachtete Schadensereignis, bspw. in Form von ausgefallenen MWh, nicht produzierte Einheiten,

Euro, usw. Diese Summe muss nicht zwingend monetisiert werden, doch erscheint es für etwaige Systemoptimierungen sinnvoll, die potentiellen Verluste gegen realisierbare und ökonomisch sinnvolle Maßnahmen aufzuwiegen und dafür einen geeigneten Vergleichswert zu erheben.

Schritt 4: Zusammenfassung der Einzelergebnisse und Bewertung der technischen Resilienz

Jedes der in Schritt 3 modellierten Schockszenarien liefert eine quantifizierte Aussage darüber, wie schwer ein (Energie-) System von einem konkreten Schadensereignis (definiert in Schritt 2) getroffen wird. Nun ist es für eine sinnstiftende Gesamtbetrachtung nötig, die einzelnen Schadenssummen zu summieren. Wie bereits in Schritt 3 werden deshalb weitere Faktoren zur Unterscheidung der einzelnen modellierten Szenarien hinzugezogen. So ist es vermutlich nicht realitätskonform, für jedes modellierte Schockereignis dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit anzunehmen. Insbesondere das Komponentenalter, deren Absicherung, vorhandene Redundanzen und die variierende Anlagenkomplexität „prädestinieren“ einige Teile des Systems erfahrungsgemäß eher zum Ausfall als andere. Die Überlegungen zum Einbezug solcher Annahmen und Wahrscheinlichkeiten bilden damit Analogien zu einer klassischen Risikoanalyse.

Demzufolge ist die potentielle Schadenssumme eines Schockereignisses, das mit großer Wahrscheinlichkeit eintritt, deutlich höher als die Summe eines verhältnismäßig seltenen Szenarios. Die geeignete Festlegung dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten kann beispielsweise auf statistischen Auswertungen von Ausfällen mit den zugehörigen Ursachen beruhen und sollte möglichst mit Hilfe von Experten validiert werden. Diesem Vorgehen ist jedoch die Herausforderung hinzuzufügen, dass Resilienz, wie in Kapitel 1 beschrieben, sowohl bekannte als auch unbekannte Vorkommnisse miteinschließt. Dementsprechend ist zur Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit insbesondere der unbekannten Ereignisse möglicherweise eine alternative Herangehensweise geboten, die jedoch eine Quantifizierung weiter erschwert (Berg, et al., 1995).

Das Ergebnis des vierten Schrittes ist wiederum eine quantitative Darstellung der technischen Resilienz des Systems. Dies erfordert eine geeignete und nachvollziehbare Erhebung von Daten, aus denen schlussendlich die Resilienz abgeleitet werden kann. Insbesondere die Höhe der potentiellen Kosten für Komponentenausfälle lässt im Vergleich zum jährlichen Kapitalfluss (engl. „Cashflow“) Rückschlüsse auf die technische Systemresilienz zu. Dabei ist zu beachten, dass der Zusammenhang zwischen Ausfallschäden, Gesamtsystemkosten und Resilienz nicht als linear angenommen werden kann. Grundsätzlich ist es aus ökonomischer Sicht stets das Ziel, möglichst vorausschauend und (u.a. im unternehmerischen Sinne) nachhaltig zu wirtschaften. Ausfall- oder Standzeiten sollten zu einem gewissen Maße durch die Unternehmensführung toleriert werden, bspw. für notwendige und geplante Intervallreparaturen oder Inspektionen (sog. „deterministische Ereignisse“, (Klemm, 2008)). Sinkt die Betriebszeit jedoch weiter, muss gegebenenfalls mit ex-

ponentiellen, negativen Auswirkungen gerechnet werden, insbesondere dann, wenn Stillstände nicht geplant sind und unvorhergesehen auftreten (Berg, et al., 1995). Diese mitunter erheblichen (ökonomischen) Schäden sollten bestmöglich vermieden werden, wobei realitätsgemäß davon ausgegangen werden kann, dass Kosten zur Vermeidung dieser schädlichen Ereignisse in einer beispielsweise pareto-ähnlichen Verteilung steigen, je weiter man sich dem Optimum nähert.

Weitere Kennzahlen, die im Rahmen der Betriebsführung erhoben und ebenfalls in eine Resilienzbewertung einbezogen werden können, sind bspw. die Gesamtanlageneffektivität (GAE, englisch „Overall Equipment Effectiveness“), die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF, englisch „Mean Time Between Failures“) oder Berechnungen der allgemeinen Anlagenverfügbarkeit, bspw. nach (VGB, 2016). Im Hinblick auf die Bewertung von Energiesystemen – einem oft essentiellen Teil der Organisation – ist zu bedenken, dass bereits kleinere Ausfälle erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben können. Deshalb kann argumentiert werden, dass der akzeptable Spielraum für ungeplante Ausfälle („stochastische Ereignisse“, (Klemm, 2008)) sehr gering angesetzt werden sollte.

Die Resultate aus sowohl organisationaler als auch technischer Sicht ergeben abschließend ein Gesamtbild hinsichtlich der Resilienz des betrachteten Systems im Status Quo. Darauf aufbauend werden in der Regel Verbesserungsvorschläge und Optimierungsmaßnahmen identifiziert, die – z.B. mit Hilfe von Kosten-Nutzen-Abwägungen – priorisiert und zur Resilienzsteigerung für die Zukunft implementiert werden können.

Das in diesem Kapitel eingeführte, methodische Vorgehen zur Resilienzbewertung wird im folgenden Abschnitt anhand des Energiesystems am TUM Standort Campus Garching beispielhaft in der Praxis getestet. Das vordergründige Ziel dabei ist die Validierung der vorgeschlagenen Bewertungsmethode, woraus im Optimalfall direkte Anknüpfungspunkte und konkrete Maßnahmen für eine Steigerung der Resilienz am Campus Garching resultieren.

4. Anwendung der Bewertungsmethodik auf ein Fallbeispiel

Energiesystem der Technischen Universität München (TUM) am Campus Garching

Die in den Kapiteln 2 und 3 eingeführten Überlegungen und Darstellungen zur Resilienz bilden die Grundlage für die nun folgende beispielhafte Anwendung des in Abschnitt 3.4 erläuterten Konzepts zur quantitativen Betrachtung von Resilienz in Energiesystemen. Um den dreistufigen Ansatz zur Bestimmung der organisationalen Resilienz sowie das vierstufige Konzept für die Bewertung aus technischer Sicht in der Praxis zu testen, soll das Energiesystem des Hochschulcampus der Technischen Universität München am Standort Garching untersucht werden. Das Ziel besteht darin, die zuvor erarbeitete Methodik mit Hilfe eines realen Systems zu validieren und gleichzeitig relevante Informationen über die Resilienz – also die funktionale Qualität - des Energiesystems am TUM Standort Garching zu erheben. Anschließend wird exemplarisch dargestellt, wie aus den gewonnenen Erkenntnissen Maßnahmen abgeleitet werden können, die eine gesteigerte Resilienz des Standorts zur Folge haben.

4.1. Überblick des Energiesystems der TUM am Campus Garching

Am Universitätscampus in Garching agieren mehrere voneinander unabhängige Institutionen, die jedoch zum Teil bei ihren Energieversorgungssystemen miteinander gekoppelt sind. Die größte Organisation ist dabei die Technische Universität München (TUM), welche auch als einzige Eigenversorgungsanlagen betreibt. Die Validierung der zuvor eingeführten Bewertungsmethodik beschränkt sich auf die TUM-Anlagen, da zum aktuellen Zeitpunkt nur für diesen Teilbereich belastbare Eingangsdaten hinsichtlich der Größe, des Energieverbrauchs und der -erzeugung verfügbar sind. Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) der TUM besitzt aufgrund ihrer Kritikalität eine eigene, abgekoppelte Energieversorgung, die unabhängig vom restlichen Campus fungiert.

Die folgenden Ausführungen bezüglich Energieerzeugung und –verbrauch beziehen sich entsprechend auf alle anderen TUM Gebäude, Fakultäten und Lehrstühle am Standort, der mittlerweile Ausbildungsort für ca. 17.000 Studierende ist. Der Universitätscampus Garching entspricht mit ca. 214.300 m² etwa 37 % der Nutzfläche, die insgesamt durch die Technische Universität München beansprucht wird und ist damit flächenmäßig der größte Standort der Hochschule (Technische Universität München, 2018).

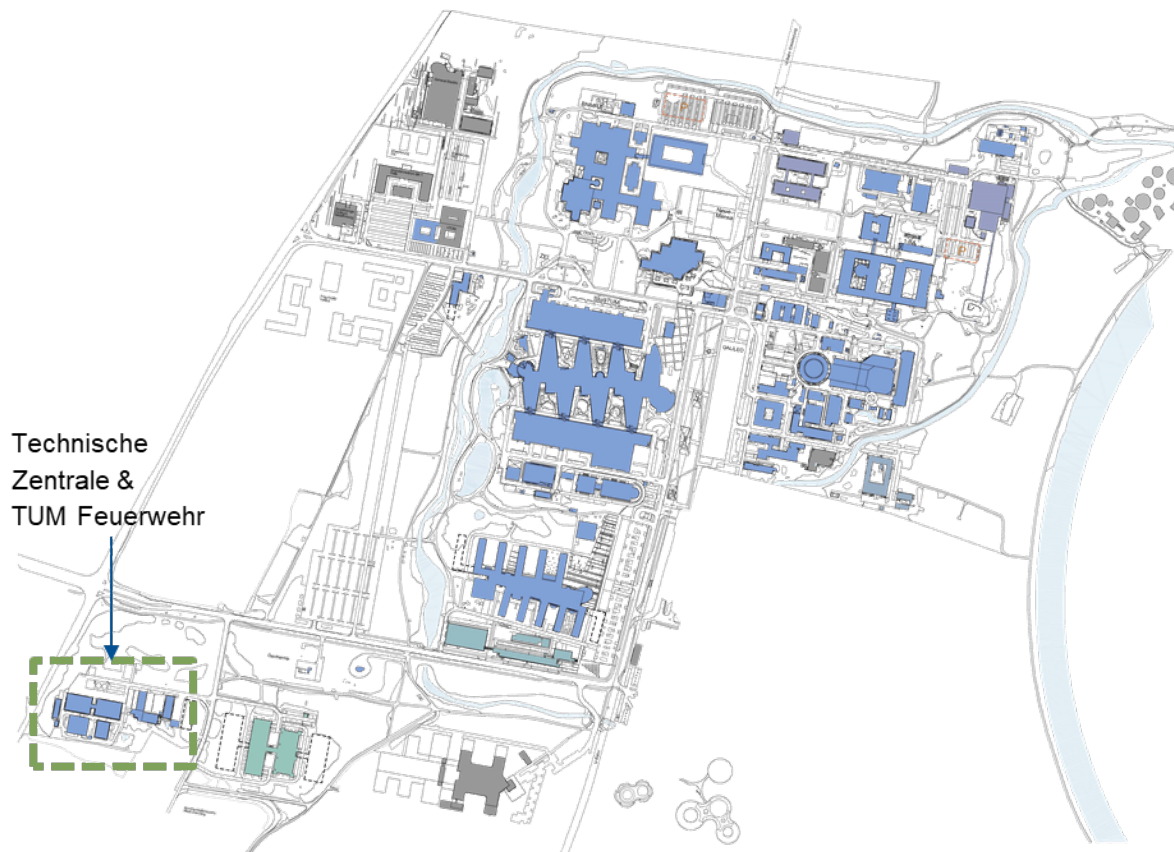


Abbildung 9: 3D-Gebäudeerfassung am Campus Garching, TUM-zugehörige Gebäude in blau gekennzeichnet, angepasst nach (ENS, 2018)

Der durchschnittliche Verbrauch der Energieträger am Campus liegt für Strom im Bereich zwischen 10 und 15 MW sowie für Wärme und Kälte in der Spitze bei rund 20 MW bzw. 10 MW. Pro Jahr verbraucht der Standort ca. 88.000 MWh Strom, 75.000 MWh Wärme und 14.000 MWh Kälte. Es sind derzeit (Stand: August 2019) über 50 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen im Referat Gebäudemanagement am Campus Garching beschäftigt. Das Referat agiert vom südwestlichen Ende des Campus aus. Hier befinden sich alle sechs untergeordneten Sachgebiete und entsprechende Anlagen, die direkt oder indirekt verantwortlich sind für die Strom-, Wärme und Kältesysteme und die zuverlässige Energieversorgung des Standorts:

- Heizkraftwerke mit Leitwarte
- Maschinentechnische Anlagen
- Elektrotechnische Anlagen
- Facility Management und Zeiterfassung
- Umwelt/Abfallentsorgung
- Versorgungsnetze

Zusätzlich sind aktuell ca. 50 Personen bei der Werkfeuerwehr Garching angestellt, die – als Teilbereich ihrer Aufgaben – im Krisenfall bei der akuten Bekämpfung von Gefahren

im Energiesystem Hilfe leisten können. Die Werkfeuerwehr befindet sich ca. 200 m entfernt vom Referat Gebäudemanagement.¹⁶



Abbildung 10: Darstellung der räumlichen Nähe zwischen Umspannwerk (Vordergrund), Heizkraftwerk und Leitzentrale (zwei Schornsteine im Hintergrund links) und TUM Feuerwehr (Turm mit zwei Antennen im Hintergrund rechts)

Die Stromversorgung der TUM in Garching wird im Regelfall aus zwei Quellen gedeckt: Einerseits durch Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz sowie zum anderen durch den Betrieb einer Gasturbine mit Cheng-Cycle ($7,5 \text{ MW}_{\text{peak, thermisch}}$, $6 \text{ MW}_{\text{peak, elektrisch}}$). In Summe tragen derzeit (Q3 2019) beide Quellen zu ähnlichen Teilen zur jährlichen Strombedarfsdeckung bei. Durch den stetigen Ausbau des Forschungsgeländes sowie der angrenzenden Stadt Garching gewinnt der Netzbezug zunehmend an Bedeutung. Aus diesem Grund wird das bestehende Umspannwerk derzeit deutlich erweitert, vollständig umgebaut und eingehaust. Beide Quellen, das Umspannwerk und das Heizkraftwerk, befinden sich räumlich unmittelbar nebeneinander am südlichen Ende des Universitätscampus. Zur Notfallversorgung stehen an diesem Standort weiterhin drei Notstromdieselgeneratoren (je $2 \text{ MW}_{\text{peak}}$) zur Verfügung, welche die Stromerzeugung im Falle eines Ausfalls des Heizkraftwerks für eine begrenzte Zeit ersetzen können. Ein Ausfall der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz wäre allerdings auch bei funktionstüchtigem Heizkraftwerk in der derzeitigen Auslegung nicht vollständig abgedeckt. Ein kleiner Teil des Strombedarfs wird durch Auf-Dach-Photovoltaiksysteme ($80 \text{ kW}_{\text{peak}}$) gedeckt. Diese Anlagen sind nicht mit Batteriespeichern ausgestattet und tragen nicht zur Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung bei. Die Stromverteilung wird durch ein zentral in der technischen Zentrale überwachttes Mittelspannungsnetz gewährleistet. Dieses Netz ist in drei räumlich unabhängige Ringe aufgeteilt und mit einem redundanten Ersatznetz ausgestattet.

Die Wärmeversorgung wird durch das Heizkraftwerk sowie zwei unterstützende Spitzenlastkessel (je $20 \text{ MW}_{\text{peak}}$) erbracht. Die Kessel befinden sich am Standort des Heizkraftwerks, die Anlagen werden durch denselben Gasübergabepunkt versorgt. Zur Wärmeverteilung wird ein nicht redundantes Fernwärmenetz betrieben. Die Kälteversorgung der verschiedenen Gebäude wird etwa zu gleichen Teilen durch fernwärmebetriebene Absorptionskältemaschinen (thermische Verdichter mit $6 \text{ MW}_{\text{peak}}$) und elektrische Kompressionskältemaschinen ($4 \text{ MW}_{\text{peak}}$) gewährleistet. Nur in wenigen Gebäuden sind allerdings beide

¹⁶ <https://campus.tum.de/tumonline/webnav.ini>, abgerufen am 18. August 2019

Technologien vorhanden (Ross, 2019). Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung des beschriebenen Energiesystems.

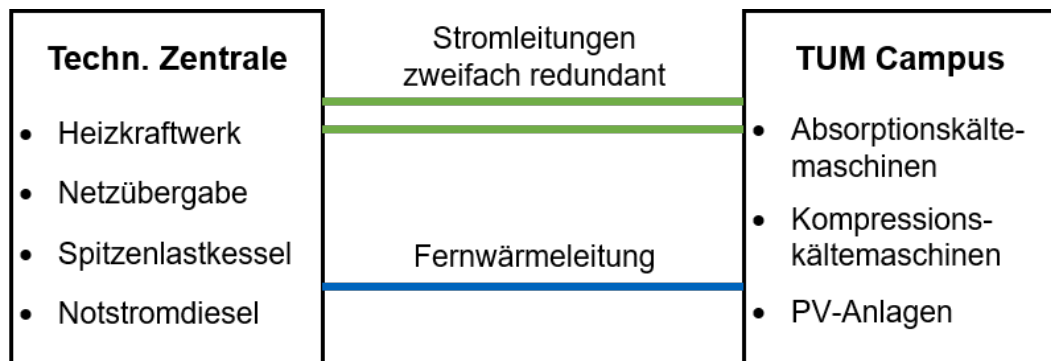


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen der technischen Zentrale und Verbrauchern des Energiesystems am TUM Campus Garching

4.2. Organisationale Resilienz am Campus Garching

Am TUM Standort Garching sind etwa 50 im öffentlichen Dienst Festangestellte mit der Sicherstellung einer reibungslosen Funktion der TUM-Gebäude betraut. Die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen sind dem TUM-Referat 45 zugeteilt, besitzen abgeschlossene Berufsausbildungen und verfügen demnach ihren Positionen entsprechende Qualifikationen zur Ausübung ihrer Profession. Insbesondere die Angestellten auf Leitungsebene verfügen darüber hinaus über weiterqualifizierende Hochschulabschlüsse. Die festen Arbeitsplätze befinden sich im Heizkraftwerk sowie im Büro- und Werkstattgebäude am südwestlichen Ende des Campus, wobei Mitarbeiter*innen regelmäßig zur Überprüfung und Instandsetzung von defekten Anlagen oder Bauteilen in der Regel per Kraftfahrzeug auf dem Campusgelände unterwegs sind.



Abbildung 12: Technische Zentrale: Büro- & Werkstattgebäude des TUM Referats 45 - Gebäudemanagement Campus Garching mit dahinterliegendem Heizkraftwerk

4.2.1. Analyse von Expertenansichten durch den *Resilienzfragebogen*

Der in Kapitel 3.3 entwickelte Fragebogen dient als Grundlage für die Analyse der organisationalen Resilienz am TUM Campus Garching. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um die beispielhafte Anwendung einer konzeptionellen Bewertungsmethodik auf ein reelles Energiesystem handelt, ist es nicht das Ziel, eine vollumfängliche Untersuchung darzulegen. Vielmehr versteht sich die Erhebung als initialer Schritt, ein Augenmerk auf die Handlungsfähigkeit des betreffenden Energiesystems aus organisationaler Sicht zu legen, insbesondere im Eintrittsfall widriger Ereignisse. Deshalb wird zum jetzigen Zeitpunkt auf eine umfangreiche und aufwendige Befragung – bspw. bei allen Mitarbeiter*innen im Referat 45 – verzichtet. Insgesamt wurden fünf Beschäftigte aus drei Sachgebieten um Beantwortung des *Resilienzfragebogens* gebeten, davon besetzen drei Angestellte Leitungspositionen. Mit fünf vollständig beantworteten Fragebögen wurde die gängige Mindestanzahl an Befragten erreicht, sodass für die konkrete Beantwortung der einzelnen Fragen von Anonymität ausgegangen werden kann. Neben diesen Feststellungen wurden mehrere Interviews mit Personen geführt, die mit dem Energiesystem des Campus sehr gut vertraut sind, u.a. (Sarıkaya, 2019) (Ross, 2019) (Müller, 2019) und (Schönleber, 2019). Die Befragungen und Interviews fanden in der Zeit zwischen März und Juli 2019 statt. Während die Beantwortung der Fragebögen jeweils etwa 20 Minuten in Anspruch nahmen, variierten die Interviews zwischen 30 und 60 Minuten.

Nach eigener Aussage sind die menschlichen Ressourcen in den befragten Abteilungen zu knapp bemessen, um jegliche anfallenden Reparaturen selbstständig durchzuführen. Für diesen Zweck werden regelmäßig externe Dienstleistungsfirmen aus dem Landkreis München hinzugezogen. Dadurch sind die Beschäftigten im Gebäudemanagement zum Teil an externe Terminpläne der Drittfirmen gebunden, was die Instandsetzung von Anlagen in dringenden Fällen empfindlich verzögern kann. Hier wurde deutlich, dass die Verfügbarkeit externer Arbeitskräfte einerseits vom Zeitpunkt und andererseits stark vom betroffenen Teilbereich abhängt. Abgesehen von dieser Herausforderung können insbesondere kurzfristige Ausfälle von geschulten Mitarbeitern zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Bewältigung des Normalbetriebs führen, da Arbeitsplätze nur begrenzt redundant besetzt werden und die Einsatzplanung kurzfristige Ausfälle bislang kaum berücksichtigt. Diese Ansichten spiegeln sich auch in der Beantwortung des *Resilienzfragebogens* wider.

4.2.2. Quantitative Einordnung der Antworten

Die im Fragebogen behandelten Themenstellungen stießen bei den fünf befragten Personen auf positive Resonanz. Die Fragen waren nach eigenen Aussagen für die Teilnehmer*innen verständlich gestellt, sodass Interpretationsschwierigkeiten weitgehend ausgeschlossen werden können. Wie in Kapitel 3.3 erläutert, waren die Befragten angehalten, die 24 Items jeweils auf einer fünfstufigen Ordinalskala (*Stimme voll zu* – *Stimme gar nicht zu*) zu beantworten.

Um die so ermittelten Antworten anschaulich darzustellen, werden die fünf Optionen auf eine prozentuale Verhältnisskala von 0 bis 100 % übertragen, wobei die Antwort *Stimme voll zu* auf der Skala 100 % entspricht. Von dort wird jeweils in festen Schritten abgestuft, sodass die Option *Stimme gar nicht zu* demnach 0 % gleichkommt. Diese Vorgehensweise (Umwandlung Ordinalskala zu Verhältnisskala) ist im statistischen Sinne gegebenenfalls zu hinterfragen (vgl. z.B. (Lantermann, 2009)), ermöglicht aber in der Folge, anhand mehrerer Antworten relevanter Umfrageteilnehmer*innen eine prozentuale Bestimmung der Resilienz (hier: „Resilienzgrad“) aus organisationaler Sicht.

Die Ergebnisse der initialen Erhebung durch den *Resilienzfragebogen* sind in Abbildung 13 für die acht Kriterien von Seite 37 ff in ihren jeweils übergeordneten Clustern dargestellt.

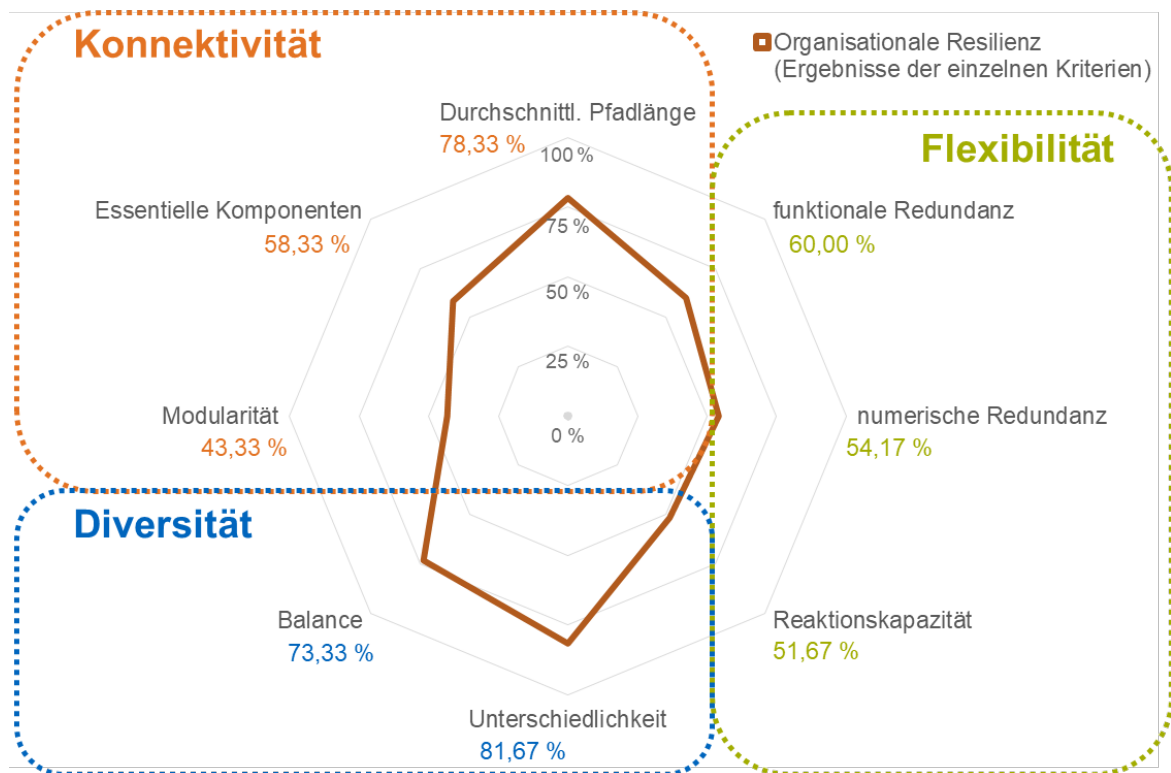


Abbildung 13: Ergebnisse der campusinternen, organisationalen Resilienzserhebung im Energiesystem am TUM Standort Garching, aufgeschlüsselt auf die Resilienzkriterien

4.2.3. Zusammenfassung der Antworten und Resilienzbewertung

Bei der Auswertung wird deutlich, dass die befragten Personen in einigen Aspekten sehr ähnliche Ansichten haben, bei anderen Themen sind dagegen größere Differenzen erkennbar. So wird bspw. die Frage nach ausreichend externer Hilfe im Krisenfall teilweise mit 0 %, aber ebenso mit 75 % bewertet (Frage 10, Kriterium funktionale Redundanz, Durchschnittlicher Resilienzgrad RG: 55 %, Varianz = 4). Größere Einigkeit herrscht dagegen zum Beispiel hinsichtlich des Bewusstseins der verschiedenen Rollen und Verantwortlichkeiten im Energiesystem (Frage 1, Kriterium Unterschiedlichkeit, RG: 95 %, Varianz = 1). In Abbildung 13 sind deutliche Differenzen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Kriterien erkennbar. Am auffälligsten stechen dabei die Extremwerte heraus, wobei *Modularität*

mit 43,33 % im direkten Vergleich am unteren Ende einzuordnen ist, während *Unterschiedlichkeit* mit 81,67 % am besten bewertet wird.

Als Teil des Kriterienclusters **Konnektivität** behandelt das Kriterium *Modularität* die Intensität der Interaktion zwischen verschiedenen Abteilungen sowie innerhalb derselben Abteilung (siehe Seite 39). Hier zeigt die Befragung, dass es zwar abteilungsintern einen guten Erfahrungsaustausch gibt (Resilienzgrad: 75 %), dieser jedoch zwischen verschiedenen Abteilungen nur begrenzt stattfindet (RG: 45 %). Ebenso deutlich wird, dass es praktisch keine Notfallübungen für den Ernstfall gibt (RG: 10 %). Der Mittelwert bei identisch gewichteten Fragen ergibt die in Abbildung 13 dargestellte Prozentzahl für das Kriterium.

Auf der anderen Seite ist klar erkennbar, dass das Kriterium *Unterschiedlichkeit*, also die Verschiedenheit sowie der Wissensstand einzelner Akteure bzw. Interessengruppen (vgl. Seite 40) bei den befragten Beschäftigten im Energiesystem des Campus hoch ausgeprägt ist. So sehen die Befragten ein hohes Bewusstsein der Verantwortlichkeiten innerhalb ihrer Abteilungen (Resilienzgrad: 95 %, siehe oben, Frage 10), bilden weitestgehend alle Kompetenzen und Organisationsstufen zur Bewältigung der täglichen Arbeit und in Krisensituationen ab (RG: 85 %) und werden in der Regel bei energiesystemrelevanten Zukunftsentscheidungen miteinbezogen (RG: 65 %). Die weiteren, derart aufgeschlüsselten Ergebnisse der Befragung finden sich im Anhang.

Um die Ergebnisse anschaulicher in den Kontext der Resilienzbewertung zu bringen und einen besseren Überblick zu schaffen, zeigt Abbildung 14 die gemittelten Resilienzgrade in Bezug auf die übergeordneten Cluster **Konnektivität**, **Flexibilität** und **Diversität**.



Abbildung 14: Ergebnis der organisationalen Resilienzbewertung des Energiesystems am TUM Campus Garching

Hier zeigt sich, dass ein Kriterium im Cluster **Konnektivität** zwar den niedrigsten Resilienzgrad aller Kriterien erzielte, insgesamt aber ergibt sich im Cluster **Flexibilität** mit 55,28 % das größte Optimierungspotential.

Die Ergebnisse der initialen Bewertung anhand des *Resilienzfragebogens* beweisen, dass die organisationale Resilienz im Energiesystem des TUM Campus Garching unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Während im Cluster **Diversität** bereits ein hoher Wert erreicht wird, offenbaren sich in den beiden anderen Hauptgruppen Defizite, die ggf. durch verantwortliche Gremien adressiert und behoben werden sollten.

4.3. Technische Resilienz am Campus Garching

Nachdem das Energiesystem aus organisationaler Sicht analysiert wurde, folgt nun die Resilienzbewertung aus der technischen Perspektive. Dafür werden die in Abschnitt **3.4** vorgestellten Schritte konkret auf das Energiesystem der TUM am Standort Garching angewendet. Das Vorgehen ist dabei wie folgt:

1. Bezugsgrößen für die technische Resilienz am Campus
2. Definition von Schockereignissen
3. Herleitung der jährlich zu erwartenden Ausfallkosten für Schadensereignisse
4. Zusammenfassung der Ergebnisse.

4.3.1. Bezugsgrößen für die technische Resilienz am Campus

Das in der vorliegenden Arbeit beispielhaft zu untersuchende Energiesystem ist Strom-, Wärme- und Kälteversorger für den größten Campus der TUM, sowohl flächenmäßig, als auch in absoluten Personal- und Studierenden-Zahlen (Technische Universität München, 2018), (Technische Universität München, 2019). Ein Großteil der Forschung und Lehre sowie der weiteren, am Campus erarbeiteten Wertschöpfung hängt direkt von einer funktionierenden Energieversorgung ab. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass generierte oder nicht-generierte – das heißt ausgefallene – Energie (in Megawattstunden) die erste, entscheidende Bezugsgröße für das Bewertungsmodell bildet.

Um im Rahmen einer umfassenden Betrachtung der technischen Resilienz relevante Schlussfolgerungen vornehmen zu können, erscheint es sinnvoll, die im System produzierte und verbrauchte Energie mit der generellen Wertschöpfung des Gesamtsystems am TUM Campus Garching in Relation zu bringen.

Die konkrete Definition der (ökonomischen) Wertschöpfung der Technischen Universität als staatliche Bildungseinrichtung gestaltet sich angesichts der vielschichtigen gesellschaftlichen Rolle von Hochschulen schwierig. Im Endbericht des Projekts „Hochschulen als regionaler Wirtschaftsfaktor“ benennen die Autoren vier zentrale Mehrwerte, die auch

in der vorliegenden Thesis die Grundlage zur Wertschöpfungsbewertung bilden (Schubert & Kroll, 2013):

1. Direkte Nachfrageeffekte durch wirtschaftliche Aktivitäten der Hochschulen, ihrer Beschäftigten sowie der eingeschriebenen Studierenden
2. Direkte Humankapitaleffekte durch die Ausbildung von Absolvent*innen für den Arbeitsmarkt sowie ggf. durch die Weiterbildung regionaler Arbeitnehmer*innen
3. Indirekte Effekte durch Wissens- und Technologietransfer in die umliegende Region durch Unternehmenskooperationen und -neugründungen
4. Indirekte Vernetzungseffekte durch soziales und/oder politisches Engagement in der Region

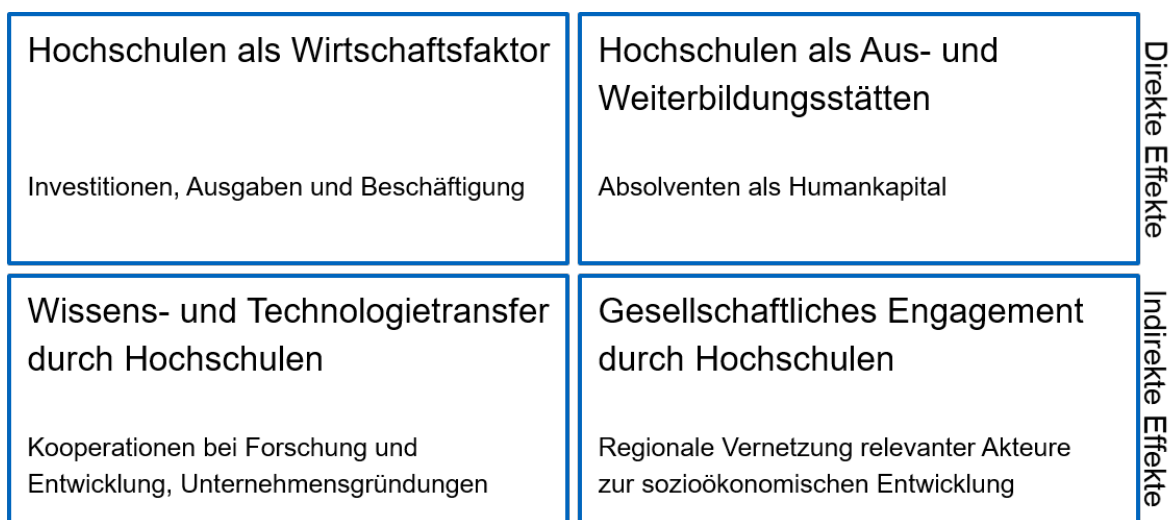


Abbildung 15: Wertschaffende Effekte von Hochschulen, eigene Darstellung angelehnt an (Schubert & Kroll, 2013)

Den Kern dieser Studie des Stifterverbands für die deutsche Wissenschaft bildet der ermittelte ökonomische Effekt deutscher Hochschulen auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP). Demnach beziffern die Autoren den Beitrag aller bayrischen Hochschulen als regionale Wirtschaftsfaktoren zum BIP des Freistaats Bayern im Jahr 2013 auf 24,91 Mrd. € (Deutschland: 190,4 Mrd. €) (Schubert & Kroll, 2013).

Zum Zeitpunkt der Studie im Jahr 2013 hatte die Technische Universität München 8.434 hauptberuflich an der Hochschule Beschäftigte, davon 3.720 am Standort Garching. Dabei wurden Auszubildende sowie wissenschaftliche Hilfskräfte oder Studierende mit wissenschaftlichen Hilfstätigkeiten nicht mitberücksichtigt (Technische Universität München, 2014). Gemessen am gesamten hauptberuflich angestellten Personal an bayrischen Hochschulen (2013: 100.892 Personen (Statistisches Bundesamt, 2014)) entfallen demnach 3,6871 % auf den Standort Garching der TUM. Mit der vereinfachenden Annahme, dass die Wertschöpfung einer Hochschule ausschließlich durch die hauptberuflich Beschäftigten erbracht werde, können die Kennzahlen verknüpft werden.

Der entsprechend gewichtete Anteil des Campus Garching an der monetären Wertschöpfung aller bayrischen Hochschulen entspricht etwa 918,46 Mio. € Wirtschaftsleistung pro Jahr. Für jede Stunde des Jahres errechnet sich damit im Mittel eine Wertschöpfung in Höhe von 104.847 €. Dies kann als der ökonomische Mehrwert betrachtet werden, der stündlich am Campus Garching erbracht wird.

	Hauptberufliches Personal an Hochschulen	BIP-Zuwachs durch Hochschulen pro Jahr	BIP-Zuwachs durch Hochschulen pro Stunde
Deutschland	662.076	190,4 Mrd. €	21,735 Mio. €
Bayern	100.892	24,91 Mrd. €	2,843 Mio. €
TUM gesamt	8.434	2,1 Mrd. €	237.671 €
TUM Garching	3.720	0,918 Mrd. €	104.847 €

Tabelle 2: Vergleich zwischen hauptberuflich angestelltem Hochschulpersonal, hochschulbedingtem Zuwachs des Bruttoinlandsprodukts und der monetären Wertschöpfung durch Hochschulen pro Stunde im Jahr 2013 (Schubert & Kroll, 2013), (Statistisches Bundesamt, 2014), (Technische Universität München, 2014)

2017 hat sich die Mitarbeiterzahl am TUM Campus Garching im Vergleich zu den oben genannten Zahlen leicht verringert (3.529 Personen), während der Hochschul-Etat für die gesamte Technische Universität von 1,2 Mrd. € im Jahr 2013 (davon 295,3 Mio. € durch Drittmiteinnahmen) auf 1,45 Mrd. € (Drittmittel: 331,6 Mio. €) um über 20 % gestiegen ist (Technische Universität München, 2018). Damit ist anzunehmen, dass die Wertschöpfung pro Stunde am Standort Garching mittlerweile sogar über die veranschlagten 104.847 € hinausgeht, was jedoch im Kontext dieser Masterarbeit nicht weitergehend erörtert wird.

Vielmehr soll der eingeführte Betrag der stündlichen Wertschöpfung einen probaten Ansatz liefern, um die Auswirkungen von den nun zu definierenden Schockereignissen monetär bewerten zu können.

4.3.2. Definition von Schockereignissen

Die Definition der Schockereignisse orientiert sich an Schritt 2 des zuvor eingeführten Konzepts (siehe Abschnitt 3.3). Für den Campus Garching ergeben sich durch dieses Vorgehen für die drei definierten Kriteriencluster **Konnektivität**, **Flexibilität** und **Diversität** jeweils unterschiedliche Szenarien. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass potentielle Schäden an Personen, gleich ob Mitarbeiter*innen, Studierende oder Dritte, nicht in den hier getroffenen Annahmen berücksichtigt werden, sondern die Erhebung vielmehr ein generelles Verständnis der Thematik, vorrangig auf technischer und organisationaler Ebene vertiefen soll. Weitere Ausführungen zur Rolle ethischer Maßstäbe finden sich unter anderem in (Berg, et al., 1995). Entsprechend der vorrangig technischen Perspektive ergeben sich die folgenden Schockereignisse bzw. Szenarien zur weiteren Betrachtung aus den Gesprächen mit Experten des Campus (u.a. (Müller, 2019) und (Schönleber, 2019)):

Cluster **Konnektivität**:

Angelehnt an das Schaubild in Abbildung 11 besteht das Energiesystem am Campus Garching aus zwei wesentlichen Knoten: Der technischen Zentrale, in der alle Energieerzeugungsanlagen sowie die Übergabepunkte zur öffentlichen Energieinfrastruktur lokalisiert sind und dem restlichen Campus, an dem die Energie verbraucht wird. Schockereignisse für diesen Cluster werden in der vorliegenden Arbeit als Ausfälle von räumlichen Systemknoten definiert. Demnach bildet eine Trennung der technischen Zentrale vom Campus (das heißt der Ausfall der technischen Zentrale) in diesem Cluster das einzige Schockereignis für die Resilienz Betrachtung des Campus Garching.

Cluster **Diversität**:

In diesem Fall wird für das Anwendungsbeispiel davon ausgegangen, dass die Energieerzeugungsanlagen selbst nicht von einem Schockereignis betroffen seien, sondern die öffentlichen Energieversorgungswege unterbrochen werden. Es ergeben sich für die Energiebezugsquellen Strom und Gas somit drei mögliche Schockereignisse, genauer ein Ausfall der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz, analog ein Ausfall der Gasversorgung aus dem Gasnetz oder aber ein Ausfall sowohl der Strom- als auch der Gasversorgung aus dem jeweiligen öffentlichen Netz.

Cluster **Flexibilität**:

Für die Auswahl relevanter Schockereignisse in diesem Cluster wird mit dem n-1-Kriterium „ein grundsätzlicher Sicherheitsstandard der Netzplanung und -betriebsführung“¹⁷ hinzugezogen, um etwaige Ausfälle zu simulieren. Zum Zweck einer n-1 Betrachtung des Standorts werden alle relevanten Energiewandler und Übertragungsnetze jeweils einzeln abgeschaltet und anschließend die jeweiligen Auswirkungen bewertet. Am Campus in Garching ergeben sich acht mögliche Schockereignisse, genauer sind dies jeweils Ausfälle der Gasturbine mit Cheng-Cycle, des Umspannwerk, von Photovoltaikanlagen, eines Spitzenlastkessels, der Absorptions- bzw. Kompressionskältemaschinen sowie Energieübertragungsstörungen im Strom- und Wärmenetz. Diese Auswahl entspricht näherungsweise allen relevanten Komponenten zur Energieproduktion und -weiterleitung am Campus Garching. (Schönleber, 2019), (Müller, 2019), (Sarıkaya, 2019).

Damit wurden für die drei Cluster zwölf Schockereignisse identifiziert, die in den folgenden Schritten quantitativ bewertet werden.

¹⁷ (Agora Energiewende & Energynautics, 2018, S. 25)

	Cluster		
	Konnektivität	Diversität	Flexibilität
Betrachtete Schockereignisse in jedem Cluster	1. Ausfall der technischen Zentrale	1. Ausfall der öffentlichen Stromversorgung am Bezugspunkt 2. Ausfall der öffentlichen Gasversorgung am Bezugspunkt 3. Ausfall sowohl der öffentlichen Strom- als auch der Gasversorgung am Bezugspunkt	1. Ausfall der Gasturbine mit Cheng-Cycle 2. Ausfall des Umspannwerks 3. Ausfall der Energieerzeugung aus Photovoltaik 4. Ausfall eines Spitzenlastkessels 5. Ausfall der Absorptionskältemaschinen 6. Ausfall der Kompressionskältemaschinen 7. Ausfall einer Stromleitung (auf Mittelspannungsebene) 8. Ausfall der Fernwärmeleitung

Tabelle 3: Die zwölf in der linearen Optimierung zugrunde gelegten Schockereignisse aufgeteilt auf die drei Cluster

4.3.3. Herleitung der jährlich zu erwartenden Ausfallkosten für Schadensereignisse

In den vorangegangenen Schritten wurden sinnvolle Bezugsgrößen der Resilienz, eine nachvollziehbare Erhebung der ökonomischen Wertschöpfung am Campus sowie potentielle, auf den drei Kriterienclustern basierende Ausfallszenarien definiert. Damit können die potentiellen Auswirkungen jedes Schockereignisses erarbeitet werden. Im vorliegenden Fall werden diese Auswirkungen mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells ermittelt.

Am TUM Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS) wurde ein solches Modell mit Hilfe der Open-Source Software *urbs* implementiert, um ein kostenoptimales Energiesystem des Campus Garching zu simulieren. Der „Multiple Input Multiple Output“ (MIMO) Ansatz des linearen Optimierungsmodells eignet sich dazu, realitätsnah beliebig viele Verbrauchs- und Erzeugungsvariablen eines Energiesystems darzustellen, sie in Prozessen miteinander zu verknüpfen und das modellierte System (z.B. kosten-) optimiert zu gestalten (Dorfner, 2016).

Zur quantitativen Resilienz Betrachtung werden Anpassungen am Optimierungsmodell vorgenommen, um möglichst genau auf die unterschiedlichen Auswirkungen der Szenarien aus Schritt 2 (Kapitel 4.3.2) einzugehen. Insbesondere wurden die Granularität der modellierten Energieanlagen und deren räumliche Verortung nach Rücksprache mit leitenden Angestellten des Energiesystems realitätsgetreuer angepasst. Das Modell ermöglicht – je nach betrachtetem Schockereignis – bestimmte Komponenten des Energiesystems abzuschalten, um einen Ausfall zu simulieren (bspw. Störungen der Strom- oder Gasversorgung, verringerte Funktion der Gasturbine, usw., vgl. Tabelle 3). Die Modellierung des Energiesystems am Universitätsstandort Garching erfolgt in *urbs* mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Der Inputdatensatz besteht neben den realen Angaben über vorhandene Energieinfrastrukturen aus jeweils 8.760 Datenpunkten für den stündlichen Verbrauch von Strom, Wärme- und Kälteenergie am Campus im Jahr 2015. Die Kostenannahmen für Brennstoffe, Energiebezug aus dem öffentlichen Netz, CO₂-Zertifikate, fixe und variable Kosten, Investitionen, usw. basieren auf umfassenden Literaturrecherchen (u.a. (Juhrich, 2016), (Kemmler, et al., 2016), (BDEW, 2018), (Europäische Kommission, 2018)). Ein Auszug der Inputparameter zur modellbasierten Abbildung der vorhandenen Energieinfrastrukturen befindet sich im Anhang.

Das lineare Optimierungsmodell hat die Aufgabe, möglichst kostengünstig die Energienachfrage nach Strom, Wärme und Kälte am Campus zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten. Sofern die Deckung der Nachfrage mit den derzeit vorhandenen Erzeugungsanlagen und Übertragungsleitungen aufgrund eines Komponentenausfalls nicht möglich ist, wird dies in der Optimierung deutlich. In einem solchen Fall kann mit Hilfe von Schlupfvariablen nicht gedeckte Energie ermittelt werden. In Abbildung 16 sind die Auswirkungen eines Ausfalls der öffentlichen Stromversorgung beispielhaft dargestellt:

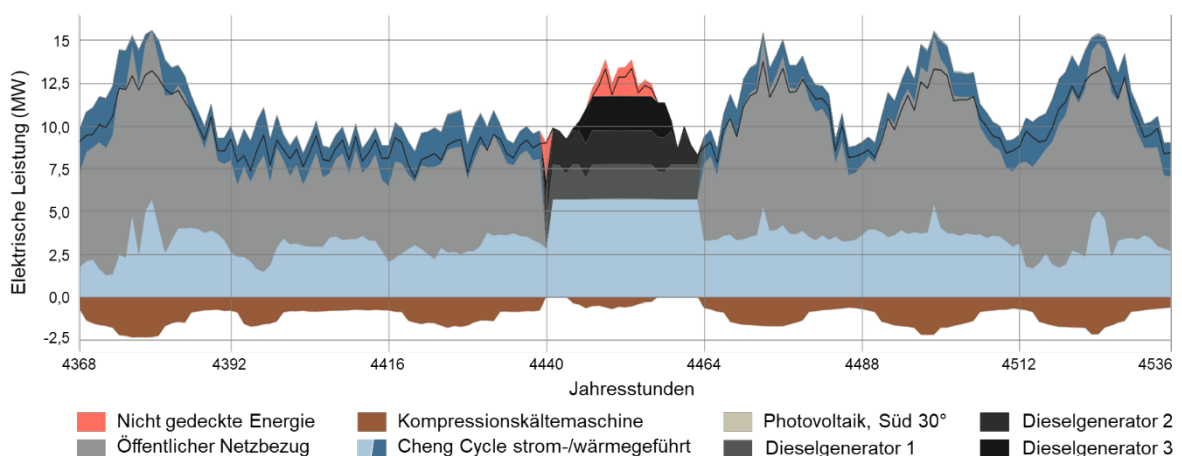


Abbildung 16: Ergebnis der linearen Optimierung für Strom im Falle eines Ausfalls der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz im Sommer für 24 Stunden

Im abgebildeten Beispiel kann ein Teil der nachgefragten elektrischen Energie für 24 Stunden nicht bereitgestellt werden, da – ungeachtet der Ursache – die Stromversorgung aus

dem öffentlichen Netz nicht gegeben ist. In einem solchen Fall wird die Gasturbine mit nachgelagertem Cheng-Cycle von wärmegeführtem auf stromgeführten Betrieb umgestellt (hellblauer Bereich), sodass zwar etwa 5,4 MW elektrische Leistung, gleichzeitig jedoch deutlich weniger thermische Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Die drei in der technischen Zentrale installierten Notstrom-Dieselmotoren mit einer Leistung von jeweils 2 MW können die Nachfrage des Campus (schwarze Linie) zu Beginn des Ausfalls (Reaktionszeit und Anfahrtdauer der Generatoren) sowie in der Tagesspitze nicht vollständig decken, sodass ungedeckte Nachfrage nur mit Hilfe einer Schlupfvariable erfüllt werden kann. Nicht erbrachte Energie – also nicht erbrachte Leistung multipliziert mit der Zeit (rot dargestellt) – wird im Folgenden als „ausgefallene“ Megawattstunden bezeichnet, deren „Kosten“ im weiteren Verlauf sinnvoll gewichtet und bewertet werden.

Die Grundlage zu dieser Bewertung bildet der in Schritt 1 eingeführte Betrag der stündlichen Wertschöpfung in Höhe von 104.847 €. Durch die Verknüpfung ausgefallener Energie („Nicht gedeckte Energie“ – rot, in Abbildung 16) mit diesem Wertschöpfungsbetrag lässt sich ermitteln, welche ökonomischen Auswirkungen ein zeitweiser Ausfall von Energiesystemkomponenten hat. Da eine ausgefallene Megawattstunde Energie nicht pauschal nur einen einzigen, festen Preis hat, sollen im Folgenden weitere Parameter eingeführt werden, um die Auswirkungen unterschiedlicher Ereignisse fundiert zu unterscheiden.

Mit einer geeigneten Faktorisierung kann die veranschlagte Summe auf verschiedene Schockereignisse sowie deren Zeitpunkte und Dauer bezogen werden, um die jeweils entgangene Wertschöpfung bzw. entstehende Kosten zu berechnen.

Faktorisierung für unterschiedliche Arten von Ausfällen

Kommt es zu einem Ausfall von Systemkomponenten, wird Energie nicht wie vorgesehen produziert oder zu Verbrauchern transportiert. Sofern diese Energie nicht mit Hilfe alternativer Erzeugungsanlagen oder Übertragungsleitungen bereitgestellt werden kann, hat dies neben dem zuvor beschriebenen Ausfall der Wertschöpfung am Standort offenkundig weitere Konsequenzen, die in ihrer Vollständigkeit allerdings den Rahmen dieser methodischen Resilienzbewertung sprengen würden. Die Thesis adressiert daher lediglich grundlegende, nachvollziehbare ökonomische Auswirkungen. Aus wirtschaftlicher Sicht hat ein Ausfall von Systemkomponenten insbesondere zur Folge, dass ursprünglich geplante Ressourcen nicht verbraucht und andererseits andere Ressourcen kurzfristig hinzugezogen werden müssen. Vordergründig handelt es sich dabei um Brennstoff zur Energieerzeugung, ebenso möglich ist die Nutzung von Ersatzanlagen, während die ausgefallenen Komponenten möglicherweise kostenintensiv und zeitaufwendig repariert werden müssen.

Da sich die in Tabelle 3 gebündelten potentiellen Schockereignisse mitunter erheblich voneinander unterscheiden, sind Reparaturkosten und deren Zeitaufwand kaum zu pauschalisieren. Insbesondere die Gründe, die zu einem Ausfall führen können, reichen von defekten, leicht ersetzbaren technischen Komponenten (z.B. Schutzschalter) hin zu Kontamina-

tion oder sogar Explosionen von Anlagen (bspw. in Folge von Unwetter, Erdbeben, Terrorismus). Gänzlich unbekannte oder unvorhersehbare Gefahrenquellen sind noch komplexer in ein (quantitatives) Modell zu integrieren, da etwaige Eintrittswahrscheinlichkeiten praktisch keine begründete Basis haben (Linkov, et al., 2014), (Scharte & Thoma, 2016).

Trotzdem soll im Folgenden mit vereinfachenden Annahmen die Grundlage für eine nachvollziehbare Methodik der Resilienzbewertung präsentiert werden. In Anlehnung an Abbildung 5 wird zur Feststellung der technischen Resilienz darauf verzichtet, Schäden am Gesamtsystem und damit existenzbedrohende und oft langfristige Stressfaktoren mit in die Bewertung aufzunehmen. Unter diesen Voraussetzungen werden in den folgenden Überlegungen einer geeigneten Faktorisierung neben stündlichen Wertschöpfungsverlusten z.B. etwaige Reparaturkosten, Kosten für zeitliche Bindung von Arbeitskräften (zur Behebung der Schäden) sowie Kosten für eine alternative Energiebereitstellung berücksichtigt.

Das Zeitfenster für die Expositionsdauer eines Stressfaktors auf das Energiesystem liegt in der vorliegenden Arbeit zwischen einer Stunde und einer Woche (vgl. Tabelle 4). Ein verhältnismäßig kurzer Ausfall von Systemkomponenten (eine Stunde) und damit entgangene Wertschöpfung ist in der Regel als weniger gravierend zu bewerten als ein mittelfristiger Ausfall (ein Tag bzw. eine Woche). Dies begründet sich unter anderem darin, dass durch eine „Verdichtung“ oder „Nachholung“ von Arbeitsprozessen häufig ein Teil des Arbeitsausfalls kompensiert werden kann. Sofern der Ausfall länger andauert, reduziert sich diese Möglichkeit zunehmend. Weiterhin wird vereinfachend angenommen, dass bei einem kurzfristigen Ausfall Systemkomponenten, insbesondere Infrastrukturen oder Gebäude, weniger Schaden nehmen als bei tage- oder sogar wochenlangen Ausfällen.

Da ein Schaden bzw. Ausfall, der spätestens innerhalb von einer Woche behoben werden kann, erfahrungsgemäß (u.a. (Sarıkaya, 2019), (Müller, 2019)) übermäßige bauliche Eingriffe oder Neubauten ausschließt, wird als 0,7 als maximaler Schadensfaktor definiert.

Für einen einwöchigen Schaden liegen die stündlichen Kosten $K_{Ausfall, \text{stündlich}}$ ohne Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit entsprechend Tabelle 4 bei

$$K_{Ausfall, \text{stündlich}} = 104.847 \text{ €} * 0,7 = 73.392,90 \frac{\text{€}}{h}$$

Ebenso ist zu berücksichtigen, zu welchem Zeitpunkt ein Ausfall, gleich welcher Dauer, stattfindet. So ist ein Ausfall am Tage mit höheren ökonomischen Schäden zu bewerten als in der Nacht, da die meiste Wertschöpfung an öffentlichen Einrichtungen wie einer Universität in der Regel in der „normalen“ Arbeitszeit (ca. 6 Uhr bis 18 Uhr) erbracht wird.

Ein Ausfall am Wochenende ist entsprechend derselben Logik weniger gravierend als ein Ausfall an einem oder mehreren Werktagen, wobei der Samstag hier dem Wochenende zugerechnet wird, da es sich bei der Technischen Universität München um eine staatliche Organisation mit Forschungsfokus und weitgehend normalen Büroarbeitszeiten handelt. Sofern der hier vorgestellte Bewertungsansatz auf die Industrie bzw. das produzierende

Gewerbe angewandt wird, sollten Faktorisierung und zeitliche Differenzierung den entsprechenden Wertschöpfungszeiten angepasst werden.

Zuletzt ist die Jahreszeit zu berücksichtigen, in der ein Schockereignis und damit verbundene Systemausfälle auftreten. Zur Betrachtung der Resilienz am Campus Garching wird vereinfacht angenommen, dass die Wertschöpfung der Universität das ganze Jahr konstant sei, auf demselben Niveau von 104.847 € verbleibt und auch Schäden, die an Gebäuden oder sonstiger Infrastruktur entstehen, über das Jahr gleichverteilt teuer sind. So könnte beispielsweise ein Einfrieren von Leitungen im Winter zu erheblichen Schäden führen, doch ebenso wäre es aus ökonomischer Sicht möglich, aufgrund von Frühlingsstürmen oder Sommergewittern ähnliche Schadenssummen (ggf. bei Ausfällen anderer Komponenten) zu erreichen. Entsprechend wird zur Simplifizierung angenommen, dass die Faktorisierung des Schadens unabhängig von konkret betroffenen Systemkomponenten bzw. der Systeminfrastruktur (vgl. Schockereignisse in Tabelle 3) sei, ebenso wie von der Jahreszeit, in der ein Schockereignis auftritt. Entsprechend dieser Vorgaben ergeben sich folgende Werte für die angewandten Faktoren:

		Ausfallzeitraum				
		1 Stunde		1 Tag		1 Woche
		Tagsüber	Nachts	Wochenends	Wochentags	
Jahreszeit	Frühling	0,2	0,1	0,2	0,4	0,7
	Sommer	0,2	0,1	0,2	0,4	0,7
	Herbst	0,2	0,1	0,2	0,4	0,7
	Winter	0,2	0,1	0,2	0,4	0,7

Tabelle 4: Faktorisierung $f_{\text{Zeitpunkt,Dauer}}$ der durch einen Schock ausgelösten Kosten am Campus Garching, in Abhängigkeit von Ausfallzeitpunkt und -dauer sowie der Jahreszeit, in der ein Schockereignis auftritt

Bei der Festlegung dieser systemspezifischen Faktorisierung kann die organisationale Resilienz als wichtiger Differenzierungsaspekt hinzugezogen werden: Je nachdem, wie resilient ein System aus organisationaler Sicht ist, können innerhalb weniger Stunden oder Tage bereits Maßnahmen getroffen worden sein, um die Wertschöpfung nach einem Schockereignis zumindest in Teilen aufrechtzuerhalten oder auszulagern. Dieses Verhalten ist insbesondere aus ökonomischer Sicht sinnvoll und wird – wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung und Güte – bei der Ressourcenplanung von praktisch jedem Unternehmen im Rahmen des Krisenmanagements befolgt. Auf dieser Grundlage kann argumentiert werden, dass in einem mehr oder weniger resilienten System die Wertschöpfung bei kurz- und mittelfristigen Ausfällen von bis zu einer Woche nicht auf 0 fallen kann. Der direkte Zusammenhang von technischer und organisationaler Resilienz eines Systems wird in Kapitel 3.2 vertieft. Es ist denkbar, die Ergebnisse aus der vorgegangenen Erhebung der Resilienz aus organisationaler Sicht in die hier vorzunehmende Faktorisierung einzubeziehen. Diese direkte Kopplung der Erkenntnisse aus dem ersten Erhebungsschritt mit den

Ergebnissen der Resilienzbewertung aus technischer Sicht wird jedoch im vorliegenden Fallbeispiel nicht vorgenommen.

„Milde“ und „disruptive“ Auswirkungen auf den Campus

Die Unterscheidung von gravierenden und weniger gravierenden Schäden wird in der vorliegenden Methodik nicht auf Basis der betroffenen Systemkomponenten getroffen, sondern richtet sich nach den Auswirkungen auf die Funktionalität (vgl. die Bezugsgröße) des Energiesystems. Nach Rücksprache mit Energieverantwortlichen des Campus (Sarıkaya, 2019), (Ross, 2019), (Müller, 2019) wird im Fallbeispiel davon ausgegangen, dass ca. 5 MW der am Campus dauerhaft nachgefragten elektrischen Leistung dem Erhalt teurer Geräte und der allgemeinen Sicherheit (Absauganlagen im Chemie-Gebäude, Notbeleuchtung, Aufrechterhaltung notwendiger Kommunikationsanlagen, usw.) dienen. Sofern, trotz etwaiger Störungen oder Ausfälle, nach wie vor mindestens 5 MW durch alternative Energiebeschaffung gedeckt sind, werden die Auswirkungen als „mild“ bezeichnet und kosten-technisch einfach bewertet. Eine beispielhafte Darstellung dieser „milden“ Auswirkungen liefert Abbildung 16: Hier reduziert sich die erbrachte Leistung auch im Schadensfall nicht unter die Grenze von 5 MW, weshalb lediglich einfach bewertete Ausfallkosten entstehen.

Bei schwerwiegenderen Ausfällen kann die essentielle Grundlast in Höhe von 5 MW elektrischer Leistung nicht mehr gedeckt werden. In solchen Fällen können erhebliche Schäden an Anlagen als Folge disruptiver Schockereignisse auftreten. Die Kosten für ausgefallene Leistung in diesem Bereich werden daher gegenüber des "milden" Ausfalls als dreifach erhöht angenommen und mit der Konstante $c_{disruptiv}$ multipliziert.

Auf ähnliche Weise kann ein mittelfristig anhaltender Komponenten- oder Systemausfall betrachtet werden. Dauert der Störfall über einen längeren Zeitraum an (das heißt im Campusbeispiel für einen Tag oder sogar eine Woche), kann es unter Umständen zu irreparablen Schäden an der grundlegenden Infrastruktur, also einem katastrophalen Ereignis, kommen. Ein mögliches Beispiel wäre eine Kontamination bzw. Zerstörung der Bausubstanz durch Explosionen (z.B. in Transformatorgebäuden) oder giftige Chemikalien (bspw. in Laboren der Fakultät für Chemie). In einem solchen Fall könnte neben Unbenutzbarkeit und Ausfall von Arbeitsleistung die Notwendigkeit eines vollständigen Neubaus der zerstörten Infrastruktur zu hohen Kosten die Folge sein.

Gleichzeitig erscheint es jedoch möglich, zentrale Wertschöpfungseinheiten, insbesondere Teile der Belegschaft, an anderen Orten bzw. auf andere Art und Weise in ihrer Weiterarbeit zu befähigen. So könnte zumindest der dauerhafte Ausfall von Forschung und Wertschöpfung in einem solchen Krisenfall abgewendet werden. Da in der Regel in jedem System schnellstmöglich Maßnahmen ergriffen werden, um Schäden zu begrenzen und Leistung aufrechtzuerhalten, ist anzunehmen, dass nach einer gewissen Zeit nicht mehr derselbe Wertschöpfungsverlust auftritt wie zu Beginn eines Schocks. Begründet durch die räumliche Ausdehnung des Campus und die Unterschiedlichkeit der wertschöpfenden Strukturen (Fakultäten, Labore, Werkstätten usw.) wird für die hier betrachteten Ereignisse

eine existentielle Bedrohung des Gesamtsystems ausgeschlossen (vgl. Abschnitt 3.2). Entsprechend wird auch für „katastrophale“ Ereignisse gegenüber eines „milden“ Ausfalls eine um den Faktor 3 erhöhte Kostensumme angewandt, die jeweils auf den gesamten Ausfallzeitraum projiziert wird.

Einordnung und Bewertung der Wärme- und Kälteenergiesysteme

In dieser Arbeit soll das Hauptaugenmerk auf der Versorgung mit elektrischer Energie liegen. Gleichwohl ist im Rahmen einer umfänglichen Resilienz Betrachtung ebenso eine Berücksichtigung von Wärme- und Kälteenergie naheliegend, nicht zuletzt wegen neuer Systemanforderungen im Zuge der voranschreitenden Sektorkopplung (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.), 2017). Auch im Hinblick auf die organisationale Aufhängung der Energiesystemüberwachung ist festzustellen, dass Strom, Wärme und Kälte in einer Vielzahl von Unternehmen, insbesondere kleinen oder mittelständischen Industriebetrieben, oft gemeinsam in einer zentralen Leitstelle gesteuert und überwacht werden. Dies ist auch am TUM Forschungszentrum in Garching der Fall, wo alle relevanten Steuerungs- und Überwachungsmechanismen in der technischen Zentrale am südwestlichen Ende des Campus zusammenlaufen (siehe Abbildung 9).

Im Folgenden werden einige Annahmen für die Bewertung der thermischen Energieanlagen getroffen, um das Energiesystem Garching realitätsnäher zu modellieren. Damit wird außerdem eine geeignete Unterscheidung zwischen dem teilweise sicherheitsrelevanten Stromsystem und den Wärme- und Kältesystemen vorgenommen, da die letzteren vornehmlich für gute Luftqualität, angenehme Raumtemperaturen und Warmwasser sorgen.

Für das Wärmesystem am Campus (hauptsächliche Nutzung: Heizung, Warmwasser) werden in dieser Arbeit keine erheblichen oder katastrophalen Effekte angenommen, da in der Regel ein irreversibler, kostenintensiver Schaden insbesondere bei kurzfristigen Ausfällen eher auszuschließen ist als bei der Nicht-Versorgung mit elektrischem Strom.

Im vorliegenden Fall wird erst ab der vierten Ausfallstunde das zuvor eingeführte Schadensmaß berücksichtigt, da ein Ausfall des Wärmesystems von betroffenen Mitarbeitern und Studenten oft erst nach einer gewissen Zeit registriert wird, z.B. sobald die in den Rohrleitungen befindlichen Warmwasserreserven verbraucht sind. Entsprechend ist anzunehmen, dass ein Ausfall des Wärmesystems aufgrund von thermischer Trägheit nicht unmittelbar zu einem Arbeitsausfall und damit Wertschöpfungsverlust am Campus führt. Auch Schäden an der Systeminfrastruktur wirken sich häufiger erst nach längerem Defekt aus (bspw. Einfrieren von Wärmeleitungen), abgesehen von plötzlichen, schwerwiegenden Unfällen wie Explosionen oder Bränden.

Die Wärmeversorgung des Campus erfolgt aktuell über eine ringförmige Leitung, welche die Wärme aus der Gasturbine mit Cheng-Cycle und den Heizkesseln von der technischen Zentrale an alle relevanten TUM-Gebäude verteilt. Ein Ausfall des Wärmesystems kann derzeit nur sehr begrenzt durch alternative Anlagen am Campus abgefangen werden. Trotz

der funktionalen Redundanz der (überwiegend wärmegeführten) Gasturbine mit doppelt ausgelegten Spitzenlastkesseln kann die Standortversorgung mit Wärme in bestimmten Szenarien vollständig zum Erliegen kommen. Gründe dafür liegen in der räumlichen Nähe beider Anlagen in der technischen Zentrale sowie ihre Abhängigkeit vom Brennstoff Gas, welcher aktuell nur durch einen einzigen Netzübergabepunkt bereitgestellt werden kann. Dieser Übergabepunkt liegt ebenfalls in direkter Umgebung der Wärmeerzeugungsanlagen. Auch die nicht-redundante Auslegung der Wärmeversorgungsleitung kann unter Umständen zu einem Komplettausfall der Wärmeversorgung führen (Müller, 2019).

Für die Betrachtung des Kältesystems (überwiegende Nutzung für Raumklimatisierung) wird derselbe Ansatz verfolgt. Auch hier werden keine erheblichen oder katastrophalen Effekte angenommen und das Schadensmaß erst ab der vierten Stunde eines Ausfalls berücksichtigt.

Die Nachfrage nach Kälte wird durch strombetriebene Kompressionskältemaschinen sowie Absorptionskältemaschinen gedeckt, sodass hier von einer gewissen funktionalen Redundanz ausgegangen werden kann, insbesondere durch die differenzierte Art der Kälteerzeugung bei diesen Anlagen. Die Kältemaschinen werden an verschiedenen Standorten am Campus betrieben, was im Falle von räumlich begrenzten Schockereignissen – obwohl kaum sicherheitsrelevant – die modulare Arbeitsraumkühlung zumindest in Teilen zulässt.

Die zuvor getätigten Annahmen zu "milden", "erheblichen" und "katastrophalen" Auswirkungen für die Energieversorgung sind in Abbildung 17 veranschaulicht. Qualitativ ist erkennbar, dass ein Schockereignis mit Einfluss auf das Stromsystem nur unterhalb einer Grenze (Campus: 5 MW) zu erheblichen oder katastrophalen Auswirkungen führt. Im Wärme- und Kältesystem ist einerseits die zeitliche Verzögerung der auftretenden Kosten (Campus: Schadkosten erst ab 4. Ausfallstunde) erkennbar, sowie, dass keine erheblichen oder katastrophalen Auswirkungen angenommen werden.

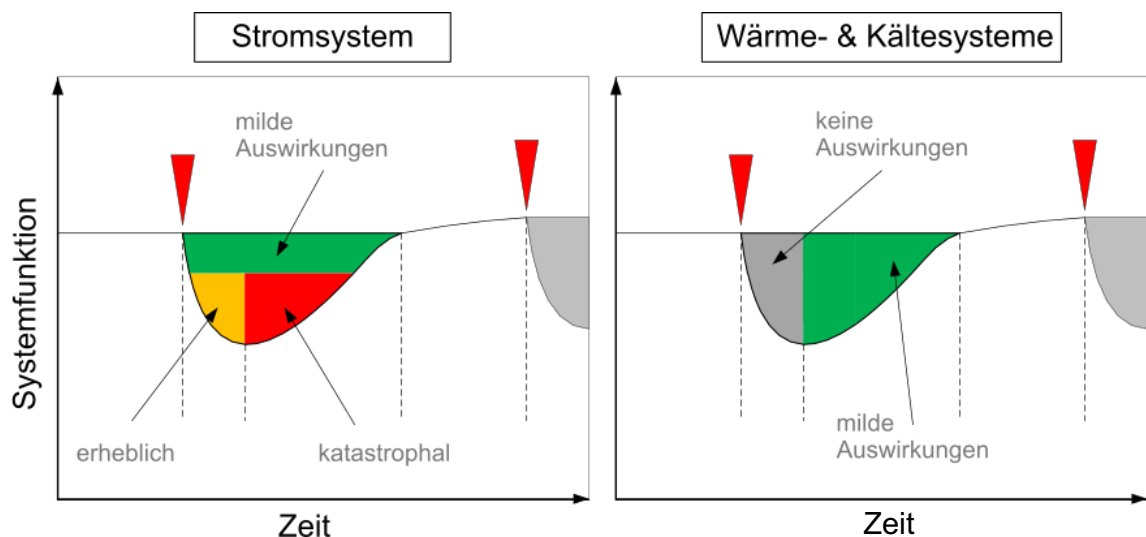


Abbildung 17: Qualitative Unterteilung des Schadensausmaßes für schädliche Ereignisse im Energiesystem des TUM Campus Garching für Strom, Wärme und Kälte

Berechnung der erwarteten Kosten für jeden Komponentenausfall

Um die zu erwartenden Ausfallkosten im Energiesystem zu berechnen, werden die in Tabelle 3 definierten Schockereignisse mit Hilfe des linearen Optimierungsmodells in *urbs* simuliert. Die Komponenten stehen dem Modell in einem definierten Zeitraum nicht zur Verfügung, stattdessen fallen Kosten für nicht erbrachte Energie an. Das Ergebnis der Optimierung liegt für jedes Schockereignis in ausgefallenen Megawattstunden (MWh) vor. Da Strom, Wärme und Kälte der Einfachheit halber unter derselben Bezugsgröße zusammengefasst und mit demselben Schadensmaß bewertet werden, wird nicht explizit zwischen „mildem Stromausfall“ und „mildem Wärme-/Kälteausfall“ unterschieden, obwohl diese Unterscheidung darstellbar wäre. Allerdings wird unterschieden, ob ein Ausfall milde oder sogar disruptive Auswirkungen auf die verfügbare Energie hat (siehe Seite 67).

Zur Veranschaulichung wird beispielhaft der für den Campus gravierende Ausfall der technischen Zentrale im Frühling im Folgenden näher betrachtet. Tabelle 5 zeigt die durch lineare Optimierung errechneten ausgefallenen MWh in Folge dieses Schockereignisses für die verschiedenen Expositionszeiträume:

	Ausfall für 1 Stunde				Ausfall für 1 Tag				Ausfall für 1 Woche	
	Tagsüber		Nachts		Wochenends		Wochentags			
	<i>mild</i>	<i>disruptiv</i>	<i>mild</i>	<i>disruptiv</i>	<i>mild</i>	<i>disruptiv</i>	<i>mild</i>	<i>disruptiv</i>	<i>mild</i>	<i>disruptiv</i>
MWh	8,124	5,01	3,76	5,03	323,34	120,42	390,89	120,55	2619,94	843,95

Tabelle 5: Darstellung der (lt. Modellierung) ausgefallenen Energiemenge in MWh für den Ausfall der technischen Zentrale im Frühling bei verschiedenen Ausfallzeiträumen

So würden bei einem einstündigen Ausfall der technischen Zentrale tagsüber insgesamt über 13 MWh Leistung verloren gehen (praktisch die komplette Standortversorgung), dauert der Ausfall eine Woche wären es dementsprechend fast 3,5 GWh.

Die so ermittelten MWh werden zur quantitativen Bewertung nun mit der dem Kapitalwert der Wertschöpfung am Campus Garching aus Tabelle 2 sowie dem entsprechenden Schadensmaßfaktor aus Tabelle 4 verrechnet. Dabei ist zu beachten, dass Energie, deren Fehlen disruptiv auf das System wirkt, dreimal so teuer ist wie ausgefallene Energie, die nur „milde“ Auswirkungen hat (siehe Abschnitt „*Milde*“ und „*Disruptive*“ Auswirkungen auf den Campus auf Seite 67). Dieser Faktor wird mit der Konstante $c_{disruptiv}$ abgebildet.

Die Berechnung lässt sich in der folgenden, allgemeinen Formel zusammenfassen:

$$K_{\text{Ereignis,Dauer}} = K_{\text{Bezugsgröße}} \cdot f_{\text{tagsüber,1h}} \cdot (E_{\text{Ausfall,mild}} + c_{\text{disruptiv}} \cdot E_{\text{Ausfall,disruptiv}})$$

mit

$K_{\text{Ereignis,Dauer}}$ Kosten eines bestimmten Schockereignisses für einen Ausfallzeitraum

$K_{\text{Bezugsgröße}}$ Kosten pro Stunde durch einen Komponentenausfall (siehe Tabelle 2)

$f_{\text{Zeitpunkt,Dauer}}$ Faktor zur Differenzierung der Ausfallauswirkungen (siehe Tabelle 4)

$c_{\text{disruptiv}}$ Konstante ($c = 3$) zur Differenzierung disruptiver und milder Schäden

E_{Ausfall} Wegen Komponentenausfall nicht erbrachte Energie (vgl. z.B. Tabelle 5).

Für einen einstündigen Ausfall der technischen Zentrale tagsüber im Frühling lautet die Formel dementsprechend

$$K_{\text{Ausf.techn.Zentr.,1h,tagsüber}} = K_{\text{Bezugsgröße}} \cdot f_{\text{tagsüber,1h}} \cdot (E_{\text{Ausfall,mild}} + c_{\text{disruptiv}} \cdot E_{\text{Ausfall,disruptiv}})$$

bzw. in Zahlen

$$K_{\text{Ausf.techn.Zentr.,1h}} = 104.847 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 0,2 \cdot (8,124 \text{ MWh} + 3 \cdot 5,008 \text{ MWh}) = 485.399 \text{ €}$$

Das bedeutet, dass der einstündige Ausfall der technischen Zentrale an einem (Arbeits-) Tag im Frühling fast 500.000 € kosten würde. Darin sind, wie zuvor erläutert, sowohl die Kosten für entgangene Arbeitszeit wie auch etwaige Reparatur- und Sonderzahlungen (für alternative Energiebeschaffung, Arbeitsplätze usw.) berücksichtigt. Im Laufe der Modellierung wurde deutlich, dass dieses Ereignis mit Abstand die umfangreichsten Auswirkungen auf das Energiesystem des Campus hätte. Ein entscheidender Grund dafür liegt darin, dass etwaige Notfallversorgungen (z.B. die vorhandenen Dieselmotoren) in direkter räumlicher Nähe zur Technischen Zentrale stehen und im Falle eines Komplettausfalls der Zentrale nicht einsatzfähig sind. Dass die Netzspeisepunkte für Strom und Gas in direkter Umgebung der technischen Zentrale liegen und ggf. ebenfalls unbenutzbar sind, stellt einen weiteren, erheblichen Kostentreiber dar.

Diese Zahlen allein sind jedoch nicht übermäßig aussagekräftig, da es unwahrscheinlich ist, dass jedes Jahr mindestens einmal die aufgeführten Schockereignisse den Campus treffen.

Normierung der Ausfallkosten anhand der jährlichen Ausfallwahrscheinlichkeit

Aus diesem Grund wird die Kostenformel nun um eine Variable erweitert, welche die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schocks im Energiesystem des Campus abbilden soll. Erneut ist zur Erhebung dieser Wahrscheinlichkeit die tatsächliche Ausfalldauer relevant. Ein Ausfall, der nach einer Stunde wieder behoben ist, kommt erfahrungsgemäß häufiger vor als

ein Ereignis, das den Campus oder einige seiner Teilsysteme tage- oder wochenlang lahmlegt.

Der zweite zu berücksichtigende Aspekt liegt im generellen Systemdesign und der damit zusammenhängenden Fähigkeit, auf die oben genannten potentiellen Schockereignisse mehr oder weniger resilient zu reagieren. Die in Tabelle 6 dargestellten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die drei Cluster und die ihnen zugehörigen Ereignisse wurden im Rahmen von Interviews mit Sachverständigen des Energiesystems am Campus Garching festgelegt (Müller, 2019), (Sarıkaya, 2019), (Schönleber, 2019). Dabei wurde deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit einzelner Schockereignisse, insbesondere im Cluster **Flexibilität**, nur äußerst schwer abzuschätzen ist. Auf Vergangenheitsdaten konnte nicht zurückgegriffen werden. Da der Kern dieser Arbeit die beispielhafte Anwendung der erarbeiteten Methodik besteht, werden vereinfachende Annahmen getroffen. So ist es sinnvoll und naheliegend, die technische Zentrale als Steuer- und Leiteinheit möglichst kontinuierlich mit neuer Technik auszustatten, um sie vor Ausfällen zu sichern. Mutmaßlich ist dies im Vergleich zur Optimierung oder Erweiterung des historisch gewachsenen Campusgeländes (z.B. durch Neu- oder Zubau von weiteren Gasleitungen, Redundanz des Heizkraftwerks) günstiger und leichter zu realisieren, weshalb ein Ausfall im Cluster **Konnektivität** im vorliegenden Beispiel seltener vorkommt, als in den anderen Clustern. Die Vielzahl von potentiell ausfallenden Systemkomponenten im Cluster **Flexibilität** (8 Schockereignisse im Vergleich zu drei **[Diversität]** bzw. einem **[Konnektivität]**) begründet, dass es in diesem Cluster verhältnismäßig am häufigsten zu Ausfällen kommt, wie aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich wird.

	Ausfall für 1 Stunde	Ausfall für 1 Tag	Ausfall für 1 Woche
Konnektivität	alle 10 Jahre	alle 40 Jahre	alle 200 Jahre
Diversität	alle 5 Jahre	alle 20 Jahre	alle 100 Jahre
Flexibilität	jedes Jahr	alle 4 Jahre	alle 20 Jahre

Tabelle 6: Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ausfallzeiten von einer Stunde, einem Tag und einer Woche für jedes Cluster

Um die Eintrittswahrscheinlichkeit in die Kostenformel zu integrieren wird die Variable $p_{Cluster, Zeit}$ eingeführt: Die jährliche Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Ausfalldauer und dem betroffenen Cluster.

$$p_{Cluster, Zeit} = \frac{1 \text{ Jahr}}{\text{Ausfall alle } x \text{ Jahre}}$$

	Ausfall für 1 Stunde	Ausfall für 1 Tag	Ausfall für 1 Woche
Konnektivität	0,1	0,025	0,005
Diversität	0,2	0,05	0,01
Flexibilität	1	0,25	0,05

Tabelle 7: Jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ausfalls in Abhängigkeit der Ausfalldauer und betroffenem Cluster

In Anlehnung an die zuvor eingeführte Formel ergeben sich die zu erwartenden, jährlichen Ausfallkosten für jedes Szenario zu

$$\frac{K_{Ereignis,Dauer}}{a} = K_{Bez.gr} \cdot f_{Zeitpkt,Dauer} \cdot p_{Cluster,Zeit} \cdot (E_{Ausf.,mild} + c_{dis} \cdot E_{Ausf.,dis.})$$

mit

$\frac{K_{Ereignis,Dauer}}{a}$	Kosten eines bestimmten Schockereignisses für einen Ausfallzeitraum p.a.
$K_{Bezugsgröße}$	Kosten der Bezugsgröße für einen Ausfall (104. 847 €, aus Tabelle 2)
$f_{Zeitpunkt,Dauer}$	Faktor zur Differenzierung der Ausfallauswirkungen (siehe Tabelle 4)
$p_{Cluster,Zeit}$	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schockereignisses (aus Tabelle 7)
$c_{disruptiv}$	Konstante ($c = 3$) zur Differenzierung disruptiver und milder Schäden
$E_{Ausfall}$	wegen Komponentenausfall nicht erbrachte Energie (vgl. z.B. Tabelle 5).

Für das Beispiel des einstündigen Ausfalls der technischen Zentrale im Frühling entspricht das

$$\begin{aligned} \frac{K_{Ausf.techn.Zent.,1h}}{a} &= 104.847 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,1}{a} \cdot (8,124 \text{ MWh} + 3 \cdot 5,008 \text{ MWh}) \\ &= 48.540 \frac{\text{€}}{a} \end{aligned}$$

Alle modellierten und linear optimierten Schockszenarien werden mit Hilfe dieser Formel monetisiert, sodass letztlich für jedes Ereignis und jeden Zeitpunkt eine konkrete Schadenssumme definiert wird. Diese, um die Wahrscheinlichkeit eines Schockereignisses pro Jahr erweiterte, Schadenssumme entspricht den „jährlich zu erwartenden Ausfallkosten“ für das jeweilige Szenario.

Zur Veranschaulichung wird noch einmal auf Tabelle 5 verwiesen, in der die zugrunde liegenden, ungedeckten Megawattstunden für den beispielhaften Ausfall der technischen Zentrale im Frühling dargestellt sind. In Tabelle 8 sind nun – mit Hilfe des zuvor eingeführten Berechnungsansatzes – die jährlich zu erwartenden Kosten in Euro für jeden der fünf Zeitschritte abgebildet.

Ausfall für 1 Stunde		Ausfall für 1 Tag		Ausfall für 1 Woche
Tagsüber	Nachts	Wochenends	Wochentags	
48.540 €/a	19.764 €/a	358.880 €/a	789.015 €/a	1.892.749 €/a

Tabelle 8: Berechnung der jährlich zu erwartenden Ausfallkosten für einen Ausfall der technischen Zentrale im Frühling bei verschiedenen Ausfallzeiträumen

Analog zu diesem beispielhaften Vorgehen werden für alle weiteren Schockereignisse der Cluster **Konnektivität**, **Diversität** und **Flexibilität** die voraussichtlichen jährlichen Ausfallkosten ebenso berechnet.

Berechnung der jährlichen Kosten für alternative Energiebereitstellung

Nachdem die Eintrittswahrscheinlichkeiten für jedes Schockereignis einbezogen wurden, können nun die voraussichtlichen jährlichen Kosten für eine alternative Energieerzeugung in jedem der zwölf Szenarien bestimmt werden. Dies ermöglicht einen konkreteren Blick auf Zusammenhänge im System und berücksichtigt in der ökonomischen Betrachtung auch die Auswirkungen der Nicht-Benutzbarkeit von bestimmten Teilkomponenten.

Um diese Kosten möglichst realitätsgetreu abzubilden, soll eine Vergleichsrechnung vorgenommen werden: Berechnet werden die entstehenden Kosten durch Einkauf und Einsatz von alternativen Brennstoffen zur Energieerzeugung inklusive CO₂-Zertifikatspreise¹⁸, abzüglich der Einsparungen durch die Nichtbenutzung der ausgefallenen, aber bereits installierten Erzeugungsanlagen. Der daraus resultierende Wert für jedes Schockereignis und für jede Ausfalldauer wird anschließend mit der entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert. Die Nutzungskosten redundanter Übertragungsleitungen werden mit 0 € angenommen (nur für das Ringsystem bei elektrischer Energie relevant). Die Tabellen für die zusätzlichen Kosten der alternativen Energieerzeugung für alle Szenarien sowie eine Beispielrechnung befinden sich im Anhang.

Die Berechnungen zeigen, dass für die alternative Energieerzeugung je nach betrachtetem Schockereignis jährliche Zusatzkosten von maximal 17.227 € (Schockereignis: F1 – Ausfall der Gasturbine mit Cheng-Cycle) fällig werden. In drei von zwölf Fällen reduzieren sich durch den Ausfall der konventionellen Energiebedarfsdeckung sogar die jährlichen Kosten um bis zu 1.898 € (K1 – Ausfall der technischen Zentrale). Eine solche „Einsparung“ kommt zustande, wenn es keine alternativ benutzbaren Energieerzeugungs- oder Bezugsmöglichkeiten gibt, da diese entweder nicht gebaut oder nicht einsatzfähig sind. In diesem Fall gilt allerdings zu beachten, dass entsprechend erhebliche Kosten für die nicht gedeckte Leistung anfallen. Im Schockszenario „Ausfall der technischen Zentrale“ macht die Einsparung durch nicht verbrauchte Energie über alle Zeitschritte hinweg nur einen Bruchteil der entstehenden Ausfallkosten aus (vgl. z.B. Tabelle 8).

„Negative“ Zusatzkosten ergeben sich außerdem in zwei Szenarien mit marginalen Auswirkungen im Wärme- bzw. Kältesystem (F4 – Ausfall eines Heizkessels, F5 – Ausfall der Absorptionskältemaschinen). Durch die Annahme von drei nicht zum Schadensmaß beitragenden Ausfallstunden zu Beginn eines Schockereignisses (d.h. „Ausfallkosten“ = 0 €, siehe Seite 68) drosselt das lineare Optimierungsmodell in *urbs* im Ereignisfall fälschlicherweise die aufzuwendende Energie zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung und senkt so die Energieerzeugungskosten im Vergleich zum Basis-Szenario, in dem kein Ausfall stattfindet. Um den Modellierungs- und Programmieraufwand nicht unnötig zu steigern, wird diese kaum ins Gewicht fallende Unsauberkeit akzeptiert.

¹⁸ Durchschnittspreis für CO₂ European Emission Allowances vom 19.06.2019 (~25,00 €), <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>, abgerufen am 14.08.2019

In der folgenden Tabelle sind die zu erwartenden jährlichen Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung in jedem der zwölf Schockereignisse zusammengefasst. Die dargestellten Zusatzkosten für jedes Szenario werden aus der Summe der jeweiligen Kosten für die alternative Erzeugung von Energie für eine Stunde, einen Tag bzw. eine Woche gebildet und über die vier Jahreszeiten gemittelt. Die exakten Werte für die Einzelszenarien können im Anhang nachvollzogen werden.

		Ausfall ...	Jährliche Zusatzkosten für die alternative Energieerzeugung
Cluster (Konnektivität, Diversität, Flexibilität)	K1	der technischen Zentrale	- 1.898 €
	D1	der Netzstromversorgung am Bezugspunkt	2.848 €
	D2	der Gasversorgung am Bezugspunkt	1.701 €
	D3	der Netzstrom- & Gasversorg. am Bezugspunkt	2.890 €
	F1	der Gasturbine mit Cheng-Cycle	17.227 €
	F2	des Umspannwerks Garching	14.240 €
	F3	der Energieerzeugung aus Photovoltaik	22 €
	F4	eines Spitzenlastkessels	- 242 €
	F5	der Absorptionskältemaschinen	- 9 €
	F6	der Kompressionskältemaschinen	340 €
	F7	einer Haupt-Stromleitung (Mittelspannungsebene)	0 €
	F8	der Fernwärmeleitung	8.505 €

Tabelle 9: Jährlich zu erwartende Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung in den 12 potentiellen Schockereignissen

Um diese potentiellen *Zusatzkosten* in einen geeigneten Kontext zu bringen und mit den zu erwartenden *Ausfallkosten* zu vergleichen, werden im letzten Schritt die Einzelergebnisse zusammengefasst und auf Basis bisheriger Erkenntnisse in Bezug auf ihre technische Resilienz bewertet.

4.3.4. Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, werden alle Schockszenarien jeweils stunden-, tage- und wochenweise simuliert. Dabei werden die stündlichen Ereignisse jeweils tagsüber und nachts modelliert, zudem wird zwischen 24-Stunden-Ausfällen am Wochenende und an Wochentagen unterschieden. Ein Ausfall für eine Woche beginnt jeweils an einem Montag um Mitternacht und dauert 168 h bis zur darauffolgenden Sonntagnacht. Jeder Zeitschritt wird für alle vordefinierten Ereignisse und jeweils für jede Jahreszeit durchgeführt.

Insgesamt ergeben sich damit für jedes der 12 Schockereignisse 20 Simulationen, was zu einer Gesamtzahl von 240 Simulationen führt.

Schockszenarien (vgl. Tabelle 3)	12
Zeitpunkt und Dauer eines Schockereignisses (1 h tagsüber, 1 h nachts, 24 h wochenends, 24 h wochentags, 1 Woche)	5
Jahreszeit des Eintritts (Frühling, Sommer, Herbst, Winter)	4
Gesamtzahl an modellierten Schadensereignissen	240

Tabelle 10: Zusammensetzung und Anzahl der linear optimierten Schockereignisse für das Energiesystem des TUM Campus Garching

Die Ausfallkosten wurden in den vorangegangenen Schritten anhand der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten normiert. Damit ist es zur Feststellung der insgesamt resultierenden jährlichen Kosten legitim, die fünf einzelnen Summen der verschiedenen Zeitschritte zu einer Größe innerhalb desselben Szenarios zusammenzufassen.

Unter der Annahme, dass ein Ausfall tagsüber (6:00 Uhr bis 18:00 Uhr) genauso wahrscheinlich ist wie nachts (18:00 Uhr bis 6:00 Uhr) und das Wochenende wie oben beschrieben zwei von sieben Tagen ausmacht, errechnen sich die jährlichen Gesamtkosten für einen Ausfall der technischen Zentrale im Frühling (vgl. Tabelle 8) zu

$$\frac{K_{Ausf.techn.Zent.,gesamt}}{a} = \left[\frac{48.540}{2} + \frac{19.764}{2} + \left(358.881 \frac{2}{7} + 789.015 \frac{5}{7} \right) + 1.892.750 \right] \frac{\text{€}}{a}$$

$$= 2.594.022 \frac{\text{€}}{a}$$

Es sei angemerkt, dass der Ausfall der technischen Zentrale das mit Abstand gravierendste Ereignis am Campus darstellt, da in diesem Falle die komplette Energieversorgung am Standort zusammenbrechen würde – abgesehen von Systemsteuerungssoftware und Notfallinfrastrukturen, deren Server und Anlagen mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) ausgestattet sind. Damit wäre die Wertschöpfung am Campus außerordentlich eingeschränkt. Durch den zusätzlichen Wärmebedarf des Standorts in den Wintermonaten liegen die oben dargestellten Kosten im Vergleich zu den Sommer- und Herbstmonaten höher. Die Mittelung der jährlichen Kosten über alle Jahreszeiten ergibt dann die Gesamtsumme der erwartenden Ausfallkosten innerhalb eines Schockereignisses (Ereigniseintritt über das Jahr hinweg als gleich wahrscheinlich angenommen).

Im Anhang wird diese Mittelung am Beispiel des Clusters **Konnektivität** vorgenommen. Werden die jährlich erwarteten Ausfallkosten für jedes der zwölf Schockszenarien innerhalb ihrer jeweiligen Zeitschritte und Cluster zusammengefasst und gemittelt, ergeben sich die in Abbildung 18 dargestellten Gesamtsummen.

Auf Basis der vorangegangenen Annahmen und Festlegungen ergeben sich für den Campus Garching damit voraussichtlich zu erwartende Ausfallkosten in Höhe von 4,6 Mio. € pro Jahr.

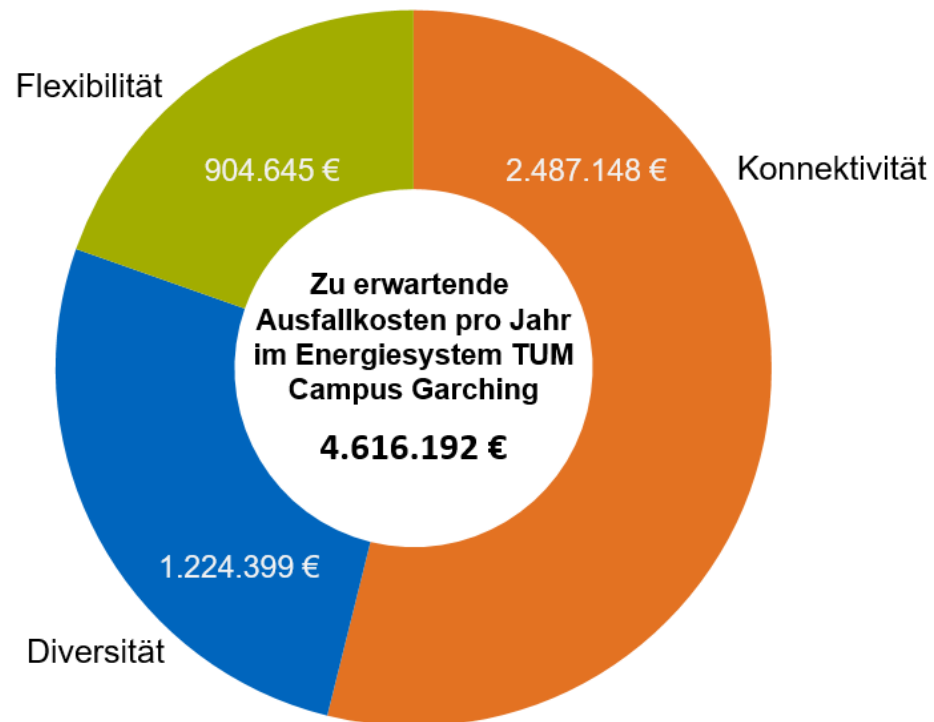


Abbildung 18: Jährlich zu erwartende Kosten durch Komponentenausfälle im Energiesystem des TUM Campus Garching, basierend auf vorangegangenen Annahmen und der linearen Optimierung mit *urbs*

Die Erkenntnisse aus der linearen Optimierung des *urbs*-Modells ermöglichen einen Vergleich mit den jährlichen Gesamtkosten des Energiesystems.

Kostenart	Jährliche Kosten	Anteil an den Gesamtkosten
Fixkosten (v.a. Abschreibungen, Versicherungen)	1.274.873 €	4,18 %
Variable Kosten (v.a. Löhne, Arbeitsmittel)	8.515.783 €	27,95 %
Brennstoffkosten (v.a. Gas, Heizöl, Diesel)	5.223.742 €	17,14 %
Kosten für Strombezug aus dem öffentlichen Netz	9.288.337 €	30,48 %
Umweltkosten (v.a. CO ₂ -Zertifikate)	1.553.590 €	5,10 %
Zu erwartende Ausfallkosten	4.616.192 €	15,15 %
Gesamtsystemkosten pro Jahr	30.472.517 €	100,00 %

Tabelle 11: Verteilung der jährlichen Kostenstruktur des Energiesystems am Campus Garching

Die durch Wertschöpfungsverluste und Komponentenversagen entstehenden Kosten machen demnach über 15 % der jährlichen Gesamtkosten für die Energiebereitstellung am TUM Campus Garching aus. Die betrachteten, potentiellen Ausfälle sind für das Energiesystem von großer Relevanz, jedoch nur bis zu einem gewissen Grad vorhersehbar oder allgemeingültig versicherbar, was die Budgetplanung erheblich erschwert. Diese Unsicherheit stellt die Verantwortlichen regelmäßig vor Herausforderungen, insbesondere vor dem

Hintergrund, dass die TU München als Körperschaft des öffentlichen Rechts zu knapp 60 % über den Haushaltsplan des Freistaats Bayern finanziert wird (Müller, 2019), (Sarikaya, 2019). Auch eingeworbene Drittmittel (knapp 34 %, (Technische Universität München, 2018)) dienen vorwiegend Forschungsvorhaben und können daher nur sehr begrenzt für kurzfristige, höhere Aufwendungen für unvorhergesehene Reparaturen verwendet werden. Hier ergibt sich für das Energiesystem am Campus die Problematik, dass dessen Funktion theoretisch ähnlich kurzfristige Planung erfordert wie in profitorientierten Unternehmen, dagegen die TUM als staatliche Bildungseinrichtung einen langfristigen Planungshorizont besitzt. Diese Problematik wird u.a. in (Daus, Kesting, & Kukuk, 2014) ausgeführt.

Auf der anderen Seite sollte hervorgehoben werden, dass in der Regel nur ein Teil der zu erwartenden Ausfallkosten tatsächlich „ausgegeben“ werden muss, während der Rest vielmehr als „verlorene Wertschöpfung“ deklariert werden kann. Dies bestätigt auch der Vergleich der jährlich anfallenden Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung aus dem vorherigen Schritt und den nun erarbeiteten, insgesamt jährlich zu erwartenden Ausfallkosten. Der Vergleich wird aufgrund der gegenseitigen Unabhängigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeiten jeweils einzeln für die Cluster **Konnektivität**, **Diversität** und **Flexibilität** durchgeführt.

	Jährliche Kosten für alternative Energie- erzeugung $K_{altern.Erz.,Cluster,gesamt}$	Jährlich zu erwartende Ausfallkosten $K_{Cluster,gesamt}$	Verhältnis $\frac{K_{altern.Erz.,Cluster,gesamt}}{K_{Cluster,gesamt}}$
Konnektivität	-1.898 €	2.487.148 €	- 0,00076
Diversität	2.479 €	1.224.399 €	0,00203
Flexibilität	5.010 €	904.645 €	0,00554

Tabelle 12: Verhältnis zwischen voraussichtlichen, jährlichen Kosten für die alternative Energieerzeugung und den zu erwartenden jährlichen Kosten für die ausgefallene Energie insgesamt in Abhängigkeit der drei Cluster

In Tabelle 12 wird deutlich, dass Aufwendungen für alternative Energieerzeugung praktisch nur eine marginale Bedeutung haben im Verhältnis zu den insgesamt erwarteten Kosten pro Jahr (Faktor > 180). Der genaue Anteil der Kosten, der tatsächlich für Reparaturen, Schadensbeseitigungen und ähnliches aufgewandt werden muss, ist nur schwer von den Opportunitätskosten zu unterscheiden und nicht pauschal festzulegen. Um hier eine fundierte Differenzierung vorzunehmen, wäre die Betrachtung der konkreten Schadensereignisse notwendig, also dem tatsächlichen Grund für einen Ausfall (bspw. Gewitter, Brand, o.ä.), der in der vorliegenden Methodik bewusst nicht näher behandelt wird (siehe dazu Seite 44 ff.).

Nichtsdestotrotz lässt sich anhand der zu erwartenden jährlichen Ausfallkosten in Höhe von 4,6 Mio. € feststellen, dass bei der Systemauslegung Optimierungspotential besteht. Das Cluster **Flexibilität** (bestehend aus 8 verschiedenen Schockereignissen) macht knapp

ein Fünftel der potentiellen jährlichen Gesamtkosten aus, während 27 % auf die drei Ereignisse des Clusters **Diversität** entfallen. Wie auch grafisch in Abbildung 18 erkennbar, entstehen fast 54 % der Gesamtkosten im Cluster **Konnektivität** mit dem alleinigen Schockereignis eines Ausfalls der technischen Zentrale – dem Worst-Case Szenario für die Energieversorgung am Standort im vorliegenden Fallbeispiel. Diese extrem einseitige Verteilung deutet insbesondere für den letztgenannten Bereich auf Schwächen hin, die im Krisenfall ggf. zu erheblichen Schäden führen können.

Nach Aussagen verschiedener Verantwortlicher ist die technische Zentrale mehrfach ausfallsicher ausgelegt, wird regelmäßig um neue Sicherheitsmaßnahmen erweitert und durch verschiedene Teilsysteme und Anlagen (z.B. unterbrechungsfreie Stromversorgung) unterstützt. Trotzdem wird der räumlichen Konzentration aller betriebsrelevanten Energieanlagen innerhalb des Areals technischen Zentrale am südwestlichen Ende des Campus ein gewisses Gefahrenpotential eingeräumt (Sarıkaya, 2019), (Ross, 2019), (Müller, 2019).

Bewertung der technischen Resilienz des Campus Garching

Da die vorangegangenen Erhebungen detailreich und zahlenlastig sind, werden die bisherigen Ergebnisse – analog zum Vorgehen für die organisationale Resilienzbewertung – zur besseren Übersicht auf einer Resilienzskala dargestellt. Dies ermöglicht einerseits, relevante Erkenntnisse zu kondensieren bzw. aufzubereiten und andererseits die anschauliche Bewertung des Gesamtsystems sowohl aus organisationaler als auch technischer Sicht.

Um eine „hohe“, „mittlere“ oder „niedrige“ Resilienz vor dem Hintergrund der Anlagentechnik konkret zu definieren, können verschiedenste Faktoren in Betracht gezogen werden. 2017 lag der Durchschnittswert für Versorgungsunterbrechungen pro Letztverbraucher über alle Spannungsebenen bei 15,14 Minuten (Bundesnetzagentur, 2018). Auf ein Jahr gerechnet entspricht dies einer Verfügbarkeit der öffentlichen Stromversorgung von 99,997 % pro Letztverbraucher. Die öffentliche Stromversorgung wird von mehr als 1.900 Kraftwerken (Stand März 2019) mit insgesamt über 210 GW Netto-Nennleistung gesichert (Bundesnetzagentur, 2019), sodass der Verfügbarkeitsanspruch am TUM Campus Garching gegebenenfalls nachsichtiger bearbeitet werden muss. Insbesondere, da der Campus selbst einen Großteil seines Strombedarfs über die Versorgung aus dem öffentlichen Netz deckt, müssen noch weitere Parameter hinzugezogen werden.

Der VGB PowerTech e.V. erhebt regelmäßig Verfügbarkeitsdaten für unterschiedliche Energieerzeugungstechnologien und ermittelte 2015 für Gasturbinen bzw. Gas- und Dampfanlagen (entspricht der Hauptenergieerzeugungsanlage am Campus Garching) eine Nichtverfügbarkeit zwischen 11,6 % und 15,0 %. Davon entfielen ca. 7,5 % bis 9,0 % auf geplante und 4,1 % bis 6 % auf ungeplante Ereignisse (VGB, 2015).

Eine weitere, anerkannte Größe für die Leistungserfassung von Systemen ist die Gesamtanlageneffektivität (GAE), also das Produkt aus Anlagenverfügbarkeit, Produktionsleistung und Qualitätsfaktor. (Nakajima, 1988), (Baker Tilly, 2013), (Vorne Industries, Inc., 2019)

und andere Autoren geben Richtwerte für die GAE zwischen 50 und 85 % für Unternehmen an, verweisen dabei aber auf teilweise erhebliche Branchenunterschiede, die in weiteren Literaturrecherchen ermittelbar wären, doch nicht den Kern dieser Arbeit bilden. Um den Zielfokus eines nachvollziehbaren, methodischen Ansatzes der Resilienzbewertung beizubehalten, werden die vorangegangenen Überlegungen hier nicht zu Ende geführt. Sie dienen allerdings als Orientierung für die folgende, beispielhafte Verknüpfung der technischen Resilienz mit den in der Systemmodellierung berechneten Kostenstrukturen.

Die Nichterfüllung einer vorgesehenen Systemfunktion aufgrund von Nichtverfügbarkeiten verursacht dem Systembetreiber in der Regel Kosten (hier: „Ausfallkosten“, z.B. in Form von Instandhaltungs-, Reparatur- oder Opportunitätskosten). Sofern ein System zu praktisch jeder Zeit seine Funktion (bspw. Energieerzeugung, Produktion) uneingeschränkt erfüllen oder – nach ungeplanten Ausfällen – schnellstmöglich wieder aufnehmen kann, gilt es als resilient (vgl. Kapitel 2.1). Auf dieser Basis wird zur konkreten Resilienzbewertung der folgende Zusammenhang hergestellt:

Aus technischer Sicht kann ein System als zunehmend resilient charakterisiert werden, je geringer der Anteil der Ausfallkosten an den jährlichen Gesamtsystemkosten ist. Diese Orientierung an einem systeminternen Verhältnis anstelle eines diskreten, festgelegten „Resilienzwerts“ ermöglicht eine (bspw. branchen- und größenunabhängige) Übertragung des Ansatzes auf andere Energiesysteme.

Für die Bewertung der technischen Resilienz des Campus Garching wird der Anteil der Ausfallkosten jedes Clusters an den jährlichen Gesamtsystemkosten näher betrachtet. Die jeweiligen Anteile lassen sich z.B. aus Abbildung 18 und Tabelle 11 ermitteln.

Kostenart	Jährliche Kosten	Anteil an den Gesamtkosten
Zu erwartende Ausfallkosten pro Jahr	4.616.192 €	15,15 %
<i>... davon im Cluster Konnektivität</i>	2.487.148 €	8,16 %
<i>... davon im Cluster Diversität</i>	1.224.399 €	4,02 %
<i>... davon im Cluster Flexibilität</i>	904.645 €	2,97 %
Normal anfallende Kosten (vgl. Tabelle 11)	25.856.325 €	84,85 %
Gesamtsystemkosten pro Jahr	30.472.517 €	100,00 %

Tabelle 13: Jeweilige Anteile der zu erwartenden Ausfallkosten pro Jahr der drei Kriteriencluster in Abhängigkeit der jährlichen Gesamtsystemkosten

Die Kritikalität eines funktionierenden Energiesystems erfordert maximale Verfügbarkeit und bestmögliche Planungssicherheit. Dies wird auch in der Resilienzbewertung berücksichtigt, sodass die zu erwartenden Ausfallkosten in den einzelnen Clustern im Verhältnis zu den Gesamtkosten möglichst geringgehalten werden sollten. Ein höherer Anteil der Aus-

fallkosten resultiert in einem verringerten Resilienzgrad (RG) und umgekehrt. Der Zusammenhang zwischen Ausfallschäden, Gesamtsystemkosten und Resilienz sollte, wie in Kapitel 3.4 (Schritt 4) eingeführt, als nichtlinear angenommen werden.

Um die zugehörigen Werte auf der Resilienzskala zu ermitteln, wird mit Hilfe der folgenden Punktepaare eine Polynomfunktion vierten Grades $f(p_{AKA})$ angenähert, wobei p_{AKA} dem Anteil der Ausfallkosten an den jährlichen Gesamtkosten (siehe Tabelle 13) entspricht.

$$f(p_{AKA}) = x^4 * a_1 + x^3 * a_2 + x^2 * a_3 + x^1 * a_4 + c$$

Der Anteil der Ausfallkosten an den Gesamtkosten	... entspricht auf der technischen Resilienzskala	Annäherung eines Polynoms vierten Grades mit Hilfe des Gauß-Verfahrens	
0 %	100 %	a ₁	0,000453879
2,5 %	75 %	a ₂	-0,032230746
7,5 %	50 %	a ₃	0,844554517
17,5 %	25 %	a ₄	-11,91703599
30 %	0 %	c	100

Tabelle 14: Punktepaare zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads eines Energiesystems und Annäherungsergebnis der Resilienzfunktion

Die angenäherte Funktion ist in Abbildung 19 dargestellt. Abgebildet sind außerdem die jeweiligen Anteile der Ausfallkosten der drei Cluster **Konnektivität**, **Flexibilität** und **Diversität** an den Gesamtsystemkosten und ihre entsprechenden Werte auf der technischen Resilienzskala.

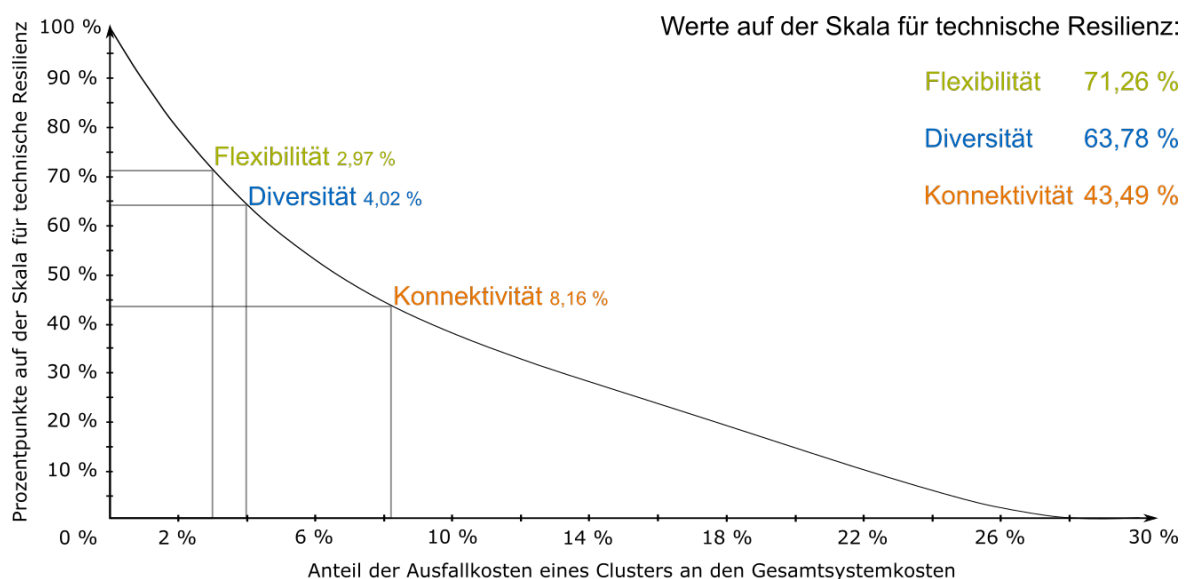


Abbildung 19: Resilienzfunktion zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads eines Energiesystems

Da es aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, die Nicht-Verfügbarkeiten in einem Energiesystem möglichst gering zu halten, werden sich die meisten Unternehmen aller Voraussicht

nach im vorderen Drittel (2 – 10 % Ausfallkostenanteil) der Skala wiederfinden. Die Erreichung des „perfekten“ Zustands (0 % Ausfallkostenanteil bzw. 100 % Resilienz) wäre gemäß des Pareto-Prinzips verhältnismäßig deutlich teurer als eine identische prozentuale Verbesserung auf einem niedrigeren Level. Da dieser Zusammenhang (und die praktische Unerreichbarkeit dieses Zustands) auch für die Realität eines Energiesystems als zutreffend bezeichnet werden kann, befindet sich zur besseren Differenzierung verschiedener Systeme im vorderen Bereich eine relativ steil fallende Flanke.

Weil die dargestellte Funktion den Resilienzgrad jedes Clusters einzeln abbildet, wurde die Abszissenachse bei 30 % begrenzt. Dies bedeutet, dass ein System, das derart hohe Ausfallkostenanteile (etwa 15 – 30 % in einem oder mehreren Clustern) aufweisen würde, als praktisch nicht resilient bezeichnet werden kann. Aus wirtschaftlicher Sicht müsste in einem solchen Fall allein für z.B. die Schadensbeseitigung ein exorbitanter Kostenanteil aufgewandt werden, was nicht im Interesse einer (zumindest ökonomisch) nachhaltigen Betriebswirtschaft wäre. Sofern die Majorität solcher Ausfallkosten als Opportunitätskosten angesehen wird, wäre auch hier erhebliches Optimierungspotential erkennbar, was ebenfalls dem Resilienzgedanken widerspricht (vgl. Kapitel 3).

Um die Vergleichbarkeit zur Erhebung aus organisationaler Sicht herzustellen, werden die Erkenntnisse aus der *Resilienzfunktion* im folgenden Netzdiagramm dargestellt:

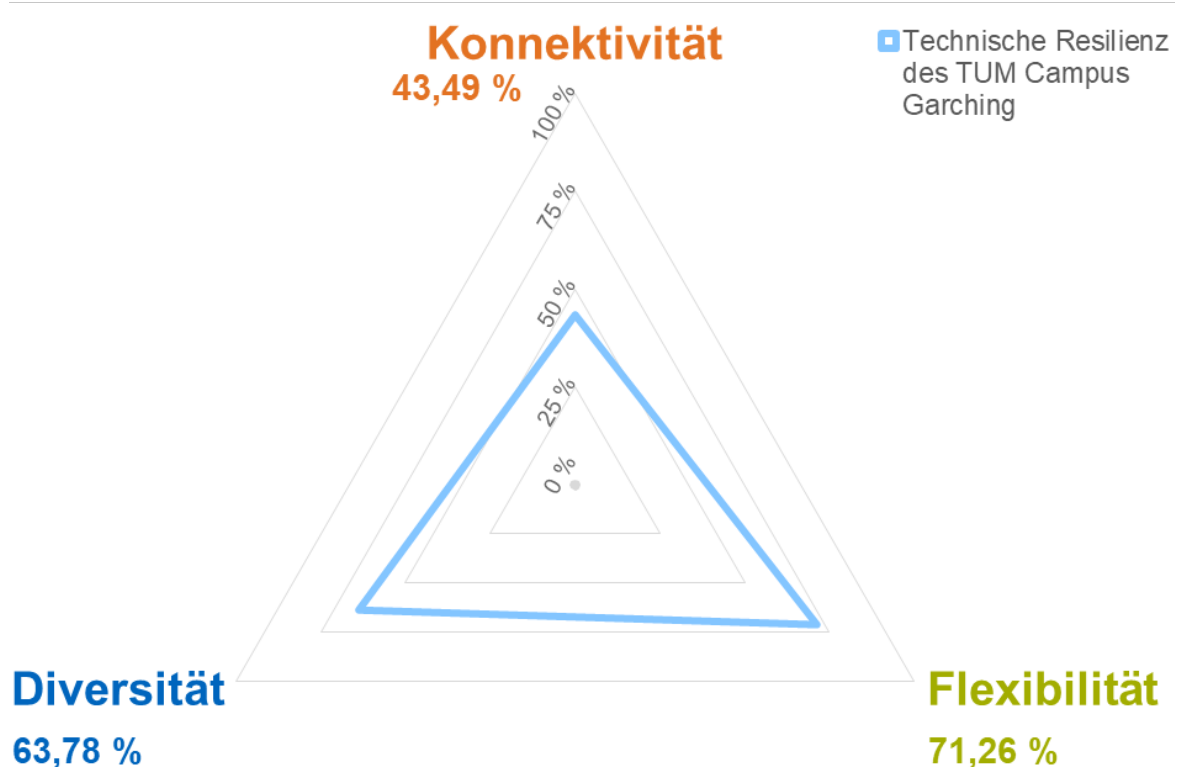


Abbildung 20: Ergebnis der technischen Resilienzbewertung des Energiesystems am TUM Campus Garching

4.4. Status Quo der Resilienz am Campus Garching - August 2019

Nachdem das Energiesystem des TUM Campus sowohl aus organisationaler als auch technischer Perspektive analysiert und bewertet wurde, können die gewonnenen Erkenntnisse aggregiert werden, um eine Gesamtübersicht über die Resilienz des Systems zu erlangen.

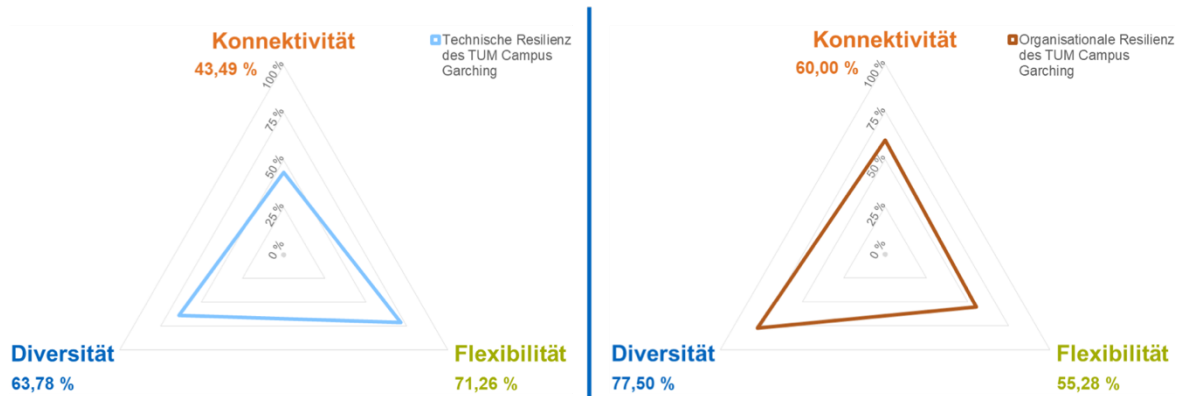


Abbildung 21: Die jeweiligen Ergebnisse der Resilienzbetrachtungen aus technischer sowie organisationaler Sicht, unterteilt in die drei Kriteriencluster

Dabei ist zu hinterfragen, mit welcher Gewichtung die beiden unterschiedlichen Dimensionen zusammengeführt werden sollten. Hierfür gibt es verschiedene Herangehensweisen. Beispielsweise könnte – ausgehend von einer monetären Sichtweise – erarbeitet werden, welche Dimensionen bzw. welche Cluster in welcher Dimension gegebenenfalls mit höheren „Kosten“ (und damit einer höheren Relevanz) herauszustellen wären als andere. Dieses Vorgehen erweist sich im vorliegenden Fall als insofern schwierig, als dass nicht geklärt ist, mit welchen „Kosten“ innerhalb der Cluster aus organisationaler Perspektive durch eine höhere oder verringerte Resilienz zu rechnen ist. Ein denkbares Szenario zur Erhebung wäre, das Brutto-Einkommen der betreffenden Arbeitsstellen zu ermitteln und mit den Ausfallkosten der technischen Resilienzbetrachtung zu vergleichen. In einem vollautomatisierten System mit minimalem (menschlichen) Arbeits- oder Überwachungsbedarf könnte demnach der technische Resilienzgrad deutlich höher gewichtet werden als bspw. in einem System mit hohem Humankapitalanteil.

Obwohl die Einkommensstufen von Beschäftigten einer staatlichen Einrichtung wie der TUM in Deutschland öffentlich zugänglich sind, werden diese Überlegungen hier nicht weiter ausgeführt. Dementsprechend ergibt sich unter der Annahme einer identischen Gewichtung für das Energiesystem des Campus Garching folgender Resilienzgrad (RG) in den drei Clustern:

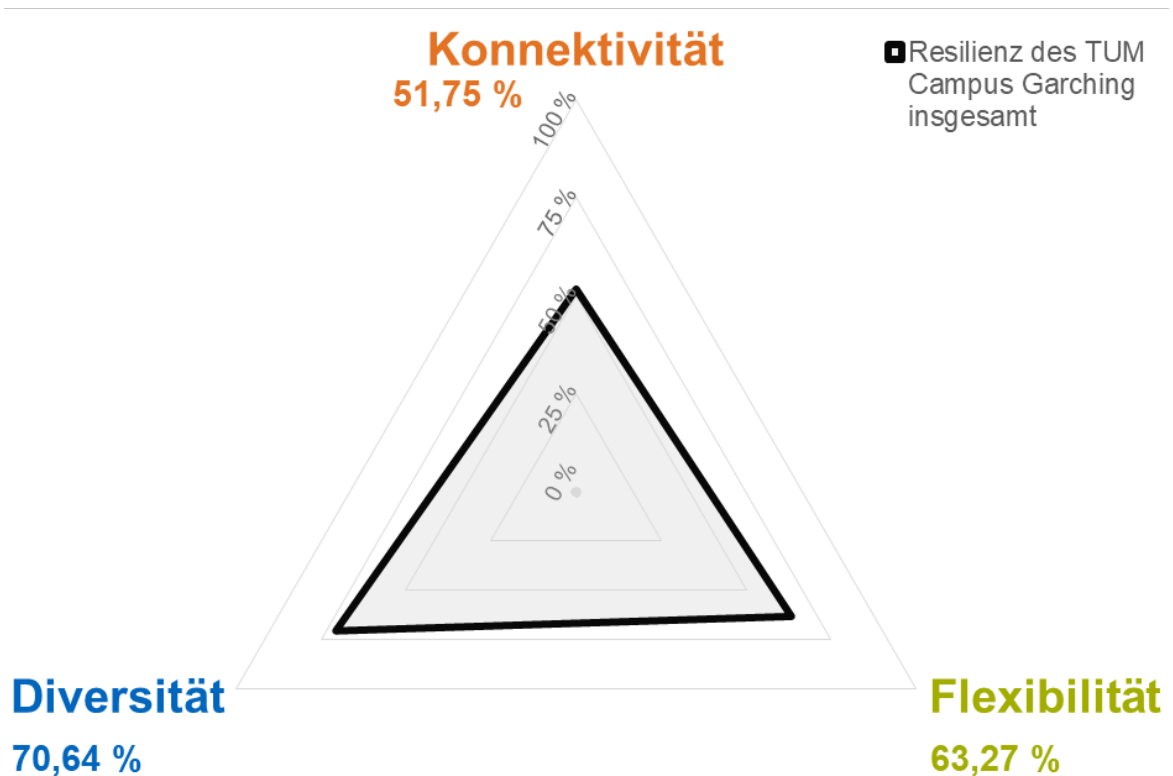


Abbildung 22: Gesamtbetrachtung der Resilienzbewertung am TUM Campus Garching, aufgeteilt auf die Kriteriencluster Konnektivität, Flexibilität und Diversität im Status Quo (Stand: August 2019)

Der RG der einzelnen Cluster am TUM Campus Garching ist als heterogen zu beschreiben. Während die **Diversität** des Campus einen Wert von über 70 % erreicht, eröffnet sich im Cluster **Konnektivität** mit 51,75 % das größte Potential. Ein beachtenswerter Aspekt ergibt sich aus dem direkten Vergleich der jeweiligen Prozentwerte in beiden Dimensionen (siehe Abbildung 21). Dabei ist festzustellen, dass die Clusterwerte der technischen Betrachtung sich jeweils um ca. 14 - 16 % von denen aus organisationaler Sicht unterscheiden. Die Differenzen innerhalb der jeweiligen Dimensionen liegen zwischen 22 % (organisational zwischen **Diversität** und **Flexibilität**) und fast 28 % (technisch zwischen **Konnektivität** und **Flexibilität**).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Resilienz am Campus insgesamt, aber ebenso innerhalb der technischen bzw. organisationalen Dimensionen, äußerst unterschiedlich ausgeprägt ist. Daraus lässt sich ableiten, dass der Campus gegen bestimmte Ereignisse eher verwundbar erscheint, insbesondere solche, die überwiegend die Resilienz im Cluster **Konnektivität** (RG insgesamt 51,75 %) herausfordern.

Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Methodik für alle Cluster eine identische Gewichtung angenommen. Dies wird mit der Wichtigkeit der organisationalen Struktur für einen resilienten Betrieb des Energiesystems begründet, der auch von befragten Verantwortlichen am Campus Garching bestätigt wurde. Insbesondere zentrale Arbeitsstellen wie Leitstandfahrer, Kesselwärter oder Elektroniker*innen spielen eine entscheidende Rolle für den reibungslosen Ablauf der Energiebereitstellung innerhalb der technischen Anlagen

(Sarıkaya, 2019), (Müller, 2019). Dies ergibt über alle sechs Cluster innerhalb der beiden Dimensionen einen Gesamtresilienzgrad von 61,89 %.

Unter Annahme einer identischen Gewichtung aller Cluster:

Resilienz des Energiesystems am Campus Garching: 61,89 %

Abbildung 23: Aggregierter Resilienzgrad über alle Kriteriencluster am TUM Campus Garching

Dieser Wert fasst die zuvor beschriebenen Verbesserungsmöglichkeiten zu einer quantitativen Größe zusammen. Dabei ist zu klären, wie der ermittelte RG zu beurteilen sei. Die Betrachtung der Extrempunkte erweist sich dafür als geeignetes, einleitendes Indiz. So bedeutet ein RG von 0 % den vollständigen Kollaps, während 100 % die „systemische Unverwundbarkeit“ gegenüber jeglichem Risiko impliziert. Während ein Systemkollaps unbedingt zu vermeiden ist (und in der Regel stets gewisse Teile des Systems auch im Katastrophenfall erhalten bleiben), ist die vollumfängliche Schadensvermeidung in einem realen System praktisch nicht zu erreichen (siehe u.a. (Hirschl B. et al., 2018), (Bartl, Gerhold, & Schiller, 2014)).

Der Zielwert sollte aus ökonomischer Perspektive möglichst in der oberen Hälfte der Resilienzskala liegen, um Schäden weitestgehend zu minimieren. Gleichwohl sind dabei branchen- oder systemspezifische Besonderheiten zu beachten, die das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis mitunter erheblich beeinflussen können. Maßnahmen zum Schutz bzw. zur Schadensvermeidung kosten häufig Geld oder andere Ressourcen, liefern allerdings auf längere Sicht selten direkte, messbare ökonomischen Vorteile (vgl. (Linkov, et al., 2014), (Rose, 2016)). Zur Erörterung einer konkreten Zielgröße des RG erscheint eine dynamische, systeminterne Analyse mit spezifischer Risikobewertung dementsprechend zielführender als die ausschließliche Orientierung an einem statischen Zielwert von extern.

Diese Überlegungen ähneln dem Ansatz des Total Productive Maintenance (TPM), eingeführt in (Nakajima, 1988) zur kontinuierlichen Prozessverbesserung in verschiedensten Bereichen eines Unternehmens. Der darin enthaltene Wert der Gesamtanlageneffektivität (GAE) geht von Zielwerten zwischen 60 und 85 % aus, was auch für Resilienz Betrachtungen in Energiesystemen als angemessenes Spektrum angesehen werden kann (vgl. Kapitel 4.3.4). Ebenso wie der mittlerweile weltweit verbreitete GAE-Wert eignet sich auch der RG zur Übersicht über die Leistungsfähigkeit systeminterner Prozesse auf verschiedenen Ebenen. Während die GAE vor allem wertschöpfungsbezogene Aussagen liefert, fokussiert sich der RG stärker auf die Schockfestigkeit eines Systems und den Umgang mit widrigen Ereignissen.

In Bezug auf die hier dargestellten Erhebungen eignet sich der Wert in jedem Fall als qualitative Messgröße für ein allgemeines Verständnis der Resilienz im Betrachtungsobjekt. Insbesondere bei einer wiederholten Betrachtung kann der interne Vorher-Nachher-Vergleich des RG einen probaten Mehrwert für diverse Management-Ebenen darstellen. Für

die Ableitung konkreter Maßnahmen ist dagegen unerlässlich, die zuvor ermittelten Ergebnisse in den einzelnen Kriterienclustern des *Resilienzfragebogens* sowie der (technischen) Systemmodellierung einer genaueren Untersuchung zu unterziehen. Hier bietet besonders die bereits erfolgte monetäre Bewertung potentieller Schadensereignisse aus technischer Sicht den Vorteil, Optimierungspotentiale zu identifizieren und entsprechend der ökonomischen Auswirkungen zu priorisieren und gegebenenfalls umzusetzen.

Insgesamt offenbart die Resilienz Betrachtung des TUM Campus Garching mit einem RG von knapp 62 % durchaus Verbesserungspotential. Der folgende Abschnitt baut auf der bereits erfolgten Systemmodellierung aus technischer Perspektive auf und bietet erste Ansätze für mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz am Standort.

4.5. Optionen für eine optimierte Systemresilienz am TUM Campus Garching

Wie in Abschnitt 4.4 deutlich wurde, gibt es nach Anwendung der eingeführten Resilienzmethodik sowohl aus technischer als auch aus organisationaler Sicht Optimierungspotential hinsichtlich der Resilienz am TUM Standort Garching. Um potentielle Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen, werden – ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen – weitere Modellierungen mit Hilfe der linearen Optimierungssoftware *urbs* vorgenommen.

Aus organisationaler Sicht gestaltet sich eine Modellierung des Energiesystems Garching mit den verfügbaren Mitteln insofern schwierig, als dass zum jetzigen Zeitpunkt keine Möglichkeit besteht, die Auswirkungen von bestimmten organisationsstrukturellen oder personellen Maßnahmen in geeigneter Form in einem Modell abzubilden. Da eine solche Vorgehensweise nicht den Kern der Arbeit bildet, beschränken sich die Überlegungen für einen resilienzoptimierten Campus auf die technische Perspektive. Ansätze für die Verbesserung der Resilienz auf organisationaler Ebene finden sich unter anderem in (Rolfe, 2019), (Di Bella, 2014) und (Heller, et al., 2019) und fokussieren sich überwiegend auf die Vor-Ort-Durchführung von regelmäßigen Übungen, Workshops, Seminaren o.ä.

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, um das derzeitige Energiesystem des Campus gesamtkostenoptimal, aber gleichzeitig mit realistischen Maßnahmen zu optimieren.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.4 sowie den Experteninterviews mit (Sarıkaya, 2019) (Ross, 2019) (Müller, 2019) und (Schönleber, 2019) werden der linearen Optimierungssoftware technische Erweiterungsoptionen zur Verfügung gestellt. Diese umfassen zum einen den Anschluss des Campus an die Geothermie-Anlage Garching¹⁹, die Installation einer dazugehörigen Wärmepumpe sowie einen Lithium-Ionen-

¹⁹ Siehe dazu: <https://www.ewg-garching.de/technik/bohrung/>, abgerufen am 17.09.2019

Batteriespeicher in der technischen Zentrale, um die u.a. **Diversität** der Energiebereitstellung am Standort zu steigern. Wie aus der Status Quo Modellierung deutlich wurde, führen die hohen Kosten im Cluster **Konnektivität** zu einem relativ geringen Resilienzgrad, der erhebliches Verbesserungspotential offenbart. Dies hängt vor allem mit der enormen Abhängigkeit der Energieversorgung von der technischen Zentrale (TZ) ab, sodass als zusätzliche Erweiterungsoptionen Energieanlagen außerhalb der TZ zur Verfügung stehen, u.a. weitere Photovoltaik-Anlagen und Notstromdiesel.

In Expertengesprächen mit Energiesystem-Verantwortlichen des Campus wurden für die in Abbildung 24 erwähnten Erweiterungsmöglichkeiten (grün und **fett** markiert) realistische Leistungs- bzw. Kapazitätsgrenzen erarbeitet. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf räumliche Verfügbarkeiten und realistische Investitionssummen gelegt. Beispielsweise wurde die maximale Kapazitätsgrenze für den Batteriespeicher auf 10 MWh festgelegt, die Maximalleistung für am Campus installierbare PV-Anlagen auf jeweils 1 MW in Ost-West- bzw. Südausrichtung begrenzt (verfügbare Dachflächen) und die realistisch durch die Garching Geothermie zur Verfügung stehende Leistung auf 5 MW geschätzt.

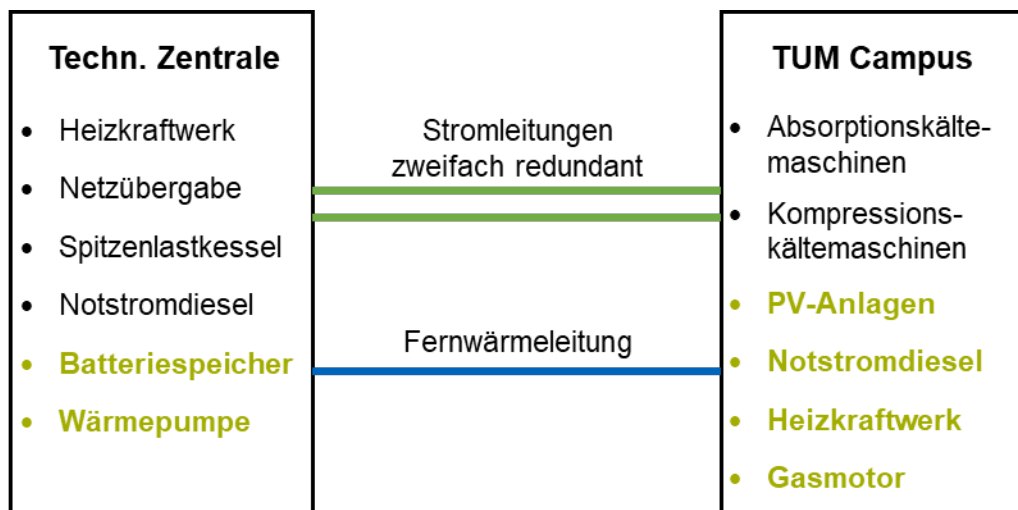


Abbildung 24: Schematische Darstellung der zur Diskussion stehenden Erweiterungsoptionen (grün) des TUM Campus Garching zur resilienzbasierten Systemoptimierung

Auf Grundlage dieser Annahmen kann das so entstehende, fiktive Energiesystem des Campus in *urbs* simuliert werden. Dafür werden erneut alle 240 zuvor behandelten Schockszenarien modelliert. So kann ermittelt werden, zu welchen Anteilen die neuen Erweiterungsoptionen in den einzelnen Szenarien zum Einsatz kommen, um die Gesamtsystemkosten möglichst gering zu halten. Dabei sind teils erhebliche Unterschiede festzustellen. Logischerweise werden insbesondere in Fällen, in denen bspw. die elektrische Energieversorgung beeinträchtigt ist, keine der optionalen Erweiterungen für zusätzliche thermische Energie im System genutzt und umgekehrt. Ausnahmen hiervon ergeben sich durch die ergänzenden PV-Anlagen sowie den zusätzlichen Gasmotor außerhalb der TZ aufgrund der geringeren variablen Kosten pro MWh. Diese Optionen werden immer gebaut, um die Gesamtsystemkosten zu verringern (Ausnahme: Photovoltaik bei nächtlichen Ausfällen).

Um die Ergebnisse der 240 einzelnen Simulation angemessen zusammenzufassen, werden erneut die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien zugrunde gelegt. Darüber hinaus wird für die Optimierung außerdem die prozentuale Verteilung der Ausfallkosten innerhalb der einzelnen Cluster im Status Quo berücksichtigt. Dies geschieht, um die Cluster entsprechend ihrer vorangegangenen Auswirkungen zu priorisieren, die Resilienz innerhalb der einzelnen Cluster anzugleichen und den Resilienzgrad des Campus insgesamt zu steigern. Bezugnehmend auf die konkrete Verteilung der Ausfallkosten (vgl. Abbildung 18) haben die Ausbauoptionen der simulierten Ereignisse im Cluster **Konnektivität** entsprechend mehr Gewicht als jene im Cluster **Flexibilität** bzw. **Diversität**.

Das so entstehende, resilienzoptimierte System besitzt neben den bestehenden Energieanlagen folgende Erweiterungen:

- Gasmotor außerhalb der technischen Zentrale (8 MW_{peak} Spitzenleistung)
- Spitzenlastkessel außerhalb der technischen Zentrale (2,37 MW_{peak, thermisch})
- Dieselgenerator außerhalb der technischen Zentrale (1,87 MW_{peak})
- Photovoltaikanlagen Südausrichtung (0,92 MW_{peak}, da 0,08 bereits installiert) sowie Ost-West-Ausrichtung (1 MW_{peak})
- Anschluss an die Geothermie-Anlage Garching: Wärmepumpe (0,82 MW_{peak}) mit Versorgungsleitung (0,82 MW * 5; 4,08 MW)
- Batteriespeicher (4,8 MW_{peak}, 5,88 MWh Speicherkapazität)

Im Anhang findet sich eine Aufschlüsselung über die dadurch entstehenden, jährlichen Investitions- und Fixkosten.

Dieses resilienzoptimierte Energiesystem des Campus wird nun – analog zu den Berechnungen im Status Quo – erneut hinsichtlich der potentiellen jährlichen Ausfallkosten modelliert. Die relevantesten, daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 15 abgebildet.

Kostenart	Kosten pro Jahr im Status Quo	Quantitative Veränderung gegenüber Status Quo	Kosten pro Jahr im optimierten System	Neuer Anteil an Gesamtsystemkosten des Status Quo
Zu erwartende Ausfallkosten pro Jahr	4.616.192 €	-1.460.362 €	3.155.830 €	10,36 %
<i>... davon im Cluster Konnektivität</i>	<i>2.487.148 €</i>	<i>-739.103 €</i>	<i>1.748.045 €</i>	<i>5,74 %</i>
<i>... davon im Cluster Diversität</i>	<i>1.224.399 €</i>	<i>-681.346 €</i>	<i>543.053 €</i>	<i>1,78 %</i>
<i>... davon im Cluster Flexibilität</i>	<i>904.645 €</i>	<i>-39.913 €</i>	<i>864.732 €</i>	<i>2,84 %</i>
Gesamtsystemkosten pro Jahr	30.472.517 €	- 8.573.427 €	21.899.090 €	71,87 %

Tabelle 15: Übersicht über die Veränderungen zwischen Status Quo und resilienzoptimiertem Energiesystem hinsichtlich der zu erwartenden Ausfallkosten und den Gesamtsystemkosten pro Jahr

Insgesamt sind erhebliche Kostenreduktionen festzustellen. So sinken die zu erwartenden Ausfallkosten um über 30 % pro Jahr auf 3.155.830 €, was sich entsprechend auch in den einzelnen Clustern widerspiegelt. Hierbei konnten vor allem in den Clustern **Konnektivität** und **Diversität** deutliche Verbesserungen erzielt werden. Die Erweiterungen im Energiesystem senken weiterhin die Gesamtsystemkosten um rund 28 %, was einer Reduktion um 8,5 Mio. € jährlich entspricht. Dadurch zeigt sich deutlich, dass der auf Resilienzüberlegungen basierende Optimierungsansatz erhebliche, positive ökonomische Auswirkungen erzielen kann.

Um festzustellen, welchen Effekt die Optimierung auf den technischen Resilienzgrad hat, wird erneut die in Kapitel 4.3.4 eingeführte *Resilienzfunktion* hinzugezogen.

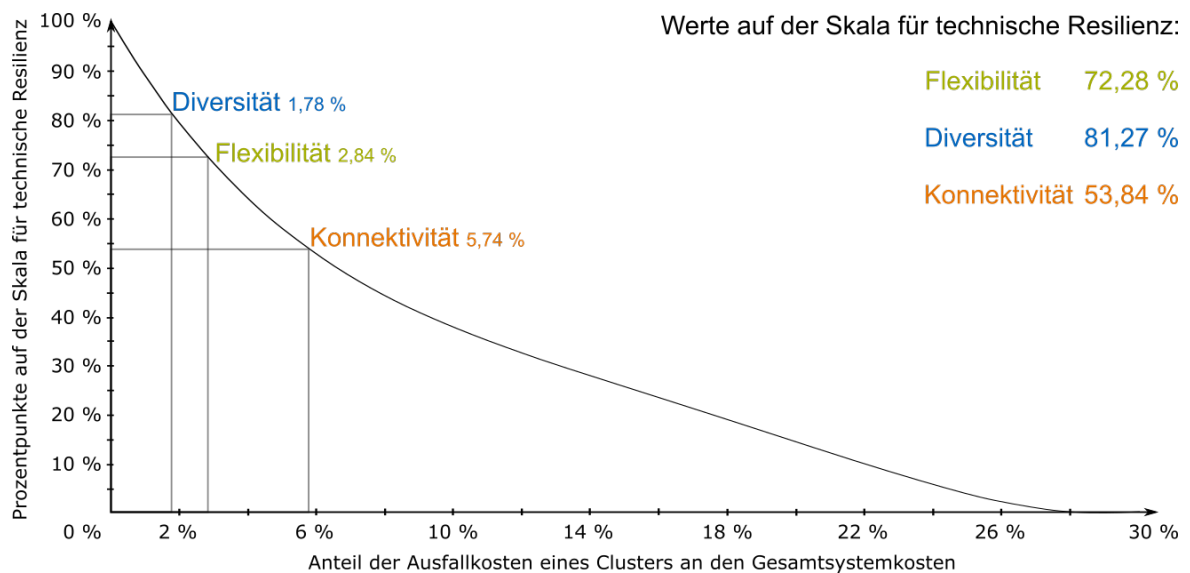


Abbildung 25: Resilienzfunktion zur Bestimmung des technischen Resilienzgrads des optimierten Energiesystems am TUM Campus Garching

Anhand der in Tabelle 15 verzeichneten Anteile der neuen, verringerten Ausfallkosten an den Gesamtkosten des Status Quo können die optimierten Werte jedes Clusters mit Hilfe der *Resilienzfunktion* ermittelt werden. Es zeigt sich, dass die Optimierung in allen Kriterienclustern zu teilweise signifikanten Verbesserungen des technischen Resilienzgrads führt. Während sich das Cluster **Flexibilität** um ca. einen Prozentpunkt steigert, gewinnen **Konnektivität** und **Diversität** über 10 % bzw. sogar 17,5 % im Vergleich zum Status Quo.

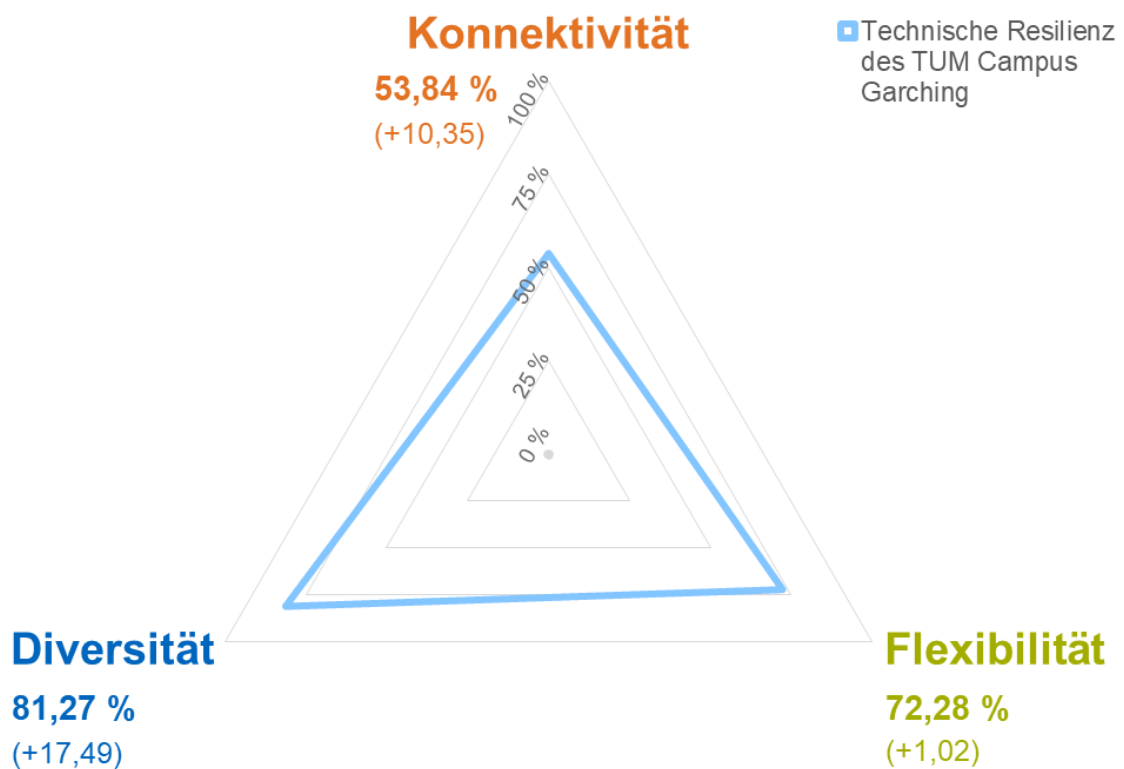


Abbildung 26: Optimiertes Ergebnis der technischen Resilienzbeurteilung des Energiesystems am TUM Campus Garching, aufgeteilt auf die drei Kriteriencluster

4.6. Einschränkungen und Grenzen der angewandten Methodik

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt wurde, ermöglicht der eingeführte und in einem Fallbeispiel angewandte Bewertungsansatz bedeutsame und nachvollziehbare Erkenntnisse bezüglich der Resilienz in Energiesystemen. Gleichzeitig bleibt festzuhalten, dass die vorgenommenen Einschränkungen sowie die relativ hohe Zahl von Annahmen und qualitativen Einschätzungen die Granularität der gewonnenen Ergebnisse reduziert.

Dabei eröffnet sich an erster Stelle die Frage, inwiefern die Nutzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und diskreten Schadensereignissen eine fundierte Resilienzbewertung zulässt, die praktisch alle denkbaren Schocks – also sowohl die bekannten, „zu erwartenden“ als auch die gänzlich unbekannten oder unvorhersehbaren – hinreichend berücksichtigt. Die Vorgehensweise in der vorliegenden Methodik basiert auf der Betrachtung von konkreten „Auswirkungen im System“, die in Zusammenarbeit mit Energiesystemexperten erarbeitet wurden (vgl. Tabelle 3). Für eine vollumfängliche Betrachtung von Einwirkungseffekten durch Schockereignisse wäre es gegebenenfalls angebracht, die Anzahl betrachteter Events zu erhöhen und sich zusätzlich auf potentielle Ereignisse zu konzentrieren, die in unbekannter Form an verschiedenen Orten des Campus unterschiedliche Folgen haben können (wie z.B. Blitzschlag, Brand, Hackerangriff, o.ä.). Dies hätte auf der anderen Seite möglicherweise einen beachtenswerten Anstieg des Ressourcen- und Zeitaufwands zur Folge. Außerdem ist zu hinterfragen, ob die „Schwarz-Weiß-Betrachtung“ – das heißt

die Differenzierung zwischen Ausfall oder voll funktionstüchtig – der Komplexität des Betrachtungsobjekts ausreichend gerecht wird oder ob die Etablierung eines „Mittelwegs“ zielführend wäre.

Im Laufe der Gespräche mit diversen Verantwortlichen und sonstigen Mitarbeiter*innen des TUM Campus ergaben sich weitere, möglicherweise noch nicht ausreichend berücksichtigte Schock- oder Ausfallszenarien, unter anderem:

- Kurzfristige Erkrankung von Fachpersonal
- Gleichzeitiger Ausfall der Netzersatzanlagen und der öffentlichen Stromversorgung
- Ausfall der Wasserversorgung und/oder der Wasseraufbereitung
- Ausfall der unterbrechungsfreien Stromversorgung für Servereinheiten, Kraftwerkssteuerung und Gebäudeleittechnik
- Hackerangriff auf IT-Infrastrukturen (Sarikaya, 2019), (Ross, 2019), (Müller, 2019).

Die Nutzung von Wahrscheinlichkeiten zur Schadensabschätzung führt, wie zuvor bereits eingeführt, unweigerlich zu Einschränkungen des Betrachtungshorizonts, ist aber dennoch ein beliebtes Instrument zur Beurteilung und Priorisierung von Maßnahmen gegen eben-diese Schäden. Die Unzulänglichkeiten solcher Methoden (z.B. im Rahmen von Risikobewertungen) werden in dieser Arbeit ebenfalls thematisiert (siehe u.a. Kapitel 2.1.2 und 3).

Die Beschränkung auf drei übergeordnete Cluster mit insgesamt acht Kriterien bietet im vorliegenden Fall eine gute und angemessene Perspektive für die Resilienzbewertung. Hier ist denkbar, den Betrachtungshorizont einerseits hinsichtlich zusätzlicher, relevanter Kriterien zu erweitern, oder neben den hier erwähnten Ebenen der Resilienz (organisational und technisch) weitere Dimensionen zu berücksichtigen (z.B. ökologisch, ethisch, rechtlich, etc., vgl. Abschnitt 2.1.2).

Um die entstehenden Schäden in einen ökonomisch sinnvollen Kontext zu bringen, bedient sich die vorgestellte Methodik bestimmten Annahmen zur Kategorisierung und Faktorisierung von unterschiedlichen Schadensauswirkungen. Dabei war nicht Sinn und Zweck, eine holistische Darstellung aller potentieller Kostenpunkte in höchster Granularität abzubilden, sondern vielmehr eine allgemeine, aber nachvollziehbare Übersicht über mögliche Kosten in einer korrekten Größenordnung zu erarbeiten. Deshalb wurden bspw. Reparaturkosten nicht konkretisiert bzw. gesondert ausgewiesen, ebenso wurden die zusätzlichen Kosten durch alternative Energiebereitstellung (nach einer Abschätzung auf Seite 74) nicht weiter berücksichtigt. Insbesondere im Hinblick auf Ereignisse, die in Personenschäden oder sogar dem Verlust von Menschenleben resultieren, stößt die vorliegende (vorwiegend monetäre) Bewertung an ethische Grenzen. Ansätze zum Umgang mit dieser Problematik finden sich u.a. in (Perrett, 1992), (Berg, et al., 1995) und (Kellert, 1996).

Methodisch ist bei der Betrachtung der organisationalen Resilienzbewertung gegebenenfalls zu überdenken, inwiefern die Nutzung einer Ordinalskala zur Erhebung des Resilienz-

werts mit anschließender Umwandlung in eine prozentuale Verhältnisskala eine akzeptable statistische Vorgehensweise darstellt. Auch ist empfehlenswert, im *Resilienzfragebogen* konkrete Differenzierungsmerkmale zwischen den fünf geschlossenen Antwortmöglichkeiten zu formulieren, um die Objektivität der abgegebenen Antworten zu erhöhen. Während die vorgestellte Systematik die Erarbeitung eines „resilienzoptimierten Energiesystems“ aus technischer Sicht ermöglicht, wird darauf verzichtet, für die organisationale Perspektive die Effektivität spezifischer Verbesserungsmaßnahmen zu ermitteln. Da Personalstrukturen sowie Erfahrungen und Kompetenzen einzelner Mitarbeiter*innen schwer modellierbar sind, sollten für die Erfassung der Maßnahmenwirksamkeit auf organisationaler Ebene neben „Vorher-Nachher-Vergleichen“ gegebenenfalls weitere Verfahren etabliert werden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine Bewertungsmethodik der Resilienz von Energiesystemen auf organisationaler sowie technischer Ebene mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells und einem selbstentwickelten Resilienzfragebogen erarbeitet. Das vorgestellte Konzept basiert auf dem aktuellen Stand der Forschung und berücksichtigt eine Reihe von Zusammenhängen, die für die Resilienzbetrachtung eines Energiesystems wichtig sind. Die Ergebnisse der realitätsgetreuen Übertragung der theoretischen Methodik auf das Fallbeispiel des Energiesystems am TUM Campus Garching bestätigen die Sinnhaftigkeit des erarbeiteten Ansatzes.

Das mehrstufige Verfahren ermöglicht auf beiden Betrachtungsebenen – sowohl aus technischer als auch aus organisationaler Sicht – relevante Anknüpfungspunkte für eine Verbesserung der Resilienz von elektrischen Energiesystemen. Im Rahmen der technischen Untersuchung wurde für den TUM Campus Garching eine deutliche Abhängigkeit von einzelnen Systemkomponenten festgestellt. Insbesondere die Dependenz von einem einzigen Netzübergabepunkt für die öffentliche Stromversorgung und die allgemeine, räumliche Konzentration nahezu aller Energieanlagen in der technischen Zentrale können im Schadensfall erhebliche schädliche Auswirkungen haben. Dies kann im Extremfall zur Handlungsunfähigkeit des gesamten Campus führen. Die Ergebnisse legen gleichzeitig erhebliche Potentiale aus technischer und ökonomischer Sicht offen, die in künftigen Überlegungen zur resilienten Weiterentwicklung des Energiesystems am TUM Standort Garching beitragen können.

Auf organisationaler Ebene wurde durch die Umfrage anhand des Resilienzfragebogens ersichtlich, dass in einigen Abteilungen zum jetzigen Zeitpunkt „unersetzliche“ Know-How-Träger arbeiten, deren dauerhaft notwendige Verfügbarkeit einen Brennpunkt hinsichtlich des Verhaltens im Krisenfall darstellt. Weiterhin verringert das Fehlen von Notfallmanagementübungen teilweise offenbar die Systemkenntnis und den abteilungsübergreifenden Austausch. Gleichzeitig ist in der am Campus Garching durchgeführten Umfrage die positive Rückmeldung verschiedener Interessengruppen auf die Erhebung besonders hervorzuheben. Die Ergebnisse eröffnen Möglichkeiten für eine verbesserte Kommunikation und Zusammenarbeit innerhalb und außerhalb der betroffenen Sachgebiete.

Im Laufe der Analyse ergaben sich verschiedene Ansätze für weitere Forschungsfragen und Folgeüberlegungen. Eine Weiterentwicklung der präsentierten Methodik könnte die direkte Verknüpfung der Einblicke aus der organisationalen Resilienzbewertung mit den Untersuchungen aus technischer Sicht sein. Beispielsweise ist denkbar, spezifische organisationale Ergebnisse in die Berechnung der Ausfallkosten aus technischer Sicht einfließen zu lassen, um festzustellen, wie gut die Systemfunktion durch menschliche Handlungen aufrechterhalten oder wiederaufgenommen werden kann (vgl. Kapitel 4.3.3). Dieser Zusammenhang konnte im vorliegenden Fallbeispiel nicht berücksichtigt werden, da die organisationale Erhebung erst im Anschluss an die technische Analyse erfolgte, unterstreicht

jedoch die Notwendigkeit der Betrachtung mehrerer Ebenen. In der Arbeit werden verschiedene weitere Fragestellungen aufgeworfen, aber nicht vollumfänglich beantwortet, unter anderem Gewichtungsaspekte (z.B. Kapitel 4.4), Branchenspezifikationen (Kapitel 3.2), sowie die ökologische/juristische/sonstige Kontexterweiterung (Kapitel 2.1.2).

Im Anschluss an die vorliegende Arbeit sollten zur weiteren Vertiefung der technischen Resilienz Betrachtung zusätzliche Ausfall- oder Schockszenarien erarbeitet werden, um die Vielzahl von potentiellen oder tatsächlichen Ereignissen, denen ein reales Energiesystem ausgesetzt ist, noch besser widerzuspiegeln. Weiterhin könnten für die Faktorisierung und Zusammenfassung der einzelnen Schockszenarien ergänzende Anhaltspunkte gesammelt und angemessen aufbereitet werden, die über die hier behandelten Aspekte hinausgehen. Die Optimierung bzw. Erweiterung des Systems aus technischer Sicht anhand des linearen Optimierungsmodells schränkt möglicherweise den Lösungsraum ein – hier können insbesondere stochastische Optimierungsmodelle womöglich bessere Ergebnisse erzielen.

Der Resilienzfragebogen zur Erhebung der organisationalen Resilienz wurde für diese Arbeit aus diversen Quellen erarbeitet und spezifisch auf das Betrachtungsobjekt „Energiesystem“ angepasst (siehe Kapitel 3.3). Darauf aufbauend eröffnen sich verschiedene Anknüpfungspunkte, insbesondere eine Korrelationsanalyse oder die Anpassung bzw. Erweiterung der bisherigen 24 Items. Die Steigerung der Repräsentanz des Fragebogens bildet einen weiteren, wichtigen Aspekt für Folgeuntersuchungen. Neben einer lückenlosen Befragung der beteiligten Interessengruppen wäre auch der Einbezug von Energiesystemen mehrerer, ähnlicher Standorte denkbar, um Vergleichswerte zu erarbeiten.

Generell ist die Entwicklung von praxisbezogenen Konzepten zur resilienzorientierten Verbesserung von Arbeitsweisen und Organisationsstrukturen in Energiesystemen eine bis dato nur begrenzt im interdisziplinären Forschungskontext berücksichtigte Herausforderung. Denkbar wären hier unter anderem Ansätze zur regelmäßigen Konfrontation mit Eventualitäten abseits des Tagesgeschäfts, z.B. in Form von Workshop-Formaten oder abteilungsübergreifenden (Notfall-) Übungen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass Resilienz Betrachtungen im Hinblick auf die unternehmerische Bewertung von Betriebsrisiken einen wichtigen Beitrag leisten. Zwar gibt es mittlerweile Standards, die sich der Resilienzthematik in Unternehmen auf unterschiedliche Art und Weise annehmen, doch mangelt es bislang an einem einheitlichen Ansatz mit konsequenter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge in Energiesystemen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Vorgehensweise, wie der Begriff der Resilienz auf verschiedenen Ebenen im unternehmerischen Kontext etabliert werden kann und liefert gleichzeitig fundierte, nachvollziehbare Ergebnisse zur konkreten, internen Bilanzierung der Resilienz in einem Energiesystem. Daraus ergibt sich schlussendlich die Möglichkeit, angemessene Maßnahmen zur kontinuierlichen Optimierung von Energiesystemen hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber widrigen Ereignissen abzuleiten – einem kritischen Anliegen in der heutigen, vernetzten Gesellschaft.

Anhang

Resilienzfragebogen zur organisationalen Resilienz im Energiesystem

(Zugehörigkeit der Fragen zu ihren jeweiligen Kriterien inklusive der Definitionen waren für die Befragten nicht sichtbar)

Diversität:

Unterschiedlichkeit:

Verschiedenheit und Wissensstand einzelner Akteure oder Interessengruppen, z.B. Zeit-horizont der Ziele, Funktion, Erfahrung, Kompetenzen, usw.

1. Das Personal dieser Abteilung ist sich der Unterschiede der eigenen Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Rollen im Vergleich zu anderen Personen voll bewusst.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

2. Entscheidungen über zukünftige Anlagen bzw. Energiekonzepte werden unter Berücksichtigung der Erfahrungen und Kompetenzen in dieser Abteilung getroffen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

3. Personal dieser Abteilung bildet alle Kompetenzen und Organisationsstufen ab, die zur Erledigung der täglichen Arbeit sowie zur Bewältigung von etwaigen Krisen nötig sind.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Balance:

*Verhältnis an Akteuren in relevanten Abteilungen in Relation zur Gesamtzahl der Akteure im Energiesystem, z.B. gleichmäßige Verteilung von Mitarbeiter*innen über alle (ähnlich wichtigen) Organisationsbereiche*

4. Durch die derzeitige Mitarbeiterkonstellation innerhalb der Abteilung, aber auch abteilungsübergreifend, werden energiesystemrelevante Aufgaben produktiv erledigt.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

5. Die Verteilung der Aufgaben und Verantwortlichkeiten innerhalb der Abteilung erfolgt so, dass möglichst alle Mitarbeiter*innen stets ähnlich ausgelastet sind.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

6. Die Gruppe relevanter Mitarbeiter*innen bzw. Entscheider zur erfolgreichen Erledigung von Aufgaben – auch in Krisensituationen – ist in dieser Abteilung eindeutig definiert.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Flexibilität:

Numerische Redundanz:

Verfügbarkeit & Anzahl von Akteuren mit ähnlichen Kenntnissen, Kompetenzen & Erfahrungen in der Organisation, z.B. Stellvertreterregelungen und genügend Arbeitsplätze

7. Arbeitsstellen mit identischen Aufgabenbereichen und Fachkenntnissen werden in ausreichender Zahl besetzt, um auch in potentiellen Notsituationen belegt zu sein.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

8. Es fällt dieser Abteilung leicht, fähiges Personal zu halten bzw. neu zu rekrutieren.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

9. Es gibt für alle Mitarbeiter*innen dieser Abteilung alternative Räumlichkeiten zur Aufrechterhaltung der Arbeitsleistung, falls normale Arbeitsstätten unbenutzbar wären.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Funktionale Redundanz:

Verfügbarkeit und Anzahl relevanter Personen/Interessengruppen in der Organisation, z.B. ausreichende Besetzung eines Arbeitsplatzes auch für Urlaubs- oder Krankenzeiten

10. Dieser Abteilung steht im Falle einer Unterbrechung der Arbeitsfähigkeit genügend externe Hilfe zur Verfügung, um wesentliche Aufgaben weiterhin erledigen zu können.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

11. Diese Abteilung kann im Krisenfall auf eine ausreichende Anzahl an verfügbaren Entscheider*innen, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Themen, zurückgreifen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

12. Diese Abteilung ist auf die Auswirkungen, die ein Schockereignis ggf. auf ihre Mitarbeiter*innen haben kann, gut vorbereitet.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Reaktionskapazität:

Aufwand, um Handlungsmöglichkeiten auszuführen, auch Befehlskettenlänge und Antizipationsfähigkeit, z.B. umständliche Freigaben zur Umstellung auf Ersatzbetrieb

13. Es gibt Notfallmanagement-Räume, die für praktisch jeden bekannten Schock ausgestattet sind, um bei solchen Ereignissen die Arbeitsleistung aufrechtzuerhalten.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

14. Die Art und Weise der Entscheidungsfindung ist ebenso effizient wie effektiv und wird vermutlich auch im Krisenfall erfolgreich sein oder hat sich in vergangenen Krisen bewährt.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

15. Das Personal dieser Abteilung ist auf Notfälle vorbereitet und darin geschult, das Tagesgeschäft auch während der Bewältigung von Krisensituationen weiterzuführen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Konnektivität:

Modularität:

Intensität der Interaktion zwischen verschiedenen Abteilungen sowie innerhalb der-selben Abteilung, z.B. zeitnahe Kommunikation einer Fehlfunktion

16. Diese Abteilung betreibt, ggf. in Absprache mit anderen Abteilungen, regelmäßige Notfallmanagementübungen, insbesondere im Hinblick auf das Energiesystem.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

17. Mitarbeiter*innen dieser Abteilung tauschen sich **untereinander** regelmäßig aus, um verschiedene Sichtweisen in ihre Arbeit und Entscheidungen einfließen zu lassen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

18. Mitarbeiter*innen dieser Abteilung tauschen sich **abteilungsübergreifend** regelmäßig aus, um verschied. Sichtweisen in ihre Arbeit und Entscheidungen einfließen zu lassen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Essentielle Komponenten:

Kenntnis über Relevanz von Personen und Interessengruppen innerhalb der Organisation, z.B. Wissen über vorgesetzte Entscheidungsträger, auch in anderen Abteilungen

19. Diese Abteilung ist bemüht, die Anliegen und Bedürfnisse ihrer Mitarbeiter zu verstehen und sich auf sie einzulassen, um möglichst erfolgreich zu arbeiten.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

20. Diese Abteilung hat vollständigen Zugang zu Interessengruppen und Informationen, die für die tägliche Arbeit, aber insb. die Arbeit in Notsituationen relevant sein könnten.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

21. In dieser Abteilung gibt es niemanden, der aufgrund von besonderen Erfahrungen, Kompetenzen oder Freigaben „unersetzlich“ wäre, insbesondere im Krisenfall.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Durchschnittliche Pfadlänge:

„soziale Distanz“ zwischen Personen verschiedener interner oder externer Interessengruppen, z.B. direkte Absprache mit externen Reparaturdienstleistern

22. Diese Abteilung ist ausreichend stark mit relevanten Akteuren in ihrem Umfeld vernetzt (innerhalb und außerhalb der Organisation), um erfolgreich und produktiv zu arbeiten.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

23. Personal kann in dieser Abteilung bzw. in der gesamten Organisation leicht und effektiv „auf-“ und „abwärts“ kommunizieren.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

24. Die Meinungen bzw. Erfahrungen einzelner Mitarbeiter*innen haben Gewicht bei der Entscheidungsfindung, sowohl in der täglichen Arbeit als auch in Krisensituationen.

☐ Stimme voll zu ☐ Stimme eher zu ☐ Neutral ☐ Stimme eher nicht zu ☐ Stimme gar nicht zu

Kriterienbezogene Auswertung der Fragen des *Resilienzfragebogens*

Kriterium		Aussage	prozentual	Proz. Kriterienw.
Diversität	Unterschiedlichkeit	1. Das Personal dieser Abteilung ist sich der Unterschiede der eigenen Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Rollen im Vergleich zu anderen Personen voll bewusst.	95,0%	81,67%
		2. Entscheidungen über zukünftige Anlagen bzw. Energiekonzepte werden unter Berücksichtigung der Erfahrungen und Kompetenzen in dieser Abteilung getroffen.	65,0%	
		3. Personal dieser Abteilung bildet alle Kompetenzen und Organisationsstufen ab, die zur Erledigung der täglichen Arbeit sowie zur Bewältigung von etwaigen Krisen nötig sind.	85,0%	
	Balance	4. Durch die derzeitige Personalkonstellation innerhalb der Abteilung, aber auch abteilungsübergreifend, werden energiesystemrelevante Aufgaben produktiv erledigt.	60,0%	73,33%
		5. Die Verteilung der Aufgaben und Verantwortlichkeiten innerhalb der Abteilung erfolgt so, dass möglichst alle Mitarbeiter*innen stets ähnlich ausgelastet sind.	70,0%	
		6. Die Gruppe relevanter Mitarbeiter*innen bzw. Entscheider zur erfolgreichen Erledigung von Aufgaben – auch in Krisensituationen – ist in dieser Abteilung eindeutig definiert.	90,0%	
Flexibilität	Numerische Redundanz	7. Arbeitsstellen mit identischen Aufgabenbereichen und Fachkenntnissen werden in ausreichender Zahl besetzt, um auch in potentiellen Notsituationen belegt zu sein.	65,0%	54,17%
		8. Es fällt dieser Abteilung leicht, fähiges Personal zu halten bzw. neu zu rekrutieren.	47,5%	
		9. Es gibt für alle Mitarbeiter*innen dieser Abteilung alternative Räumlichkeiten zur Aufrechterhaltung der Arbeitsleistung, falls normale Arbeitsstätten unbenutzbar wären.	50,0%	
	Funktionale Redundanz	10. Dieser Abteilung steht im Falle einer Unterbrechung der Arbeitsfähigkeit genügend externe Hilfe zur Verfügung, um wesentliche Aufgaben weiterhin erledigen zu können.	55,0%	60,00%
		11. Diese Abteilung kann im Krisenfall auf eine ausreichende Anzahl an verfügbaren Entscheider*innen, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Themen, zurückgreifen.	50,0%	
		12. Diese Abteilung ist auf die Auswirkungen, die ein Schockereignis ggf. auf ihre Mitarbeiter*innen haben kann, gut vorbereitet.	75,0%	
	Reaktionskapazität	13. Es gibt Notfallmanagement-Räume, die für praktisch jeden bekannten Schock ausgestattet sind, um bei solchen Ereignissen die Arbeitsleistung aufrechtzuerhalten.	55,0%	51,67%
		14. Die Art und Weise der Entscheidungsfindung ist ebenso effizient wie effektiv und wird vermutlich auch im Krisenfall erfolgreich sein / hat sich in vergangenen Krisen bewährt.	50,0%	
		15. Das Personal dieser Abteilung ist auf Notfälle vorbereitet und darin geschult, das Tagesgeschäft auch während der Bewältigung von Krisensituationen weiterzuführen.	50,0%	
Konnektivität	Modularität	16. Diese Abteilung betreibt, ggf. in Absprache mit anderen Abteilungen, regelmäßige Notfallmanagementübungen, insbesondere im Hinblick auf das Energiesystem.	10,0%	43,33%
		17. Mitarbeiter*innen dieser Abteilung tauschen sich untereinander regelmäßig aus, um verschiedene Sichtweisen in ihre Arbeit und Entscheidungen einfließen zu lassen.	75,0%	
		18. Mitarbeiter*innen dieser Abteilung tauschen sich abteilungsübergreifend regelmäßig aus, um verschied. Sichtweisen in ihre Arbeit und Entscheidungen einfließen zu lassen.	45,0%	
	Essentielle Komponenten	19. Diese Abteilung ist bemüht, die Anliegen und Bedürfnisse ihrer Mitarbeiter zu verstehen und sich auf sie einzulassen, um möglichst erfolgreich zu arbeiten.	80,0%	58,33%
		20. Diese Abteilung hat vollständigen Zugang zu Interessengruppen und Informationen, die für die tägliche Arbeit, aber insb. die Arbeit in Notsituationen relevant sein könnten.	70,0%	
		21. In dieser Abteilung gibt es niemanden, der aufgrund von besonderen Erfahrungen, Kompetenzen oder Freigaben „unersetzlich“ wäre, insbesondere im Krisenfall.	25,0%	
	Durchschnittliche Pfadlänge	22. Diese Abteilung ist ausreichend stark mit relevanten Akteuren in ihrem Umfeld vernetzt (innerhalb und außerhalb der Organisation), um erfolgreich und produktiv zu arbeiten.	70,0%	78,33%
		23. Personal kann in dieser Abteilung bzw. in der gesamten Organisation leicht und effektiv „auf-, und „abwärts“ kommunizieren.	80,0%	
		24. Die Meinungen bzw. Erfahrungen einzelner Mitarbeiter*innen haben Gewicht bei der Entscheidungsfindung, sowohl in der täglichen Arbeit als auch in Krisensituationen.	85,0%	

Tabelle der zu erwartenden Ausfallkosten für Szenario K 1 – „Ausfall der technischen Zentrale“ (entspricht Cluster Konnektivität)

Eine Stunde									
	Tagesüber			Nachts					
	mild	disruptiv	gesamt	mild	disruptiv	gesamt			
Jahreszeit									
Frühling	17.034 €	31.505 €	48.539 €	3.943 €	15.821 €	19.764 €			
Sommer	16.311 €	31.643 €	47.953 €	4.154 €	15.821 €	19.975 €			
Herbst	16.252 €	31.550 €	47.802 €	3.123 €	15.821 €	18.944 €			
Winter	18.176 €	31.571 €	49.747 €	3.212 €	15.821 €	19.033 €			
Jahresmittelwert			48.511 €			19.429 €			
zeitl. normiert						33.970 €			
24 Stunden									
	Wochenends			Wochentags					
	mild	disruptiv	gesamt	mild	disruptiv	gesamt			
Jahreszeit									
Frühling	169.503 €	189.377 €	358.881 €	409.841 €	379.175 €	789.016 €			
Sommer	143.012 €	189.857 €	332.869 €	338.994 €	379.714 €	718.708 €			
Herbst	132.884 €	189.780 €	322.663 €	313.789 €	379.193 €	692.982 €			
Winter	186.564 €	189.669 €	376.233 €	388.596 €	379.538 €	768.135 €			
Jahresmittelwert	0 €	0 €	347.662 €	0 €	0 €	742.210 €			
zeitl. normiert	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	629.482 €			
1 Woche									
				mild	disruptiv	gesamt			
Jahreszeit									
Frühling				963.650 €	929.100 €	1.892.750 €			
Sommer				842.757 €	930.299 €	1.773.056 €			
Herbst				769.835 €	929.571 €	1.699.406 €			
Winter				999.603 €	929.972 €	1.929.575 €			
Jahresmittelwert									
zeitl. normiert						1.823.697 €			
Schockkosten p.a. (entspricht der Summe der zeitlich normierten Jahresmittelwerte)						2.487.148 €			

Berechnung der Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung (Bsp.)

Berechnung der zusätzlichen Kosten einer alternativen Energieerzeugung - mit Berücksichtigung der jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten					
Die Summe setzt sich zusammen aus den jährlichen Kosten für einen					
einstündigen Ausfall (Mittelwert aus Tages- und Nachtsausfall)					
24-Stunden Ausfall (Gewichtung: 5 Wochentage, 2 Wochenendtage)					
einwöchigen Ausfall					
multipliziert mit dem entsprechenden Wert der Faktorisierung, abhängig von					
dem betreffenden Cluster					
der betreffenden Ausfalldauer					
Cluster	Faktor	Ausfalldauer			
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	
	Konnektivität	0,1	0,025	0,005	
	Diversität	0,2	0,05	0,01	
	Flexibilität	1	0,25	0,05	
K1 Ausfall der Technischen Zentrale					
Mittlere Zusatzkosten pro Jahr					-1.898,46 €
Jahreszeit		Ausfalldauer			
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt
	Frühling	-132,71 €	-796,24 €	-1.114,74 €	-2.043,68 €
	Sommer	-112,78 €	-676,67 €	-947,34 €	-1.736,80 €
	Herbst	-109,92 €	-659,50 €	-923,30 €	-1.692,71 €
	Winter	-137,70 €	-826,22 €	-1.156,71 €	-2.120,64 €
D1 Ausfall der Netzstromversorgung am Bezugspunkt					
Mittlere Zusatzkosten pro Jahr					2.847,98 €
Jahreszeit		Ausfalldauer			
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt
	Frühling	179,73 €	1.078,37 €	1.509,72 €	2.767,81 €
	Sommer	202,58 €	1.215,50 €	1.701,70 €	3.119,79 €
	Herbst	181,86 €	1.091,18 €	1.527,65 €	2.800,69 €
	Winter	175,56 €	1.053,36 €	1.474,71 €	2.703,63 €
D2 Ausfall der Gasversorgung am Bezugspunkt					
Mittlere Zusatzkosten pro Jahr					1.700,97 €
Jahreszeit		Ausfalldauer			
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt
	Frühling	81,98 €	491,87 €	688,62 €	1.262,47 €
	Sommer	162,57 €	975,45 €	1.365,63 €	2.503,65 €
	Herbst	127,59 €	765,52 €	1.071,73 €	1.964,84 €
	Winter	69,67 €	418,02 €	585,23 €	1.072,92 €

	D3	Ausfall sowohl der Netzstrom- als auch der Gasversorgung				
		am Bezugspunkt			Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				2.890,21 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	168,82 €	1.012,89 €	1.418,05 €	2.599,76 €	
	Sommer	208,67 €	1.252,02 €	1.752,83 €	3.213,52 €	
	Herbst	214,40 €	1.286,38 €	1.800,93 €	3.301,70 €	
	Winter	158,82 €	952,93 €	1.334,10 €	2.445,85 €	
	F1	Ausfall der Cheng-Cycle Energieerzeugung				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				17.227,33 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	1.141,31 €	6.847,85 €	9.586,99 €	17.576,14 €	
	Sommer	1.076,55 €	6.459,33 €	9.043,06 €	16.578,94 €	
	Herbst	1.125,33 €	6.752,01 €	9.452,81 €	17.330,15 €	
	Winter	1.131,43 €	6.788,60 €	9.504,05 €	17.424,09 €	
	F2	Ausfall des Umspannwerks Garching (identisch mit Ausfall des Netzbezugs D1)				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				14.239,90 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	898,64 €	5.391,84 €	7.548,58 €	13.839,06 €	
	Sommer	1.012,92 €	6.077,51 €	8.508,52 €	15.598,94 €	
	Herbst	909,31 €	5.455,89 €	7.638,24 €	14.003,44 €	
	Winter	877,80 €	5.266,81 €	7.373,53 €	13.518,15 €	
	F3	Ausfall der Energieerzeugung aus Photovoltaik				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				22,28 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	0,99 €	5,95 €	8,33 €	15,27 €	
	Sommer	2,72 €	16,30 €	22,82 €	41,84 €	
	Herbst	1,63 €	9,77 €	13,67 €	25,07 €	
	Winter	0,45 €	2,71 €	3,79 €	6,95 €	
	F4	Ausfall eines Heizkessels				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				-241,93 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	-20,09 €	-120,54 €	-168,75 €	-309,38 €	
	Sommer	-5,67 €	-34,01 €	-47,61 €	-87,28 €	
	Herbst	-10,68 €	-64,09 €	-89,72 €	-164,49 €	
	Winter	-26,40 €	-158,40 €	-221,77 €	-406,57 €	
	F5	Ausfall der Absorptionskältemaschinen				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				-8,81 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	Sommer	-2,29 €	-13,73 €	-19,22 €	-35,24 €	
	Herbst	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	Winter	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	

	F6	Ausfall der Kompressionskältemaschinen				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				339,96 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	6,45 €	38,67 €	54,14 €	99,26 €	
	Sommer	56,69 €	340,13 €	476,18 €	872,99 €	
	Herbst	25,17 €	151,01 €	211,41 €	387,59 €	
	Winter	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	F7	Ausfall einer Haupt-Stromleitung				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				0,00 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	Sommer	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	Herbst	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	Winter	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	
	F8	Ausfall der Gasversorgungsleitung (identisch mit Ausfall der Gasversorgung D2)				
					Mittlere Zusatzkosten pro Jahr	
		Ausfalldauer				8.504,86 €
		1 Stunde	1 Tag	1 Woche	gesamt	
Jahreszeit	Frühling	409,89 €	2.459,37 €	3.443,11 €	6.312,37 €	
	Sommer	812,87 €	4.877,24 €	6.828,14 €	12.518,25 €	
	Herbst	637,94 €	3.827,62 €	5.358,66 €	9.824,22 €	
	Winter	348,35 €	2.090,10 €	2.926,14 €	5.364,59 €	
Summe der mittleren Zusatzkosten für alternative Energieerzeugung pro Jahr über alle 12 potentiellen Schockereignisse in Abhängigkeit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit						45.624,29 €
Im Vergleich zu den errechneten jährlichen Ausfallkosten für entgangene Wertschöpfung in Höhe von						4.616.192,54 €
						entspricht dies
						0,988%
Sie tragen damit keinen entscheidenden Anteil zu den Gesamtkosten für entgangene Wertschöpfung bei.						
Dieser Größenvergleich ermöglicht in dieser Thesis die Annahme, die Kosten für alternative Energieerzeugung in der Gesamtrechnung insofern zu vernachlässigen, als dass sie bereits im ermittelten Schadensmaß enthalten seien.						

Beispielrechnung Szenario D3 - Sommer - 1 Woche				
Ausfall sowohl der Gas- als auch Stromversorgung am Campus Garching im Sommer für 1 Woche				
Faktor zur CO2-Bilanzierung (Umweltbundesamt, 2017, 2019):				
	1 MWh Strom	erzeugt		0,5 t CO2
	1 MWh Gas	erzeugt		0,201 t CO2
	1 MWh Diesel	erzeugt		0,266 t CO2
Die Kosten pro MWh entsprechen den in der linearen Optimierung angenommenen Bezugspreisen				
Strombezug in MWh		Veränderung	Kosten je Einheit	Zusatzkosten
ohne Schockereignis	mit Schockereignis			
2146,32	1064,51	-1081,81 MWh	160,00 €	-173.089,90 €
produzierte CO2-Äquivalente		-540,91 t	25,00 €	-13.522,65 €
Gasbezug in MWh		Veränderung	Kosten je Einheit	Zusatzkosten
ohne Schockereignis	mit Schockereignis			
5144,34	5062,79	-81,55 MWh	30,00 €	-2.446,56 €
produzierte CO2-Äquivalente		-16,39 t	25,00 €	-409,80 €
Dieselbezug in MWh		Veränderung	Kosten je Einheit	Zusatzkosten
ohne Schockereignis	mit Schockereignis			
0,00	2880,00	2880,00 MWh	120,00 €	345.600,00 €
produzierte CO2-Äquivalente		766,08 t	25,00 €	19.152,00 €
Gesamtkosten für alternative Energieerzeugung				175.283,09 €
multipliziert mit der Ausfallwahrscheinlichkeit für				
ein Szenario im Cluster Diversität mit Ausfalldauer von 1 Woche				0,01
jährliche Zusatzkosten für die alternative Energieerzeugung im Schadensfall i.H.v.				1.752,83 €
Vergleich mit den im Status Quo potentiell entstehenden, jährlichen Ausfallkosten:				
(bereits mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert)				
Ausfälle bei				
Strom:	"disruptiv" (Schadensmaß x3)	162,93 MWh		357.270,54 €
	"mild" (Schadensmaß x1)	722,56 MWh		530.309,60 €
Wärme: "mild"		635,78 MWh		466.617,38 €
Kälte: "mild"		0,00 MWh		0,00 €
Kosten für einwöchigen Ausfall der Wertschöpfung im Sommer:				1.354.197,52 €
(entspricht dem 770-fachen der Kosten für alternative Energieerzeugung)				

Szenario D3 - Ausfall sowohl der Netzstrom- als auch Gasversorgung für 1 Woche						
Jahreszeit: Sommer						
Werte laut linearem Optimierungsmodell <i>urbs</i>						
		Elektrizität	Wärme	Kälte	Gas	Diesel
Verbrauch in MWh	Absorptionskältemaschine	0,00	0,53	0,00	0,00	0,00
	Nachfrage	3383,47	1332,03	1521,39	0,00	0,00
	Dieseldgenerator 1	0,00	0,00	0,00	0,00	960,00
	Dieseldgenerator 2	0,00	0,00	0,00	0,00	960,00
	Dieseldgenerator 3	0,00	0,00	0,00	0,00	960,00
	Gas Turbine Cheng Cycle	0,00	0,00	0,00	5014,80	0,00
	Heizkessel 1	0,00	0,00	0,00	47,99	0,00
	Kompressionskältemaschine	378,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Erzeugung in MWh	Absorptionskältemaschine	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00
	Ausfall Hart	162,93	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ausfall Mild	722,56	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ausfall Nicht Relevant Kälte (die ersten 3h nach Ausfall)	0,00	0,00	8,92	0,00	0,00
	Ausfall Nicht Relevant Wärme (die ersten 3h nach	0,00	13,51	0,00	0,00	0,00
	Ausfall Wärme Mild	0,00	635,78	0,00	0,00	0,00
	Cheng Cycle stromg.	499,83	56,95	0,00	0,00	0,00
	Cheng Cycle wärmeg.	301,16	602,32	0,00	0,00	0,00
	Dieseldgenerator 1	335,33	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dieseldgenerator 2	335,33	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dieseldgenerator 3	335,33	0,00	0,00	0,00	0,00
	Heizkessel 1	0,00	23,99	0,00	0,00	0,00
	Kompressionskältemaschine	0,00	0,00	1512,10	0,00	0,00
	PV S 30°	4,49	0,00	0,00	0,00	0,00
	Strombezug	1064,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Vergleichsszenario: Energieversorgung im Sommer ohne Ausfall						
		Elektrizität	Wärme	Kälte	Gas	Diesel
Verbrauch in MWh	Absorptionskältemaschine	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
	Nachfrage	3383,47	1332,03	1521,39	0,00	0,00
	Gas Turbine Cheng Cycle	0,00	0,00	0,00	5040,00	0,00
	Heizkessel 1	0,00	0,00	0,00	104,34	0,00
	Kompressionskältemaschine	380,34	0,00	0,00	0,00	0,00
Erzeugung in MWh	Absorptionskältemaschine	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
	Cheng Cycle stromg.	1031,82	117,57	0,00	0,00	0,00
	Cheng Cycle wärmeg.	581,17	1162,34	0,00	0,00	0,00
	Heizkessel 1	0,00	52,17	0,00	0,00	0,00
	Kompressionskältemaschine	0,00	0,00	1521,35	0,00	0,00
	PV S 30°	4,49	0,00	0,00	0,00	0,00
	Strombezug	2146,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Komponenten, die im Szenario ohne Ausfall nicht aufgeführt sind, werden nicht eingesetzt und tragen entsprechend nicht zur Energieerzeugung oder zu deren Verbrauch bei.						

Input-Parameter des Energiesystems Campus Garching für die lineare Optimierung in *urbs*

Process	inst-cap	lifetime	inv-cost	fix-cost	var-cost	startup-co	wacc	depreciation
PV S 30°	0,08	10	1.000.000	5.000	0,0	0	0,05	20
PV2 S 30°	0,00	10	900.000	5.000	0,0	0	0,05	20
PV WE 10°	0	0	900.000	5.000	0,0	0	0,05	20
Gas Turbine Cheng Cycle	15	10	0	20.000	-6,5	5.000	0,05	25
Cheng Cycle wärmeg.	15	10	0	0	5,0	0	0,05	25
Cheng Cycle stromg.	15	10	0	0	9,0	0	0,05	25
Gas Engine CHP	0	0	350.000	30.000	20,0	0	0,05	15
Heizkessel 1	15	10	0	30.000	8,0	0	0,05	30
Heizkessel 2	15	10	0	30.000	8,0	0	0,05	30
Heizkessel 3 off-site	0	0	2.000.000	30.000	8,0	0	0,05	30
Strombezug	0	0	0	5.000	150,0	0	0,05	50
Import Geothermal Heat	0	0	1.500.000	1.000	36,0	0	0,05	30
Absorptionskältemaschine	6	10	300.000	0	2,0	0	0,05	25
Kompressionskältemaschine	4	10	1.500.000	0	24,0	0	0,05	25
Heat Changer	100	40	0	0	0,0	0	0,05	40
Heat Pump	0	0	400.000	30.000	4,0	0	0,05	25
Ausfall Wärme Mild	0	0	0	0	33.333	0	0,05	50
Ausfall Kälte Mild	0	0	0	0	33.333	0	0,05	50
Ausfall Mild	10	0	0	0	33.333	0	0,05	50
Ausfall Hart	5,03	0	0	0	100.000	0	0,05	50
Diesलगенератор 1	2	0	0	5.000	200,0	0	0,05	50
Diesलगенератор 2	2	0	0	5.000	200,0	0	0,05	50
Diesलगенератор 3	2	0	0	5.000	200,0	0	0,05	50
Diesलगенератор off-site	0	0	600.000	5.000	1000,0	0	0,05	20
Ausfall Nicht Relevant Wärme	0	0	0	0	0	0	0,05	50
Ausfall Nicht Relevant Kälte	0	0	0	0	0	0	0,05	50
	MW	a	€/MW	€/MW/a	€/MWh	€		a

Anmerkungen

- *Inst. Cap* zeigt die installierten Kapazitäten für einzelnen Systemkomponenten
- *Lifetime* zeigt, wie lange einzelne Komponenten bereits realisiert sind (vgl. *depreciation*)
- Weitere Annahmen: *öffentl. Strommix* kostet 150 €/MWh, *Gasbezug*: 30 €/MWh, *Diesel*: 120 €/MWh, *CO₂-Zertifikate*: 25 €/t (Stand: 19. Juni 2019), Weighted Average Cost of Capital (WACC) = 5 %
- Die Schlupfvariablen zur Feststellung ausgefallener Energie lauten „*Ausfall ...*“, wobei entsprechend der Annahmen in Kapitel 4.3.3 die Kosten unterschieden werden
- die dargestellten Annahmen zu Investitions-, Fix und variablen Kosten wurden basierend auf folgenden Quellen getroffen: (U.S. Department of Energy, 2009), (ASUE, 2011), (Deloitte Financial Advisory S.r.l., 2017), (Deutscher Bundestag, 2019), (E.ON SE, 2019), (Fraunhofer ISE, 2018), (Icha, 2019), (KPMG, 2018), (KPMG, 2017), (Schuberth & Kaschenz, 2008), (Umweltbundesamt, 2016), (Umweltbundesamt, 2017), (Juhrich, 2016), (Kemmler, et al., 2016), (BDEW, 2018), (Europäische Kommission, 2018)

Investitionsrechnungen des technisch optimierten Energiesystems

Investitionskostenrechnungen für neu zu installierende Energieanlagen im resilienzoptimiertem Ansatz										
WACC	0,05									
Zu installierende Spitzenleist. im optimierten System in MW	Gasmotor 8,00	Heizkessel 3 off-site PV2 S 30° 2,37		PV WE 10° 0,92	1,00	Dieselpgen 1,87	Import Geotherm 4,08	Wärmepumpe 0,82	Batterie P 4,80	Batterie C (MWh) 5,88
Investitionskosten [Euro/MW]	350.000 €	2.000.000 €	900.000 €	900.000 €	600.000 €	1.500.000 €	400.000 €	100.000 €	900.000 €	
Fixkosten[Euro/MW/Jahr]	30.000 €	30.000 €	5.000 €	5.000 €	5.000 €	1.000 €	30.000 €	0 €	5.000 €	
Neue Investitionskosten pro Jahr	140.000 €	236.542 €	41.400 €	44.949 €	56.014 €	305.910 €	16.315 €	24.025 €	264.389 €	
Neue Fixkosten	240.000 €	70.963 €	4.600 €	4.994 €	9.336 €	4.079 €	24.473 €	0 €	29.377 €	
Total Neue Investition pro Jahr	1.129.544 €									
Total Neue Fixkosten	387.821 €									
Total	1.517.364 €									
		Status Quo	Optimiertes System							
germittelte Kosten über die Jahreszeiten	Invest 0 €	1.274.873 €	1.129.544 €	1.566.732 €						
	Fixed	8.515.783 €	4.865.544 €							
	Variable	5.223.742 €	6.272.481 €							
	Fuel	9.288.337 €	3.513.211 €							
	Purchase	1.553.590 €	1.395.748 €							
	Environmental	4.616.193 €	3.155.830 €							
	Ausfallkosten									
	SUMME	30.472.516 €	21.899.090 €							

Literaturverzeichnis

- acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.). (2017). *Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung*. München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.). (2017). *Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems*. München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- AEE. (08. Oktober 2018). *Agentur für Erneuerbare Energien*. Von Pressemitteilung der Agentur für Erneuerbare Energien: <https://www.unendlich-viel-energie.de/klares-bekenntnis-der-deutschen-bevoelkerung-zu-erneuerbaren-energien> abgerufen
- Agora Energiewende, & Energynautics. (2018). *Toolbox für die Stromnetze – Für die künftige Integration von Erneuerbaren Energien und für das Engpassmanagement*. Berlin: Agora Energiewende.
- ASUE. (2011). *BHKW-Kenndaten 2011*. Essen: energiedruck - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch.
- Baban, C. P. (2014). *Gesellschaftliche Resilienz - Grundlagen für die zivile Sicherheit*. Potsdam: Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH.
- Baker Tilly. (November 2013). *bakertilly.de*. Von <https://www.bakertilly.de/aktuelles/presse/detailansicht/studie-deutsche-industrie-mit-viel-leerlauf/> abgerufen
- Bara, C., & Brönnimann, G. (2011). *Risk Analysis: Resilience – Trends in Policy and Research*. Zürich: Center for Security Studies (CSS).
- Bartl, G., Gerhold, L., & Schiller, J. (2014). Resilienz - Nationale Perspektiven. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 19 - 52). Freiburg: utz Verlag.
- BDEW. (2018). *BDEW-Strompreisanalyse Mai 2018*. (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft eV, Herausgeber) Abgerufen am 21. August 2019 von Haushalte und Industrie: https://www.bdew.de/media/documents/1805018_BDEW-Strompreisanalyse-Mai-2018.pdf
- BDI & PwC. (2011). *Risikomanagement 2.0 - Ergebnisse und Empfehlungen aus einer Befragung in mittelständischen deutschen Unternehmen*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- Beck, U. (Februar 1992). From Industrial Society to the Risk Society: Questions of Survival, Social Structure and Ecological Enlightenment. *Theory, Culture & Society*, S. 97 - 123.
- Beck, U. (2008). *Weltrisikogesellschaft - Auf der Suche nach der verlorenen Sicherheit*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Berg, M., Erdmann, G., Leist, A., Renn, O., Schaber, P., Scheringer, M., . . . Wiedenmann, R. (1995). *Risikobewertung im Energiebereich*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). *Navigating Social-Ecological Systems. Building resilience for Complexity and Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bie, Z., Lin, Y., & Li, G. L. (Juli 2017). Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience. *Proceedings of the IEEE*, 7, S. 1253 - 1266.
- Binder, C., Mühlemeier, S., & Wyss, R. (2017). An Indicator-Based Approach for Analyzing the Resilience of Transitions for Energy Regions. Part I. *Energies*, 10(1), S. 36.
- BMBF. (2015). *Sozial-Ökologische Forschung - Förderkonzept für eine gesellschaftsbezogene Nachhaltigkeitsforschung 2015-2020*. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- BMBF. (2018). *Forschung für die zivile Sicherheit 2018 - 2025*. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung. Von Bundesministerium für Bildung und Forschung: https://www.sifo.de/files/Projektumriss_KUBAS.pdf abgerufen
- BMI. (2009). *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)*. Berlin: Bundesministerium des Innern.
- BMWi. (2018). *7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bonanno, G. A. (Februar 2004). Loss, Trauma, and Human Resilience: Have We Underestimated the Human Capacity to Thrive After Extremely Aversive Events? *American Psychologist*, 59, S. 20-28.
- Brand, F., & Jax, K. (2007). Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecology and Society*, 1(23). Von <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art23/> abgerufen
- Brand, F., Hoheisel, D., & Kirchhoff, T. (2011). Der Resilienz-Ansatz auf dem Prüfstand: Herausforderungen, Probleme, Perspektiven. In B. A. (ANL), *Landschaftsökologie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen* (S. 78 - 83). Freising: Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege.
- Brand, U., & von Gleich, A. (2015). Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience—Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. *Energies*, 8(7), S. 6995–7019.
- Brandt, D., Tschiersch, I., & Henning, K. (2000). The Design of Human-Centered Manufacturing Systems. In C. (. Leondes, *The Design of Manufacturing Systems* (S. 5-1 ff.). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Briguglio, L., Cordina, G., Farrugia, N., & Vella, S. (14. September 2009). Economic Vulnerability and Resilience: Concepts and Measurements. *Oxford Development Papers*, S. 229-247.
- BSI. (2008). *BSI-Standard 100-4 - Notfallmanagement*. Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.
- BSI. (2018). *BSI Projekt - "Institutionalisierung des gesellschaftlichen Dialogs"*. Abgerufen am 30. August 2019 von Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Projekt_IdgD/Projektbeschreibung_IdgD.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- Bundesnetzagentur. (2018). *Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom*. (Bundesnetzagentur, Produzent) Abgerufen am 21. 8 2018 von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/Versorgungsunterbrech_Strom_node.html
- Bundesnetzagentur. (03. März 2019). *bundesnetzagentur.de*. Von Kraftwerksliste: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2019_1.xlsx?__blob=publicationFile&v=2 abgerufen
- Bürkner, H.-J. (2010). *Vulnerabilität und Resilienz - Forschungsstand und sozialwissenschaftliche Untersuchungsperspektiven*. Erkner: Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung.
- Buth, M., Greiving, S., & Zebisch, M. (2015). *Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Cabinet Office UK. (2019). *Public Summary of Sector Security and Resilience Plans*. London: Cabinet Office of the Government of the United Kingdom.
- Chand, S. (2006). *Pacific Islands Regional Integration and Governance*. Canberra: ANU Press.
- Chanda, S., & Srivastava, A. K. (November 2016). Defining and Enabling Resiliency of Electric Distribution Systems With Multiple Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6, S. 2859 - 2868.
- Clarke, J., Coaffee, J., Rowlands, R., Finger, J., Hasenstein, S., & Siebold, U. (2015). *Resilience Evaluation and SOTA Summary Report*. Brüssel: RESILENS.
- Coaffee, J. (2013). Rescaling and Responsibilising the Politics of Urban Resilience. *Politics*, 33(4), S. 240–252.
- Cutter, S., Ahearn, J., Amadai, B., Crawford, P., Eide, E., Galloway, G., . . . Zoback, M.-L. (2013). Disaster Resilience: A National Imperative. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2, S. 25 - 29.
- Daus, L., Kesting, B., & Kukuk, T. (2014). Resiliente Unternehmen. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 97 - 114). Freiburg: utz Verlag.
- Deloitte Financial Advisory S.r.l. (2017). *Overview of business valuation parameters in the energy industry*. Mailand: Deloitte Financial Advisory S.r.l. - Valuation Services.
- Deutscher Bundestag. (1998). *Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“*. Bonn: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbG.
- Deutscher Bundestag. (2019). *Großspeicherkosten: Einzelfragen zur Lithium-Ionen-Batterietechnologie (Sachbestand)*. Berlin: Wissenschaftliche Dienste im Deutschen Bundestag.
- Di Bella, J. (2014). *Unternehmerische Resilienz - Protektive Faktoren für unternehmerischen Erfolg in risikoreichen Kontexten (PhD Thesis)*. Mannheim: Universität Mannheim.

- Digital-Gipfel. (2018). *DIV-Report 2018: Status und Fortschritt der Intelligenten Vernetzung in Deutschland*. Berlin: Digital-Gipfel, Plattform Innovative Digitalisierung der Wirtschaft, Fokusgruppe Intelligente Vernetzung.
- Dorfner, J. F. (2016). *Open Source Modelling and Optimisation of Energy Infrastructure at Urban Scale*. München: Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.
- E.ON SE. (2019). Facts & Figures 2019 (Jahresbericht). Essen. Von <https://www.eon.com/content/dam/eon/eon-com/investors/annual-report/Facts%20and%20Figures%202019.pdf> abgerufen
- Edwards, C. (2009). *Resilient nation*. London: Demos.
- ENS. (2018). 3D-Modell des TUM Campus Garching. Garching.
- Europäische Kommission (Hrsg.). (2018). *Energiestatistik, Preise Elektrizität für Nichthaushaltskunden*. (EUROSTAT, Produzent) Abgerufen am 24. 8 2018 von [ab 2007 - halbjährliche Daten \(Code: nrg_205\): https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database](https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database)
- Europäische Kommission. (2018). *Joint Report to the European Parliament, the European Council and the Council on the implementation of the Joint Framework on countering hybrid threats from July 2017 to June 2018*. Brüssel.
- Ferreira, P., & Simoes, A. (2015). *RESOLUTE D2.1 - State of the Art Review and Assessment Report*. Florenz: DISIT Lab.
- Fichter, K., von Gleich, A., Pfriem, R., & Siebenhüner, B. (2010). *Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien*. Delmenhorst: Projektkonsortium 'nordwest2050'.
- Florida Division of Emergency Management. (2017). *Loss Avoidance Assessment - Hurricane Matthew (DR-4283)*. Tallahassee: Florida Division of Emergency Management – Bureau of Mitigation.
- Florin, M.-V., & Linkov, I. (2016). *IRGC Resource Guide on Resilience*. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC).
- Fraunhofer ISE. (2018). *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Geels, F. (Mai 2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, S. 897 - 920.
- Gößling-Reisemann, S. (2016). Resilience - Preparing Energy Systems for the Unexpected. In M.-V. Florin, & I. Linkov, *IRGC Resource Guide on Resilience* (S. 73-80). Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC).
- Gößling-Reisemann, S., & Thier, P. (Januar 2019). On the difference between risk management and resilience management for critical infrastructures. *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*, S. 117-135.
- Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S., Wachsmuth, J., & von Gleich, A. (2014). *Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen*. (S. e. Gößling-Reisemann, Hrsg.) Marburg: Metropolis-Verlag.

- Hatton, T., Brown, C., Kipp, R., Seville, E., Brouggy, P., & Loveday, M. (März 2018). Developing a model and instrument to measure the resilience of critical infrastructure sector organisations. *International Journal of Critical Infrastructures*, S. 59 - 79.
- Heller, J., Huemer, B., Preissegger, I., Drath, K., Zehetner, F., & Amann, E. G. (2019). Messung Organisationaler Resilienz: Zentrale Elemente, Schutz- und Risikofaktoren. In J. (. Heller, *Resilienz für die VUCA-Welt* (S. 133 - 139). Stein: Springer Verlag.
- Henning, H.-M., & Palzer, A. (2013). *ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050*. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Henschel, T. (2010). *Erfolgreiches Risikomanagement im Mittelstand*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Henzelmann, T., & Büchele, R. (2009). *Der Beitrag des Maschinen- und Anlagenbaus zur Energieeffizienz*. Frankfurt am Main: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau.
- Hidalgo Rodríguez, D., Hofmann, S., Adelt, F., Myrzik, J., & Weyer, J. (2017). A Socio-Technical Simulation Framework for Collaborative Management in Power Distribution Grids . *International ETG Congress 2017* (S. 623 - 628). Bonn: VDE Verlag GmbH.
- Hill, E. W., Wial, H., & Wolman, H. (June 2008). Exploring Regional Economic Resilience. *Urban Affairs Association*. Baltimore, Maryland: University of California Berkeley: Institute of Urban and Regional Development.
- Hinrichs, S. (2009). *Betriebs- und Dienstvereinbarungen: Mitarbeiterbefragungen*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.
- Hirschl B. et al. (2018). Vulnerabilität und Resilienz des digitalen Stromsystems.
- Holling, C. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, S. 1–23.
- Holling, C. (1986). The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change. *Sustainable development of the biosphere*(14), S. 292–317.
- Holling, C. (1996). Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In P. C. Schulze, *Engineering Within Ecological Constraints* (S. 31-43). Washington D.C.: National Academy Press.
- Holling, C. (2001). Understanding the Complexity of Economic, Ecological and Social Systems. (Springer-Verlag, Hrsg.) *Ecosystems*, S. 390-405.
- Hollnagel, E. (2009). *Safer Complex Industrial Environments*. Boca Raton: CRC Press.
- Hollnagel, E. (2014). Resilience engineering and the built environment. *Building Research & Information*, 42(2), S. 221-228.
- Icha, P. (2019). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Juhrich, K. (2016). *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Kay, R., & Goldspink, C. (2012). *CEO Perspectives on Organisational Resilience*. Barton: Commonwealth of Australia.

- Kellert, S. R. (1996). *The value of life: biological diversity and human society*. Washington, D.C.: Island Press [for] Shearwater Books.
- Kemmler, A., Straßburg, S., Seefeldt, F., Anders, N., Rohde, C., Fleiter, T., . . . Geiger, B. (2016). *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Klemm, M. (2008). Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen - Verfügbarkeit und Lebensdauer. (7). Dresden. Abgerufen am 20. August 2019 von https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/ressourcen/dateien/kwt/lehre/stubi/BetriebIns_t7.pdf?lang=de
- Köhler, I., & Schulze, B. W. (2016). Resilienz - Unternehmenshistorische Dimensionen der Krisenrobustheit am Beispiel deutscher Brauereien in den 1970er Jahren. *Jahrbuch für Wirtschaftsgeschichte / Economic History Yearbook*, 57(2), S. 455-491.
- KPMG. (2017). *Kapitalkostenstudie 2017*. Hamburg: KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- KPMG. (2018). *Cost of Capital Study 2018*. Hamburg: KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- Krotter, S., & Schüler, A. (September 2013). Empirische Ermittlung von Eigen-, Fremd- und Gesamtkapitalkosten: eine Untersuchung deutscher börsennotierter Aktiengesellschaften. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, S. 390 - 433.
- Kube, M., Schimmel, M., Rhiemeier, J.-M., Barckhausen, A., Fehr, J., Büttner, S., . . . Piégsa, A. (2017). *Marktv verfügbare Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Lantermann, E. (Mai 2009). *Skalen und Skalenniveau - Vorlesung an der Universität Kassel*. Von <http://www.uni-kassel.de/fb4/psychologie/personal/lantermann/messen/einleitung1.pdf> abgerufen
- Lee, A., Vargo, J., & Seville, E. (Februar 2013). Developing a Tool to Measure and Compare Organizations' Resilience. *Natural Hazards Review*, S. 29 - 41.
- Leyh, C., & Bley, K. (2015). *Digitalisierung: Chance oder Risiko für den deutschen Mittelstand? – Eine Studie ausgewählter Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., . . . Thiel-Clemen, T. (2014). Changing the resilience paradigm. *nature climate change*(4), 407 - 409.
- Longstaff, P. H., Armstrong, N. J., Perrin, K., Parker, W. M., & Hidek, M. A. (September 2010). Building Resilient Communities: A Preliminary Framework for Assessment. (N. C. Security, Hrsg.) *HOMELAND SECURITY AFFAIRS*, S. Article No. 6.
- Lovins, A. B., & Lovins, L. H. (1982). *Brittle power*. Andover, Mass.: Brick House Pub. Co.
- Mallet, R. (1856). *On the physical conditions involved in the construction of artillery: with an investigation of the relative and absolute values of the materials principally*

- employed, and of some hitherto unexplained causes of the destruction of cannon in service.* London: Longman, Brown, Green, Longmans and Roberts.
- Mayunga, J. (Juli 2007). *Understanding and Applying the Concept of Community Disaster Resilience: A capital-based approach (working paper).* München: Summer Academy For Social Vulnerability And Resilience Building.
- McAslan, A. (2010). *The Concept of Resilience. Understanding its Origins, Meaning and Utility.* Adelaide, Australia: The Torrens Resilience Institute.
- McManus, S. (2008). *Organisational Resilience in New Zealand.* University of Canterbury. Christchurch: Canterbury University Press.
- McManus, S., Seville, E., Brunsdon, D., & Vargo, J. (2007). *Resilience Management - A Framework for Assessing and Improving the Resilience of Organisations.* Christchurch: Resilient Organisations Ltd.
- Mendonça, D., & Wallace, W. A. (2015). Factors underlying organizational resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 141, S. 83–91.
- MTRS, FAC, TCD, UoW. (2015). *Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods and Measures for Resilience Assessment.* Brüssel: RESILENS.
- Müller, M. (25. Juni 2019). Experteneinschätzung zur Resilienz am Campus Garching. (E. Sauer, Interviewer) Garching b. München.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM - Total Productive Maintenance.* Cambridge: Productivity Press.
- National Research Council. (2012). *Disaster Resilience: A National Imperative .* Washington D.C.: The National Academies Press.
- Nationaler IT-Gipfel. (2015). *Stakeholder Peer Review – Deutschland intelligent vernetzt: Status- und Fortschrittsbericht 2015.* Berlin: Digitalgipfel, Plattform Innovative Digitalisierung der Wirtschaft, Fokusgruppe Intelligente Vernetzung.
- NATO. (Juli 2016). *gemeinsame Pressemitteilung der NATO und der Europäischen Kommission.* Abgerufen am 11. September 2019 von North Atlantic Treaty Organization: https://www.nato.int/cps/ic/natohq/official_texts_133163.htm
- Orencio, P. M., & Fujii, M. (März 2013). A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, S. 62 - 75.
- Pant, R., Barker, K., & Zobel, C. W. (September 2013). Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors. *Reliability Engineering and System Safety*, S. 92 - 102.
- Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziaargyriou, N. D. (Juli 2017). Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies. *Proceedings of the IEEE*, S. 1202 - 1213.
- Perrett, R. W. (Juli 1992). Valuing Lives. *Bioethics*, 3, S. 185-200.
- Pflüger, F. (2013). Resilienz - Schlüsselwort der Energiesicherheit. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 63(11), S. 30-33.
- Pflüger, F. (2014). Resilience - Der Schlüssel zur Energiesicherheit. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 115 - 120). Freiburg: utz Verlag.

- Rammstedt, B. (2004). *Zur Bestimmung der Güte von Multi-Item-Skalen: Eine Einführung*. Mannheim: Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen.
- Rat der Europäischen Union. (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*. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union.
- Reitsam, N., Sauer, E., & Kuhn, P. (November 2019). Auswirkungen der aktuellen deutschen Energiepolitik auf die unternehmerische Bewertung der Energiesicherheit. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, S. Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht.
- Renn, O. (Juni 2008). Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 2, S. 50 - 66.
- Roege, P. E., Collier, Z. A., Mancillas, J., McDonagh, J. A., & Linkov, I. (September 2014). Metrics for energy resilience. *Energy Policy*, S. 249-256.
- Rolfe, M. (2019). *Positive Psychologie und Organisationale Resilienz*. Berlin: Springer Verlag.
- Rose, A. (2016). Measuring Economic Resilience to Disasters: An Overview. In M.-V. Florin, & I. Linkov, *IRGC Resource Guide on Resilience* (S. 197 - 203). Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC).
- Ross, F. (19. Juli 2019). Experteneinschätzung zur Resilienz am Campus Garching. (E. Sauer, Interviewer) Garching b. München.
- Sarikaya, Ü. (18. Juli 2019). Experteneinschätzung zur Resilienz am Campus Garching. (E. Sauer, Interviewer) Garching b. München.
- Scharte, B., & Thoma, K. (2016). Resilienz - Ingenieurwissenschaftliche Perspektive. In R. Wink (Hrsg.), *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Scharte, B., Hiller, D., Leismann, T., & Thoma, K. (2014). Einleitung. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 9 - 18). Freiburg: utz Verlag.
- Scharte, B., Hiller, D., Leismann, T., & Thoma, K. (2014). Fazit. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 121 - 130). Freiburg: utz Verlag.
- Scharte, B., Hiller, D., Leismann, T., & Thoma, K. (2014). Resilienz - Internationale Perspektiven. In Thoma, Klaus (Hrsg.), *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen* (S. 53 - 96). Freiburg: utz Verlag.
- Scheer, D., Gold, S., Benighaus, C., Benighaus, L., & Renn, O. (2010). *Kommunikation von Risiko und Gefährdungspotenzial aus Sicht verschiedener Stakeholder*. Berlin: Bundesinstitut für Risikobewertung.
- Schönleber, K. (14. März 2019). Experteneinschätzung zur Resilienz am Campus Garching. (E. Sauer, Interviewer) Garching b. München.

- Schubert, T., & Kroll, H. (2013). *Endbericht zum Projekt "Hochschulen als regionaler Wirtschaftsfaktor"*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Schuberth, J., & Kaschenz, H. (2008). *Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie?* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Statistisches Bundesamt. (2014). *Bildung und Kultur - Personal an Hochschulen*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stephenson, A. (2010). *Benchmarking the Resilience of Organisations*. University of Canterbury. Christchurch: Canterbury University Press.
- Technische Universität München. (2014). *TUM in Zahlen 2013*. München: Hochschulreferat 1 - Controlling, Organisation, Planung / TUM.
- Technische Universität München. (2018). *TUM in Zahlen 2017*. München: Hochschulreferat 1 - Controlling, Organisation, Planung / TUM.
- Technische Universität München. (2019). *Daten & Fakten 2018/19*. München: Corporate Communications Center / TUM.
- Thoma, K. (2014). *Resilien-Tech: „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen*. Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik. Freiburg: utz Verlag.
- Tredgold, T. (März 1818). On the transverse strength and resilience of timber. (T. & Francis, Hrsg.) *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 51(239), S. 214-216.
- U.S. Department of Energy. (2009). *2009 Smart Grid System Report*. Washington D.C.: U.S. Department of Energy.
- Umweltbundesamt. (2016). *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt. (2017). *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- VGB. (2015). *Analyse der Nichtverfügbarkeit von Wärmekraftwerken 2004-2013*. Essen: VGB PowerTech e.V.
- VGB. (2016). *Technische und kommerzielle Kennzahlen für Kraftwerksanlagen*. Essen: VGB PowerTech e.V.
- Vollmer, M., Walther, G., Jovanovic, A., Schmid, N., Oien, K., Grotan, T. O., . . . Egloff, R. (2016). *Initial Framework for Resilience Assessment*. Euskirchen: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- von Freyberg, T. (2011). Resilienz - mehr als ein problematisches Modewort? In M. Zander, & M. (. Roemer, *Handbuch Resilienzförderung* (S. 219 - 239). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien.
- Vorne Industries, Inc. (August 2019). *oeo.com*. Abgerufen am 20. August 2019 von <https://www.oeo.com/world-class-oeo.html>
- Vugrin, E. (2016). Critical Infrastructure Resilience. In M.-V. Florin, & I. Linkov, *IRGC Resource Guide on Resilience* (S. 236 - 239). Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC).

- Vugrin, E., Warren, D., Ehlen, M., & Camphouse, C. (2010). A framework for assessing resilience of infrastructure and economic systems. In K. Gopalakrishnan, & S. Peeta, *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems* (S. 77-116). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Walker, B., & Salt, D. (2006). *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Washington DC: Island Press.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S., & Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social– ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2).
- Walker, J., & Cooper, M. (Mai 2011). Genealogies of resilience: From systems ecology to the political economy of crisis adaptation. *Security Dialogue*, S. 143-166.
- Welter-Enderlin, R., & Hildenbrand, B. (Hrsg.). (2006). *Resilienz - Gedeihen trotz widriger Umstände* (5. Auflage, 2016 Ausg.). Heidelberg: Carl-Auer-Systeme-Verlag.
- Werner, E. E., & Smith, R. S. (1982). *Vulnerable but invincible: A Longitudinal Study of Resilient Children and Youth*. New York: McGraw-Hill.
- Werner, E. E., & Smith, R. S. (1992). *Overcoming the odds* (5. paperback print Ausg.). Ithaca, NY: Cornell Univ. Press.
- Wink, R. (2011). Evolution regionaler Resilienz: theoretischer Rahmen und Messkonzepte. In C. Dreger, *Empirische Regionalforschung heute* (1. Aufl. Ausg., S. 111–124). Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH .
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future* (13. impr Ausg.). Oxford, New York: Oxford University Press.
- Young, T. (1807). *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. London: Joseph Johnson, St. Pauls Church Yard.
- Zhang, H., Yuan, H., Li, G., & Lin, Y. (June 2018). Quantitative Resilience Assessment under a Tri-Stage Framework for Power Systems. *energies*.