



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

---

## **Aktives kybernetisches Energiemanagementsystem für die stationäre Energiespeicherung**

Andreas Wilhelm Ebentheuer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Die Dissertation wurde am 24.09.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 30.09.2021 angenommen.



# Danksagung

Diese Dissertation ist im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes EEBatt gestartet. In diesem Projekt erforschten 13 Lehrstühle und Fachgebiete der TUM unter der Leitung des Lehrstuhls für Elektrische Energiespeichertechnik von Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen und des Lehrstuhls für Technische Elektrochemie von Herrn Prof. Dr. Hubert A. Gasteiger dezentrale stationäre Energiespeicher zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energien und Unterstützung der Netzstabilität. Als Partner waren das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) und die VARTA Storage GmbH beteiligt. Zusammen mit der KWH Netz GmbH, einem regionalen Stromnetzbetreiber in Haag in Oberbayern, wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes evaluiert und im Feld umgesetzt. Hierbei möchte ich mich bei den beiden Initiatoren und Herrn Stefan Mair, stellvertretend für die VARTA Storage GmbH, für viele fachliche Diskussionen, bedanken.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog für die ausgezeichnete Betreuung meiner Arbeit. Das mir entgegengebrachte große Vertrauen, die Rückendeckung bei allen Ideen sowie die Kombination aus enger wissenschaftlicher Betreuung, gleichzeitig großen Gestaltungsfreiräumen in Forschung und Lehre und das Verständnis für die Vereinbarkeit von Beruf und Familie, haben mich immer sehr motiviert und beflügelt.

Daneben möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen für die Übernahme des Zweitgutachtens und die interessanten Diskussionen während der EEBatt-Projektlaufzeit bedanken.

Ganz besonders danke ich auch Joachim Fröschl, Julian Taube, Laurenz Tippe und Markus Herzog für die unzähligen fachlichen und methodischen Energiemanagement-Diskussionen. Ihre Anregungen waren essenziell und eine große Bereicherung dieser Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei meinen damaligen Kollegen am Fachgebiet Energiewandlungstechnik, Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik und Professur für elektrische Energieversorgungsnetze für ihre Unterstützung und die schöne Zeit, die wir miteinander hatten, bedanken. Ein besonderer Dank gilt: Alexander Zeh, Christoph Weißinger, Jonas Keil, Jörg Kammermann, Lorenz Viernstein, Michael Winter, Nam Truong, Stefan Lobmeyer, Taha Lahlou, Wolfgang Meyer und Sabine Prucker.

Stellvertretend für die 26 an diesem Forschungsprojekt beteiligten Studierenden möchte ich Max Fischer und Simon Niederle meinen besonderen Dank aussprechen. Ihr aller Engagement, Kreativität und die Bereitschaft, sich in die Kybernetik einzuarbeiten und zunächst verquer erscheinenden Gedanken zu folgen, waren unverzichtbare Säulen dieser Arbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern für die große Unterstützung, die sie mir in all den Jahren meiner Ausbildungsweg zuteil werden ließen. Und bei meiner Frau Isabell und meinen Töchtern Amelie und Elisa für ihre Geduld und Unterstützung – in der Schreibphase, der Vorbereitung auf das Rigorosum – und ihrer Liebe – die mir alles bedeutet.

*Andreas Wilhelm Ebentheuer*



# Zusammenfassung

In den Jahren 2015–2020 ist die Öffentlichkeit in Deutschland geprägt von den Diskussionen und Protesten rund um die Klima- und Energiepolitik. Teile der Bevölkerung und die Politik fordern die Reduzierung schädlicher Klimagase, den Ausstieg aus fossilen Energieträgern sowie der Atomenergie und die Nutzung regenerativer Ressourcen, wie Solar- und Windenergie. Die mit diesen Forderungen verbundenen Folgen und Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung, -verteilung und -speicherung sowie die damit nötigen Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen werden oft von Kritikern vergessen, müssen aber Beachtung finden. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende muss das gewachsene Energieversorgungsnetz, die Kraftwerks- und Netzstruktur sowie die verwendeten Methoden der Steuerung und Regelung im gleichen Maße angepasst und flexibilisiert werden. Die schwankende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien muss mit Speichern, als Flexibilitätsoption zur zeitlichen Entkopplung zwischen Erzeugung und Verbrauch, gepuffert werden. Hierzu sind für einen effizienten und geregelten Betrieb neuartige Managementsysteme notwendig.

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Entwicklung eines derartigen Energiemanagementsystems für die stationäre Energiespeicherung. Hierfür werden die Grundlagen von Managementsystemen in verschiedenen Disziplinen betrachtet. Schlussfolgerungen daraus sind, der in heutigen Systemen vorhandenen Komplexität mit validierten und erprobten Methoden zu begegnen. Hierzu wird die Wissenschaft der Kybernetik ausgewählt, entsprechend beschrieben und das Viable System Model von STAFFORD BEER zum Aufbau und zur Strukturierung des Energiemanagementsystems verwendet. Für die Portierung des Modells aus dem unternehmerischen Management in die Technik wird eine Analyse der Teilsysteme des Viable System Models durchgeführt. Einerseits durch die Erörterung der Physiologie, die den theoretischen Ursprung des Modells darstellt und zum anderen durch die Erklärung der grundlegenden kybernetischen Prinzipien und Eigenschaften, wie Autonomie, Homöostase, Lebensfähigkeit, Rekursivität und weitere. Die Kombination der theoretischen Betrachtung und der Einführung in die relevanten Themen der Energieversorgung, -verteilung, -speicherung und rechtlicher Rahmenbedingungen erlaubt den Aufbau eines aktiven und kybernetischen Energiemanagementsystems. Dieses garantiert eine effiziente Koordination der Energieflüsse im elektrischen System. Vorgeschlagene und ausgearbeitete Betriebsstrategien und Managementalgorithmen werden mittels Simulationen validiert. Der durchschnittliche Wirkungsgrad der vorgestellten Verteil-Algorithmien im Speicher-Container liegt beispielsweise im Bereich von 90 % bis 95 %. Ergänzend wird die Umweltkopplung des Managementsystems betrachtet. Das heißt, durch die Einführung vier definierter Rekursionsebenen wird die Komplexität des Systems beherrschbar und beobachtbar. Dies erlaubt eine aktive Regelung der Energieflüsse durch die Einbindung der Informationen der Teilnehmer am Versorgungsnetz.

Zusammengefasst zeigen die simulativ betrachteten Szenarien in einem ausgewählten Ortsnetzquartier, dass die Portierung des Viable System Modells funktioniert und durch die Schaffung eines offenen und evolutionär anpassbaren Systems eine Grundlage für Weiterentwicklungen gegeben ist.



# Abstract

In the years 2015–2020, the German public is characterized by the discussions and protests around climate and energy policy. People and policy claim for the reduction of harmful greenhouse gases, the withdrawal from fossil fuels, the nuclear phaseout and the use of more renewable energies, such as solar and wind energy. However, the associated effects and consequences on the electrical energy supply system, distribution and storages plus the necessary changes in the legal framework are often neglected during discussions and must be considered. With the energy revolution the grown energy supply network, the power plants and network structures plus the used methods of control and regulation have to be equally adapted and made more flexible. The fluctuating energy supply from renewable energies must be buffered by energy storage systems as a flexibility option for the temporal decoupling between generation and consumption. For an efficient and controlled operation, innovative management systems are necessary.

This thesis presents the development of such an energy management system for stationary energy storage applications. For this purpose, the fundamentals of management systems in different disciplines are observed. The conclusion is to meet the complexity in today's systems with validated and proven methods. Furthermore, the science of cybernetics is selected and described as well as the use of STAFFORD BEER's Viable System Model for developing and structuring the energy management system. For the porting of the model from the entrepreneurial management into the technology discipline an analysis of the subsystems is performed. Firstly through the discussion of the physiology, the theoretical origin of the model, and on the other hand by explanation of basic cybernetic principles and properties, like autonomy, homeostasis, viability, recursivity and more. The combination of theoretical consideration and introduction to relevant topics in energy supply, distribution, storage and legal frameworks allows the development of an active and cybernetic energy management system. This allows an efficient coordination of the energy flow in the electrical system. The proposed and elaborated operating strategies and management algorithms are validated by simulation. The average efficiency of the presented distribution algorithms in the storage container lies in the range of 90% to 95%. In addition, an environmental coupling of the management system is considered. That means, the complexity of the system is more manageable and observable by the introduction of four defined recursion levels. This enables an active control by integrating the gained information of the participants in the grid.

In summary, the presented simulativ scenarios out of a chosen rural low-voltage distribution grid proof, that the transfer of the Viable System Model is practicable and through the creation of an open and evolutionary adaptable system a basis for further development is given.





# Übersicht der Arbeit

Der Aufbau des Dokumentes folgt der Systematik schrittweise aufeinander aufbauender Teilaspekte der Managementtheorie, der elektrischen Energieversorgung, -verteilung und -speicherung im Energieversorgungsnetz, der Kybernetik lebensfähiger Systeme und der Strukturierung, dem Aufbau sowie der Simulation und Validierung des Systemkonzeptes für ein aktives kybernetisches Energiemanagementsystem für die stationäre Energiespeicherung.

**Einleitung:** Beschreibung der Ausgangssituation und des Stands der Forschung und Technik. Aus den Defiziten ergeben sich die Problemstellung und die Herausforderungen der Arbeit. Daraus leiten sich die Zielsetzung, die Abgrenzung, die Aufgabenstellung und die Vorgehensweise ab.

**Managementsysteme und die elektrische Energieversorgung:** Das Kapitel gibt eine Einführung in die relevanten Managementtheorie-Aspekte und Begriffe in der elektrischen Energieversorgung, -verteilung und -speicherung sowie rechtliche Rahmenbedingungen.

**Kybernetik, kybernetische Prinzipien und das Viable System Model:** Ergänzend zu den kybernetischen Managementmodellen werden grundlegende kybernetische Prinzipien und Eigenschaften erläutert. Weiter werden Anwendungen des Viable System Models vorgestellt.

**Vertiefung des Viable System Models:** In diesem Kapitel wird das Viable System Model im Detail betrachtet und die Herleitung aus der Physiologie erörtert. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Rekursionsebenen, Umweltkopplung und die Schritte der Anwendung des Modells.

**Feldtestgebiet, Energy Neighbor-Prototyp und kyELM light-Ansatz:** Vorstellung des Feldtestgebietes, des umgesetzten Ansatzes und des Prototypen im Rahmen des EEBatt-Projektes in Moosham.

**Strukturierung und Aufbau eines aktiven kybernetischen Energiemanagementsystems:** Zusammenfassung der bis hier eingeführten Themen in einem Gesamtkonzept samt kritischer Beurteilung der Systembestandteile.

**Simulation und Validierung des Systemkonzeptes:** Dieses Kapitel zeigt ausgewählte Ergebnisse aus dem simulierten Betrieb des Energiemanagementsystems in einem definierten Netzgebiet.

**Zusammenfassung und Ausblick:** Den Abschluss bilden die Zusammenfassung und ein Ausblick auf weiterführende Themen- und Aufgabenstellungen im Energiemanagementsystem.

Fazit: Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Systemkonzept zum Energiemanagement in der stationären Energieversorgung vorgeschlagen. Dieses basiert auf kybernetischen Theorien, welche es modular, skalierbar und erweiterbar machen. Der theoretische Ansatz wurde mit Simulationen validiert und eine erste Version in einem Prototypen umgesetzt.



# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>XV</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>XIX</b> |
| <b>Nomenklatur</b>   | <b>XXI</b> |
| <b>1 Einleitung und Hinführung zum Thema</b>                                     | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation und Problemstellung . . . . .                                     | 1          |
| 1.2 Stand der Forschung und Technik . . . . .                                    | 3          |
| 1.3 Herausforderung, Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit . . . . .             | 4          |
| 1.4 Vorgehensweise . . . . .   | 5          |
| <b>2 Managementsysteme und die elektrische Energieversorgung – ein Überblick</b> | <b>7</b>   |
| 2.1 Managementsysteme . . . . .  | 7          |
| 2.1.1 Management in der Betriebswirtschaftslehre und Soziologie . . . . .        | 7          |
| 2.1.2 Management in der Informatik . . . . .                                     | 9          |
| 2.1.3 Management in der Kybernetik . . . . .                                     | 10         |
| 2.1.4 Management in der Regelungstechnik . . . . .                               | 11         |
| 2.1.5 Fazit zu Managementsystemen . . . . .                                      | 11         |
| 2.2 Energiemanagementsysteme – eine Übersicht . . . . .                          | 11         |
| 2.2.1 Energiemanagement im Fahrzeug . . . . .                                    | 13         |
| 2.2.2 Energiemanagement im Gebäude . . . . .                                     | 14         |
| 2.2.3 Energiemanagement im Verteilnetz . . . . .                                 | 15         |
| 2.2.4 Fazit des Energiemanagementüberblicks . . . . .                            | 15         |
| 2.3 Elektrische Energieversorgung in Deutschland . . . . .                       | 16         |
| 2.3.1 Elektrische Energieverteilung . . . . .                                    | 19         |
| 2.3.2 Elektrische Energiespeicherung . . . . .                                   | 21         |
| 2.3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .                                     | 27         |
| 2.3.4 Spannung- und Frequenzregelung . . . . .                                   | 29         |
| 2.3.5 Fazit des Energieversorgungsüberblicks . . . . .                           | 32         |
| 2.4 Zusammenfassung Management und Energieversorgung . . . . .                   | 32         |
| <b>3 Kybernetik, kybernetische Prinzipien und das Viable System Model</b>        | <b>35</b>  |
| 3.1 Kybernetik – eine Einführung . . . . .                                       | 35         |
| 3.2 Kybernetische Systemmodelle . . . . .  | 38         |
| 3.2.1 Viable System Model – eine Einführung . . . . .                            | 39         |
| 3.2.2 Model for Systemic Control – eine Einführung . . . . .                     | 46         |
| 3.3 Kybernetische Prinzipien . . . . .   | 48         |
| 3.4 Das Viable System Model in der Anwendung . . . . .                           | 60         |
| 3.4.1 Anwendung des VSM im organisationellen Umfeld . . . . .                    | 60         |
| 3.4.2 Anwendung des VSM im sozialen Bereich . . . . .                            | 61         |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4.3    | Anwendung des VSM in der Medizin . . . . .  | 61         |
| 3.4.4    | Anwendung des VSM in der Technik . . . . .  | 61         |
| 3.4.5    | Anwendung des VSM in der Fahrzeugtechnik . . . . .                                      | 62         |
| 3.5      | Zusammenfassung . . . . .   | 62         |
| <b>4</b> | <b>Vertiefung des Viable System Models</b>  | <b>63</b>  |
| 4.1      | Grundlagen der menschlichen Physiologie . . . . .                                       | 63         |
| 4.1.1    | Nervensystem . . . . .  | 64         |
| 4.1.2    | Gehirn . . . . .  | 66         |
| 4.1.3    | Immunsystem . . . . .   | 68         |
| 4.2      | Das Viable System Model im Detail betrachtet . . . . .                                  | 69         |
| 4.2.1    | Operative Einheiten – Aktoren . . . . .   | 69         |
| 4.2.2    | Teilsystem 1 – autonome Regelzentren . . . . .  | 71         |
| 4.2.3    | Teilsystem 2 – Koordination . . . . .   | 74         |
| 4.2.4    | Teilsystem 3* – Monitoring . . . . .  | 79         |
| 4.2.5    | Teilsystem 3 – Betrieb im Inneren und der Gegenwart . . . . .                           | 81         |
| 4.2.6    | Teilsystem 4 – Umweltkopplung und Prädiktion . . . . .                                  | 84         |
| 4.2.7    | Teilsystem 5 – Systemethos . . . . .  | 87         |
| 4.2.8    | Rekursion im Viable System Model . . . . .  | 89         |
| 4.2.9    | Schema zur Identifizierung der Viable System Model-Bestandteile . . . . .               | 94         |
| 4.3      | Zusammenfassung . . . . .   | 96         |
| <b>5</b> | <b>Feldtestgebiet, Energy Neighbor Prototyp und kyELM light-Ansatz</b>                  | <b>99</b>  |
| 5.1      | Feldtestquartier Moosham . . . . .  | 99         |
| 5.2      | Vorstellung des EEBatt-Prototyps – Energy Neighbor . . . . .                            | 99         |
| 5.2.1    | Elektrische Komponenten des Energy Neighbor . . . . .                                   | 101        |
| 5.2.2    | Klimasystem des Containers . . . . .  | 103        |
| 5.3      | kyELM light – das Energiemanagement im Energy Neighbor . . . . .                        | 103        |
| 5.4      | Prüfstandslandschaft im EEBatt-Projekt . . . . .  | 106        |
| 5.5      | Zusammenfassung . . . . .   | 107        |
| <b>6</b> | <b>Strukturierung und Aufbau eines aktiven kybernetischen Energiemanagement-systems</b> | <b>111</b> |
| 6.1      | Identifikation und Definition der Systembestandteile, -intelligenz und -identität       | 111        |
| 6.2      | Betrachtung der Rekursionsebenen und ihrer Umweltkopplung . . . . .                     | 114        |
| 6.2.1    | Rekursionsebene 0: Ursprung der Energie . . . . .                                       | 115        |
| 6.2.2    | Rekursionsebene 1: Das RVSM . . . . .   | 116        |
| 6.2.3    | Rekursionsebene 2: Das CVSM . . . . .   | 117        |
| 6.2.4    | Rekursionsebene 3: Das QVSM . . . . .   | 121        |
| 6.2.5    | Zusammenfassung der Rekursion und Umweltkopplung des kyELM . . . . .                    | 124        |
| 6.3      | Ausgestaltung der Betriebsstrategie im kyELM . . . . .                                  | 129        |
| 6.3.1    | Strategien im Rack . . . . .  | 129        |
| 6.3.2    | Betriebsstrategien im Container – Verteil-Algorithmen . . . . .                         | 130        |
| 6.3.3    | Strategien im Quartier . . . . .  | 136        |
| 6.4      | Zusammenfassung . . . . .   | 145        |

|          |   |             |
|----------|---|-------------|
| <b>7</b> | <b>Simulation und Validierung des Systemkonzeptes</b>                   | <b>147</b>  |
| 7.1      | Quartiersimulation und Datenlage . . . . .                              | 148         |
| 7.1.1    | Modellbestandteile . . . . .  | 151         |
| 7.1.2    | Szenarien und Ergebnisse . . . . .                                      | 157         |
| 7.2      | Containersimulation und Datenlage . . . . .                             | 164         |
| 7.2.1    | Modellbestandteile . . . . .  | 165         |
| 7.2.2    | Szenarien und Ergebnisse . . . . .                                      | 167         |
| 7.3      | Validierung der Simulationen . . . . .                                  | 171         |
| 7.4      | Zusammenfassung . . . . .   | 173         |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                     | <b>175</b>  |
| 8.1      | Ergebnis dieser Arbeit . . . . .  | 175         |
| 8.2      | Ausweitung des Anwendungsbereichs und Potential der Arbeit . . . . .    | 176         |
| 8.3      | Ausblick . . . . .  | 178         |
| <b>A</b> | <b>VSM-Schnittstellen-Knoten</b>  | <b>A-1</b>  |
| <b>B</b> | <b>Konzepte zur Identifizierung der VSM-Bestandteile</b>                | <b>A-3</b>  |
| <b>C</b> | <b>Bestimmung elektrischer Kurzschlussgrößen des Netzes</b>             | <b>A-7</b>  |
| <b>D</b> | <b>Kenndaten des Ortsnetzes Moosham</b>                                 | <b>A-11</b> |
| <b>E</b> | <b>Beispiel Rack-Koordination des Teilsystem 2</b>                      | <b>A-17</b> |
| <b>F</b> | <b>Sollleistungs-Berechnung dynamischer dreiphasiger Lastblock</b>      | <b>A-19</b> |
| <b>G</b> | <b>Knotenspannungs-Betrachtung Netzsimulation</b>                       | <b>A-21</b> |
| <b>H</b> | <b>SoC-Betrachtung Netzsimulation</b>                                   | <b>A-27</b> |
| <b>I</b> | <b>Ergänzungen zur thermischen Modellierung des Speicher-Containers</b> | <b>A-31</b> |
| <b>J</b> | <b>Ergebnisse der Validierung mit Simulink-Tool PSAT</b>                | <b>A-33</b> |
|          | Liste eigener Veröffentlichungen  | V-1         |
|          | Liste betreuter studentischer Arbeiten                                  | S-1         |
|          | Literaturverzeichnis  | L-1         |



# Abbildungsverzeichnis

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.1  | Quartiernetz Moosham in EEBatt – Illustration . . . . .                        | 2   |
| 2.1  | Struktur eines Energiemanagementsystems nach DIN Norm 50001 . . . . .          | 12  |
| 2.2  | Zusammenhang Energieformen . . . . .   | 13  |
| 2.3  | Schema eines Strahlen-, Ring- und Maschennetzes . . . . .                      | 20  |
| 2.4  | Speichertechnologie-Übersicht für die elektrische Energiespeicherung . . . . . | 22  |
| 2.5  | Übersicht rechtlicher Rahmenbedingungen zur Speicherintegration . . . . .      | 28  |
| 2.6  | VDE-Standardkennlinie zur Spannungshaltung nach VDE-AR-N 4105 . . . . .        | 29  |
| 3.1  | Elementare Bestandteile des Viable System Models von BEER . . . . .            | 39  |
| 3.2  | Viable System Model in Anlehnung an BEER . . . . .                             | 41  |
| 3.3  | Model of Systemic Control nach SCHWANINGER . . . . .                           | 46  |
| 3.4  | Varietätungleichung: Umwelt – operative Instanz – Management . . . . .         | 50  |
| 3.5  | Kybernetische Räuber-Beute-Beziehungen . . . . .                               | 56  |
| 4.1  | Aufbau menschliches Nervensystem . . . . .                                     | 64  |
| 4.2  | Sympathikus Wirkkette . . . . .  | 66  |
| 4.3  | Übersicht der Gehirnbestandteile . . . . .                                     | 67  |
| 4.4  | Darstellung Schnittstellen-Knoten OE nach BEER . . . . .                       | 71  |
| 4.5  | Darstellung Schnittstellen-Knoten TS 1 nach BEER . . . . .                     | 72  |
| 4.6  | Regelkreis mit qualitativem Führungsverhalten . . . . .                        | 73  |
| 4.7  | Ausführungen der zentralen Befehlsachse im VSM . . . . .                       | 75  |
| 4.8  | Darstellung Schnittstellen-Knoten TS 2 nach BEER . . . . .                     | 77  |
| 4.9  | Darstellung Schnittstellen-Knoten TS 3 nach BEER . . . . .                     | 83  |
| 4.10 | Darstellung Schnittstellen-Knoten TS 4 nach BEER . . . . .                     | 86  |
| 4.11 | Darstellung Schnittstellen-Knoten TS 5 nach BEER . . . . .                     | 88  |
| 4.12 | Rekursion im Viable System Model . . . . .                                     | 90  |
| 4.13 | Das Viable System Model als Entwurfstool in der Technik . . . . .              | 95  |
| 5.1  | Ortsnetzquartier Moosham . . . . .   | 100 |
| 5.2  | Rendering des Containers . . . . .   | 100 |
| 5.3  | Speicherbestandteile des Energy Neighbors . . . . .                            | 102 |
| 5.4  | Schematische Darstellung der (Leistungs-)Schütze im Energy Neighbor . . . . .  | 102 |
| 5.5  | Klimazonen des Containers . . . . .  | 104 |
| 5.6  | Architektur des Energiemanagementsystems . . . . .                             | 105 |
| 5.7  | EMS-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand – Schematische Darstellung . . . . .        | 107 |
| 5.8  | EMS-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand erste Ebene – Foto . . . . .                | 108 |
| 5.9  | EMS-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand zweite Ebene – Foto . . . . .               | 108 |
| 5.10 | Brettaufbau-Prüfstand – Foto . . . . .   | 109 |
| 5.11 | Energy Neighbor – Foto . . . . .   | 109 |

|      |  |      |
|------|--|------|
| 6.1  | Rekursionsebenen des Energiemanagementsystems . . . . .                                | 113  |
| 6.2  | Flussdiagramm der Rack-Koordination . . . . .  | 120  |
| 6.3  | Zeitverläufe der Rack-Koordination . . . . .   | 121  |
| 6.4  | Umweltkopplung des Energiemanagementsystems . . . . .                                  | 126  |
| 6.5  | Schema Verteil-Algorithmen . . . . .   | 133  |
| 6.6  | Schema des «Enumeration» Verteil-Algorithmus . . . . .                                 | 135  |
| 6.7  | Teilpakete zur Aufnahme von Wirkleistung über den Ortsnetztransformator . . . . .      | 143  |
| 6.8  | Unsortierte qualitative Leistungsbilanz bei negativer Residuallast . . . . .           | 144  |
| 6.9  | Sortierte qualitative Leistungsbilanz bei negativer Residuallast . . . . .             | 144  |
|      |  |      |
| 7.1  | Vergleich verschiedener Last- und Erzeugungsprofile . . . . .                          | 149  |
| 7.2  | Schematischer Aufbau des implementierten QEMS nach Vorbild des QVSM . . . . .          | 150  |
| 7.3  | Modellbestandteile des Netzes . . . . .  | 152  |
| 7.4  | II-Ersatzschaltbild eines Kabels . . . . .   | 153  |
| 7.5  | Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Netzanschlusses . . . . .                           | 156  |
| 7.6  | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_2$ . . . . .                  | 160  |
| 7.7  | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_3$ . . . . .                  | 161  |
| 7.8  | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_4$ . . . . .                  | 161  |
| 7.9  | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_5$ . . . . .                  | 162  |
| 7.10 | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_6$ . . . . .                  | 162  |
| 7.11 | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_7$ . . . . .                  | 163  |
| 7.12 | Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien $S_1$ & $S_8$ . . . . .                  | 163  |
| 7.13 | Schema des Speicher-Container-Modells . . . . .  | 165  |
| 7.14 | Thermisches Punktmassenmodell des Speicher-Containers . . . . .                        | 168  |
| 7.15 | Detaillierte Darstellung der Schnittstellen des Container-Simulationsmodells . . . . . | 168  |
| 7.16 | Simulation: Verteil-Algorithmus mit vier Racks . . . . .                               | 169  |
| 7.17 | Simulation: Verteil-Algorithmus mit acht Racks . . . . .                               | 169  |
|      |  |      |
| A.1  | Detaillierte VSM-Darstellung mit Schnittstellen-Knoten nach BEER . . . . .             | A-2  |
|      |  |      |
| B.1  | Viable System Model als Entwurfstool nach ESPINOSA . . . . .                           | A-4  |
|      |  |      |
| C.1  | Zusammengefasste Netzgrößen . . . . .  | A-9  |
| C.2  | Ortsnetz Moosham, elektrischer Überblick . . . . .                                     | A-9  |
|      |  |      |
| E.1  | Beispiel Rack-Koordination – zeitliche Kriterien . . . . .                             | A-17 |
| E.2  | Beispiel Rack-Koordination – erkannter Rack-Ausfall . . . . .                          | A-18 |
|      |  |      |
| G.1  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N1 . . . . .                                   | A-22 |
| G.2  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N1 samt Ringleitung . . . . .                  | A-22 |
| G.3  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N20 . . . . .                                  | A-23 |
| G.4  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N20 samt Ringleitung . . . . .                 | A-23 |
| G.5  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N23 . . . . .                                  | A-24 |
| G.6  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N23 samt Ringleitung . . . . .                 | A-24 |
| G.7  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N71 . . . . .                                  | A-25 |
| G.8  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N71 samt Ringleitung . . . . .                 | A-25 |
| G.9  | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N85 . . . . .                                  | A-26 |
| G.10 | Bezogene Knotenspannungen am Netzknoten N85 samt Ringleitung . . . . .                 | A-26 |



H.1 SoC-Verläufe der Speicher in den Simulations-Szenarien  $S_2$ – $S_5$  . . . . . A-28  
H.2 SoC-Verläufe der Speicher in den Simulations-Szenarien  $S_2$  &  $S_6$ – $S_8$  . . . . . A-29  
I.1 Annahme Außentemperaturverlauf für die Speicher-Containersimulation . . . A-32



# Tabellenverzeichnis

|     |  |      |
|-----|--|------|
| 2.1 | Denkmuster von Managementansätzen nach MALIK . . . . .                               | 8    |
| 2.2 | Prozentuale Verteilung der Energieträger in der Energieerzeugung 1995–2018 . . . . . | 17   |
| 2.3 | Kennzahlen aus der DIN Norm 50160 . . . . .  | 19   |
| 2.4 | 5-Stufen-Plan zur Frequenzregel bei Großstörungen . . . . .                          | 30   |
| 2.5 | Vergleich Netzdienstleistung 2015 und 2050 . . . . .                                 | 31   |
| 3.1 | Einordnung der Kybernetik in die Wissenschaftstheorie . . . . .                      | 37   |
| 4.1 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten OE . . . . .                                      | 70   |
| 4.2 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten TS 1 . . . . .                                    | 72   |
| 4.3 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten TS 2 . . . . .                                    | 76   |
| 4.4 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten TS 3 . . . . .                                    | 82   |
| 4.5 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten TS 4 . . . . .                                    | 85   |
| 4.6 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten TS 5 . . . . .                                    | 87   |
| 6.1 | Kurzzusammenfassung der Rekursionsebenen im kyELM . . . . .                          | 115  |
| 6.2 | Komponentenzuweisung Quartier im Viable System Model . . . . .                       | 127  |
| 6.3 | Übersicht der Verteil-Algorithm-Eigenschaften . . . . .                              | 132  |
| 6.4 | Vergleich kyELM light – kyELM . . . . .  | 145  |
| 7.1 | Übersicht der Simulations-Szenarien-Eigenschaften im Quartier . . . . .              | 158  |
| 7.2 | Übersicht über die Auswertung der Verteil-Algorithm . . . . .                        | 170  |
| 7.3 | Relativer Fehler der dynamischen Netzsimulation . . . . .                            | 172  |
| A.1 | Beschreibung Schnittstellen-Knoten des Viable System Model . . . . .                 | A-1  |
| B.1 | VSM-Entwurfskonzept-Vergleich nach ADAM . . . . .                                    | A-3  |
| D.1 | Ortsnetztransformator Kennwerte Moosham . . . . .                                    | A-11 |
| D.2 | Knoten-Kennwerte im Ortsnetz Moosham . . . . .                                       | A-11 |
| D.3 | Lasten-Kennwerte im Ortsnetz Moosham . . . . .                                       | A-13 |
| D.4 | Speicher-Kennwerte im Ortsnetz Moosham . . . . .                                     | A-14 |
| D.5 | Leitungs-Kennwerte im Ortsnetz Moosham . . . . .                                     | A-14 |
| D.6 | PV-Anlagen-Kennwerte im Ortsnetz Moosham . . . . .                                   | A-15 |
| I.1 | Daten der thermischen Modelle des Speicher-Containers . . . . .                      | A-32 |
| J.1 | Validierung der Knotenspannungen zum Zeitpunkt $t = 1$ h und $t = 12$ h . . . . .    | A-33 |



# Nomenklatur

## Formelzeichen

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $c_{\text{kap}}$            | Kapazitätsfaktor PV-Anlage                                     |
| $C$                         | Kapazität eines Kondensators                                   |
| $C_N$                       | Nennkapazität eines Kondensators                               |
| $C_{\text{th}}$             | Wärmekapazität   |
| $\cos \varphi(P)$           | Leistungsfaktor Netz   |
| $E$                         | Energie  |
| $E_N$                       | Nennenergieinhalt  |
| $f$                         | (Netz-)Frequenz  |
| $g$                         | Erdbeschleunigung  |
| $G$                         | Leitfähigkeit  |
| $\eta_{\text{Bat.}}$        | Wirkungsgrad des Akkumulatorenstranges eines Racks             |
| $\eta_{\text{LE}}$          | Wirkungsgrad der Leistungselektronik                           |
| $\vartheta$                 | Temperatur in Grad Celsius                                     |
| $h_p$                       | Fallhöhe pot. Energie  |
| $I$                         | elektrische Stromstärke  |
| $J$                         | Trägheitsmoment  |
| $L$                         | Induktivität   |
| $m, n$                      | Anzahl bzw. Zählvariablen                                      |
| $p$                         | (Luft-)Druck   |
| $P_{\text{Anforderung}}$    | geforderte Sollleistung  |
| $P_{\text{max}}$            | Maximalleistung einer Komponente                               |
| $P_N$                       | Nennleistung einer Komponente                                  |
| $P_{\text{PV, deg}}$        | degradierte PV-Leistung  |
| $P_{\text{Rack, max}}$      | Maximalleistung der Racks                                      |
| $P_{\text{Rl}}$             | Residuallast   |
| $P_{\text{Speicher, lad}}$  | Ladeleistung Speicher  |
| $P_{\text{Speicher, elad}}$ | Entladeleistung Speicher                                       |
| $P_{\text{Spitze}}$         | Spitzenleistung PV-Anlagen                                     |
| $P_{\text{Ziel}}$           | berechnete Soll/Ziel-Leistung                                  |
| $\dot{q}$                   | thermische Flussgrößen (Leitung, Konvektion, Strahlung, Strom) |
| $Q$                         | Blindleistung  |
| $Q_p$                       | Quantil  |
| $r_{\text{quota}}$          | Kumulierter Bewertungsfaktor des Racks                         |
| $r_{\text{Rack}}$           | Bewertungsfaktor des Racks                                     |
| $R_L$                       | ohmscher Widerstand der Leitung                                |
| $R'_L$                      | auf Sekundärseite bezogener ohmscher Widerstand der Leitung    |
| $R_p$                       | Parallelwiderstand   |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $R_T$                       | ohmscher Widerstand des Transformators                             |
| $R'_T$                      | auf Sekundärseite bezogener ohmscher Widerstand des Transformators |
| $\rho$                      | Dichte   |
| $\sigma$                    | Statik eines Kraftwerkes   |
| $S$                         | Scheinleistung   |
| $S_N$                       | Nennscheinleistung   |
| $S_{rT}$                    | Bemessungsscheinleistung Transformator                             |
| $t$                         | Zeit(punkt)  |
| $t_{\text{aus}}$            | Ausregelzeit   |
| $t_{\text{wach}}$           | Aktivzeit der Rack-Koordination                                    |
| $T$                         | Absolute Temperatur  |
| $u$                         | Führungsgröße  |
| $u_k$                       | relative Kurzschlussspannung Transformator                         |
| $u_r$                       | Wirkkomponente der relativen Kurzschlussspannung                   |
| $U$                         | elektrische Spannung   |
| $U_{\text{max}}$            | maximale Spannung  |
| $U_{\text{min}}$            | minimale Spannung  |
| $U_n$                       | Netz-Nennspannung  |
| $U_N$                       | Komponenten-Nennspannung   |
| $U_{rT}$                    | Bemessungsspannung Transformator                                   |
| $\ddot{u}$                  | Übersetzungsverhältnis Transformator                               |
| $V$                         | Volumenstrom, Abflussvolumen                                       |
| $V^*$                       | Varietät   |
| $V_{\text{CEMS}}^*$         | Varietät des CEMS  |
| $V_{\text{Containers}}^*$   | Varietät des Containers  |
| $V_{\text{oI}}^*$           | Varietät der operativen Instanz                                    |
| $V_M^*$                     | Varietät des Managements   |
| $V_{\text{Modul-Strang}}^*$ | Varietät des Modul-Stranges  |
| $V_{\text{QEMS}}^*$         | Varietät des QEMS  |
| $V_{\text{Quartier}}^*$     | Varietät des Quartiers   |
| $V_{\text{Racks}}^*$        | Varietät der Racks   |
| $V_{\text{REMS}}^*$         | Varietät des REMS  |
| $V_U^*$                     | Varietät der Umwelt  |
| $V_{\text{ÜSEEMS}}^*$       | Varietät des ÜSEEMS  |
| $\omega$                    | Winkelgeschwindigkeit  |
| $w$                         | Stellgröße   |
| $W$                         | Jahresenergiebedarf  |
| $x$                         | Platzhalter Variable   |
| $X_L$                       | Kapazitätz/kapazitive Reaktanz der Leitung                         |
| $X'_L$                      | auf Sekundärseite bezogene kapazitive Reaktanz der Leitung         |
| $X_T$                       | Kapazitätz/kapazitive Reaktanz des Transformators                  |
| $X'_T$                      | auf Sekundärseite bezogene kapazitive Reaktanz des Transformators  |
| $y$                         | Regelgröße   |
| $Z_T$                       | komplexer Widerstand/Impedanz des Transformators                   |
| $z$                         | Störgröße  |

---

## Abkürzungen

|              |   |
|--------------|---|
| <b>AF</b>    | <b>A</b> larmfilter   |
| <b>BDEW</b>  | <b>B</b> undesverband <b>d</b> er <b>E</b> nergie- und <b>W</b> asserwirtschaft   |
| <b>BMS</b>   | <b>B</b> atteri <b>m</b> anagementsystem  |
| <b>BMWi</b>  | <b>B</b> undes <b>m</b> inisterium für <b>W</b> irtschaft und <b>E</b> nergie   |
| <b>CAN</b>   | <b>C</b> ontroller <b>A</b> rea <b>N</b> etwork   |
| <b>CEMS</b>  | <b>C</b> ontainer- <b>E</b> nergi <b>m</b> anagementsystem  |
| <b>DIN</b>   | <b>D</b> eutsches <b>I</b> nstitut für <b>N</b> ormung  |
| <b>DNS</b>   | <b>D</b> esoxyribo- <b>N</b> uklein- <b>S</b> äure  |
| <b>DP</b>    | « <b>D</b> isvison <b>PLUS</b> » Verteil-Algorithmus  |
| <b>EDMS</b>  | <b>E</b> nergiedaten <b>m</b> anagementsystem   |
| <b>EEG</b>   | <b>E</b> rneuerbare- <b>E</b> nergien- <b>G</b> esetz   |
| <b>EME</b>   | <b>E</b> xterne <b>m</b> otorische <b>E</b> reignisse   |
| <b>EMS</b>   | <b>E</b> nergi <b>m</b> anagementsystem   |
| <b>EnWG</b>  | <b>E</b> nergi <b>w</b> irtschaftsgesetz  |
| <b>ENu</b>   | « <b>E</b> numeration» Verteil-Algorithmus  |
| <b>ESE</b>   | <b>E</b> xterne sensorische <b>E</b> reignisse  |
| <b>fEPM</b>  | flexibles <b>E</b> nergie- und <b>P</b> ower <b>m</b> anagement   |
| <b>FL</b>    | « <b>F</b> ull <b>L</b> oad» Verteil-Algorithmus  |
| <b>GT</b>    | « <b>G</b> ame <b>T</b> heory» Verteil-Algorithmus  |
| <b>HGÜ</b>   | <b>H</b> ochspannungs- <b>G</b> leichspannungs- <b>Ü</b> bertragungsleitungen   |
| <b>HöS</b>   | <b>H</b> öchstspannung  |
| <b>HS</b>    | <b>H</b> ochspannung  |
| <b>IKT</b>   | <b>I</b> nformations- und <b>K</b> ommunikationstechnik   |
| <b>IME</b>   | <b>I</b> nterne <b>m</b> otorische <b>E</b> reignisse   |
| <b>IK</b>    | <b>I</b> nteraktions- <b>K</b> omponente im TS 5  |
| <b>IoT</b>   | <b>I</b> nternet of <b>T</b> hings  |
| <b>ISE</b>   | <b>I</b> nterne sensorische <b>E</b> reignisse  |
| <b>ISO</b>   | <b>I</b> nternational <b>O</b> rganization for <b>S</b> tandardization –<br><b>I</b> nternationale <b>O</b> rganisation für <b>N</b> ormung |
| <b>IT</b>    | <b>I</b> nformationstechnik   |
| <b>KK</b>    | <b>K</b> oordinations- <b>K</b> noten im Viable System Model  |
| <b>kyELM</b> | kybernetisches <b>E</b> nergie- und <b>L</b> eastungs <b>m</b> anagement  |
| <b>KSys</b>  | <b>K</b> limasystem   |
| <b>LE</b>    | <b>L</b> eistungselektronik   |
| <b>LIN</b>   | <b>L</b> ocal <b>I</b> nterconnect <b>N</b> etwork  |
| <b>MK</b>    | <b>M</b> otorische- <b>K</b> omponente im TS 5  |
| <b>MS</b>    | <b>M</b> ittelspannung  |
| <b>MSC</b>   | <b>M</b> odel of <b>S</b> ystemic <b>C</b> ontrol   |
| <b>NAV</b>   | <b>N</b> iederspannungs <b>a</b> nschluss <b>v</b> erordnung  |
| <b>NEV</b>   | <b>N</b> etzentgeld <b>v</b> erordnung  |
| <b>NS</b>    | <b>N</b> iederspannung  |
| <b>NSy</b>   | <b>N</b> ervensystem  |
| <b>NZV</b>   | <b>N</b> etzzugangs <b>v</b> erordnung  |
| <b>OE</b>    | <b>O</b> perative <b>E</b> inheit im Viable System Model  |
| <b>ONT</b>   | <b>O</b> rts <b>n</b> etz <b>t</b> ransformator   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>OP</b>       | « <b>O</b> ptimization» Verteil-Algorithmus  |
| <b>PDCA</b>     | <b>P</b> lan- <b>D</b> o- <b>C</b> heck- <b>A</b> ct-Cycle                                     |
| <b>PNS</b>      | <b>P</b> eripheres <b>N</b> ervensystem  |
| <b>PV</b>       | <b>P</b> hotovoltaik   |
| <b>PWM</b>      | <b>P</b> ulsweiten <b>m</b> odulation  |
| <b>QEMS</b>     | <b>Q</b> uartier- <b>E</b> nergi <b>m</b> anagementsystem                                      |
| <b>RE</b>       | <b>R</b> ekursionsebene  |
| <b>REMS</b>     | <b>R</b> ack- <b>E</b> nergi <b>m</b> anagementsystem  |
| <b>RZ</b>       | <b>R</b> egelzentrale  |
| <b>SB</b>       | « <b>S</b> o <b>C</b> - <b>B</b> alance» Verteil-Algorithmus                                   |
| <b>SD</b>       | « <b>S</b> imple <b>D</b> ivision» Verteil-Algorithmus   |
| <b>SiF</b>      | <b>S</b> ystem in <b>F</b> ocus  |
| <b>SK</b>       | <b>S</b> ensorische- <b>K</b> omponente im TS 5  |
| <b>SNS</b>      | <b>S</b> omatisches <b>N</b> ervensystem   |
| <b>SoC</b>      | <b>S</b> tate of <b>C</b> harge – Ladezustand von Akkumulatoren                                |
| <b>StromStG</b> | <b>S</b> trom <b>s</b> teu <b>e</b> rgesetz  |
| <b>StromStV</b> | Verordnung zur Durchführung des <b>S</b> trom <b>s</b> teu <b>e</b> rgesetzes                  |
| <b>SoH</b>      | <b>S</b> tate of <b>H</b> ealth – Alterungszustand von Akkumulatoren                           |
| <b>SWOT</b>     | <b>S</b> trengths, <b>W</b> eaknesses, <b>O</b> pportunities, <b>T</b> hreats-Analyse          |
| <b>TS</b>       | <b>T</b> eilsystem des Viable System Models  |
| <b>ÜSE</b>      | überlagerten <b>S</b> pannungsebene  |
| <b>V2G</b>      | <b>V</b> ehicle-to( <b>2</b> )- <b>G</b> rid   |
| <b>VDE</b>      | <b>V</b> erband der <b>E</b> lektrotechnik, <b>E</b> lektronik und <b>I</b> nformationstechnik |
| <b>VNS</b>      | <b>V</b> egetatives <b>N</b> ervensystem   |
| <b>VSM</b>      | <b>V</b> iable <b>S</b> ystem <b>M</b> odel – Modell lebensfähiger Systeme                     |
| <b>ZNS</b>      | <b>Z</b> entrales <b>N</b> ervensystem   |



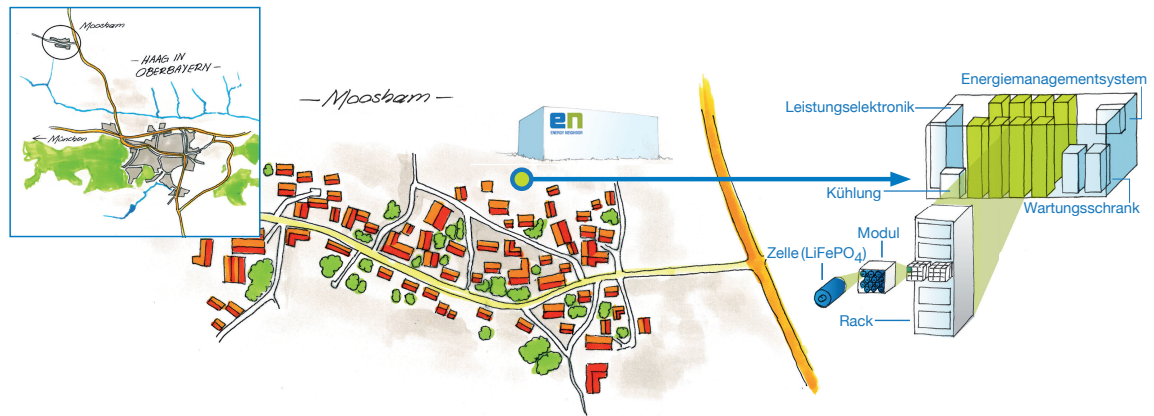
# 1 Einleitung und Hinführung zum Thema

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Mit dem Einzug der erneuerbaren Energieträger und der beschlossenen Energiewende, welche den Ausstieg aus der Atomenergie in Deutschland inkludiert, stößt das deutsche Strom-Verteilnetz an seine Grenzen. Die ursprüngliche Idee, dass große Kraftwerke die Energie bereitstellen und diese über die verschiedenen Spannungsebenen zu den Verbrauchern transportiert wird, tritt immer mehr in den Hintergrund. Durch die dezentrale Einspeisung von erneuerbaren Energien in Form von Windkraft- und Photovoltaik (PV)-Anlagen wird mehr Energie an den Endpunkten des Netzes produziert und an höhere Spannungsebenen im Verteilnetz abgegeben. Die Infrastruktur des Netzes (Transformatoren, Schaltanlagen und Kabel) stößt an ihre Grenzen. Aufwendige Netzausbaumaßnahmen oder die Drosselung der Einspeiseleistung sind gängige Lösungen zur Stabilisierung des Netzes. Weiter wird versucht, durch den gezielten Einsatz von Speichern verschiedenster Art (chemisch, mechanisch, etc.), den zu viel produzierten und schwankenden Strom zwischenzuspeichern. Dies erfordert allerdings auch einen neuen und gesteigerten Regelaufwand. Sogenannte «Smart Grids» sollen Abhilfe schaffen. Dies sind Netze und Anlagen, welche durch eine hochgradige Vernetzung mit Informations- und Kommunikationsanlagen (IKT) ausgerüstet, neue Regelverfahren und Steuerungskonzepte in das Netz einbringen. Dadurch wird das Energieversorgungssystem in Deutschland immer komplexer und diese Komplexität muss beherrscht werden. Nach [139] entwickelt sich die Energieversorgung zum soziotechnischen System mit Einsatz von künstlicher Intelligenz und der Interaktion Mensch-Netz-Energieproduktion und -konsum. Hierfür gilt es einen systemübergreifenden Lösungsansatz zu identifizieren und umzusetzen, sowohl für die aktuelle Versorgungsstruktur als auch für zukünftige Netztopologien.

Ein ähnliches Problem hatte auch die Automobilindustrie. Die steigende Anzahl an elektrischen Verbrauchern für Komfort, Entertainment und Sicherheit brachte das Bordnetz an seine Grenzen. In den Arbeiten von GIOVANAZZI [91] und FRÖSCHL [84] wurde mit Hilfe der Kybernetik und deren Methoden ein Ansatz entwickelt, der diese Komplexität beherrscht und das Bordnetz stabilisiert. Dieses sogenannte flexible Energie- und Powermanagement (fEPM) wurde von der BMW Group und dem Fachgebiet Energiewandlungstechnik der Technischen Universität München (TUM) entwickelt und im zweiten Jahrzehnt des 20ten Jahrhunderts in die Serienproduktion gebracht.

Aus diesem Grund liegt es nahe, die in den Arbeiten beschriebenen Erkenntnisse zu verwenden und die Theorie der Kybernetik zu studieren, um daraus einen Ansatz für die stationäre Energieversorgung zu generieren. Somit ergibt sich die Motivation für diese Arbeit, in welcher ähnlich zum fEPM ein kybernetisches Energie- und Leistungsmanagement, kurz kyELM, entwickelt werden soll. Ein erster Ansatz wurde im 30 Mio. € geförderten Projekt EEBatt (Dezentrale Stationäre Batteriespeicher zur effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien und Unterstützung der Netzstabilität) in Zusammenarbeit mit 13 Lehrstühlen der TUM, der



**Abb. 1.1** – Blick auf das Feldtestgebiet Moosham und eine Illustration des Energy Neighbors – Illustration aus dem Projektflyer

Varta Storage GmbH und dem Zentrum für Angewandte Energieforschung erarbeitet und im Feld als Batteriespeicher-Prototyp (Energy Neighbor) getestet. Im Detail beschäftigte sich das interdisziplinäre Forschungsprojekt mit der vollständigen Systementwicklung eines Batteriespeichersystems zur Netzunterstützung. Mehrere Teilprojekte und Teilaspekte wurden hierbei in den vier Jahren Projektlaufzeit (2013–2016) betrachtet. Genauer wurden folgende Punkte untersucht:

- das Zellmaterial
- die Zellherstellung und der Zelltyp
- der Modul- und Rackbau
- die Teil-Komponenten-Integration zu einem Gesamtsystem Container
- die Auslegung, Entwicklung und Implementierung eines Batterie- und Energiemanagementsystems
- die Auswahl und Steuerung der Leistungselektronik-Komponenten
- Definition des Netzanschlusses
- Durchführung eines Feldtestes
- Ansatz zur Betriebsstrategie
- wirtschaftliche sowie rechtliche Betrachtungen der Rahmenbedingungen für Batteriespeicher
- Erhöhung und Sicherstellung der Systemsicherheit

Ergebnisse und Infos zum Projekt sind auf der archivierten Projekt-Homepage [170], dem Zwischenbericht [247] von 2015 und einem Konferenzbeitrag [220] von 2017 zu finden. In Abbildung 1.1 ist eine grafische Darstellung des Feldtest-Gebietes und des Energy Neighbors gezeigt.

Die aus diesem ersten Ansatz – im weiteren kyELM light-Ansatz genannt – gewonnenen Erkenntnisse und weitere Überlegungen zu einem vollwertigen kyELM, soll die vorliegende Arbeit aufzeigen.

## 1.2 Stand der Forschung und Technik

Das Umfeld und die Rahmenbedingungen für diese Arbeit sind geprägt durch die anhaltenden Diskussionen und Suche nach Lösungen für die Energiewende [221]. Die Abwendung von den fossilen Brennstoffen, der Ausstieg aus der Atomkraft sowie die Integration von erneuerbaren Energien und Elektrofahrzeugen bringen das Versorgungsnetz an die Grenzen der Belastbarkeit. In Studien wie [13, 94, 234] werden Lösungen und Wege aufgezeigt, wie die elektrische Energieversorgung und der Einsatz von Energiespeichern bis 2030 und 2050 aussehen kann. Es wird vom «Weg zum Internet der Energie» gesprochen. Das heißt ein massiver Ausbau von IKT soll den Netzausbau hin zum Stromnetz im Jahr 2030 prägen. Es werden verschiedene Szenarien betrachtet, die bei entsprechenden Ausrichtungen auftreten könnten. Außerdem werden heutige Netzkomponenten bewertet und die Veränderungen und Anpassungen, welchen sie unterliegen, beschrieben. STERNER beschreibt in [211], dass ein Wandel vom Supply-Side-Management zum Demand-Side-Management stattfinden wird und Energiespeicher definitiv benötigt werden:

1.)

---

*„In diesem Kapitel wurde eine Vielzahl von Prozessen diskutiert, die auf das Energieversorgungssystem dieselbe Wirkung haben wie Energiespeicher und oft auch tatsächlich Energie speichern. Sie unterscheiden sich von allen anderen Energiespeichern dergestalt, dass es sich um bereits existierende Prozesse handelt und somit für die Speicherkapazität keinerlei Kapitalkosten anfallen. Sie können zu Kosten aktiviert werden, die für alle vorher beschriebenen Energiespeicher illusorisch sind. Ihr theoretisches Potenzial ist bezüglich der verfügbaren Leistung derart riesig, dass sie den gesamten Bedarf decken könnten. Allerdings gilt dies nur für einen Zeitbereich von Minuten bis zu einigen Stunden, in Ausnahmefällen noch bis zu einem Tag. Zur Überbrückung längerer Zeiten sind die Energiespeicher [...] unerlässlich.“*

---

[211, S. 594]

Neben der nötigen Integration von Energiespeichern sind sich die Experten einig, dass auch der Einsatz von Managementsystemen nötig ist. Die alleinige Regelung des gesamten Netzes aufgrund Viertel-Stunden-Mittelwerten ist nicht mehr tragbar. Allerdings bringt ein massiver Ausbau der IKT auch neue Probleme wie hohe Kosten, komplexe Strukturen und den Bedarf an performanten Hardware-Komponenten mit sich. Aus diesem Grund sind vor allem Lösungen interessant, die schon vorhandene Strukturen nutzen und ein Umdenken in der Betrachtungsweise der Problematik mit sich bringen. Allen voran ist hier der «Zellulare Ansatz» des VDE zu nennen. In den Werken [43, 227, 228] wird die Idee vorgestellt, dass Netz dezentral in autarke Energiezellen aufzuteilen. Jede Zelle soll sich selbst stabil regeln und verschiedene Energieformen (thermisch, elektrisch) miteinander koppeln. Aus mehreren kleinen Quartierzellen sollen dann auf gleicher Spannungsebene größere Zellverbände geschaffen werden, welche die Energiebalance zwischen den Quartierzellen anstreben. Diese Ausführungen und Ideen sind konkret formuliert, allerdings fehlt eine wissenschaftliche und theoretische Basis. Dieser Umstand soll neben der Portierung der kybernetischen Ansätze aus dem fEPM, die Grundlage und Rechtfertigung für die Ausführungen und Ideen dieser Arbeit sein, ein modulares, aktives und kybernetisches Energiemanagementsystem (EMS) aufzubauen.

### 1.3 Herausforderung, Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Aus der genannten Motivation und Problemstellung sowie dem aktuellen Stand der Technik ergeben sich für diese Arbeit folgende Herausforderungen und Zielsetzungen. Die Arbeit betrachtet schwerpunktmäßig das Szenario einer Ortsnetzquartier-Versorgung. Die genauen Details zu diesem werden im Kapitel 5 genannt. Diese virtuelle Grenze wird gezogen, weil es schwierig ist, alle Aspekte eines gesamten deutschen Energieversorgungsnetzes in einer Arbeit abzubilden. Auch durch die virtuelle Grenze sind weitere Annahmen zu treffen und Einschränkungen gegeben, die vor allem die Ausgestaltung der Simulationsmodelle und die Verfügbarkeit von realen Messdaten beinhalten. Im betrachteten Quartier wird vor allem das EMS eines Speicher-Containers sowie das EMS der eingeführten Rekursionsebenen darüber und darunter betrachtet. Nach der Konzepterstellung für das Management werden die erstellten Algorithmen und Strukturen simulativ validiert und auf Plausibilität überprüft. Hierzu wird das Quartier sowie die Zuleitung der nächst höheren Spannungsebene und der Speicher-Container im Modell abgebildet. Welche angesprochenen Vereinfachungen hierzu im Modell gemacht werden müssen, wird im Kapitel 7 erläutert. Im Sinne der Konzepterstellung wurde der light-Ansatz des kyELM in einer ersten Hardware-Iteration mit umgesetzt und im Projekt EEBatt getestet und validiert. Die erhaltenen Ergebnisse dienen der Erstellung des vollwertigen kyELM.

Für die Konzepterstellung wird die Theorie der Kybernetik in den Fokus gerückt. Vor allem das Viable System Model (VSM) – Modell lebensfähiger Systeme – von STAFFORD BEER wird schwerpunktmäßig erläutert und für das EMS-Konzept verwendet. Vorreiter für diesen Schritt sind die Arbeiten von GIOVANAZZI und FRÖSCHL im Bereich der Energieversorgung im Kraftfahrzeug. Die positiven Erfahrungen und Ergebnisse werden in dieser Arbeit auf die stationäre Anwendung des Energiespeichers zur Netzunterstützung übertragen. Am Ende sollte durch die Definition der passenden Schnittstellen ein Elektro-Fahrzeug, mit einem fEPM, nahtlos an ein Energienetz, verwaltet durch das kyELM, angeschlossen werden und interagieren können.

Somit ist die Zielsetzung dieser Arbeit der Entwurf eines Gesamtansatzes für ein aktives kybernetisches EMS und dessen Funktionsnachweis mit folgenden Schwerpunkten:

- Einführung in die Energieversorgung und das kybernetische Management.
- Erörterung der Grundlagen des VSM und Portierung des Modells in die Technik.
- Vorschlag für ein aktives und kybernetisches EMS samt ausgewählter Betriebsstrategie.
- Validierung des Ansatzes mit entsprechend abgestimmten Simulationsmodellen.
- Schaffung einer fundierten Grundlage für Folgearbeiten.

Bei den Ausführungen wird versucht folgende Fragestellungen zu klären:

- Was ist Management allgemein und wie ist ein EMS aufzubauen?
- Auf welchen Grundlagen basiert die Kybernetik und im Speziellen das VSM?
- Ist das VSM für die Anwendung in der stationären Energieversorgung geeignet?
- Wie kann die technische Problemstellung in einem VSM umgesetzt werden?
- Welche Betriebsstrategien können verfolgt werden?
- Ist ein modularer und skalierbarer Aufbau im Versorgungsnetz möglich?

Am Ende soll das aus der Anwendung des VSM resultierende kyELM alle wesentlichen Anforderungen an das EMS, wie Skalierbarkeit, Autonomie, Robustheit und Effizienz, erfüllen.

Allerdings stellt das in dieser Arbeit entstandene Konzept keinen direkt zu implementierenden Bauplan dar. Vielmehr zeigt es die nach dem VSM nötige Strukturierung sowie zu besetzenden Funktionen innerhalb des EMS in der stationären Energieversorgung auf.

## 1.4 Vorgehensweise

Zunächst werden in Kapitel 2 zum einen die nötigen Grundlagen zu Management-Methoden und -Ansätzen geliefert. Zum anderen werden die nötigen Begrifflichkeiten und Methoden der elektrischen Energieversorgung, -speicherung und -verteilung komprimiert erläutert. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Kybernetik, die kybernetischen Prinzipien und das VSM sowie Anwendungen davon betrachtet. Eine Vertiefung und ein Abgleich mit der physiologischen Ausgangsbasis, dem Nervensystem des Menschen, mit dem VSM erfolgt in Kapitel 4. Außerdem werden die Rekursion und Skalierbarkeit des VSM sowie ein Entwurfsschema zur Anwendung des Modells vorgestellt. In Kapitel 5 erfolgt die Betrachtung des EEBatt-Prototypen und des Ortsnetzquartiers Moosham. Letzten Endes wird aufgrund der Erkenntnisse der vorhergehenden Kapitel in Kapitel 6 der Aufbau und die Strukturierung des kyELM behandelt. Hierfür werden für jede eingeführte Rekursionsebene die definierten Betriebsstrategien erläutert. Das EMS-Konzept wird dann in Kapitel 7 mit Hilfe von Simulationsmodellen validiert. Den Abschluss der Arbeit bildet das Kapitel 8 mit der Zusammenfassung und einem Ausblick.



## 2 Managementsysteme und die elektrische Energieversorgung – ein Überblick

In diesem Kapitel werden zum einen Managementsysteme in verschiedenen Disziplinen – im speziellen das Energiemanagement – betrachtet. Zum anderen wird auf die relevanten Grundlagen der elektrischen Energieversorgung eingegangen, auf welchen die nachfolgenden Kapitel aufbauen. Das Thema der Energiespeicherung und -verteilung wird abgestimmt auf diese Arbeit erläutert. Hierbei sind vor allem Batteriespeichersysteme von Interesse. Diese werden mit anderen gängigen und für die stationäre Energieversorgung relevanten Speichertechnologien vorgestellt und eingeordnet.

### 2.1 Managementsysteme

Zunächst werden Managementsysteme in verschiedenen Disziplinen betrachtet. Diese beinhalten Ansätze und Methoden, welche der Kybernetik als Wissenschaft für komplexe Systeme zugeordnet werden können. Diese Ansätze sowie Methoden gilt es zu identifizieren und im weiteren Verlauf der Arbeit zu erläutern, bevor sie im Anschluss angewendet werden. Allgemein steht der Begriff des Managements nach dem deutschen Duden für die:

2.)

---

*„Leitung, Führung eines Großunternehmens, welche die Planung, Grundsatzentscheidungen und die Erteilung von Anweisungen umfasst[.]“*

---

[60]

In die Technik übertragen handelt es sich um eine Koordinations-Instanz für verschiedene Systembestandteile zur Erfüllung eines definierten Systemzweckes – zum Beispiel des Managements der im System vorhandenen Energie. Wodurch sich der Begriff des Energiemanagements einführen lässt. Im Folgenden wird aus unterschiedlichen Disziplinen der Begriff des Managementsystems weiter dargestellt. Danach wird im nächsten Abschnitt auf das Energiemanagement im Fahrzeug, im Gebäude und im Verteilnetz detaillierter eingegangen.

#### 2.1.1 Management in der Betriebswirtschaftslehre und Soziologie

Gerade im soziologischen und im betriebswirtschaftlichen Sinne ist das Management allgegenwärtig. In Unternehmen wird Management durch das Führen von Menschen und das Koordinieren von Ressourcen betrieben. Mit verschiedenen wissenschaftlichen Werkzeugen und Methoden werden alte und neue Ansätze stetig verbessert und untersucht.

**Tab. 2.1** – Dichotomisches Bild dominierender Denkmuster von Managementansätzen MALIKS, im Detail beschrieben in [141, S. 44]

| Konstruktivistisch-technomorphes Management...     | Systemisch-evolutionäres Management...                           |
|--|--|
| ...ist Menschenführung                             | ...ist Gestaltung & Lenkung ganzer Institutionen in ihrer Umwelt |
| ...ist Führung Weniger                             | ...ist Führung Vieler  |
| ...ist Aufgabe Weniger                             | ...ist Aufgabe Vieler  |
| ...ist direktes Einwirken                          | ...ist indirektes Einwirken                                      |
| ...ist auf Optimierung ausgerichtet                | ...ist auf Steuerbarkeit ausgerichtet                            |
| ...hat im Großen & Ganzen ausreichende Information | ...hat nie ausreichende Information                              |
| ...hat das Ziel der Gewinnmaximierung              | ...hat das Ziel der Maximierung der Lebensfähigkeit              |

Hier bietet SCHOENEBERG in [185] eine Zusammenfassung aktueller Arbeiten und Methoden zum Komplexitätsmanagement an. In ihrer Gesamtheit ergeben sich Vorgehensweisen, mit denen sich die Komplexität von Wirtschaftsprozessen und Fällen in der Soziologie beherrschen lassen. Als Beispiel sei auf die Basismaßnahmen des Komplexitätsmanagements nach SCHOENEBERG, auf die systemdynamischen Simulationsmodelle nach FORRESTER und die Beherrschbarkeit von komplexen und komplizierten Systemen nach SCHULZ hingewiesen. Alle drei genannten Beispiele werden im Detail in [185] beschrieben.

Neben SCHOENEBERG beschäftigt sich auch MALIK im Bereich des Managements komplexer Systeme und definiert hierbei zwei Betrachtungsweisen – die konstruktivistisch-technomorphe und die systemisch-evolutionäre –, welche in Tabelle 2.1 gegenübergestellt sind. Diese werden in [141] ausführlich eingeführt und diskutiert. Daraus abgeleitet sei an dieser Stelle auf das eigentliche Problem des Managements nach MALIK hingewiesen:

- 3.) 

---

 „[...] das Grundproblem von Management [ist] in der Beherrschung von Komplexität zu sehen.“ 

---

 [141, S. 33]

Weiter definiert er die Komplexität wie folgt:

- 4.) 

---

 „Komplexität als empirisches Merkmal von soziotechnischen Systemen bezeichnet die Mannigfaltigkeit von Zuständen und Zustandskonfigurationen von Systemen. Diese Mannigfaltigkeit resultiert im Prinzip aus der Interaktion von Systemen und Systemelementen.“ 

---

 [141, S. 33]

In ähnlicher Form definiert auch MILLING Komplexität:



5.)

---

*„Die Komplexität eines Systems wird nach systemtheoretischer Auffassung durch die Anzahl an Elementen, die Anzahl an Wechselwirkungen zwischen diesen Elementen sowie die Art dieser Wechselwirkungen bestimmt.“*

---

[150, S. 91]

Beide Definitionen der Komplexität zeigen, dass im Zuge von Managementprozessen einzelne spezielle Elemente des Ganzen betrachtet und gezielt koordiniert werden müssen. Mit den beiden genannten Ansätzen MALIKS kann laut seiner Aussage diese Komplexität beherrscht werden. Er empfiehlt vor allem den system-evolutionären Ansatz, bei welchem ein Regelwerk methodisch definiert werden kann, welches das allgemeine Verhalten des Ganzen definiert und somit ein überschaubares Management des Systems erlaubt. Demgegenüber wäre der konstruktivistisch-technomorphe Ansatz zu nennen, welcher das Wissen über Details im Sinne einer Konstruktion im technischen Sinne voraussetzt und somit ein hohes Maß an Komplexität schafft. Im Sinne des kybernetischen Managements schlägt MALIK folgende Vorgehensweise vor:

6.)

---

*„Organisiere das Unternehmen so, dass es sich so weit wie möglich selbst organisieren und selbst regulieren kann.“*

---

[140, S. 7]

Diese Aussage unterstreicht auch SCHWANINGER, der sich in diesem Feld des Managements bewegt. Er bringt in seinen Ausführungen [192, 193] neben kybernetischen Denkansätzen auch Methoden des System Thinkings mit in den zu betrachtenden Methodenpool. Als Beispiele seien hier genannt: Integrative Systems Methodology [191], System Dynamics [194, 195], Model for Systemic Control [197].

### 2.1.2 Management in der Informatik

Für Beispiele und Managementsysteme in der Informatik sind vor allem Algorithmusansätze oder andere daraus entstehende Strukturmodelle zu nennen. Ein Beispiel hierfür ist das Organic Computing Model, welches in [153, 243] beschrieben und in [5] wie folgt definiert wird:

7.)

---

*„Ein ‚organischer Computer‘ ist definiert als ein selbstorganisierendes System, das sich den jeweiligen Umgebungsbedürfnissen dynamisch anpasst. Organische Computer sind selbst-konfigurierend, selbst-optimierend, selbst-heilend und selbst-schützend.“*

---

[5, S. 2]

Mit dem Themenfeld des dezentralen Managements beschäftigt sich ROTH in [178], um die Komplexität in Cloud-Computing-Diensten zu beherrschen. Hierbei bedient er sich der Theorien und Ansätze des Organic Computing, die aus dem Autonomic Computing [118] Anfang der 2000er entstanden. Interessant ist hierbei, dass bei den vorgestellten Methoden

auch im kybernetischen Sinne gedacht wird. Autoren betrachten biologische Vorgänge wie das autonome Zusammenspiel des Nervensystems, den Ameisenalgorithmus [58] oder den Schwänzeltanz der Bienen bei ihrer Futtersuche [156]. Daraus werden am Ende Managementalgorithmen in die Informatik portiert sowie eine gesteuerte Selbstorganisation durch sogenannte Observer/Controller-Architekturen geschaffen. Diese Architekturen können unterschiedlich als zentrale, mehrschichtige, hierarchische und verteilte Architekturen aufgebaut werden. Im Bereich des Organic Computing spielt der Begriff der Emergenz eine wichtige Rolle. Im Teilkapitel 3.3 wird dieser genauer in Form eines kybernetischen Prinzips vorgestellt. Ähnlich wie ROTH untersucht SINSEL in [204] den Organic Computing Ansatz als Konzept zur Steuerung interagierender Prozesse in verteilten Systemen. Im Bereich der Informatik im Fahrzeug zeigt ADAM in [1] ein Konzept einer bionischen Elektrik/Elektronik-Architektur nach menschlichem Vorbild, welches ebenfalls auf Ideen des Organic Computing Models und der Kybernetik beruht.

### 2.1.3 Management in der Kybernetik

Durch die Wissenschaft der Kybernetik hat die Lehre im Management eine fundierte Ansammlung von Methoden und Modellen erhalten. Im Folgenden werden einige der wichtigsten Kybernetiker und ihre Arbeiten vorgestellt. Wie schon genannt, ist das oberste Ziel der Kybernetik, Methoden zur Beherrschung komplexer Systeme bereitzustellen.

Um eine Aussage darüber zu treffen wie komplex ein System ist, hat ASHBY die Varietät, als Maßzahl zur Messung der Komplexität, in [15] eingeführt. Weiter definiert er das Gesetz von der erforderlichen Varietät. Dieses wird näher im Teilkapitel 3.3 erläutert. Ergänzt wird das Gesetz durch das darüber hinaus existierende CONANT/ASHBY-Theorem, welches nach [47] und [91, S. 59] besagt, dass die Effektivität des Managementsystems von der Qualität des zugrunde liegenden Modells abhängt. Weiter definiert ASHBY in seinen Arbeiten zur Selbststeuerung und Selbstregulation [14, 15] den Entwurf des Homöostaten und den Begriff der Ultrastabilität. Alle Kriterien von ASHBY zusammengenommen ergeben einen Werkzeugkoffer zur Schaffung von stabilen und effizienten Managementsystemen.

Der nächste Vertreter der Kybernetik ist STAFFORD BEER, welcher mit der Begründung seines Viable System Models – Modell lebensfähiger Systeme – einen Grundstein in der Managementtheorie gelegt hat. Das Modell ist aus der Biologie des Nervensystems der Säugetiere abgeleitet. Im Abschnitt 3.2.1 und Kapitel 4 wird detailliert auf den Ansatz von BEER eingegangen. Einen Vergleich des traditionellen Managements und des kybernetischen Ansatzes von BEER zeigt ESPINOSA in [69, S. 644]. Durch diesen Vergleich wird klar, dass es wichtig ist, die internen und externen Vorgänge und Kommunikationswege der zu verarbeitenden Informationen zu betrachten. So wird klar, dass Systeme nicht nur als diskret und einfache Input/Output-Verknüpfungen gesehen werden dürfen und die Autorität sowie der Gehorsam alleine nicht immer zum Ziel führen. In einigen Fällen bedarf es ergänzend noch einer gesonderten Betrachtung wichtiger Parameter, Zustandsgrößen und deren zusammenhängenden Wirkgefüge und Dynamiken.

Deshalb wird an dieser Stelle noch auf das Sensitivitätsmodell von VESTER hingewiesen. In [230] bezeichnet VESTER die Biokybernetik als modellhafte Sichtweise ineinandergreifender vernetzter Abläufe in Struktur, Funktion und Organisation. Hierbei ist die Selbststeuerung als Teil des Systems anzusehen und nicht zwingend durch eine zentrale Instanz definiert. Über die

systemeigene Feedbackstruktur wird diese Regelung, unter Beachtung der komplexen Vorgänge in der Umwelt des Systems, realisiert. Zur Analyse der dabei auftretenden Wirkgefüge eines solchen vernetzten Systems empfiehlt VESTER das von ihm entwickelte Sensitivitätsmodell.

### 2.1.4 Management in der Regelungstechnik

Die Regelungstechnik als Lehre der Kybernetik hat in ihrer Definition nach LUNZE:

8.)

---

*„[...] die Aufgabe, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft.“*

---

[137, S. 1]

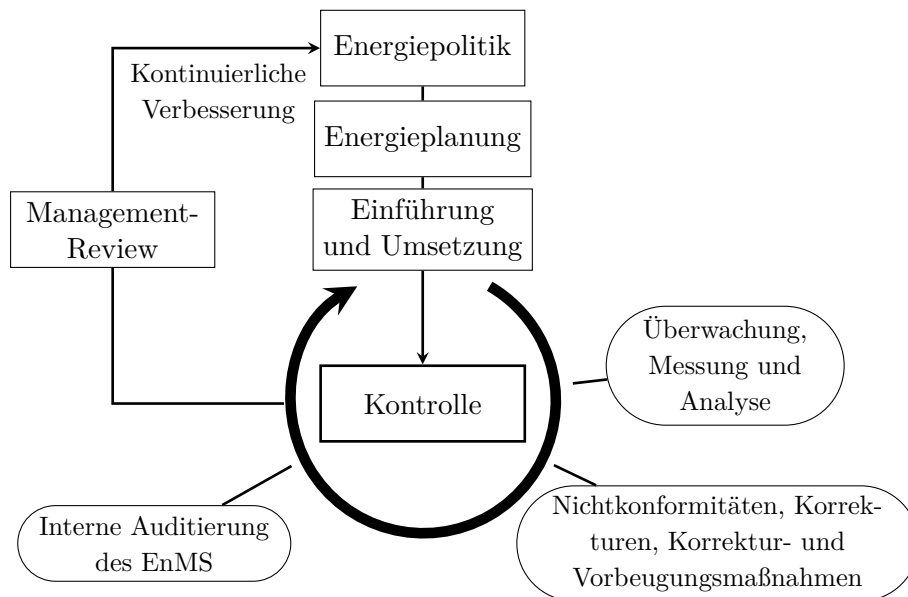
Hierbei ist im Sinne des Managements vor allem der „sich zeitlich verändernde Prozess“ interessant zu betrachten. Als Prozess kann hier die Veränderung in einem dynamischen System näher definiert werden, was im technischen Sinne durch eine Funktionseinheit mit sich zeitlich ändernden Größen repräsentiert wird. Zur Beherrschung dieser Systeme sind in der Regelungstechnik die beiden Ansätze der Steuerung und Regelung zu nennen. Die Vorteile der Regelung liegen klar in einem geschlossenen Wirkungskreis, der den Ausgang vor neuen Regeleingriffen mit dem Sollzustand vergleicht und entsprechend reagiert. Durch die Nutzung unterschiedlicher Regleransätze und -strukturen – wie zum Beispiel Feedforward-Regler, Kaskadenregelung, Regelkreise mit Hilfsregel- oder Hilfsstellgröße, Störgrößenaufschaltung, Vorsteuerung, etc. – unterstützt die Regelungstechnik die Managementtheorie mit Methoden und Ansätzen, die eine Grundlage für die Gestaltung effizienter Managementprozesse bilden.

### 2.1.5 Fazit zu Managementsystemen

Als Fazit zum Thema Managementsysteme in den vorgestellten Bereichen kann festgehalten werden, dass es beim Management generell um die Beherrschung von Komplexität geht. In den unterschiedlichen Bereichen haben sich verschiedene Modelle und Ansätze etabliert, um dieser Aufgabe gerecht zu werden. Zusammengefasst stellt sich heraus, dass in jeder Disziplin Parallelen zu kybernetischen Methoden und Ansätzen vorhanden sind oder diese explizit angewendet werden, aber keine deutliche Nennung erfolgt. Somit ist die Anwendung des VSM im EMS der stationären Energieversorgung eine valide Option. Für das Management in der technischen Anwendung wird deshalb im nächsten Teilkapitel im Detail auf das Energiemanagement eingegangen.

## 2.2 Energiemanagementsysteme – eine Übersicht

Nach den vorgestellten Bereichen des Managements in unterschiedlichen Disziplinen wird nach einer kurzen Zusammenfassung der Energiemanagement-Norm EN ISO 50001:2011 [159] in diesem Teilkapitel genauer auf das Energiemanagement in drei technischen Bereichen eingegangen. In der Norm wird der Begriff des Energiemanagements wie folgt definiert:



**Abb. 2.1** – Struktur eines Energiemanagementsystems nach EN ISO 50001:2011 [159, S. 8].

9.)

---

*„Gesamtheit miteinander zusammenhängender oder interagierender Elemente zur Einführung einer Energiepolitik und strategischer Energieziele, sowie Prozesse und Verfahren zur Erreichung dieser strategischen Ziele.“*

---

[159, S. 8]

Somit kann festgehalten werden, dass es beim Energiemanagement darum geht, Ziele im energetischen Sinne durch gezielte Steuer- und Regelungsprozesse zu erreichen. Diese Prozesse sollen nach der Norm einem stetigen Verbesserungsprozess unterliegen. Dieser wird im Projektmanagement als PDCA-Zyklus – Englisch für: Plan-Do-Check-Act-Cycle – bezeichnet. In Abbildung 2.1 ist die allgemeine Struktur eines Energiemanagementsystems nach EN ISO 50001:2011 [159] dargestellt. Zum EMS gehört immer ein nach der Norm definiertes Energiedatenmanagementsystem (EDMS), dieses liefert die Datenbasis mit der das EMS arbeitet. In [89, Kap. 5] wird dieses genauer definiert. An dieser Stelle seien folgende Schwerpunkte des EDMS genannt: Entwicklung eines Messkonzeptes, Erfassung/Messung der Daten, Auswertung/Analyse der Daten, Monitoring der Energie.

Bevor im Folgenden unterschiedliche Energiemanagementkonzepte näher betrachtet werden, ist der Begriff der Energie, wie er in dieser Arbeit verstanden wird, zu definieren. Nach der klassischen Physik und [106, 157, 163] gilt:

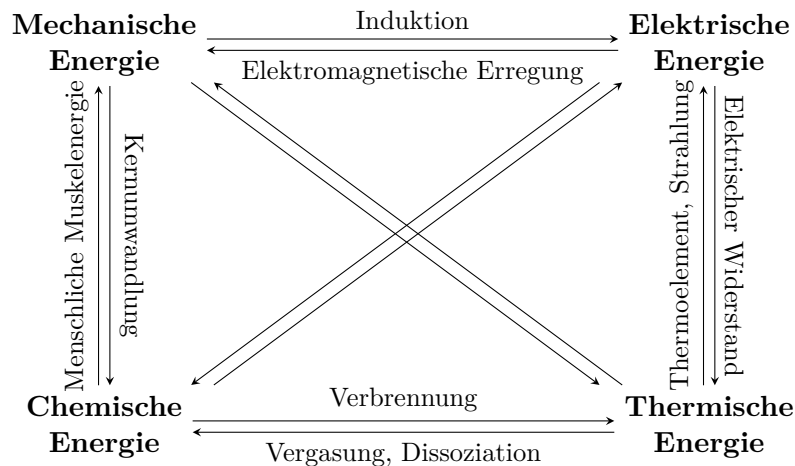
10.)

---

*„Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern ausschließlich nur in andere Energieformen umgewandelt, d. h. überführt werden.“*

---

[157, S. 9]



**Abb. 2.2** – Energieformen und Umwandlungsmöglichkeiten zwischen der mechanischen, elektrischen, chemischen und thermischen Energie nach [245, S. 6].

Für die im Folgenden vorgestellten EMS bedeutet das, dass die Begriffe Stromerzeugung oder Energieerzeugung im Zusammenhang mit der Energieversorgung aus physikalischer Sicht falsch sind. Aus physikalischer Sicht wird keine neue Energie gewonnen, sondern Energie unterschiedlicher Domänen ineinander überführt. Das typische Beispiel ist die Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie. Dies geschieht zum Beispiel bei einem Laufwasserkraftwerk. Dort treibt das Wasser eine Turbine mechanisch an und diese ist wiederum mit einer elektrischen Maschine verbunden, welche durch die Rotation eine elektrische Spannung aufbaut und so einen Strom in das Netz treibt. Mögliche Übergänge zwischen Energieformen zeigt Abbildung 2.2 nach [245, S. 6]. Das heißt für das Energiemanagement, dass die Energie nur durch Umwandlungsprozesse gespeichert oder genutzt werden kann. Diese physikalische Gegebenheit muss in den folgenden Ausführungen und dem zu definierenden Konzept beachtet werden. Im Weiteren werden beispielhaft EMS im Fahrzeug, im Gebäude und im elektrischen Verteilnetz vorgestellt.

### 2.2.1 Energiemanagement im Fahrzeug

Wie in der Einleitung dieser Arbeit erwähnt, ist das Energiemanagement im Fahrzeugbordnetz ein aktuelles Forschungsgebiet, das kybernetische Methoden zum Management des komplexen technischen Systems «Fahrzeug» einsetzt. In der mobilen Anwendung stellt das Energiemanagement einen sicherheitsrelevanten Faktor dar. Sollten aufgrund von Ausfällen in der Energieversorgung Fehler in Steuergeräten auftreten, so kann dies für die Insassen gefährliche Auswirkungen haben. Deshalb wird der sicheren und konstanten Energieversorgung der relevanten Fahrzeugfunktionen hohe Aufmerksamkeit in der Forschung zuteil.

Das elektrische Bordnetz wird dabei in unterschiedlichen Spannungsebenen – zum Beispiel im Bereich von 5 V bis 600 V – betrieben und wird entweder zentral [61] oder dezentral [91] geregelt. In folgenden Arbeiten [91, 119, 173, 181, 239] wird ein prädiktiv konditionierendes Managementsystem in seiner Umwelt beschrieben. Hierbei wird gezeigt, dass konditionierende Eigenschaften sowohl die Stabilität als auch die Effizienz des Zielsystems erhöhen. Die Folgen sind eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und eine Reduzierung der für den Betrieb

notwendigen Komponenten zur Energieversorgung. Hauptaufgabe des Managementsystems ist es, die Energieformen elektrisch, mechanisch oder thermisch in den Teilsystemen Antrieb, Fahrdynamik, Klimatisierung, Komfort und Infotainment unter Beachtung der Verfügbarkeit, der Stabilität und der Effizienz zu koordinieren. Immer unter der Prämisse, dass der Komfort des Nutzers gewährleistet wird. GIOVANAZZI, FRÖSCHL und ADAM haben Arbeiten zum Thema des Energiemanagements im Fahrzeug, welche kybernetischen Prinzipien folgen, durchgeführt. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf die Arbeiten [1, 84, 91] verwiesen.

In den Ansätzen und Methoden des EMS im Fahrzeug sind Parallelen zur stationären Energieversorgung zu sehen. Beiden gemein ist, im Falle eines stehenden und vollelektrischen Fahrzeuges, kann der Speicher verwaltet und im richtigen Moment gezielt als Puffer eingesetzt werden. Das Forschungsfeld des Vehicle-to-Grid (V2G) ist für diesen Interessenfall in der Literatur näher zu betrachten.

### 2.2.2 Energiemanagement im Gebäude

Aufgrund der generellen Situation im Energieversorgungsnetz – weg von fossilen und atomaren Brennstoffen, hin zu erneuerbaren Energiequellen – ist es laut [80] entscheidend, dass am Ende des Versorgungsnetzes ein Umdenken passiert. Darunter ist zu verstehen, dass die Verbraucher mitwirken und Gebäude so gebaut werden, dass nur noch in Notfällen oder Versorgungsengpässen Energie aus einem Verteilnetz bezogen werden muss. FREY spricht von «Smart Energy Systems» und meint damit Gebäude, die nach dem sogenannten «Passivhaus Baustandard» errichtet werden und somit sehr wenig Energie nach außen hin verlieren oder umgekehrt wenig Energie zum angenehmen Wohnen benötigen. Gleichzeitig sollen erneuerbare Energiequellen genutzt werden. Hier können Solarenergie – zur Wärmeerzeugung –, Photovoltaik-Speicher-Kombinationen – zur Energieversorgung – und effiziente Erdwärmepumpen – zur Heizung der Gebäude – aufgeführt werden. Abgerundet wird das Ganze durch die Nutzung eines voll integrierten und intelligenten EMS, das im Idealfall für das Management des Gebäudes standortbedingte Informationen – wie Sonneneinstrahlung und Klimaparameter – miteinbezieht.

Im Zuge der Steuerung und Regelung der Prozesse im Gebäude wird von der Gebäudeautomatisierung gesprochen. Diese wird in drei Ebenen – Management-, Automatisierungs- und Feldebene – eingeteilt. Näher ist dies in [80, S. 490] beschrieben. In [144] wird ein Managementansatz gezeigt, der die unterschiedlichen Lasten eines Mehrfamilienhauses oder Wohnblocks virtuell zu einer größeren Last verbindet. Neben weiteren intelligenten Kombinationen und der Beachtung der thermischen Energiedomäne ergibt sich so ein intelligentes und effizientes Gebäude-EMS, das in der Lage ist generelle Lastspitzen zu verhindern. [202] zeigt ein Gebäude-EMS, das sowohl thermische als auch elektrische Energie auf vorhandene Speicher aufteilt. Hierbei wird die Verteilung abgestimmt auf die Speichercharakteristiken und unter Beachtung einer Lang- und Kurzzeit-Energiebetrachtung. Bei diesem Vorgang werden stets die Batteriezyklen, der Ausstoß von Emissionen beachtet und versucht so klein wie möglich zu optimieren. Am Ende arbeitet das System trotz unbekannter Umweltbeeinflussungen effizient im Sinne der Batterielebensdauer und Gesamtsystemleistung. Für kommerzielle Gebäude wird in [205] und [206] ein Vorschlag für ein EMS basierend auf Multi-Agenten und Fuzzylogik präsentiert. Auch hier zeigt sich eine Reduzierung des Energieverbrauches durch das EMS ohne Komforteinbußen für den Nutzer.

### 2.2.3 Energiemanagement im Verteilnetz

Im Bereich des Verteilnetzes ist das Energiemanagement gerade durch die Möglichkeiten des Internet of Things (IoT) in einem Umbruch. Es erfolgt der Wandel von den früher durch die sogenannten Energiemanager, die sich mit Viertelstunden Mittelwerten telefonisch von Leitwarte zu Leitwarte abgestimmt haben, geführten Kraftwerken hin zu den mit moderner IKT ausgestatteten – zentral oder dezentral in Echtzeit – geregelten Kraftwerken.

Hierbei sind vor allem Cloud-Dienste und Multi-Agenten-Systeme zu nennen. Bestehend aus Kraftwerken – Energieerzeuger –, Haushalten – Energieverbrauchern – und Energiespeichern wird das Versorgungsnetz, je nach Größe als «Micro Grid» oder «Smart Grid» bezeichnet, sobald es vernetzt ist. Hierin erfolgt der gezielte Einsatz von IKT, um Systeme und Entscheidungen zu automatisieren und den Posten des Energiemanagers in eine Beobachtungs- und Überwachungsfunktion zu transformieren. In der Literatur finden sich Beispiele für unterschiedlichste technische Ausführungen. Ein genereller Vergleich von EMS-Ansätzen im Jahr 2013 wird in [7] beschrieben. Beispiele für EMS mit Multi-Agenten in der Anwendung werden in [18, 33, 57, 128, 131, 168] aufgezeigt. Die Beschreibung eines Stadtviertels mit eigenem EMS und einer hierarchischen Struktur als Management zeigt Literatur [201]. [115] beschreibt Standardisierungsprozesse von Regelstrategien für die Micro-Grid-Steuerung und die auftretenden Probleme bei der Integration von erneuerbaren Energien. [222] präsentiert einen auf verschiedenen Layern basierenden Micro-Grid-Kontrollansatz, der es erlaubt, das «Micro Grid» ohne großen Aufwand zwischen inselnetz- und netzgeführtem Betrieb zu wechseln. Einen weiteren Micro-Grid-Controller, der in Fehlerfällen stabil arbeitet, zeigt [30]. Im Bereich der dezentralen Regelung von Kleinanlagen beschäftigt sich [133] mit PV-Anlagen, die eine stabile Netzversorgung erlauben. Die Beschreibung eines virtuellen Kraftwerks und dafür mögliche Kontrollstrukturen übernehmen [134] und [136]. Sie präsentieren damit einen weiteren Ansatz für ein dezentrales EMS. Einen Vergleich von Regelalgorithmen für EMS zeigen [56] und [172], die ergänzend eine Koordination von der Einspeisung durch PV-Anlagen und Batteriespeichern vorschlagen. Im Bereich der Windenergieerzeugung zeigt [19] ein EMS, das eine Prädiktion einholt und damit entscheidet, wann der vorhandene Speicher geladen oder entladen wird. Wie schon beim Energiemanagement im Fahrzeug genannt, ist das Netz der Partner zum Fahrzeug-Speicher im Forschungsfeld des V2G-Themas.

### 2.2.4 Fazit des Energiemanagementüberblicks

Die Vorstellung der genannten Ansätze und Methoden zeigt, dass das klassische Energiemanagement in verschiedenen Bereichen, das nur Spannungs- und Stromverläufe oder gemittelte Viertelstundenverläufe als Referenz und Steuergrößen in Betracht zog, der Vergangenheit angehört. Die neuen Möglichkeiten von vernetzten und großflächig verteilten Informations- und Kommunikationstechnologien erlauben ein Management in Echtzeit einzurichten. Allerdings stößt dies gerade durch die hohe Anzahl an Teilnehmern an seine Grenzen. Die anfallenden Berechnungen sind nur durch entsprechende Rechenleistung und -kapazität in der verwendeten Hardware möglich. Weiter wird aktuell oft nur die elektrische Energie in die Überwachung und Regelung mit einbezogen. Andere Domänen wie die Wärmeenergie sollten gleichwertig in den Regelansätzen und Algorithmen Beachtung finden. Diese Kopplung erlaubt weitere Möglichkeiten der Regelung, Flexibilität und Speichermöglichkeiten für die betrachteten Energiedomänen. Die in naher Zukunft angedachte Kopplung der drei vorgestellten Bereiche

Fahrzeug, Gebäude und Verteilnetz ermöglicht ein gemeinsames Management und somit eine Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems. Für das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept soll dieser Gedanke in die Erstellung mit aufgenommen werden.

### 2.3 Elektrische Energieversorgung in Deutschland

Im Folgenden wird ein für diese Arbeit nötiger Einblick in die Struktur und das Vorgehen der elektrischen Energieversorgung in Deutschland gegeben. Eine allumfassende Themenbehandlung würde den Rahmen der Arbeit sprengen, weshalb auf folgende Literatur [50, 117, 143, 214] – ergänzend zu den im Verlauf des Teilkapitels verwendeten Quellen – hingewiesen wird. Schwerpunkt der hier gegebenen Einführung sind die nötigen Grundlagen des Netzaufbaus und der Regelung, um einen Batteriespeicher zu integrieren und ein Energiemanagement durchführen zu können. Weiter wird ein kurzer Einblick in mögliche Speichertechnologien und gesetzliche Rahmenbedingungen gegeben. Als erstes werden die Eigenschaften der Elektrizität aufgeführt, die sie nach NIEDERHAUSEN zum favorisierten Energieträger im Versorgungsnetz machen:

11.)

---

*„Elektrizität weist Eigenschaften auf, die kein anderer Energieträger hat:*

- *Elektrizität ist der Energieträger mit maximaler Energie.*
- *Elektrizität unterliegt nicht den Gesetzen der Thermodynamik, weshalb mit ihrem Einsatz höchste Temperaturen erreichbar sind.*
- *Elektrizität ist, da eine Energie des elektro-magnetischen Feldes, ein praktisch masse- und volumenloser Energieträger.*
- *Elektrizität emittiert am Ort ihrer Nutzung keine Emissionen, abgesehen von Lärm und Wärme.“*

---

[157, S. 18]

Weiter kann im Allgemeinen in der Energieversorgung zwischen den beiden Netzformen Insel- und Verbundnetz [107, S. 67–71] unterschieden werden. Hierbei zeichnet sich die Insel-Variante dadurch aus, dass es ein kleines Netz mit wenigen Erzeugern ist und einer dieser Erzeuger die Spannungs- und Frequenzlage vorgeben muss. Im Verbundnetz hingegen ist es außerdem nötig, als Gesamtsystem zu agieren und die Koppelstellen zu den Partnernetzen auf angepasste Spannungs- und Frequenzlage zu regeln.

Generell befindet sich die Energieversorgung in Deutschland im Wandel. Grund hierfür sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2000 inklusive einigen beinhalteten Reformen daraus, der Ausstieg aus der Atomenergie bis 2022 und dem in 2020 beschlossenen Braunkohleausstieg bis 2038 [183]. Außerdem soll der Anteil an Elektro-Fahrzeugen mit einem Ausbau der Ladeinfrastruktur erhöht werden, und bei den Heizsystemen erfolgt der Trend hin zu elektrischen Wärmepumpen [40, 161]. Wie eingangs erwähnt, ist das Problem bei diesen Änderungen der Umstieg auf erneuerbare Energieträger. Diese unterliegen einer volatilen Einspeisung, wodurch es zum Versorgungsengpass kommen kann. Somit müssen etwaige Leistungsüberschüsse anderweitig durch Speicherlösungen gepuffert werden. Eine detaillierte Erläuterung der erneuerbaren Energiequellen und deren Energieeffizienz liefert GÜNTHER in [99, Kap. 4]. Die für diese Arbeit relevante Technologie ist die Nutzung der Solarenergie,



**Tab. 2.2** – Die Tabelle zeigt die an der Energieerzeugung in Deutschland beteiligten Energieträger, in den Jahren 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 und 2018 nach [4]. Hierbei ist der Trend zu erkennen, dass in Deutschland aufgrund der Energiewende ein Wechsel von fossilen und nuklearen Energieträgern hin zu den erneuerbaren Energieträgern stattfindet.

| Energieträger          | 1995   | 2000   | 2005   | 2010   | 2015   | 2018   |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Braunkohle             | 31,1 % | 25,7 % | 24,7 % | 23,0 % | 23,8 % | 22,5 % |
| Steinkohle             | 25,6 % | 24,8 % | 21,5 % | 18,5 % | 18,2 % | 12,8 % |
| Kernenergie            | 27,7 % | 29,5 % | 26,2 % | 22,2 % | 14,2 % | 11,7 % |
| Erdgas                 | 6,5 %  | 8,5 %  | 11,7 % | 14,1 % | 9,6 %  | 12,8 % |
| Mineralölprodukte      | 2,0 %  | 1,0 %  | 1,9 %  | 1,4 %  | 1,0 %  | 0,8 %  |
| Erneuerbare darunter:  | 3,6 %  | 6,6 %  | 10,2 % | 16,7 % | 29,1 % | 35,2 % |
| - Windkraft (onshore)  | 0,3 %  | 1,6 %  | 4,5 %  | 6,1 %  | 11,1 % | 14,5 % |
| - Windkraft (offshore) | k. A.  | k. A.  | k. A.  | k. A.  | 1,3 %  | 3,0 %  |
| - Wasserkraft          | 4,0 %  | 4,3 %  | 3,1 %  | 3,3 %  | 2,9 %  | 2,6 %  |
| - Biomasse             | 0,1 %  | 0,3 %  | 1,8 %  | 4,6 %  | 6,9 %  | 7,0 %  |
| - Photovoltaik         | 0,0 %  | 0,0 %  | 0,2 %  | 1,8 %  | 6,0 %  | 7,1 %  |
| - Hausmüll             | 0,3 %  | 0,3 %  | 0,5 %  | 0,9 %  | 0,9 %  | 1,0 %  |
| Übrige Energieträger   | 3,2 %  | 3,9 %  | 3,8 %  | 4,1 %  | 4,1 %  | 4,2 %  |

welche durch PV-Anlagen auf Hausdächern in elektrische Energie umgewandelt werden kann. In der Verteilung der in Deutschland verwendeten Energieträger ist der Trend hin zu den erneuerbaren Energieträgern auch beobachtbar. In Tabelle 2.2 sind die Zahlenwerte ersichtlich. Anhand dieser ist die Verlagerung der Anteile der unterschiedlichen Energieträger seit 1995 nachvollziehbar. Die Zahlenwerte für alle Jahre sind in [4] aufgeführt und werden jährlich aktualisiert. An dieser Stelle sei die Definition des Primärenergieträgers gegeben. Nach [99, S. 49] ist dies der erste produzierte nutzbare Energieträger. In Tabelle 2.2 sind dies zum Beispiel Braunkohle, Steinkohle, Uranerze, Erdgas, Erdöl, strömendes Wasser, Biomasse oder auch die Sonnenstrahlung. Ergänzt werden sie durch Holz und Torf. Die Endenergie ist demgegenüber die Energie, die dem Verbraucher über das Energiesystem übergeben wird [99, S. 54–55]. Eine zukünftige Erweiterung dieser transportierbaren Energieträger ist die Verknüpfung der Strom- und Gasversorgung über das Systemspeichermedium Methan oder Wasserstoff im Rahmen der sogenannten Power-to-Gas-Anwendung [99, S. 154].

Neben dieser Verlagerung der Anteile der einzelnen Energieträger kommt es im Verteilnetz auch zu einer Veränderung in der Energieflussrichtung. Das Netz ist nach dem Top-Down-Prinzip ausgelegt und erfährt durch die dezentrale Einspeisung von Photovoltaik-Energie und Windkraft in den Ortsnetzen eine bidirektionale Belastung durch eine Umkehr des Energieflusses. Weiter folgt dem hohen Anteil an erneuerbaren Energien ein Auseinanderdriften von Erzeuger- und Verbrauchszentren. Der Grund liegt darin, dass große Wind- und Photovoltaik-Anlagen nicht in oder nahe den Ballungszentren errichtet werden, sondern dort, wo der Energieträger vorhanden ist. Beispielhaft für die Windkraft sind dies Offshore-Anlagen in Nord- und Ostsee.

Mit diesen Anlagen verbunden ist der mit großem Aufwand nötige Ausbau von großen Nord-Südtrassen mit Hochspannungs-Gleichspannungs-Übertragungsleitungen (HGÜ) und neuen Hochspannungsleitungen bis 380 kV [40, S. 112–113]. Der aktuelle Stand der Arbeiten und Projekte kann [147] entnommen werden. Neben dem Netzausbau ist außerdem noch zu

beachten, dass durch den Wechsel der Primärenergieträger auch ein Wegfall der sogenannten rotierenden Massen auftritt. Diese und die mit ihr verbundene schnelle Möglichkeit der Frequenzstabilisierung muss durch die als Ersatz eingesetzten Leistungselektronikkomponenten ausgeführt werden. Eine Übersicht über Möglichkeiten und neue Herausforderung dieses Wechsels bietet KROPOSKI in [124]. Im Abschnitt 2.3.4 wird genauer auf die Spannungs- und Frequenzhaltung eingegangen.

Eine weitere Folge der Energiewende ist in der Verschiebung der Anteile der Kraftwerksanlagen und der üblichen Eingruppierung in Grund- (Braunkohle-, Kernenergie-, Laufwasseranlagen, etc.), Mittel- (Steinkohle-, Wind-, PV-Anlagen, etc.) und Spitzenlastkraftwerke (Pumpspeicher- und Gasturbinenanlagen) erkennbar. Auch dies erfordert ein Umdenken in der Strukturierung und dem Management des Energieversorgungssystems [107]. Mögliche Szenarien schlagen einen Wechsel von einem zentralen hin zu einem dezentralen Elektroenergiesystem vor. In [183, S. 11] stellt SCHEFFLER beide Varianten wie folgt dar:

12.)

---

*„Zentral gespeiste Elektroenergiesysteme:*

- *Deckung des zeitlich variablen elektrischen Leistungsbedarfes räumlich verteilter Abnehmer. Leistungsnachführung mit zentralen, regelbaren, technisch hoch ausgestatteten Kraftwerken*
- *Netzbetriebsführung über Fahrplanleistungen und Kommunikation zwischen Fachpersonal des Netzbetreibers und des jeweiligen Erzeugers*
- *Netzplanung mit Einzelfallberechnung zur Netzanbindung der Erzeuger*

*Dezentral gespeiste Elektroenergiesysteme:*

- *Aufnahme und Weiterleitung der elektrischen Leistung einer Vielzahl bislang nur teilweise steuerbarer, stark fluktuierender und technisch einfach ausgestatteter Erzeuger ohne Fachpersonal*
- *Einführung einer entgegengesetzten Leistungsflussrichtung in den Betrieb der dafür nicht geplanten Netze*
- *Netzplanung mit Einzelfallberechnung für alle potenziellen Erzeuger wirtschaftlich nicht vertretbar“*

---

[183, S. 11]

Aufgrund der Dezentralität spricht SCHEFFLER vom sogenannten «Flächenkraftwerk», das auf Verteilnetzebene viele kleine Anlagen zu einer großen oder virtuellen Anlage verbindet. Hierfür wird in der Literatur der Begriff des «virtuellen Kraftwerkes» [157, S. 134–135] verwendet. Durch die Vernetzung und das Hinzufügen einer intelligenten Regelung ist der Transfer in die begriffliche und thematische Welt eines sogenannten «Smart Grids» [40, 157, 163, 183, 188] erlaubt. BUCHHOLZ definiert ein «Smart Grid» wie folgt:

13.)

---

*„Ein Smart Grid ist ein elektrisches Netz, das die Aktionen aller seiner Nutzer – Erzeuger, Verbraucher und Speicher – intelligent integriert, um die effiziente, nachhaltige, wirtschaftliche und sichere Elektroenergieversorgung zu gewährleisten.“*

---

[40, S. 4]

**Tab. 2.3** – Die Tabelle zeigt einen Auszug, der für diese Arbeit zu beachtenden Kennzahlen im Bereich der Energieversorgung für die beiden Netz charakterisierenden Werte der Spannung und Frequenz in der Nieder- und Mittelspannung. Für Werte der Hochspannung und des Schwingungsverhaltens sei auf die DIN Norm 50160 [160] verwiesen.

|                         | Niederspannung                       | Mittelspannung                      | Erfassung            | Anforderung                          |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Frequenz                | 50 Hz $\pm 1$ %<br>50 Hz +4 %, –6 %  | 50 Hz $\pm 1$ %<br>50 Hz +4 %, –6 % | 10 s<br>Mittelwert   | 99,5 % in 1 Jahr<br>100,0 % der Zeit |
| Nennspannung $U_n$      | 230 V Leiter–Erde                    | Netzbezogen                         |                      |                                      |
| langsame Änderung $U_n$ | $U_n +10$ %, –15 %<br>$U_n \pm 10$ % | $U_n \pm 10$ %                      | 10 min<br>Mittelwert | 100 %<br>95,0 % in 1 Woche           |

Somit braucht ein Netz aktive Komponenten, die nach [183, 242] eigeninitiativ in verschiedenen Situationen sowohl agieren als auch reagieren können. Ergänzt wird diese Fähigkeit der Teilnehmer durch eine gezielte Interaktion untereinander. Hier wird von sogenannten Agenten gesprochen. Im späteren Verlauf dieser Arbeit wird sich noch zeigen, dass die genannten vier Eigenschaften (eigeninitiativ, agieren, reagieren und interagieren) auch im Rahmen der Kybernetik eine Rolle spielen.

An dieser Stelle sei ergänzt, dass im Bereich der Niederspannungsnetze oder kleinen Versorgungsgebieten in Stadt- oder Dorfgröße die Literatur nicht mehr von Smart sondern «Micro Grids» spricht [245, S. 512]. Weiter ist auf die in der Energieversorgung vorhandenen Qualitätsbegriffe oder auch Kennzahlen hingewiesen, die in der DIN Norm 50160 [160] definiert werden. Diese Norm stellt einen europäischen Mindeststandard dar und ist für die Gestaltung von Rahmenbedingungen im Bereich des Energiemanagements zu beachten. In Tabelle 2.3 ist eine Auswahl an – für diese Arbeit wichtigen – Kennzahlen für die Nieder- und Mittelspannung eingetragen. Sollten für den Leser noch weitere Werte von Interesse sein, sei auf die DIN Norm 50160 [160] selbst verwiesen. Abschließend sei für einen ergänzenden Ausblick auf zukünftige Themen und noch am Anfang stehende Weiterentwicklungen im Bereich der elektrischen Energieversorgung auf [237] verwiesen. In den nun folgenden Abschnitten wird detaillierter auf die Energieverteilung und -speicherung, rechtliche Themen sowie die Spannungs- und Frequenzhaltung im Speziellen für das Niederspannungsnetz eingegangen.

### 2.3.1 Elektrische Energieverteilung

Im Bereich der elektrischen Energieverteilung ist für diese Arbeit speziell das Wissen über die im Netzaufbau eingesetzten Komponenten, Betriebsmittel, Spannungslagen und der strukturelle Aufbau des Verteilnetzes von Interesse. Zwischen den Ländern der Welt kann es zu Unterschieden in den Betriebsmitteln kommen. Aus diesem Grund wird für Deutschland im Folgenden nach [49, S. 4] und [183, S. 179] eine Auswahl an Betriebsmitteln vorgestellt:

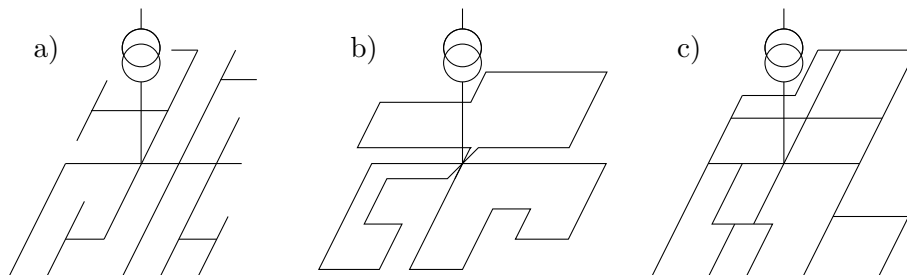
- Elektrische Betriebsmittel:
  - Elektrische Maschinen inklusive der Transformatoren und E-Spulen
  - Primärtechnik mit:
    - \* Leitungen (Freileitung, Kabel)
    - \* Schaltgeräten (unter anderem Leistungsschalter, Trenner)

- \* Sammelschienen
- \* Schaltanlagen (Freiluftanlagen, Innenraumanlagen)
- \* Wandler (z. B. Strom-, Spannungswandler)
- Sekundärtechnik mit:
  - \* Netzschutz
  - \* Lokal- und Fern-Steuerung
  - \* Messung und Zählung
  - \* Hilfsspannungsversorgung
  - \* Spannungs- und Frequenzregelung
- Bauliche Anlagen:
  - Gebäude
  - Masten
  - Blitzschutz

Für die erste Einteilung des Verteilnetzes wird die Spannungslage der jeweiligen Netzebene benutzt. In Deutschland liegt hier ein hierarchischer Aufbau vor. Dieser ergibt sich nach [49, S. 6] und [107, S. 82] wie folgt:

- **Höchstspannung:** Verbundsystemverteilung (380 kV oder 220 kV)
- **Hochspannung:** Regionalverteilung (110 kV oder 60 kV)
- **Mittelspannung:** Lokalverteilung (20 kV oder 10 kV)
- **Niederspannung:** Kleinverteilung (0,4 kV)

Für die weitere Strukturierung des Netzaufbaus existieren neben der Spannungslage die drei gängigen Formen des Strahlen-, Ring- und Maschennetzes. In Abbildung 2.3 sind diese schematisch dargestellt. Die genannten Netzaufbauformen geben vereinfacht die Anzahl möglicher Wege wieder, die der elektrische Strom – und damit die Energie – durch die Einspeise- und Abnahmepunkte im Netz wählen kann. Im Strahlennetz besteht hierfür genau eine Möglichkeit, um vom Einspeisepunkt – dem Transformator – zum Abnahmepunkt – einem beliebigen Haushalt – zu gelangen. Natürlich sind vom Einspeisepunkt und von einzelnen Netzstrahlen mehrere Verzweigungen möglich. Dies hat allerdings zur Folge, dass im Falle einer Störung oder eines Betriebsmittelausfalles aus Sicht des Einspeisepunktes für alle Netzteile hinter dem betroffenen Betriebsmittel eine Versorgungsunterbrechung eintritt. Demgegenüber steht allerdings ein kostengünstiger und klar strukturierter Aufbau, der einen einfachen Netzbetrieb erlaubt. [183, S. 178]



**Abb. 2.3** – Einfache Darstellung der drei gängigen Netzaufbauformen a) Strahlen-, b) Ring- und c) Maschennetzes nach [183, S. 178].

Wird im Strahlennetz eine geschlossene Verbindung von einem Endpunkt zum Einspeisepunkt des Netzes geschaffen, so entsteht ein Ringnetz. Dadurch ergeben sich zwei mögliche Wege für den elektrischen Energietransport von der Speisestelle hin zum Abnehmer. Im oben genannten Fehlerfall ist bei vorausschauender Planung trotzdem noch die Netzanbindung aller am Ring hängenden Abnehmer und Einspeiser, wie im Normalbetrieb, möglich. Die Vorteile des einfachen Betriebes eines Strahlennetzes werden in ein Ringnetz dadurch übertragen, dass schließ- und öffnbare Trennstellen eingebaut werden, um das Netz als Strahlennetz zu betreiben. Folgen sind allerdings ein höherer Aufwand im Aufbau des Netzes und der damit verbundenen höheren Investitionskosten. [183, S. 178]

Werden in einem gerade beschriebenen Ringnetz noch weitere Stromwege eingeführt, so spricht die Literatur von einem Maschennetz. Dadurch wird die Anzahl an möglichen Wegen zwischen Einspeisung und Abnehmern weiter im Vergleich zum Ringnetz erhöht. Auch im Fehlerfall sind mehrere Wege für die elektrische Energie vorhanden. Wie bei den Ringnetzen ist der Aufwand für den Betrieb und den Bau eines solchen Netzes erhöht und mit einem finanziellen Mehraufwand verbunden. Der Betrieb des Maschennetzes kann durch das Einfügen von gezielt schaltbaren Trennstellen im Normalbetrieb wie ein Ring- und ein einfaches Strahlennetz vorstattgehen. [183, S. 178–179]

Unabhängig von den in diesem Abschnitt beschriebenen Spannungsebenen und Strukturen des Netzaufbaus, muss im Falle eines Fehlers die Versorgung der am Netz hängenden Teilnehmer gewährleistet sein. Im Allgemeinen wird dies durch das sogenannte  $(n-1)$ -Ausfallkriterium geregelt. Das heißt erst ab dem gleichzeitigen Auftreten von zwei Fehlern kann und darf es zu Versorgungsunterbrechungen im Netz kommen. Ein einzelner Fehler muss beherrscht werden und darf nicht zu Versorgungsunterbrechungen führen. Für die einzelnen Netzebenen haben sich so im Laufe der Zeit unterschiedliche Strukturen und Komponenten als zweckmäßig erwiesen. Das Kriterium und die Verfahren sind in der Literatur [49, 51, 183] näher beschrieben. [107, S. 82]

Zusammengefasst kann für das Verteilnetz festgehalten werden, dass in ihm eine modulare Struktur und Rekursivität vorhanden ist, die sich durch unterschiedliche Netzaufbautypen und Spannungslagen charakterisieren lässt. Im nächsten Abschnitt wird eine Einführung in die relevanten Themen im Bereich der elektrischen Energiespeicherung gegeben.

### 2.3.2 Elektrische Energiespeicherung

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Einsatz eines chemischen Batteriespeichers. Trotzdem soll in diesem Abschnitt ein kurzer Überblick über mögliche Speicherarten im elektrischen Energieversorgungsnetz gegeben werden. In diesem bedienen Speicher den zeitlichen und das Netz den räumlichen Energieausgleich [211, S. 33]. Für die Literatur zum Thema Energiespeicher sei neben den bereits in diesem Abschnitt erwähnten auch auf die beiden Werke [116, 186] hingewiesen. Im Bereich der Batteriespeicher werden außerdem mögliche Anwendungen genannt, die für die spätere Konzepterstellung und für die Ausrichtung der Betriebsstrategie erforderlich sein werden.

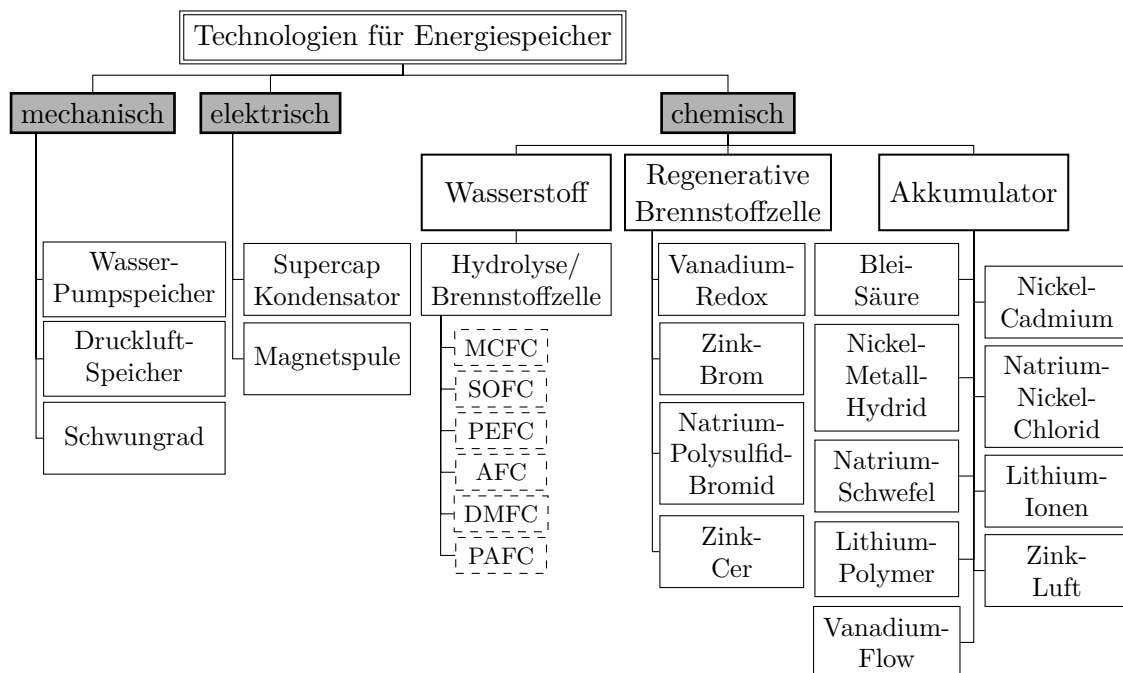
Generell haben Energiespeicher die Aufgabe, eine räumliche und zeitliche Entkopplung zwischen Erzeugung und Verbrauch zu ermöglichen. Dieser Vorgang soll mit so wenig wie möglich auftretenden Verlusten während des Einspeicher-, Speicher- und Ausspeicherprozesses – äquivalent zu Lade-, Speicher- und Entladeprozess – der Energie stattfinden. Vor allem

ist dies für die Regelung des Netzes im Bereich der Frequenz- und Spannungshaltung bei zunehmendem Einsatz von erneuerbaren Energien nötig. Generelle Anforderungen an Speicher sind nach HEUCK in [107, S. 56–61]:

- geringe spezifische Kosten und Platzbeanspruchung pro Kilowattstunde
- eine hohe Lebensdauer
- hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen
- hoher Gesamtwirkungsgrad
- geringe Selbstentladung
- geringer Installation- und Wartungsaufwand
- hohe Umweltverträglichkeit

Neben der Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Speichertechnologien kann allgemein zwischen direkten und indirekten Speichern, je nach Art der Energiewandlung, unterschieden werden. Direkte Speicher führen keine Zwischenwandlung im Lade- und Entladeprozess durch, weshalb sie einen höheren Wirkungsgrad erreichen können. Allerdings ist nur eine begrenzte Energiemenge wirtschaftlich speicherbar. Abbildung 2.4 zeigt eine Übersicht und Einordnung einzelner im Nachgang gezeigter Energiespeicher-Technologien.

Parallel zu dieser sei auf die Veröffentlichung [72] von FARROKHABADI hingewiesen, der gängige Energiespeicherarten für ein «Micro Grid» aufzeigt und einen Überblick gibt, wie der Einsatz zur Stabilisierung des Netzes dienen kann. Eine Bewertung eines Teiles der dargestellten Speicher führen VIERNSTEIN und MÜLLER in [155] durch. Ähnlich wie die Studie [92] zeigen



**Abb. 2.4** – Nach [157, S. 156] zeigt die Abbildung eine Übersicht von möglichen Speichertechnologien. Für die Brennstoffzellenarten ergeben sich die Abkürzungen wie folgt: MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-); SOFC – Solid Oxide Fuel Cell (Oxidkeramik-); PEFC – Polymer Electrolyte Fuel Cell; AFC – Alkaline Fuel Cell (alkalische); DMFC – Direkt-Methanol-Fuel Cell; PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure)

beide Quellen typische Anwendungsfälle für den netzdienlichen Betrieb mit Fokus auf die Batteriespeichertechnologie. Die Betrachtung ist hierbei für unterschiedliche Spannungsebenen des Netzes definiert. Weiter wird in [92] kurz zusammengefasst, wofür Energiespeicher in der Mittel- und Niederspannungsebene eingesetzt werden können. Im Grunde werden die Ergebnisse der ETG-Taskforce des VDE beschrieben, die in einer Studie [93] veröffentlicht wurden. Die Ergebnisse zeigen zum Beispiel eine SWOT-Analyse der Lithium-Ion-Batterie, die rechtlichen Rahmenbedingungen und einen Vergleich mit der Speicherentwicklung in den USA auf. Des Weiteren werden folgende Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsfelder für Batteriespeicher herausgestellt und für die Anwendung in 2015 und 2025 verglichen:

- Eigenverbrauchsoptimierung für Haushalte und Gewerbe
- Versorgung netzferner Kunden
- Erhöhung der Versorgungsqualität
- Bereitstellung von Primärregelleistung
- Vermarktung der Energie in Regelenergiemärkten (Sekundärleistung, Minutenreserve)
- Vermeidung und Verzögerung von Netzausbau im Verteilnetz

Diese vorgestellte Auswahl aus verschiedenen Verantwortungsbereichen in der Netzinfrastruktur und die Anwendungsfälle für Batteriespeicher in den jeweiligen Netzbereichen erscheinen am meisten benötigt und am ehesten umsetzbar zu sein. Als Beispiel für die Teilnehmer an den Studien seien Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber, (Strom-)Erzeuger, Bilanzkreisverantwortliche, Stromvertriebsgesellschaften und Stromkunden genannt. Im Folgenden erfolgt nun eine nähere Betrachtung gängiger Energiespeicher-Technologien für die Energieversorgung in Deutschland. Anzumerken ist, dass sich manche der Technologien noch im Forschungsstadium befinden und ein Großeinsatz aktuell noch nicht rentabel ist. Zur weiteren Recherche ist bei jedem Speicher ein Hinweis auf die verwendete und entsprechende Literatur gegeben. Die Betrachtung wird in mechanische, elektrische, chemische und elektrochemische Speicher eingeteilt:

#### Mechanische Speicher – Pumpspeicher:

([107, S. 56], [127, S. 7], [157, S. 143–146], [211, Kap. 9.2] & [245, S. 529–534])

Pumpspeicherwerke haben den Vorteil der hohen Energiekapazität, zum Beispiel können je nach Größe hohe vierstellige Megawattstunden-Bereiche erreicht werden, allerdings mit dem großen Nachteil des entsprechend benötigten Flächenbedarfes. Die Energie wird in Form von potenzieller Energie gespeichert und mithilfe von verschiedenen Turbinenformen in elektrische Energie im Kraftwerk umgewandelt. Der formelmäßige Zusammenhang zwischen dem Abflussvolumen  $V$ , der Fallhöhe  $h_p$ , der Wasserdichte  $\rho$  und der Erdbeschleunigung  $g$  lautet wie folgt:

$$E_{\text{Pumpspeicher}} = V \cdot h_p \cdot \rho \cdot g \quad (2.1)$$

Nach NIEDERHAUSEN [157, S. 159] ist hiermit ein Wirkungsgrad von circa 80% bei einer Verlustrate von 1% pro Stunde möglich. Weil das Platzangebot für Pumpspeicher in Deutschland limitiert ist, wird in der Forschung über andere Arten diskutiert, die dem Prinzip einer potentiellen Energieänderung ähnlich sind. Nach [211, Kap. 9.2] sind dies Ringwallspeicher, die in ebene Landschaften gebaut werden, Staustufenspeicher, die das natürliche Gefälle nutzen, eine Nachnutzung von gefluteten Bergbaurevieren, oder Kugelpumpspeicher, die die Druckdifferenz der hohen Wassersäule eines Sees oder Meeres ausnutzen können. Ergänzt werden diese Ansätze durch die Idee von

Lage-Energiespeichern oder hydraulischen Wasserspeichern nach [245, S. 535–537]. Hierbei werden große Gesteinsblöcke hydraulisch mit Wasser angehoben. Entfällt der Gegendruck kann die gespeicherte potentielle Energie ähnlich einem Pumpspeicher durch Turbinen in elektrische Energie gewandelt werden.

### **Mechanische Speicher – Druckluft-, Kavernen-, Solespeicher:**

([107, S. 57], [127, S. 8], [157, S. 147, 153], [211, Kap. 9.1], [237, Kap. 11] und [245, S. 537–542])

Die Ausnutzung von stillgelegten Bergwerken und unterirdischen Kavernen erlaubt es, in Kombination mit Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke Energie zeitlich flexibel speicherbar zu machen. Neben der rein elektrischen Nutzung kann die beim Prozess entstehende Wärme in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt werden, was den Wirkungsgrad der Anlage von 40 % auf 70 % ansteigen lässt. Die Verlustrate (ohne Zeitangabe) liegt je nach Literatur bei 25 % bis 35 %. Gegenüber den Pumpspeichern ist die Druckluft aufgrund der vorhandenen Speicherorte flexibler einsetzbar, allerdings stehen die Kavernen auch für andere Anwendungen – wie der Wasserstoff- oder Kohlendioxid-Speicherung – mit in der Diskussion. Der formelmäßige Zusammenhang zwischen dem Abströmvolumen  $V$ , der Luftdichte  $\rho$  und dem Überdruck in der Kaverne  $\Delta p$  lautet wie folgt:

$$E_{\text{Druckluftspeicher}} = V \cdot \rho \cdot \Delta p \quad (2.2)$$

### **Mechanische Speicher – Schwungmassenspeicher:**

([107, S. 57], [127, S. 8–9], [211, Kap. 9.3] und [245, S. 549–551])

Grundsätzlich ist jeder Rotor eines Generators im Energieversorgungsnetz und den Kraftwerken eine Schwungmasse, weshalb wie später noch gezeigt, erste Änderungen bei Frequenzabweichungen mit Schwungmassen ausgeregelt werden. Der Haupteinsatz des Speichers liegt deshalb im Sekundenbereich bei kurzzeitigen Überbrückungen von Spannungsänderungen und Versorgungseinbrüchen. Ihr Einsatz wird in öffentlichem Nahverkehr und Bahnstromanwendungen forciert. Die im Schwungrad gespeicherte Energie errechnet sich anhand des Trägheitsmoments  $J$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , was folgenden Zusammenhang liefert:

$$E_{\text{Schwungradspeicher}} = \frac{J}{2} \cdot \omega^2 \quad (2.3)$$

Nach NIEDERHAUSEN [157, S. 159] ist hiermit eine Effizienz von circa 90 % bei einer Verlustrate von 10 % pro Stunde möglich.

### **Elektrische Speicher – Kondensator- oder Spulenspeicher:**

([107, S. 60], [127, Kap. 2], [157, S. 162], [211, Kap. 6] und [245, S. 551–554])

Elektrische Energie in ihrer eigenen Domäne ohne Umwandlungsverluste zu speichern, ist mit Hilfe von Kondensatoren oder Spulen möglich. Dieser Vorteil steht dem Nachteil der hohen Kosten und der geringen erreichbaren Energiedichten im Bezug auf das Volumen und das Gewicht des eingesetzten Materials gegenüber. Anwendungen sind deshalb oft nur in Nischenbereichen zu finden. Im Bereich der Kondensatoren kommen Ein- oder Doppelschichtkondensatoren zum Einsatz. Häufig werden Aluminium-Elektrolyte verwendet. Vor allem Doppelschichtkondensatoren werden als Pufferspeicher in Versorgungssystemen von öffentlichen Verkehrsmitteln oder in PV-Anlagen eingesetzt. Hierzu qualifiziert sie eine bis zu tausendfach höhere Energiedichte im Vergleich zu den Elektrolyt-Kondensatoren. Lediglich ein sehr niedriges Spannungsniveau, mit dem die Isolation von Doppelschichtkondensatoren belastet werden darf, erfordern den Einsatz



vieler in Reihe geschalteter Elemente. Nur so kann ein entsprechendes Spannungsniveau für die Energieversorgung erreicht werden. Dies stellt einen hohen Aufwand bei der Errichtung und dem Betrieb solcher Anlagen dar. Der formelmäßige Zusammenhang zwischen der Kapazität  $C$  und der Spannung  $U$  lautet wie folgt:

$$E_{\text{Kondensator}} = \frac{C}{2} \cdot U^2 \quad (2.4)$$

Nach NIEDERHAUSEN [157, S. 159] ist hiermit eine Effizienz von circa 95 % bei einer Verlustrate von 10 % pro Tag möglich.

Ein weiterer elektrischer Speicher ist der supraleitende Magnetspeicher. Bei diesem werden vor allem supraleitende Spulen eingesetzt. Diese können durch ihre Materialeigenschaften und bei entsprechend niedrigen Umgebungstemperaturen einen elektrischen Widerstand von Null erreichen. Allerdings wird noch nach den passenden Materialkombinationen geforscht, damit dieser Zustand auch bei Raumtemperatur erreicht werden kann. Dadurch würde der Energieaufwand für die Kühlung auf kryogene Temperaturen entfallen. Der formelmäßige Zusammenhang zwischen der Induktivität  $L$  und der Stromstärke  $I$  lautet wie folgt:

$$E_{\text{Spule}} = \frac{L}{2} \cdot I^2 \quad (2.5)$$

#### Chemische Speicher – Power-to-X:

([107, S. 59], [127, Kap. 7, 8], [211, Kap. 8.6 & 8.7], [237, Kap. 12, 13] und [245, S. 545–549])

Bei der Speicherung von Energie mittels der Umwandlung in Wasserstoff, Methan oder allgemein in Gase oder Fluide spricht man von der sogenannten Power-to-X-Anwendung, wobei das X für die genannten Stoffe stehen kann. Vorteil dieser Technologie ist das schon vorhandene Verteilnetz, so dass die Produktion vor Ort stattfindet – zum Beispiel Offshore bei großen Windenergie-Parks. Nachteile sind die Transportkosten und der niedrige Gesamtwirkungsgrad, der im Falle des Wasserstoffes nach HEUCK nur bei 25 % liegt. Dieser ergibt sich aus der Effizienz für die Gewinnung des Wasserstoffes von 70 % und der Verwendung zum Beispiel in Brennstoffzellen mit einer Effizienz von 40 %. Im Bereich der Forschung ist allerdings noch Potential für die Technologie vorhanden, und es wird mit einem Anstieg der Nachfrage, gerade im Verkehrssektor, gerechnet.

#### Elektrochemische Speicher – Batterien:

([107, S. 58–59], [127, Kap. 3–6], [157, S. 161], [211, Kap. 7], [237, Kap. 10] und [245, S. 543–545])

Im Bereich der elektrochemischen Speicher werden hier kurz die Batterie- und die Redox-Flow-Technologie vorgestellt. Im Bereich der Batterien ist die Bleibatterie neben der Anwendung in fast jedem Pkw und Lkw auch in der stationären Energieversorgung im Bereich Mobilfunkanlagen anzutreffen. Ihre Schwermetallbestandteile und geringe Leistungsdichte bringen ihr beim Thema Umweltschutz und Arbeit als Minutenreserve allerdings keine Vorteile. Hier haben sich in den letzten Jahren andere Zelltopologien, vor allem die Lithium-Ionen-Zellen, durchgesetzt. Höhere Energiedichten und Speicherraten sowie eine zunehmende Akzeptanz durch fallende Preise und höhere Energieinhalte treiben den Einsatz in fast allen technischen Bereichen voran. Neben dem breit diskutierten Einsatz im Verkehrssektor – first-life-Anwendung – kommen auch immer mehr Batteriespeicher in der stationären Energieversorgung und Netzstützung – second-life-Anwendung – zum Einsatz. Gleiches gilt für die Redox-Flow-Batterie. Auch hier hat sich die Entwicklung in den letzten Jahren verbessert, und durch die

Flexibilität bei der Auslegung der Elektrolyttanks in der Größe lassen sich die Energie- und Leistungsdichte des Systems an die Anforderungen anpassen. Genauere Details dazu können in der genannten Literatur nachgelesen werden.

Bei den Wirkungsgraden werden unterschiedliche Werte je nach Zelltechnologie erreicht. Zink-Luft-Batterien erreichen nur 60 %, während Lithium-Ionen an die 90 % erreichen können. Bei den Verlusten liegen Batterien je nach Zelltyp im Bereich von 0,1 % bis 10 % pro Tag.

An dieser Stelle sei auf den Einsatz von Batteriespeichern in der Netzregelung nach BRAUNER in [32, S. 107] hingewiesen. Gerade durch den steigenden Einsatz von Wind- und PV-Anlagen ist es wichtig Regelleistung bereitzuhalten, weil Wind- und Sonnenenergie ein fluktuierendes Angebot darstellen und die Nachfrage nicht immer synchron dazu ist. Außerdem muss im Sinne der Regelleistung eine gewisse Energiemenge vorrätig sein, um geforderte Regelbänder und -zeiträume einzuhalten. Werden diese Anlagen mit Energiespeichern gekoppelt, so kann trotzdem ein Einsatz in der Regelleistung stattfinden. Die im Folgenden von BRAUNER beschriebenen Voraussetzungen für Batteriespeicher, sind für die später zu definierende Betriebsstrategie des kyELM interessant:

14.)

---

*„Die Batteriespeicher müssen für die Regelungsaufgaben folgende Voraussetzungen erfüllen:*

- Ein Regelband in beide Leistungsrichtungen muss möglich sein. Die Batteriespeicher müssen sowohl eine Mindestenergie gespeichert haben und dürfen eine Maximalladungsgrenze nicht überschreiten, damit sie Überschussleistung aufnehmen können.*
- Die Wechselrichter der Batterien müssen insgesamt in der Lage sein, die für die Regelaufgaben vorgegebene Regelleistung mit den Regelgradienten abzugeben.*
- Die Speicherenergie muss so bemessen sein, dass eine Abgabe der Regelleistung für 15 Minuten möglich ist und mehrere nachfolgende Störereignisse ebenfalls beherrscht werden. Im Allgemeinen genügt eine Gesamtzeit von 30 Minuten für die Leistungsabgabe. Deckung des zeitlich variablen elektrischen Leistungsbedarfes räumlich verteilter Abnehmer. Leistungsnachführung mit zentralen, regelbaren, technisch hoch ausgestatteten Kraftwerken.“*

---

[32, S. 107]

Neben den vorgestellten Speichertechnologien wurde nicht auf die Wärmespeicherung eingegangen. Dies liegt zum einen am nicht vorhandenen Einsatz im Prototyp und weil es den Rahmen der Arbeit übersteigen würde. In der genannten Literatur finden sich aber auch zu diesem Thema Ausführungen. Speziell sei an dieser Stelle auf den Vergleich von zehn Studien – mit dem Thema: Zukunft des Speicherbedarfes in der Stromversorgung in Deutschland – hingewiesen. Diesen Vergleich führt STERNER in [211, Kap. 3] durch. Entscheidend ist, dass die Speicherkapazität mit dem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien im Versorgungssystem ansteigen muss. Somit ist dem Thema der Energiespeicherung und dem Management der Energie in der Zukunft eine tragende Rolle zuzuschreiben.

Zusammengefasst wurde in diesem Abschnitt ein Überblick über verschiedene Speichertypen und -technologien gegeben. Ein Vergleich der bekannten Technik- und Kostenkennzahlen

gibt STERNER in [211, S. 600–604] sowie eine Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen der einzelnen Systeme [211, S. 614–619]. Im nächsten Unterabschnitt wird auf die für diese Arbeit relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen eingegangen.

### 2.3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

In diesem Abschnitt wird auf Gesetze und rechtliche Rahmenbedingung für die in dieser Arbeit behandelte Thematik der Konzepterstellung des Energiemanagements in der Niederspannung eingegangen. Eine Übersicht über alle geltenden Regularien in Deutschland gibt die Gesetzeskarte für das Energieversorgungssystem des BMWi [31] (Stand: 2019) wieder. An der einen oder anderen Stelle wird auf mögliche Neuerungen hingewiesen. Schwerpunkt der Betrachtung soll außerdem der technische Aspekt des Anschlusses der einzelnen Komponenten an das Netz sein. Für die betriebswirtschaftliche Betrachtung sei auf die im Folgenden genannte Literatur verwiesen. Im Fokus aller Gesetze und Rahmenbedingungen im Niederspannungsnetz stehen nach SCHEFFLER zwei Schwerpunkte:

15.)

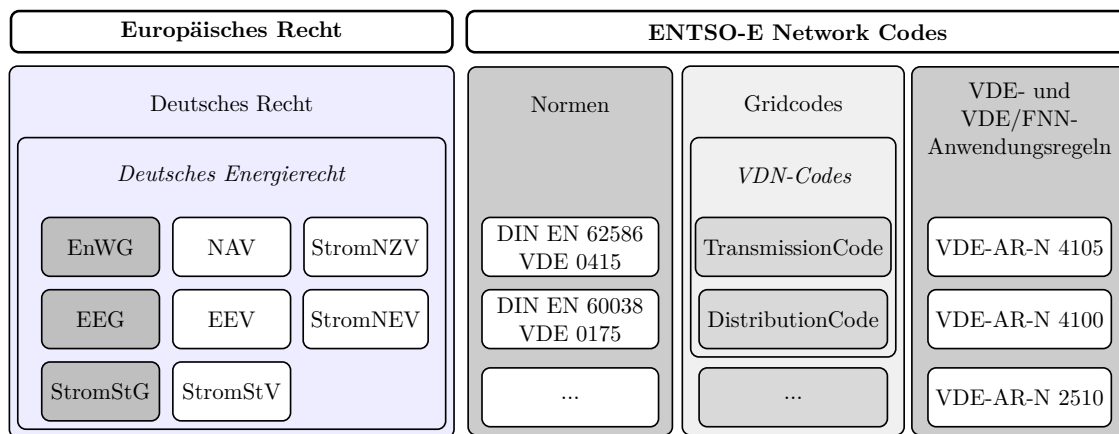
- *„Die von dezentralen Erzeugungsanlagen verursachten Netzurückwirkungen dürfen den ordnungsgemäßen Betrieb des Elektroenergiesystems selbst und der Anlagen anderer Netznutzer nicht beeinflussen. Dafür sind Grenzwerte der zulässigen Netzurückwirkungen festgelegt. [...]“*
- *„Darüber hinaus darf das betriebliche Verhalten der dezentralen Erzeugungsanlagen nicht einem sicheren und ordnungsgemäßen Netzbetrieb des Elektroenergiesystems zuwiderlaufen, sondern muss diesen in festgelegten Bereichen unterstützen.“*

[183, S. 240]

Diese von SCHEFFLER genannten Bereiche beziehen sich auf die in Tabelle 2.3 vorgestellten Spannungs- und Frequenzbereiche, welche im nächsten Abschnitt 2.3.4 näher betrachtet werden. Wird in der Literatur und in entsprechenden Arbeiten, die sich mit der Integration von Energiespeichern beschäftigen, nachgelesen, so sind es die im Nachfolgenden genannten Werke, welche aktuell zu beachten sind und die Energiespeicher explizit aus technischen Gesichtspunkten behandeln. Generell sind folgende Anwendungsregeln des VDE zu nennen:

- VDE-Anwendungsregel 2510-2 [9] Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz
- VDE-Anwendungsregel 2510-50 [10] Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien
- VDE-Anwendungsregel 4105 [12] für Energiespeicher am Niederspannungsnetz
- VDE-Anwendungsregel 4100 [11] für die Beschreibung der technischen Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb

Entscheidend zu beachten ist die Anwendungsregel 4105. Sie behandelt die Sicherheitsanforderungen an die Komponenten der Energiespeicher und Batteriezellen im Falle eines Batteriespeichers. Wird allerdings in den gesetzlichen Rahmenbedingungen nachgeschlagen, so kommt es nach ZEH in [246] aus betriebswirtschaftlicher Sicht noch zu einer finanziellen

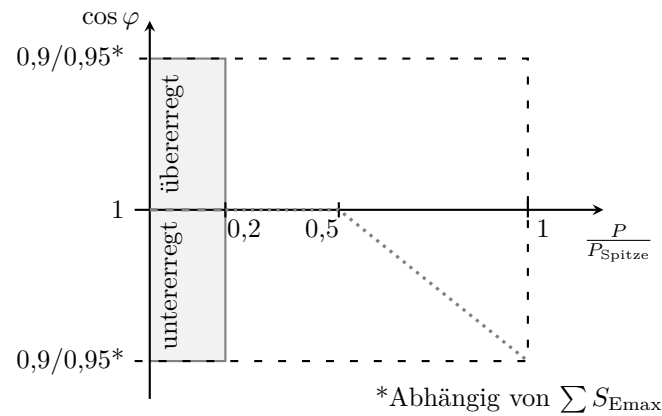


**Abb. 2.5** – Übersicht über zu beachtende gesetzliche und technische Regelungen zur Speicherintegration in das Energieversorgungsnetz – in Zusammenarbeit mit [SA.14] erstellt.

Doppelbelastung der Energiespeicher, da sie weder als Erzeugungs- noch als Letztverbraucheranlage definiert werden und sich schwierig in vorhandene Strukturen der entsprechenden Gesetze – Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und Stromsteuergesetz (StromStG) – einordnen lassen. Somit kann in einer Übersicht festgehalten werden, dass im Sinne eines EMS die rechtlichen Rahmenbedingungen im Bezug auf mögliche Betriebsstrategien beachtet werden müssen. In Abbildung 2.5 sind deshalb entscheidende Regelwerke zusammengefasst und gegliedert. Gerade im Bereich der sogenannten Network Codes werden sich in Zukunft Anpassungen aufgrund der Änderungen der Netzstruktur und der Wende hin zu erneuerbaren Energien ergeben. Zum Beispiel soll es bezüglich der genannten Doppelbelastung noch im Jahr 2019 zu einer Klärung und klaren Definition kommen. Leider lässt sich dazu weder in Pressemitteilungen [53] oder Internetquellen [45] ein genaues Datum identifizieren.

Bezüglich der Integration von immer mehr PV-Anlagen sei an dieser Stelle auf die Rahmenbedingungen hingewiesen. Die Grundlage bildet das EEG [44]. Es gewährt den Netzbetreibern das Recht, nicht die volle Leistung, die eine PV-Anlage erbringen kann, zu jedem Zeitpunkt vollständig aufzunehmen. Das heißt nach §9 EEG sind Betreiber von Erzeugungsanlagen verpflichtet, Anlagen mit einer installierten Einspeiseleistung von 30 kW oder größer mit fernsteuerbaren Einrichtungen zur Reduzierung der Einspeiseleistung auszustatten. Ergänzend müssen Anlagen mit einer Einspeiseleistung von 100 kW oder mehr die aktuelle Ist-Einspeiseleistung für den Netzbetreiber jederzeit abrufbar machen. Für Anlagen, deren installierte Leistung weniger als 30 kW beträgt, kann auf fernsteuerbare Regeleinrichtungen verzichtet werden, sofern die maximal am Netzverknüpfungspunkt eingespeiste Wirkleistung auf 70% der installierten Leistung begrenzt wird. Um hier den Nutzungsgrad der eigenen Anlage noch zu erhöhen, kann je nach Verschaltung der Anlage vor dem Netzübergabepunkt, überschüssige Leistung vom Anlagenbetreiber selbst genutzt werden.

Weiter legt das EEG in §14 die Abregel-Bedingungen für Erzeugungsanlagen fest. Der Netzbetreiber darf die oben beschriebenen Regeleinrichtungen nutzen, um Netzengpässe im eigenen Netz oder vorgelagerten Netzen zu vermeiden. Im Vorfeld muss allerdings zum einen Energie aus anderen erneuerbaren Energieträgern, wie zum Beispiel Grubengas oder Kraft-Wärme-Kopplung, abgerufen worden sein. Und zum anderen muss die Energiemenge entsprechend vor der Abregelungsmaßnahme der PV-Anlagen, in der aktuellen Ist-Einspeisung, im Netz-



**Abb. 2.6** – Die VDE-Standardkennlinie zur Spannungshaltung durch PV-Anlagen nach [12]. Geregelt wird entsprechend der Scheinleistungsverfügbarkeit  $\sum S_{E_{max}}$  einer Anlage. Hierbei wird die Grenze für den Leistungsfaktor zwischen  $\cos \varphi$  bei  $0,95_{ind}$  ( $3,68 \text{ kVA} < \sum S_{E_{max}} \leq 13,6 \text{ kVA}$ ) oder  $0,90_{ind}$  ( $13,6 \text{ kVA} \leq \sum S_{E_{max}}$ ) unterschieden.

gebiet mit einkalkuliert sein. Sollte die Abregelung trotz der Bedingungen stattfinden, so hat der verantwortliche Netzbetreiber dem Betreiber der betroffenen PV-Anlage Entschädigungszahlungen in Höhe von 95 %, der durch die geminderte Einspeisung entgangenen Einnahmen (nach Berücksichtigung eventuell entstandener zusätzlicher Aufwendungen oder Einsparungen) zu leisten. Übersteigen die durch Abregelung entgangenen Einnahmen 1 % der zu erwartenden Jahreseinnahmen, so steigt der zu entschädigende Anteil auf 100 % (vgl. §15 EEG, *Härtefallregelung*). Nach §14 EEG ist der handelnde Netzbetreiber überdies für jeden im Rahmen des Einspeisemanagement getätigten Eingriff dem Anlagenbetreiber gegenüber rechenschaftspflichtig.

Ein weiterer Punkt bei PV-Anlagen ist die Beeinflussung der Spannungshöhe im Netz. Nach der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 [12] des VDE müssen Anlagen mit einer verfügbaren Scheinleistung  $\sum S_{E_{max}}$  von mehr als 3,68 kVA sich an der Spannungshaltung aktiv beteiligen. Hierzu wird über die Wechselrichter Blindleistung ins Netz eingespeist. Vom Netzbetreiber wird dazu nach [12] eine Kennlinie vorgeschrieben, nach der die in Abhängigkeit von der aktuellen Wirkleistung  $P(t)$  bereitzustellende Blindleistung  $Q(P(t))$  beziehungsweise der einzustellenden Leistungsfaktor  $\cos \varphi(P)$  festgelegt wird. Die Kennlinie ist in Abbildung 2.6 dargestellt und wird in der Arbeit als Grundlage für die Modellierung von Spannungshaltungsmaßnahmen der PV-Anlagen dienen.

### 2.3.4 Spannung- und Frequenzregelung

Generell stellt die Regelung des Frequenzbandes im Energieversorgungsnetz eine Anforderung an die Wirkleistungsabgabe der Erzeugungseinheiten in Abhängigkeit von der Netzlast dar. In diesem Zusammenhang wird von der sogenannten  $P$ - $f$ -Regelung gesprochen. Das heißt, es wird nach einem 5-Stufenplan der Frequenzabweichung entsprechend auf Erzeuger- oder Lastseite reagiert, je nachdem wie groß die Frequenzabweichung ist. Hierzu erfolgt als erstes eine sukzessive Haltung der Frequenz durch entsprechende Spannungs- und Lastregelung und bei einer Verschlechterung eine Abschaltung von Anlagen. Die vorgeschriebenen Grenzen

**Tab. 2.4** – Die Tabelle zeigt den 5-Stufen-Plan zur Frequenzregel bei Großstörungen. Hierbei wird das Netz durch frequenzsensitive Lastabwurfrelais nach [28, S. 17] geschaltet und Meldung an die entsprechenden Betriebs- und Regelstellen weitergegeben.

| Stufe            | Maßnahme   |
|------------------|--|
| Stufe 1: 49,8 Hz | Alarmierung des Personals und Einsatz der noch nicht mobilisierten Erzeugungsleistung auf Anweisung des Übertragungsnetzbetreibers, Abwurf von Pumpen. |
| Stufe 2: 49,0 Hz | Unverzögerter Lastabwurf von 10 % bis 15 % der Netzlast.   |
| Stufe 3: 48,7 Hz | Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 10 % bis 15 % der Netzlast.  |
| Stufe 4: 48,4 Hz | Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 15 % bis 20 % der Netzlast.  |
| Stufe 5: 47,5 Hz | Abtrennen aller Erzeugungsanlagen vom Netz.  |

und Zahlenwerte sind in [104, S. 140], [107, S. 518–525] und [188, S. 43] nach [28, S. 17] ausführlich erläutert und diskutiert sowie in Tabelle 2.4 angegeben.

Weiter gilt, dass über eine Änderung der Blindleistung die Netzspannung reguliert wird. Hier wird von der sogenannten  $Q-U$ -Regelung gesprochen. Dabei geht es um eine generelle Regulierung der Leistungsbilanz im Energieversorgungsnetz. Hierin verhält sich die Frequenz abhängig von dem Verhältnis von Erzeugung zu Abnahme der Energie. Aufgrund des noch ausgeprägten Kraftwerksparkes mit Turbinenlösungen wird folgendes festgehalten: Erfolgt im Gleichgewicht der Energieversorgung eine Störung, so weicht die Netzfrequenz, die durch die Rotation der Turbinen gegeben ist, von ihrem definierten Wert  $f = 50$  Hz ab. Bei zu viel Last im Netz sinkt die Frequenz, bei zu viel Erzeugung steigt die Frequenz an.

Als schnellste Regulierung einer Störung des Gleichgewichtes zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung wird nach BRAUNER in [32, S. 93] die Kinetik der im Netz vorhandenen Schwungmassen der aktiven Generatoren verwendet. Die auszuregelnde Leistungsdifferenz wird durch ein Abbremsen der Massen bei einem Leistungsdefizit oder ein Beschleunigen der Massen bei einem Leistungsüberschuss erreicht. In Zukunft entfallen diese Massen allerdings und müssen durch die sogenannten virtuellen Schwungmassen der Umrichter ausgeglichen werden, indem die Leistungselektronikkomponenten diese Schwungmassen künstlich nachbilden. Diese Regelungsvorgänge sind wie bereits genannt im Bereich der Netzdienstleistung durch das Bereithalten der Primär-, Sekundär- und Tertiärleistung zur Regelung des Netzes bekannt. Gerade im Bereich eines Netzverbundes wird jedes am Verbund teilnehmende Netz mit einer eigenen zentralen Sekundärregelung ausgerüstet, die primär der Frequenzhaltung dient. Gleichzeitig muss die Regelung die geforderte Leistung zum Austausch mit dem Nachbarnetzen gewährleisten. Durch welche Kraftwerke und erneuerbare Erzeuger diese Regelung in Zukunft bereitgestellt werden kann, zeigt Tabelle 2.5 nach Ausführungen von BRAUNER.

Technisch betrachtet zeigt SCHEFFLER in [183, S. 216–218] mehrere Möglichkeiten der Regelung von Spannung und Frequenz. Hierbei ist oft der Ortsnetztransformator (ONT) der Hauptregler in der Niederspannungsebene. Durch die Änderung der Übersetzung – aufgrund geeigneter technischer Schaltvorrichtungen – kann ein geregelter ONT in gewissen Grenzen sein Übertragungsverhältnis ändern und so die Spannung anpassen. Durch die Dezentralisierung der Einspeisung im Ortsnetz reicht dies allerdings nicht immer aus. Unterstützt wird der ONT dann durch folgende Maßnahmen:

**Tab. 2.5** – Die Tabelle zeigt nach [32, S. 94] eine Übersicht der im Jahr 2050 zusätzlich notwendigen Netzdienstleistungen um eine Frequenz- und Spannungshaltung zu ermöglichen.

| Netzdienstleistung      | 2015   | 2050   |
|-------------------------|--|--|
| <b>Frequenzhaltung</b>  |  |  |
| Primärregelung          | <i>thermische &amp; hydraulische Kraftwerke, Pumpspeicher</i>  | <i>Windenergieanlagen, PV-Batterien</i>  |
| Sekundärregelung        | <i>thermische Kraftwerke, Pumpspeicher</i>                     | <i>Windenergieanlagen, PV-Batterien, dezentrale Kleinanlagen</i>               |
| Tertiärregelung         | <i>thermische Kraftwerke, Pumpspeicher</i>                     | <i>Windenergieanlagen, PV-Batterien, dezentrale Kleinanlagen</i>               |
| <b>Spannungshaltung</b> |  |  |
|                         | <i>Generatoren der Kraftwerke, HöS-/HS-/MS-Transformatoren</i> | <i>NS-Transformatoren, Windenergieanlagen, PV-Umrichter, Speicherbatterien</i> |
| <b>Wiederversorgung</b> |  |  |
|                         | <i>thermische &amp; hydraulische Kraftwerke, Pumpspeicher</i>  | <i>PV-Batterien, Elektrofahrzeuge (V2G), Windenergieanlagen</i>                |

- konventioneller Netzausbau – Legen von parallelen Leitungen oder Einfügen von neuen Netzstationen.
- Spannungsregelung an den dezentralen Erzeugern – durch das Einbinden der Anlagen in ein Managementsystem.
- Vorschriften zur Blindleistungsbereitstellung an den Erzeugungsanlagen.
- Einbau zusätzlicher Betriebsmittel und Komponenten – Längsregler oder Speicher.

Diese Maßnahmen sind nötig, weil die Spannungsänderungen vor allem lokal an Betriebsmitteln detektiert werden. Somit besteht das Problem, dass bei einem unkoordinierten Netzausbau durch zu niedrige Spannungswerte ein Abfall der Transportkapazität des regionalen Netzes auftritt. Um die gleiche Leistung trotzdem bereitzustellen, sind höhere Ströme erforderlich. Diese können Betriebsmittel an ihre Belastungsgrenze bringen, was im schlimmsten Fall nach [32, S. 92] zu einem Spannungszusammenbruch und darauf folgendem Blackout führt.

Ist der beschriebene Blackout-Fall eingetreten, hilft nur ein geregelter Wiederaufbau des Netzes. Dieser wird realisiert durch das Hochfahren, Synchronisieren und wieder Zusammenschalten einzelner Netzgruppen. Hierzu sind Energiequellen oder Kraftwerke nötig, welche aus einem spannungslosen Zustand wieder ein Netz aufbauen. Dies sind sogenannte schwarzstartfähige Anlagen. Wasserkraftwerke und thermische Kraftwerke – mit entsprechenden Hilfs-Diesel-Generatoren – oder neuartige Batteriespeicher mit speziellen Umrichtern sind in der Lage, ein neues Netz aufzubauen und einen geregelten Netzbetrieb herzustellen. Nach [51, S. 53–54] ist der geregelte Netzbetrieb beispielhaft in drei mögliche Teilbereiche zu unterteilen:

- **Inselbetrieb mit einem einzigen Generator:** Diese Variante stellt die einfachste Netzkonfiguration dar. Die Frequenzhaltung besteht aus dem Konstanthalten der Drehzahl des Generators, was somit einer Primärregelung – mit einer primären Drehzahl- oder Integralregelung – gleichkommt. CRASTAN spricht in diesem Fall von einer Statik  $\sigma = 0\%$ , die einerseits einer linearen Reglerkennlinie nahe kommt und andererseits das Verhalten eines Generatorsatzes in Abhängigkeit von den Netzgrößen (Spannung, Frequenz) beschreibt.
- **Inselnetzbetrieb mit mehreren Generatoren oder Kraftwerken:** In dieser Konstellation besteht die Möglichkeit, die Regelung oder die Last des Netzes auf mehrere Erzeuger zu verteilen. Hierbei teilt sich der Anteil der Kraftwerke an der Primärregelung unterschiedlich auf die teilnehmenden Erzeuger auf. Je nachdem wie die Drehzahl-Wirkleistungskennlinie der einzelnen Teilnehmer definiert ist – ausgedrückt durch die Statik – beteiligen sie sich an der Regelung. Hierbei kann zwischen Regelkraftwerken mit einer Statik  $\sigma = 5\%$  und Kraftwerken, die mit konstanter Leistung ( $\sigma = \infty$ ) fahren, unterschieden werden. Weiter gilt, je kleiner die Statik, desto stärker ist die Reaktion eines Kraftwerkes auf eine Änderung in der Drehzahl. Die Folge ist eine stärkere Beteiligung an der Frequenzhaltung. Deshalb sollte die Statik mindestens ein paar Prozentpunkte aufweisen, damit ein sinnvoller Beitrag zur Regelung erfolgen kann. Durch eine übergeordnete lokale oder zentrale Sekundärregelung werden die Sollwerte für die Primärregelung der Frequenzhaltung gesteuert. Durch die parallel durchgeführte Tertiärregelung erfolgt nach wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Aspekten die Arbeitspunkteinstellung der Regelkraftwerke und mitlaufenden Kraftwerke.
- **Netzverbund:** Wie schon erwähnt findet im Netzverbund eine definierte Leistungsbereitstellung zwischen den einzelnen Nachbarnetzen statt. Diese Vorgaben werden ergänzt durch eine überlagerte Sekundärregelung in jedem einzelnen Teilnetz, das am Verbund beteiligt ist.

Zusammengefasst ist die Spannungs- und Frequenzregelung weiterhin mit einem forcierten und gänzlichen Umstieg hin zu erneuerbaren Energiequellen möglich. Allerdings erfordert es eine Anpassung des Netzes, des Managements und der Betriebsstrategien sowie an speziellen Punkten eine schwarzstartfähige Basis durch entsprechende Anlagen.

### 2.3.5 Fazit des Energieversorgungsüberblicks

Die Nutzung regenerativer Energiequellen und neuartige Technologien – wie die Umrichter-technik – erlauben einen Umstieg und Wandel der stark geprägten fossilen Energieversorgungslandschaft. Dies erfordert eine bedachte Anpassung der Netzinfrastruktur, ein Umdenken und Anpassen der Gesetze und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie eine Schaffung von Speicherkapazitäten für die fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen in Kombination mit einem entsprechend ausgelegten EMS.

## 2.4 Zusammenfassung Management und Energieversorgung

In Summe gibt dieses Kapitel einen Einblick in das Management in unterschiedlichen Disziplinen, in das EMS der technischen Anwendung und in die elektrische Energieversorgung in Deutschland. Bei den Managementsystemen werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede



in der Komplexitätsbeherrschung deutlich. Gleiches ist in den technischen Anwendungen im Bereich des Energiemanagements festzustellen. Hier ist das Managementsystem geprägt durch die jeweiligen Rand- und Umweltbedingungen. Vorhandene Systeme sind entweder nicht entsprechend gekoppelt oder verarbeiten mehr Informationen als sie für einen effizienten Betrieb benötigen. Somit ist es nötig, eine skalierbare und modulare Struktur zu definieren, in die das Managementsystem integriert werden kann. Entsprechende Methoden zur Umweltidentifikation müssen parallel analysiert und evaluiert werden, um in der zunehmenden Komplexität die entscheidenden Faktoren zu betrachten. Gleiches gilt im Bereich der elektrischen Energieversorgung. Durch den Umstieg von den fossilen zu den erneuerbaren Energieträgern nimmt die Komplexität des Gesamtsystems und der Regelung zu. Um dieser Komplexität gerecht zu werden, wird auf der in diesem Kapitel vorgestellten Grundlage aufgebaut und im nächsten Kapitel auf kybernetische Modelle und Prinzipien eingegangen. Diese Vertiefung und Kombination der Methoden und der hier vorgestellten Grundlagen wird letzten Endes zum skalierbaren, aktiven und kybernetischen EMS in der Energieversorgung führen.



## 3 Kybernetik, kybernetische Prinzipien und das Viable System Model

In dem folgenden Kapitel wird die Kybernetik als interdisziplinäre Wissenschaft vorgestellt. Weiter werden im Speziellen kybernetische Prinzipien und das Viable System Model (VSM) von STAFFORD BEER eingeführt. Generell ist die Kybernetik eine gewachsene Wissenschaft, die laut der im Folgenden genannten Literatur seit dem antike Griechenland Erwähnung findet. Für die Neuzeit sind vor allem die Theorien bekannt, die auf der Josia Macy Konferenz im Jahr 1946 präsentiert wurden. Hier stellte WIENER seine kybernetischen Grundlagen [236] vor. Daraus entwickelten ASHBY, VON FOERSTER und MCCULLOCH eine bis heute bestehende Wissenschaftsdisziplin. Im Bereich der Management-Kybernetik legte BEER mit seinem VSM die Grundlage.

Eine Vertiefung und Ergänzung in die Geschichte der Kybernetik geben folgende Literaturbeispiele. FLECHTNER erklärt in [73] die Grundbegriffe der Kybernetik. Er unterscheidet hierin in Kommunikation, Information, Nachricht, Nachrichtenübertragung und Verhalten. Die Ausführungen von HENN in [102] geben einen Einblick in die Vorgeschichte der Kybernetik. HEYLIGHEN erläutert in [108] in kurzer Form die Kybernetik erster und zweiter Ordnung. JESCHKE fasst in [112] Kybernetik im interdisziplinären Diskurs zusammen. MÜLLER erläutert die Geschichte der Kybernetik in [154], und relativ aktuell zeigt KÜPPERS in [126] die generelle Entwicklung der Kybernetik. Er definiert die wichtigsten Begriffe und stellt die relevanten Autoren und Kybernetiker ihrer Zeit vor.

### 3.1 Kybernetik – eine Einführung

16.)

---

*„Wiener hat Kybernetik als ‚die Wissenschaft von Steuerung und Kommunikation in Lebewesen und Maschine‘ definiert – mit einem Wort, als die Kunst des Lotsens, wie sie ein Steuermann auf dem Schiff ausübt (...)“*

---

[15, S. 15]

Mit den Worten WIENERS, der 1946 die Kybernetik mitbegründete, beginnt die kurze Einführung in die Theorie der Komplexitätswissenschaft. Die Kybernetik beschäftigt sich unter anderem mit komplexen Fragestellungen des Managements und der Regelung von unterschiedlichen Systemen. Dabei ist sie engmaschig mit Teilgebieten aus Soziologie, System-, Spiel- und Entscheidungstheorie sowie Betriebswirtschaftslehre und Politik vernetzt. Das Wort «Kybernetik» entstammt dem Altgriechischen und bedeutet soviel wie «Steuermann». Obwohl die Kybernetik nicht der Nautik entsprungen ist, ist diese Wortabstammung eine Vorlage für die passende Metapher des Steuermannes. Dieser muss sein Schiff mit Passagieren

unversehrt von Hafen zu Hafen steuern. Hierbei soll das Ziel sowohl bei ruhiger See als auch bei tosenden Wellen erreicht werden. Das Handeln des Steuermannes spiegelt somit die Wortherkunft der Kybernetik wider. Kurzum steht die Kybernetik für die Fähigkeit, sich autonom durch eine sich ständig ändernde Umgebung zu bewegen – und damit für Regelungsvorgänge jeglicher Art.

Neben WIENER befassten sich weitere Autoren [15, 48, 59, 73, 152, 180] mit einer Definition des Begriffes. Zusammenfassend gehen die Definitionen aller in dieselbe Richtung, hin zu einer einheitlichen, strukturierten und klar formulierten Systembeschreibung. MIROW beschreibt dies in [152] anhand der Aussagen zweier anderer Kybernetiker [48, 59], welche die Kybernetik als eine Wissenschaft ansehen, die es ermöglicht, ein System so auszurichten und zu konstruieren, dass es mit seinen Handlungen ein vordefiniertes Ziel erreichen kann. MIROW schreibt dazu,

17.)

---

*„[dass d]ie Kybernetik als eine allgemeine Theorie der Organisation angesehen werden kann, deren Grundsätze für die Struktur und Regelung von Organisationen beliebiger Art und Größe gültig sind. Jede Untersuchung einer speziellen Organisation, sei diese ein Lebewesen, eine Gemeinschaft mehrerer Lebewesen oder eine Maschine, muss auf diesen allgemeinen Grundsätzen aufbauen und unter Einbeziehung der für das Untersuchungsgebiet verfügbaren Spezialdisziplinen weiterentwickelt werden.“*

---

[152, S. 21]

Und auch SACHSSE stellt fest,

18.)

---

*„[d]ie Kybernetik ist die Wissenschaft von Wirkungsgefügen.“*

---

[180, S. 3]

Mit dieser Aussage definiert er die regelungstechnische Betrachtungsweise der Kybernetik und damit die Möglichkeit der Einordnung in die Wissenschaften der Regelungstechnik. Die Kybernetik widmet sich laut SACHSSE vor allem den informationsverarbeitenden Systemen. Somit ist die wichtigste Ressource der Kybernetik – die Information. SACHSSE bezeichnet die Information als die dritte Grundgröße neben Materie und Energie. Auch die Definition als vierter Wirtschaftssektor in der heutigen Gesellschaft zeigt ihren Stellenwert. Der Informationsgehalt eines Systems stellt somit eine physikalische Zustandsfunktion dieses Systems dar. Dies bekräftigt KÜPPERS durch folgende Ausführung:

19.)

---

*„Kybernetik ist daher nichts anderes als wirkungsvolle Kommunikation bzw. verlustarmer Daten- und Informationsaustausch, der in der Natur die Überlebensfähigkeit und in der Technik die maschinelle, prozessuale Funktionalität stärkt und dadurch Fehler vermeiden hilft. [...] Kybernetik ist keine Einzelwissenschaft. Kybernetik ist eine kommunikative Metawissenschaft, die imstande ist, Fortschritte in natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftlichen Einzel- bzw. Fachdisziplinen beizusteuern. [...] Kybernetische Systeme sind auch Systeme, die Informationen aufnehmen, speichern und verarbeiten und diese in Wirkungsbeziehung auf die Umwelt umsetzen.“*

---

[126, S. 2, 6 & 14]

MALIK hat dies auch erkannt, weist allerdings auf folgendes Problem hin:

20.)

---

*„Die kybernetischen Gesetze beschreiben die Wirkung der dritten Grundgröße der Natur – von Information. Information entsteht nur im Gehirn. Die Wirkung kybernetischer Naturgesetze kann man sich daher nur gedanklich erobern, und das erschwert den Durchbruch des Potenzials der Komplexitätswissenschaften, besonders der Kybernetik und Bionik.“*

---

[141, S. XXI]

Neben dieser gedanklichen Hürde ist die Portierbarkeit zwischen den einzelnen Disziplinen nicht immer trivial (siehe Kapitel 4). Für die Kybernetik ist der Zweck eines zu beobachtbaren Systems immer der Ausgangspunkt der Analyse oder des Entwurfes. Das heißt mit der Zweckdefinition wird der Rahmen gesetzt, welche Wirkmechanismen in einem System vorhanden sein können. Folglich werden Transformationen von Zuständen sowie deren Ablauf betrachtet. Die Zustände können einerseits physikalischer Natur sein und andererseits Informationen oder abstraktere Gebilde, wie soziale Verhältnisse zwischen Menschen, repräsentieren. Dem allen gemeinsam obliegt der Systembegriff, der nach [22, 73, 152] zusammengefasst in der Kybernetik als eine Ansammlung von miteinander in Beziehung stehenden Teilen oder Elementen verstanden wird. Hierbei ist die Festlegung von Ein- und Ausgängen der einzelnen Elemente durchzuführen. Die Übergangsfunktion eines Elementes beschreibt den Zusammenhang vom Ausgangs- zum Eingangsverhalten. Nach [152, S. 23] und [22] werden Systeme wie folgt klassifiziert:

- Zeitverhalten (dynamisch oder statisch),
- Komplexität (einfach, komplex, äußerst komplex),
- Bestimmtheit im Verhalten (deterministisch oder probabilistisch),
- Art der Beziehungen zwischen den Elementen bzw. ihrer Art der Kommunikation.

Nach der Sammlung an Definitionen der Kybernetik wird die Einordnung dieser in die Wissenschaftstheorie gezeigt. SACHSSE hat in [180, S. 240] anhand der Erkenntnisse von FRANK in [79] vereinfacht in Tabelle 3.1 Definitionen zusammengefasst. Die Tabelle zeigt, wie die Kybernetik in die Wissenschaftstheorien eingeordnet wird. FRANK definiert mit den vier Klassen – qualitativ, naiv, quantitativ und reflexiv – die damaligen Arten des Verständnisses

**Tab. 3.1** – Die Tabelle zeigt die Einordnung der Kybernetik in die Wissenschaftstheorie aus [79] nach [180, S. 240] vereinfacht. Beispielhaft kann in der Naturwissenschaft und Kybernetik der Mensch und seine Umwelt oder in der Philosophie das Sein und Denken für die Subjekt-Objekt-Beziehung stehen.

|  | vorwissen-<br>schaftliches<br>Weltverständnis | Philosophie | Naturwis-<br>senschaften | Kybernetik |
|--|---|-------------|--------------------------|------------|
| <b>qualitativ</b> – verstehend, gestaltend         | +   | +           | –                        | –          |
| <b>naiv</b> – nur auf das Objekt bezogen           | +   | –           | +                        | –          |
| <b>quantitativ</b> – kalkülisierend, konstruierend | –   | –           | +                        | +          |
| <b>reflexiv</b> – auf das Subjekt bezogen          | –   | +           | –                        | +          |

und die Gestaltung der Welt. Darin eingeordnet ist die Kybernetik komplementär zur Philosophie zu sehen. Beide Wissenschaften ergänzen sich gegenseitig, sind aber in ihren Grenzen unterschiedlich. Die Grenzen der Philosophie liegen am denkenden Individuum, die Grenzen der Kybernetik – des Machbaren – liegen an den Gegebenheiten und Umweltbedingungen des Systems. In Kombination mit den Naturwissenschaften sind drei der vier Bewertungskriterien als positiv einzustufen. Die qualitative Komponente ist negativ behaftet und muss durch den Entwickler im technischen Sinne mit berücksichtigt werden. Weiter kann ein Entwickler durch die Anwendung der Theorie und das eigene Verständnis der Welt dieses Manko der Kybernetik ausfüllen. Durch die Erstellung und Implementierung geeigneter Managementsystemen in der Anwendung von Systemmodellen und kybernetischen Prinzipien unterstützt er schließlich die Erfüllung des Systemzweckes.

## 3.2 Kybernetische Systemmodelle

Nach der allgemeinen Einführung in die Kybernetik wird in diesem Teilkapitel auf Beispiele für kybernetische Systemmodelle eingegangen. Wie schon geschildert, liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen bei der Erreichung des Systemzweckes unter der Beachtung und Ausnutzung der vorhandenen Wirkgefüge des Systems. Für den Fall, dass nicht alle internen Bestandteile und Vorgänge eines Systems bekannt und beobachtbar sind, erfolgt eine spezielle Betrachtungsweise.

Ein solches System wird nach ASHBY als Black Box bezeichnet [15]. Ein Beispiel für eine Black Box ist eine unbekannte Maschine. Diese soll von einem Ingenieur untersucht werden, ohne diese zu öffnen. Ebenso ist im sozial-biologischen Bereich ein Patient eine Black Box, bei dem ein Arzt versucht, eine Krankheitsdiagnose aufgrund von Berichten und Symptomen – also Systemausgängen – zu finden. ASHBY nennt in [15] Strategien, die eine Untersuchung der Black Box ermöglichen, um auf ihre Inhalte und internen Vorgänge schließen zu können. Hierbei sind Fälle vorhanden, die zeigen, dass nicht jede Black Box notwendigerweise untersucht werden muss. Als Beispiel sei das Benutzen einer Tür genannt [15]. Der Mensch als Nutzer hat sich bereits im Kindesalter an das System «Tür» gewöhnt. Beim Aufschließen einer Tür und anschließenden Betätigen der Türklinke wird die Tür sich öffnen, ohne den komplexen Mechanismus zu hinterfragen, der hinter dem Schließsystem steckt. Somit kann festgehalten werden, dass es nicht notwendig ist, alle Details eines Systems zu kennen oder beobachten zu können. Sofern das System bei einer bestimmten Anregung, in diesem Fall dem Betätigen der Klinke, auch den gewünschten Ausgang liefert, das heißt das Öffnen der Tür, kann das System ohne Einschränkung mit seiner Gesamttransformation genutzt werden.

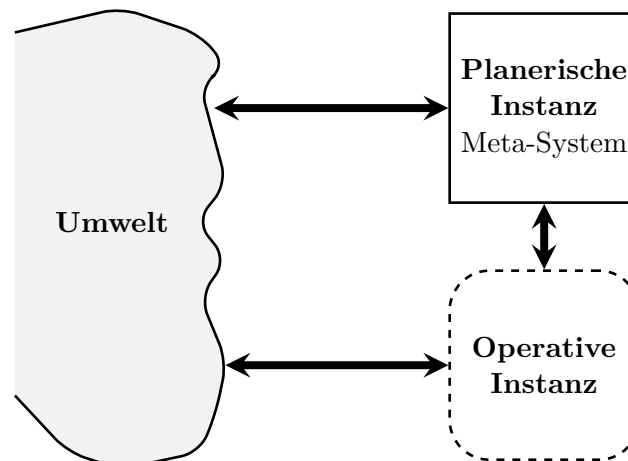
Für ein einfacheres Verständnis und die Greifbarkeit von möglichen Transformationen und Mechanismen in Systemen werden diese deshalb oft und gerade in technischen Problemstellungen, in Form von Modellen abstrahiert und vereinfacht. Zwei solcher Modelle werden im Folgenden vorgestellt, diskutiert und schwerpunktmäßig in dieser Arbeit verwendet. BEER zeigt in seinem VSM die Strukturen auf, die in jedem lebensfähigen System vorkommen. Und weiter stellt SCHWANINGER mit dem Model for Systemic Control (MSC) ein Instrument vor, um gezielt Kontrollgrößen für einzelne Wirkungsebenen auszuwählen und über die Ebenen hinweg kontrollieren zu können.

An dieser Stelle werden bewusst die Grundlagen für das in dieser Arbeit primär verwendete VSM behandelt, um einen ersten Einstieg in das Modell zu gewähren. Eine detaillierte

Auseinandersetzung, Vertiefung und Diskussion erfolgt im Kapitel 4. Weiter behandelt Teilkapitel 3.3 die Prinzipien des kybernetischen Systementwurfs. Diese werden in Anlehnung an das VSM vorgestellt und auf dieses abgestimmt. Die Prinzipien bieten eine zusätzliche und allgemeinere Betrachtung des kybernetischen Systementwurfs und erleichtern das Verständnis der Wirkungsweisen und Zusammenhänge im VSM.

### 3.2.1 Viable System Model – eine Einführung

BEER entwickelte das VSM zur Strukturierung der Managementebenen von Unternehmen. Als Vorbilder dienten Regelsysteme in der Natur und insbesondere das menschliche Nervensystem. Ziel des Modells ist es, die grundlegenden funktionellen Strukturen – die ein System lebensfähig machen – zu benennen und miteinander in Verbindung zu setzen. Die Funktion des Systems ist im ersten Schritt nicht weiter relevant, weil beispielsweise ein Zellverbund als Gesamtsystem nach den gleichen kybernetischen Strukturen wie der menschliche Körper aufgebaut ist. Es unterscheidet sich meist nur der physikalische Aufbau der Systeme, in denen diese Strukturen untergebracht sind. Für die Auslegung von Informationssystemen bezeichnet ESPEJO das VSM in seinen Arbeiten [65, 68] als eine gute Ausgangsbasis. Der Grund ist, dass das Modell ein besonderes Augenmerk sowohl auf die Art und Quellen von Vorgaben als auch auf die dazugehörigen Kontrollmechanismen legt [110]. Somit zeigt sich, dass beim VSM die Transformation und Übertragung von Informationen im Vordergrund stehen, die ein System möglichst effizient agieren lassen. Durch das ursprüngliche Ziel, mit dem Modell die Managementebenen von Unternehmen zu strukturieren, existieren in der Literatur viele Beispiele, wie VAHIDI in [224] aufzeigt, die sich auf diesen Anwendungszweck beziehen. Beispiele an entsprechender Stelle und eine Sammlung von ausgewählter Literatur im Teilkapitel 3.4 unterstützen beim Verständnis des Modells. Vereinfacht betrachtet, besteht das VSM aus drei Bestandteilen: Je eine ausführend-operative und eine planerische Instanz und als drittes die Umwelt des Systems. Die beiden Instanzen stehen sowohl mit der Umwelt über eine horizontale als auch untereinander über eine vertikale Verbindung in Wechselwirkung. Abbildung 3.1 zeigt dies grafisch.



**Abb. 3.1** – Überblick und Anordnung der grundsätzlichen Bestandteile des Viable System Model mit den vertikalen und horizontalen Verbindungen – nach [21, S. 21].

Laut der Literatur erbringt die operative Instanz die eigentliche Arbeit des Systems und hat die Vorgaben der planerischen Instanz zu erfüllen. Diese planerische Instanz, die auch als Meta-System bezeichnet wird, legt zum einen die Aufgaben der einzelnen operativen Elemente innerhalb der operativen Instanz fest und erarbeitet zum anderen strategische Pläne, wie sich das Gesamtsystem sowohl intern als auch gegenüber seiner Umwelt verhalten soll. Auf diese Weise erfolgt die Koordination der operativen Elemente und die Kontrolle, wie das Gesamtsystem als ein Ganzes agiert. Die Definition der Zweckerfüllung des Gesamtsystems wird somit von der planerischen Instanz übernommen. Diese Unterteilung in eine planerische und eine ausführende Instanz hat eine Trennung von Funktion (Ausführung von Tätigkeiten) und Management (Planung) zur Folge. Das Management des Systems gibt die Rahmenbedingungen vor, in welchen sich die ausführenden Einheiten bewegen sollen. Dazu ist das Wissen über die Arten von Tätigkeiten, die das System ausführen kann, nötig. Durch die bidirektionale und vertikale Verbindung zwischen der planerischen und operativen Instanz ist dies repräsentiert.

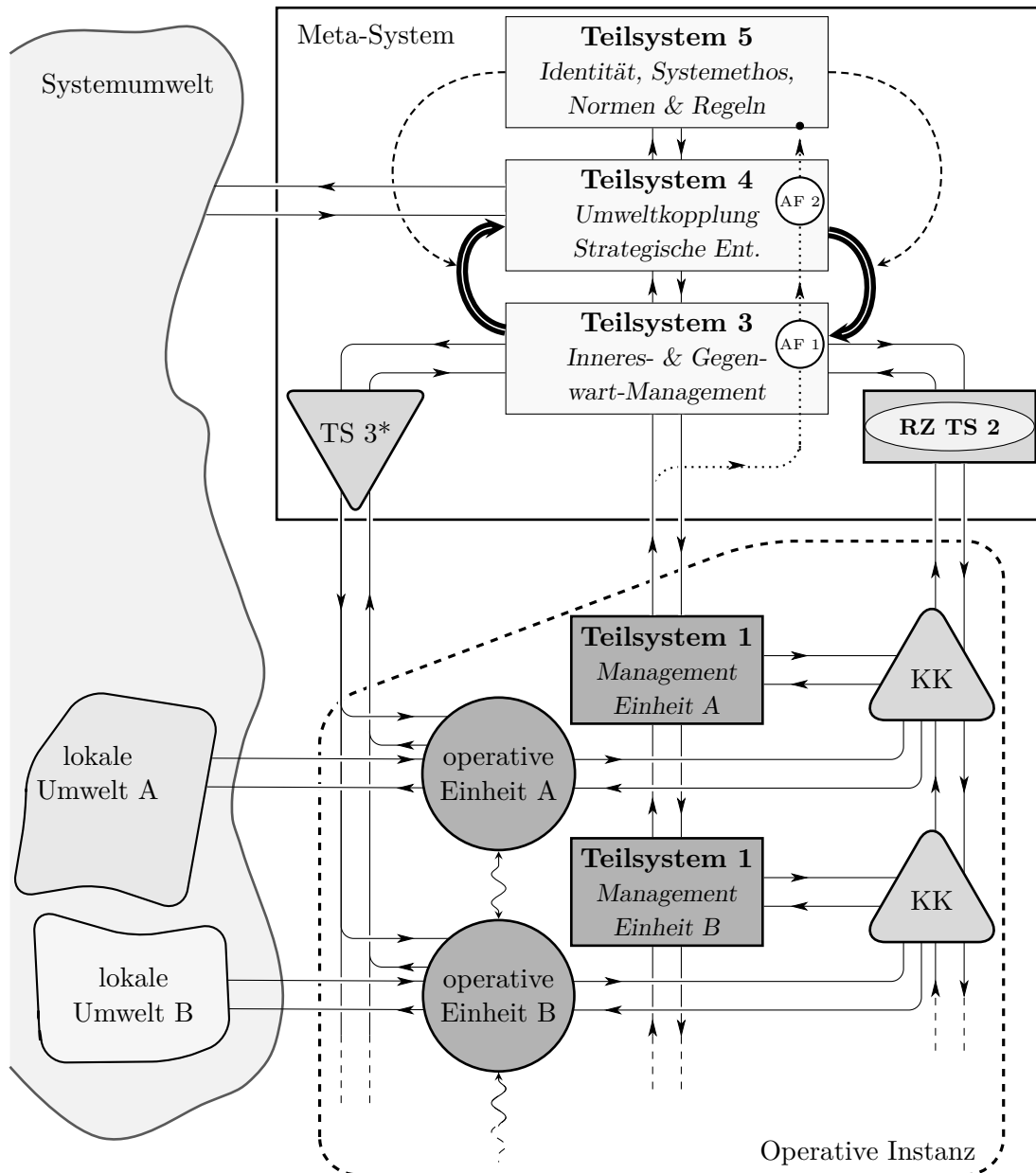
Hierbei gilt, dass die operative Instanz ihre Tätigkeiten als autonomes System ausführt. Das heißt, sie bewegt sich in vorgegebenen Rahmenbedingungen und entscheidet selbst darüber, wie die Tätigkeiten im Detail gestaltet werden, um auf Änderungen in der Systemumwelt adäquat zu reagieren. Diese Autonomie ist als horizontale Verbindung zwischen der operativen Instanz und der Umwelt dargestellt und als ein explizites kybernetisches Prinzip im Teilkapitel 3.3 erläutert. Entsprechend trifft das Meta-System seine planerischen und strategischen Entscheidungen aufgrund einer fundierten Informationsbasis. Diese besteht zum einen aus Informationen der Umwelt, die es über die eigene horizontale Verbindung zu dieser erhält, und zum anderen sammelt es durch die vertikale Verbindung zur operativen Instanz zusätzliche Informationen über den internen Systemzustand. Letztendlich versucht es, die einzelnen Elemente der operativen Instanz zu einem harmonisch funktionierenden Gesamtsystem zusammenzufügen.

Wird das Modell eine Stufe detaillierter betrachtet, so bestehen das Meta-System und die operative Instanz aus mehreren Elementen, die spezielle Funktionen inne haben. Diese Elemente werden im weiteren Verlauf der Arbeit als Teilsysteme (TS) bezeichnet. Hierbei wird das Meta-System in die TS 3, 4 und 5 und die operative Instanz in die TS 1 sowie die operativen Einheiten (OE) unterteilt. TS 2 wird intern nochmal unterteilt, weshalb es sowohl in das Meta-System – in Form der Regelzentrale (RZ) – als auch in die operative Instanz – in Form eines Koordinations-Knoten (KK) zwischen TS 1 und der dazugehörigen OE – integriert wird.

Ein vereinfachtes und allgemein gültiges resultierendes Gesamtsystem mit den genannten Teilsystemen und ihren jeweiligen Beziehungen untereinander ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die verschiedenen Teilsysteme sind aufgrund ihrer jeweiligen Funktionen und der Zuordnung der jeweiligen Instanz auf der vertikalen Befehlsachse in einer hierarchischen Struktur angeordnet. Diese Hierarchie dient laut BEER jedoch rein der Effizienzsteigerung des Gesamtsystems und macht keine Aussage über die Wertigkeit der einzelnen Teilsysteme. Für die noch zu definierende Lebensfähigkeit des Gesamtsystems sind alle Teilsysteme erforderlich. Daher sind sie laut Literatur [21, 23, 24, 110] als gleichwertig anzusehen.

In den folgenden Unterabschnitten wird auf die einzelnen Teilsysteme kurz eingegangen. Eine Vertiefung erfolgt im Kapitel 4.





**Abb. 3.2** – Das Viable System Model in Anlehnung an BEER – nach [21, 23, 26, 141] – Abkürzungen: Alarmfilter (AF), Koordinations-Knoten (KK), Regelzentrale (RZ)

## Operative Einheiten und Teilsysteme 1 – Wertgenerierung

21.)

---

*„Der Zweck eines Systems ist das, was es erreicht. Und was ein lebensfähiges System erreicht, wird durch TS 1 [ – und seine OE –] gemacht.“*

---

übersetzt nach [21, S. 128]

Die operative Instanz ist in unterschiedliche OE sowie in dazugehörige TS 1 unterteilt. Hierin sind die OE die Bestandteile des Gesamtsystems, die laut BEER für dieses System einen tatsächlichen Wert generieren [21, 23]. Bei einem Unternehmen kann dies beispielsweise eine Produktionsabteilung oder beim menschlichen Körper ein Muskel oder Organ sein. Die OE stehen jeweils mit ihrer eigenen lokalen Umwelt in direkter Verbindung. Ergänzend kann eine Verbindung unter den einzelnen OE erfolgen. Beispielhaft könnte das Produkt von Abteilung A sowohl an Kunden verkauft als auch von Abteilung B zu einem anderen Produkt weiterverarbeitet werden. Die jeweilige lokale Umwelt der OE kann ebenso eine Schnittmenge aufweisen oder voneinander verschieden sein. Konkurrenten, Kunden, Zulieferer und ähnliche Rollen sind Beispiele aus der Unternehmenskultur für eine solche lokale Umwelt [21, 64]. Die zugehörigen TS 1 stellen die Regelungseinheiten der jeweiligen OE dar und versuchen, den Betrieb und die Effizienz ihrer OE zu optimieren. In Abbildung 3.2 sind beispielhaft zwei TS 1 und dazugehörige OE (A und B) dargestellt. Die Anzahl der OE in einem betrachteten System hängt immer von dem System selbst und seinem Zweck ab.

Die TS 1 sind die Bestandteile der operativen Instanz, die die Rahmenbedingungen und Sollvorgaben vom Meta-System entgegennehmen. Aus den Vorgaben generieren die TS 1 die Soll- und Regelgrößen, die von ihren OE umgesetzt werden. Die Ausführung durch die OE und die Regelung durch die TS 1 erfolgt weitestgehend autonom, das heißt ohne eine dauerhafte und unmittelbare Kontrolle durch das Meta-System, je nachdem, welchen Zweck die operative Instanz erfüllen soll. Allerdings müssen die TS 1 an das Meta-System zurückmelden, ob die vereinbarten Vorgaben tatsächlich eingehalten werden. Sollte sich zeigen, dass durch die Handlungen eines TS 1 und seiner OE die Existenz des Gesamtsystems in Gefahr ist, muss dem TS 1 die Autonomie entzogen werden können. Das Meta-System übernimmt die Rolle einer übergeordneten Kontrolleinheit, die den Zusammenhalt des Gesamtsystems verfolgt. Dieser Zusammenhalt des Gesamtsystems und die Verfolgung eines gemeinsamen Ziels durch alle Teilsysteme wird in Verbindung mit dem VSM als Kohärenz bezeichnet [23, 26, 233].

## Teilsystem 2 – Koordination

22.)

---

*„Die Notwendigkeit für ein [TS] 2 wurde ziemlich ausführlich bereits damit begründet, daß[!] dies das einzige Mittel sei, um unkontrollierte Schwingungen zwischen den einzelnen Divisionen [– OE –] zu verhüten.“*

---

[23, S. 180]

Durch die Autonomie der TS 1 kann es zu Konflikten und Schwingungen zwischen den Teilsystemen kommen. Ausgelöst werden diese durch das Bestreben jedes TS 1, seinen eigenen optimalen Betrieb zu erhalten. Das TS 2 unterstützt bei der Konfliktlösung sowie

Schwingungen zu dämpfen. Damit kann das Meta-System durch das TS 2 Instabilitäten des Gesamtsystems verhindern oder wieder einregeln. Den TS 1 bietet es eine Art Kommunikationsplattform, auf der die jeweiligen Interessen der TS 1 vermittelt werden können. Dieses Aufrechterhalten der inneren Stabilität wird in der Kybernetik und in der Physiologie als Homöostase bezeichnet [15, 21, 23, 26, 64].

Durch die Zuordnung zum Meta-System und der operativen Instanz nimmt das TS 2 eine Sonderrolle ein. Beim Vergleich der Darstellungen in der Literatur fällt auf, dass das TS 2 aus einer RZ des Meta-Systems (von BEER auch als «Regelzentrale des Unternehmens» bezeichnet [23, S. 162]) und Regelzentren, die zu den einzelnen TS 1 gehören («Regelzentralen der Divisionen» [23, S. 162]), besteht. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die «Regelzentrale des Unternehmens» als RZ bezeichnet, um eine allgemeine Formulierung zu erhalten, die sich auf technische Systeme anwenden lässt. Analog werden die «Regelzentralen der Divisionen» als KK bezeichnet. In der RZ – vergleiche auch Abbildung 4.8 – kommen kontinuierlich Informationen aus den KK über die Zustände der TS 1 zusammen. Aufgrund dieser Informationen können die TS 1 aufeinander abgestimmt werden, indem die RZ angepasste Vorgaben über die KK an die TS 1 sendet. In den Abbildungen 3.2 und 4.8 ist die RZ jeweils als Ellipse dargestellt, die von einem Rechteck umgeben ist. Die KK hingegen sind als Dreiecke mit abgerundeten Ecken symbolisiert.

### Teilsystem 3 und Teilsystem 3\* – Inneres-und-Gegenwart-Management

23.)

---

*„System 3 ist die oberste Stufe des autonomen und die unterste Stufe des Unternehmensmanagement, dessen Hauptfunktion darin besteht, die Stabilität der inneren Umwelt der Organisation zu regeln.“*

---

[23, S. 182]

Die TS 1 erhalten ihre initialen Vorgaben vom TS 3 aus dem Meta-System. Das TS 3 orientiert sich dabei an systeminternen Zuständen und ist dafür zuständig, die Gesamtleistung des Systems zu optimieren. Dafür muss es Synergien zwischen den TS 1 herstellen und diese auf das Gesamtziel des Systems ausrichten. Hierzu zählt sowohl die Verteilung von Ressourcen als auch die Zuteilung von Verantwortungsbereichen [21, 64, 192, 233]. TS 3 stellt somit die oberste Ebene des autonomen Managements und gleichzeitig die unterste Ebene des Meta-Systems dar [21, S. 129].

Seine Informationen erhält das TS 3 sowohl durch die Rückmeldungen der TS 1 auf die Vorgaben und Richtlinien als auch über eine Berichterstattung der RZ des TS 2. Auf diesen beiden Wegen erhält TS 3 allerdings nur gefilterte Informationen über den Zustand der OE, da in beiden Fällen entweder TS 1 oder TS 2 zwischengeschaltet ist. Um dennoch genaue Informationen zu erhalten und somit bessere Entscheidungen treffen zu können, bedient sich TS 3 des TS 3\* als Direktverbindung und Monitoringfunktion zu den operativen Einheiten. TS 3\* ist somit ein Instrument des Meta-Systems, mit dem TS 3 zusätzliche Kenntnisse über den Ist-Zustand des Systems erlangt. In einem Unternehmen kann dies in Form von unregelmäßig durchgeführten Audits erfolgen.

### **Teilsystem 4 – Umweltkopplung und Äußere-und-Zukunfts-Planung**

Als Teil des Meta-Systems repräsentiert TS 4 die Verbindungsschnittstelle zur Systemumwelt. Es kann aus dieser noch mehr Information für das System gewinnen, als es durch die lokalen Umwelten der OE möglich ist. Diese Informationen bündelt und interpretiert es und generiert daraus eine langfristige Strategie, wie sich das System an seine Umwelt anpassen kann. Hierfür steht TS 4 mit TS 3 in ständigem Informationsaustausch, um aufgrund des aktuellen Systemzustands realistische Prognosen über die Entwicklung des Systems treffen zu können [23, 64, 233]. Zu diesem Zweck muss das TS 4 nach BEER über eine Art Modell oder zumindest ein gutes Wissen über das Gesamtsystem verfügen, damit korrekte Entscheidungen getroffen werden können [21, 23, 64].

### **Teilsystem 5 – Systemethos**

24.)

---

*„Die Ziele der Gesamtorganisation und die Absicht, die verfolgt wird, werden von [TS] 5 über die vertikale Befehlsachse nach unten weitergegeben.“*

---

[23, S. 163]

Das grundsätzliche Verhalten des VSM wird in TS 5 definiert. Hierfür werden eine Betriebsstrategie, Politik sowie Regeln und Normen etabliert, an welchen sich das Gesamtsystem orientiert. Durch den damit geschaffenen Systemethos wird die Interaktion der TS 3 und 4, indem es die jeweiligen Standpunkte bewertet und in Konfliktsituationen zwischen TS 3 und 4 moderiert, beeinflusst. Folge ist, dass bei auftretenden Konflikten TS 5 entscheiden muss, ob der bisherige Plan für das Gesamtsystem angepasst werden muss oder erhalten bleibt. TS 5 lenkt damit die Entscheidungsfindung in die Richtungen, die dem Gesamtsystem am dienlichsten sind [21, 23, 64, 233]. Eine weitere Aufgabe des TS 5 ist die Versorgung des TS 4 mit Vorgaben und Rahmenbedingungen, nach welchen Informationen in der Umwelt gesucht werden soll, weil das TS 5 die Entscheidungen über die zukünftige Ausrichtung des Gesamtsystems trifft [64].

BEER nennt in [23, S. 134] als Beispiel, dass jemand in Eile versucht, einen Bus zu erreichen, wodurch der gesamte Körper in hoher Auslastung arbeitet. Allerdings zeigt sich, dass diese Person aufgrund mangelnder physischer Fitness nicht in der Lage ist, zum vorgesehenen Zeitpunkt zum Bus zu gelangen. Infolgedessen muss das Ziel des Gesamtsystems – den Bus zu Fuß zu erreichen – angepasst werden. Entweder durch eine alternative Möglichkeit schneller zum Bus zu gelangen oder einen Bus ausfallen zu lassen. Letzten Endes wirkt sich die Definition von Normen und Regeln durch das TS 5 direkt auf die TS 1 aus. Die Autonomie, die sich in den TS 1 einstellen darf, definiert das TS 5 entsprechend seiner Normen und Regeln. Somit bestimmt TS 5 die Umstände und den Umfang, wann den TS 1 die Autonomie wieder entzogen werden kann, sofern durch deren Handlungen eine Gefahr für die Lebensfähigkeit des Gesamtsystems bestehen sollte.

## Rekursion im VSM

Eine Besonderheit des VSM ist, dass die beschriebene Struktur in sich rekursiv anwendbar ist. Je nachdem, welche Rekursionsebene (RE) oder anders ausgedrückt, welches „system-in-focus“ [21] betrachtet wird, ergeben sich die einzelnen Teilsysteme in der Rekursion – vergleiche hierzu [21, S. 136]. Dies erlaubt eine Portierung von Regeln, Komponenten und Systembestandteilen. Als Beispiel dient ein weltweit agierender Konzern, der nach dem VSM strukturiert ist. Seine TS 1 werden durch nationale Niederlassungen auf der globalen Skala repräsentiert. Die nationalen Niederlassungen sind ihrerseits aber auch wieder als vollständiges VSM aufgebaut, mit einem Meta-System – dem nationalen Führungsmanagement – und ausführenden Instanzen – wie Produktions- oder Entwicklungsstandorten. Dies ließe sich im Idealfall durch verschiedene Stufen bis in das kleinste Team fortsetzen. Die Rekursion wird im Abschnitt 4.2.8 der Arbeit noch vertieft.

## Zwischenfazit zum Viable System Model

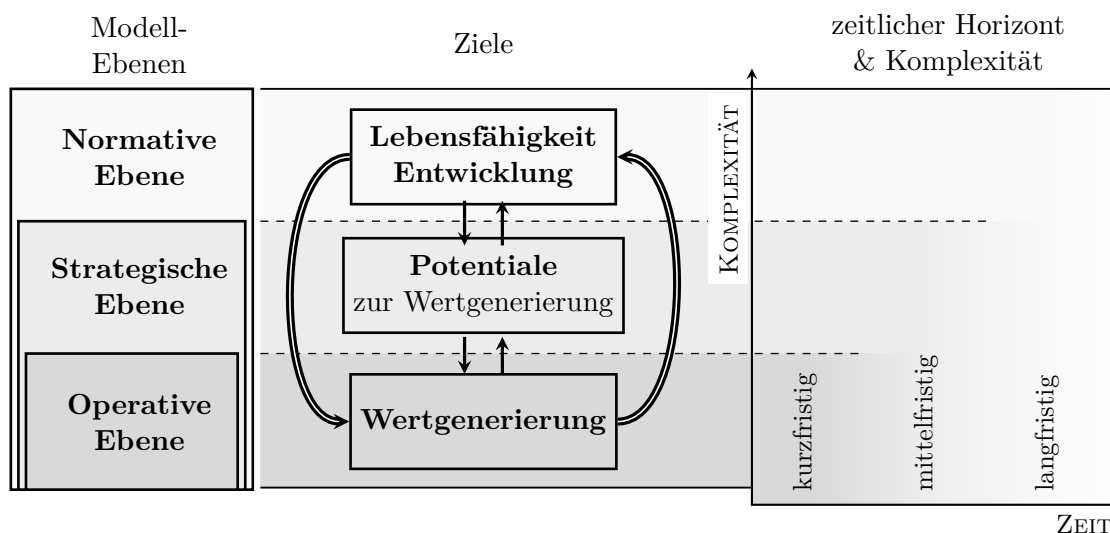
Ein lebensfähiges System ist – laut BEER – aus OE sowie fünf Management-Teilsystemen aufgebaut. Hierin regeln die weitgehend autonom handelnden TS 1 ihre jeweilige OE. Kurzfristig mögliche Konflikte zwischen verschiedenen TS 1 löst das TS 2 durch die koordinierende Tätigkeit. Das Gesamtsystem wird so vor Instabilitäten geschützt. Für die Kohärenz des Gesamtsystems ist das TS 3 zuständig, das die Synergie zwischen den TS 1 schafft und den Betrieb des Gesamtsystems organisiert. Weiter nutzt TS 3 das TS 3\* als Direktverbindung zu den OE zur Ergänzung seiner Datenbasis. Die TS 1, 2 und 3 bilden zusammen das autonome Management, das die systeminternen Vorgänge und Zustände überwacht und lenkt. Das TS 3 erfüllt neben der Funktion im autonomen Management noch eine zweite Aufgabe. Es repräsentiert das autonome Management gegenüber den TS 4 und 5. Für eine langfristige Planung ist TS 4 zuständig. Hierfür sucht es in der Umwelt nach Veränderungen sowie Hinweisen, ob und wie sich das Gesamtsystem auf lange Sicht an diese Gegebenheiten anpassen muss. TS 3 und 4 verhandeln dementsprechend die genauen Vorgaben für die OE. Dazu werden aktuell interne Systemzustände (TS 3) und externe Ereignisse sowie voraussichtlich zukünftige Entwicklungen (TS 4) berücksichtigt. Als normatives Management bestimmt TS 5, wie die einzelnen Teilsysteme handeln dürfen und sollen. Dazu definiert es Betriebsstrategien, Normen und Regeln und prägt damit die Identität des Gesamtsystems.

Die TS 3, 4 und 5 werden von BEER in [23, S. 162] als das «Unternehmensmanagement» bezeichnet. Um diese Bezeichnung zu verallgemeinern, werden TS 3 und 4 im weiteren Verlauf dieser Arbeit als strategisches Management zusammengefasst und TS 5 als normatives Management betitelt. Diese Benennung ist angelehnt an das unabhängig vom VSM vorgeschlagene Model for Systemic Control (MSC) [197] von SCHWANINGER. Dieses erlaubt es auch – wie das VSM – aus der in der Regel großen Auswahl an zur Verfügung stehenden Kontrollmechanismen eine begründete Wahl für die richtige Stelle des Eingriffes in Systemen zu finden. Wodurch auch die Effizienz des Gesamtsystems verbessert werden kann. Im nächsten Abschnitt wird das MSC näher erläutert.

### 3.2.2 Model for Systemic Control – eine Einführung

In [197] stellt SCHWANINGER die These auf, dass die meisten (sozialen) Systeme auf einer internen oder einer Eigenregelung basieren, um möglichst dynamisch agieren zu können. Diese Wahrnehmung der eigenen Autonomie erlaubt es auf langsamere Entscheidungsprozesse von außenstehenden Instanzen nicht warten zu müssen. Durch Hierarchien wird in dem System die interne – innerhalb einer hierarchischen Ebene – als auch die externe Regelung durch höhere Ebenen nötig. In [192] wird gezeigt, dass die Interessen und die jeweiligen Kontrollvariablen der unterschiedlichen Ebenen jedoch oft in Konflikt miteinander stehen. Hierzu sei folgendes Beispiel genannt, in dem die Führungsebene einer Firma einer Abteilung auferlegt, Geld einzusparen, obwohl diese Abteilung gerade in neues Equipment und Personal investieren will. Für diesen Fall schlägt das MSC vor, dass sich die Regelziele der Ebenen voneinander unterscheiden sollen, die sich letzten Endes auch auf die jeweilige Kontrollvariablen auswirken. Um dieses Konzept der Trennung von Regelgrößen und -methoden für Unternehmensstrukturen greifbar zu machen, ist das MSC entwickelt worden.

Abbildung 3.3 zeigt das Modell, das drei Ebenen eines Systems unterscheidet: eine operative Ebene zur Ausführung des Systemzwecks, eine strategische Ebene zur Schaffung von Rahmenbedingungen für die operative Ebene und eine normative Ebene zur Definition der Systemidentität. Diese Ebenen des MSC stehen in einem hierarchisch-integrierten Verhältnis zueinander. Dadurch nimmt die hierarchisch niedrigere Ebene zwar Vorgaben der höheren Ebene an, ist aber gleichzeitig auch in die höhere Ebene eingebunden. Eine Folge dieser Verbindung ist, dass die Ziele und Vorgaben der verschiedenen Ebenen in einem sehr engen und sich gegenseitig berücksichtigenden Zusammenhang stehen. Aufgrund der sehr allgemeinen Quantifizierung der Zusammenhänge im MSC kann dieses neben der Anwendung in der Unternehmensstruktur auch auf nicht-ökonomische Systeme übertragen werden.



**Abb. 3.3** – Das Modell, das ein System in drei voneinander unterscheidbare Ebenen unterteilt und diese sowohl in der Ausrichtung der jeweiligen Ziele als auch des betrachteten Zeitraums gegenüberstellt, wird von SCHWANINGER nach [192] als Model for Systemic Control bezeichnet. Die generelle Struktur des Modells ähnelt dem VSM und nimmt sich vor allem Systemen an, die über mehrere Rekursionsebenen aufgebaut sind.

**Operative Ebene:** Als niedrigste Ebene betrachtet sie Kontrollvariablen, mit denen sie als operative Ebene im nahezu direkten Kontakt steht – Profit, Liquidität und Kunden-Nutzen nennt SCHWANINGER als Beispiele für ein Unternehmen [192]. Über diese Regelgrößen wird ein eher kurzfristiger Zeithorizont abgedeckt. Die Größen bilden die momentane Systemperformanz – also die Effizienz des Systems – ab. Diese Ebene des Systems ist folglich für die Wertgenerierung des Systems zuständig, wobei die Definition der Werte in Abhängigkeit des betrachteten Systems variiert und definiert werden muss.

**Strategische Ebene:** Die strategische Ebene als nächst höhere hat zur Aufgabe, die Voraussetzungen und Potentiale zu schaffen, unter denen die operative Ebene ihre Ziele erfüllen kann. Dementsprechend orientiert sich die strategische Ebene an längerfristigen Größen. Ähnlich der Kontrollvariablen der operativen Ebene lassen sich die Einheiten dieser Größen in der Regel nicht genau quantifizieren – hierfür nennt SCHWANINGER in [192] unter anderem Kernkompetenzen, Marktposition und Kundenwünsche als Beispiele. Der Fokus der strategischen Ebene liegt dementsprechend auf der Effektivität und der Verfolgung einer gewünschten Entwicklungsrichtung des Systems. In Form einer Vorsteuerung werden die Ergebnisse dieser Regelungsinstanz an die operative Ebene übergeben, um diese vorausschauend zu steuern.

**Normative Ebene:** Die Ziele dieser höchsten Ebene stellen die komplexesten und abstraktesten dieses Modells dar. Sie beinhalten die Lebens- und Entwicklungsfähigkeit des Systems. Diese Ebene definiert somit, wie das System grundsätzlich aufgebaut ist und welchen Sinn es erfüllen soll. Wie bereits auf strategischer und operativer Ebene werden die Erkenntnisse der normativen Ebene als Vorsteuerungsgrößen an die nächst niedrigere Ebene weitergegeben.

### Zwischenfazit zum MSC und seiner Beziehung zum VSM

Das MSC unterteilt ein System in drei Ebenen – eine operative, eine strategische und eine normative Ebene. Diese sind für die Regelung ihrer jeweiligen Kontrollgrößen verantwortlich, wobei die Ergebnisse einer hierarchisch höheren Ebene als Vorsteuerung in die Regelung der nächst niedrigeren Stufe eingehen. Die Ziele der drei Ebenen werden im MSC zwar getrennt voneinander betrachtet, können jedoch nach [192] nicht strikt separiert werden. Ebenso handelt es sich bei den drei Ebenen eher um ein Konstrukt, bei dem die niedrigere Ebene in der höheren integriert ist. Dies zeigt sich auch im Aufbau der Regelstruktur, in der eine Ebene stets durch die Vorsteuerung ihrer nächst höheren Ebene beeinflusst wird. Mit dieser Vorsteuerung sollen niedrigere Ebenen auf zukünftige Ereignisse und Tendenzen vorbereitet werden. Aus diesem Grund hängen die Fähigkeiten und Ergebnisse der niedrigeren Ebene immer von den gegebenen Voraussetzungen der höheren Ebene ab. Im Gegenzug kann die höhere Ebene die Resultate niedrigerer Ebenen in ihre eigene Regelung mit einbeziehen. Dies ist von Vorteil, wenn die Performanz und der Zustand der niedrigeren Ebene nur eine geringe oder sehr langsame Wirkung auf die eigene Regelgröße hat.

Das MSC und das VSM unterscheiden sich nicht nur in ihren Namen, sondern auch in ihren Schwerpunkten. Das VSM geht hauptsächlich auf die Struktur und Informationsführung zur Lebensfähigkeit eines Systems ein. Das MSC gibt eine Möglichkeit, Kontroll- oder Regelgrößen auszuwählen, um Effektivität und Effizienz des Systems gezielt zu beeinflussen. Aus diesem Grund ergänzen sich beide Modelle nach [192].

Des Weiteren sind Parallelen zwischen den Modellen zu erkennen. Die normative Ebene des MSC kann dem TS 5 des VSM gleichgestellt werden. Beide setzen sich zum einen mit den Kriterien der Lebensfähigkeit und langfristigen Entwicklung des Systems auseinander. Zum anderen entscheiden sie über die Identität des Systems und definieren somit dessen Existenz innerhalb der Systemumwelt. Das strategische Management des VSM kann ohne Einschränkung der strategischen Ebene zugeordnet werden, weil es die planerische Instanz des Modells repräsentiert. Das TS 3 muss aufgrund seiner zeitlichen Zuordnungen im VSM differenzierter betrachtet werden. Einerseits nimmt es durch seine Zugehörigkeit zum Meta-System und durch die direkte Interaktion mit TS 4 eine strategische Rolle ein, in der es den momentanen Systemzustand gegenüber den zukünftigen Anforderungen vertritt. Andererseits generiert TS 3 aus dieser Interaktion die aktuellen Anforderungen und Sollgrößen der TS 1. Eine Übergabe dieser Sollgrößen erfolgt in der Regel in sehr kurzer Zeit, während die Verhandlungen mit TS 4 in einem längerem Zeitfenster erfolgen können. Die Monitoring-Funktion von TS 3\* dient TS 3 als Informationsquelle für strategische Entscheidungen. Weiter spiegelt sich TS 3\* im MSC in der Form wieder, dass höhere Ebenen gezielt auf den Istzustand von Regelgrößen aus niedrigeren Ebenen zugreifen können, um diese Zustände bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Die TS 1 und 2 wiederum dienen der Umsetzung des Systemzwecks [63] und bilden daher die operative Ebene.

Das MSC betrachtet somit ein System von einem allgemeineren Standpunkt aus, wie es zu Beginn der Einführung des VSM in Abbildung 3.1 der Fall war. Neben der operativen und planerisch-strategischen Ebene bezieht das MSC gleich die normative Ebene auf derselben Stufe mit ein. Im VSM wird diese Unterteilung erst in der detaillierteren Betrachtung auf Teilsystemebene erkennbar.

### 3.3 Kybernetische Prinzipien

Nach der allgemeinen Einführung in die Kybernetik und der Vorstellung zweier Systemmodelle wird in diesem Teilkapitel das Thema der kybernetischen Prinzipien abgehandelt. Bei den vorgestellten Prinzipien handelt es sich um eine Art Gesetze im Sinne häufiger Beobachtungen in kybernetischen Systemen und nicht wie im naturwissenschaftlichen Sinne um physikalische Gesetze, die unumgänglich sind. Dies bringt ASHBY in folgendem Zitat zum Ausdruck:

25.)

---

*„Kybernetik war ursprünglich in mancher Hinsicht eng mit Physik verknüpft, ist aber in keiner Hinsicht abhängig von deren Eigenschaften und Gesetzen. Kybernetik untersucht alle Formen des Verhaltens, die in irgendeiner Weise organisiert, determiniert oder reproduzierbar sind. Die Art der Materie ist hierfür irrelevant, ebenso wie die Einhaltung von Gesetzen der Physik. [...] Die Gesetze der Kybernetik sind nicht von ihrer Ableitung aus anderen Gebieten der Wissenschaft abhängig. Kybernetik hat ihre eigenen Grundlagen [...]“*

---

[15, S. 15–16]

Ein Teil der heute bekannten und am meisten angewendeten Prinzipien basiert auf den Systemprinzipien von FORRESTER, die in [77] beschrieben sind. Neben den Prinzipien von FORRESTER sind die beiden Dokumente [209] und [210] von STEPKEN zu nennen. Sie geben einen Gesamtüberblick über die Kybernetik und ihre Gesetzmäßigkeiten mit Beispielen wieder.



Es handelt sich hierbei allerdings um keine fundierten wissenschaftlichen Arbeiten. Weiter führen die Kybernetiker ASHBY, BEER, MALIK und WIENER in ihren Werken immer wieder auf die kybernetischen Prinzipien hin. Im Folgenden werden deshalb die für diese Arbeit relevanten Prinzipien vorgestellt und auf die entsprechende Literatur hingewiesen.

Nach der Idee der Kybernetik, komplexe Systeme erst zu verstehen und dann zu beherrschen, ist allen Prinzipien gemeinsam, dass sie eine Reduzierung oder Vervielfältigung von Varietät nach sich ziehen. Hierbei wird die Varietät als das Maß für die Komplexität eines Systems und seiner Umwelt verstanden. Das bedeutet, dass zur Regelung von komplexen Systemen die Varietät des Regelsystems erhöht beziehungsweise die Varietät der Systemumwelt reduziert werden muss. Die Varietät ist somit eine quantitative Maßzahl der Komplexität in der Kybernetik. ASHBY hat in [15, Kap. 11] die Varietät – basierend auf der Entropiedefinition von SHANNON [152, S. 77] – eingeführt. ASHBY erläutert die Varietät – allgemein definiert, die Anzahl möglicher Systemzustände – anhand eines Spieles zwischen zwei Spielern R und D. Diese wählen nach einem bestimmten Schema nacheinander Zahlen aus.  $V_R^*$  und  $V_D^*$  entsprechen den jeweiligen Zügen der Spieler. Hieraus ergibt sich die Varietät  $V^*$  nach folgender Gleichung:

$$V^* = V_D^* - V_R^* \quad (3.1)$$

Wenn  $V_D^*$  gegeben und fixiert ist, kann  $V^*$  nur kleiner werden, wenn die Varietät  $V_R^*$  erhöht wird. Daraus folgt, die Vielfalt von R kann die Vielfalt von D senken. ASHBY drückt dies in seinem Gesetz der erforderlichen Varietät aus:

26.)

---

*„...nur Vielfalt kann Vielfalt zerstören.“*

---

[15, S. 299]

BEER beschreibt die Varietät als die Größe, die im Management Beachtung finden muss:

27.)

---

*„Die größte Gefahr für das Management, die erst durch die Kybernetik entdeckt wurde, liegt in der Varietät – in ihrer Erzeugung und Proliferation, in ihrer Reduktion und Verstärkung, in ihrer Filterung und Steuerung. Denn die Varietät ist der eigentliche Stoff, die eigentliche Substanz des modernen Management in einer komplizierten Umwelt, so wie seinerzeit die physikalische Substanz es war, mit der sich unsere Vorfahren herumschlagen mussten.“*

---

[23, S. 239]

BEER stellt laut [36, S. 50] die These auf, dass ein System nur dann lebensfähig sein und bleiben kann, wenn es die betreffende Varietät seiner Umweltbedrohungen annähernd ausgleichen kann. Als Beispiel nennt er den Wurm, der zufrieden im Boden leben können muss, um nicht vom Vogel gefressen zu werden. Der Vogel muss fliegen können, um der Katze zu entkommen und die Katze sollte auf den Baum klettern können, um dem Hund zu entfliehen. Für das Management bedeutet das, es muss seine kritischen Faktoren der Umwelt identifizieren, seine Varietät und Handlungsmöglichkeiten dementsprechend ausbauen sowie durch eine Fokussierung auf die situationsbedingten, wesentlichen Umweltaspekte deren Varietät reduzieren, um lebensfähig bleiben zu können [68, S. 54]. ESPEJO drückt dies wie folgt aus:

28.)

---

*„Summarizing so far, the more distinctions an observer is able to make in a situation, the more complex it will appear to him or her. These distinctions, in turn, are made in the domain in which the observer interacts with the object and, therefore, depend on the ‘observational instrument’ used by the observer. Interacting in the same domain and at the same level of resolution is important for complexity definition.“*

---

[68, S. 35]

Nach dem Gesetz von ASHBY und der Theorie von ESPEJO [68, S. 39] kann die Berechnung der Varietät einer Black Box formelmäßig wie folgt festgehalten werden. Sollten die Ein- ( $n$ ) und Ausgänge ( $m$ ) jeweils zwei Zustände annehmen können, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$V^* = (2^m)^{2^n} \quad (3.2)$$

Sind allerdings auch die Ein- ( $IN$ ) und Ausgänge ( $OUT$ ) in ihrer Anzahl variabel, ergibt sich folgende rasch ansteigende Varietät:

$$V^* = (OUT^m)^{IN^n} \quad (3.3)$$

Für die Auslegung des Managements, der einzelnen Teilsysteme und letzten Endes der Festlegung der Systemgrenzen muss dieser formelmäßige Zusammenhang berücksichtigt werden. Am Ende wird die Varietät der Umwelt  $V_U^*$  immer größer sein als die der operativen Instanz  $V_{oI}^*$  und des Managements  $V_M^*$ . Dies ist anschaulich in Abbildung 3.4 dargestellt. Nach der kurzen Einführung der Varietät wird versucht, das Konzept so auszulegen, dass entsprechend benötigte Varietäten ausgeglichen werden können. Dazu gibt BEER in [25] noch folgende vier Prinzipien des Organisierens vor, die die Varietätsdefinition unterstützen – Zitat 29.) bis 32.):

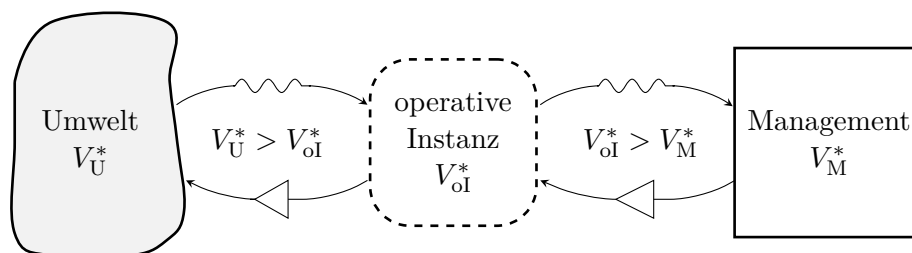
29.)

---

*„The first principle of organization: Managerial, operational and environmental varieties, diffusing through an institutional system, tend to equate; they should be designed to do so with minimum damage to people and to cost.“*

---

[25, S. 97]



**Abb. 3.4** – Das Bild zeigt anschaulich den Zusammenhang der Varietäten  $V^*$  zwischen den drei Instanzen: Umwelt, operative Instanz und Management. Außerdem ist die dämpfende (Federsymbol) und verstärkende Wirkung (Dreiecksymbol) der zu definierenden und erzeugenden Varietät dargestellt. Abgeleitet von Abbildungen aus [68, S. 54, 56] und [21, S. 27].

30.)

---

*„The second principle of organization: The four directional channels carrying information between the management unit, the operation, and the environment must each have a higher capacity to transmit a given amount of information relevant to variety selection in a given time than the originating subsystem has to generate it in that time.“*

---

[25, S. 99]

31.)

---

*„The third principle of organization: Wherever the information carried on a channel capable of distinguishing a given variety crosses a boundary, it undergoes transduction; the variety of the transducer must be at least equivalent to the variety of the channel.“*

---

[25, S. 101]

32.)

---

*„The fourth principle of organization: The operation of the first three principles must be cyclically maintained through time without hiatus or lags.“*

---

[25, S. 258]

Zusammengefasst werden ergänzend zur Varietät folgende Prinzipien in alphabetischer Reihenfolge vorgestellt – wobei es sich nicht immer vermeiden lässt, dass bei der Erklärung der einzelnen Prinzipien auf andere Prinzipien verwiesen wird: Autonomie und Subsidiarität, Black-Box-Modell, Dezentralisierung, Emergenz, Feedback, Hierarchisierung, Lebensfähigkeit, Komplexitätsreduktion durch Informationsverdichtung und festen Systemgrenzen, Rekursion, Resilienz und Selbstorganisation, Skalierbarkeit, Trennung von Funktion und Management, Umweltkopplung und Prädiktion, weiche Modellierung.

### **Autonomie und Subsidiarität**

In hierarchischen Systemen ist das Ziel der Autonomie, Regelfunktionen auf hierarchisch möglichst niedrigen Instanzen ausführen zu lassen, um einen schnellen Regeleingriff zu ermöglichen. Gleichzeitig wird der Informationsfluss an höhere Ebenen auf die für diese Ebenen wesentlichen Aspekte konzentriert. Im Vorfeld muss die Lenkungsebene des Systems entscheiden, wie viel Entscheidungsbefugnis in welcher Hierarchieebene sinnvoll und dem System vor allem unter den Kriterien der Stabilität dienlich ist. Erst wenn in einem System die niedrigere Instanz ihre Aufgaben nicht umsetzen kann, wird die nächst höhere Ebene informiert, um unterstützend einzugreifen. Andererseits muss es möglich sein, den autonomen Objekten ihre Autonomie entziehen zu können, sollte die Stabilität des Gesamtsystems aufgrund der Regeleingriffe der Objekte gefährdet sein [233]. Autonomie kann und sollte jedoch zu einem maximalen Grad zugestanden werden, solange erkennbar ist, dass all diese autonomen Instanzen zusammen auf ein vorab definiertes und vereinbartes Gesamtziel hinarbeiten [21, 23, 64, 233].

Ein weiterer Aspekt, den BEER in diesem Zusammenhang in [23] aufgreift, ist die Rolle von Reflexen. Sie stellen eine andere Form von Autonomie dar. Bei einem Reflex umgehen die ausführenden Einheiten notfalls Steuersignale höherer Ebenen, um sich oder das Gesamtsystem zu schützen. Die Ursachen für die Auslösung eines Reflexes ist dabei von geringerem Interesse als die Beseitigung des fehlerhaften Zustandes [23]. Allerdings muss diese Reaktion von der nächst höheren Systeminstanz wahrgenommen und für das weitere Vorgehen berücksichtigt werden. Der Vorteil von Reflexen ist – wie bei der allgemeinen Autonomie – eine schnellere Reaktionsfähigkeit des Systems, ohne lange Wartezeiten auf Entscheidungen höherer Instanzen.

Wie bei der Einführung des VSM in Abschnitt 3.2.1 genannt, sollen insbesondere die TS 1 und ihre jeweilige OE des VSM autonom handeln. Sie erhalten hierfür lediglich Zielvorgaben durch das TS 3. Die Funktion des TS 2 zeigt die Gefahren der Autonomie auf. Einzelne autonome TS 1 haben die Möglichkeit gegeneinander zu arbeiten, was zu Schwingungen im Gesamtsystem führt. Dieser Gefahr, der durch das TS 2 begegnet wird, stehen die Vorteile der Steigerung von Varietät – in Verbindung mit der Dezentralisierung – und schnellere Reaktionszeiten gegenüber.

Aus diesem Grund kann Management bedeuten, sich zwischen einer zentralisierten Befehlsform und einer Zuweisung dezentraler Autonomie zu entscheiden. Diese Autonomie der Teilsysteme kann und muss allerdings durch entsprechende Eingriffsmöglichkeiten begrenzt werden, wenn der zu erbringende operative, strategische und normative Zusammenhalt des Gesamtsystems nicht mehr gewährleistet wird [120, S. 83-84]. Diese Möglichkeiten können durch Regeln, Strategien oder dergleichen realisiert werden.

In der Politik findet dieses Prinzip unter der Bezeichnung Subsidiaritätsprinzip Anwendung. Hier treten der Staat oder höhere Instanzen erst in den Vordergrund, wenn Instanzen wie Familien oder Gemeinden keinen Handlungsspielraum mehr haben. In der Technik sei an dieser Stelle an den eingangs erwähnten zellularen Ansatz erinnert. Auch hier sollen einzelne Energiezellen autonom agieren, so lange sie dazu in der Lage sind. Erst wenn das gesamte Energiesystem oder die einzelne Zelle nicht mehr in der Lage ist zu agieren, schreitet ein überlagertes Management ein.

#### **Autopoiesis, Resilienz und Selbstorganisation**

33.)

---

*„Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, Erschütterungen zu absorbieren oder ihnen zu widerstehen, sodass das System seine Funktion, Struktur und Identität bewahrt. Ein resilientes System ist dabei durch die Merkmale der Selbstorganisation, der Fähigkeit, zu lernen, und der Anpassungsfähigkeit zu beschreiben.“*

---

nach der Resilience Alliance in [177, S. 31]

Neben der Autonomie sei an dieser Stelle auf die Begriffe und Prinzipien der Autopoiesis, Resilienz und Selbstorganisation hingewiesen. Diese werden in der Literatur oft gleichwertig verwendet. Im Detail unterscheiden sie sich deutlich. Auf das Studium der Literatur [3, 37, 146, 169, 177, 180, 226, SA.27] sei deshalb verwiesen. Hierbei ist festzustellen, dass der Begriff der Autopoiesis eine Kombination aus der Lebensfähigkeit und Selbstorganisation von Systemen ist. Wenn die Selbstorganisation aber im Sinne der Lebensfähigkeit definiert wird, so erlaubt

sie einem System, sich aufgrund seiner Fähigkeiten an verändernde Umweltbedingungen anzupassen [46, S.146]. Der Begriff der Autopoiesis, definiert durch Maturana und Varela, unterscheidet an dieser Stelle zwischen lebenden und nicht lebenden Systemen. Der Grund hierfür ist, dass nur lebende Systeme dazu in der Lage sind, selbst erschaffend und selbst erhaltend aufgebaut zu sein.

### Black-Box-Modell

34.)

---

*„The distinction between outputs and outcomes is quite important here; while the former refer to single values at a particular moment in time, the latter refer to patterns of values through time.“*

---

[68, S. 36]

Bei der Betrachtung komplexer Systeme ist es nicht immer möglich, ein detailliertes Modell des beobachteten Systems aufzustellen. Außerdem ist der Betrachter nicht immer in der Lage und es ist nicht immer nötig, in das Innere des Systems zu blicken. Ihm bleiben so nur die Eingangsgrößen und die darauf beobachtbaren Ausgangswerte – wie in Zitat 34.) beschrieben. Liegt ein derartiges System vor, kann ein Black-Box-Modell erstellt werden, indem aus Rückschlüssen der Eingangs- und Ausgangsgrößen ein abstrahiertes und vereinfachtes Modell des Systems – und seiner Zustände – erstellt und benutzt wird. Gerade im Zuge einer Umweltbetrachtung, die zu komplex ist, um sie in ihrer Gänze zu modellieren, ist der Einsatz eines Black-Box-Modells vorzuziehen. Ein Beispiel im Alltag ist der unterschiedliche Wissenstand, der auch Dinge nicht hinterfragt und sie als Black-Box-Modell betrachtet und nutzt. «Normale» Menschen, die ein Smartphone oder Auto benutzen, hinterfragen selten, wie die genaue Funktion dahinter implementiert oder umgesetzt ist. Man weiß nur, jede Aktion hat eine bestimmte im Vorfeld festgelegte Wirkung. Besitzt man allerdings entsprechendes Hintergrundwissen – wie spezielle Ausbildungen –, kann die Black-Box auch im Inneren analysiert werden [68, S. 26]. Auch Beer definiert in [25] den Sinn der Black-Box-Modell-Betrachtung in den beiden folgenden Zitaten:

35.)

---

*„The first regulatory aphorism: It is not necessary to enter the black box to understand the nature of the function it performs.“*

---

[25, S. 40]

36.)

---

*„The second regulatory aphorism: It is not necessary to enter the black box to calculate the variety that it potentially may generate.“*

---

[25, S. 47]

#### Emergenz

37.)

---

*„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“*

---

nach ARISTOTELES in [210, S. 7]

Mit diesem Zitat von ARISTOTELES ist die Emergenz von Systemen in einem Satz formuliert. Die Emergenz beschreibt die Beobachtung, dass sich Eigenschaften eines Systems erst aus dem Handeln der einzelnen Systembestandteile ergeben. Allerdings sind diese bei der Betrachtung der Eigenschaften der einzelnen Bestandteile nicht offensichtlich. Ein Beispiel für Systeme dieser Art sind Schwarmssysteme. REYNOLDS beschreibt in [174, S. 28] die Regeln, nach denen sich ein Vogelschwarm koordiniert. Drei Regeln sind notwendig und lauten nach [174] und [210] wie folgt:

1. Zusammenstöße vermeiden: Vermeide Kollisionen mit Nachbarn, entferne dich aber auch nicht zu weit.
2. Angepasste Geschwindigkeit: Passe deine Geschwindigkeit der deiner Nachbarn an.
3. Mitte bevorzugen: Orientiere dich stets Richtung der vermeintlichen Mitte des Schwarms.

Mit diesen drei Regeln ist es dem System «Vogelschwarm», bestehend aus einer Summe an eigenständigen Systembestandteilen «Vögel», möglich, selbstständig zu entscheiden, Gebäude zu umfliegen und Hindernissen auszuweichen, indem sich der Schwarm davor trennt und danach wieder zusammenfindet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass keine zentrale Steuerung vorhanden ist, das System autonom agiert und es hochgradig durch die Regeln vernetzt ist. Einige sich dadurch ergebende Vorteile sind:

- die Anpassungsfähigkeit an unbekannte Einflüsse,
- der Aufbau von parallelen Redundanzen und
- die Verlagerung von Anpassungsvorgängen auf die einzelnen Teile des Systems.

Demgegenüber stehen die Nachteile, wie:

- die Unvorhersagbarkeit des Verhaltens,
- die teilweise vorhandene Ineffizienz,
- die indirekte Beeinflussbarkeit und
- das Fehlen der Steuerbarkeit einzelner Systembestandteile.

Zusammengefasst bietet die Emergenz dem System die Möglichkeit der freien Problemlösung. Jedes Element – im Beispiel jeder Vogel – trägt seinen kreativen Teil zur Problemlösung bei, wodurch sich ein dezentral gesteuertes System ohne zentrale Führung ergibt.

#### Feedback, Rückkopplung, Homöostase und Ultrastabilität

38.)

---

*„[Rückkopplung ist] [...] die Eigenschaft, künftiges Verhalten durch vergangene Leistung regeln zu können.“*

---

[236, S. 71]

Der wohl älteste Rückkopplungsmechanismus ist die Homöostase in der Biologie beziehungsweise Physiologie. Sie hat zum Ziel, ein Gleichgewicht bei stark wechselnden Umweltbedingungen einzustellen [200, S. 400]. Hierbei handelt es sich um die Erhaltung eines Gleichgewichtszustandes in offenen, dynamischen Systemen. Wie schon genannt, entwarf ASHBY für technische Systeme einen Homöostaten in [14–16]. Anhand der Physiologie und der genannten Werke ASHBYS fasst STEINBUCH dies wie folgt zusammen:

39.)

---

*„Die Gesamtheit aller Regelvorgänge, welche bewirken, dass gewisse Zustände des Organismus (z. B. Körperhaltung, Körpertemperatur, Blutzuckergehalt, Blutsauerstoffgehalt usw.) in den für das Weiterleben zulässigen Grenzen bleiben, wird als ‚Homöostase‘ bezeichnet. Der englische Neurologe W. R. Ashby hat ein technisches Modell vielfach verknüpfter Regelungsvorgänge gebaut, das er ‚Homöostat‘ nennt.“*

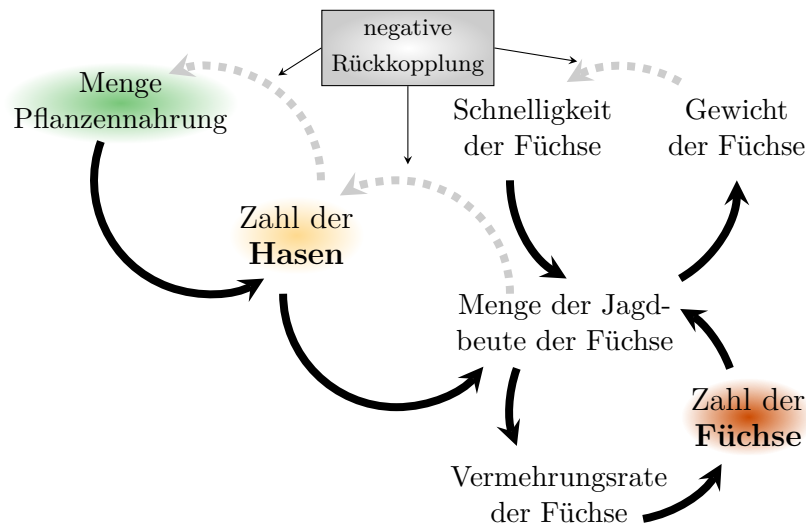
---

[208, S. 145]

Weiter sind Feedback- oder Rückkopplungsschleifen in der – parallel zur Kybernetik [236] hervorgegangenen – Regelungstechnik [137] wichtige Instrumente in der Systembeschreibung und Regelung. Durch den Vergleich von Soll- und Istvorgaben kann auf den nötigen Aufwand der Regelung geschlossen werden. Hierbei kann neben dem Standardregelkreis noch zwischen Feedforward-Steuerungen und Feedback-Regelung unterschieden werden. Auch FORRESTER stellt in seinen Prinzipien den geschlossenen Pfad der Rückkopplungsschleife dar. Dieser besteht aus den Elementen: Zustand, Information über den Zustand, Entscheidung und Handlung [77, S. 19, 89]. Im Bereich des Organic Computing sind Feedbackstrukturen nach dem MAPE-cycle – Monitor, Analyze, Plan and Execute cycle – strukturiert [153]. Die wohl detaillierteste Auseinandersetzung mit Rückkopplungsstrukturen beschreibt VESTER in [230]. Er unterscheidet bei der Analyse und Modellierung von komplexen Systemen zwischen einer positiven und negativen Rückkopplung. Hierbei hat die positive einen aktivierenden und die negative einen dämpfenden Einfluss innerhalb des Systems. Feedbackstrukturen können somit sowohl für die Analyse als auch für die Regeleingriffe im System verwendet werden. Beispielhaft lässt sich das Prinzip der positiven und negativen Rückkopplung auch anhand des Verlaufes der Fuchs-Hase-Population nach VESTER in [231, S. 81] – dargestellt in Abbildung 3.5 – erläutern. Weiter sei an dieser Stelle der Dampf-Fliehkraftregler von WATT genannt, der in [68, S. 25] oder [126, S. 49] näher beschrieben wird. Aufgrund der Kopplung zwischen Kessel und Überdruckventil regelt sich das System je nach Dampfmenge selbst. Als letzten Begriff zum Thema der Rückkopplung und Homöostase wird noch der von ASHBY definierte Begriff der «Ultrastabilität» eingeführt. Systeme und Zusammenhänge, die wie Homöostaten wirken, haben nach ASHBY diese Eigenschaft [14, 22, 23, 141]. Egal wie stark die Auslenkung eines Systems aus der Stabilitätslage ist, das System findet immer wieder zu ihr zurück.

### Hierarchisierung und Dezentralisierung

Die Anwendung dieses Prinzips erlaubt eine Reduzierung der Komplexität des Systems und seiner Umwelt. Entscheidend ist hier, dass die Einführung von Hierarchieebenen oder die Dezentralisierung von Kontrollalgorithmen eine Änderung der Varietät und damit der möglichen Systemzustände herbeiführt [17]. Durch diese Änderung kann das System oder Teile davon auf die vorhandene Umwelt angepasst reagieren. Hiermit kommt es zu einer



**Abb. 3.5** – Beispiel für die positive und negative Rückkopplung in Form einer kybernetischen Räuber-Beute-Beziehung zwischen zwei Tierarten – in diesem Fall Fuchs und Hase – und einer Pflanzenart nach [231] und [126, S. 111].

generellen Erhöhung der Stabilität des Systems. Für die bereits vorgestellten Systemmodelle von BEER und SCHWANINGER ist die Hierarchisierung Grundvoraussetzung für ihren Aufbau. Allerdings sei erneut betont, dass die Hierarchisierung keine Aussage über die Wertigkeit des Teilsystems trifft. Alle Teilsysteme werden in gleichem Maße für das Gesamtsystem benötigt und sind wichtig für den Systemzweck. Durch die Verwendung mehrerer OE im VSM erfolgt eine Dezentralisierung der Funktion. Dies ermöglicht im weiteren Handeln, im Rahmen der lokalen Umwelt und abhängig von den internen Systemvorgängen zu agieren. Hierdurch ergibt sich eine Steigerung der Effektivität und Effizienz des Gesamtsystems.

### Lebensfähigkeit

Im Sinne der Kybernetik bedeutet der Begriff der Lebensfähigkeit, dass ein System als Ganzes in der Lage ist, sich bewusst an eine dynamisch-komplexe Umwelt anzupassen. Hierbei lernt es aus seinen Erfahrungen, entwickelt sich weiter und verliert seine eigene Identität nicht [23, 64, 69, 123, 141]. Die Wahrung der eigenen Identität in der Lebensfähigkeit beschränkt sich jedoch nicht rein auf die Fähigkeit des Überlebens, sondern beschreibt die Interaktion eines Systems mit seiner Umwelt, um seine generelle Existenz, Identität und seinen Zweck zu erfüllen. Nach [64] beinhaltet dies auch die Fähigkeit, sich wenn nötig eine neue Umwelt zu suchen. BEER stellt im Sinne der Lebensfähigkeit und dem Prinzip der Rekursion – das noch erläutert wird – hierzu das folgende Invarianztheorem auf:

40.)

„[...] dass alle lebensfähigen Systeme bezüglich ihrer Strukturen und Lenkungsmechanismen isomorph, also invariant sind. Das Invarianztheorem ist nicht in dem Sinne normativ formuliert, dass alle lebensfähigen Systeme entsprechend dem Modell lebensfähiger Systeme strukturiert sein sollten, sondern dass sie es tatsächlich sind.“

[120, S. 84]



Dieser Aussage stimmt auch SCHWANINGER in [192] zu. Im Sinne von technischen Systemen wird die Lebensfähigkeit deshalb wie folgt definiert: Lebensfähigkeit im technischen Sinne bedeutet das Vermögen, eine spezifische Zustandskonfiguration – in der sich ein System befindet – auf (un)bestimmte Zeit aufrecht erhalten zu können, wobei das Ziel immer die Sicherung des Betriebszieles des Systems ist. Folgendes Zitat von ORLOFF fasst dies zusammen:

41.)

---

*„[E]in technisches System ist nur dann lebensfähig, wenn jedes seiner Teile über eine minimale Funktionsfähigkeit verfügt, aber auch die minimale Funktionsfähigkeit aller seiner Teile als ein einheitliches System gewährleistet.“*

---

[162, S. 227]

Weiter zeigt die Aussage von SACHSSE den Interpretationsspielraum für den Entwickler eines Systems nach den kybernetischen Prinzipien – in besonderem der Lebensfähigkeit – auf:

42.)

---

*„[...] auch die Marionetten werden nicht dadurch lebendiger, dass sie die Lebendigkeit täuschend nachahmen. Weil sich die Kybernetik von Qualitäten abstrahiert, bleiben ihre Aussagen für jede Art qualitativer Interpretation offen.“*

---

[180, S. 244]

### **Komplexitätsreduktion durch Informationsverdichtung und feste Systemgrenzen**

Wie schon gezeigt, ist die Varietät in der Kybernetik als Maß für die Komplexität von Systemen bestimmend. In komplexen Systemen gilt es aufgrund der Vernetzung der Teilnehmer, eine hohe Informationsdichte zu verarbeiten. Durch die gezielte Aggregation von Signalen und die Umwandlung in Kennzahlen oder definierte Systemzustände wird die zu übertragende Information verdichtet und in ihrer messbaren Größe reduziert [15]. Kommunikationskanäle und -medien können so auf ihren Einsatzzweck abgestimmt werden und effizient arbeiten. Methoden, die dieses Vorgehen beschreiben, lassen sich je nach Datengüte mit Hilfe der Fuzzy Logic, oft im Einsatz bei unscharfen Datensätzen und bei probabilistischen Daten mit der linearen partiellen Information oder Bayesschen Netzen als Beispiel beherrschen. Die dadurch fokussierte Wahl der zu übertragenden Information geht einher mit einer Komplexitätsreduktion durch Anpassung der Varietät. Charakteristische Systemgrößen werden durch die mit Systemwissen übersetzten Zustände repräsentiert. In Summe wird das System in seiner Gänze durch die einzelnen Zustände beschrieben. Weiter lassen sich mit der Beachtung systemischer Grenzen deterministische Aussagen über die Zustände eines zu beschreibenden Systems treffen. Aufgrund der Beschaffenheit, gegebener Randbedingungen oder Beschränkungen können bereits beim Aufbau eines Managements unmögliche und mögliche Zustände sowie Situationen des Systems definiert und damit die Komplexität reduziert werden [22]. Dieses Wissen kann insbesondere bei einem Reglerentwurf sowie bei der Prädiktion von Regel- und Steuerungsaufgaben genutzt werden. Bestätigt wird diese Tatsache durch das Zitat 28.) von ESPEJO. Aus technischer Sicht können hier laut SACHSSE, ähnlich der Theorien in der Biologie, Feedforward-Steuerungen zum Einsatz kommen [180]. Diese brauchen im Gegensatz zu Rückkopplungsschleifen keine Abweichung von der Sollvorgabe zu detektieren.

## Rekursion und Skalierbarkeit

43.)

---

*„Alle kybernetischen Systeme sind charakterisiert dadurch, dass es wiederkehrende (rekursive, zirkuläre) Prozesse gibt, deren ständige Wiederholung (Rekursion) das System letztendlich definieren oder charakterisieren.“*

---

[210, S. 3]

Nach BEER, MALIK und KIRCHHOF ist das Prinzip der Rekursion eines der wesentlichsten Strukturierungsprinzipien von lebensfähigen Systemen. Egal aus wie vielen Systemebenen das betrachtete System aufgebaut ist, es wiederholen sich Struktur- und Lenkungsmechanismen [120, S. 83]. Das Prinzip kann für Algorithmen- und Hardware-Bestandteile angewendet werden. Hierbei wird auf eine universelle Formulierung der Schnittstellen geachtet, so ist zusätzlich die Skalierbarkeit des Systems und dessen Einzelbestandteile gegeben. Beispielhaft ist bei der Betrachtung des menschlichen Körpers die Regelstruktur des Gesamtsystems «Körper» identisch zu der einzelnen Zelle. Obwohl die Zelle ein fester Bestandteil des Körpers ist, besitzt auch sie den gesamten Bauplan des Körpers in Form der Desoxyribo-Nukleinsäure – kurz DNS. Beide haben trotz der unterschiedlichen Größe und des physikalischen Aufbaus ein gemeinsames Ziel, nämlich das Gesamtsystems «Körper» am Leben zu halten. Die Kohärenz, also die Verfolgung gemeinsamer Strategien und Ziele auf allen rekursiven Ebenen, ist ein wesentlicher Bestandteil von lebensfähigen Systemen. Durch die Rekursivität können die entsprechenden Aspekte in der Synthese von Systemen auf verschiedenen hierarchischen Ebenen wiederverwendet und aufeinander abgestimmt werden [23, 233]. Durch die Einführung unterschiedlicher Rekursionsebenen, die einer Hierarchie angehören, aber trotzdem hierarchisch gleichgestellt sind, ist die Varietät und damit die Gesamtkomplexität von System und Subsystemen einstellbar. Jede Rekursionsebene ist für sich für andere Arten von Informationen, andere Variablen, andere Systemaspekte und andere Meta-Sprachen zuständig und verantwortlich [141, S. 91]. Hierbei muss allerdings nach AULINS «Law of Requisite Hierarchy» und TURCHINS «Meta-System transition» in [108, S. 18] auf ein abgestimmtes Verhältnis zwischen der Anzahl an Hierarchieebenen und deren Regelungs- oder Lenkungsfähigkeit geachtet werden. Somit kann nach MALIK in [141, S. 92] und KIRCHHOF folgendes festgehalten werden:

44.)

---

*„Die Systemgestaltung nach dem Rekursionsprinzip hat dabei folgende Vorteile:*

- jedes Subsystem eines Rekursionsniveaus stellt für sich eine systemische Ganzheit dar, weil es alle Strukturelemente des lebensfähigen Systems aufweist,*
- jedes lebensfähige System besitzt ein gewisses Maß an Autonomie, weshalb jedes derart strukturierte Subsystem ein hohes Potenzial an Komplexitätsbewältigung besitzt,*
- auf allen Ebenen sind auf Grund der [Rekursion] die gleichen Lenkungsmechanismen, Modelle, Methoden, Detailstrukturierungsprinzipien, Programme etc. anwendbar.“*

---

[120, S. 83]

## Trennung von Funktion und Management

In der Kybernetik wird die Trennung von Funktion und Management aufgrund von meist definierten Systemstrukturen aus Stabilitätsgründen angewendet. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen ausführenden Objekt- und koordinierenden Lenkungseinheiten, definiert in [91, S. 48]. Wie das VSM zeigt, ist hierin nicht ausgeschlossen, dass die Objekte autonom agieren können. Dies geschieht allerdings erst nach einer erfolgten Zuweisung der Erlaubnis zur eigenständigen Autonomie – mit und ohne definierter Grenzen – durch eine überlagerte Lenkungseinheit. Im VSM wird das beschriebene Verhalten durch die operative und Meta-Instanz repräsentiert. Durch ein derartiges Vorgehen lässt sich die Höhe der Varietät beeinflussen. Systeme sollten deshalb mit einer Begrenzung definiert sein, nur so ist gewährleistet, dass nicht alle möglichen Zustände des Systems eintreten können. Als Beispiel dient die Beschreibung des Ampelsystems nach ASHBY [15, S. 188]. Hier reduziert sich die Anzahl der Zustände von acht auf vier, wenn nur die Funktion der Ampel als System im Verkehrswesen betrachtet wird. Die Begrenzung des Systems dient als Einschränkung der Freiheitsgrade des Systems.

## Umweltkopplung und Prädiktion

45.)

---

*„Let's remember that a viable system is capable of independent existence ... within a specified environment. Human beings are perfect examples of viable systems – BUT suck all the air out of the room, and then see how viable they are.“*

---

[21, S. 8]

Alle in einer Beziehung stehenden Elemente eines Systems hängen in einem Wirkgefüge zusammen. Somit beeinflusst die Umgebung, das Umfeld oder die Umwelt ein System und seine Elemente [22, 152]. Deswegen ist es entscheidend, dass ein kybernetisches Management eine Umweltkopplung betreibt. Mit dem Abgleich der äußeren und inneren Systemdaten ist ein stabiler Betrieb leistbar. Die gewonnenen Informationen können zusätzlich für die Bildung einer Prädiktion verwendet werden. Diese muss in keinster Weise hochkomplex sein.

WIENER und ASHBY beschreiben dies in dem Entwurf eines Luftabwehrsystems: Das Geschütz zielt nicht auf das Flugzeug selbst, sondern dorthin, wo es vermutet wird, in Zukunft zu sein [236]. Dies stellt eine einfache prädiktive Funktion dar. Weiter kann die Umweltkopplung und eine nachgelagerte Prädiktion durch die Modellierung der Umwelt geschehen. CONANT und ASHBY schließen daraus, dass die Qualität und Effektivität des darauf aufgebauten Managements von der Qualität des Modells abhängt, das die Umwelt repräsentiert [47]. Wie die Prädiktion im Anschluss ausgestaltet wird, ob mit probabilistischen oder analytischen Ansätzen, hängt von dem zu regelnden System ab. Außerdem kann mit der Betrachtung von vergangenen Daten und der Einbeziehung des eigenen, darauf durchgeführten Verhaltens eine verbesserte prädiktive Vorgehensweise definiert werden. Ansätze dazu finden sich unter dem Stichwort der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens wieder.

#### **Weiche Modellierung**

Wie bei der Umweltkopplung angesprochen, sind komplexe Systeme und deren Umwelt nicht immer vollständig beschreib- und beobachtbar. Eine deterministische Beschreibung – charakterisiert durch fest definierte Werte und Grenzen – ist dadurch nicht mehr in allen Fällen gegeben und gerechtfertigt. Als Alternative bleibt die probabilistische Betrachtungsweise zur Beschreibung des Systems. Sollten aufgrund der Wahrscheinlichkeiten keine scharfen Aussagen mehr möglich sein, so muss in diesem Fall auf messbare Kriterien des Systems zur besseren Analyse der Situation zurückgegriffen werden. ASHBY nennt für diesen Fall Rückkopplungen zweiter Ordnung, die nicht immer aktiv sind, sondern bei bestimmten Schwellenwerten oder der Unterschreitung definierter Unschärfen aktiviert werden [14].

### **3.4 Das Viable System Model in der Anwendung**

Nach der allgemeinen Einführung in das VSM und Vorstellung der wichtigsten kybernetischen Prinzipien erfolgt im folgenden Abschnitt die Vorstellung einiger Anwendungen des Modells in verschiedenen Disziplinen. Hierdurch wird die Vielfalt der Möglichkeiten des Modells gezeigt. Aufgrund der Vielzahl an Anwendungen wird keine Gewähr auf Vollständigkeit übernommen und die Empfehlung zur stetigen Literaturbeobachtung ausgesprochen. An dieser Stelle sei auf die relativ jungen Arbeiten [223–225] von VAHIDI hingewiesen, der über 1000 Veröffentlichungen, die das VSM und die Lehren der Management-Kybernetik betreffen, studiert hat und Statistiken dazu erstellte. Als Ausgangspunkt und Einarbeitung in die Theorie des VSM können diese in Zukunft und in Kombination mit der vorliegenden Arbeit, als sehr hilfreich angesehen werden. Schwerpunkte der Recherche dieser Arbeit waren die folgenden Anwendungsbereiche: Organisationelle, soziale, medizinische und technische Anwendung des VSM.

#### **3.4.1 Anwendung des VSM im organisationellen Umfeld**

Das VSM wurde ursprünglich von BEER im Management für Organisationen und ihre komplexen Strukturen geschaffen. Deshalb sind hier die meisten Anwendungsfälle des VSM zu finden. Generelle Organisationsanwendungen und die Eignung des VSM dafür beschreiben ALVAREZ [6], FOSS [78], ESPEJO [66] und MAIER [138]. Auch die aus und mit dem VSM entstandene VIPLAN-Methode und -Software von ESPEJO in [67] basiert auf den Gedanken des Modells. Weiter wird in [76] ein Krankenhaus durch FONSENCA und in [123] durch KOULOURA eine Düngemittelfabrik in ihren Organisations- und Strukturelementen nach dem VSM aufgebaut. Beispiele für kybernetische Unternehmensarchitekturen, die mit Hilfe des VSM erarbeitet wurden, sind durch BUCKL in [42] dargestellt. ZADEH beschreibt in [244] hingegen die nach dem VSM aufgebaute Unternehmensstruktur einer australischen Regierungsbehörde. Im Bereich des sogenannten Change-Management wird die Anwendung des VSM durch WILBERG in [238] vorgeschlagen. Auch für die Organisation eines Dienstleistungsunternehmens wurde das VSM von GOLNAM in [95] angewendet. In [125] beschreibt KUMMAMURU, wie das VSM dabei half, die Organisation einer Softwareentwicklungsfirma zu strukturieren. Neben all diesen Anwendungsfällen sei hier auf die weiteren Veröffentlichungen [189, 190, 194, 198, 199] von SCHWANINGER hingewiesen, die sich ebenfalls mit der Anwendung des VSM in der Unternehmensführung beschäftigen und diese Anwendung kritisch hinterfragen. Eine

Gegenüberstellung des VSM mit der System-Dynamic-Methode und der Entscheidungsanalyse stellt MINGERS in [151] vor. Ein weiteres Tool namens VSMmod führt PÉREZ-RÍOS in [165] ein und beschreibt ausführlich die Rekursivität im VSM-Modell. In [164] widmet er sich dem generellen Management Thema und der Anwendung des VSM in diesem. Dem allen gegenüber wird von HUTCHINSON in [109] die Gefahr der Anwendung des VSM in der Organisationsstrukturierung durch die gezielte Manipulation von Informationen aufgezeigt.

### 3.4.2 Anwendung des VSM im sozialen Bereich

Der zweite Bereich der Anwendungen des VSM betrifft den sozialen Sektor und seine Wissenschaften. Hierunter fällt nicht nur die schon behandelte Unternehmensführung, sondern auch die Betrachtung ganzer Gemeinden und Landesgefüge als komplexe soziale Systeme. Dies beschreibt zum Beispiel ESPINOSA in [70] und [71]. Er diskutiert die Anwendung des VSM in sozialen Systemen ganzer Länder – wie Irland oder Latein-Amerika. In Verbindung des VSM mit Multi-Agenten-Systemen ist in diesem Bereich die Arbeit [114] von JONES zu nennen, die die Entwicklung hin zum Ballungsraum der Grenzregion um Tijuana-San Diego genauer untersucht. In [54] zeigt DEVINE die Vorteile der Anwendung des VSM im Bereich der Wirtschaftsentwicklung nationaler Systeme und deren Innovationssysteme. Die wohl größte Anwendung im sozialen Bereich fand das VSM durch BEER selbst von 1971 bis 1973, als unter der Präsidentschaft von Salvador Allende auf demokratischem Wege versucht wurde, sozialistische Strukturen in der chilenischen Ökonomie zu etablieren [26, 110, 233]. Weiter evaluiert DHILLON in [55] die Veröffentlichungsperformanz von Wissenschaftlern. SCHWANINGER zeigt in [193] die Anwendung des VSM im sozialen Bereich. Er gibt eine Empfehlung für die optimale Lage einer Zugverbindung und deren Auswirkungen auf die sozialen Gegebenheiten der Anwohner. In [196] vergleicht SCHWANINGER das VSM außerdem mit der Living-Systems-Theory von Jim und Jessie MILLER, die dem VSM sehr ähnlich ist. Im Bereich des Katastrophenschutzes und der damit verbundenen Organisation von Rettungsaktivitäten arbeitet LEONARD in [132] mit dem VSM als Strukturierungshilfe.

### 3.4.3 Anwendung des VSM in der Medizin

Auch in der Medizin findet das Modell Anwendung. RIPPEL beschreibt in [177] die biologische und organisationale Resilienz. Er benutzt das menschliche Immunsystem, um resiliente Verhaltensmuster zu definieren. Bei der Untersuchung benutzt er das VSM als Referenz. Die Arbeit kann als eine Ergänzung zu BEERS Arbeiten gesehen werden, da er selbst das Immunsystem nicht als Teil des VSM sah. Dies wird im nächsten Kapitel aufgegriffen. Zum anderen baut ERBSEN in [64] die gesamte Struktur und Organisation eines Krankenhauses mit Hilfe des VSM auf.

### 3.4.4 Anwendung des VSM in der Technik

Im Bereich der technischen Anwendungen, in welchen das VSM benutzt wird, ist vor allem die Informatik zu nennen. In [171] wird von RAI die Unterstützung von Produktionsprozessen beschrieben. Bei diesen ist die Software mit dem VSM-Gedanken aufgebaut worden. Im Bereich der Softwareentwicklung von Lieferkettenmanagementsystemen findet das VSM durch BROSZE in [38] Anwendung. In [111] wird von JAFAROV die Entwicklung eines cloud-basierten

Serviceprogramms nach dem Modellgedanken für Business-Anwendungen aufgezeigt. Weitere Anwendung findet es auch durch HERRING, RICHTER und STOYANOV in [105, 175, 212] im Bereich der Softwareentwicklung. ELEZI zeigt in [62] beispielhaft die Implementierung eines Regelsystems im Bereich der Linienfertigung mit Hilfe des VSM auf. Speziell bei der Hardwareentwicklung sei auf JIAS Beitrag [113] hingewiesen. Hierin wird die Implementierung einer elektromagnetischen Abschussvorrichtung auf Basis des VSM beschrieben. Im Bereich der künstlichen Intelligenz und dem Design für lebensfähige Computersysteme sei an dieser Stelle [217] genannt, worin THOMPSON die Resultate anhand des VSM aufbaut. Als Überleitung für den nächsten Anwendungsbereich ist die Arbeit [2] von ADAM anzuführen, der das Thema der Bordnetz- und Spannungsstabilität in Fahrzeugen aus algorithmischer Sicht betrachtet.

#### 3.4.5 Anwendung des VSM in der Fahrzeugtechnik

Neben den Software-Bestandteilen sind auch Strukturierungen der Hardware mit Hilfe des VSM möglich. Beides wurde vor allem in der Stabilisierung der Bordnetzspannung im Fahrzeug in den folgenden Arbeiten näher untersucht. Wie in der Einleitung schon erwähnt, beschäftigte sich GIOVANAZZI als einer der ersten mit diesem Thema und erstellte in den Arbeiten [91, 121, 122] einen Vorschlag für ein prädiktives Leistungsmanagement im Fahrzeug. Vertieft wird dieses Konzept durch die Arbeiten [81–86, 88] von FRÖSCHL, die sich mit dem Energiemanagement unter dem Arbeitstitel «flexible Energy and Power Management (fEPM)» beschäftigen. Diese Arbeiten werden ergänzt durch die eher komponentennahen Arbeiten von WINTER [240, 241], TAUBE [215, 216] und TIPPE [218, 219]. Hierin werden vor allem die Themen der Leistungselektronik, Versorgungsschienen und Multifunktionseinheiten sowie die Modellierung der Komponenten immer in Synergie mit dem VSM behandelt. Als erste Serienanwendung wurde letzten Endes das fEPM als sogenanntes «ConnectedPower Management» im BMW 7er des Jahres 2015 erstmalig integriert [87] und durch selbstlernende Ansätze in [100, 101] erweitert.

### 3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Kybernetik als Wissenschaft zur Komplexitätsbeherrschung vorgestellt. Wichtiger Bestandteil der Theorie sind die kybernetischen Prinzipien und Systemmodelle wie das VSM von BEER oder das MSC von SCHWANINGER. Es zeigt sich, dass sich durch die Betrachtung der Varietät und damit durch die genaue Definition der Systemzustände, die Komplexität in Systemen beherrschen lässt. Das VSM ist vor allem durch die drei Prinzipien der Lebensfähigkeit, der Rekursion und der Autonomie geprägt. In drei Bereichen wurden Anwendungsfälle des VSM vorgestellt. Hier zeigt sich, dass es in der Technik anwendbar ist und die Strukturierung, Kontrolle und die Regelung von Systemen vereinfacht und unterstützt. Somit ist das Design und die Auslegung eines EMS mit Hilfe des VSM möglich. Das VSM wird im nächsten Kapitel weiter detailliert betrachtet, bevor es zur Anwendung im Rahmen des EMS kommt.

## 4 Vertiefung des Viable System Models

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, wurde das VSM von BEER seit 1959 zur Strukturierung von Organisationen entwickelt und bis heute in anderen Domänen und Disziplinen eingesetzt und angepasst. Der Ursprung des gesamten Modells liegt in der Physiologie des menschlichen Nervensystems. In seinem Buch «Kybernetische Führungslehre» [23] – original, «Brain of the Firm» – aus dem Jahr 1972 stellte BEER zum ersten Mal neurophysiologische Analogien vor. Aufgrund dieser langen Anwendungszeit des Modells und zum Teil auftretenden Abweichungen vom Original BEERS werden im Folgenden das Modell und die Physiologie vertieft betrachtet. Dies ist nötig, da sogar BEER selbst in [23] zum Teil widersprüchlichen Aussagen am Beispiel der Zuständigkeit für die innere Homöostase trifft. Die Zitate 46.) und 47.) zeigen dies auf. In Zitat 46.) weist BEER die Aufgabe den paravertebralen Ganglien und damit dem TS 2 zu, während er in Zitat 47.) wiederum das TS 3 in dieser Verantwortung sieht.

46.)

---

*„In Wirklichkeit sind es diese paravertebralen Ganglienketten, die die Stabilität der inneren Umwelt regeln. Sie sind die eigentlichen Rückkopplungsregler und Integratoren.“*

---

[23, S. 109]

47.)

---

*„[TS] 3 [...], dessen Hauptfunktion darin besteht, die Stabilität der inneren Umwelt der Organisation zu regeln.“*

---

[23, S. 182]

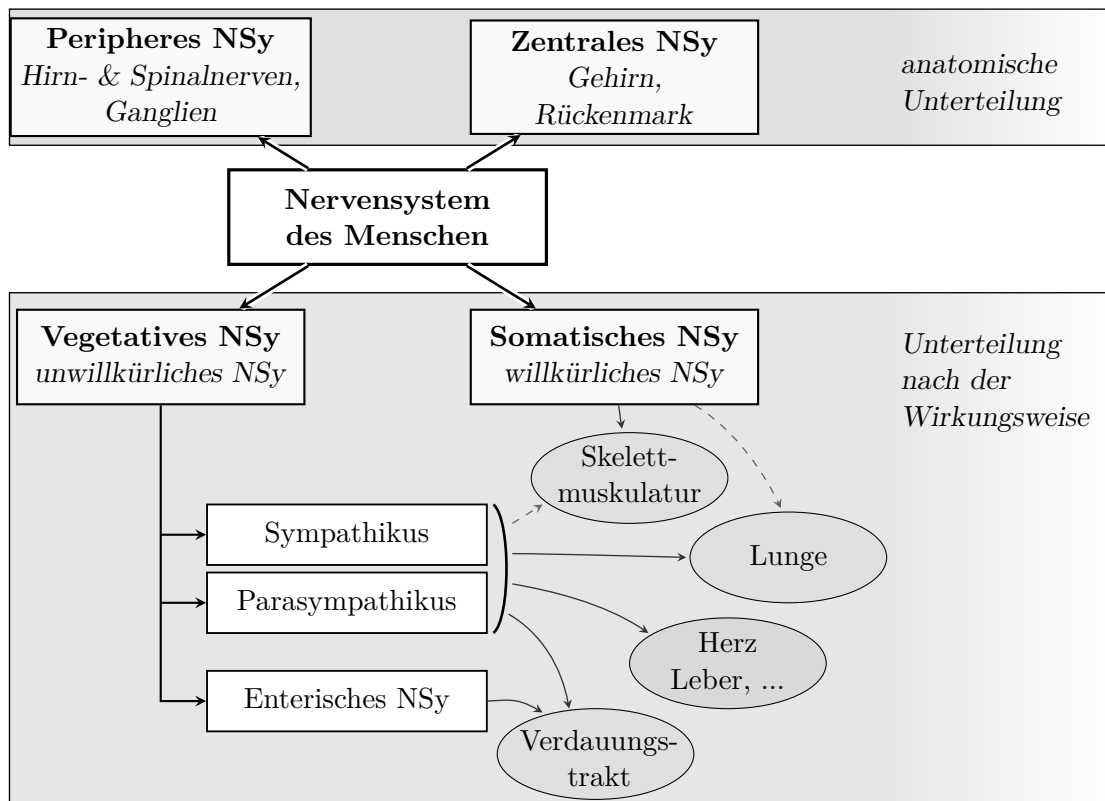
### 4.1 Grundlagen der menschlichen Physiologie

Diese Uneindeutigkeit zeigt, dass gerade für die Anwendung des Modells in der Technik dem Entwickler die ursprünglichen Gedanken und Strukturen bekannt sein sollen, die lebensfähige Systeme – wie der Mensch – haben. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Teilkapitel eine kurze Einführung in die Physiologie des menschlichen Körpers – speziell des Nerven- und Immunsystems. An dieser Stelle empfiehlt es sich, bereits den Abschnitt 3.2.1 und das Teilkapitel 3.3 gelesen und verstanden zu haben, da dort ein Überblick und Einstieg in das VSM und die entscheidenden kybernetischen Prinzipien gegeben wird. Diese sind hilfreich, um die im Teilkapitel 4.2 und Kapitel 6 folgenden Ausführungen nachvollziehen und verstehen zu können. Mit dieser vertiefenden Auseinandersetzung mit dem VSM wird schließlich in Kapitel 6 das Konzept für das vollwertige kyELM abgeleitet.

### 4.1.1 Nervensystem

Das Nervensystem des Menschen dient BEER in [23] als Grundlage für die Gestaltung des VSM. Zur weiteren Vertiefung der Inhalte sei auf die an entsprechenden Stellen genannte Literatur verwiesen. Als Überblick für das Nervensystem dient Abbildung 4.1.

Im Detail wird das Nervensystem anatomisch in ein zentrales und ein peripheres Nervensystem (ZNS und PNS) unterteilt. Gehirn und Rückenmark – untergebracht in einer schützenden Hülle (Schädel und Wirbelsäule) – bilden hierbei das ZNS, während das PNS über den Körper verteilt ist und das ZNS über 12 Hirn- und 31 Spinalnervenpaare mit den jeweiligen Organen verbindet. Im Bereich des Gehirns – oberhalb des Rückenmarks – verlassen die Hirnnerven das ZNS. Die Spinalnerven entspringen dagegen direkt dem Rückenmark. Über die Sinnesorgane – Augen, Haut, Nase, Ohren, etc. – und dem Körper empfängt, verarbeitet, verknüpft und reduziert das ZNS Umweltinformationen. Außerdem stellt das Gehirn die übergeordnete Regelzentrale der somatischen und vegetativen Funktionen des Körpers dar, während Reflexe im Steuerungsbereich des Rückenmarks liegen. Wird die Wirkungsweise der einzelnen Bestandteile zur Unterscheidung verwendet, ist die Wirkung einzelner PNS-Vorgänge für den Menschen wahrnehmbar, aber auch aus chemischer und anatomischer Betrachtung im Speziellen differenzierbar. Bewusste und willkürliche Steuerungsvorgänge des Körpers werden in diesem Fall vom somatischen Nervensystem (SNS) übernommen.



**Abb. 4.1** – Bestandteile des menschlichen Nervensystems (NSy) und Zuordnung zu bestimmten Organen nach [200]. Eine Unterteilung erfolgt entweder anatomisch oder nach der Wirkungsweise – nach [SA.3].



Unbewusste und unwillkürliche Regelungsvorgänge werden hingegen vom vegetativen Nervensystem (VNS) durchgeführt. Als Beispiel für ein von beiden Systemen angesteuertes Organ ist die Skelettmuskulatur zu nennen, die sowohl bewusst – Bewegungsapparat – als auch unbewusst – Zwerchfell oder Herzmuskel – angesteuert wird. Hierbei wird klar, dass sowohl SNS als auch VNS auf ein und das selbe Organ wirken können und je nach Situation eher autonom oder bewusst gearbeitet wird. [184, 200, 207]

Als nächstes zu nennen sind die mehr autonom ablaufenden Reflexe. Hierbei werden Reize über Rezeptoren aufgenommen und über sensitive – oder auch afferente – Nervenfasern an das Rückenmark geleitet. Hierzu muss der Reiz allerdings einen bestimmten Schwellenwert erreichen. Im Rückenmark werden dann entsprechend einer Reizdetektion über motorische – oder auch efferente – Nervenfasern entsprechende Organe zur Reaktion angesprochen. Diese einer Regelung gleichkommende Anordnung und Informationsverarbeitung im Nervensystem – ohne eine Beteiligung des Gehirns – wird in der Physiologie als Reflexbogen bezeichnet. Als Beispiel führt BEER das Zwicken eines Schlafenden in [23, S. 104] an. Obwohl ein Zurückweichen des jeweiligen Gliedmaßes erfolgt – um dem Reiz zu entkommen – erfolgt kein Aufwachen. Erst wenn der Reiz eine noch höher liegende Schwelle überschreitet, würden die Informationen an höhere Kontrollzentren weitergeleitet werden, die den Schlafenden aufwachen ließen. Parallel dazu ist der Patellarsehnenreflex zu nennen, der ebenfalls verschiedene Reizschwellen und entsprechende Auslösestufen aufweist. [176, 184, 200, 207]

Des Weiteren ist auf die beiden Komponenten Sympathikus und Parasympathikus als Teil des VNS hinzuweisen. Sie sorgen bei der Funktionserfüllung autonom gesteuerter Organe – je nach Umweltsituation – für eine Funktionsdämpfung oder -anregung und verlaufen durch den gesamten Körper. Nur der Verdauungstrakt wird primär durch das enterische Nervensystem geregelt. Sympathikus und Parasympathikus beeinflussen diese Regelung lediglich untergeordnet, indem sie die Verdauungsaktivitäten hemmen oder fördern. Der Sympathikus wirkt dabei anregend auf alle mit ihm verbundenen Organe und versetzt diese koordiniert in einen Zustand erhöhter Aufmerksamkeit und Leistungsbereitschaft. Als Beispiel erhöht sich die Atem- und Herzfrequenz, Blutgefäße werden erweitert sowie Haut und Schleimhäute verengt. Die Koordination aller beteiligten Organe ist dadurch möglich, dass der Sympathikus aus je zwei Neuronen pro Organ besteht. [184, 200, 207]

Als Neuron wird hier eine Zelle bezeichnet, die der Aufnahme, Verarbeitung und Weitergabe von Impulsen und Informationen im Nervensystem dient. Das erste Neuron sitzt an entsprechenden Stellen des Rückenmarks, die die einzelnen Organe regeln und greift die relevanten Informationen auf. Diese wird an das zweite Neuron geleitet, das sich neben der Wirbelsäule befindet. Die – über einen gemeinsamen Nervenstrang verbundenen und neben der Wirbelsäule verlaufenden – Neuronen des Sympathikus bilden die paravertebralen Ganglien – je nach Literatur auch als Grenzstrang bezeichnet. [184, 200, 207]

Die Funktionsweise der paravertebralen Ganglien beruht auf chemischen Prozessen, womit sie sich von der initialen Regelung der Rückenmarksabschnitte abgrenzt. In einzelnen Abschnitten der Wirkungskette kommen verschiedene Botenstoffe – auch Neurotransmitter genannt – zur Weiterleitung von Informationen zum Einsatz. Zwischen Rückenmark und Ganglion – oder zwischen erstem und zweitem Neuron – wird die Information mit Acetylcholin weitergeleitet. Abgestimmte Befehle für die Organe werden hingegen mit Noradrenalin übertragen. Abbildung 4.2 zeigt diese Wirkkette grafisch. [184, 200, 207]



**Abb. 4.2** – Wirkkette des Sympathikus bei der Weiterleitung von Informationen mit den beteiligten Neurotransmittern – nach [184, 207].

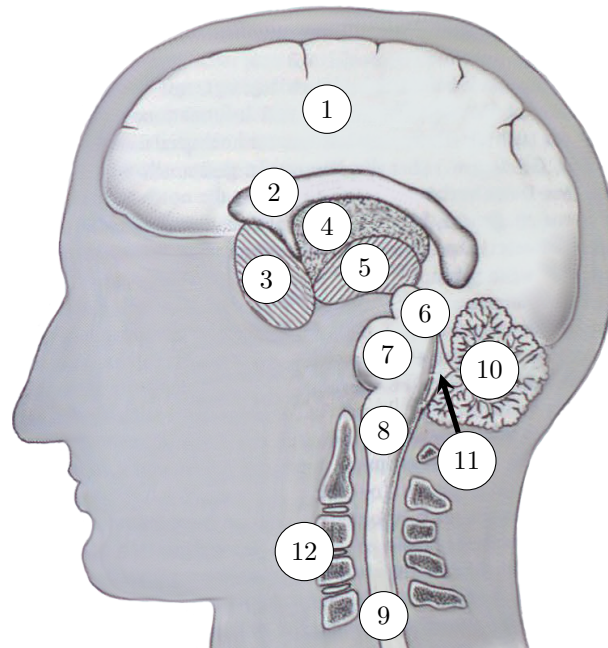
Durch diese beschriebene Verbindung der Rückenmarksabschnitte wird die anregende Wirkung des Sympathikus auf die einzelnen Organe koordiniert. Außerdem erfolgt hier die Reflexauslösung an weitere beteiligte Organe sowie im Falle einer Überschreitung der höheren Reizschwelle die genannte Gehirnweiterleitung. Der Parasympathikus als Pendant zum Sympathikus ist ebenfalls großflächig über den Körper verteilt und hat eine beruhigende Wirkung auf einzelne Organe und verlangsamt beispielsweise die Herz- und Atemfrequenz. Unterschiede zum Sympathikus sind eine nicht vorhandene Koordination über Neuronen und eine Informationsweiterleitung ausschließlich mit Acetylcholin. Weiter besitzt der Parasympathikus Regelzentren im Hirnstamm, dem Hypothalamus und im Bereich der unteren Wirbelsäule nahe dem Kreuzbein. Der Sympathikus hingegen nur in den Seitenhörnern des Rückenmarks. Zusammengefasst dienen Sympathikus und Parasympathikus der autonomen Regelung der inneren Organe, die lediglich durch übergeordnete Zentren des Gehirns überwacht und kontrolliert wird. Die angesprochenen Organe werden in der Regel sowohl durch Sympathikus als auch Parasympathikus beeinflusst, sodass es in den Organen zu einer entgegengesetzten Anregung kommt, die durch höhere Instanzen geregelt wird. [98, 184, 200, 207]

#### 4.1.2 Gehirn

Wie bereits beschrieben, wird das ZNS anatomisch in Gehirn und Rückenmark unterteilt. Beide Begriffe fassen wiederum mehrere Teile zusammen. Anatomisch und funktionelle Bereiche werden im menschlichen Gehirn unterschieden. Die für das VSM nach BEER wesentlichen Bestandteile sind in Abbildung 4.3 qualitativ dargestellt.

Hierzu gehört das Großhirn (Telecephalon), das zusammen mit der Hirnrinde (Cortex) etwa 80% der gesamten Gehirnmasse ausmacht [97]. Es besteht aus der rechten und linken Hemisphäre, die nahezu symmetrisch aufgebaut und über den Gehirnbalken (corpus callosum) verbunden sind. Sensorische Felder zur Verarbeitung und Speicherung von Sinneseindrücken, motorische Felder zur Steuerung von Bewegungen sowie Gedanken- und Antriebsfelder, die für das Denk- und Erinnerungsvermögen zuständig sind, umfassen den funktionellen Umfang des Großhirns. Weiter nach unten gehend folgen die Basalganglien (Nuclei basalis). Sie bilden in Kombination mit dem Kleinhirn (Cerebellum) das motorische Kontrollzentrum. Zu den Aufgaben der Basalganglien gehört die Koordination der somatischen Bewegungen und das Planen der motorischen Abläufe unter Beachtung der Informationen, die in der Großhirnrinde aufgenommen werden. Der daraus entstandene Bewegungsplan beinhaltet alle räumlich und zeitlich abgestimmten Aspekte der Bewegungsrichtung, -amplitude, -geschwindigkeit und -intensität. Parallel dazu erfolgt die Feinabstimmung der Motorik im Kleinhirn, die oft wiederholte Bewegungsabläufe durch Abspeicherung in einen Automatismus übergehen lässt. Somit dient das Kleinhirn neben der Steuerung der Stützmotorik allgemein dem Großhirn als Regler in der Motorik. Das danach kommende Zwischenhirn (Diencephalon) bildet den Übergang vom Großhirn zum Hirnstamm. Es ist unterteilt in Thalamus, Hypothalamus samt Hirnanhangdrüse – die sogenannte Hypophyse, die für die Produktion von Hormonen

1. Großhirn & Hirnrinde
2. Balken (Corpus callosum)
3. Basalganglien
4. Zwischenhirn
5. III. Ventrikel
6. Mittelhirn
7. Varolsbrücke
8. verlängertes Rückenmark
9. Rückenmark
10. Kleinhirn
11. IV. Ventrikel
12. Halswirbel



**Abb. 4.3** – Qualitative Darstellung des Gehirns und seiner Bestandteile – nach [23]

zuständig ist. Aufgabe des Thalamus ist die Filterung der Informationen, die das Gehirn aus dem Körper erhält, sowie Sinneseindrücke, bevor diese an das Großhirn gesendet werden. Der Hypothalamus ist das Schaltzentrum der vegetativen Körperfunktionen. Seine Aufgabe ist es beispielsweise, die Körpertemperatur, den Schlaf-Wach-Rhythmus, das Schmerzempfinden, die Schweißsekretion und den Wasserhaushalt zu regulieren. Des Weiteren ist der Hypothalamus für die Haltung der Balance zwischen Sympathikus und Parasympathikus zuständig und gewährleistet so die Homöostase des Körpers. Das Zwischenhirn ist außerdem von dem III. Ventrikel, Hohlräume, die mit Hirnwasser – auch Liquor genannt – gefüllt sind, umgeben. In Summe sind im Gehirn vier untereinander in Verbindung stehende Ventrikel vorhanden. Die Aufgabe des Hirnwassers ist es, Gehirn und Rückenmark mit Nährstoffen zu versorgen, Stoffwechselprodukte abzutransportieren und vor mechanischer Beschädigung und Überhitzung zu schützen.

Der nächste und evolutionär älteste Teil des Gehirns ist der Hirnstamm (Truncus encephali). Dieser wird vollständig von beiden Gehirnhälften umschlossen. Er verbindet das Kleinhirn und Rückenmark mit dem Großhirn und setzt sich aus Mittelhirn (Mesencephalon), Brücke (Pons) und verlängertem Rückenmark (Medulla oblongata) zusammen. Manchmal werden Brücke und verlängertes Rückenmark als Nachhirn (Myelencephalon) bezeichnet. Der Hirnstamm ist der Ort, an dem sich die Nervenbahnen auf dem Weg vom Rückenmark zum Gehirn kreuzen, sodass die Informationen der rechten Körperhälfte in der linken Hirnhälfte ankommen und umgekehrt. Zusätzlich sind lebenswichtige vegetative Funktionen wie Atem- und Herzfrequenzregelung, Blutgefäßweite und Stoffwechsel sowie die Auslösung von Husten, Niesen und Erbrechen als Reflexe im Hirnstamm lokalisiert. [23, 97, 176, 184, 200, 207]

Zusammengefasst ist das Gehirn ein komplexes Managementsystem, das über seine Evolution hinweg gezeigt hat, welches Potenzial in ihm steckt und wie es sich weiterentwickeln kann.

### 4.1.3 Immunsystem

Der nächste vorgestellte Bestandteil der Physiologie, der auch Parallelen zum VSM zulässt, ist das Immunsystem. Dieses wird zwar in [23] nicht explizit verwendet, allerdings zeigen ELEZI in [63] und RIPPEL in [177], dass es zur Ergänzung und Weiterentwicklung des VSM dient. Laut ELEZI sähe BEER das Immunsystem in [25, S. 608] als:

48.)

---

*„[...] [agent] to the brain and the nervous system.“*

---

[25, S. 608]

Aus diesem Grund hat BEER es in der Entwicklung des VSM ausgeschlossen. Allerdings ist das Immunsystem in der Lage, autonom auf Bakterien, Fehlfunktionen von Körperzellen, fremde Substanzen, Pilze und Viren adäquat zu reagieren. In Thymus und Milz werden Immunzellen zur Bekämpfung von Erregern gebildet und über das lymphatische System im gesamten Körper verteilt [176, 213]. Genauer gesagt kann die Abwehr des Immunsystems in eine unspezifische und spezifische Abwehr unterteilt werden.

Die unspezifische Abwehr ist eine sehr schnelle und allgemeine Reaktion auf alle Arten von Erregern. Hierzu kommen bei Krankheitserregern weiße Blutkörperchen (Leukozyten) zum Einsatz. Sie behindern den Proteinaufbau der Erreger, hemmen Entzündungen, verlangsamen das Zellwachstum oder zerstören befallene Zellen. Die Phagozyten (eine Untergruppe der Leukozyten) sind auch unter dem Begriff der Fresszellen bekannt. Sie sind ein intelligenter Teil des Immunsystems und können im Zuge der unspezifischen Abwehr Krankheitserreger durch ihre Oberflächenstruktur erkennen, Informationen über den Erreger an die spezifische Immunabwehr weitergeben und den Erreger letzten Endes zerstören. So ist das Immunsystem in der Lage, aus aktuellen und vergangenen Krankheiten zu lernen. [176, 213]

Dieser Prozess des Lernens erfolgt in der spezifischen Abwehr. Neben den Phagozyten gibt es noch die Immunglobuline und die Lymphozyten. Die Immunglobuline werden allgemein als Antikörper bezeichnet und zerstören die Erregerzellen, die von den Phagozyten nicht erkannt werden. Sie werden ähnlich den Lymphozyten durch Impfung oder schon überstandene Krankheiten gebildet. Bei den Lymphozyten erfolgt eine Unterscheidung in kurz- und langlebige Zellen – auch Gedächtniszellen genannt. Der Plan zur Erstellung der langlebigen Lymphozyten wird im Rückenmark gespeichert und steht somit bei einem erneuten Befall des Erregertyps als Abwehrmechanismus zur Verfügung. Durch eine aktive Impfung – Verabreichung von abgetöteten oder geschwächten Krankheitserregern – kann die Erinnerungsfunktion der Zellherstellung angesprochen werden. Dieser Abwehrmechanismus erfolgt vollkommen autonom, nur bei einer zu langsamen oder unzureichenden Funktion nimmt der Mensch diesen Prozess als Krankheit mit Nebenerscheinungen wie Schmerzen und Fieber wahr. [176, 213]

Auch beim Immunsystem kann zusammengefasst gesagt werden, dass es sich um ein komplexes Management mehrerer Systembestandteile zur Bekämpfung und Abwehr von nicht-körpereigenen Zellen handelt. Und auch hier sind Parallelen zum VSM zu identifizieren.

## 4.2 Das Viable System Model im Detail betrachtet

Nach der Einführung in die Physiologie werden in diesem Teilkapitel die einzelnen VSM-Bestandteile im Detail betrachtet und die Grundlagen für die Umsetzung in der Technik und der Anwendung in der stationären Energiespeicherung herausgearbeitet und definiert. Als Grundlage gilt im Generellen die Literatur [21, 23, 24, 26] von BEER, [141] von MALIK und die in den entsprechenden Abschnitten genannten Werke.

In [110] diskutiert JACKSON die Vor- und Nachteile des VSM in sozialen und ökonomischen Anwendungsfällen und präsentiert die Sichtweise von CHECKLAND. Dieser sieht im VSM eine Struktur, die nur in Form von Maschinen umsetzbar sei. Denn der freie Wille der Menschen in sozialen Systemen ist eine dynamische Größe, die das VSM per se zwar beherrscht, aber dadurch können die wichtigsten Komponenten des VSM in sozialen Systemen nur unzureichend berücksichtigt werden. JACKSON betont damit die Eignung des VSM als Auslegung für ein abgestimmtes Design von Informationssystemen. Die Aufmerksamkeit der Entwickler werde durch die Anwendung des Modells auf die Informationsquellen sowie die passende Verwendung von Vorgaben und Kontrollen gelenkt.

Somit liefert das Modell einen Mehrwert für die Auslegung von adaptiven und zielorientierten Systemen. Im Unterschied zu sozialen Systemen kann für technische Systeme der freie Wille als nicht vorhanden angesehen werden, weil Algorithmen und Mechanismen schon während der Entwicklung zu bestimmen sind. Die Rahmenbedingungen und der Grad der Selbstorganisation des Systems muss dementsprechend bei der Entwicklung definiert werden.

In der Detailbetrachtung des VSM werden deshalb folgende Fragen geklärt:

- Welche Aufgaben haben die einzelnen Teilsysteme und deren Bestandteile zu erfüllen?
- Wie leiten sich diese Aufgaben aus der Physiologie ab?
- Wie arbeiten die Teilsysteme zusammen und formen ein großes Ganzes?
- Wie sind die Funktionen der Teilsysteme aus technischer Sicht zu interpretieren oder repräsentierbar?

### 4.2.1 Operative Einheiten – Aktoren

Die operativen Einheiten (OE) des VSM sind als die ausführenden – laut BEER in [21] – und die Werte generierenden Elemente für das Gesamtsystem – laut WALKER in [233, S. 9–12] – charakterisiert. In der Physiologie sind es Organe und Muskeln, die laut BEER für den menschlichen Körper die Rolle der OE einnehmen und ihren Beitrag zum Gesamtsystem «Körper» leisten. In der Physiologie bleibend, wird allerdings das Immunsystem von BEER nicht als OE gesehen, wie es in Abschnitt 4.1.3 gezeigt wurde, obwohl der Körper ohne die Abwehrmechanismen des Immunsystems nicht lange überleben würde, sobald er von Krankheitserregern befallen wäre. Das Immunsystem liefert also einen merklichen Mehrwert und dient einem höheren Ziel und Zweck des Gesamtsystems «Körper», der durch das Überleben und Leben definiert ist. Also können Einheiten, die sowohl durch eine direkte als auch indirekte Auswirkung auf den Systemzweck – positiv oder negativ – beitragen, als OE angesehen werden.

Dies lässt sich anhand der Unterteilung des Nervensystems in einen somatischen und einen vegetativen Teil begründen. Der somatische Teil – repräsentiert durch den Bewegungsapparat –

wird durch den überwiegend vegetativ geregelten Organteil in der Erfüllung des Systemzwecks Fortbewegung unterstützt, indem das Gesamtsystem «Körper» entsprechend konditioniert und somit die Homöostase des Gesamtsystems aufrechterhalten und eine gleichzeitige Fortbewegung ermöglicht wird. In einer Organisation ist dies vergleichbar mit einer Informationstechnik (IT)-Abteilung einer Produktionsfirma [233]. Sie nimmt eine unterstützende Rolle in der Firma ein. Durch die Gewährleistung einer ordnungsgemäß arbeitenden IT-Infrastruktur bringt sie der Firma einen Mehrwert und leistet ihren Beitrag an der Produktion neuer Waren. Sollte die IT nicht funktionieren, wirkt sich dies negativ auf das Produktionsziel und damit auf den Systemzweck aus. Diese Beispiele zeigen, dass komplexe Systeme meist über eine Vielzahl an Teilsystemen verfügen, wenn sie effizient und durchdacht aufgebaut sind. Dies gilt sowohl in ökonomischen, biologischen und letzten Endes auch in technischen Systemen. Jedes Teilsystem und hier insbesondere jede OE hat einen definierten Zweck zu erfüllen oder Ziele zu erreichen, die letzten Endes dem Gesamtsystem dienen. Das kybernetische Prinzip der Emergenz kommt hier zum Tragen. Die OE in bestehenden Systemen können allerdings nur dann korrekt bestimmt werden, wenn der Zweck des betrachteten Systems bekannt ist [64]. Als Anhaltspunkte hierfür können sowohl die Wertgenerierung [233] als auch die Umweltkopplung und die nächst höhere oder niedrigere Rekursionsebene dienen, die von Tätigkeiten und Erzeugnissen dieser OE profitieren sollen [21, 23, 64].

Anschaulich und in der Technik umgesetzt wird diese Denkweise in GIOVANAZZIS Leistungsmanagement in [91]. Alle Arten elektrischer Aktoren werden als kybernetische Objekte gesehen, können durch das Management – unter Beachtung ihrer Funktion – beeinflusst werden und leisten einen Beitrag zur Stabilisierung der Bordnetzspannung.

Zusammenfassend lässt sich für die OE eines in der Technik verwendeten VSM festhalten, dass die Aufgaben „Werte generierend“ und „zweckdienlich“ als äquivalent angesehen werden müssen. Somit können alle Bestandteile eines Systems als OE angesehen werden, die einen Mehrwert für das zu entwerfende VSM liefern. Die Identifikation der Einheiten muss aber immer unter Beachtung der vorhandenen Rekursionsebenen stattfinden. Dieser Aspekt wird noch genauer in Abschnitt 4.2.8 behandelt. Die einzuhaltenden Schnittstellen einer OE sind in Tabelle 4.1 eingetragen und in Abbildung 4.4 dargestellt. Im Grunde handelt es sich um den Ein- und den Ausgang der OE zum Management TS 1 (OE- und OE+), die Schnittstellen zur lokalen Umwelt der OE (OE-U und OE+U), die Schnittstellen zum überlagerten Meta-System über TS 3\* (OE-M und OE+M) und die direkte vertikale Verbindung (OE<sub>v</sub>) zu den anderen OE, die nicht in jeder VSM-Beschreibung verwendet wird.

**Tab. 4.1** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten der Operativen Einheit (OE) zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.4 in Anlehnung an [23, S. 176]. Die Gesamtübersicht über alle Teilsysteme und OE ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

| Knoten          | Aufgaben  |
|-----------------|---|
| OE+/OE-         | Ein- und Ausgang der OE ihrer Hauptfunktion                                   |
| OE+U/OE-U       | Verbindung der OE zu ihrer Umwelt (Sensor, Datenverbindung, etc.)             |
| OE+M/OE-M       | Schnittstelle für den direkten Meta-System-Eingriff des TS 3*                 |
| OE <sub>v</sub> | operationale Verbindung zwischen den OE – je nach System-Definition vorhanden |

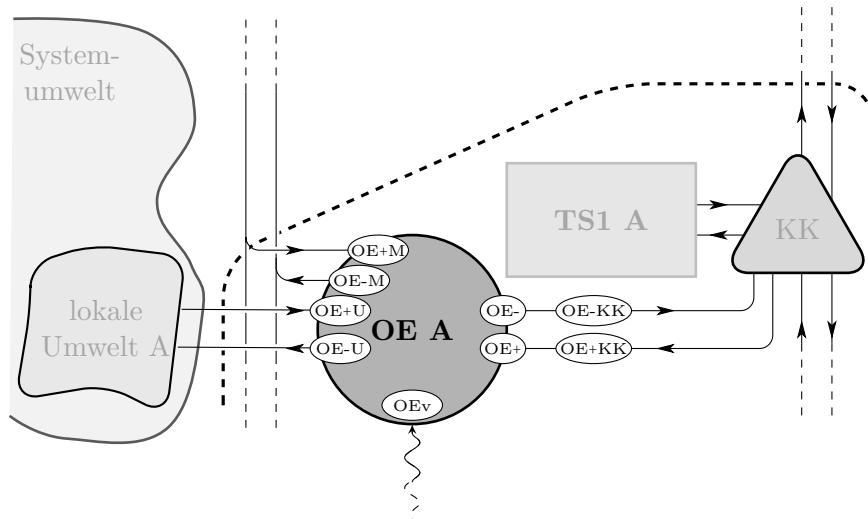


Abb. 4.4 – Darstellung der Schnittstellen-Knoten an der Operativen Einheit (OE) – nach [23, S. 176].

#### 4.2.2 Teilsystem 1 – autonome Regelzentren

Die TS 1 repräsentieren im VSM die Management- oder Meta-System-Einheiten, die von BEER aus der Funktion der Rückenmarksabschnitte hergeleitet wurde. Sie bilden die Regelzentren der Organe oder Muskeln und sind über die Nervenfasern des Sympathikus und Parasympathikus verbunden. Regelvorgaben erhalten sie entweder von zentral-vertikal höheren Hirnarealen oder durch einen horizontal eingebetteten Reflex. Die Kombinationen OE und zugehöriges TS 1 stellen im VSM die lateral, horizontale Regelung dar. Dies zeigt Abbildung 3.4 und detaillierter Abbildung 4.5. Anhand dieser aufgezeigten Kommunikationspfade muss die Varietätsbeherrschung auf dieser Ebene definiert werden. Letzten Endes ist auf diese Weise die zentralisierte, vertikale Steuer- und die autonome horizontale Regelachse im VSM festgelegt. BEER beschreibt die zentrale Befehlsachse samt der TS 1 wie folgt:

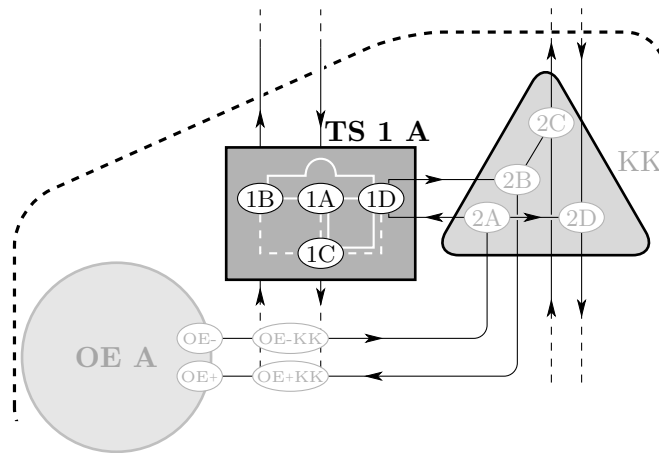
49.)

„Also muß[!] eine zentrale Befehlsachse mit Spezialcomputern vorhanden sein, [...]. Es sind drei Aufgaben zu erfüllen, die nunmehr bekannt sind und als Befehle formuliert werden können.“

1. Eingehende Daten prüfen und unterscheiden, welche Befehlsmaßnahmen zu ergreifen sind. Maßnahmen einleiten und die entsprechend modifizierten Informationen weitergeben.
2. Alle Daten, die auf dieser Stufe gefiltert werden sollen, aussuchen und prüfen. Aufwärtsbewegung komprimieren, erleichtern oder hemmen.
3. Transaktionsregister für den Fall speichern, daß[!] Einzelheiten wieder aufgefunden werden müssen.“

[23] – S. 94

Aus 49.) wird deutlich, dass in den TS 1 eine Komplexitätsreduktion durch Informationsverdichtung – Punkt 2 in 49.) – stattzufinden hat. Und zusätzlich müssen die TS 1 die genannten Spezialcomputer repräsentieren. Wie diese Aufgaben in TS 1 auf die einzelnen Schnittstellen-Knoten der Kommunikation und Funktionen der Teilsysteme verteilt sind, zeigt



**Abb. 4.5** – Darstellung der Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 1 zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [23, S. 176].

Abbildung 4.5 nach [23]. Der Knoten 1A empfängt die Daten der oberen Teilsysteme und überprüft, ob die eingehenden Vorgaben für dieses TS 1 bestimmt sind. Bei einer positiven Übereinstimmung wird nach der Übersetzung der Vorgaben der entsprechende Sollwert an 1D weitergegeben. 1D setzt diese Maßnahmen um und regelt das Verhalten der OE. Hierfür generiert 1D die Sollwerte für die OE und gleicht diese mit den entsprechenden Istwerten ab. Der Knoten 1B filtert, komprimiert, übersetzt und sendet die Informationen für die Berichterstattung an die oberen Teilsysteme. Knoten 1C beeinflusst die Knoten 1A, 1B und 1D insofern, dass er die Aufgabe der normativen Planung übernimmt. Er erfüllt die Funktionen der TS 4 und TS 5 auf der nächst niedrigeren rekursiven Ebene des VSM. Folglich ist es auch 1C, der für die Speicherung von Informationen aus der Vergangenheit – also für das Anlegen des «Transaktionsregisters» laut 49.) – zuständig ist. Die Funktionen der Schnittstellen-Knoten 1A bis 1D sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die gezeigte Abbildung 4.5 veranschaulicht zusätzlich die Verbindungen der Knoten zu denen der anderen Teilsysteme und gibt somit einen Überblick über die Zusammenhänge, die von BEER im autonomen, horizontalen Management identifiziert sind.

Das eben beschriebene, autonome Management ist also in der Lage, seine Lebensfähigkeit und Funktion in dem ihm bekannten und definierten Rahmen zu erhalten und zu erfüllen.

**Tab. 4.2** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 1 zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.5 in Anlehnung an [23, S. 176]. Die Gesamtübersicht über alle Teilsysteme und Operative Einheiten (OE) ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

| Knoten | Aufgaben  |
|--------|---|
| 1A     | Empfangen der Soll-, Umwelt- und Normativen-Daten der TS 3, 4 und 5           |
| 1B     | Senden der verdichteten Istdaten an TS 3                                      |
| 1C     | Planungsfunktion des TS 1 (TS 4 und 5 der nächst niedrigeren Rekursionsebene) |
| 1D     | Stellen der Soll- und Regelgrößen sowie Einleiten von Reflexen                |



Hierbei gilt es aber, diesen Rahmen entsprechend frei zu wählen. Dies macht BEER anhand folgender Aussage deutlich:

50.)

„Dinge, deren sich die Hirnrinde bewußt[!] ist, können für das autonome System tödlich sein – eine weitgehend unphysiologische Bedingung.“

[23, S. 166]

Aussage 50.) zeigt, dass das autonome System – TS 1 und ihre zugehörige OE – für sich und in seiner Umwelt stabil arbeiten muss. Wie das Systemziel und das große Ganze erreicht wird, entscheiden die überlagerten Teilsysteme. Als Beispiel zu der Aussage im Zitat 50.) nennt BEER die Funktion des Herzens. Wäre dieses sich selbst bewusst, dass es eine überlebenswichtige Funktion inne hat, so könnte es aufgrund der Angst des Scheiterns außer Takt geraten.

In technischen Systemen ist der Mechanismus der TS 1 auf einen klassischen Regler übertragbar. Anhand der Differenz von Soll- und Istwert wird die Regelgröße des Systems beziehungsweise die Regelstrecke durch die Stellgröße beeinflusst – vergleiche Abbildung 4.6. Ist es dem Regler nicht möglich, seine Sollwerte zu stellen, so wird nach BEER über den Knoten 1D die Einleitung eines hinterlegten Reflexes veranlasst. Dazu ist nur der Knoten 1D in der Lage, weil er als einziger im TS 1 in Verbindung mit der OE steht. Bei der Auslösung eines Reflexes weicht TS 1 von den initialen Vorgaben des TS 3 ab, um das Teil- oder Gesamtsystem zu schützen. Der Eintritt und die Auswirkungen eines Reflexes müssen bei Überschreiten der im Vorfeld definierten Schwellenwerte an das TS 3 gemeldet und dort entsprechend bei der Planung berücksichtigt werden. Die zweifachen Schwellenwerte, wie sie in der Physiologie oder in ökonomischen Systemen nach [23] vorhanden sein können, sind allerdings für technische Systeme nicht praktikierbar. Dies liegt an den Unterschieden in den zu beachtenden Zeitkonstanten.

Technische Systeme sind in der Regel so ausgelegt, dass ihre Rechenschrittweite kleiner ist als die charakteristischen Zeitkonstanten des zu regelnden physikalischen Systems. Pro Sekunde

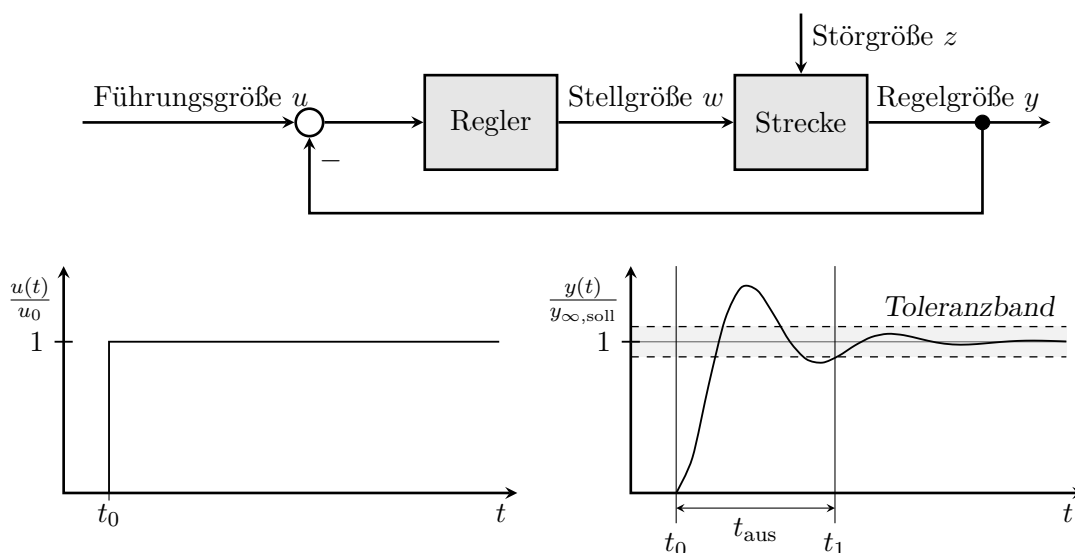


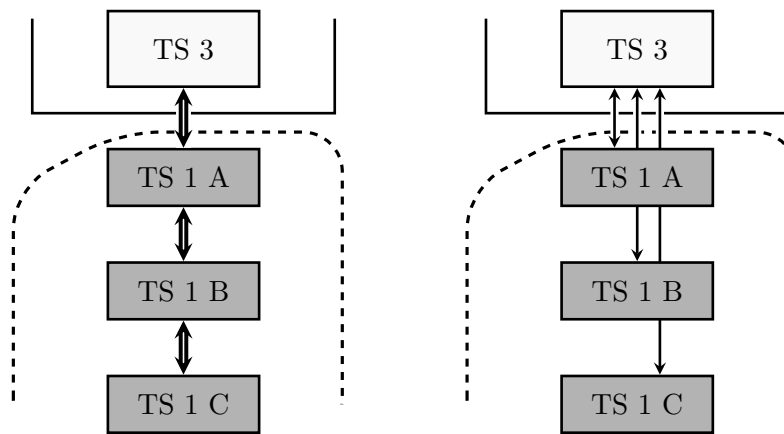
Abb. 4.6 – Einfacher Regelkreis und möglicher Verlauf der Sprungantwort – nach [187].

können mehrere tausend Vorgaben für die Aktoren eines Systems generiert werden. Demnach ist es gerechtfertigt, den Eintritt eines Reflexes unmittelbar und ohne Passieren eines zweiten Schwellenwertes an die überlagerten Teilsysteme zu melden. Daraufhin kann TS 3 die Vorgaben für den nächsten Rechenschritt anpassen. Daraus ergibt sich für technische Systeme, dass die Schwellen und somit auch der Grund für die Auslösung und die einzuleitenden Reaktionen eines Reflexes im Vorfeld in der Betriebsstrategie definiert werden. Nur so wird sichergestellt, dass TS 3 und TS 1 durch ihre regelnden Funktionen nicht gegeneinander arbeiten. An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass sich sowohl in der menschlichen Physiologie als auch im daraus abgeleiteten VSM die paravertebralen Ganglien in Form der Koordinations-Knoten des TS 2 zwischen den OE und ihrer TS 1 befinden. In vielen Beiträgen zum VSM ist dieser Zusammenhang nur noch angedeutet oder gar nicht dargestellt [63, 66, 69, 84, 91, 192, 235]. Deshalb ist in dieser Arbeit in allen Abbildungen des VSM die Signalführung bewusst in Anlehnung an die Physiologie sowie an [21] und [23] gezeichnet, nämlich von den TS 1 über die Koordinations-Knoten des TS 2 zu den OE.

Für die Repräsentation der «zentralen Befehlsachse» aus Zitat 49.) sind in der Physiologie die Nervenfasern im Rückenmark gemeint, mit denen die einzelnen Regelzentren untereinander und mit dem verlängerten Rückenmark bis zum Gehirn verbunden sind. In der Technik wird diese Kommunikation in Form von Datenleitungen zwischen Recheneinheiten realisiert. Als Beispiel kann ein serielles Datenbussystem (z. B. CAN, LIN, FlexRay) verwendet werden. Verschiedene Recheneinheiten werden über einen Datenbus verbunden, und jede empfängt alle auf dem Datenbus übertragenen Nachrichten. Um eine Zuordnung zwischen einer definierten Nachricht und der entsprechenden Recheneinheit zu gewährleisten, wird jede Nachricht mit einem definierten «Message Identifier» versehen. Die Recheneinheit im TS 1 kann anhand des Identifikators überprüfen, ob die Befehle, Sollwerte oder Informationen in der Nachricht für sie bestimmt sind oder nicht. In der Regel ist im TS 3 eine zentrale Recheneinheit, die die unterlagerten Einheiten mit Vorgaben versorgt und so das Gesamtsystem steuert beziehungsweise regelt. Die Art der seriellen Verschaltung der TS 1 bringt einen Nachteil mit sich. Sollte die serielle Datenverbindung zwischen den TS 1 und TS 3 beschädigt sein, kann nur noch ein Teil der Recheneinheiten mit Informationen versorgt beziehungsweise können keine Informationen von ihnen abgefragt werden. In der Physiologie wäre dies durch eine Querschnittslähmung repräsentiert. Beim Entwurf technischer Systeme kann dieser Nachteil minimiert werden, indem die TS 1 parallel verschaltet werden. Dadurch hätte jedes TS 1 eine direkte Datenverbindung zum TS 3. Die parallele Verschaltung der TS 1 erfordert zwar einen größeren Hardware-Einsatz und lässt die Kosten ansteigen, erhöht aber die Ausfallsicherheit des Systems. Zusätzlich ist eine Steigerung der Rechenfrequenz möglich. Aufgrund einer Reduzierung der zu übertragenden Daten entsteht eine Entlastung der einzelnen Kommunikationsverbindungen. Anschaulich ist dies in Abbildung 4.7 dargestellt.

### 4.2.3 Teilsystem 2 – Koordination

Im Körper erfolgt die Koordination der Organe über das sympathische, anregend wirkende, und das parasympathische, dämpfend wirkende, Nervensystem. Weiter sind die Regelzentren des Rückenmarks einerseits über die zweiten Neuronen des Sympathikus mit den Organen und gleichzeitig untereinander verbunden und bilden damit die paravertebralen Ganglien. Anhand dieser definiert BEER die Funktionen und Aufgaben des TS 2 im VSM, die vorrangig die Koordination und Abstimmung der TS 1 samt ihrer OE ist.



**Abb. 4.7** – Veranschaulichung der zentralen Befehlsachse zur Verbindung des TS 3 mit den TS 1 in unterschiedlichen Topologien:  
 links: serielle Verschaltung bzw. Anschluss an einer Datenleitung (z. B. Bussystem)  
 rechts: parallele Verschaltung

Im Gesamtsystem «Körper» wird das gemeinsame vegetative Ziel der Organe – Sicherung der Lebensfähigkeit und Homöostase – durch die gezielte und gegenseitige Unterstützung gewährleistet. Wird zum Beispiel primär ein Organ durch das Rückenmark angesprochen, so erfolgt zusätzlich sukzessive eine Anregung der umliegenden Organe durch den Sympathikus. Die Koordination zwischen Sympathikus und Parasympathikus wird – wie im Abschnitt 4.1.2 vorgestellt – durch den Hypothalamus, einen Teil des Zwischenhirns, als übergeordnetem Regler des VNS durchgeführt. Ihm kann somit die von BEER eingeführt Funktion der RZ des TS 2 zugeordnet werden. Dieser Teil des Gehirns wird von BEER auch als Schnittstelle zwischen TS 3 und TS 4 [23, S. 144] und damit höchster Regler des autonomen Systems (TS 1-3) gesehen. Somit ist an dieser Stelle eine Unstimmigkeit in BEERS Ausführungen zu identifizieren. Im Gegensatz zum menschlichen Körper, der bei Überlastung nicht trivial neue Organe hinzufügen kann, können ökonomische und technische Systeme als dynamische adaptive Systeme erweitert oder reduziert werden. In ökonomischen Systemen kann eine neue Abteilung geschaffen oder eine bestehende Abteilung aufgelöst werden. Gleichermäßen kann einem technischen System eine Komponente hinzugefügt oder aus diesem entfernt werden.

Dieses Wissen über die Anzahl der Teilnehmer und deren Zu- und Abschaltung wird von der RZ verwaltet. Die RZ empfängt außerdem stets die Pläne des strategischen Managements und setzt diese über Veränderungen der TS 1 in Kenntnis. So kann TS 2 die TS 1 und deren zugehörige OE mit Hilfe der Rückkopplung im Sinne des strategischen Managements koordinieren.

51.)

„Die Reaktion des jeweiligen [TS] 1 geht unmittelbar zu den Computern des [TS] 2, wo sie örtlich rationalisiert und dann über das zentrale (somatische) System in die Kontrollzentren von [TS] 3 eingespeist werden. Die gleichen Informationen gehen aber auch über die Sympathi[k]us-Anschlüsse nach oben und erreichen das Kontrollzentrum auf einem anderen Weg.“

[23, S. 132]

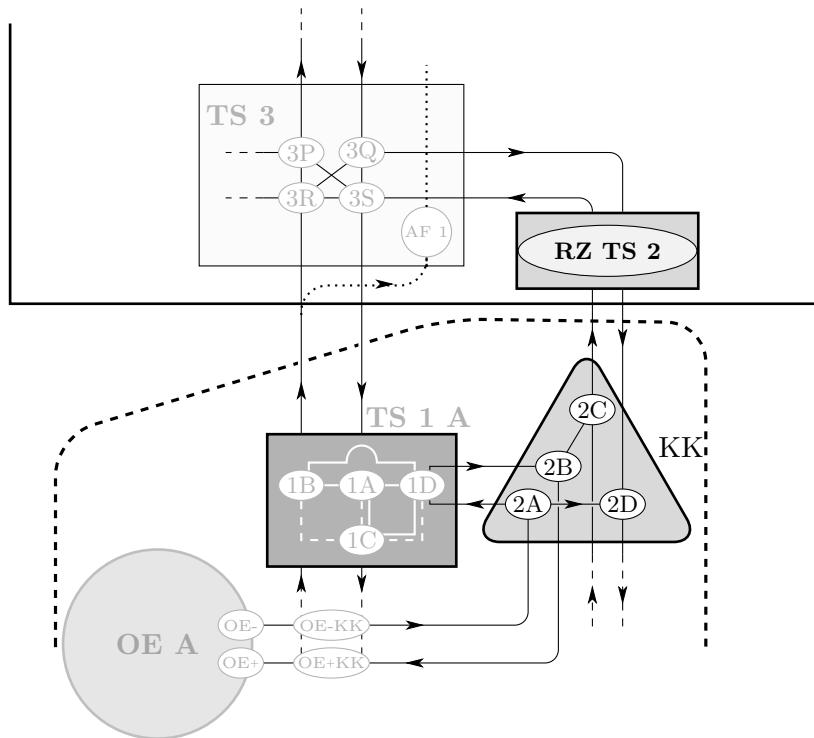
Zitat 51.) von BEER zeigt, dass die RZ die Ergebnisse der OE und TS 1 mit Hilfe der KK – den «Computern des [TS] 2» – zusammenfasst und die Information verdichtet an das TS 3 weitergibt. Hierbei erfolgt die Abstraktion der Informationen der OE in den KK, die somit die Modularität des Systems unterstützen, weil die KK die detaillierten Informationen in standardisierte Größen übersetzen können. Diese Größen kennt die RZ und kann mit ihnen eine Koordination durchführen, ohne die genaue Beschaffenheit der OE und ihrer TS 1 kennen zu müssen. Parallel und aus Gründen der Redundanz wird diese Information auch von den TS 1 an das TS 3 in ihrer Meta-Sprache übermittelt. Für die Verbindung zwischen der RZ und den KK kann aus technischer Sicht die gleiche Argumentation zur seriellen und parallelen Verschaltungstopologie angeführt werden, wie sie bereits in Abschnitt 4.2.2 zur Verbindung zwischen TS 3 und den TS 1 dargelegt wurde.

Wenn ein KK selbst näher betrachtet wird, so hat BEER wie im TS 1 vier Schnittstellen-Knoten zum Informationsaustausch mit den anderen KK und der Funktionserfüllung definiert [23]. Der Knoten 2B erhält die Sollwerte des TS 1, die für die OE bestimmt sind. Diese Sollwerte werden von 2B gegebenenfalls im Rahmen der Koordinations-Funktion der RZ angepasst, bevor sie an die OE gesendet werden. Der Knoten 2A empfängt die Istwerte der OE, überprüft die Einhaltung der Vorgaben und übersetzt gleichzeitig die Istwerte wieder für TS 1. Die Knoten 2A und 2B bilden folglich einen überlagerten Regelkreis ergänzend zum Regelkreis von TS 1. Weiter komprimiert und verdichtet der Knoten 2C die Informationen der Vorgänge der horizontalen autonomen Regelung und sendet sie an die RZ. Mit Hilfe dieser Informationen kann die RZ im Bedarfsfall – abgestimmt mit TS 3 – ergänzende koordinierende Maßnahmen definieren und sie über den Knoten 2D zurück in den KK einspielen. Parallel dazu können über die Knoten 2C und 2D der KK Informationen an die anderen KK weitergeben oder empfangen werden. Die Funktionen sind in Tabelle 4.3 zur Übersicht zusammengefasst und die Knoten in Abbildung 4.8 dargestellt. An dieser Stelle sei auf die möglichen Abhängigkeiten einzelner TS 1, OE und KK-Kombinationen hingewiesen, die die Arbeitsweise des TS 2 beeinflussen und beachtet werden müssen. Hierzu definiert BRITTON in [34] folgende drei Möglichkeiten:

**Gepoolte Abhängigkeit:** Hierbei handelt es sich um eine schwache Bindung, bei welcher zwei oder mehr Einheiten eines Systems lediglich auf gemeinsame Ressourcen und Instrumente zugreifen. Aber keine Abhängigkeiten der Materialien oder Informationen bestehen. Ein Beispiel im unternehmerischen Sinne wäre die Nutzung einer gemeinsamen IT-Servicefirma.

**Tab. 4.3** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystem (TS) 2 zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.8 in Anlehnung an [23, S. 176]. Die Gesamtübersicht über alle Teilsysteme und Operative Einheiten (OE) ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

| Knoten | Aufgaben  |
|--------|---|
| 2A     | Überwachung der Einhaltung von Regelvorgaben für die OE   |
| 2B     | Generieren der angepassten, koordinierten Sollwerte   |
| 2C     | Senden von abstrahierten und gefilterten Informationen an die RZ $\Rightarrow$ Empfang von Informationen anderer KK |
| 2D     | Senden von Informationen an andere Divisionen $\Rightarrow$ Empfang von Informationen der RZ                        |



**Abb. 4.8** – Darstellung der Signalführung der Schnittstellen-Knoten des Teilsystem (TS) 2 zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [23, S. 176].

**Sequentielle Abhängigkeit:** Bei dieser tritt eine unidirektionale Interaktion zwischen Einheiten auf. Das heißt Einheit B ist von Ergebnissen und Produkten von Einheit A abhängig, um ihren Teil zur Erbringung des Gesamtsystemzweckes zu erfüllen. Sollte Einheit A nicht liefern, kann auch Einheit B nicht liefern.

**Reziproke Abhängigkeit:** Dies ist die stärkste Form der Abhängigkeit, die aber bidirektional wirkt, das heißt alle Einheiten müssen ihren Teil zum Gesamtsystem beitragen. Bei dieser Abhängigkeit ist eine genaue Analyse der Auswirkung nötig, die einzelne Verbindungen der Einheiten haben können und die kritisch für den Systemerfolg sind. Hier ist die koordinierende Aufgabe des TS 2 wichtig und muss erfüllt werden.

Im Zitat 52.) wird die genannte doppelte Funktion und Aufteilung des TS 2 – in eine RZ und die KK – sowie das eben beschriebene von BEER zusammengefasst.

52.)

„[TS] 2 hat eine doppelte Funktion. Erstens wird die Produktivität in [...] den anderen Divisionen automatisch angepaßt[!]. [...] Zweitens wird die [RZ] des Unternehmens, die all diese Informationen erhält, in die Lage versetzt, die möglichen Folgen von höherer Warte aus ins Auge zu fassen. Sie berichtet dann an [TS] 3 [...]. Wie wir sehen, wirkt die [RZ] des Unternehmens gegenüber [TS] 3 wie die Eingabesynapse auf der horizontalen Befehlsachse gegenüber [TS] 1.“

[23, S. 181, 182]

Die Art und Weise, wie die koordinierende Funktion des TS 2 aussehen kann, sollen die im folgenden genannten Beispiele aus der Literatur verdeutlichen. BEER selbst in [21, S. 69] und auch MALIK in [141, S. 450, 451] nennen den Stundenplan einer Hochschule als Beispiel für ein TS 2. Weiter führt MALIK noch das Fluglotsensystem und eine Taxileitzentrale als direkte Beispiele an. Alle genannten Beispiele sind Regel- und Koordinations-Instanzen, die von den Benutzern nicht in Frage gestellt werden und darüber hinaus das große Ganze im Blick haben und auf ein Gesamtziel, die Aufteilung der Arbeitskraft der Lehrenden, geregelter Luftraum am Flughafen und eine geregelte Taxiauslastung, hinarbeiten.

Im technischen System ist an dieser Stelle die Arbeit [91] von GIOVANAZZI anzuführen. In ihr wird die Gleichspannung des Bordnetzes zur Koordinierung der kybernetischen Objekte verwendet. Durch die Verwendung der Spannung, die an allen kybernetischen Objekten erfasst werden kann und sich aufgrund der Physik überall gleich verhält, nutzt GIOVANAZZI keine dedizierten KK und auch keine zentralisierte Kontrollinstanz, was den Vorteil bringt, keine weiteren Kommunikations- und Regelinstanzen definieren zu müssen. Eine Übertragung dieses Ansatzes bezogen auf die Frequenz und die Spannung in der stationären Energieversorgung kann auch im VSM umgesetzt werden. Dass die Kommunikation über die Frequenz, die an jedem Netzteilnehmer anliegt möglich ist, zeigt SCHÄFER in [182].

Die Kommunikation über die Spannung oder Frequenz stellt somit ein aktives, zentrales Management dar, das laut BEER in der Lage ist, koordinierende Eingriffe durchzuführen. Hierzu ist es nötig, auch das Verhalten der TS 1 zu berücksichtigen. Als Beispiel wird ein Regler in einem Feedback-Regelkreis, wie in Abbildung 4.6 gezeigt, als Umsetzung eines TS 1 angenommen. Die Abbildung stellt einen möglichen Verlauf der Sprungantwort des Regelkreises dar, wenn zum Zeitpunkt  $t_0$  ein Referenzsprung auf  $u_0$  an der Führungsgröße  $u$  angelegt wird. Im üblichen Regelfall wird der Regler die Stellgröße  $w$  aufgrund der Differenz von Führungsgröße  $u$  und Regelgröße  $y$  zum Zeitpunkt  $t_0$  anpassen. Er will das Ziel, die Regelgröße auf den gewünschten Endwert  $y_{\infty, \text{soll}}$  regeln, erreichen. Regler (TS 1) und Strecke (OE) sind allerdings jeweils ein dynamisches und träges System, weshalb der Endwert nicht instantan erreicht werden kann, sondern erst nach einer systemabhängigen Verzögerung. Diese Verzögerung muss das übergeordnete TS 2 beachten, um so gezielt und zeitlich angepasst in die Regelung einzugreifen. Das TS 2 muss dem Regler mindestens eine Ausregelzeit  $t_{\text{aus}}$  nach Gleichung (4.1) einräumen, damit das TS 1 und seine OE als autonomes System die Chance haben, selbst die Abweichung auszuregeln.

$$t_{\text{aus}} = t_1 - t_0 \quad (4.1)$$

Zusätzlich kann ein Toleranzband um den angestrebten Endwert der Regelgröße definiert werden, das bei elektrischen Maschinen laut SCHRÖDER zum Beispiel 2% des Sollwertes einer definierten Größe betragen kann [187, S. 82]. Befindet sich der Wert der Regelgröße innerhalb dieses Toleranzbandes, kann er als ausreichend gut angenähert bezeichnet werden. Der Zeitpunkt  $t_1$  definiert damit den Zeitpunkt, ab dem die Regelgröße das Toleranzband ohne weitere äußere Einwirkungen nicht mehr verlässt. Analog zu den erörterten Führungsverhalten gelten diese Überlegungen für das Störverhalten des Regelkreises. Auch dort muss das TS 2 den Reglern des TS 1 genug Zeit einräumen, um mögliche Störungen  $z$  autonom auszuregeln. Bei der Nutzung der eben definierten Ausregelzeit und eines relativ zur Sollgröße gewählten Toleranzbandes ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Ausregelzeit ist durch die Zeitpunkte  $t_0$  und  $t_1$  nach Gleichung (4.1) klar definiert.

- Das TS 2 wird nicht durch kleinste Störungen aktiviert, die die TS 1 autonom ausregeln können.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass TS 2 durch Rauschen aktiviert wird, ist minimiert.
- TS 1 und TS 2 arbeiten nicht gegeneinander.

Es lässt sich also für die Technik zusammenfassen, dass das TS 2 nicht primär der Funktion dient, mögliche Konflikte zwischen den TS 1, wie sie aufgrund des freien Willens von Individuen im Rahmen sozialer Meinungsverschiedenheiten auftreten können, zu lösen, sondern es dient den TS 1 als eine Art passive Kommunikationsschnittstelle oder als aktiver Regler. In beiden Fällen erlaubt TS 2 die Einhaltung der Vorgaben des TS 3. Somit kann das TS 3 das Generieren der Vorgaben auf essentielle Planänderungen im Inneren eines Systems und zum aktuellen Zeitpunkt beschränken. Dies erlaubt eine Minimierung der Rechenfrequenz des TS 3. Die Funktion und Zustände der TS 1 und der OE werden in der Zwischenzeit vom TS 2 überwacht und koordiniert. Aufgrund der Homöostase des autonomen Systems kann TS 3 davon ausgehen, dass seine Vorgaben eingehalten werden. Erst dem widersprechende Feedback-Meldungen des TS 2 oder der TS 1 erfordern ein früheres Eingreifen. Wann und wie das TS 2 in das Verhalten der TS 1 eingreift, ist jedoch während des Systementwurfs in der Betriebsstrategie vom Entwickler festzulegen.

Abschließend wird auf die Diskrepanz der physiologischen Aufteilung von sympathischen und parasympathischen Nervenfasern hingewiesen. Dies würde in der Folge für technische Systeme bedeuten, dass dort ein komplementäres Wirksystem zum Einsatz kommen müsste. Zitat 53.) zeigt jedoch auf, dass auch BEER die Zusammenfassung der anregenden und hemmenden Wirkung von Sympathikus und Parasympathikus in einer Instanz für technische Systeme als gerechtfertigt ansieht:

53.)

---

*„Sicherlich kommt es in der Technik nicht allzu oft vor, daß[!] ein bestimmter Vorgang gleichzeitig von zwei Kontrollzentren aus geregelt wird, wobei das eine Steuerorgan eindeutig stimulierend und das andere hemmend wirkt. Ein kompetenter Ingenieur [...] wird diese Funktionen innerhalb einer Vorrichtung mit Sicherheit in einem einzigen Kontrollzentrum vereinigen.“*

---

[23, S. 114]

Auf diese Weise kann die resultierende Wirkung der Vorgaben in einer Regelinstanz der OE definiert werden. Zusammengefasst repräsentiert das TS 2 demnach sowohl die koordinierende Wirkung der paravertebralen Ganglien als auch die Anregung und Hemmung der Aktivitäten durch Sympathikus und Parasympathikus. Damit reduziert sich die Funktion des im folgenden Abschnitt vorgestellten TS 3\* auf informative Sammelaufgaben.

#### 4.2.4 Teilsystem 3\* – Monitoring

54.)

---

*„[TS] 3 bedient die parasympathischen Informationskreise, die den synaptischen Kreisen ([TS] 2) gegenübergestellt sind.“*

---

[23, S. 183]

Wie BEER in Zitat 54.) herausstellt, ist das TS 3\* eine physiologische Repräsentation des Parasympathikus im VSM. Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, kann die hemmende Wirkung auf die OE zur Effizienzsteigerung auch in das TS 2 ausgelagert und dort mit der anregenden Wirkung der Sympathikus-Funktion zusammengefasst werden. In der Physiologie ist allerdings auch festzustellen, dass neben der hemmenden Wirkung des Parasympathikus, dieser auch eine direkte Verbindung der Organe mit dem Hirnstamm herstellt. In der Literatur [3, 23, 69, 141] dient das TS 3\* so meist als Monitoringkanal, über den das TS 3 detaillierte Informationen über die OE beziehen kann. Folglich ist das TS 3 mit Hilfe des TS 3\* selbstständig in der Lage, Anzeichen von Stress in den OE festzustellen, Überlasterscheinungen frühzeitig zu erkennen und seine Strategie entsprechend über die Vorgaben für die TS 1 anzupassen [64]. Beispiele für ökonomische oder organisationelle Anwendungen zeigt das folgende Zitat:

55.)

---

*„[TS] 3\* hat Monitoring- und Auditfunktion und informiert so zusätzlich über den Vollzug der Vorgaben und Vorschriften aus der Befehlsachse. Die [TS] 3\*-Interaktion entspricht am besten den Vorstellungen eines ‚Managements by Walking around‘. Durch direkte Kontakte in Rundgängen, informellen Gesprächen oder bei Versammlungen werden Informationen über Neuerungen, Beschwerden und Überlastung in den ausführenden Bereichen gewonnen, die von den anderen Informationskanälen vernachlässigt worden sind. Der Marktleiter, der durch seinen Supermarkt geht, der Betriebsleiter, der sich in der Werkshalle mit seinen Mitarbeitern unterhält, der Katastrophenverantwortliche, der sich per Hubschrauber ein Bild von Umweltschäden macht; sie alle erfüllen die Aufgaben von [TS] 3\*.“*

---

[3, S. 89]

Eine Übersetzung dieser Funktion in technische Systeme kann unterschiedlich erfolgen. Im Prinzip ist eine einfache Bereitstellung von Sensordaten der OE zum TS 3 über das TS 3\* denkbar. Allerdings können nicht alle Systemgrößen durch Sensoren erfasst werden. Bei einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer können zum Beispiel keine Rotorgrößen (Ströme, Spannungen, Fluss) per Sensor erfasst werden. Eine entsprechende Lösung wäre aufwendig, und nötige Sensoren müssten im Rotor verbaut werden. Eine Alternative bietet die Modellierung der Rotorvorgänge durch einen Rückschluss der gemessenen Statorströme. Im Nachgang ist beispielsweise die Verwendung einer modellbasierten Regelung möglich. Für die Bestimmung der Modellgrößen ist lokales Wissen nötig.

Aus diesem Grund und im Sinne der Modularität des Systems sollen die Modellgrößen lokal, also in den OE erzeugt werden. So ist das TS 3 nicht auf ein spezielles Wissen angewiesen und kann unterschiedliche OE und deren TS 1 in einem Gesamtsystem verwenden. Zur Berechnung solcher Modellgrößen ist jedoch lokales Wissen nötig, zum Beispiel Maschinenart und -parameter, Verschaltung etc.. Auf diese Art und Weise kann TS 3 unterschiedliche OE und deren TS 1 zur Zweckerfüllung verwenden, ohne Details der OE kennen zu müssen. Zusätzlich wird die lokale Generierung von Modelldaten der Autonomie sowie der Trennung von Funktion und Management gerecht. Außerdem kann diese redundante Verknüpfung, die das TS 3\* zu den OE und ihren TS 1 erzeugt, in der Technik durch eine sogenannte Watch-Dog-Funktion ergänzt werden. Das heißt, es wird ein redundanter Kommunikationskanal eingerichtet, der die Aktivität oder anders gesagt die Betriebsbereitschaft der am System beteiligten OE überwacht. ESPEJO bringt dies in folgendem Zitat zum Ausdruck:



56.)

---

*„[...] the monitoring channel helps to guard against communication breakdowns.“*

---

[66, S. 97]

Zusammengefasst ist zu sagen, dass das TS 3\* das TS 3 mit detaillierten Informationen über die OE versorgt, die TS 3 nicht über die bis zu diesem Abschnitt definierten Funktionen des TS 2 oder des TS 1 erhalten würde. Kleinere direkte Vorgaben an die OE sind nicht benannt, könnten aber bei einer sinnvollen Anwendung gemacht werden. TS 3\* ist somit kein konzentrierter Funktionsblock, sondern vielmehr als Richtlinie oder Vereinbarung zur Handhabung von Systemdaten anzusehen, die im Sinne des Gesamtsystems definiert werden muss. Die systemdämpfende Wirkung des Parasympathikus ist weiterhin gegeben. Durch das Bereitstellen von Informationen versetzt TS 3\* das TS 3 in die Lage, das Gesamtsystem aus übergeordneter Sicht im Detail zu kennen und zu beobachten. So hat TS 3 alle Möglichkeiten, das Gesamtsystem wieder in die Richtung zu lenken, die aus den einzelnen Teilsystemen im Sinne der Emergenz ein großes Ganzes machen.

#### 4.2.5 Teilsystem 3 – Betrieb im Inneren und der Gegenwart

57.)

---

*„Vom korporativen Standpunkt aus betrachtet ist [TS] 3 ein ziemlich verschlafener und unaufmerksamer Regler. Nach unten hin ist er ganz da und wachsam – schließlich müssen alle automatischen Funktionen überwacht werden. Doch seine Hauptregler, das heißt jene, die nach oben wirken, sind im wesentlichen Inhibitoren.“*

---

[23, S. 143]

Dieses Zitat von BEER zeigt, dass das TS 3 in seiner funktionalen Doppelrolle sowohl dem strategischen als auch dem autonomen Management zugeordnet werden kann. Im Sinne des strategischen Managements vertritt es die systeminternen Zustände und Interessen gegenüber dem TS 4 und wirkt somit als hemmender Filter. Aus dieser Rolle heraus konkretisiert TS 3 in Verhandlungen mit TS 4 die Pläne zu den umzusetzenden Vorgaben für die TS 1 und repräsentiert so den höchsten Regler des autonomen Managements. Das nötige Wissen über die TS 1 holt sich TS 3 über die drei möglichen Kommunikationspfade (TS 3\*, TS 2 oder zentrale Befehlsachse). Weiter nutzt es dieses Wissen zum einen zur korrekten Formulierung der Vorgaben und zum anderen, um sie optimal aufeinander abzustimmen. Wie in Zitat 58.) beschrieben, ermöglicht das TS 3 auf diese Art und Weise das Funktionieren der operativen Instanz des Systems im Sinne der Homöostase und Kohärenz [64].

58.)

---

*„Es geht um die Managementprozesse, die aus den [vorhandenen operativen Instanzen] ein größeres Ganzes machen.“*

---

[64, S. 54]

Weiter definiert BEER für das eben Beschriebene das erste Axiom des Managements, formuliert in folgendem Zitat 59.):

59.)

---

*„The first axiom of management: The sum of horizontal variety disposed by n [OE] equals the sum of vertical variety disposed on the six vertical components of corporate cohesion.“*

---

[25, S. 217]

Wie im TS 1 und TS 2 identifiziert BEER vier Schnittstellen-Knoten – 3P, 3Q, 3R und 3S – im TS 3 [23, S. 185]. Diese sind in Tabelle 4.4 beschrieben und in Abbildung 4.9 dargestellt. Hierbei empfängt 3S laufend die abstrahierten Informationen der RZ von TS 2, 3Q nimmt die Pläne von TS 4 entgegen. Beide Knoten bereiten dann alle Informationen auf, um über 3S die neuen Vorgaben an die TS 1 zu senden. 3R empfängt zum einen die Rückmeldungen seitens der TS 1 als auch die Informationen vom TS 3\*. Knoten 3P fordert diese Informationen im Bedarfsfall vom TS 3\* explizit an. Gemeinsam mit 3R komprimiert und integriert 3P die Informationen über die einzelnen OE und ihrer TS 1. Damit sendet 3P nur noch Größen an TS 4, die die gesamte operative Instanz beschreiben und nicht mehr die individuellen Größen. Hierzu muss das zweite Axiom des Managements von BEER zitiert werden:

60.)

---

*„The second axiom of management: The variety disposed by [TS 3] resulting from the operation of the First Axiom equals the variety disposed by [TS 4].“*

---

[25, S. 298]

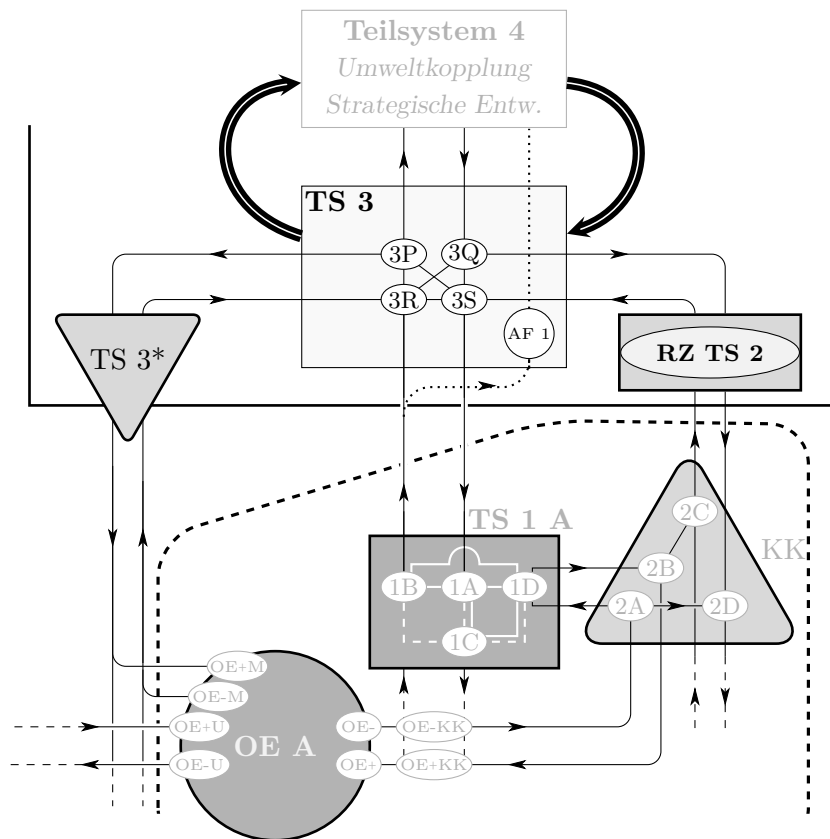
Zusammengefasst verfügt TS 3 im Gegensatz zu den TS 1 über alle Informationen bezüglich der operativen Instanz, wodurch TS 3 als einzige Instanz des autonomen und strategischen Managements optimale Vorgaben für die einzelnen TS 1 generieren kann. Unterstützt wird TS 3 lediglich bei der Regelung der Homöostase durch die RZ des TS 2. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die Zeitkonstante des TS 3 größer ist als die des TS 2. Die RZ selbst liefert dem TS 3 nur abstrahierte Informationen. Neben den vier genannten Informationsknoten 3P bis 3S verfügt TS 3 zusätzlich über einen Alarmfilter 1 (AF1) – ebenfalls zu sehen in Abbildung 4.9. Über diesen werden in Ausnahmesituationen des Systems ungefilterte Informationen der TS 1 und ihrer jeweiligen OE direkt an das TS 5, als oberste Entscheidungsinstanz [23], gesendet. Dieses ist hiermit in der Lage über ein etwaiges Eingreifen nach Hinzunahme der Umweltinformationen aus TS 4 zu entscheiden.

**Tab. 4.4** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 3 zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.9 in Anlehnung an [23, S. 176]. Die Gesamtübersicht über alle Teilsysteme und Operative Einheiten (OE) ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

---

| Knoten | Aufgaben  |
|--------|---|
| 3P     | Anfordern von Informationen aus RZ, TS 2 und TS 3*  |
| 3Q     | Empfang von Befehlen der planerischen Ebene   |
| 3R     | Empfang der Informationen der TS 1 für die planerische Ebene sowie gezieltes Anfordern von Informationen aus den TS 1 |
| 3S     | stetiger Empfang von gefilterten Informationen von der RZ des TS 2 sowie Senden von Vorgaben an die TS 1              |

---



**Abb. 4.9** – Darstellung der Signalführung der Schnittstellen-Knoten des Teilsystem (TS) 3 und 3\* zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [23, S. 176].

Um die Verknüpfung des TS 3 zur Physiologie zu verdeutlichen, sei daran erinnert, dass die genannten Funktionen des TS 3 laut BEER aus dem Hirnstamm und dem Kleinhirn abgeleitet sind [23, S. 97]. Wie das Kleinhirn leisten die Basalganglien ihren Beitrag zur Koordinierung und Generierung von Vorgaben für die Motorik, wie es Abschnitt 4.1.2 zeigt. Die Funktionen des TS 3 im Rahmen des autonomen Managements sind mit Vorgängen im Hirnstamm vergleichbar. Sowohl somatische als auch vegetative Informationen werden dort verarbeitet und an das Rückenmark geleitet. Der Thalamus repräsentiert die Schnittstelle zum TS 4. Neben Sinneseindrücken werden hier Informationen aus dem Körper für das Großhirn sowie die Basalganglien und das Kleinhirn gefiltert. Bevor das TS 4 detaillierter betrachtet wird, soll an dieser Stelle eine Definition der drei möglichen Kommunikationspfade erfolgen – TS 3 zu TS 1, TS 3 über TS 2 zu TS 1, TS 3 über TS 3\* zur OE und damit zum TS 1. Diese sind im Zitat 59.) von BEER angesprochen und werden im Detail von BRITTON in [35, S. 262] im Rahmen einer Managementkommunikation definiert. Hierbei hat die Verbindung TS 3 und TS 1 einen «befehlenden Charakter»:

61.)

„Du TS 1 musst Dies oder Jenes tun, sonst werde ich TS 3 dich bestrafen.“

übersetzt nach – [35, S. 262]

Die Verbindung TS 3 über TS 2 zu TS 1 einen «beratenden Charakter»:

62.)

---

*„Ich TS 2 rate dir TS 1 tue Dies, damit du deine Funktion effizient erfüllen kannst. Wenn du meinen Rat ignorierst und deine Funktion somit nicht effizient ausführst, dann wird dich TS 3 bestrafen.“*

---

übersetzt nach – [35, S. 262]

Und die Verbindung TS 3 über TS 3\* zur OE und damit zum TS 1 einen «informativen Charakter»:

63.)

---

*„Ich schlage dir TS 1 vor, tue Dies um die Erfüllung deiner Funktion zu verbessern. Wenn du meine Empfehlung ablehnst und daran scheiterst dich zu verbessern, dann wird dich TS 3 bestrafen.“*

---

übersetzt nach – [35, S. 262]

Außerdem betont BRITTON, dass TS 1-Entscheidungen immer nur die unmittelbare OE betreffen, wohingegen TS 3 mit seinen Entscheidungen immer die Summe der TS 1-OE-Kombinationen beachtet.

Im technischen Sinne ist das TS 3 durch eine zentrale Recheneinheit inklusive der abgestimmten Management-Software darzustellen. Diese besitzt die nötigen Ein- und Ausgänge für das zu regelnde System und die darunter liegenden Aktoren und System-Komponenten, die die TS 1 samt ihren OE managen.

### 4.2.6 Teilsystem 4 – Umweltkopplung und Prädiktion

Das TS 4 dient als Schnittstelle des Meta-Systems zur Umwelt. Zur Vorbereitung und Konditionierung des Gesamtsystems betrachtet es relevante Vorgänge und Entwicklungen in der Systemumwelt und leitet daraus Szenarien ab. Für die korrekte Durchführung muss TS 4 quasi allwissend über das System informiert sein. Dafür erhält es von TS 5 Anweisungen darüber, wie und wonach in der Umwelt Ausschau gehalten werden soll. Um dies tun zu können, muss TS 4 über den Zweck und die Ausrichtung des Systems immer auf den aktuellen Stand gebracht werden, nur so kann die Varietät der Umwelt für TS 4 reduziert werden. Eine weitere Aufgabe ist die Verbindung der TS 3 und 5. Hier fungiert es als Vermittler und Übersetzer.

BEER gibt verschiedene Interpretationen, an welcher Stelle aus den prädierten Szenarien des TS 4 die Maßnahmen und Vorgaben für das System abgeleitet werden. In [23, S. 188–207] bezeichnet BEER das TS 4 als die «Stätte der Entscheidung». Mit Zitat 64.) und anderen Passagen auf derselben Seite sagt er allerdings aus, dass TS 4 lediglich Informationen aus der Umwelt an das TS 5 weiterleite. Ebenso setze es TS 5 über den Systemzustand in Kenntnis, über den es aus den Verhandlungen mit TS 3 erfahre. Die finale Entscheidung über die zu treffenden Vorkehrungen für das daraus resultierende Systemverhalten treffe jedoch TS 5.

Die eben beschriebenen Funktionen des TS 4 – Umweltkopplung und die Verbindung von TS 3 und TS 5 – soll BEER vom Zwischenhirn, den Basalganglien und dem III. Ventrikel

abgeleitet haben [23]. Hier ist aus physiologischer Sicht allerdings zu bemängeln, dass der III. Ventrikel eigentlich ein mit Hirnwasser gefüllter Hohlraum ist und keine regelnden oder filternden Funktionen erfüllt. Außerdem nehmen die Basalganglien Befehle vom Großhirn über auszuführende Bewegungen entgegen und koordinieren diese. Es erfolgt eine Planung der Bewegungsausführung, auch ohne eine sensorische Verbindung zur Umwelt oder Peripherie des Körpers. Nur der Thalamus des Zwischenhirns filtert Informationen, durch die Erfassung der Umwelt mit den fünf Sinnen, aus dem Körper und der Umwelt, bevor er diese an das Großhirn weiterleitet. Wird die Physiologie als scharfes Vorbild genommen, so befinden sich in TS 4 neben der Umweltkopplung keine Entscheidungszentren, sondern nur Filterfunktionen für das Bewusstsein des Körpers, der Unternehmung oder der Maschine:

64.)

---

*„Die Eingabe für die Entscheidungen auf höchster Ebene hat aber noch eine zweite Komponente, nämlich die Informationen über die Umwelt, [...]. Sämtliche Hinweise von Bedeutung werden hier von [TS] 4 als Direkteingaben aus der Außenwelt gesammelt und ebenfalls [- neben den vorgefilterten Informationen von TS 3 -] nach [TS] 5 weitergeschaltet.“*

---

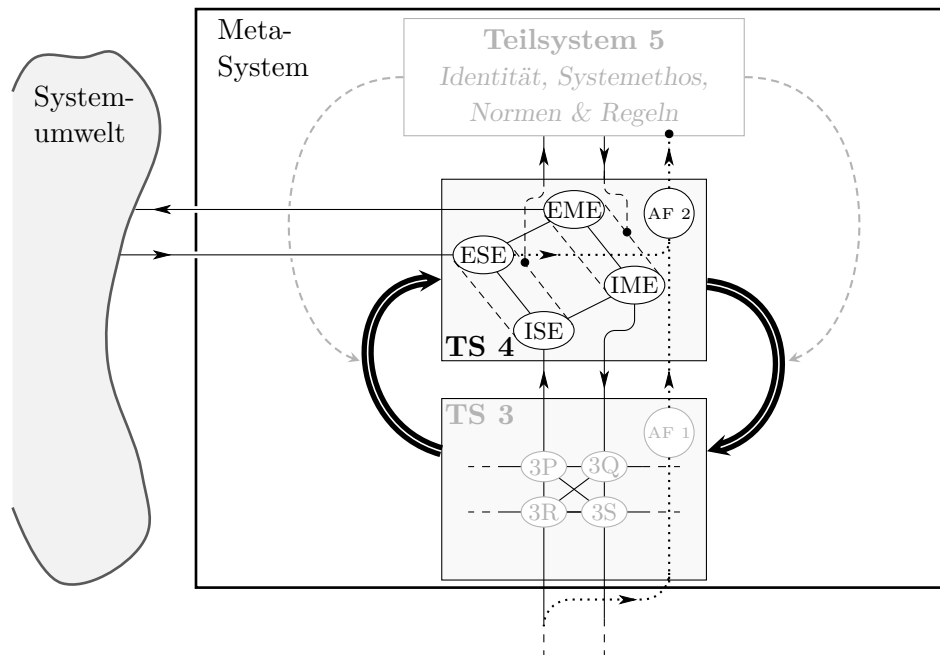
[23, S. 188]

BEER definiert wie in den anderen Teilsystemen auch hier vier Schnittstellen-Knoten (ESE (externe sensorische Ereignisse), ISE (interne sensorische Ereignisse), EME (externe motorische Ereignisse) und IME (interne motorische Ereignisse)), die in Tabelle 4.5 beschrieben und in Abbildung 4.10 dargestellt sind. Im Detail haben die Knoten folgende Funktionen.

Über den ESE werden die relevanten Umweltdaten und -zustände erfasst und entsprechend für das System übersetzt. Was erfasst werden soll und in welchem Umfang, wird dem TS 4 durch den Knoten EME und das TS 5 mitgeteilt. Dies kann auch als Fokuslenkung des TS 5 bezeichnet werden. Die beiden Knoten ISE und IME sorgen zum anderen für die Erfassung der internen Zustände und Umweltdaten des autonomen Managements und die Weitergabe der relevanten Betriebsziele und -strategien, bestimmt durch das TS 5. Ähnlich wie in TS 3 werden über den Alarmfilter 2 (AF2) die ungefilterten Informationen des autonomen Managementsystems durch die Umweltinformationen des ESE ergänzt und direkt an TS 5 weitergeleitet.

**Tab. 4.5** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 4 zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.10 in Anlehnung an [141, S. 130] und [23, S. 147 & 189]. Die Gesamtübersicht aller Teilsysteme und Operative Einheiten (OE) ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

| Knoten | Aufgaben   |
|--------|--|
| ESE    | Erfassen der Umwelt und Ausgabe der Zustandsbeschreibungen der Umweltsituation                     |
| ISE    | Empfang der Informationen des Autonomen Managements und Abgleich dieser mit Umweltinformationen    |
| EME    | Empfang der Beobachtungsziele für die Auswertung der Umweltdaten                                   |
| IME    | Empfang der Betriebsziele und -strategien des TS 5 und Abgleich dieser mit den Umweltinformationen |



**Abb. 4.10** – Darstellung der Signalführung der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 4 zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [141, S. 130] und [23, S. 147 & 189].

Durch die Position und Funktion des TS 4 im VSM ist es auch der Teil des Systems, der sich um die Zukunftsplanung des Systems kümmert. Hierbei unterliegt es nur dem vorgegebenen Rahmen von TS 5, den gesammelten Umweltdaten und den internen Daten des autonomen Managements. In Summe kann durch die vorhandenen Daten eine Prädiktion für zukünftige Ereignisse getroffen werden. Dies sind Aussagen über die Intensität, die Wahrscheinlichkeit und den Zeitpunkt eines voraussichtlichen Ereignisses. Die nachfolgende Entscheidung, wie das System auf diese Situation reagieren soll, wird und muss außerhalb des TS 4 getroffen werden. Dieser Ansatz gewährt und erhält die Modularität und Autonomie der Systemkomponenten. Voraussetzung dafür ist, dass die Schnittstellen zwischen der Prädiktion und den darauf aufbauenden Funktionsblöcken eingehalten werden, denn nur so kann jede dieser Komponenten unabhängig von der anderen verändert werden. Mögliche Ansätze für eine solche probabilistische Inputdatenanalyse und -gewinnung sind die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse nach VESTER in [230], die Berechnung der Bravais-Pearson-Korrelation [39, S. 117, 118] oder die Einteilung von Umweltfaktoren in «predictability», «novelty of change» und «escalation of turbulence» nach ANSOFF in [8]. Außerdem definiert BEER in [27] die sogenannte T-, U- und V-machine mit welchen er mathematisch erläutert, wie die Inputdaten genau analysiert werden müssen.

Das TS 4 in die Technik übersetzt bedeutet eine Erfassung und Validierung der Umgebung und Umwelt des Gesamtsystems. Hierzu zählen nicht nur die offensichtlichen Klimadaten, sondern auch technisch erfassbare und für das Systemziel entscheidende Umgebungsfaktoren. Dies können je nach System unterschiedliche physikalische Größen oder auch Daten über das Umfeld des Systems sein. Die Erfassung der Daten je nach Einsatzzweck und Umgebungsbedingungen muss entsprechend dem technischen System definiert werden. Entweder erfolgt die Erfassung nötiger Daten durch das Abfragen von Service Providern oder direkt vor Ort durch – entsprechende von einer Sensorik – gemessene Daten. Zusammenfassend

kann für technische Systeme festgehalten werden, dass die Funktion des TS 4 rein auf die Vorhersage von zukünftigen Ereignissen beschränkt sein und keine Entscheidungsfindung beinhalten soll.

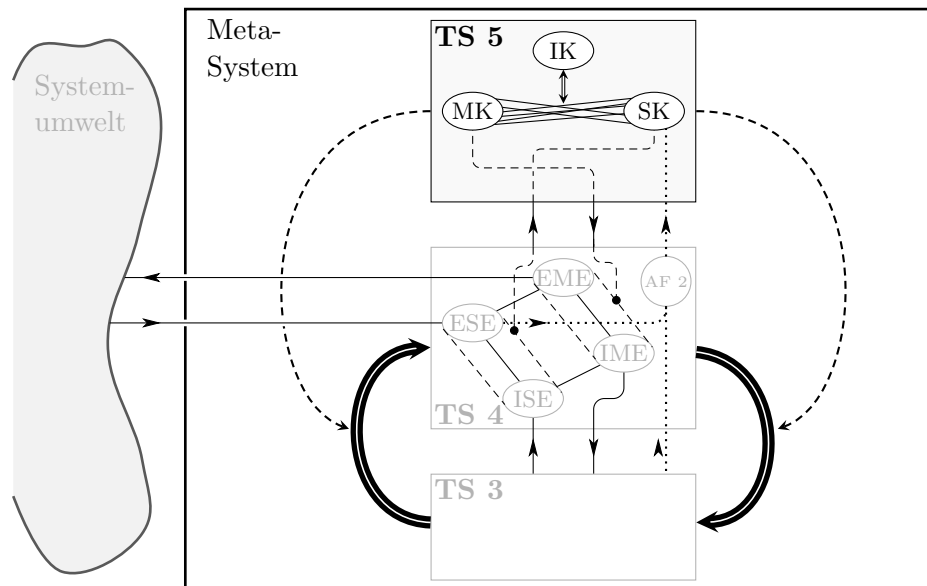
#### 4.2.7 Teilsystem 5 – Systemethos

Für BEER ist TS 5 der «denkende Teil der Organisation» [23, S. 208]. Das heißt, es hat das Ziel des Systems stets im Blick und ist die Einheit, in der alle Entscheidungen für das Gesamtsystem getroffen werden. Dies folgt aus der physiologischen Herleitung, in der die Funktion des TS 5 durch die Arbeitsweise des Großhirns inklusive der Hirnrinde repräsentiert wird. Beide Teile des Gehirns bilden das Zentrum der bewussten Entscheidungsfindung. Das Treffen von bewussten Entscheidungen und eine spontane Zielanpassung sind Fähigkeiten des Menschen. In sozialen und ökonomischen Systemen sind Menschen involviert, weshalb in diesen Systemen Ziele und Ausrichtungen mit relativ wenig Aufwand neu definiert werden können. Für technische Systeme, wenn sie nicht mit einer künstlichen Intelligenz ausgestattet oder der Befähigung zum Lernen mächtig sind, ist dies nicht der Fall, da alle Entscheidungsfindungen, Richtlinien und Zielsetzungen von vornherein definiert sind und ohne externe Eingriffe nicht geändert werden können.

Wie in den anderen Teilsystemen können auch im TS 5 Schnittstellen-Knoten identifiziert werden. Sie sind in Tabelle 4.6 beschrieben und in Abbildung 4.11 dargestellt. Diese nehmen eine Sonderrolle ein, indem sie ähnlich dem Gehirn in Sensorische (SK), Motorische (MK) und Interaktions Komponenten (IK) eingeteilt werden. Diese Aufteilung dient der Beherrschung der Varietät. Im Sinne des obersten Managements und in Abstimmung mit den Zielen und Zweck des Systems wird an dieser Stelle die Einschränkung von bestimmten Systemzuständen definiert, im Unternehmen ist dies oft als Politik oder Leitbild zu verstehen. Die daraus definierten Vorzugszustände dienen der Verminderung der Varietät nach MALIK in [141, S. 136–140]. Erst wenn die erhaltenen Informationen in der SK nicht zu einem definierten Betriebszustand passen, ist ein komplexerer Entscheidungs- und Aushandlungsprozess beziehungsweise sind neue Berechnungen für das Erreichen der Betriebsziele notwendig. Dazu muss in Abstimmung mit der MK interagiert werden, so dass nicht definierte Zustände mit passenden Handlungsoptionen der MK erreicht werden können. Daraus folgt, dass sich die genannte Politik oder das Leitbild über die Zeit ändern können und bei Zeiten an das sich ändernde Umfeld angepasst werden müssen. Die Aushandlung zwischen MK und SK übernimmt die

**Tab. 4.6** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten des Teilsystem (TS) 5 zur Informationsverarbeitung aus Abbildung 4.11 in Anlehnung an [23, S. 189] und [141, S. 136]. Eine Gesamtübersicht aller Teilsysteme und der OE ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt.

| Knoten | Aufgaben   |
|--------|--|
| MK     | Umsetzung des Management-Leitbildes in den konkreten Aktorik-Komponenten oder Ausführungsorganen             |
| IK     | Methodik, Regeln wie Aushandlungsprozesse zwischen SK und MK stattfinden                                     |
| SK     | Aufnahme der Informationen der zentralen Befehlsachse, repräsentiert durch Daten von TS 3, TS 4 und dem AF 2 |



**Abb. 4.11** – Darstellung der Signalführung der Schnittstellen-Knoten des Teilsystems (TS) 5 zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [141, S. 130] und [23, S. 147 & 189].

IK. Aus diesen Schilderungen ergibt sich die Aufgabe des TS 5, die in der Koordination und Vermittlung der TS 3 und TS 4 besteht. Nur das TS 5 ist dazu in der Lage, die gewonnenen Informationen von TS 3 und TS 4 miteinander zu vergleichen und zu entscheiden, ob die Systeme wirklich ihrer Funktionserfüllung nachkommen. Nach BEER und MALIK verfügt es hierzu über die allerhöchste Meta-Sprache des Gesamtsystems. Zusammengefasst wird dies durch das von BEER definierte dritte Axiom des Managements:

65.)

*„The third axiom of management: The variety disposed by [TS 5] equals the residual variety generated by the operation of the Second Axiom.“*

[25, S. 298]

In technischen Systemen kann dies folglich durch die Implementierung von Betriebsstrategien geschehen. Diese repräsentieren das TS 5 mit seinen normativen Definitionen. Im Grunde handelt es sich um ein Abbild aller Überlegungen, Entscheidungsregeln sowie jeglichen Wissens des Entwicklers, die dieser beim Systementwurf implementiert. Deshalb kann das TS 5 als «Spiegelbild des Entwicklers» bezeichnet werden. Zu den normativen Definitionen gehören unter anderem:

- *Art der Umsetzung:* Ein Multi-Agenten-System verhält sich anders als eine Multi-Input-Multi-Output-Regelung oder eine regelbasierte Strategie. Die zu stellende Frage lautet: Welche Strategie eignet sich am besten für den vorliegenden Anwendungsfall?
- *Entscheidungsfindung:* Welche Funktionsblöcke erfüllen welche Aufgaben und wie generieren sie ihre Ergebnisse?
- *Funktionsschnittstellen:* Welche Parameter und Größen tauschen die Funktionsblöcke aus? Im Detail, welche Daten muss TS 3\* dem TS 3 bereitstellen?
- *Parameter:* In welchem Rahmen soll das System agieren dürfen?



- *Wahl zwischen Alternativen:* Wie reagiert und entscheidet das System in Situationen, in denen es über Handlungsspielraum verfügt?
- *Zielsetzung des Systems:* Welchen Zweck soll das System erfüllen?

Zusammengefasst für das TS 5 und die zentrale Befehlsachse gibt MALIK einen Überblick und Vergleich der Funktionen und damit einen Plan zur Definition der Teilsysteme in folgendem Zitat:

66.)

---

*„Wenn man versucht, jeder Stufe auf der vertikalen Befehlsachse eine kurze, prägnante Charakterisierung ihrer Funktion aus der Sicht von [TS] 5 zuzuordnen, so kommt man etwa zu folgendem Schema:*

- **System 1:** *Was geschieht jetzt und hier?*
- **System 3:** *Was wird – demnächst und im Rahmen der kurzfristig nicht änderbaren Gegebenheiten – passieren?*
- **System 4:** *Was könnte – bei Einbezug gewisser vage erkennbarer Entwicklungstendenzen und bei Beseitigung von internen Engpässen – geschehen?*
- **System 5:** *Was sollte – unter Einbezug all dieser Überlegungen – geschehen?“*

---

[141, S. 89]

#### 4.2.8 Rekursion im Viable System Model

67.)

---

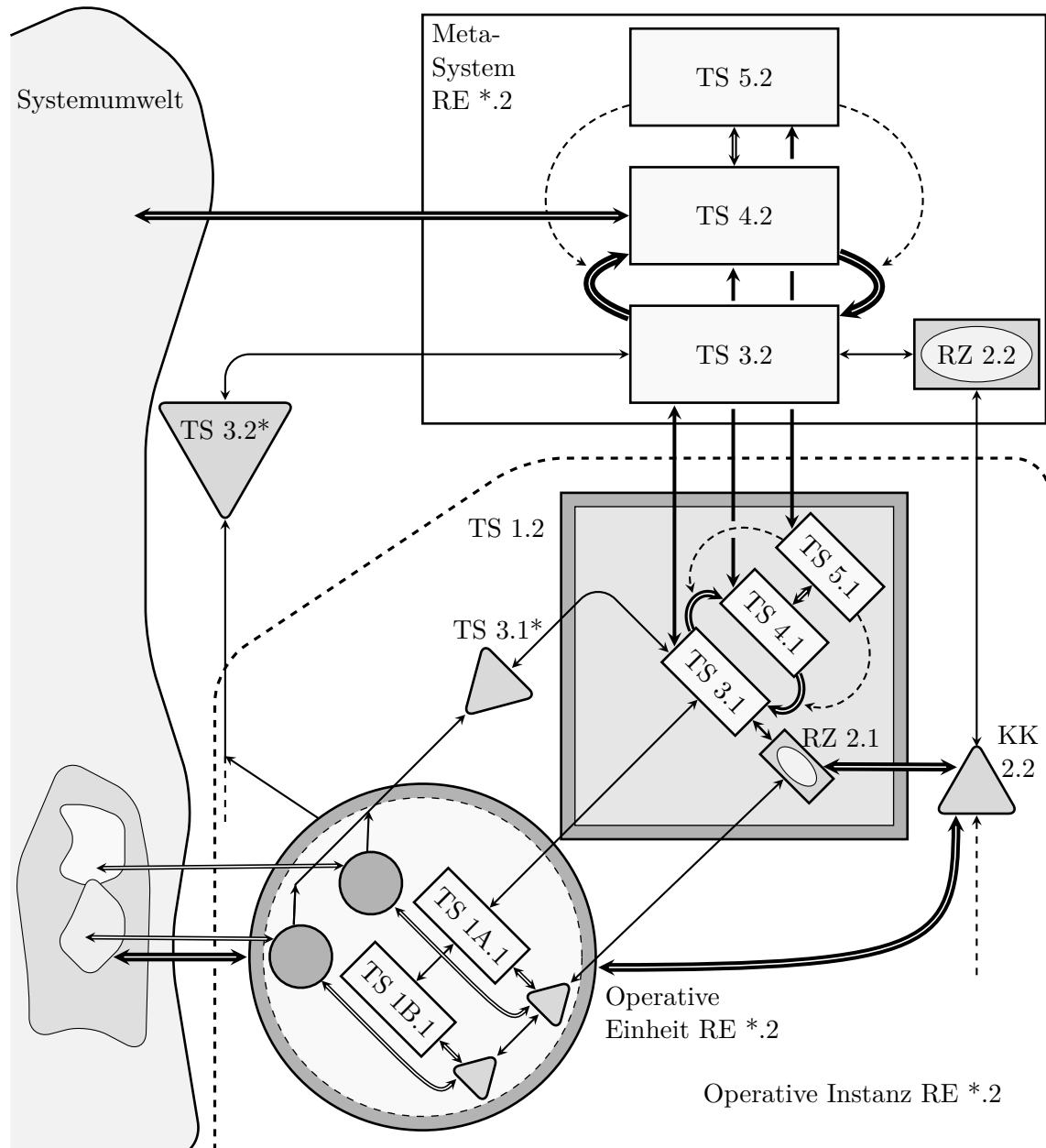
*„Recursive system theorem: In a recursive organizational structure, any viable system contains, and is contained in, a viable system.“*

---

[25, S. 118]

In diesem Abschnitt wird auf das Prinzip der Rekursion und Skalierbarkeit des VSM – vergleiche Teilkapitel 3.3 – näher eingegangen. Wie das Zitat 43.) und das Systemtheorem – Zitat 67.) – von BEER zeigen, bestehen lebensfähige Systeme wieder aus lebensfähigen Komponenten. Das heißt, dass Systeme, die nach dem VSM strukturiert sind, aus Komponenten bestehen, die auch nach dem VSM aufgebaut sind. Die Prinzipien der Autonomie und das der Black-Box – vergleiche Teilkapitel 3.3 – bilden die Grundlage für diese Aufteilung. Jedes TS 1 und seine OE regelt oder steuert nach eigenem besten Wissen, solange es im Sinne der Kohärenz des Gesamtsystems handelt. Das TS 1 wird somit zu einem Meta-System der nächst niedrigeren Rekursionsebene und lenkt eine neu entstandene operative Instanz. Diese Unterteilung kann und soll soweit fortgeführt werden, wie es Teilsysteme gibt, die dem Zwecke des Gesamtsystems dienen und die auf einer funktionellen Ebene zusammengefasst und intelligent geregelt werden können. Im Sinne eines EMS wäre die unterste Ebene der Ursprung der zu regelnden Energie.

Zur Diskussion einzelner Rekursionsebenen und deren Zusammenhänge ist in Abbildung 4.12 ein VSM mit zwei Rekursionsebenen dargestellt. Die Ebenen sind hierin wie folgt zugeordnet. Zu der niedrigeren Rekursionsebene mit der Bezeichnung «RE \*.1» gehören alle Komponenten, die mit «\*.1» enden. Zu der darüber liegenden Rekursionsebene mit der Bezeichnung «RE \*.2» können entsprechend alle Komponenten, die mit «\*.2» enden, zugeordnet werden.



**Abb. 4.12** – Veranschaulichung einer zweistufigen Rekursion im VSM – nach [21, 24, 26, SA.3]. Die Rekursionsebenen (RE) sind mit \*.1 und \*.2 nummeriert.

Dieses Vorgehen kann nach Belieben auf eine beliebige Anzahl an Rekursionsebenen erweitert werden. Um hierbei nicht den Überblick zu verlieren, wählt BEER in seinen Ausführungen ein VSM aus, das sowohl eine Rekursionsebene über und unter sich besitzt. Für seine Betrachtungen bezeichnet er dieses als das «System-in-Focus» (SiF). Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Nachvollziehbarkeit sind im Folgenden aber nur zwei Ebenen dargestellt und es wird auf die Darstellung der Umweltverbindung von TS 4.1 und die Darstellung der AF in den TS 3 und TS 4 verzichtet.

**Rekursion TS 1 und OE:** Es ist zu erkennen, dass das TS 1.2 im Grunde das Meta-System der RE \*.1 repräsentiert. Grafisch wird dies durch die gleiche Umrandung wie die des Meta-System RE \*.2 verdeutlicht. Analog dazu zeigt die Umrandung der Operativen Instanz der RE \*.2 den gleichen Rand wie die der OE RE \*.2. Diese Kennzeichnung stellt damit die Operative Instanz der RE \*.1 dar. Je nachdem, in welcher Rekursionsebene man sich befindet, wird die Information auf Grundlage einer anderen Informationsbasis bewertet und Aktionen ausgeführt. Je höher die Rekursionsebene ist, umso abstrakter und globaler werden die Informationen. Diesen Sachverhalt der sogenannten «Meta-Sprache» beschreiben BEER und MALIK in [23] und [141]. Die operativen Instanzen können durch die Übersetzung und Datenverdichtung eine Varietätsreduktion herbeiführen. Das Managementsystem, das aufgrund von mangelndem Prozesswissen nicht an jedem Detailwert interessiert ist, kann dann mit der in eine Meta-Sprache übersetzten Information weiterarbeiten. Ein Beispielmaß dafür sind auf eine Basis normierte, dimensionslose Zahlenwerte, die den Prozess beschreiben. BEER und MALIK sprechen von normierten Indexsystemen – Beispiel in der Technik, die «per unit» Normierung. Für das Management ist am Ende eine vergleichbare Größe inklusive einer Referenz nötig. BEER und MALIK nennen dazu eine Formel für die Gesamtleistung der operativen Instanz [141, S. 108]. Wichtige Faktoren sind hierbei die Realität, die Kapazität und die Potenzialität:

68.)

- *„Realität: Was bei gegebenen Mitteln und Rahmenbedingungen momentan tatsächlich erreicht wird.*
- *Kapazität: Was bei gegebenen Mitteln und Rahmenbedingungen momentan erreicht werden könnte, wenn jede Möglichkeit ausgeschöpft würde.*
- *Potenzialität: Was bei bestmöglicher Ausnutzung und Weiterentwicklung der eigenen Mittel und Beseitigung hindernder Bedingungen im Rahmen des praktisch Realisierbaren erreicht werden könnte.“*

[141, S. 108]

Ergänzend sei gesagt, dass BEER die «Kapazität» in [23, S. 168] ursprünglich als «Fähigkeit» bezeichnet. Aus den drei Werten ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$\text{Latenz} = \frac{\text{Potenzialität}}{\text{Kapazität}} \quad (4.2)$$

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Kapazität}}{\text{Realität}} \quad (4.3)$$

$$\text{Gesamtleistung} = \text{Latenz} \cdot \text{Produktivität} = \frac{\text{Potenzialität}}{\text{Realität}} \quad (4.4)$$

Letzten Endes stellt dies nur eine Möglichkeit der metasprachlichen Erfassung des Zustands der operativen Instanz dar. Generell ist jede Umsetzung eines Entwicklers, die der Varietätsreduktion für das Management dient und zugleich die wichtigsten Informationen bereitstellt, am Ende erfolgreich.

**Rekursion TS 2:** Im Abschnitt 4.2.3 zeigte sich bereits, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, das TS 2 in technischen Systemen umzusetzen. Hier wird von einem aktiven zentralen Managementsystem ausgegangen, das mit Hilfe des zugehörigen KK die Vorgaben der TS 1 an seine OE überwacht und beeinflussen kann. Deshalb wird die Rekursion an dieser Stelle genauer betrachtet. Beide Ebenen verfügen über ein eigenes TS 3, das sich jeweils um den optimalen Betrieb – im Inneren und der Gegenwart – seiner operativen Instanz in der jeweiligen Rekursionsebene kümmert. Wie in Abbildung 4.12 gezeigt, steht die RZ 2.1 sowohl mit TS 3.1 als auch mit dem KK 2.2 der RZ 2.2 in Verbindung.

Das bedeutet, dass der koordinierende Eingriff der RZ 2.1 – beim Vorhandensein einer höheren Rekursionsebene – nicht mehr nur durch das TS 3.1 geregelt werden kann, sondern zusätzlich durch die RZ 2.2 und somit nach Anweisung des TS 3.2 agieren könnte. Allerdings muss – für einen optimalen Betrieb der operativen Instanz der RE \*.1 – das TS 3.2 dazu über Detailwissen bezüglich der RE \*.1 verfügen, genau wie TS 3.1. Dieses Wissen kann, wie in der Abbildung 4.12 zu sehen, über eine Verbindung der beiden TS 3 geliefert werden. Ein etwaiger Widerspruch zur Betrachtung der OE als Black-Box kann so widerlegt werden, weil diese nach wie vor nur über die KK 2.2 beeinflusst wird und die aufgetretene Rückkopplung über den KK 2.2 oder das TS 3.1 mitgeteilt bekommt. Das heißt, über die Rekursion hinweg spiegelt sich die in der RE \*.1 vorhandene Verbindung des TS 3.1 zu RZ 2.1 zu KK 1A.1 zu TS 1A.1 im Allgemeinen auch in der Verbindung des TS 1.2 zu KK 2.2 zu OE RE \*.2 in der RE \*.2 wieder. Dies zeigt, dass durch die Auslegung des TS 2 bei einer Rekursionsbetrachtung des Systems auf die Skalierbarkeit und Modularität Einfluss genommen werden kann. Nach BEER in [21, S. 6] muss immer die Ebene über und unter dem SiF betrachtet werden, nur so können die funktionellen Abhängigkeiten im VSM erhalten und genutzt werden.

Diese Betrachtung geht mit den Entwurfsprinzipien der Autonomie, Dezentralisierung sowie Trennung von Funktion und Management einher. Lediglich die «unterste» und die «oberste» Rekursionsebene stellen einen Sonderfall dar und repräsentieren die Verbindungen der Teilsysteme eins zu eins wie in den vorherigen Abschnitten geschildert. Dazwischen wird es überlappende Funktionen geben oder anders ausgedrückt, eine Betrachtung der vorhandenen Information durch einen neuen Blickwinkel auf einer höheren Meta-Ebene oder auch -Sprache. Diese sind aber dem Rekursionsgedanken geschuldet und in der Einzelbetrachtung der jeweiligen Rekursionsebene genau zuordenbar.

**Rekursion TS 3\*:** Im Abschnitt 4.2.4 wurde erörtert, dass das TS 3\* das TS 3 mit Informationen, Sensordaten sowie Modellgrößen versorgt, die dezentral in den TS 1 erfasst und berechnet werden. Interessant sind diese Informationen sowohl für RE 1 als auch RE 2. Um beiden Ebenen diese Informationen zur Verfügung zu stellen, stehen auch TS 3.1\* und TS 3.2\* in einer Rekursionsverbindung. TS 3.1\* sammelt demnach die Daten für TS 3.1 und steht gleichzeitig auch mit TS 3.2\* in Verbindung, an das es geforderte Informationen weitergibt. TS 3.2\* übermittelt diese ungefiltert an TS 3.2, das die Informationen auf einer erweiterten Datenbasis auswerten kann.

**Rekursion TS 3:** Das zentrale Teilsystem für die Planungen und den Betrieb im «Inneren und der Gegenwart» ist das TS 3. In der Rekursion wird hier in Abbildung 4.12 deutlich, dass dieses je nach Betrachtungsweise direkt mit seinem unterlagerten TS 3 über die zentrale Befehlsachse kommunizieren kann. Hierüber findet ein direkter Austausch von Vorgaben und Rückmeldungen zwischen den Optimierungszentralen statt. Das heißt, in Ergänzung zu den bisherigen Betrachtungen steht TS 3 nicht nur mit seinem TS 1, TS 2 und TS 4 in Verbindung, sondern im Rekursionsfall auch mit einem rekursiv höheren oder niedrigeren TS 3, um gezielte TS 3-Vorgaben zu senden oder zu empfangen. Ob diese Verbindung redundant besteht oder über eine Mehrkanalleitung wie einem Datenbus kommuniziert wird, gilt es je nach System festzulegen.

**Rekursion TS 4:** Ähnlich dem TS 3 kann auch die Rekursion im Sinne des TS 4 beschrieben werden. TS 4.1 und TS 4.2 stehen in Abbildung 4.12 direkt untereinander in Verbindung, was im Sinne der Umweltkopplung notwendig ist. Aufgrund der definierten Systemgrenzen haben die unteren Rekursionsebenen nur einen eingeschränkten Blick auf die Umwelt. Durch die Rekursion können sie zu mehr Umweltinformationen in Form von gemachten Prädiktionen kommen. Die hierarchische Weitergabe von Voraussagen ist somit die Quelle der Information über zukünftiges Geschehen für die niedrigeren Rekursionsebene. Ob dies nun direkt von TS 4.2 zu TS 4.1 weitergegeben wird oder noch durch TS 3 überwacht und verändert wird, ist eine Implementierungsfrage. Unabhängig davon, welches Teilsystem die Informationen weitergibt, muss berücksichtigt werden, dass keine Rekursionsebene über ein allumfassendes Wissen verfügen kann und sich daher meist auf vereinfachte Modelle stützen muss. Das heißt, die weitergegebenen Informationen und Prädiktionen werden unschärfer, je niedriger die Rekursionsebene ist. Gleiches gilt für die zeitliche Betrachtung, für die die Vorhersagen definiert sind. Die Zeitspannen müssen kürzer werden, da auch die Regel- und Steuerungszeiten auf den niedrigeren Rekursionsebene kürzer werden. Eine Bewertung der eigenen gewonnenen Informationen der Umwelt kann durch die höheren Informationen ergänzt und erweitert werden.

**Rekursion TS 5:** Für das höchste Teilsystem des Meta-Systems gilt ähnliches wie für die TS 3 und 4. Auch über die Rekursionsebene hinweg stehen diese in Verbindung. Dies bedeutet in der Praxis, dass Regeln, Betriebsstrategien und andere Normen über die Rekursionsebene hinweg abgeglichen und synchronisiert werden müssen. Nur wenn alle Bestandteile des Systems harmonisch zusammenarbeiten, kann ein effizienter Systembetrieb erzielt und die Autonomie der Teilsysteme gerechtfertigt werden. Inkludiert sind hier auch Systemänderungen, wie Updates oder der Austausch von Komponenten, bei denen die Kompatibilität der jeweiligen Bestandteile vorab zu prüfen ist.

**Fazit Rekursion:** Die Betrachtung der Rekursion zeigt, dass durch die Rekursion zusammengefasst weder konkrete Einschränkungen noch umfassende Neuerungen der bisher angeführten Funktionen und Verknüpfungen im VSM entstehen. Allerdings untermauern die Erörterungen dieses Abschnitts die engen Verknüpfungen der jeweiligen Teilsysteme. Somit muss die Auslegung eines VSM stets im Sinne der Rekursion gemacht werden. Der Grund liegt darin, dass es wenige bis gar keine Systeme gibt, die nur aus einem VSM bestehen und nur eine Rekursionsebene aufweisen. Gerade die Auslegungen des autonomen Managements hat Auswirkungen auf andere rekursive Ebenen. Dank des VSM kann der Entwickler seine

Aufmerksamkeit gezielt auf diese Verknüpfungen über die Ebenen hinweg richten. Vorteil des Ganzen ist, dass Strukturen, Algorithmen, Betriebsstrategien und andere Komponenten über die Rekursion hinweg modular und skalierbar verwendet werden können. Lediglich Rahmenbedingungen und die Auswertung der gewonnenen Information müssen auf die jeweils vorhandene Datenbasis, Meta-Sprache und Rekursionsebene angepasst werden. Im Sinne der Varietät wird dieser Zusammenhang der Rekursionsebene durch BEERS Gesetz zur Kohärenz über mehrere Rekursionen des VSM zusammengefasst:

69.)

---

*„The law of cohesion for multiple recursions of the viable system: The [TS 1.2] variety accessible to [TS 3.2] of Recursion [RE \*.2] equals the variety disposed by the sum of the metasystems of Recursion [RE \*.1] for every recursive pair.“*

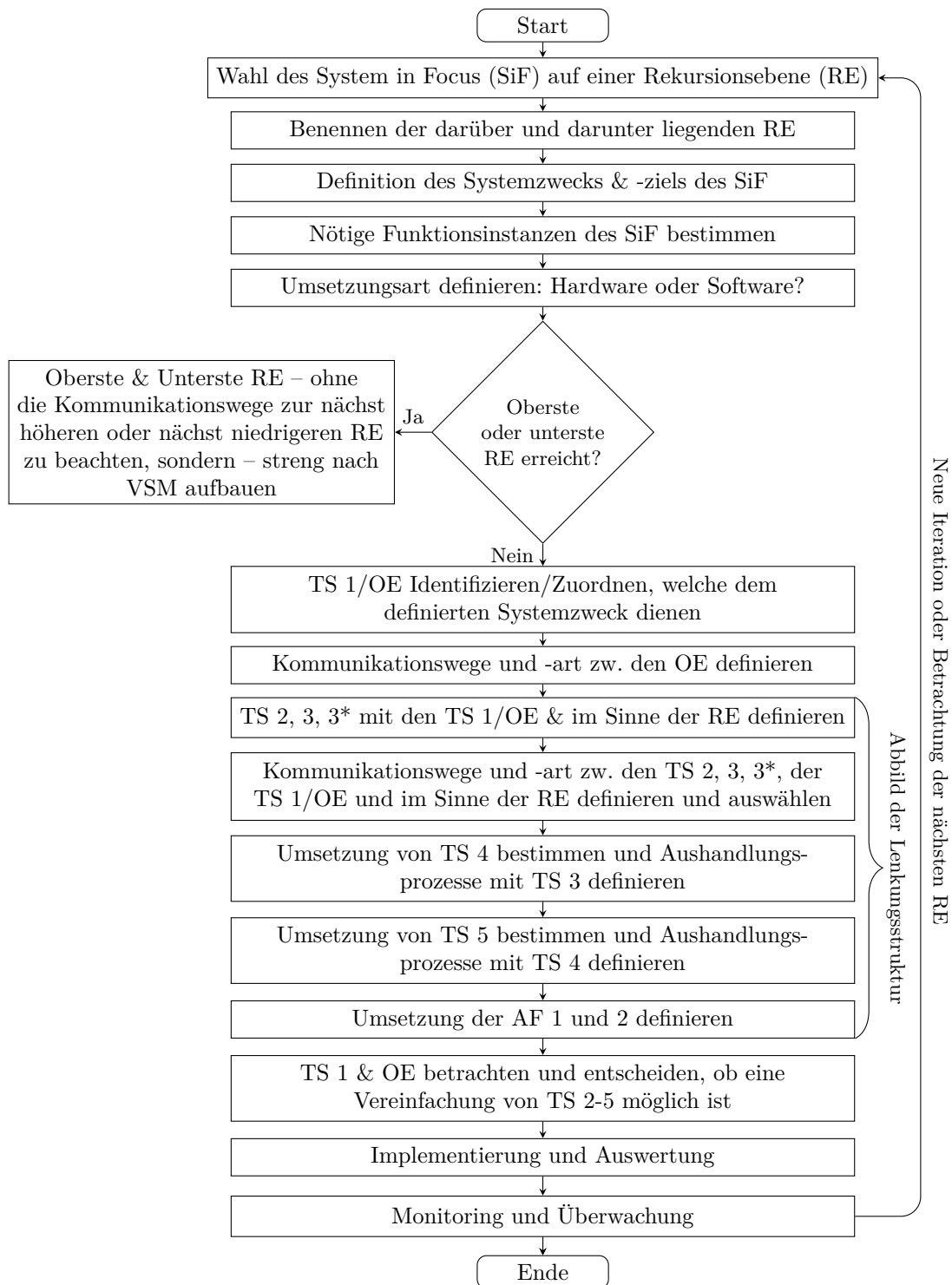
---

[25, S. 355]

### 4.2.9 Schema zur Identifizierung der Viable System Model-Bestandteile

Nachdem das VSM detailliert aufgezeigt wurde, wird im Folgenden ein Schema zur Identifizierung der einzelnen VSM-Bestandteile vorgestellt und für die technische Anwendung portiert. Das Schema basiert hierbei auf den Ausführungen von BRITTON in [35] – aufgeführt im Anhang B –, worin er Schritte zur Identifizierung des VSM für Managementsysteme in der Business-Anwendung vorstellt. Ergänzend werden die Ausführungen von ESPINOSA in [71] – bildhaft in Abbildung B.1 dargestellt – und Erkenntnisse des Vergleichs ADAMS aus [3, S. 253], zusammengefasst in Tabelle B.1, interpretiert und angewendet. Entscheidend für die Einteilung der Systembestandteile in die VSM-RE und -TS ist die Festlegung des SiF. Hierbei ist es stets wichtig, die Rekursionsebene unter und über dem SiF zu betrachten, siehe Zitat 67.). Bei dieser Betrachtung kann das VSM zur Analyse eines vorhandenen Systems oder als Entwurfstool für die Bildung eines neuen Systems – wie es in dieser Arbeit der Fall ist – verwendet werden. Diese Gedanken erläutert ESPEJO in [65]. Zu beachten ist allerdings, dass zwei der Rekursionsebenen eine besondere Betrachtung benötigen. Diese besonderen Rekursionsebenen werden durch die oberste und unterste RE, die den Rahmen für die Skalierung und damit in Summe ein gemeinsames VSM ergeben repräsentiert. Zusammengefasst soll durch die im Folgenden vorgestellte Übersicht 4.13 der Entwurf eines technischen Systems mit Hilfe des VSM als Entwurfstool unterstützt werden. Angewendet wird es im Anschluss in Kapitel 6 für die Konzeptionierung des kyELM.

Im vorgestellten Ablauf der VSM-Erstellung oder VSM-Analyse eines vorhandenen Systems wird deutlich, dass das vorgestellte Schema eine Art roten Faden darstellt, der den Entwurf und die Analyse begleitet [71]. Somit muss festgehalten werden, dass insbesondere das Ergebnis des VSM-Entwurfs nicht als finaler Bauplan für das gesuchte Managementsystem verstanden werden darf [65], sondern als ein erster Startpunkt für die weiteren Entwicklungs- und Implementierungsprozesse des Gesamtsystems. Dieses Vorgehen wird abgerundet durch die Integration eines Monitoring- und Validierungsschrittes in das Entwurfsschema. Hiermit kann der Erfolg des verbesserten beziehungsweise neu gestalteten Managements überprüft werden [71]. Herrscht ein zu großer Unterschied zu den erwarteten Ergebnissen, so kann ein neuer Entwurfszyklus eingeleitet werden. Als erster Korrekturschritt ist hierbei die Überprüfung der Definition des Systemzwecks und -ziels des SiF empfohlen.



**Abb. 4.13** – Die Abbildung zeigt den zirkularen Kreislauf, wenn das VSM als Entwurfs- oder Analysetool in der Technik verwendet wird. Der Prozess ist angelehnt an die Ausführungen von BEER, BRITTON, ESPEJO und ESPINOSA in [21, 23, 35, 65, 71].

Ergänzend zur Identifizierung und Zuordnung der OE wird ein Fragenkatalog vorgestellt, der in [141, S. 446] von MALIK im Unternehmenskontext vorgeschlagen wird. In diesem Fall wurde er in die technische Anwendung übersetzt:

- Ist die vorgeschlagene Komponente bzw. die vorgeschlagene Funktion einer Soft- oder Hardware im Prinzip in der Lage, als autonome Instanz zu operieren?
- Ist die Software und die entsprechende Hardware angesichts der Umwelt-, Performance- und Funktionsbedingungen in der richtigen Größe dimensioniert?
- Rechtfertigen die Umwelt und die Funktionsweise der Soft- und Hardware die nach heutigen Kenntnissen erforderliche Ausstattung mit der gesamten Infrastruktur (Sensorik, Kommunikations-Busse, Ressourcen, Betriebskosten, usw.)?
- Erbringt die OE die richtigen Leistungen bezogen auf ihre definierte Funktion?
- Worauf beruht ihre Lebensfähigkeit?
- Wie viel Autonomie ist erforderlich und ist sie im Sinne der Systemstabilität bzw. Systemausfallwahrscheinlichkeit zu beschränken?
- Welche Kommunikationsschnittstellen sind nötig?
- Welche Unterstützung braucht die OE durch das Gesamtsystem?
- Was bindet die OE an das System?

### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das VSM, seine Teilsysteme sowie die Rekursion im Detail betrachtet. Hierbei wurde versucht, nach BEERS Überlegungen, die an der einen oder anderen Stelle vage gehalten sind, zu argumentieren und die Teilsystemfunktionen in technische Anwendungen zu übersetzen. In BEERS Ausführungen treffen einige seiner Analogien nicht die korrekten Funktionen der physiologischen Repräsentanten des menschlichen Nervensystems, nach dem es konzipiert ist. Zum Beispiel ist hier die Zuordnung des Hypothalamus zum TS 4 zu nennen, oder die Analogien gehen im Laufe seiner Argumentationskette verloren, wie die zum Kleinhirn von S. 97 bis S. 133 in [23]. Weiter erschweren manche Formulierungen einen ganzheitlichen Blick auf das vorliegende System. In den Zitaten 46.) und 47.) wird die Verantwortung der Homöostase unterschiedlichen Teilsystemen zugeordnet, wodurch mehrere Teilsysteme des VSM auf ihre Art zur Aufrechterhaltung der Systemstabilität beitragen müssen. Dies ist allerdings in der Physiologie normal. Im menschlichen Körper sind oft mehrere Organe an der Ausführung von Funktionen beteiligt, wie Basalganglien und Kleinhirn an somatischen Bewegungen oder Hypothalamus und paravertebrale Ganglien an der vegetativen Koordination.

Nichts desto trotz geht aus den Ausführungen eine möglichst allgemeine Anwendbarkeit des VSM hervor. Einige Schnittstellen-Knoten und deren Funktion sind leicht zu identifizieren und können in die Technik übertragen werden. Oft ist nur eine Funktion, wie das Senden und Empfangen von Informationen, auf eine definierte Art und Weise festzulegen. In der Technik existieren dafür verschiedene definierte und standardisierte Kommunikationskomponenten und -protokolle. Das VSM bietet also die gewünschte und definierte Struktur, die für die Analyse und den Entwurf komplexer technischer Systeme erforderlich ist. Aus der beschriebenen Verknüpfung der Teilsysteme lässt sich ableiten, in welcher Form der Informationsaustausch über die genannten Knoten sein soll (detailliert, abstrahiert, individuell, zusammengefasst etc.). Somit erhält der Anwender die Möglichkeit, Teilfunktionen zu einem effizienten Gesamtsystem



zusammenführen zu können. Die Einordnung der funktionalen Bestandteile in die fünf vorgestellten Teilsysteme repräsentieren eine übersichtliche Struktur des Systems. Eine im Nachgang während des Betriebes nötige Erweiterung oder Überprüfung der Funktionen ist so im Zuge von Revisionsarbeiten, Upgrades und Updates möglich und einfach zugänglich. Dies trifft nicht nur auf die physische Erreichbarkeit zu, sondern auf alle Systemkomponenten, Hardware wie Software.

Das Hauptaugenmerk bei der Systemauslegung muss auf die Umsetzung des autonomen Managements gelegt werden. Neben den trivialen Kommunikationsverbindungen zwischen den einzelnen Teilsystemen sind es vor allem die Koordinations-Funktion des TS 2 und die Informationsbeschaffung des TS 3\*, die in unterschiedlichster Art und Weise implementiert werden können. BEERs Ausführungen zu den Teilsystem-Funktionen fallen mitunter diffus aus, um die allgemeine Anwendbarkeit des VSM zu gewährleisten. So bleibt es am Ende dem Entwickler überlassen, diese zu interpretieren und zu implementieren. In Summe zeigt sich aber, dass das VSM eine gute Basis für die Auslegung von technischen Managementsystemen bietet. Man kann sogar so weit gehen zu sagen, BEERs allgemeine Darstellung des VSM erfordert eine überlegte und analytische Auseinandersetzung mit dem zu entwickelnden System, da die Umsetzung und Abstimmung der einzelnen Teilsysteme ein tiefgründiges Systemverständnis erfordern. Eine tatsächliche Umsetzung und Nutzung des VSM im Energiemanagementsystem-Kontext wurde schon vollzogen, wie es im Teilkapitel 2.2 erläutert ist.

Im nächsten Kapitel wird die vorgestellte Theorie nun auf das Energiemanagementsystem in der stationären Energieversorgung angewendet.



# 5 Feldtestgebiet, Energy Neighbor Prototyp und kyELM light-Ansatz

Wie eingangs erwähnt, wurde diese Arbeit im Rahmen des Projektes EEBatt durchgeführt und dabei ein erster vereinfachter Ansatz in Hardware implementiert. In diesem Kapitel wird kurz auf die Details des Projektes, das Feldtestgebiet Moosham und den dabei entstandenen Prototypen, den sogenannten «Energy Neighbor», eingegangen. Für mehr Details sei nochmals auf folgende Projekt-Literatur [170, 220, 247] verwiesen. Die Daten des Feldtestgebietes Moosham und die des Energy Neighbor dienen als Datengrundlage für die später präsentierten Simulationen und der Algorithmenentwicklung.

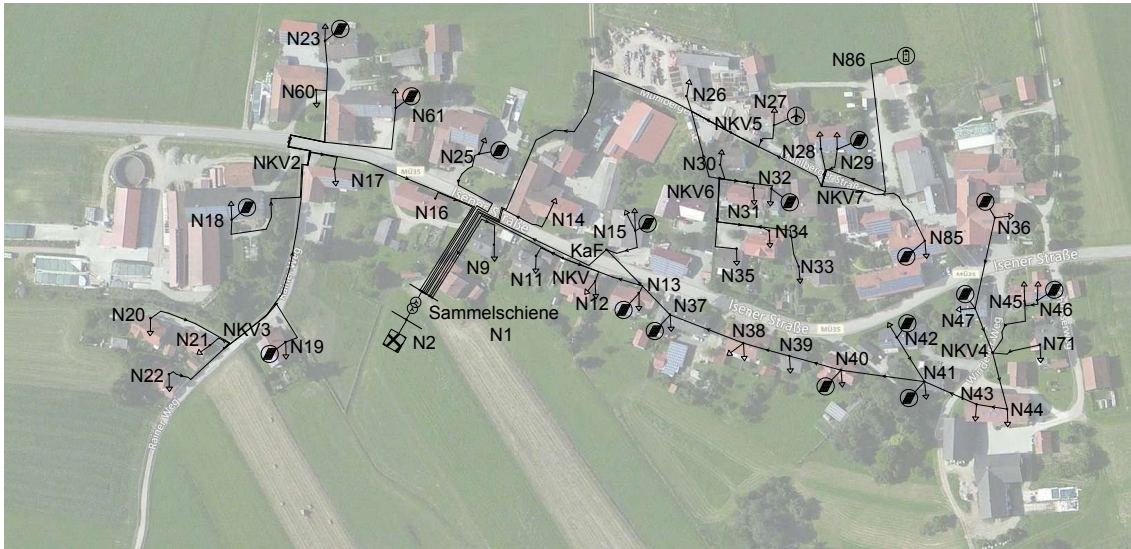
## 5.1 Feldtestquartier Moosham

Um die im Projekt entstandenen Systemansätze, Regelalgorithmen und Modelle in die Realität umsetzen zu können, wurde im Projekt definiert, einen Feldtest mit dem Energy Neighbor durchzuführen. Als passendes Ortsnetzquartier, das ein relevantes Verbrauchs- und Erzeugungsprofil besitzt, hat sich das Dorf Moosham bei Haag in Oberbayern herauskristallisiert. In Abbildung 5.1 ist eine Luftbildaufnahme gezeigt. In dieser ist das Strahlennetz ausgehend vom ONT N2 aufgezeichnet. Für relevante Daten des Leitungssystems und mögliche Ersatzschaltbilder sei auf das Teilkapitel 7.1 und den Anhang C und D verwiesen.

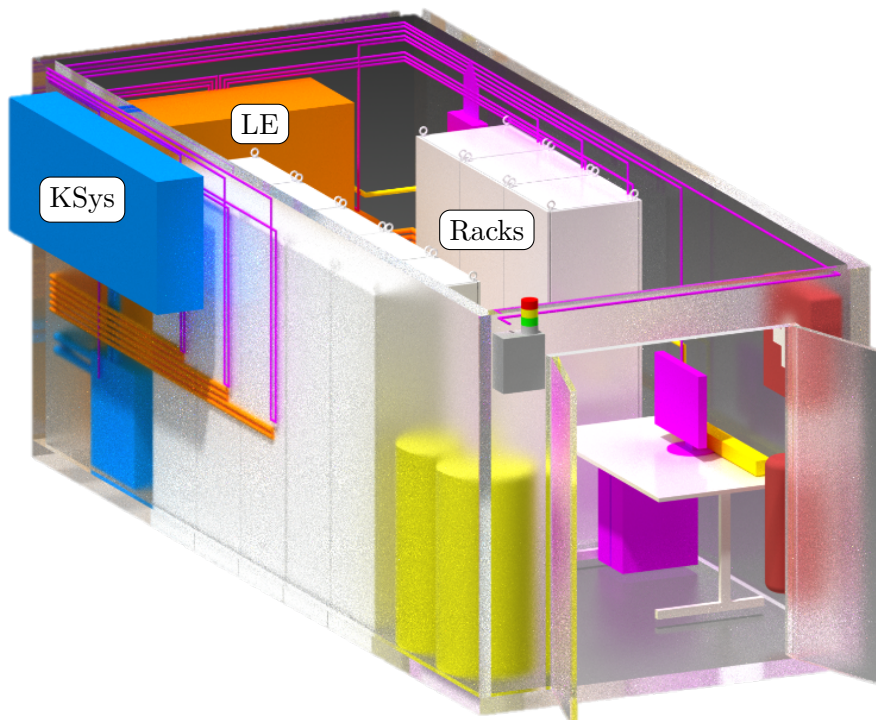
## 5.2 Vorstellung des EEBatt-Prototyps – Energy Neighbor

Eines der Hauptziele dieser Arbeit ist die Entwicklung eines aktiven kybernetischen EMS für einen stationären Energiespeicher. Voraussetzung für eine Konzeptentwicklung ist die Kenntnis über das vorliegende System. Aus diesem Grund werden in diesem Teilkapitel beispielhaft die für diese Arbeit wesentlichen Bestandteile des Speichersystems sowie die bisherige Architektur des Energy Neighbor Prototyps vorgestellt. Abbildung 5.2 zeigt ein Schaubild der einzelnen Bestandteile des Speicher-Containers. Zu diesen gehören die Speicherschränke (Racks), die dazugehörigen Leistungselektronik-Komponenten zur Spannungswandlung (LE), das Klimasystem zur Kühlung und Heizung (KSys) sowie die Bedieneinheiten und Sicherheitseinrichtungen für den Container. Zur Unterscheidung der im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Komponenten des Speichers sowie seiner Rekursionsebenen wird folgende Nomenklatur eingeführt:

- **Ebenen des Quartiers:** Quartier- (RE 3), Container- (RE 2), Rack- (RE 1) und Modul-Ebene (RE 0)
- **EMS-Bezeichnungen:** Quartier- (QEMS), Container- (CEMS), Rack-EMS (REMS)



**Abb. 5.1** – Das verwendete Ortsnetzquartier in Moosham bei Haag in Oberbayern in Form einer Satellitenaufnahme aus [29] und dem eingezeichneten Strahlennetz. Dieses kann an den Knoten NKV4 und NKV7 zu einem Ring verbunden werden.



**Abb. 5.2** – Rendering des Containers mit Benennung der Racks, der Leistungselektronik (LE) und des Klimasystems (KSys) – nach [247].

### 5.2.1 Elektrische Komponenten des Energy Neighbor

Zur Speicherung elektrischer Energie stehen im Energy Neighbor acht Racks zur Verfügung. Im Feldtest sind in jedem Rack 13 Module seriell verschaltet, die ihrerseits aus jeweils 192 Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren in *16s12p*-Topologie aufgebaut sind. Mit dieser Verschaltung ergeben sich je Rack folgende Werte:

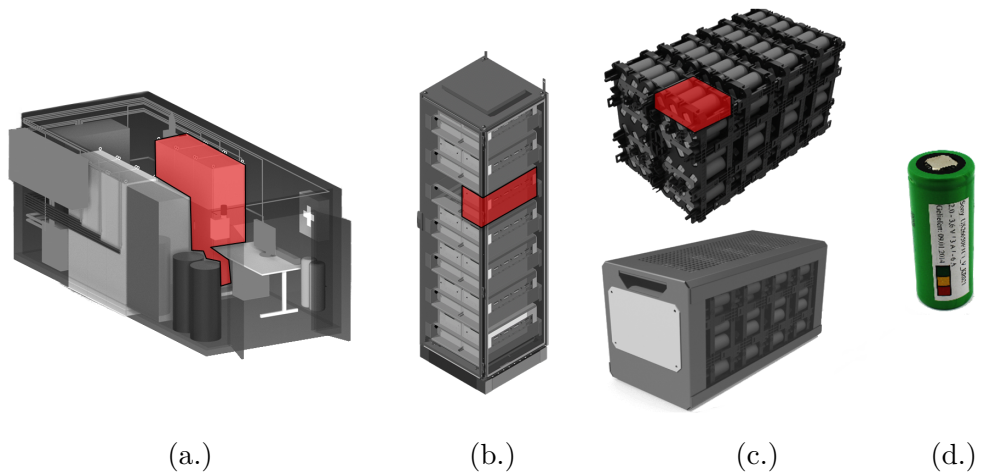
- Gleichspannungen von  $U_{\min} = 540,8 \text{ V}$ ,  $U_N = 665,6 \text{ V}$  und  $U_{\max} = 748,8 \text{ V}$ ,
- eine Nennkapazität von  $C_N = 36 \text{ Ah}$  sowie
- ein Nennenergieinhalt von  $E_N = 25 \text{ kWh}$ .

Insgesamt ergibt sich somit ein Energieinhalt des Containers von 200 kWh. Um die Unterteilung zu verdeutlichen, sind die einzelnen Komponenten des Speichers im Rendering in Abbildung 5.3 veranschaulicht. Je nach Betriebsstrategie kann der Speicher mit unterschiedlichen C-Raten ge- und entladen werden. Aus Gründen der Lebensdauer für die Batterie-Zellen wird im Projekt eine 1C-Ladung empfohlen. Aus dieser Annahme ergibt sich eine Nennleistung von 200 kW für den Container. Für die Spannungswandlung im Container werden B6-Umrichter verwendet, von denen sechs der acht Umrichter auf eine Maximalleistung von 36 kW und zwei auf 16 kW ausgelegt sind. Hierdurch ergibt sich eine theoretische Maximalleistung von 248 kW. Die Umrichter werden im weiteren Verlauf, in Abbildung 5.4 und 5.6, immer mit dem zugeordneten Rack als eine Funktionseinheit angesehen. Aus thermischer Sicht ist allerdings die räumliche Trennung der Komponenten Rack und Umrichter zu beachten.

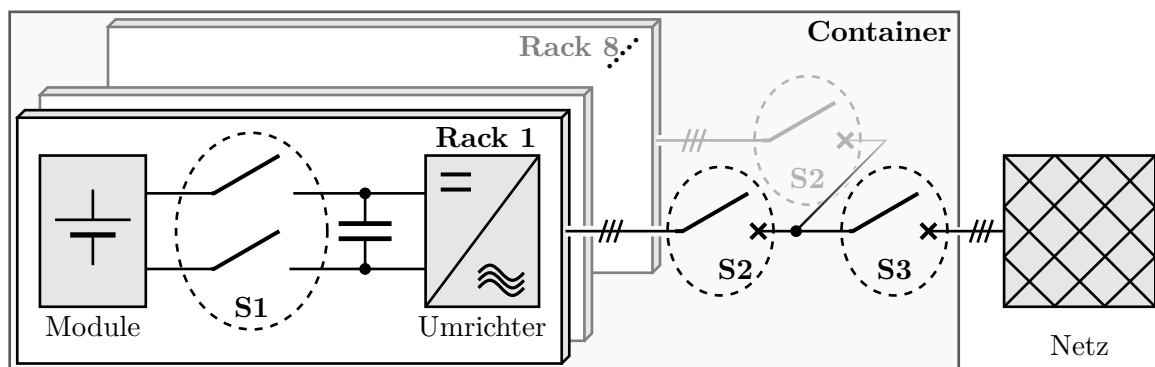
Im System sind Schütze und Leistungsschalter integriert, die zum Schutz der elektrischen Komponenten dienen. Container-Bestandteile können so vor Ausgleichs- oder Kurzschlussströmen sowie Netzfehlern einzeln per Schütz oder Leistungsschalter getrennt werden. Im Wartungs- oder Fehlerfall können diese Schütze ebenso zur Freischaltung von Komponenten verwendet werden. Eine schematische Anordnung der Schütze zur Freischaltung der jeweiligen Komponenten zeigt Abbildung 5.4. Der Leistungsschalter S3 kann den gesamten Container vom örtlichen Niederspannungsnetz trennen, während die Leistungsschalter S2 im geöffneten Zustand jedes Rack und dessen LE einzeln vom Netz trennen. Auf diese Weise kann ein Rack gezielt freigeschaltet werden, ohne dabei die übrigen Racks außer Betrieb nehmen zu müssen. Sowohl S3 als auch die jeweiligen S2 werden in der Regel nur bei Fehlerfällen oder Wartungsarbeiten ausgelöst. Die Schütze S1 dienen dazu, den Gleichspannungszwischenkreis der Racks zu schalten.

Im Detail betrachtet, besteht jedes der Schütze sowohl aus einem elektrisch angesteuerten Schütz, das über eine Fehlererkennung angesteuert wird, als auch aus einem manuell zu bedienenden Schütz für Wartungsarbeiten. Aus funktioneller Sicht können diese beiden Bestandteile, wie in Abbildung 5.4 gezeigt, zu einem Element zusammengefasst werden, weil sie den Gleichspannungszwischenkreis gleichermaßen beeinflussen. Eine Betätigung der Schütze S1 ist sowohl im laufenden Speicherbetrieb als auch im Fehler- oder Wartungsfall möglich. Sollte ein Rack keine Energie ein- oder ausspeichern und sich somit im Standby-Betrieb befinden, können durch das Öffnen der Schütze Leckströme vermieden und eine damit einhergehende Selbstentladung der Racks im Standby-Betrieb minimiert werden.

Im Bereich der Sicherheit werden alle Schütze und Leistungsschalter im Fehlerfall durch die sogenannte Not-Aus-Linie ausgelöst. Wird ein Fehler in einer Komponente des Speichers detektiert, kann dies den anderen Komponenten über die Not-Aus-Linie mitgeteilt und



**Abb. 5.3** – Darstellungen der Speicherbestandteile des betrachteten Energy Neighbor, in denen die nächste Ebene jeweils rot hervorgehoben wird.  
 (a.) Container, (b.) Rack, (c.) Modul – mit und ohne Chassis, (d.) Batterie-Zelle



**Abb. 5.4** – Schematische Darstellung der Schütze (S1) und Leistungsschalter (S2 und S3) im Energy Neighbor – nach [SA.3]

der gesamte Container außer Betrieb genommen werden. Die Aktivierung der Not-Aus-Linie kann durch die Racks, das Klimasystem, den Netz- und Anlagenschutz, das Betätigen eines Not-Aus-Tasters oder sonstige allgemeine Sicherheitssysteme auf Container-Ebene erfolgen. Als Ergänzung findet sich ein ähnliches System mit der sogenannten Pilot-Linie auf Rack-Ebene wieder. Durch ein Rack, den Umrichter oder das Batteriemanagementsystem (BMS) kann die analog realisierte Pilot-Linie ausgelöst werden. Daraufhin öffnen sich die Schütze des Gleichspannungszwischenkreises. Somit werden lediglich die betroffenen Racks vom Netz getrennt, nicht jedoch der gesamte Container. Insgesamt stellen sowohl die Pilot- als auch die Not-Aus-Linie Hardware-Maßnahmen zur Umsetzung von Sicherheitsaspekten dar, die den Speicher und Menschen vor möglichen Schäden schützen sollen. Die Auslösung dieser Linien erfolgt aufgrund der Detektion festgelegter Kriterien, die in den Regel- und Steuerungseinheiten der jeweiligen Komponenten hinterlegt sind.

### 5.2.2 Klimasystem des Containers

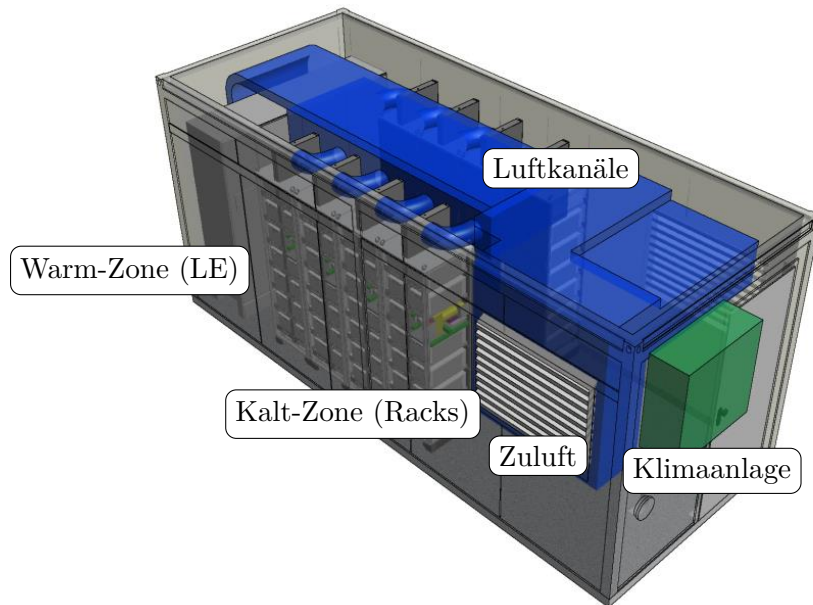
Bei der Klimatisierung des Energy Neighbor wird ein Ansatz mit unterschiedlichen Temperaturzonen realisiert. Deshalb verfügt der Container über ein geregeltes Klimasystem, um einen optimalen und vor allem sicheren Betrieb der elektrischen Komponenten zu ermöglichen. Die LE-Komponenten und die Racks bevorzugen unterschiedliche Temperaturbereiche, weshalb zwei Klimazonen – Kalt und Warm – geschaffen werden. In Abbildung 5.5 sind diese dargestellt. Die Zone der LE wird als Warm-Zone bezeichnet, während die der Racks als Kalt-Zone gilt [247]. Hierbei ist es möglich, die Rack-Zone durch den verbundenen Luftkanal mit der Abwärme der LE zu heizen, was in kälteren Jahreszeiten aus Effizienzgründen interessant ist.

Die Begründung für die Aufteilung in zwei Klimazonen liegt in den Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterien. Diese sollen in einem begrenzten Temperaturfenster betrieben werden, das in etwa 0 °C bis 30 °C beträgt [116, 211]. Bei geringeren Temperaturen nimmt die entnehmbare Kapazität der Zellen ab, wodurch der Speicher nicht effizient genutzt wird. Bei Temperaturen über 30 °C ist der Alterungseffekt der Zellen erhöht und es kann aufgrund des chemischen Energiegehalts von Lithium-Ionen-Zellen zu einem sicherheitskritischen Betrieb mit der Gefahr einer thermischen Instabilität, auch «thermal runaway» [116, 211] genannt, kommen.

Das Klimasystem wird durch ein Managementsystem geregelt, das unter anderem auf prädiktiv arbeitenden Algorithmen beruht. Zur Einhaltung sicherer Betriebsgrenzen der Racks wird ein individueller Lüfter je Rack gezielt angesteuert, um einen Luftstrom aus der Kalt-Zone auf die Batterie-Module zu leiten. Neben diesen dynamisch einsetzbaren Lüftern wird die Temperatur in der Kalt-Zone durch Kälteaggregate und Wasser-Luft-Wärmetauscher geregelt [170, 247]. Dem Klimasystem des Containers stehen demnach mehrere Mittel zur Verfügung, um in unterschiedlicher Dynamik auf die Umwelt zu reagieren. Insgesamt sind die Betriebsmittel so dimensioniert, dass sie unter Volllast eine maximale elektrische Leistung von 8 kW benötigen.

## 5.3 kyELM light – das Energiemanagement im Energy Neighbor

Im Energy Neighbor wurde ein sogenannter light-Ansatz des kyELM mit reduziertem Funktionsumfang integriert. Im Folgenden wird dieses kyELM light kurz erläutert, um den Schritt zum aktiven und vollwertigen kyELM in den folgenden Kapiteln durchführen zu können. Das



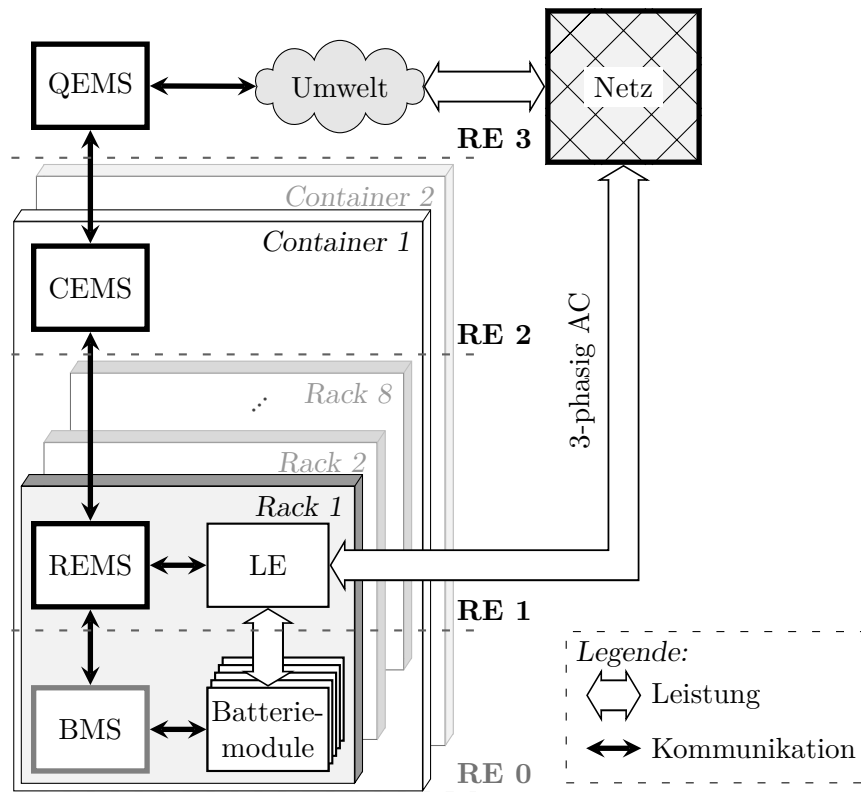
**Abb. 5.5** – Rendering der zwei Klimazonen im Container für die Leistungselektronik (LE) und Racks. Die Klimazonen können bei Bedarf miteinander verbunden werden, um zum Beispiel die Racks mit der Abwärme der LE zu heizen – [247].

gesamte EMS des Containers ist auf mehrere Hardware-Plattformen verteilt, sodass es sich aus Sicht der Hardware- und Softwareentwicklung um ein modulares System handelt. Hierarchisch wird das EMS einzelnen Rekursionsebenen, wie im Teilkapitel 5.2 definiert, zugeteilt, die in Abbildung 5.6 veranschaulicht sind. Bei allen angeführten Management-Instanzen handelt es sich um Software, in der sämtliche Algorithmen und Funktionen des EMS implementiert sind. Generell ist das Gesamtsystem und der Container im Speziellen dazu angehalten, im Quartier netzdienlich zu arbeiten. Das heißt, die Betriebsstrategie ist darauf ausgelegt, den im Quartier befindlichen ONT zu entlasten. Außerdem wird der Container im Falle eines Fehlers aus Sicherheitsgründen gesteuert in den Ruhezustand versetzt. Die Aufgaben der einzelnen Ebenen und die Hardware-Implementierung im Energy Neighbor werden nun kurz erläutert.

#### **Das Management in der Quartier-Ebene:**

Das Energie- und Leistungsmanagement zeichnet sich dadurch aus, dass das System alle Informationen bezüglich der Ereignisse in der Umwelt des Containers zusammenträgt. Zu dieser Umwelt gehören alle Faktoren und Betriebsmittel, wie Erzeuger, Verbraucher und weitere Speicher, die einen Einfluss auf die Leistung im örtlichen Niederspannungsnetz haben. Falls keine Messwerte vorhanden sind, werden diese aufgrund historischer Daten geschätzt. Hierfür bezieht das QEMS Verbrauchsdaten einzelner Haushalte, die Einspeiseleistung der installierten Photovoltaikanlagen und Daten des ONT mit ein. Zusätzlich werden Prognosen über das Wetter und der daraus resultierenden Einspeiseleistung der Photovoltaikanlagen verwendet, um eine Einsatzplanung des Speichers zur Netzentlastung erstellen zu können. Werden die Zeitspannen der verwerteten Daten gegenübergestellt, so wird deutlich, dass das QEMS Eingangsdaten mit unterschiedlicher Zeitspanne verwalten muss. Während der Empfang der Daten des ONT im 1 s-Takt erfolgt, werden die Daten für die Wetter- und





**Abb. 5.6** – Abgrenzung der Energiemanagementsystem (EMS)-Ebenen für den Speicher-Container. Die Grenzen orientieren sich sowohl an der Hardware, auf der das EMS ausgeführt wird, als auch an physikalischen Grenzen. Weiterhin ist die Unterteilung in Container, Rack und Module dargestellt.

Leistungsprognosen maximal einmal pro Tag erneuert. Zusätzlich werden die Prognosen für Verbrauchs- und Erzeugungswerte lediglich in einer Auflösung von 15 min-Abschnitten generiert. Mit diesen Daten und dem Wissen über die Leistung, die der Container in der Lage ist ein- oder auszuspeichern, kann eine Sollleistung für das CEMS und damit dem Speicher-Container bestimmt und übermittelt werden. Dies geschieht im Feldtest sekundlich. Genauer ist die Betriebsweise in [246] erläutert. Ist nur ein Speicher-Container im örtlichen Niederspannungsnetz (wie in EEBatt) vorhanden, wird das QEMS auf der gleichen Hardware implementiert wie das CEMS. Aufgrund der eingesetzten Algorithmen und der Informationsauslastung beider Systeme kommt hier ein leistungsstarker Industrie-PC zum Einsatz, auf dem die beiden Systeme parallel laufen. Sollte ein weiterer Container den aktuellen Speicher im Ortsnetz ergänzen, wie es in Abbildung 5.6 bereits angedeutet ist, bleibt abzuwägen, ob an der Implementierung des QEMS auf der Hardware eines der CEMS festgehalten wird. Da in diesem Szenario zwei oder mehr Container mit einem individuellen CEMS an unterschiedlichen Punkten des Niederspannungsnetzes angeschlossen sein können, ist es die Aufgabe des QEMS, die CEMS zu koordinieren und infolgedessen wieder eine übergeordnete Regelinstanz zu bilden. Insofern ist es zweckmäßig, das QEMS auf einer eigenen Hardware zu implementieren.

### **Das Management in der Container-Ebene:**

Der Container im kyELM light-Ansatz beinhaltet eine bestimmte Anzahl an Speicherracks. Im Beispielfall sind dies acht Stück. Aufgabe des CEMS ist es, die geforderte positive oder negative Solleistung des QEMS zu erfüllen. Durch die Betrachtung der Vorgänge im Container aus einer übergeordneten Perspektive und unter Berücksichtigung der Zustände der Racks wird entschieden, welche Anzahl und mit welcher Leistung die Racks belastet werden. Im Feldtest wurde dies sehr einfach gestaltet. Racks, die aufgrund ihres Ladezustandes und ihres Temperaturniveaus betriebsbereit sind, werden nacheinander mit maximal möglicher beziehungsweise nötiger Leistung betrieben. Neben den Racks steht das Klimasystem im Fokus des CEMS, wobei dieses eine vom EMS nahezu unabhängige Instanz im Container bildet und daher in Abbildung 5.6 nicht mit aufgeführt ist. Allerdings muss die Klimaanlage im Sinne der Leistungsbilanz beachtet werden. Aus diesem Grund wird für eine wirtschaftlichere und effizientere Betriebsweise aller Komponenten im Container im kyELM-Ansatz die sogenannte Rackauswahl eingeführt. Für diese sei auf Abschnitt 6.3.2 verwiesen. Trotzdem ist das CEMS im vereinfachten Ansatz mit dem Wissen über die Rack-Zustände und das Klimasystem in der Lage, die vom gesamten Container zu erbringende Leistung zwischen den Racks aufzuteilen.

### **Das Energiemanagement in der Rack-Ebene:**

Das Management in der Rack-Ebene beschränkt sich lediglich auf das Sammeln aller das Rack charakterisierender Daten, wie die des BMS und der LE des Racks. Weiter wird die Leistungsanforderung unter Berücksichtigung der Batteriezustandswerte in die für die LE relevanten Größen umgerechnet. Nach oben werden die Zustandsdaten des Racks in komprimierter Form weitergegeben.

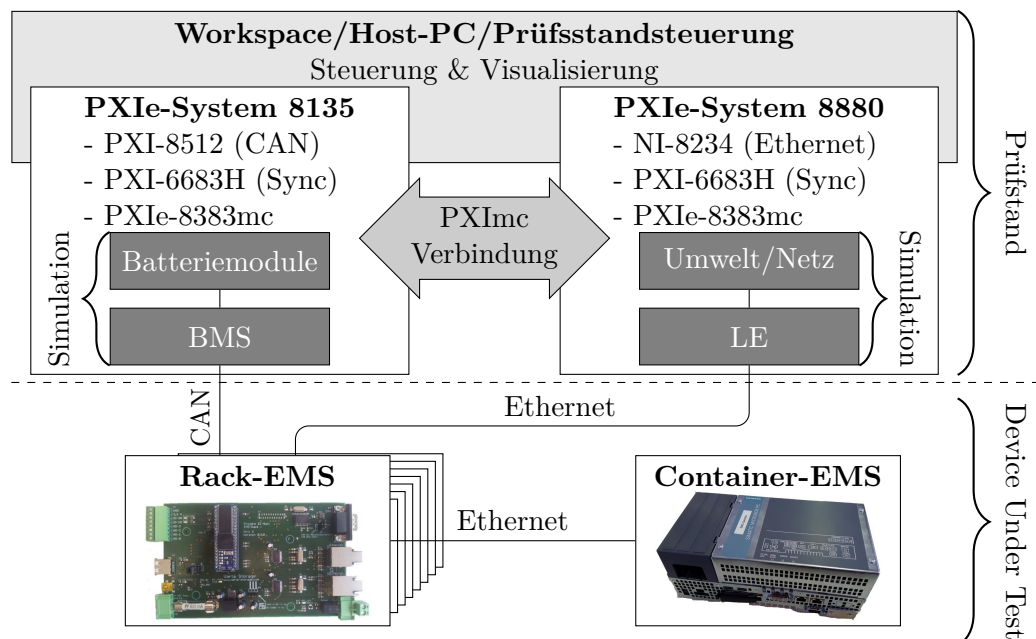
### **Das Management in den Batteriemodulen und der LE:**

Die Hauptaufgabe des Managements auf dieser Ebene ist die Realisierung der eigentlichen Leistungsbereitstellung oder -aufnahme in das hier verbaute Speichermedium «Batterie» durch die entsprechende LE. Dazu sammelt das BMS relevante Daten über den Modulstrang, welche für die Beurteilung des Rackzustandes dienen. Außerdem koordiniert es Lade- und Entladevorgänge durch die Vorgabe von Spannungs- und Stromgrenzwerten für den Betrieb des Racks, die an das REMS weitergegeben werden. Der Modularität wegen ist das BMS physikalisch vom REMS getrennt und auf einer eigenen Hardware-Plattform implementiert.

Im kyELM light-Ansatz erfolgt die Kommunikation unter den EMS-Instanzen per Ethernet-Verbindung. Zwischen dem REMS und BMS wird über eine CAN-Verbindung kommuniziert. Ob alle Systeme korrekt miteinander verbunden sind und die Kommunikation einwandfrei funktioniert, wird durch eine Watch-Dog-Funktion während des Betriebs fortlaufend überwacht.

## **5.4 Prüfstandslandschaft im EEBatt-Projekt**

Nach der Vorstellung der Struktur des kyELM light-Ansatzes in EEBatt wird im Folgenden kurz die Prüfstandslandschaft am Fachgebiet Energiewandlungstechnik im Rahmen der EMS-Entwicklung aufgezeigt. Ausgehend von einem einfachen physikalischen Simulationsmodell wurde ein Hardware-in-the-Loop-Prüfstand aufgebaut. In diesem können die



**Abb. 5.7** – Schematische Darstellung des Hardware-in-the-Loop-Prüfstands für die Energiemanagementsystem (EMS)-Komponenten – detailliert vorgestellt in [V.2] – vgl. Abbildungen 5.8 und 5.9.

Hardware-Plattformen mit den EMS-Instanzen des QEMS, CEMS und REMS integriert und getestet werden. Die Umgebung, die in Form der LE, des BMS, der Module und der Sicherheitseinrichtungen aufgebaut ist, wird in Echtzeit simuliert und ist in den Abbildungen 5.7, 5.8 und 5.9 dargestellt. Wenn in dieser Teststufe alle zuvor definierten Testkriterien erfüllt sind, wird in der nächsten Stufe die EMS-Hardware in einem sogenannten «Brettaufbau» integriert, bei dem alle Komponenten eines Racks in realer Form vorliegen. Sie sind nur nicht im finalen Rackgerüst integriert, sondern frei zugänglich auf einem Brett montiert wie in Abbildung 5.10 dargestellt. Sind auch hier alle Ergebnisse wie erwartet, kann alles in den Container integriert werden. Diese letzte Teststufe ist in Abbildung 5.11 gezeigt.

## 5.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellt die Feldtestumgebung sowie den Energy Neighbor des EEBatt-Projektes vor. Im Detail wird der Energiemanagementansatz des kyELM light und die dazugehörige Prüfstandsumgebung präsentiert. Neben den elektrischen Daten des Speicher-Containers wird auch auf die modulare Bauweise des Systems und des EMS eingegangen. Diese zunächst definierte kybernetische Struktur soll im vollwertigen kyELM noch weiter verfolgt werden. Außerdem wird die noch minimalistisch gehaltene Bestimmung des zu betreibenden Racks durch intelligente Algorithmen verbessert. Schlussendlich hat die Umsetzung im Projekt gezeigt, dass der modulare, kybernetische Aufbau Vorteile und Flexibilität im Aufbau und darauffolgenden Betrieb bringt. Mit dieser Grundlage und den im vorhergehenden Kapitel vorgestellten kybernetischen Methoden wird in Kapitel 6 der kyELM light-Ansatz zu einem aktiven und vollwertigen kyELM erweitert.

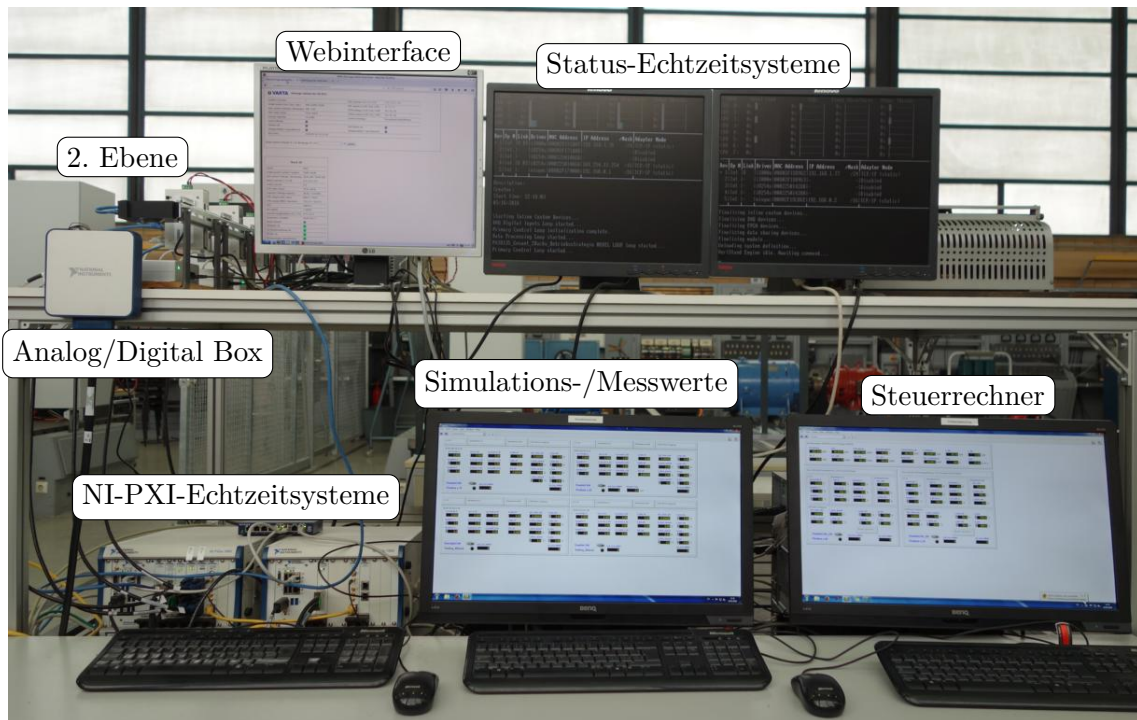


Abb. 5.8 – Blick auf die erste Ebene des Hardware-in-the-Loop-Prüfstands für Energiemanagementsystem (EMS)-Komponenten am Fachgebiet Energiewandlungstechnik.

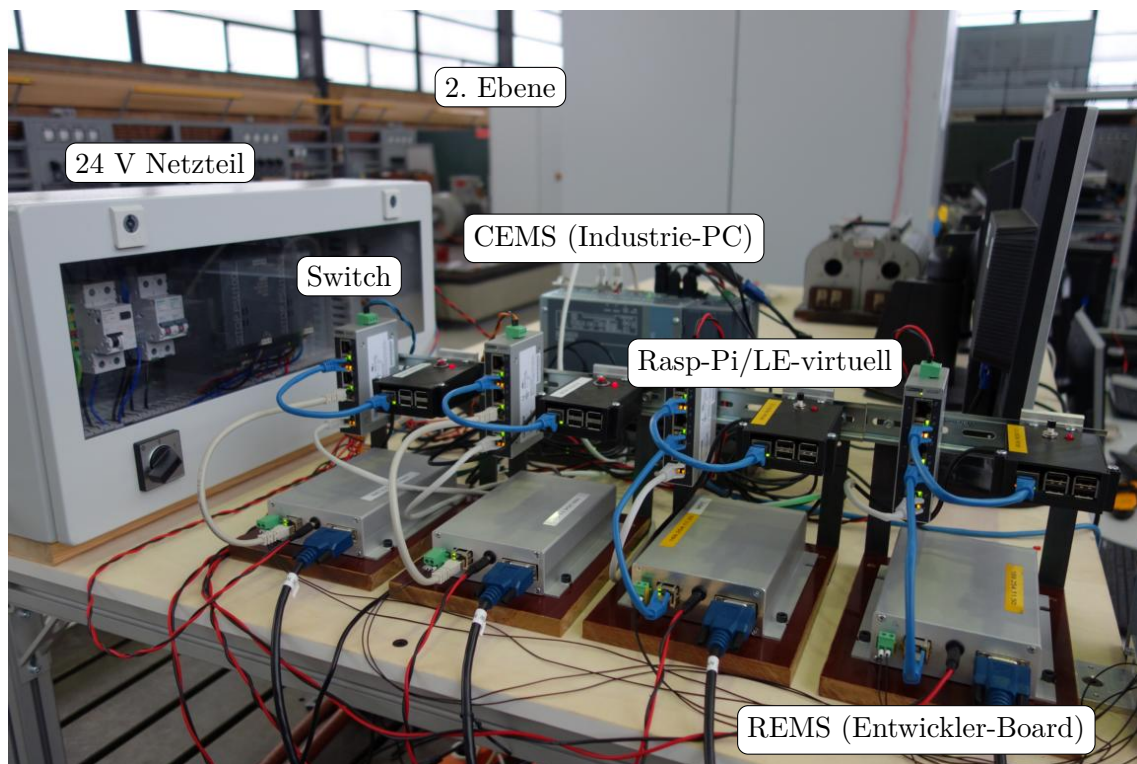
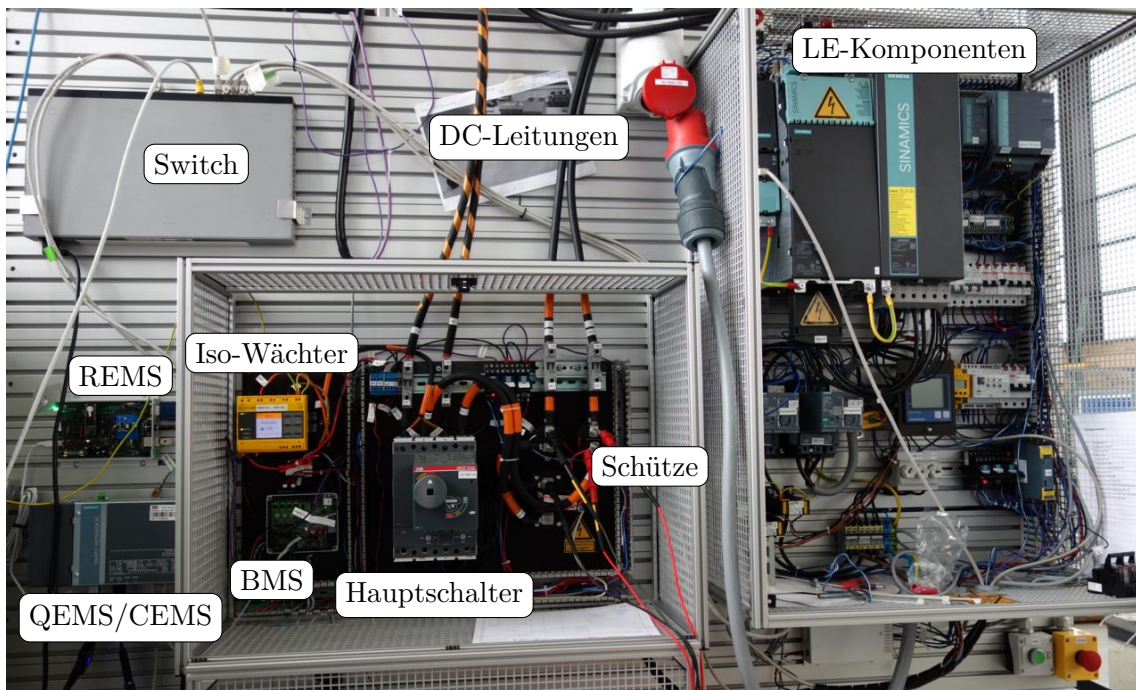


Abb. 5.9 – Blick auf die zweite Ebene des Hardware-in-the-Loop-Prüfstands für Energiemanagementsystem (EMS)-Komponenten am Fachgebiet Energiewandlungstechnik.





**Abb. 5.10** – Blick auf den Hardware-in-the-Loop-Prüfstand «Brettaufbau» für ein Batteriespeicher-Rack inklusive seiner Peripherie, dem Batteriemanagementsystem (BMS), Schützen, den Leistungselektronik-Komponenten (LE) und den Energiemanagementsystem-Komponenten (EMS) am Fachgebiet Energiewandlungstechnik.



**Abb. 5.11** – Blick auf den Energy Neighbor Container im Feldtestgebiet Moosham.



## 6 Strukturierung und Aufbau eines aktiven kybernetischen Energiemanagementsystems

In diesem Kapitel wird der Entwurf des aktiven kybernetischen EMS beschrieben. Hierzu wird zuerst allgemein auf die benötigten Bestandteile und die Intelligenz des Systems geblickt. Im Anschluss erfolgt eine Betrachtung der definierten Rekursionsebenen sowie eine Analyse der nötigen Umweltkopplung. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Betrachtung möglicher Betriebsstrategien. Eine Validierung der vorgestellten Ansätze erfolgt durch die Vorstellung und Diskussion von ausgewählten Simulationsergebnissen im nächsten Kapitel.

### 6.1 Identifikation und Definition der Systembestandteile, -intelligenz und -identität

Wird ein EMS nach der Norm aufgebaut, so muss es den Eigenschaften der DIN-Norm 50001 nach Zitat 9.) gerecht werden. Besonders zu nennen sind die «zusammenhängenden» und «interagierenden Elemente», die gemeinsam eine «Energiepolitik» samt «strategischer Energieziele» in einem definierten «Prozess» erreichen wollen. Der im vorhergehenden Kapitel vorgestellte kyELM light-Ansatz verfolgt bereits erste Grundzüge dieses Vorgehens. Wird dieser Ansatz mit dem Wissen über das Energieversorgungsnetz, den rechtlichen Rahmenbedingungen und der kybernetischen Theorie aus den Kapiteln 2 bis 4 erweitert, so kann im vorgestellten Rahmen des Ortsgebietes Moosham ein verbessertes, aktives und kybernetisches EMS aufgebaut werden.

Hierzu wird, wie bereits im Kapitel 5 erläutert, das Quartier in mehrere Rekursionsebenen aufgeteilt (RE 0–3). Für das EMS relevante Ebenen enthalten jeweils eine EMS-Komponente (REMS, CEMS und QEMS). In der RE 0 sind die LE, die Batteriemodule und das Speichermanagementssystem als BMS im Falle eines Batteriespeichers angesiedelt. In den Batteriemodulen ist außerdem der Ursprung der zu regelnden elektrischen Energie – Wandlung von chemischer in elektrische Energie und umgekehrt – festzumachen. Jede EMS-Komponente ist in einem VSM (RVSM, CVSM und QVSM) integriert und zu implementieren. Je niedriger die Ebene gewählt wird, umso mehr Hardware-Komponenten kommen zum Einsatz und umso kürzere Rechenzeit-Intervalle (Mikro- bis Millisekunden-Bereich) sind nötig. Für höhere Ebenen wird meist nur noch Software für die Umsetzung verwendet, wenn die nötige Hardware für die Kommunikations-Schnittstellen ausgeblendet wird und eher längere Rechenzeit-Intervalle (Sekunden- und Minuten-Bereich) die Regel sind.

Wird anstatt eines herkömmlichen B6-Umrichters für die LE ein Multilevel-Umrichter-Ansatz verfolgt, so kann das kybernetische EMS im Sinne dieser Umrichter-Topologie weitergeführt werden. In diesem Fall sind die Rekursionsebenen nach unten hin erweiterbar. Zum Beispiel

repräsentieren die Phasen der Spannung ähnlich dem Rack und den Modulen einen Energiespeicher. Der Multilevel-Umrichter-Ansatz wird in folgenden Arbeiten [V.1, V.7, 129, 130] näher beschrieben. In dieser Arbeit wird nur der konventionelle B6-Umrichter betrachtet. Dank des kybernetischen Ansatzes können aber auf Rack-Ebene die Topologien kombiniert oder ersetzt werden. Zur Übersicht sind beide Ansätze und die Bezeichnungen in Abbildung 6.1 dargestellt.

Theoretisch wäre neben der hier vorgestellten Anzahl an Rekursionsebenen eine Betrachtung bis in die kleinsten Bestandteile der Materie durch die Fortführung der Rekursion möglich. Allerdings darf der Systemzweck einschließlich der Komplexitätsbetrachtung nicht vergessen werden. Im Sinne des EMS ist es aus diesem Grund ausreichend, nur so viele Ebenen zu betrachten, wie aufgrund der elektrischen Energie relevant sind. Die Systemgrenzen für diese Arbeit lehnen sich denen des Niederspannungsquartiers an. Das heißt, die Betrachtung des Systems erfolgt vom Ursprung der Energie – den Batteriezellen – bis hin zur Quartiersgrenze. Ist dieser Teil stabil, empfiehlt es sich ähnlich dem zellularen Ansatz des VDE [227, 228] mit dem VSM weiter nach oben in der Versorgungsstruktur des Energienetzes zu gehen.

Somit kann festgehalten werden, dass pro Rekursionsebene eine EMS-Komponente vorhanden sein muss. Wie sich noch zeigen wird, kann deren Logik und damit die Intelligenz des Systems rekursiv, aufgrund der im Teilkapitel 3.3 vorgestellten kybernetischen Prinzipien, definiert und skaliert werden. Allgemein wird in der Kybernetik die Intelligenz nach BEER und ASHBY wie folgt definiert:

70.)

---

*„Fähigkeit zur Bewältigung eines Problems, wie sie weder an eine besondere Erziehung noch an irgendeine Spezialausbildung gebunden ist. Intelligenz durchdringt die ganze Persönlichkeit, sie schließt verschiedene Eignungen zu einer integralen Fähigkeit zusammen, die trotz der vorhandenen statistischen Maschinen letzten Endes unteilbar ist.“*

---

[22, S. 156]

71.)

---

*„Voraussicht und Selektivität sind die wichtigsten Fähigkeiten des Managements; gleichzeitig sind dies auch die Hauptmerkmale von Intelligenz überhaupt.“*

---

[22, S. 165]

72.)

---

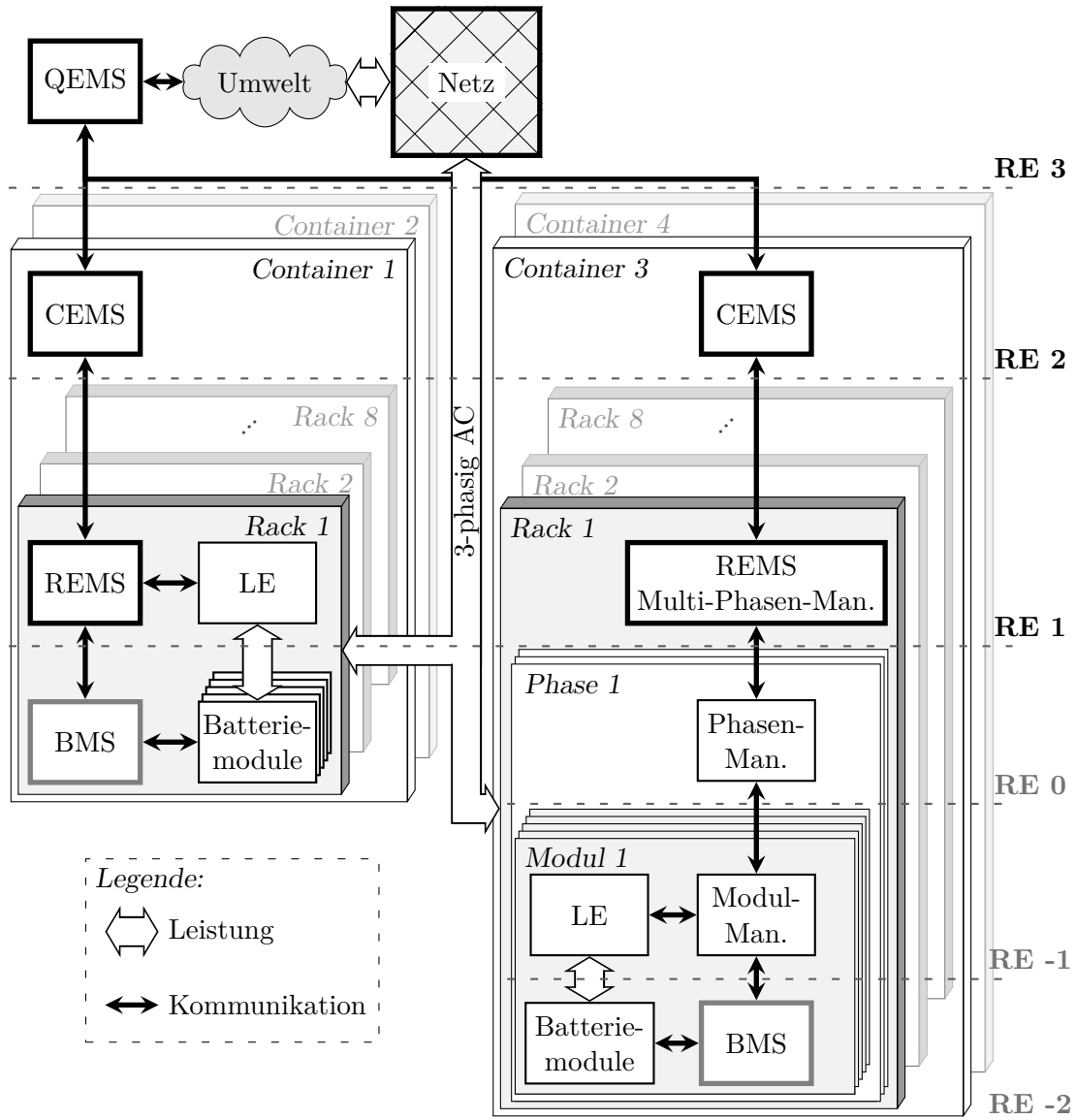
*„Fähigkeit zu angemessener Selektion“*

---

[15, S. 391]

Als Intelligenz wird bei diesem EMS verstanden, dass das System und seine EMS-Komponenten dazu in der Lage sind, sich in ihrer Umwelt und ihrem Umfeld zu identifizieren, mit diesen zu interagieren und ihre Reaktionen gezielt darauf abzustimmen. Durch den Aufbau, der sich am VSM orientiert, ist das System lebensfähig und kann sich in gegebenen Grenzen an Änderungen seiner Umwelt und seines Umfeldes anpassen oder bis zu einem gewissen Grad auch ohne höhere Instanzen, einen sicheren Betrieb gewährleisten. Wichtig hierbei ist,





**Abb. 6.1** – Die Abbildung zeigt die modulare Struktur des Energiemanagementsystems (EMS) in einem stationären Batteriespeicher. Auf der linken Seite kommt ein konventioneller B6-Umrichter als Leistungselektronik (LE) zum Einsatz. Auf der rechten Seite wird ein Multilevel-Umrichter-Ansatz verfolgt. Im Bereich des EMS sind folgende Komponenten zu nennen: Rack- (REMS), Container- (CEMS) und Quartier-Energiemanagementsystem (QEMS).

dass bei der Systemdefinition wie in Kapitel 4 definiert, klare Rahmenbedingungen gesetzt und Kommunikations-Schnittstellen implementiert werden. Zusammengefasst ergibt sich so ein System, das auf der untersten Ebene schnell, agil und nahe an den Netzgrößen arbeiten muss und nach oben hin größere Zeithorizonte betrachtet und Regeltendenzen bzw. -bereiche vorgeben kann.

Zur Systemidentität sei festgehalten, dass es sich beim EMS um die Instanz im System handelt, die einen definierten und geregelten Energiefluss im Quartier ermöglicht und einen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch schafft. In dieser Arbeit wird nur der elektrische Energiefluss betrachtet. Durchaus ist ergänzend das Miteinbeziehen von thermischen oder mechanischen Energieflüssen denkbar. Das zentrale Element und damit das Haupt-SiF auf Quartier-Ebene stellt der Speicher-Container und damit das CEMS dar. Im Falle dieser Arbeit wird diese zu einer virtuell erweiterten Version des Energy Neighbor ausgebaut. Im Betrieb muss das EMS die gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Spannungs-, Frequenz- und Netzregelung beachten und einhalten. Hierfür benötigt es entsprechende Informationen der Umwelt, die im weiteren Verlauf neben den einzelnen Rekursionsebenen erläutert werden.

### 6.2 Betrachtung der Rekursionsebenen und ihrer Umweltkopplung

Die genaue Einteilung und die vorhandenen Komponenten in den einzelnen Rekursionsebenen werden in den folgenden Abschnitten mit Hilfe des in Abschnitt 4.2.9 vorgestellten Schemas charakterisiert und die jeweilige Umweltkopplung betrachtet. Im Allgemeinen ist die Umweltkopplung wichtig zur Varietätsbeherrschung. Die Systemumwelt besitzt gewissermaßen eine unendliche Varietät. Diese kann durch eine gezielte Wahl von Systemgrenzen, Rekursionsebenen und Rahmenbedingungen an das System gemindert werden. Deshalb ist es nicht nötig, alle möglichen Sensorkombinationen zu untersuchen. Durch eine gezielte Inputdatenanalyse auf der jeweiligen Rekursionsebene, kann eine feste Sensorkonfiguration bestimmt werden. Damit ergibt sich am Ende eine definierte Anzahl an zu messenden Umweltzuständen. Eine Erhöhung der eigenen Varietät des EMS gestaltet sich schwierig bis unmöglich, weil der Hebel, den das EMS mit seinen Komponenten gegen die Umwelt ausüben kann, je nach Leistungsgröße eher gering ist.

Eine Änderung von Umweltfaktoren, wie Außentemperatur, Solarstrahlung, Bewölkung, Wind etc., ist technisch nicht realisierbar und sinnvoll. Somit bleibt nur die Wahl geeigneter Systemgrenzen zur Reduzierung der Varietät der Umwelt – wie bereits im Teilkapitel 3.3 beschrieben. Einen Sonderfall stellt das Inselnetz dar, in dem ein Speicher das Quartier bei entsprechender Dimensionierung überdies aus energetischer Sicht beeinflussen kann. Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall eines Quartiers, das an eine höhere Netzebene angeschlossen ist, besteht immer die Möglichkeit von der überlagerten Netzebene Energie zu beziehen oder an sie abzugeben. Hier kann je nach Betriebsstrategie versucht werden, den Austausch auf Null zu regulieren, was später noch näher erläutert wird. Im Folgenden werden die identifizierten Rekursionsebenen, die in Kurzform in Tabelle 6.1 zusammengefasst sind, näher beschrieben.

**Tab. 6.1** – Die Tabelle zeigt einen Überblick über die definierten Rekursionsebenen (RE) im kyELM-Ansatz inklusive der Meta-System-Komponenten und des Systemzwecks der jeweiligen RE.

| RE | VSM-Name | Meta-System-Komponente | Systemzweck  |
|----|----------|------------------------|--|
| 0  |          | BMS & LE-Management    | Überwachung, Balancing der Batteriezellen/-module, Anbindung an das dreiphasige Netz & Ursprung der elektrischen Energie                               |
| 1  | RVSM     | REMS                   | Informationsverdichtung, Übersetzung in die Meta-Sprache & Überwachung des Rackzustandes   |
| 2  | CVSM     | CEMS                   | Ein- und Ausspeichern von geforderter Energie, geeignete Auswahl der zu nutzenden Racks & Übersetzung der gewonnenen Informationen in die Meta-Sprache |
| 3  | QVSM     | QEMS                   | Überwachung des Quartiers, Erfüllung der Netzregeln & Verteilung der vorhandenen Energie unter allen Netzteilnehmern und höheren Netzebenen            |

### 6.2.1 Rekursionsebene 0: Ursprung der Energie

Die RE 0 stellt den Ursprung der zu regelnden elektrischen Energie im Sinne des EMS dar. Dies ergibt sich – im Falle von Batteriespeichern – aus der Wandlung der in den Batteriezellen gespeicherten chemischen Energie. Für den kyELM-Ansatz werden die gleichen Zell- und Modulparameter wie für den Energy Neighbor aus Kapitel 5 zugrunde gelegt. Aufgrund der Modularität können durch Einhaltung der noch zu definierenden festen Schnittstellen auch andere Speichermedien oder -topologien zum Einsatz kommen. Im Sinne des Managements muss aber auch in dieser Ebene ein Meta-System vorhanden sein. Allgemein wird dieses als ein Speichermanagementsystem bezeichnet. Das Äquivalent im Falle von Batterien ist das BMS. Dieses hat entsprechende Daten über den Speicher an die EMS-Komponenten zu liefern. Für das kyELM sind vor allem Spannung, Strom, Ladezustand (SoC), Alterungszustand (SoH), Zell- und Modul-Temperaturen sowie deren Minimal- und Maximal-Werte von Interesse. Weiter muss das BMS entsprechende Funktionszustände wie Balancingvorgänge oder State-of-Health (SoH)-Messzyklen-Anfragen an das EMS mitteilen. Eine entsprechende Buskommunikation, wie zum Beispiel Ethernet oder CAN-Bus, muss dafür vorhanden sein.

Als Übersetzungsglied, um die elektrische Energie von der Gleich- in die Wechselspannung des Niederspannungsnetzes oder umgekehrt zu wandeln, dienen konventionelle B6-Umrichter. Diese kommunizieren an das EMS vor allem Spannung, Strom, Betriebszustand, Temperatur, Minimal- und Maximal-Werte. Beide Komponenten, LE und Modul-Strang samt BMS, können je nach Komplexitätsgrad als eigene VSM aufgebaut werden. In dieser Arbeit werden sie als Black-Box betrachtet, deren Ein- und Ausgänge bekannt sind. Für die weitere VSM- und RE-Betrachtung stellen sie die unterste Ebene und somit für das darüber liegende RVSM die OE dar.

Im Sinne der Umweltkopplung können die beiden Komponenten vor allem durch die Weitergabe der intern aufgenommenen Informationen unterstützen. Beispielsweise kann die LE an das REMS die aktuellen Daten des dreiphasigen Anschlusses und das BMS die erfassten Temperaturen mitteilen.

### Varietätsbetrachtung in der RE 0

Der Batteriestrang oder die Kombination aus Batteriestrang und BMS kann folgende Zustände im Sinne des EMS annehmen: Vollgeladen, Leer oder Einsatzbereit. Letzteres bedeutet, dass der Speicher sowohl Energie aufnehmen als auch abgeben kann. Im Sinne der Varietät ergeben sich hier drei Zustände und damit die Varietät:

$$V_{\text{Modul-Strang}}^* = 3 \quad (6.1)$$

Als Reaktion auf diese drei Zustände kann die LE, gesteuert durch das REMS, mit den Zuständen Laden, Entladen oder Leerlauf antworten. Woraus sich im Sinne des Management die Varietät:

$$V_{\text{REMS}}^* = 3 \quad (6.2)$$

ergibt. Die Varietät der Umwelt kann auf der RE 0 zu Null gesetzt werden, weil durch die Wahl der Systemgrenzen keine Wandlung der Energieform erfolgt und somit nur die Varietäten des Management und die des Speichers beachtet werden müssen. Die Summe der Gesamtvarietät ergibt sich somit nach dem «Law of Requisite Variety» zu Null. Im nächsten Schritt kann in der Betrachtung des Systems eine Rekursionsebene nach oben gegangen werden, in der das Rack samt der EMS-Komponente REMS betrachtet wird.

#### 6.2.2 Rekursionsebene 1: Das RVSM

Nachdem in der RE 0 die beiden OE des RVSM bereits vorgestellt wurden, kann in diesem Abschnitt das VSM im Gesamten aufgebaut werden. Das Rack dient für die darüber liegenden Rekursionsebenen als das Speichermedium für die elektrische Energie. Ziel des Racks ist es, eine geforderte Energie ein- oder auszuspeichern und durch die Beteiligung an der Spannungs- und Frequenzregelung netzdienlich zu arbeiten. Es können hierbei verschiedene Speicherarten oder LE-Topologien Anwendung finden. Die Definition des RVSM und seiner damit verbundenen Systemgrenzen erlaubt aufgrund der kybernetischen Prinzipien diese Skalierung und Modularität.

Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall stellen die LE und das BMS mit dem unterlagerten Modulstrang je eine OE dar. Beide Komponenten besitzen ein Meta-System, das das TS 1 auf dieser Ebene repräsentiert. Im Falle der LE ist dies die interne Regelung des Umrichters samt seiner festgelegten Grenz-, Betriebs- und Maximal-Werte. Für das BMS gilt dasselbe. Es ist zum einen Informationslieferant für das REMS und zum anderen eine Regelinstanz für aktive Balancing- und Messvorgänge im Modulstrang.

Die TS 3–5 werden durch die REMS-Komponente repräsentiert. Auf einer Hardwareinstanz werden durch unterschiedliche Softwareinstanzen die jeweiligen Teilsysteme abgebildet. Beginnend beim TS 3 hat es die Aufgabe, die vom TS 4 & 5 erhaltenen Vorgaben umzusetzen. Im Anwendungsfall stellt dies eine Sollleistung dar, die das Rack in einem geforderten Zeitintervall erbringen oder aufnehmen muss. Das TS 4 übernimmt die Kopplung zur Umwelt und damit auch die Kommunikation zur nächsthöheren Rekursionsebene. Es erfasst außerdem relevante Umweltdaten und Temperaturwerte für das thermische Management.

Das TS 2, als koordinierende Instanz zwischen BMS samt Modulstrang und LE, ist zum einen indirekt im Gleichspannungskreis realisiert und zum anderen in der Ansteuerung der entsprechenden Schütze. Erst wenn LE und Modulstrang das entsprechende Spannungslevel besitzen, werden die Schütze geschaltet. Somit können die KK als entsprechende Spannungssensor- und Schütz-Komponenten angesehen werden. Die RZ ist als Software zur Überwachung dieser Grenzen auf der EMS-Hardware implementiert.

Das TS 3\* wird als eine redundante Kommunikationsstrecke zwischen den beiden OE und dem REMS aufgebaut, um eine Watch-Dog-Funktionalität, durch die Überwachung eines Alive-Signales und einen redundanten Informationsfluss TS 3 zu OE zu realisieren. Als Alarmfilter 1 und 2 kann wie im Energy Neighbor eine Pilot-Linie in Form einer analogen Signalleitung realisiert werden, die alle Teilsysteme miteinander verbindet und von jedem Teilnehmer ausgelöst werden kann.

### Varietätsbetrachtung in der RE 1

Wird auf dieser Ebene die Varietät bestimmt, so gilt für das Rack als Gesamtkomponente, dass es folgende Zustände im Sinne des Energiemanagements annehmen kann: Vollgeladen, Leer oder Einsatzbereit. Aufgrund der Modularität müssen alle im Container verbauten Racks – im Beispielfall acht Stück – beachtet werden. Somit gilt für die Varietät der Racks:

$$V_{\text{Racks}}^* = 3^8 = 6561 \quad (6.3)$$

Als Reaktion auf diese Zustände kann das CEMS des Containers mit den Zuständen Laden, Entladen oder Leerlauf antworten. Die Varietät des Managements beträgt deshalb:

$$V_{\text{CEMS}}^* = 3^8 = 6561 \quad (6.4)$$

Für die Varietät der Umwelt gilt auch auf dieser Rekursionsebene, dass sie aufgrund der Wahl der Systemgrenzen zu Null gesetzt werden kann. Die Varietäten des Managements und die der Racks erfüllen somit das «Law of Requisite Variety». Im nächsten Abschnitt erfolgt die detaillierte Betrachtung des Container-Managements.

### 6.2.3 Rekursionsebene 2: Das CVSM

Das CVSM stellt in den Rekursionsebenen das erste VSM in der Rekursion dar. Das heißt, die Komponenten, die auf dieser Ebene betrachtet werden, sind auch nach der VSM-Struktur aufgebaut. Der schwerpunktmäßig betrachtete Speicher-Container ist aus EMS-Sicht im Quartier das zentrale Speichermedium der Energie. Ob es sich um einen oder mehrere Container handelt, spielt für die Systemzweckdefinition eine untergeordnete Rolle. Im Sinne der Rekursion steht diese Rekursionsebene RE 2 zwischen der RE 1 der Racks und der RE 3 des Quartiers und stellt somit keine oberste oder unterste Ebene im Sinne der Energie dar. Der Zweck ist es, dem Quartier als Speicher dienlich zu sein und entsprechend Energie in die vorhandenen Racks ein- oder auszuspeichern. Im Beispiel beinhalten die Racks Batteriemodule. Wie im Abschnitt 2.3.2 aufgeführt, könnten allerdings im Sinne der Modularität auch andere Speichertopologien oder -arten, Verwendung finden. Lediglich die Schnittstellen müssen genau definiert werden. Die nötigen Funktionsinstanzen des CVSM sind:

- ein oder mehrere Speicher-Racks inklusive einer Wandler-Topologie, die die elektrische Energie bereitstellen oder verarbeiten,
- eine entsprechend dimensionierte Kommunikations-Schnittstelle zu höheren Ebenen und Sensorik zur Identifizierung des Umfeldes des Containers, und
- eine Konditionierungseinrichtung, wie eine Klimaanlage, zur Beherrschung von einem Teil der Umwelteinflüsse.

In der Rekursionsebene muss das CEMS über die Intelligenz verfügen, die geforderte Energie, angepasst auf die aktuelle Netzsituation, aus den vorhandenen Speicher-Racks zu beziehen oder in diese einzuspeisen. Eine Umsetzung des CEMS erfolgt in Software und in Hardware-Komponenten. Somit können dem CVSM folgende OE zugewiesen werden. Zum einen sind es die Racks inklusive ihrer REMS, LE und Batteriemodule – im Anwendungsfall acht Racks – sowie die Klimaanlage als aktiv steuerbarer Aktor. Kommuniziert wird zwischen den TS 1 und TS 3 mit einer geeigneten Bustopologie, wie zum Beispiel Ethernet. Redundant dazu wird eine Überwachungsfunktion (Watch-Dog) über das TS 3\* angelegt. Über diese können zum einen direkt von den OE redundante Informationen zum TS 1 bezogen werden und es wird ein Alive-Signal gesendet, um zu wissen, ob alle OE ihre Funktion ausführen.

Das TS 2 ist zum einen als KK auf der REMS-Hardware in Software zur Verdichtung von Rackzustandsdaten und zur kurzzeitigen Koordination bei TS 3-Latenzen oder Ausfällen implementiert. Zum anderen ist TS 2 als RZ in der CEMS-Hardware integriert, als Software-Funktion zur Übersetzung der empfangenen OE-Informationen und zur kurzzeitigen Regelung der OE bei TS 3-Ausfällen. An dieser Stelle ist die Rekursion zu beachten. Funktionsbausteine der RZ aus der RE 1 können hier im KK der RE 2 redundant Verwendung finden. Nur die Datenbasis und Meta-Sprache ist an die entsprechende Rekursionsebene angepasst. Dieser Sachverhalt wurde bereits im Abschnitt 4.2.8 erläutert.

Das TS 3 selbst ist für die gezielte Zuteilung von Leistungspaketen an die einzelnen Racks und im Bedarfsfall zur Steuerung der Klimanlage zuständig. Der genaue Ablauf der sogenannten Rackauswahl wird im Abschnitt 6.3.2 geschildert. Die Funktion des TS 4 ist durch die Umweltkopplung des Containers repräsentiert und erfasst relevante Daten zur Auswahl der geeigneten Racks. Hierzu zählen unter anderem:

- die Temperatur im Containerumfeld,
- der Netzzustand am Containeranschlusspunkt (Spannungs- und Frequenzlage) und
- über die nächsthöhere EMS-Instanz kommunizierte Daten, wie Solareinstrahlung, Bewölkungsgrad, Leistungsverteilung im Quartier, Energiekosten, etc.

Zuletzt definiert das TS 5 als Softwareinstanz die geeignete Vorgehensweise und Rack-Auswahl unter Beachtung der gewonnenen Daten der darunterliegenden Teilsysteme. Sollte allerdings eine überlagerte Rekursionsebene mit einem QEMS vorhanden sein, wird es von diesem überstimmt, solange eigene Normen und Systemidentitäten befolgt werden oder es sich um einen Notfall oder Ausfall der oberen Instanz handelt. Als Alarmfilter 1 und 2 wird wie im Energy Neighbor eine Not-Aus-Linie, als Pendant zur Pilot-Linie, in Form einer analogen Signalleitung realisiert, die alle Teilsysteme miteinander verbindet und von jedem ausgelöst werden kann. Bevor das hier angedeutete QVSM näher betrachtet wird, erfolgt die Bestimmung der Varietät in der RE 2 und die Koordinations-Funktion des TS 2 wird näher erläutert.

### Varietätsbetrachtung in der RE 2

Wie in den bereits vorgestellten Rekursionsebenen kann auch hier die Varietät nach dem gleichen Schema berechnet werden. Der Container als Gesamtkomponente liefert folgende Zustände im Sinne des Energiemanagements: Vollgeladen, Leer oder Einsatzbereit. Aufgrund der Modularität müssen alle im Quartier verbauten Container – im Beispielfall ein Stück – beachtet werden. Somit gilt für die Varietät des Containers:

$$V_{\text{Container}}^* = 3 \quad (6.5)$$

Als Reaktion auf diese Zustände kann das QEMS des Quartiers mit den Zuständen Laden, Entladen oder Leerlauf antworten. Die Varietät des Managements beträgt deshalb:

$$V_{\text{QEMS}}^* = 3 + x \text{ mit } x \geq 0 \quad (6.6)$$

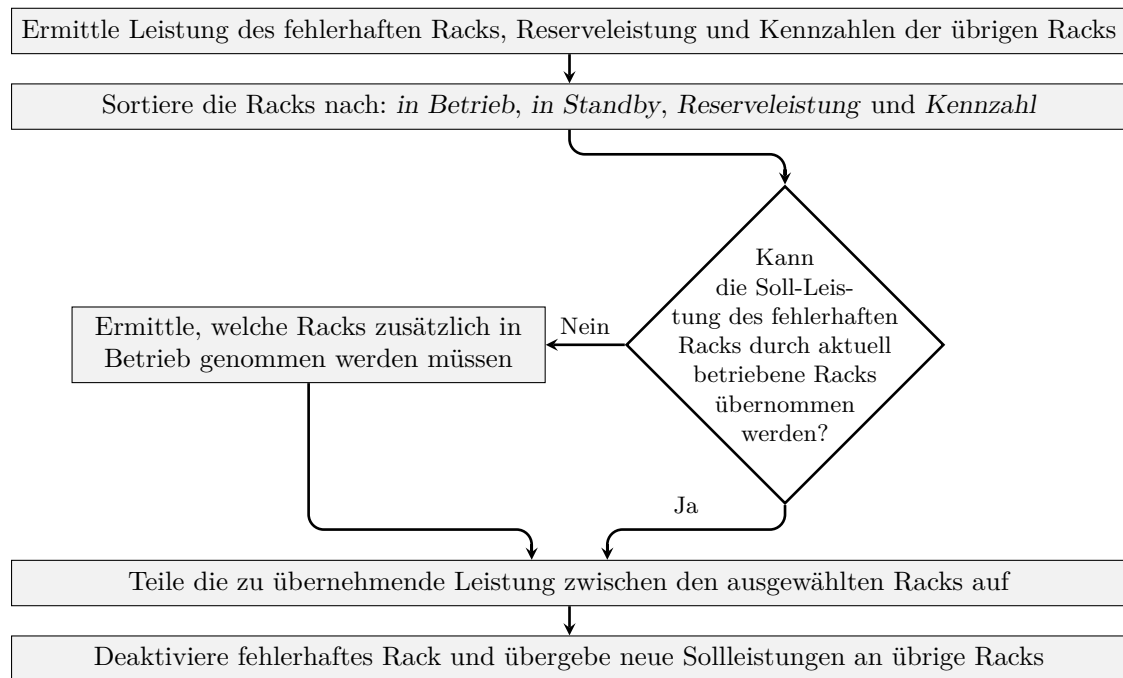
Das  $x$  steht hierbei für die Möglichkeit des QEMS, auch andere Netzteilnehmer im Quartier beeinflussen zu können, zum Beispiel PV-Anlagen oder regelbare Verbraucher, wie Haushalte oder einzelne Bestandteile davon. Diese würden ebenfalls eine Varietät liefern, die ähnlich der Varietät des Containers bestimmt wird. Allerdings kann eine PV-Anlage keine Energie einspeichern. Sie kann aber in ihrer Energieproduktion begrenzt oder ganz abgeschaltet werden. Dies würde zwei Zuständen entsprechen. Diese Betrachtung wird in der Arbeit nur bei den Simulationen zum Tragen kommen.

In Summe kann festgehalten werden, dass die Varietät des Managements stets größer als die der Störung ist. Auch hier kann für die Varietät der Umwelt auf dieser Rekursionsebene angenommen werden, dass sie aufgrund der Wahl der Systemgrenzen zu Null gesetzt wird. Somit ist das «Law of Requisite Variety» erfüllt.

### Detailbetrachtung: Rack-Koordination durch das TS 2

Wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, ist es das Ziel eines Racks, die geforderte Sollleistung der höheren Rekursionsebene zu erfüllen. Somit ist die Leistungsverteilung zwischen den Racks durch die Rack-Auswahl geregelt. Sollte allerdings zwischen den Berechnungszyklen neuer Sollleistungen doch ein Fehler, in Form eines Kommunikationsabbruches zu der höheren Rekursionsebene oder eines Rackausfalls, auftreten, so kann es zu Abweichungen kommen, die das CEMS erst im neuen Berechnungszyklus feststellen kann. Mögliche Berechnungszyklen liegen bei dem gezeigten System im einstelligen Sekunden-Bereich, was in den Simulationen noch gezeigt wird. Allerdings kann auch in diesem Zeitraum ein Komponentenausfall Folgen für das gesamte Netz haben. Aufgrund der Funktionalität des TS 2, das agiler als das TS 3 arbeiten und implementiert werden kann, ist hier die Koordinations-Funktion zu nutzen.

Diese Vorgänge können durch die RZ und die KK des TS 2 abgebildet werden. Dazu muss die RZ vom TS 3 die generierten Werte für die Sollleistungs-Verteilung redundant erhalten. Sollte eine Abweichung dieser Werte nach einem definierten Ausregel-Zeitfenster  $t_{\text{aus}}$  bei einem oder mehreren Racks detektiert werden, so kann die RZ über die KK die noch arbeitenden Racks ansprechen und die Sollvorgaben anpassen. Hierbei muss allerdings unterschieden werden, dass die der RZ vorliegende Informationsbasis durch die KK bereits verdichtet und damit abstrahiert ist. Den Ausfall von Komponenten, wie einem Rack, muss das TS 2 also nicht optimal lösen, stattdessen soll es durch seinen Eingriff lediglich die Abweichungen von



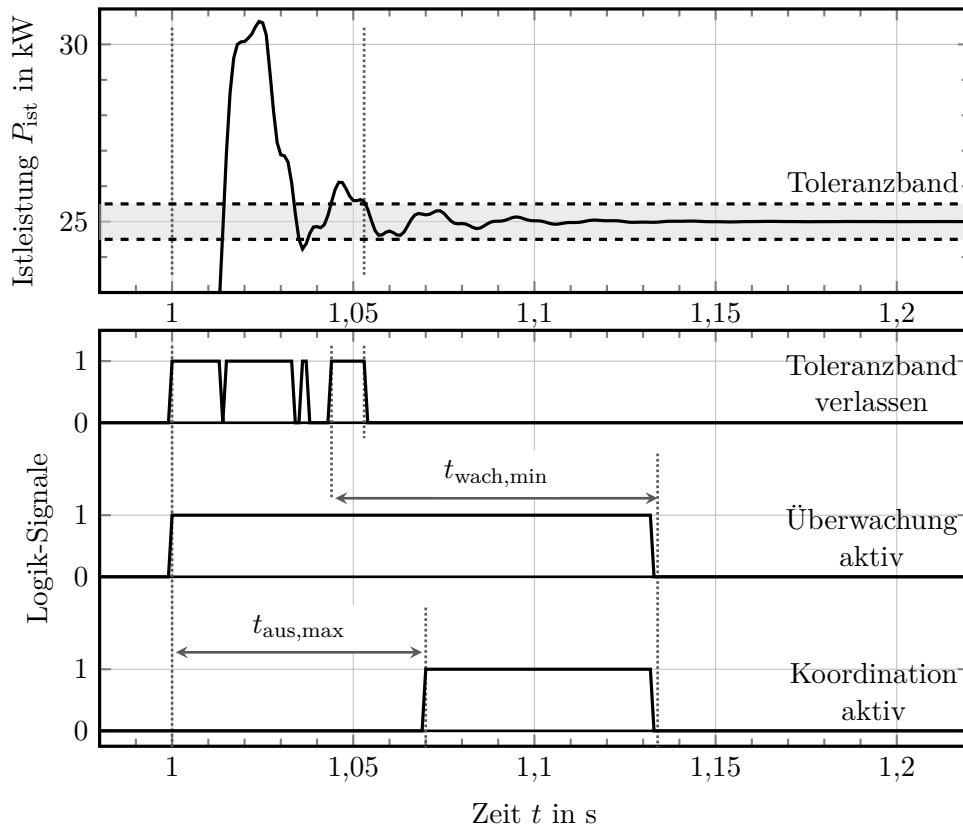
**Abb. 6.2** – Die Abbildung zeigt das Flussdiagramm der Rack-Koordination des TS 2 im CEMS des CVSM. Der zugrundeliegende Algorithmus wird ausgeführt, wenn ein Rack das Toleranzband der zu erbringenden Sollleistung verlässt, während die Koordination aktiv ist oder ein Rack-Ausfall gemeldet wird – angelehnt an die Ergebnisse nach [SA.3].

den Sollvorgaben in Grenzen halten. Im nächsten Iterationsschritt wird das TS 3 auf einer fundierten Datenbasis eine neue Sollvorgabe für die noch verbleibenden Racks generieren. Das heißt, die Auswahl, wie die Leistungspakete in der Rack-Koordination verteilt werden, basiert auf abstrahierten und definierten Rack-Auswahl-Algorithmen, die noch vorgestellt werden. Im Idealfall orientiert sich die Rack-Koordination an den Bewertungskriterien der einzelnen Racks. Sollte dies nicht möglich sein, können noch vorhandene Reserven, wie Racks im Standby, hinzugenommen werden. Abbildung 6.2 beschreibt das Flussdiagramm der Rack-Koordination.

Damit das TS 2 und das TS 3 bei der Rack-Koordination und der Rack-Auswahl nicht gegeneinander arbeiten, werden die genannten Zeitintervalle definiert, die das TS 2 entweder gezielt einsetzen lassen oder auftretende Einschwingvorgänge beachten. Hierzu wird ein Toleranzband, zum Beispiel  $\pm 2\%$ , um die geforderte Sollleistung definiert. Liegt die Istleistung über der Toleranzgrenze, wird die Überwachung des TS 2 aktiviert. Im Hintergrund wird die Zeit seit dem ersten Verlassen des Toleranzbereiches erfasst. Wird eine zuvor definierte maximale Ausregelzeit  $t_{\text{aus, max}}$  überschritten, beginnt die Rack-Koordination des TS 2 bei einer erneuten oder einer anhaltenden Abweichung der Toleranz aktiv zu arbeiten.

Für den Fall, dass ein Rack selbst einen Fehler detektiert und dieser dem TS 3 noch nicht bekannt ist, wird die Rack-Koordination sofort aktiviert. Die genannten Zeitintervalle sind zum Verständnis in Abbildung 6.3 dargestellt. Zwei exemplarische Simulationsergebnisse der arbeitenden Rack-Koordination werden im Anhang E gezeigt.





**Abb. 6.3** – Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Logik-Signale in der Rack-Koordination des TS 2 im CEMS des CVSM. Verlässt die Istleistung erstmalig die obere oder untere gesetzte Toleranzlinie, wird die Überwachung aktiviert. Nach einer definierten maximalen Ausregelzeit  $t_{\text{aus,max}}$ , die größer als die genannte Ausregelzeit  $t_{\text{aus}}$  ist, würden bei einer erneuten Verletzung des Toleranzbandes die Sollleistungen durch die Rack-Koordination neu verteilt. Erfolgt keine erneute Grenzverletzung mit einem sich nachziehenden koordinierenden Eingriff, so schaltet sich das System nach Ablauf der Überwachungszeit  $t_{\text{wach,min}} > t_{\text{aus,max}}$  ab – angelehnt an die Ergebnisse nach [SA.3].

### 6.2.4 Rekursionsebene 3: Das QVSM

Wegen der kybernetischen Prinzipien kann anhand der schon betrachteten Rekursionsebenen auch die Ebene des Quartiers (RE 3) mit Hilfe des VSM strukturiert werden. Als Funktionsinstanzen im Quartier können Verbraucher, Speicher und Erzeuger definiert werden und jeweils mehrfach besetzt sein. Die Schnittstelle zu einer höheren Netz-Spannungsebene ist eine Mischung aus allen drei Instanzen. Generell sollte, wie im Abschnitt 2.3.1 vorgestellt, das Quartier inklusive seiner Komponenten, meist Leitungen, Haushalte, Transformatoren, Erzeugungs- und Speicher-Anlagen, so ausgelegt sein, dass eine ausgeglichene Energiebilanz vorliegt. Die beschriebenen gesetzlichen und netzspezifischen Regeln, wie zum Beispiel die Spannungs- und Frequenz-Bänder, gilt es stets einzuhalten. Aufgrund der in der Einleitung 1.1 genannten Probleme ist dies nicht immer der Fall, und ein Energiemanagement kann neben klassischen Netzausbaumethoden helfen. Vereinfacht gesprochen muss ein Management auf dieser Ebene die Waage zwischen erzeugter und verbrauchter Energie halten. Sollte die Energiebilanz im Quartier nicht ausreichen, kann bei einem vorhandenen Anschluss an eine

höhere Netzebene, Energie abgegeben oder von ihr bezogen werden. Dieses Verhalten muss durch eine definierte Betriebsstrategie geregelt werden. Zusammengefasst besitzt ein Quartier folgende Funktionsinstanzen, um effizient verwaltet werden zu können:

- einen oder mehrere Speicher, die einen Überschuss oder ein Defizit von elektrischer Energie speichern oder ausgleichen können,
- Erzeugungsanlagen, die vor Ort Energie bereitstellen,
- Verbraucher, die einen variierenden Energiebedarf fordern,
- eine steuerbare Energie-Schnittstelle zu höheren Netzebenen,
- eine entsprechend definierte Kommunikations-Schnittstelle,
- Sensorik zur Identifizierung des Umfeldes und der Umwelt des Quartiers.

Wird das vorhandene Quartier in ein QVSM strukturiert, sind die genannten Komponenten, wenn sie regelbar sind oder über ein EMS verfügen, als OE, sonst als Umwelt zu definieren. Im Beispiel Moosham bieten sich der Speicher-Container mit seinem CEMS und regelbare PV-Anlagen als OE an. Alle anderen Komponenten wie nicht regelbare PV-Anlagen, Haushalte oder der ONT werden als Umweltdaten berücksichtigt. Durch die Rekursion sind auch auf dieser Ebene Überschneidungen in den einzelnen VSM auszumachen. Es gilt, dass im TS 2 schon vorhandene Algorithmen und Regler aus der unterlagerten RE 2 wiederverwendet werden können. Die Datenverarbeitung und Abstraktion findet aber auf einer höheren Meta-Sprache statt. Das QVSM ist so mit Hilfe seines QEMS in der Lage, die Energie im Quartier effizient zwischen den Netzteilnehmern zu verteilen, was den Zweck des QVSM repräsentiert.

Wie in den bereits beschriebenen Rekursionsebenen wird das QEMS sowohl in Hardware als auch in Software realisiert. Seitens des QVSM repräsentiert es die TS 3–5 und die RZ des TS 2. Die KK sind durch die Implementierung der RZ der RE 2 schon vordefiniert. Sie können das TS 3 dadurch unterstützen, dass sie aufgrund der räumlich verteilten Regelung im Quartier das TS 3 bei der Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für das Frequenz- und Spannungsband unterstützen. Außerdem kann es zusätzlich Handlungsempfehlungen oder minimale Sollwertanpassungen bei der Regelung der OE durch die Kopplung mit dem TS 1 anbringen. Als OE und zugehöriges TS 1 können in der Theorie alle Netzteilnehmer betrachtet werden, die einen sinnvollen Beitrag im Rahmen der zu verwaltenden Energie leisten. Für den in dieser Arbeit vorgestellten Fall sind dies der Speicher-Container, Haushalte, regelbare PV-Anlagen und der ONT. Somit sind die TS 1 durch die Management- und Regelkomponenten der jeweiligen Instanzen geprägt. Als Beispiel ist das CEMS des Speicher-Containers zu nennen.

Für das TS 2 kann die gleiche Methode wie im CVSM angewendet werden. Aus der Rack-Koordination wird auf Quartier-Ebene eine Netzkomponenten-Koordination, die die durch das QEMS geforderten Sollleistungen auf ihre Einhaltung überwacht und etwaige Abweichung unter den aktiven Netzkomponenten aufteilt. Im Unterschied zu der Methode auf der RE 2 sind hier allerdings die Verteil-Algorithmen und Rahmenbedingungen träger dimensioniert. Es wird wie in der RE 2 davon ausgegangen, dass die Netzkomponenten die Vorgaben einhalten und eine solche Koordination nur in Fehlerfällen zum Einsatz kommt. Eine Sammlung von verdichteten Netzkomponentendaten und die kurzzeitige Koordination bei TS 3-Latenzen oder -Ausfällen ist Aufgabe der RZ des TS 2 im QVSM. Diese ist, in der QEMS-Hardware integriert, als Software-Funktion zu implementieren und verfügt über vom TS 3 definierte Prioritätenlisten zur Koordination der Netzkomponenten. Genauer charakterisiert handelt es sich um einfach aufgebaute Standardregler, die die Spannungsamplitude oder Frequenz

bei einer Grenzüberschreitung auf einen Wert innerhalb des vorgegebenen Bandes durch entsprechende Leistungsvorgaben einstellen. In dieser Rekursionsebene hat die Einhaltung der Betriebsgrenzen höchste Priorität.

Das QEMS wird derart ausgelegt, dass es die Funktionalität aufweist, anhand seines TS 3 die im Quartier anfallende Leistungsabweichung zwischen Erzeugung und Verbrauch zu regeln. Andererseits muss es, aufgrund der Datenerfassung und Umweltkopplung im TS 4, zukünftige Energieverteilungen im Quartier vorhersagen können und in Abstimmung mit dem TS 3 entsprechende Maßnahmen treffen, um die Leistungsbilanz auszugleichen. Dem überlagert achtet das TS 5 auf die Einhaltung der selbst definierten Betriebsstrategien und rechtlich vorgegebenen Normen. Alle eben beschriebenen Teilsysteme sind als Software-Komponenten auf dem QEMS zu realisieren. Die detaillierte Betrachtung der Leistungsverteilung erfolgt im Abschnitt 6.3.3. Die Kommunikation zwischen den TS 1–3 kann hier mit geeigneten Bustopologien (z. B. Ethernet) erfolgen. Alternativ auch eine drahtlose Funkkommunikation oder dergleichen interessant sein, wenn weite Strecken zu überwinden sind. Das TS 3\* wird in dieser Ebene auch durch die Watch-Dog-Überwachungsfunktion repräsentiert und hat redundante Informationen der OE zu beziehen.

Das TS 4 des QEMS ist das TS 4 in all den betrachteten Rekursionsebenen mit der vielfältigsten Datenbasis. Durch die Vielzahl an möglichen Informationsquellen und verbauter Sensorik im Quartier ist eine Umweltkopplung auf Grundlage folgender Daten realisierbar:

- Klimadaten des Quartiers (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit, Bewölkungsgrad, Luftdruck, etc.)
- Netzzustand am ONT (Spannungs- und Frequenzlage)
- wirtschaftlich relevante Daten über das Internet of Things (Stromkosten, Zuschüsse, Förderungen, etc.)
- Verbrauchsdaten im Quartier durch vernetzte Stromzähler oder geeignete Messstellen
- Datenbanken mit historischen Netz- oder Klimadaten
- Vorhersagen über den Energiebedarf aus höheren Netzebenen
- falls erfasst, alle Verbrauchswerte der nicht regel- und steuerbaren Betriebsmittel im Quartier

Sollten nur wenige dieser Informationen vorhanden sein, so kann als Alternative auf ein vereinfachtes Netzmodell des Ortsnetzes zurückgegriffen werden. In diesem sollte zusammen mit bekannten Daten über Faktoren, wie die Erzeugung, den Verbrauch im Quartier und angenäherten Standardlastprofilen, eine Abschätzung über die aktuelle Residuallast getroffen werden können. Allerdings sind dies nur Schätzwerte. Deshalb sollte, durch eine gezielt im Quartier verbaute Messeinrichtung, ein Abgleich der Modelldaten mit der vorherrschenden Netzsituation stattfinden. Am Ende können lernfähige Systeme gewonnene Modelldaten durch die Laufzeit verbessern. Dadurch kann eine komplexere Messeinrichtung oder Kommunikationsstruktur im Quartier vermieden werden.

Neben der Erfassung der Daten aus der Systemumwelt ist das TS 4 im QVSM auch für strategische Planungsaufgaben und Abschätzungen über die weitere Systementwicklung, der sogenannten Prädiktion aufgrund der erfassten Daten, zuständig. Dieser Aspekt sollte allerdings in einer eigenen Arbeit intensiv diskutiert werden, weshalb hier nur eine Gedankenbasis gegeben wird. Hierzu wird wie im Abschnitt 4.2.6 die Idee aufgegriffen, dass Vorhersagen gemacht werden. Zum einen für die in der Zukunft, zur Umsetzung der verfolgten Betriebsziele, erforderlichen Leistungspakete sowie zum anderen zur Planung, wie diese Pakete im Rahmen

des aktuellen Betriebszustandes des Systems realisiert werden können. Beispielhaft kann hier die täglich, abhängig von Jahreszeit und Witterung, auftretende Erzeugungsspitze durch eingesetzte PV-Anlagen genannt werden. Je nach Betriebsstrategie kann mit dem Wissen über diese Spitze eine Vorkonditionierung der Speicher stattfinden. So kann im genannten Beispiel ein Entladen voller Speicher zu Zeiten geringer Erzeugung, beispielsweise in den Morgen- oder Abendstunden, ratsam sein. Somit wird deutlich, dass sich das TS 4 von dem TS 3 darin unterscheidet, dass es auch die Dimension der «Zeit» erfasst und folglich nicht nur in «Leistung», sondern auch in «Energie» plant, um einen möglichen Leistungsbedarf zu bestimmten Zeiträumen abdecken zu können. Somit ist über die Rekursionsebenen hinweg auch zu erkennen, dass vor allem in den unteren Teilsystemen (TS 1 und 2) in Leistung und in den oberen Ebenen (TS 3–5) in Energie «gedacht und gesprochen» wird.

Im Bezug auf die Umsetzung der Alarmfilter 1 und 2 im QVSM kann wie in den beiden anderen Rekursionsebenen eine Art «Not-Aus-Linie» realisiert werden. Allerdings ist hier die räumliche Trennung der Teilsysteme zu beachten und die Überlegung zu prüfen, ob die über die Alarmfilter erhaltene Information nicht auch über schon vorhandene Kommunikationswege übertragen wird. Im Folgenden wird die Varietät für diese Ebene bestimmt.

### Varietätsbetrachtung in der RE 3

Für die RE 3 wird die gleiche Vorgehensweise wie in den anderen Rekursionsebenen verwendet. Das Quartier als Gesamtkomponente liefert folgende Zustände im Sinne des Energiemanagements an eine überlagerte Spannungsebene: Vollgeladen, Leer oder Einsatzbereit. Aufgrund der Modularität sollten aber alle an diese Spannungsebene angeschlossenen Energie-Instanzen beachtet werden. Somit gilt für die Varietät des Quartiers:

$$V_{\text{Quartier}}^* = 3 + x \text{ mit } x \geq 0 \quad (6.7)$$

Als Reaktion auf diese Zustände kann das EMS der überlagerten Spannungsebene (ÜSE) mit den Zuständen Laden, Entladen oder Leerlauf antworten. Die Varietät des Managements beträgt deshalb:

$$V_{\text{ÜSEEMS}}^* = 3 + x \text{ mit } x \geq 0 \quad (6.8)$$

Das  $x$  steht hier für die Möglichkeit des EMS, andere Netzteilnehmer in der Spannungsebene, wie PV-Anlagen, regelbare Verbraucher oder andere Quartiere zu beeinflussen. Diese würden eine Varietät liefern, die ähnlich der Varietät des Quartiers bestimmt wird. Die Betrachtung wird in dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt. In Summe kann festgehalten werden, dass die Varietät des Managements zwar größer als die der Störung ist, allerdings ist die Varietät der Umwelt auf dieser Rekursionsebene nicht zwingend gleich Null, selbst wenn klare Systemgrenzen definierbar sind. Eine separate Überprüfung und das Einbeziehen anderer Energieformen, wie die Power-to-Heat-Methode, haben Einfluss auf die Varietätsbestimmung. Das «Law of Requisite Variety» muss dann genauer untersucht werden.

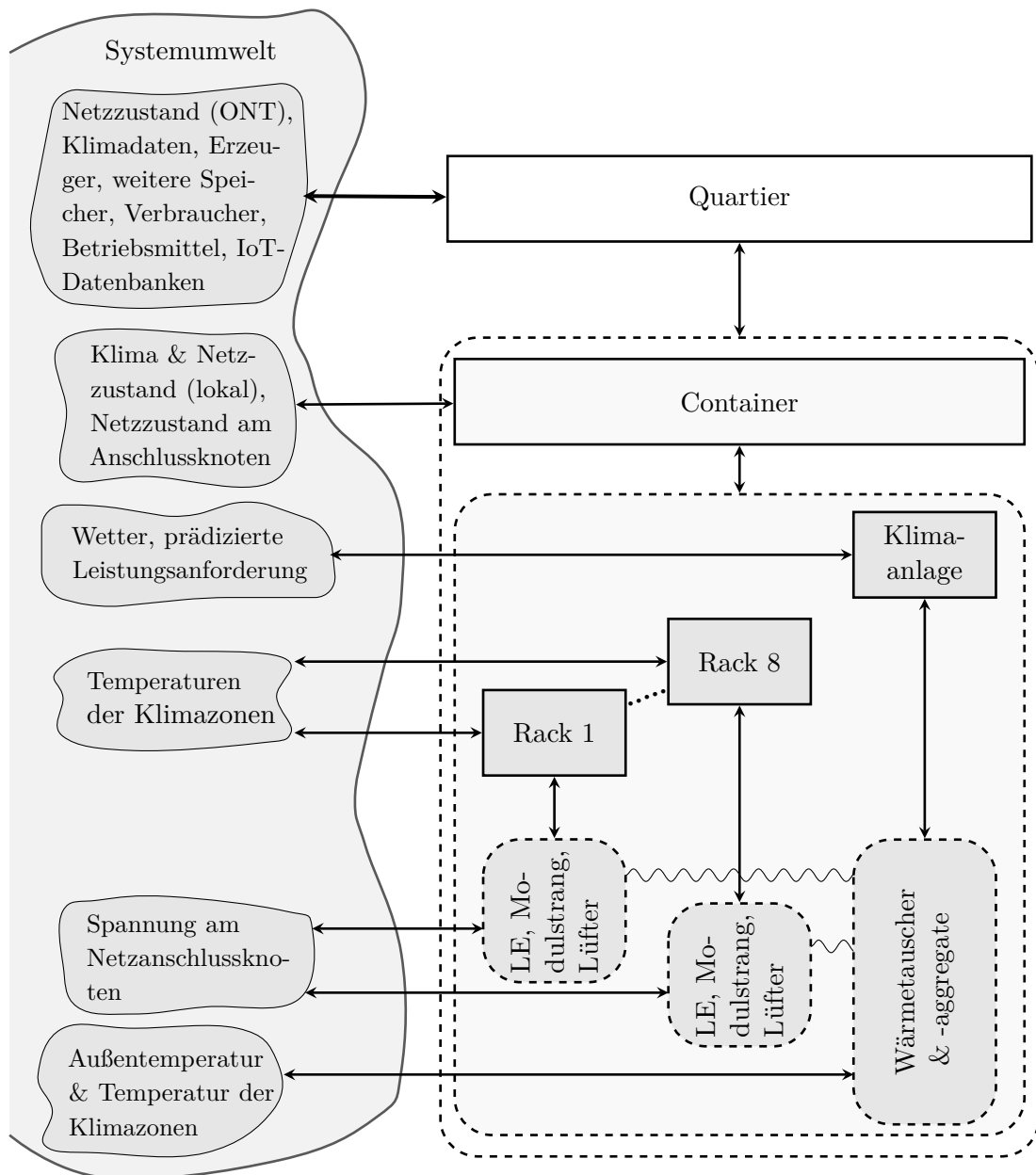
### 6.2.5 Zusammenfassung der Rekursion und Umweltkopplung des kyELM

Nach der Betrachtung der vier identifizierten Rekursionsebenen und der Strukturierung dieser nach dem VSM-Schema wird deutlich, dass eine Anwendung des VSM auch in der

stationären Energiespeicherung sinnvoll und durchführbar ist. Von den Batteriemodulen, dem Ursprung der Energie, bis zur in dieser Arbeit gewählten Quartiergrenze lässt sich ein modulares, rekursives und skalierbares EMS aufbauen. Algorithmen und Strukturen sind wiederverwendbar, da die jeweiligen Rahmenbedingungen der Rekursionsebenen nur eine Anpassung der Wertebereiche erfordern. Diese Algorithmen werden noch im Detail betrachtet. Im Sinne der Komplexitätsbetrachtung hat sich durch die gezielte Wahl von Systemgrenzen und der Einführung der Rekursionsebenen gezeigt, dass hierdurch die Zahl der auftretenden Zustände überschaubar und beherrschbar bleibt. Zum anderen ist die in der Kybernetik entscheidende Feedback-Struktur durch die physikalische Verbindung über die Versorgungsleitungen gegeben. Im Sinne der Lebensfähigkeit kann nach BEER gesagt werden, dass das Energiesystem lebensfähig ist, solange es als VSM aufgebaut ist. Dies konnte für jede Rekursionsebene gezeigt werden. Die Lebensfähigkeit für diesen Anwendungsfall ist deshalb wie folgt definiert. Das kyELM ist lebensfähig, solange das überwachte Ortsnetzquartier seine Spannungs- und Frequenzgrößen einhalten kann und es im Fehlerfall in der Lage ist, den Betrieb solange wie möglich aufrecht zu erhalten, ohne dass sich der Fehler auf höhere Netzebenen ausbreitet.

Für die Umweltkopplung gilt, dass sie es dem System erlaubt, Vorhersagen für zukünftige Management-Eingriffe zu treffen. Die identifizierten Umweltgrößen und Schnittstellen sind in Abbildung 6.4 noch einmal zusammengefasst. Weiter zeigte sich bei der Betrachtung, dass die oberen Rekursionsebenen in der Regel abstrakte OE durch Steuereingriffe beherrschen. Die Realisierung in Software stellt daher das Mittel zur Implementierung dar. Im Gegensatz dazu sind tiefer angesiedelte Rekursionsebenen eher in Hardware umgesetzt und es wird eine strikte Regelung anstatt Steuerung durchgeführt. Vergleichbar mit der Physiologie ist dies durch die nahe am Rückenmark angesiedelten Reflexbögen und das Großhirn in Form des Bewusstseins. Letzteres kann sich in Gedanken verlieren, während Reflexe sofort auf ihren Reiz antworten. Weiter ist das TS 2 und die Überlappung in den Rekursionsebenen zu nennen, wenn es sich nicht um die unterste Ebene handelt. Hier zeigt sich, dass die RZ einer Ebene den KK der nächst höheren Rekursionsebene darstellt. Die darin verarbeitete Information wird somit auf zwei unterschiedlichen Meta-Sprachlichen-Ebenen, oder anders formuliert, auf Grundlage einer anderen Datenbasis in der jeweiligen Rekursionsebene ausgewertet. Die OE und die Kommunikationsstruktur muss deshalb so konstruiert sein, dass die Vorgaben des TS 3 und des KK des dazugehörigen TS 2 entsprechend verarbeitet werden können.

Da die genaue Hardwareumsetzung nicht Schwerpunkt dieser Arbeit war, existieren die beschriebenen VSM und EMS-Komponenten nur in der Simulation. Allerdings ist für die vollständige Skalierung und Modularität eine einheitliche Hardware-Schnittstelle zu definieren. Hierbei sollte im Allgemeinen zwischen drei grundlegenden Bereichen – Kommunikation, Sicherheit und Energie – unterschieden werden. Hierbei können die Kommunikations-Schnittstellen für den Informationsaustausch zwischen den EMS-Einheiten über Bussysteme in Ring-, Maschen- oder Sterntopologie verbunden werden. Jede EMS-Komponente besitzt ihre eigenständige ID und empfängt so entsprechende Nachrichten. Im Sinne der Physiologie stellt dies eine Abweichung der Nervensystemstruktur dar. Allerdings ist dies wohl ein Kompromiss der in der Technik durch ihre Möglichkeiten erlaubt ist. Es muss jedoch beachtet werden, dass auch die Controller selbst über die Kapazitäten, wie Speicher und Rechenleistung verfügen müssen, die von der jeweiligen Rekursionsebene benötigt werden. Diese Anforderungen müssen kritisch begutachtet werden, um Kapazitäten weder zu groß noch zu klein zu definieren. Parallel dazu kann auch die Sicherheits-Schnittstelle standardisiert werden. Hier kann die im Energy Neighbor verwendete Pilot-Linie angewendet werden. Redundant ist die eingeführte



**Abb. 6.4** – Die Abbildung zeigt die relevanten und genutzten Daten der Umweltkopplung. Diese werden über entsprechende Sensoren oder Kommunikationswege erfasst und im Energiemanagementsystem verwendet. Dadurch ist dem System eine effiziente Koordination und Regelung des Quartiers und seiner Unterkomponenten möglich.

Watch-Dog-Funktion über das TS 3\* zu sehen. Für die Energie-Schnittstelle ist zum einen die hardwareseitige Anbindung der Komponenten zu prüfen und zum anderen die Meta-Sprache, gerade im Bezug auf etwaige Leistungs-Verteil-Algorithmen. Im Prinzip muss hardwareseitig eine entsprechende Gleich- und Wechselspannungs-Schnittstelle vorhanden sein und im Rahmen der Meta-Sprache muss in «Energie» gesprochen werden. Hierbei sind vor allem Ist-, Soll-, Max-, Min- und etwaige Durchschnitts-Werte von Interesse.

An dieser Stelle sei noch auf eine alternative Betrachtungsweise der Varietät im Sinne des Energiemanagements hingewiesen. Anstatt die Zustände anhand der Reaktion des Speichers zu definieren, könnte ab der Quartier-Ebene eine Betrachtung anhand der zur Verfügung stehenden oder benötigten Energiepakete stattfinden. Durch diese nicht ganz eindeutige Definition ist klar, dass BEER seinem Modell und dem Anwender einen Anpassungsspielraum gestattet. Auch die Fehlerfallbetrachtung ist nicht klar definiert, weil keinem Teilsystem die Verantwortung für die Fehlerbehebung konkret zugewiesen wird. Somit obliegt auch diese Aufgabe dem Entwickler und dem Designer der Betriebsstrategie. Während des Systementwurfs muss er oder sie definieren, wie entsprechende Reaktionsmechanismen und die Reaktion des System auf Fehler auszusehen haben.

Zum Abschluss des kyELM Aufbaus sind in Tabelle 6.2 die einzelnen VSM samt der Teilsysteme beschrieben. Im nächsten Teilkapitel werden die Betriebsstrategien für die einzelnen Rekursionsebenen vorgestellt.

**Tab. 6.2** – Einordnung der Bestandteile des Systems «Niederspannungsquartier» entsprechend der Teilsysteme der einzelnen VSM des Energiemanagements.

| Kybernetische Komponente | Funktions-Pendant im Rack und <b>REMS</b>   |
|--------------------------|---|
| Umwelt                   | Umweltdaten der LE und des BMS (Temperatur- und Netzgrößen) sowie nicht steuerbare Betriebsmittel im Rack (Sensoren)  |
| OE (RVSM)                | Halbleiter und schaltende Elemente der LE sowie Batterie- oder allgemein Speichermodule samt BMS-Aktorik  |
| TS 1 (RVSM)              | Managementsysteme der LE und der verwendeten Speicher, im Falle der Batterie ein BMS  |
| TS 2 (RVSM)              | Koordination der LE und Speicherkomponenten, beim Wegfall des CEMS kann eine Einhaltung der zulässigen Spannungs- und Frequenzbereiche erfolgen   |
| TS 3* (RVSM)             | Zusammenführung von Messdaten an steuerbaren Anlagen im REMS, Messeinrichtungen, Watch-Dog Funktion   |
| TS 3 (RVSM)              | Operatives Management des REMS, Übersetzung und Weitergabe von Sollwerten an die LE, Planung und Durchführung von Messaufträgen des Speichermanagements (BMS) und Übersetzung der erhaltenen Daten der OE |
| TS 4 (RVSM)              | Strategisches Management des REMS, Aufbereitung von Daten aus der Systemumwelt (Containertemperatur, Netzspannung), Abschätzung vom zukünftigen erforderlichen Leistungs- und Energiebedarf des Racks     |

Fortsetzung auf nächster Seite

Tab. 6.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

|                          |  |
|--------------------------|--|
| TS 5 (RVSM)              | Festlegung und Durchsetzung genereller Vorgaben wie Leistungsbeschränkungen, zulässige Abweichung von der Nennspannung, -temperatur und -frequenz der OE, Überprüfung und Angleichung der erhaltenen Betriebsstrategie   |
| Kybernetische Komponente | Funktions-Pendant im Container und <b>CEMS</b>   |
| Umwelt                   | unmittelbare Containerumwelt, nicht steuerbare Betriebsmittel (externe Klimaanlage, Lüfter, Sicherheits-Funktionen)  |
| OE (CVSM)                | Racks mit unterschiedlichen Speichertopologien, aktive Komponenten einer regelbaren Klimaanlage, andere steuer- oder regelbare Komponenten die den Containerbetrieb beeinflussen   |
| TS 1 (CVSM)              | REMS der Racks, Managementsystem der Klimaanlage   |
| TS 2 (CVSM)              | Schnelle Koordination der Racks, Einhaltung der zulässigen Spannungs- und Frequenzbereiche   |
| TS 3* (CVSM)             | Zusammenführung von Messdaten an steuerbaren Anlagen im CEMS, Messeinrichtungen, Watch-Dog Funktion  |
| TS 3 (CVSM)              | Operatives Management des CEMS, Ort der Rack-Auswahl, Bestimmung und Weitergabe von Leistungssollwerten an steuer- und regelbare Anlagen   |
| TS 4 (CVSM)              | Strategisches Management des CEMS, Aufbereitung von Daten aus der Systemumwelt (Wetterdaten über nächsthöhere Instanz, Netzanschluss des Containers und damit Spannung und Frequenz des Quartiers), Abschätzung vom zukünftigen erforderlichen Leistungs- und Energiebedarf, Anforderung aktueller Leistungssollwerte an das TS 3 entsprechend der Betriebsstrategie |
| TS 5 (CVSM)              | Festlegung und Durchsetzung genereller Vorgaben wie Leistungsbeschränkungen, zulässige Abweichung von der Nennspannung und -frequenz, Anpassung und Formulierung der Betriebsstrategie im Container, Wahl der Bewertungskriterien der Rack-Auswahl   |
| Kybernetische Komponente | Funktions-Pendant im Ortsnetz und <b>QEMS</b>  |
| Umwelt                   | nicht steuerbare Betriebsmittel (PV-Anlagen, Lasten, etc.), übergeordnetes Netz  |
| OE (QVSM)                | Speicheranlagen, regelbare PV-Anlagen, regelbare Quartier-Verbraucher oder deren Aktorik   |
| TS 1 (QVSM)              | Managementsysteme der Speicher-, Verbraucheranlagen & fernsteuerbare Regeleinrichtungen der PV-Anlagen   |
| TS 2 (QVSM)              | Schnelle Koordination der steuer- und regelbaren Anlagen, Einhaltung der zulässigen Spannungs- und Frequenzbereiche  |
| TS 3* (QVSM)             | Zusammenführung von Messdaten an steuerbaren Anlagen im QEMS, Messeinrichtungen, Watch-Dog Funktion  |
| TS 3 (QVSM)              | Operatives Management des QEMS, Bestimmung und Weitergabe von Leistungssollwerten an steuer- und regelbare Anlagen   |

Fortsetzung auf nächster Seite



Tab. 6.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

|             |  |
|-------------|--|
| TS 4 (QVSM) | Strategisches Management des QEMS, Aufbereitung von Daten aus der Systemumwelt (Wettervorhersagen, Messungen an nicht steuerbaren Anlagen im Netz), Abschätzung vom zukünftigen erforderlichen Leistungs- und Energiebedarf, Anforderung aktueller Leistungssollwerte an das TS 3 entsprechend der Betriebsstrategie |
| TS 5 (QVSM) | Festlegung und Durchsetzung genereller Vorgaben wie Leistungsbeschränkungen, zulässige Abweichung von der Nennspannung und -frequenz, Formulierung der aktuellen Betriebsstrategie im Quartier   |

## 6.3 Ausgestaltung der Betriebsstrategie im kyELM

Nachdem die Struktur, Rekursion und die einzelnen EMS- und VSM-Bestandteile des kyELM im vorhergehenden Teilkapitel erläutert wurden, wird im Folgenden auf die gewählten Betriebsstrategien eingegangen. Wichtig hierbei ist es, die Einhaltung der gesetzlichen Regeln und Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Diese wurden bereits im Abschnitt 2.3.3 behandelt. Wie beim Entwurf und der Strukturierung des kyELM nach den Rekursionsebenen soll hier die Betriebsstrategie im Rack, Container und dem Quartier betrachtet werden.

### 6.3.1 Strategien im Rack

Das Rack als Ursprung der elektrischen Energie hat aufgrund seiner Definition wenig Umwelt- und Umfeldinformation, wenn es keine überlagerte Management-Ebenen besitzt oder diese ausfallen. Lediglich Informationen über die Temperatur in und um das Rack sowie die Spannungs- und Frequenzlage am dreiphasigen Netzanschluss sind bekannt. Das REMS kann also ohne eine definierte Leistungsvorgabe von einem CEMS nur anhand der Größen Temperatur, Spannung und Frequenz agieren. Aus diesem Grund wird die Betriebsstrategie für diesen Fall wie folgt definiert.

Sollte die Kommunikation zum CEMS ausfallen und auch seitens des TS 2 keine koordinierenden Eingriffe mehr vorgegeben werden, hat sich das Rack je nach Ladungszustand den Netzgrößen «Spannung» und «Frequenz» anzupassen. Das heißt, sinkt die Frequenz oder die Spannung unter eine definierte Grenze, wird Energie in das Netz abgegeben oder im umgekehrten Fall bei steigender Frequenz oder Spannung wird Energie aufgenommen. Dieser Zustand wird dem Ladezustand entsprechend gehalten. Dadurch verhält sich das Rack netzdienlich, solange es dazu in der Lage ist und seine Temperaturbereichsgrenzen oder vorgeschriebene Strom- und Spannungsbereiche nicht verlässt. Dieses Vorgehen entspricht der Nutzung der physikalischen Kommunikation, wie sie GIOVANAZZI im Fahrzeug in [91] oder SCHÄFER in der Energieversorgung in [182] vorschlagen.

Für den normalen Betriebsfall mit einem überlagertem CEMS hat das REMS den geforderten Leistungsbedarf zu erbringen. Hierzu berechnet es aufgrund der Informationen des BMS und des LE-Managements, welche Reserven es besitzt. Das BMS und das LE-Management können aufgrund der Spannungs- und Stromgrenzen der Module und Leistungshalbleiter

die zur Verfügung stehende Energie begrenzen. Nur bei definierten Messzyklen oder SoH-Bestimmungen kann das BMS begrenzende Betriebsweisen vorgeben. Dieser Betriebszustand muss zuvor aber dem CEMS kommuniziert werden, sodass dieses in der Lage ist, entsprechende Reserven einzuplanen.

Diese vorgestellte Strategie gilt allerdings nur für die gewählte Topologie eines B6-Umrichters und eines Batteriestranges mit 13 seriell verschalteten Modulen. Sollte eine andere Umrichtertopologie verwendet werden, wie zum Beispiel der genannte Multilevel-Umrichter-Ansatz, so muss die Strategie überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Details und erste Regelansätze werden in [V.5] vorgestellt.

### 6.3.2 Betriebsstrategien im Container – Verteil-Algorithmen

Die Strategie im Container muss so ausgelegt sein, dass sie der Leistungsvorgabe des QEMS folgen kann. Aufgrund der modular aufgebauten Struktur des Containers mit mehreren Speicher-Racks existieren aus mathematischer Sicht mehrere mögliche Speicher-Rack-Kombinationen. Deswegen wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Verteil-Ansätze und -Algorithmen erörtert, implementiert und per Simulation verglichen. Hierzu sind vor allem die Arbeiten [SA.2, SA.3, SA.11, SA.18, SA.28] zu nennen, die einen wesentlichen Beitrag zum final vorgestellten Konzept geleistet haben. In diesem Abschnitt wird zunächst die Herleitung und die Methode der Verteil-Algorithmen der sogenannten Rack-Auswahl, vorgestellt. Simulationsergebnisse werden im Abschnitt 7.2.2 gezeigt und diskutiert.

#### Ablauf und Bewertungskriterien

Generell ist das Vorgehen wie folgt geregelt. Die REMS teilen dem CEMS Informationen über ihren eigenen Zustand und ihr Leistungsvermögen mit. Aufgrund dieser Informationen entscheidet das CEMS, welche Rack-Kombination die geeignete Wahl ist. Hierzu wird zuerst in einem Sicherheitscheck überprüft, welche Racks Sicherheitsgrenzen, wie Modulspannung und -temperatur, vorgegeben durch das BMS, überschreiten oder einhalten. Zur weiteren Einschränkung der Möglichkeiten erfolgt eine Vorauswahl anhand im Vorfeld definierter Kriterien, wie zum Beispiel der Lebensdauer der Batteriezellen oder Kostenfunktionen. Die daraus erhaltene Vorauswahl an Racks wird dem Verteil-Algorithmus übergeben. Im Sicherheitscheck und der Vorauswahl dienen folgende typisch zu betrachtende Akkumulatorkennzahlen [116, 211] der Rack-Charakterisierung:

#### SoC – State of Charge:

Mit dem Ladezustand SoC des Akkumulators wird die Flexibilität des Racks charakterisiert. Hohe Ladezustände erlauben mehr Energieabgabe aber weniger Energieaufnahme und umgekehrt. Weiter kann durch den SoC die zeitliche Größe des Racks ermittelt werden. Das heißt in Kombination mit der Leistungsab- oder -aufnahme, wie lange das Rack wie stark belastet werden kann.

#### Maximalleistung:

Die Maximalleistung  $P_{\max}$  eines Racks ist definiert durch die Leistung, die ein Rack in einem bestimmten Zeitraum erbringen kann. Die Belastung des Racks – auch C-Rate genannt – wird in Form einer Kennzahl ausgedrückt. Für die Algorithmen kann also festgehalten werden, dass Racks mit einer höheren Maximalleistung bevorzugt werden

und im Sinne der Lebensdauer eine niedrige C-Rate, für einen schonenden Betrieb, einzuhalten ist.

#### **Temperatur:**

Die Temperatur  $\vartheta$  beeinflusst sowohl die Lebensdauer als auch die Höhe des einstellbaren Stromes der Akkumulatoren und der Leistungselektronik. Aus diesem Grund ist die Temperatur eine wichtige Größe zur Bewertung, ob ein Rack eingesetzt werden kann oder nicht. Racks im optimalen Temperaturbereich sind deshalb besser qualifiziert als Racks, die sich an der Grenze oder schon außerhalb des definierten Bereiches – im sogenannten Derating – befinden. Generell gilt, eine zu hohe Temperatur kann die Lebensdauer von Akkumulatoren und Halbleiterbauelementen der Umrichter verkürzen.

#### **Zyklenzahl:**

Die Zyklenzahl ist ein Indikator für die Lebensdauer der Akkumulatoren. Eine höhere Anzahl an Zyklen bedeutet am Ende eine sinkende Kapazität und damit eine geringere Einsatzfähigkeit des Speichers oder Racks. Racks mit einer geringen Zyklenzahl werden deshalb bevorzugt gewählt.

#### **Ein-/Aus-Zustand:**

Mit dem Ein-/Aus-Zustand ist die Größe des Racks definiert, die die Anzahl der Schaltvorgänge von den mechanischen Leistungsschaltern beinhaltet. Weniger Schaltvorgänge bedeuten am Ende weniger Wartungsaufwand und eine höhere Lebensdauer der Komponenten. Dies bedeutet, dass in der Vorauswahl eingeschaltene den noch ausgeschaltene Racks vorgezogen werden.

Mit diesen fünf Größen erfolgt die Bewertung eines Racks, die im Nachgang in den Verteil-Algorithmus entscheidend ist. Diese kann je nach Algorithmus zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden. Der eine ist eine Bewertung in der Vorauswahl, bevor die Leistung auf die einzelnen Racks verteilt wird. Der andere tritt beim «Enumeration»-Algorithmus auf. Hier wird erst die Energie verteilt und das Ergebnis danach bewertet. Die einzelnen Algorithmen werden nun genauer erläutert.

### **Vorstellung der Verteil-Algorithmus**

Im Folgenden wird die Implementierung der einzelnen Algorithmen näher beschrieben. Tabelle 6.3 zeigt eine Übersicht der implementierten Algorithmen. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der Sicherheitscheck bei jedem Algorithmus verwendet wird. Durch die Einhaltung der vorgegebenen Temperatur-, Spannungsgrenzen und anderer sicherheitsrelevanter Kriterien wird gewährleistet, dass der Container weder sich selbst noch andere gefährdet.

In Abbildung 6.5 ist das allgemeine Schema dargestellt, in dem die Verteil-Algorithmus eingesetzt werden können. Nur der Enumeration-Ansatz hat einen abgewandelten Verlauf und wird im entsprechenden Abschnitt vorgestellt.

**Tab. 6.3** – Die Tabelle zeigt die implementierten Varianten der Verteil-Algorithmen inklusive ihrer jeweiligen Konfigurationen und Bewertungen. Der Implementierungsaufwand steht für die Zeit oder die Komplexität der Theorie, die hinter dem Algorithmus steckt. Die Determiniertheit definiert, ob sekundlich eine neue Rack-Verteilung bestimmt werden kann, als Hardwarekonfiguration wird hierzu ein handelsüblicher Desktop-PC angenommen. Die Performance gibt an, wie hoch die Rechenleistung sein muss, um eine adäquate Rack-Verteilung bestimmen zu können.

| Verteil-Algorithmus  | Sicherheitscheck | Vorauswahl | Bewertung | Determiniertheit | Implementierungsaufwand | nötige Performance |
|----------------------|------------------|------------|-----------|------------------|-------------------------|--------------------|
| Full Load (FL)       | ja               | ja         | ja        | ja               | niedrig                 | niedrig            |
| SoC-Balance (SB)     | ja               | nein       | ja        | ja               | niedrig                 | niedrig            |
| Simple Division (SD) | ja               | ja         | ja        | ja               | niedrig                 | niedrig            |
| Optimization (OP)    | ja               | ja         | ja        | ja               | niedrig                 | mittel             |
| Game Theory (GT)     | ja               | ja         | ja        | ja               | niedrig –<br>mittel     | niedrig            |
| Division PLUS (DP)   | ja               | ja         | nein      | ja               | niedrig –<br>mittel     | niedrig            |
| Enumeration (EN)     | ja               | nein       | ja        | nein             | mittel –<br>hoch        | hoch               |

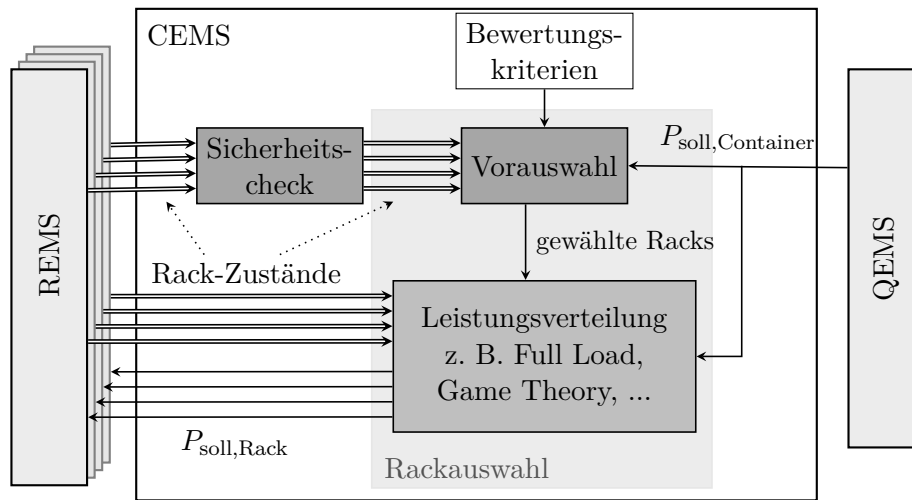
**Verteil-Algorithmus: Full Load** In dieser Variante wird die geforderte Leistung sequentiell verteilt. Wird zum Beispiel eine Leistung von 90 kW gefordert und der Speicher-Container ist vollständig geladen, dann werden bei einer Rackgröße von 25 kW drei Racks vollständig mit 25 kW und eines mit 15 kW belastet. Die Reihenfolge der Racks ist geordnet nach ihrer Bewertung, und es werden vornehmlich bereits aktive Racks verwendet. Dies ist mathematisch durch den Modulo-Operator in Gleichung (6.9) dargestellt:

$$P_{\text{Ziel, Rack}_i} = P_{\text{Anforderung}} \pmod{(P_{\text{max, Rack}_i})} \quad (6.9)$$

Hierbei repräsentiert  $P_{\text{max, Rack}_i}$  die Maximalleistung des  $i$ -ten Racks. In dieser einfach zu implementierenden Variante, deren Berechnung unter einer Sekunde durchgeführt werden kann, wird die Vorauswahl benutzt, um die aktiv laufenden Racks zu priorisieren.

**Verteil-Algorithmus: SoC-Balance** Bei diesem Algorithmus wird eine direkte Bewertung der Racks anhand des SoC unternommen. Das heißt, wird der Container geladen, werden die Racks mit dem niedrigsten SoC als erstes geladen. Beim Entladen wird die Reihenfolge umgekehrt. Racks mit hohem SoC werden als erstes benutzt. Als Leistung wird immer die maximal mögliche Leistung beaufschlagt. Im Prinzip ähnelt dieser Algorithmus dem «Full Load»-Ansatz. Allerdings erfolgt die Priorisierung der Racks ausschließlich durch die SoC-Charakterisierung.

**Verteil-Algorithmus: Simple Division** Dieser Verteil-Algorithmus ähnelt einer proportionalen Verteilung. Das bedeutet, dass die geforderte Leistung durch die Anzahl  $n_{\text{Racks, aktiv}}$ , benutzbar aktiver Racks geteilt wird. Als Beispiel für einen voll geladenen Speicher wird eine Wirkleistung von 90 kW gefordert und es seien vier Racks aktiv. Damit werden alle vier Racks mit einer



**Abb. 6.5** – Schema der Verteil-Algorithmen. In der Leistungs-Verteilung könnten die folgenden Algorithmen eingesetzt werden: «Full Load», «Simple Division», «Optimization», «Game Theory (Pacioli)» und «Division PLUS». Letzterer hat aber nur die Leistung des Racks als Bewertungskriterium. Alle anderen variieren ihre Bewertung je nach Betriebsstrategie.

Leistung von 22,5 kW belastet. Mathematisch kann dies durch Gleichung (6.10) dargestellt werden. Auch hier repräsentiert  $n_{\text{Racks, aktiv, benutzbar}}$  die Anzahl der aktiven Racks:

$$P_{\text{Ziel, Rack}_i} = \frac{P_{\text{Anforderung}}}{n_{\text{Racks, aktiv, benutzbar}}} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n_{\text{Racks, aktiv, benutzbar}} \quad (6.10)$$

Die Nutzung der Vorauswahl erfolgt hier, um die initiale Priorisierung der Racks nach Einsatzmöglichkeit festzulegen. Der Ansatz ist einfach zu implementieren und zeichnet sich durch eine Rechenzeit unter einer Sekunde aus.

**Verteil-Algorithmus: Optimization** Die Leistungs-Verteilung kann auch mit Hilfe von Optimierungsverfahren bestimmt werden. Dazu wird das Verteilungs-Problem in einem Mixed-Integer-nonlinear-Problem – MINLP – [74] formuliert. Diese Formulierung ist in Gleichung (6.13) dargestellt. Hierbei ist  $\mathbf{p}$  der Vektor der einzelnen Leistungen und  $\mathbf{k}$  der Vektor mit den jeweiligen Rack-Bewertungen.

Die beiden Werte bilden die Optimierungsvariablen der Zielfunktion  $f$ . Der Vektor  $\mathbf{p}$  kann beliebig aus der zulässigen Menge  $\mathcal{P}$  gewählt werden, die als Teilmenge des  $\mathbb{R}^n$  durch die Randbedingungen des Problems eingegrenzt wird. Diese Randbedingungen sind durch die Minimal- und Maximalleistungen der einzelnen verwendeten Racks sowie die zu erbringende Gesamtleistung des Containers bestimmt und werden in der Normalform des Problems durch die Ungleichung  $\mathbf{g}(\mathbf{p})$ :

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}) = p_{i,\min} - p_i \leq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (6.11)$$

und der Gleichung  $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ :

$$\mathbf{h}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n p_i - P_{\text{soll}} = \mathbf{1}^T \cdot \mathbf{p} - P_{\text{soll}} = 0 \quad \text{mit } \mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^n \quad (6.12)$$

wie folgt ausgedrückt:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}} f(\mathbf{p}, \mathbf{k}) \quad \text{mit} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{p}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{p}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{p} \in \mathcal{P} \subset \mathbb{R}^n \\ & \mathbf{k} \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (6.13)$$

In der zugehörigen Optimierung wird folgende Kostenfunktion definiert:

$$f(p) = (-1) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \cdot \eta_{\text{LE}}(p_i) \cdot \eta_{\text{Bat.}}(p_i) \cdot p_i \quad (6.14)$$

In dieser repräsentieren  $\eta_{\text{LE}}$  den Wirkungsgrad der verwendeten Leistungselektronik,  $\eta_{\text{Bat.}}$  den Wirkungsgrad des Batterie-Modul-Stranges und  $n$  die Nummer der gewählten verfügbaren Racks. In der implementierten Version werden der SoC und die Temperatur zur Kostenbestimmung und Bewertung der Racks berücksichtigt.

Der Algorithmus ist entsprechend der Gleichungen zu implementieren und erreicht Rechenzeiten unter einer Sekunde. Die Qualität der Ergebnisse hängt von der gewählten Kostenfunktion (6.14) ab und kann durch sie in ihrer Güte verändert werden.

**Verteil-Algorithmus: Game Theory (Pacioli)** Auch die Spieltheorie bietet Ansätze, um das Verteilungs-Problem zu lösen. Gleichung (6.15) zeigt das Konzept nach Pacioli [41]. Der Faktor  $r_{\text{quota}_i}$  stellt den Bewertungsfaktor der Racks dar:

$$P_{\text{Ziel, Rack}_i} = r_{\text{quota}_i} \cdot P_{\text{Ziel, Container}} \quad (6.15)$$

Die Einzelbewertung  $r_{\text{Rack}_i}$  wird durch Produktbildung mit den in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Eigenschaften der Vorauswahl gebildet. Der Faktor  $r_{\text{quota}_i}$  wird daraus mit folgendem Ansatz berechnet:

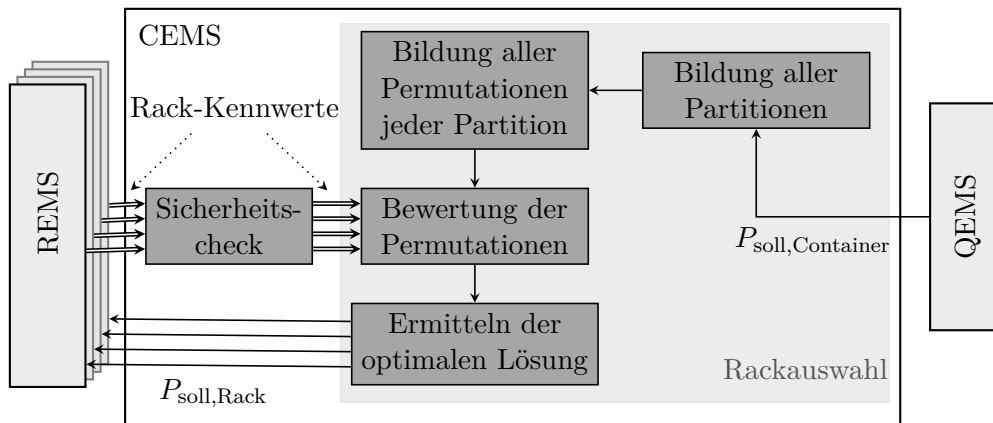
$$r_{\text{quota}_i} = \frac{r_{\text{Rack}_i}}{\sum r_{\text{Rack}_i}} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n_{\text{Racks, aktiv, benutzbar}} \quad (6.16)$$

Wie sich in den Simulationen zeigt, ist der Aufwand und die am Ende erreichte Performance für die Implementierung dieses Ansatzes tragbar. Allerdings hängt die Qualität der Ergebnisse von der Zusammensetzung der Bewertungsfaktoren ab.

**Verteil-Algorithmus: Division PLUS** Entgegen den anderen Ansätzen wird bei diesem nur die verbleibende maximale Leistung eines Racks  $P_{\text{max, Rack}_i}$  in Betracht gezogen. Somit kann der Ansatz der Spieltheorie wie folgt vereinfacht werden:

$$P_{\text{Ziel, Rack}_i} = \frac{P_{\text{max, Rack}_i}}{\sum P_{\text{max, Rack}_i}} \cdot P_{\text{Ziel, Container}} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n_{\text{Racks, aktiv, benutzbar}} \quad (6.17)$$

Durch diese Herangehensweise ist nur der Sicherheitscheck erforderlich und das Rack muss nicht aufwändig durch mehrere Kriterien, sondern nur durch die verbleibende maximale Leistung bewertet werden. Die Implementierung ist einfach und erfordert am Ende eine Rechenleistung unter einer Sekunde.



**Abb. 6.6** – Schema des «Enumeration» Verteil-Algorithmus. Nach Erhalt der Sollleistung werden alle denkbaren Partitionen gebildet, permutiert und schlussendlich nach erfolgreichem Sicherheitscheck des Racks mit den aktuellen Rack-Kennwerten bewertet.

**Verteil-Algorithmus: Enumeration** Ein weiterer Algorithmus, der keine Vorauswahl benutzt ist die «Enumeration». Bei diesem ist das Vorgehen wie folgt, die geforderte Sollleistung wird in Leistungsanteile – zum Beispiel 2 kW – aufgeteilt. Im Anschluss werden alle möglichen Verteilungs-Permutationen dieser Anteile bestimmt. Alle erhaltenen Permutationen werden mit den Kennzahlen der Racks bewertet und die beste Verteilung mit Hilfe eines Bergsteigeralgorithmus [179, S. 122–125] identifiziert.

Nachteil der «Enumeration» ist die hohe Anzahl an möglichen Permutationen, die untersucht werden müssen. Zum Beispiel müssen für eine Sollleistung von 90 kW, bei acht vorhandenen Racks – mit jeweils 25 kW – und einer Verteilgröße von 2 kW, 133.784.560 Möglichkeiten bewertet werden, wenn nur das Laden oder Entladen eines Racks erlaubt ist. Diese Anzahl kann mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\frac{(k+n-1)!}{k!(n-1)!} = \binom{k+n-1}{n-1} = \binom{\frac{90 \text{ kW}}{2 \text{ kW}} + 8 - 1}{\frac{90 \text{ kW}}{2 \text{ kW}}} \quad (6.18)$$

Wegen dieser hohen Anzahl an Möglichkeiten ist für diesen Ansatz eine entsprechende Rechenleistung unabdingbar. Alternativ kann die Suche auch abgebrochen werden, falls eine neue Sollleistung gefordert wird. Allerdings ist der Algorithmus dadurch nur mit Einschränkungen deterministisch. Die Grundlage für die Ideen der Enumeration kommen aus dem Bereich der Operation Research [75]. In Abbildung 6.6 ist das Schema des Verteil-Algorithmus Enumeration dargestellt.

### Vor- und Nachteile von Bewertungsfaktoren in den Verteil-Algorithmen

Bevor im Folgenden genauer auf den Vergleich und die Simulationsergebnisse der eben vorgestellten Algorithmen eingegangen wird, soll auf die generellen Vor- und Nachteile der Bewertung mit Hilfe eines Bewertungsfaktors eingegangen werden. Vier der sieben vorgestellten Algorithmen verwenden Bewertungsfaktoren, die verschiedene Eigenschaften in einer Kennzahl zusammenführen:

Vorteile der Kennzahlenbildung und Informationsverdichtung:

- erlaubt Verwendung standardisierter & einfach zu implementierender Sortieralgorithmen
- komprimierte Daten benötigen weniger Datenrate auf den Kommunikationswegen zwischen den EMS-Einheiten
- Änderungen im Bewertungsprozess wirken sich nicht auf die Verteil-Algorithmen aus

Nachteile der Kennzahlenbildung und Informationsverdichtung

- die Kennzahlenbildung hängt von den betrachteten Eigenschaften und weiter definierten Kriterien ab
- durch die Reduzierung auf eine Kennzahl gehen detaillierte Informationen der einzelnen Eigenschaften verloren
- kein Rückschluss auf Systemzustände durch die Analyse des Bewertungsfaktors möglich

### 6.3.3 Strategien im Quartier

Dank des VSM und der kybernetischen Prinzipien ist es möglich, aufgrund der Rekursion die Algorithmen aus dem CVSM in das QVSM zu portieren. Im Gegensatz zum CEMS ist das QEMS für die Stabilität des gesamten Niederspannungsnetzquartiers, für die Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen und für die Bereitstellung der geforderten Netzaustauschleistung zu der höheren Netzebene verantwortlich. Meist ergeben sich Spannungs- und Frequenzschwankungen in einem Niederspannungsnetz im Normalbetrieb in der Regel durch ein Ungleichgewicht zwischen der im Netz nachgefragten und der im Netz durch entsprechende Erzeugungsanlagen selbst bereitgestellten Wirk- und Blindleistung.

Dieses Ungleichgewicht muss durch das QEMS, durch entsprechende Kompensationsmechanismen, wie das Abregeln von Erzeugungsanlagen oder den Einsatz von Speicheranlagen, ausgeglichen werden. Durch den Ausgleichsvorgang dieser sogenannten Residuallast können die Netzspannung und -frequenz in ihren vorgeschriebenen Betriebsbändern gehalten werden.

Um die Methoden für das gewählte Vorgehen zu testen, wird aus Gründen der Realisierbarkeit die Simulation gewählt. Eine Umsetzung unter realen Bedingungen erfordert entsprechende Rahmenbedingungen unter Einbezug vieler Instanzen (Netzbetreiber, Hausbesitzer, etc.). Aus diesem Grund wurde ein vereinfachtes Netzmodell in [SA.18] mit aufgebaut und die im Folgenden vorgestellte und auf das VSM angepasste Methode erarbeitet. Ergebnisse der Simulationen werden im Abschnitt 7.1 gezeigt.

Wie im Abschnitt 6.2.4 beschrieben, sind hier anstelle der Racks, Haushalte, Erzeugungsanlagen und Speicher-Container die zur Verfügung stehenden OE. Bei der Systembetrachtung der Rekursionsebenen wird dazu deutlich, dass der Normalbetrieb durch Energieflüsse charakterisiert ist. Somit kann durch die Kontrolle der Leistungswerte der einzelnen Anlagen Einfluss auf die Energiebilanz im Netzquartier genommen werden. Unterstützt wird diese Kontrolle durch die Gewinnung von Umweltdaten durch eine Umweltkopplung des QVSM. Im Wesentlichen besteht die Umwelt des QEMS aus Nachbarnetzen, für das Netz verantwortliche Institutionen, Personen und, je nach Betrachtungsweise, nicht steuerbaren Komponenten im Netzquartier selbst.



Unter Einbeziehung aller genannten Faktoren und dem Trend hin zu der lokalen Nutzung erneuerbarer Energien ist festzustellen, dass auch im Normalbetrieb aufgrund der Erzeugung und des Verbrauchs gerade im Niederspannungsnetz ein Überschuss an Energie besteht. Dieser Überschuss kann aber nicht immer über den Verknüpfungspunkt ONT an die höhere Netzebene abgegeben werden. Ein Netzausbau, die Abschaltung von Erzeugungsanlagen oder die Integration von Speichern sind Möglichkeiten, um die lokal erzeugte Energie vollständig vor Ort zu nutzen und vorhandene Leistungsgrenzen der Betriebsmittel, wie Leitungen oder des ONT, nicht zu überschreiten.

Aus diesen Randbedingungen lassen sich Flexibilitätsoptionen und Betriebsziele für die Betriebsstrategie des QEMS definieren. Die Optionen stellen Maßnahmen dar, durch die das Netz gezielt Energie an die höhere Netzebene abgibt oder die Energie im Quartier selbst entsprechend wandelt. Im Falle von Moosham mit einer sehr hohen PV-Durchdringung, einem Speicher-Container und einem fest definierten ONT kristallisieren sich folgende Optionen heraus, wenn das oberste Ziel die Erhöhung des Eigenverbrauches sein soll.

#### **(Ab)Regelung der PV-Anlagen:**

Wie im Abschnitt 2.3.3 bereits beschrieben, müssen PV-Anlagen bestimmten Abschaltkriterien des Netzbetreibers folgen. Innerhalb dieses Rahmens kann das QEMS agieren und die schon vorhandenen Messeinrichtungen nutzen. Hierbei wird die Leistung der PV-Anlage mit vorhandenen Speicherkapazitäten koordiniert. Je nach Speichergröße wird es im Sommer zu einer Reduzierung der Leistung kommen, weil entweder der Transformator oder Leitungen ihre Belastungsgrenze erreichen. Um die Gesamteffizienz des Quartiers zu erhöhen, sollte bei PV-Anlagen auf privaten Hausdächern der Eigenverbrauch durch ein gezieltes Management koordiniert und die Energie gleich lokal im Haushalt verwendet werden.

Für die restliche Energie ergibt sich im Sinne des EMS zum Zeitpunkt  $t$  durch eine fernsteuerbare PV-Anlage  $pv$  die zum Leistungsausgleich zur Verfügung stehende Wirkleistung  $P_{PV,pv}(t)$  der Anlage. In einem Netz mit  $m$  Anlagen ergibt sich ein Gesamtpotential von:

$$P_{PV, \text{neg}}(t) = \sum_{pv} P_{PV,pv}(t) \quad \text{mit } pv \in [1, \dots, m] \quad (6.19)$$

Für die Blindleistungsregelung der PV-Anlagen ist entsprechend [12] einer vom Netzbetreiber vorgegebenen wirkleistungsabhängigen Kennlinie zu folgen.

#### **Gezielte SoC-Regelung des Speicher-Containers:**

Ein vorhandener Pufferspeicher ermöglicht dem EMS, einen Energieüberschuss lokal zwischenzuspeichern und im Falle der PV-Anlage in den Nachtstunden wieder einzusetzen. Aus diesem Grund sollte es das Ziel sein, den SoC des Speichers flexibel im mittleren Bereich zu halten, damit je nach Netzsituation sowohl Energie aufgenommen als auch abgegeben werden kann. Bis zu den Abendstunden muss der Speicher geladen sein, um die Nachtstunden überbrücken zu können. Sollte im Quartier eine Vorhersage von zu erwartenden Last- und Erzeugungswerten im Netz bekannt oder entsprechende Algorithmen implementiert sein, so kann ein idealer Nacht- und Tag-SoC bestimmt werden.

Mathematisch ist diese Bedingung wie folgt definierbar. Das Potential zum Leistungsausgleich eines Speichers  $s$  zum Zeitpunkt  $t$  entspricht der aktuell verfügbaren Lade-

beziehungsweise Entladeleistung  $P_{\text{Speicher},s,(e)\text{lad}}(t)$ . Sind im gesamten Netz  $n$  Speicher verbaut, ergibt sich das zur Verfügung stehende Potential entsprechend der Gleichung (6.20) für die Leistungsaufnahme (Index: lad) und -abgabe (Index: elad). Für die Blindleistung erfolgt die Berechnung äquivalent.

$$P_{\text{Speicher},(e)\text{lad}}(t) = \sum_s P_{\text{Speicher},s,(e)\text{lad}}(t) \quad \text{mit } s \in [1, \dots, n] \quad (6.20)$$

### **Nutzung der höheren Netzebene über ONT:**

Durch die Anbindung an eine höhere Netzebene ist es dem QEMS möglich, dieses als «Speicher» mit gewissen Einschränkungen zu sehen. Hierbei ergeben sich, je nachdem wie viel Energie die höhere Netzebene bereit ist aufzunehmen oder abgeben kann, Leistungsgrenzen, die vom QEMS in die Leistungsverteilung einfließen müssen. Außerdem kann im Falle eines regelbaren ONT die Nutzung der Stufenschalter durch das QEMS erfolgen.

Ist als Betriebsziel beispielsweise festgelegt, den Eigenverbrauch des Quartiers zu maximieren, so muss versucht werden, nur Energie an die höhere Netzebene abzugeben, wenn diese es auch explizit fordert. Im anderen Fall kann bei einem kritischen Zustand im Quartier Energie von der höheren Netzebene bezogen werden. Wie genau die Grenzen festgelegt werden können, wird in den folgenden Betriebszielen erläutert.

Somit ergeben sich neben diesen drei vorgestellten Flexibilitätsoptionen mehrere Betriebsziele, die in der Betriebsstrategie im TS 5 verankert werden. Einige dieser Ziele sind aufgrund der gesetzlichen Vorgaben immer einzuhalten. Andere können aufgrund von Prioritätenlisten auch in der Reihenfolge variieren. Im Weiteren werden die für das kyELM geltenden Betriebsziele für den Fall Moosham wie folgt definiert:

Die immer einzuhaltenden Betriebsziele sind:

- Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes
- Einhaltung des zulässigen Frequenzbandes
- Belastungsfähigkeit von technischen Betriebsmitteln: Leitung und ONT

Und die nach Priorität sortierbaren Ziele lauten wie folgt:

- Entlastung von Netzbetriebsmitteln und übergeordneten Netzen
- Maximale Einspeisung aus PV-Anlagen
- Vorhaltung von Speicherkapazitäten

**Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes** Wie im Abschnitt 2.3.4 beschrieben, darf die Netzspannung nach der DIN EN 50160 nur in einem bestimmten Spannungsband um die festgelegte Nennspannung des Netzes liegen. Für Moosham liegt dieses Band nach genannter Norm bei  $\pm 10\%$  von der definierten verketteten Nennspannung  $U_{N,RMS} = 400\text{ V}$  und damit zwischen 360 V und 440 V. Im Normalbetrieb abweichende Nennspannungen treten vor allem bei einem Ungleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung auf. Durch die

zusätzliche Erhöhung oder Senkung der von den Netzteilnehmern geforderten oder erbrachten Wirk- und Blindleistung kann das Gleichgewicht durch das QEMS wieder hergestellt werden. Im Falle der Spannungsregelung ist vor allem die Blindleistung zu regeln.

**Einhaltung des zulässigen Frequenzbandes** Wie bei der Spannung gilt es auch bei der Frequenz nach der DIN EN 50160, ein definiertes Band von  $\pm 1\%$  um die Nennfrequenz  $f_N = 50$  Hz während 90 % eines Jahres einzuhalten. Für Moosham ergibt sich dadurch ein zulässiger Bereich zwischen  $f_{N, \min} = 49,5$  Hz und  $f_{N, \max} = 50,5$  Hz. Auch hier kann es im Normalbetrieb zu Abweichungen kommen. Die Ursache dafür liegt in einer Disbalance zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie. Wie beim Spannungsband kann durch die Erhöhung oder Senkung der von den Netzteilnehmern geforderten oder erbrachten Wirk- und Blindleistung die Balance durch das QEMS wieder hergestellt werden. Im Falle der Frequenz ist vor allem die Wirkleistung zu regeln.

**Belastungsfähigkeit von technischen Betriebsmitteln: Leitung und ONT** Wie alle technischen Geräte weisen auch Betriebsmittel in der Netzarchitektur Grenzen in der Belastungsfähigkeit auf. Hier zu nennen sind vor allem die eingesetzten Leitungen und der verwendete ONT. Für den ONT, der als Bindeglied zu der nächsthöheren Spannungs- und Netzebene dient, ist die Nennscheinleistung die einschränkende Größe.

Im Fall Moosham kann das QEMS nur soviel Leistung von der Mittelspannungsebene beziehen oder an sie abgeben, wie der ONT zu leisten vermag. Er stellt den einzigen Verknüpfungspunkt her. Reicht die Nennleistung nicht aus, so muss die Energie im Quartier eingeschränkt, zwischengespeichert oder umverteilt werden. Dies geschieht über das vorhandene Leitungsnetz. Aber auch Leitungen weisen Belastungsgrenzen auf. Im Normalbetrieb sollten diese nicht überschritten werden, weil bei einem Netzaufbau die Leitungen nach ihren Betriebsmittelgrenzen dem Einsatz entsprechend dimensioniert werden. Allerdings kann es beim Ausbau und Hinzufügen von Verbrauchern und Erzeugern zu Engpässen kommen.

Abhilfe können strategisch gut platzierte Speicher bieten, die die Stromstärke in den Leitungen senken können und damit thermische Überlastungen vermeiden. Gerade in einem Strahlennetz wie Moosham ist dies für einzelne Stränge sehr hilfreich. Allerdings ist die Strombelastung einer Leitung eine lokale Größe, weshalb die Überwachung entsprechend verteilte Messeinrichtungen erfordert. Hier kann beispielsweise eine weitere Untergliederung in Rekursionsebenen bei entsprechender Strang- und Netzgröße sinnvoll sein.

**Entlastung des ONT und der höheren Netzebene** Neben den technischen Betriebsgrenzen des ONT kann es sein, dass aus wirtschaftlicher Sicht und aus Gründen der Lebensdauer eine Einschränkung der übertragenen Leistung am ONT sinnvoll ist. Die Alterung eines Transformators ist unter anderem stark von der thermischen Belastung der Wicklungen und somit von der übertragenen Leistung abhängig. Ein Betrieb in Teillast wirkt sich somit Lebensdauer verlängernd aus. Außerdem kann im übertragenen Sinne ein Quartier als «Speicher für die höhere Netzebene» angesehen werden.

Hierbei wird die überlagerte Netzebene durch den Netzbetreiber oder ein überlagertes EMS repräsentiert. Beide Instanzen können eine Einschränkung in der Energieübertragung vorgeben. Mit diesen Rahmenbedingungen muss das QEMS die verbleibende Leistung verteilen.

Umgesetzt werden kann dies mit der Beschränkung der erlaubten Bemessungsscheinleistung  $S_{N, ONT}$ . Hierzu werden die beiden Skalierungsfaktoren  $s_{ONT, lad, red} \in [0; 1]$  für den Leistungsbezug und  $s_{ONT, elad, red} \in [0; 1]$  für die Rückspeisung in die überlagerte Netzebene definiert. Für die jeweils erlaubte Scheinleistung ergibt sich folglich:

$$S_{ONT, (e)lad, red} = s_{ONT, lad, red} \cdot S_{N, ONT} \quad (6.21)$$

An dieser Stelle ist der Betriebsfall «Inselnetz» als Sonderfall für die vollständige Einstellung des Leistungsaustausches zwischen den beiden gekoppelten Netzebenen zu nennen. Hierbei gilt folgender Zusammenhang:

$$S_{Netz, elad, max} = S_{Netz, elad, max} = 0 \quad (6.22)$$

Als entsprechende Maßnahmen zur Einhaltung dieser Grenzen kann das QEMS die verbleibenden Flexibilitätsoptionen, wie regelbare PV-Anlagen und vorhandene Speicher nutzen.

**Maximale Einspeisung aus PV-Anlagen** Auf der einen Seite stellt die Abregelung von steuerbaren PV-Anlagen eine Flexibilitätsoption dar. Sie kann zusätzlich mit einem definierten Grenzwert  $P_{PV, neg, red}$  in die Betriebsziele mit eingebracht und priorisiert werden. Gründe hierfür sind aus wirtschaftlicher Sicht die Verminderung von zu erbringenden Entschädigungszahlungen und einer Rechenschaftspflicht gegenüber den Betreibern der PV-Anlagen bei einer Abregelung der Anlagen zur Reduzierung der ins Netz eingebrachten Energiemenge.

**Vorhaltung von definierten Speicherkapazitäten** Gründe hierfür sind wieder wirtschaftliche Gesichtspunkte, wenn mit dem Speicher an Regelleistungsmärkten gewisse Kapazitäten gehandelt werden wollen und diese auch zeitlich verfügbar sein müssen. Beispielhaft ist hier die Teilnahme am Sekundärregelleistungsmarkt während der Nachtstunden zu nennen. Hierzu muss durch die Betriebsstrategie garantiert werden, dass die Speicherkapazität in der Nacht vorhanden ist und überschüssige Energie aus den überlagerten Netzebenen aufgenommen werden kann.

Die Aufgabe des QEMS besteht darin, die aktuelle Sollleistung der Speicheranlagen zu ermitteln, die zu einer ausreichend schnellen Erreichung des angestrebten SoC führen. Entsprechend der Betriebsstrategie weist das QEMS dieser Leistungsvorgabe eine Priorität zu. In Verbindung mit anderen Betriebszielen sind hierbei auch Synergieeffekte denkbar.

### Sortierung von gewählten Leistungspaketen

Aufgrund der vorgestellten Flexibilitätsoptionen, der Betriebsziele und der Definition von Prioritätenlisten wird nun kurz der Vorgang der Leistungsverteilung im QVSM gezeigt. Wie im CVSM ist das TS 3 des QVSM dafür zuständig. Es generiert aufgrund der aktuellen Informationslage seiner TS 1 und der im Netz vorherrschenden Residuallast die passenden Leistungspakete anhand der von den TS 4 und TS 5 definierten Betriebsstrategie und der vorhandenen Prioritätszuordnung. Um die folgenden Ausführungen leicht verständlich zu halten, wird nur die umgesetzte Wirkleistung berücksichtigt. Die beschriebenen Prinzipien und Prozesse sind aber analog auf einen Systembetrieb unter Beachtung auftretender Blindleistungen anwendbar.

Generell gilt bei der Leistungsverteilung die Energieerhaltung im Quartier, das heißt die Summe der zugeführten und abgenommenen Leistungen muss sich ausgleichen. Hierbei wird die dem System entnommene Leistung mit einem negativen Vorzeichen behaftet. Somit bedeutet dies für das Ortsnetz und das QEMS, dass die erzeugte PV-Leistung, die aus dem Speicher entnommene und die durch Leistungsbezug aus der höheren Netzebene zugeführte Wirkleistung in Summe der Leistung entsprechen muss, die dem Netz durch Lasten, im Ladebetrieb befindliche Speicher und Rückspeisung in die höhere Netzebene entnommen wird:

$$\sum P_{PV} + \sum P_{\text{Speicher, elad}} + P_{\text{ONT, lad}} = \sum P_{\text{Lasten}} + \sum P_{\text{Speicher, lad}} + P_{\text{ONT, elad}} \quad (6.23)$$

Anzumerken ist, dass sich Gleichung (6.23) im praktischen Betrieb vereinfacht, weil einerseits zu einem definierten Zeitpunkt der ONT nur Leistung bezieht oder in die höhere Netzebene speist. Andererseits wird aus Effizienzgründen ein Umladen zwischen verschiedenen im Quartier vorhandenen Speichern nicht praktiziert. Somit entfallen die entsprechenden Summanden in der Bilanz.

Mit dieser Bilanz ist das TS 3 in der Lage, den steuer- und regelbaren Komponenten entsprechende Leistungspakete zuzuweisen. Hierzu bestimmt es die im Netz auftretende Residuallast  $P_{\text{RI}}$ , die Differenz zwischen aktuell aus dem Netz entnommener und im Netz erzeugter Leistung und wählt entsprechende Flexibilitätsoptionen oder Betriebsziele je nach vorgegebener Betriebsstrategie aus. Daraus ergibt sich folgende Gleichung für die Residuallast:

$$P_{\text{RI}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{Lasten}} - P_{\text{Verluste}} \quad (6.24)$$

Hierin repräsentiert  $P_{\text{Lasten}}$ , die aktuelle Netzlast durch angeschlossene Haushalte und Betriebe, und  $P_{\text{PV}}$  die im Netz erzeugte Leistung der steuerbaren und per Leistungsbegrenzung (beispielsweise 70 % der installierten Spitzenleistung) vorhandenen PV-Anlagen. Ein Ausgleich der Residuallast kann einerseits zwischen dem Quartier und der höheren Netzebene über den ONT erfolgen oder es werden die erwähnten Flexibilitätsoptionen durch das QEMS im Quartier genutzt. Hierbei ist ein Lastausgleich durch die PV-Abregelung natürlich nur bei einer negativen Residuallast sinnvoll. Für etwaige Verluste, die im Quartier auftreten, zum Beispiel über Leitungen oder andere Betriebsmittel, wird in der Modellierung der Faktor  $P_{\text{Verluste}}$  definiert. Die Verluste müssen durch entsprechende Messungen oder Abschätzungen bestimmt werden.

Für die Umsetzung im TS 3 wird die an den Komponenten zur Verfügung stehende Leistung in Pakete sortiert und mit einer von der Betriebsstrategie abhängigen Priorität versehen. Hierbei ist eine Durchmischung von Komponenten bei der Paketerstellung denkbar. Ein Beispiel stellt der ONT dar. Die Leistung des ONT kann wie beschrieben auf verschiedene Art und Weise eingegrenzt werden und bietet so folgende Potentiale für die Paketerstellung:

- Technische Grenze  $P_{\text{ONT, max}}$  abhängig von der Bemessungsscheinleistung  $S_{\text{N, ONT}}$
- Definierbare reduzierte maximale Transformatorlast  $P_{\text{ONT, red}}$
- Vom übergeordneten Netz gesetzte Grenze  $P_{\text{Netz, (e)lad}}$  je nach Bezugsrichtung

Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass die technische Grenze  $P_{\text{ONT, max}}$  immer die niedrigste Prioritätsstufe erhält und folglich nicht bevorzugt eingesetzt wird. Der Grund hierfür

ist die Art der Grenze, diese stellt eine absolute Grenze dar, das heißt aus Sicherheitsgründen darf sie auf keinen Fall überschritten werden. Es muss stets gelten:

$$P_{\text{Netz, (e)lad}} \leq P_{\text{ONT,max}} \quad (6.25)$$

In Abbildung 6.7 ist eine exemplarische Ermittlung der aus diesen Grenzwerten möglichen Pakete dargestellt. Hierbei wird eine negative Residuallast angenommen. In diesem Fall ist die an das übergeordnete Netz abführbare Leistung  $P_{\text{Netz, elad}}$  relevant. In den Schritten 1 und 2 werden die relevanten Pakete erfasst und nach ihrer Priorität sortiert. Im Beispiel erhalten die beiden, nicht aus technischen, sondern aus strategischen Gründen entstandenen Potentiale  $P_{\text{ONT, elad, red}}$  und  $P_{\text{Netz, elad}}$ , höhere Priorität. Aus Modellierungsgründen ist dies so definiert, weil durch die Nutzung eines bestimmten Potentials alle Grenzen, die höher priorisierten Potentialen zugrunde liegen, verletzt werden.

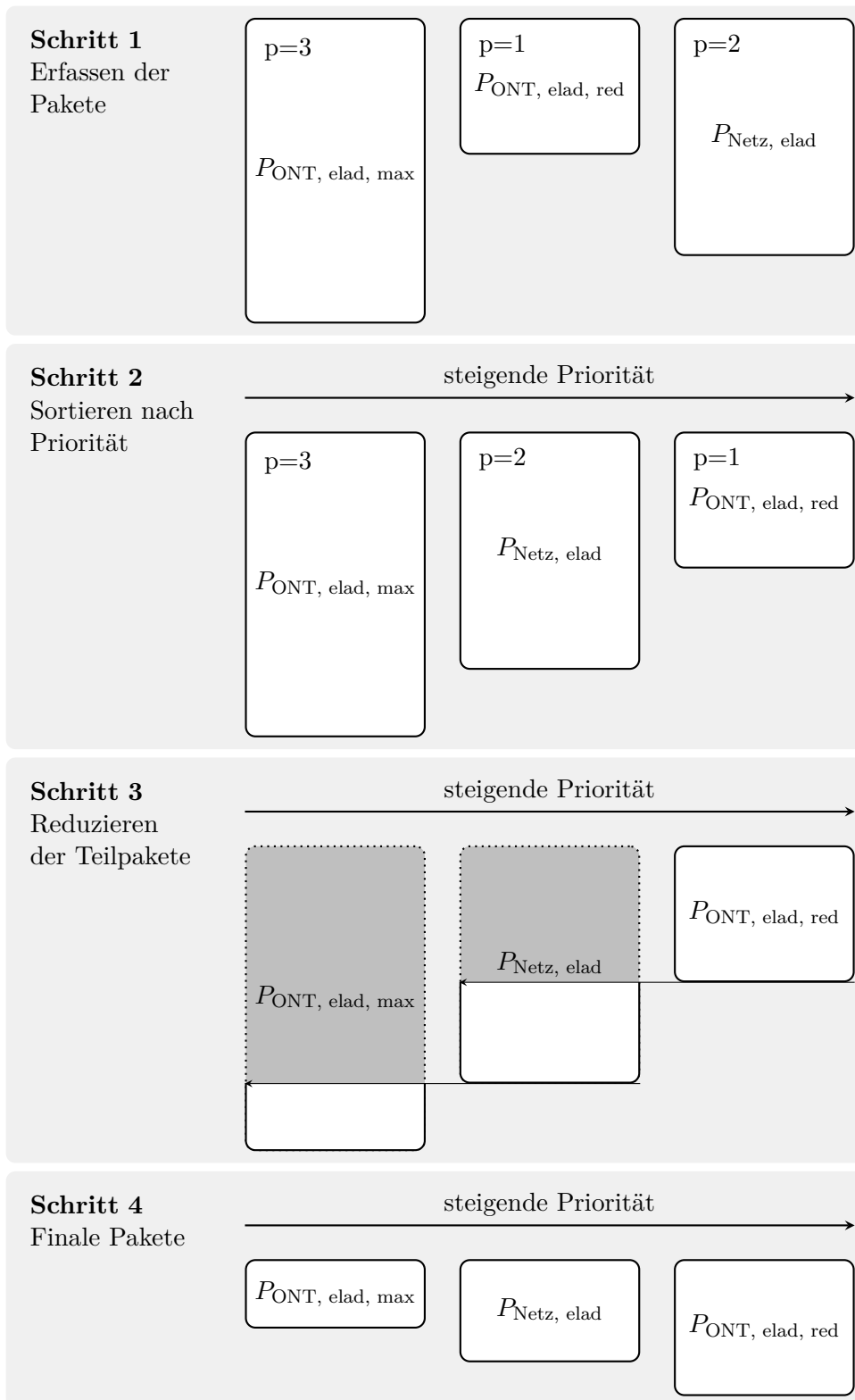
Im Schritt 3 wird die erforderliche Paketgröße gebildet, indem die Summe aller höher priorisierten Potentiale abgezogen wird. Die finalen Pakete werden schließlich im Schritt 4 vom TS 3 unter Beachtung der Reihenfolge verteilt. Bei der Gegenüberstellung der Größenverhältnisse aus dem betrachteten Beispiel muss im weiteren Verlauf der Leistungsverteilung für die Prioritäten  $\mathbf{p}$  der in Gleichung (6.26) dargestellte Zusammenhang gelten.

$$\mathbf{p}_{P_{\text{ONT, max}}} < \mathbf{p}_{P_{\text{Netz, elad}}} < \mathbf{p}_{P_{\text{ONT, red}}} \quad (6.26)$$

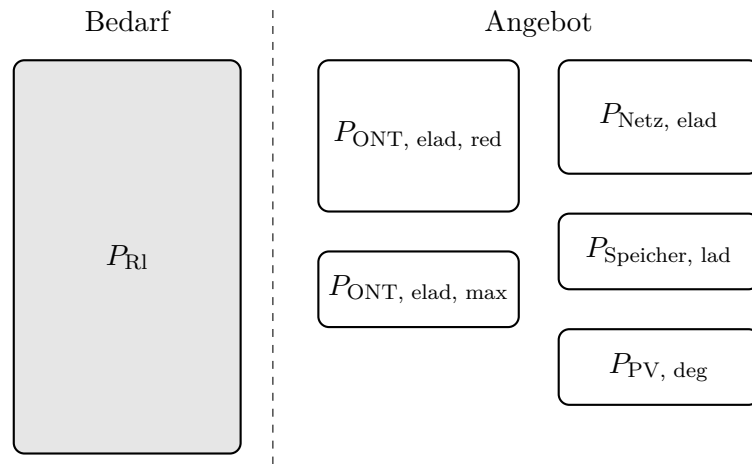
Ähnlich wie der Transformator kann der Energieinhalt des Speichers durch virtuelle Kann-, Momentan- und Vollastwerte für die Betriebsstrategie untergliedert werden. Die Potentiale aus verschiedenen Komponenten in einem Paket zu kombinieren, stellt eine gleichberechtigte Behandlung je nach Betriebsziel und -strategie dar.

Nach der Identifizierung aller Pakete durch das TS 3 muss dieses den Bedarf mit dem Angebot vergleichen und entsprechend der Prioritäten die zu verwendenden Pakete finden. Diese Pakete werden dann auf die Komponenten verteilt und ein entsprechender Leistungswert eingestellt. Kommt es zu dem Fall, dass die Residuallast betragsmäßig größer ist als die Summe der vorhandenen Leistungspakete auf der Angebotsseite, so ist bei negativer Residuallast eine Überlastreaktion und umgekehrt bei einer positiven Residuallast ein Versorgungsengpass im Quartier zu erwarten. Letzteres bedeutet, dass die Lasten unzureichend mit Energie versorgt werden. In der Praxis sollten die geschilderten Situationen aufgrund des im Vorfeld geplanten und berechneten Netzaufbaus nicht auftreten. In den Abbildungen 6.8 und 6.9 wird der Sortierungsprozess dargestellt.

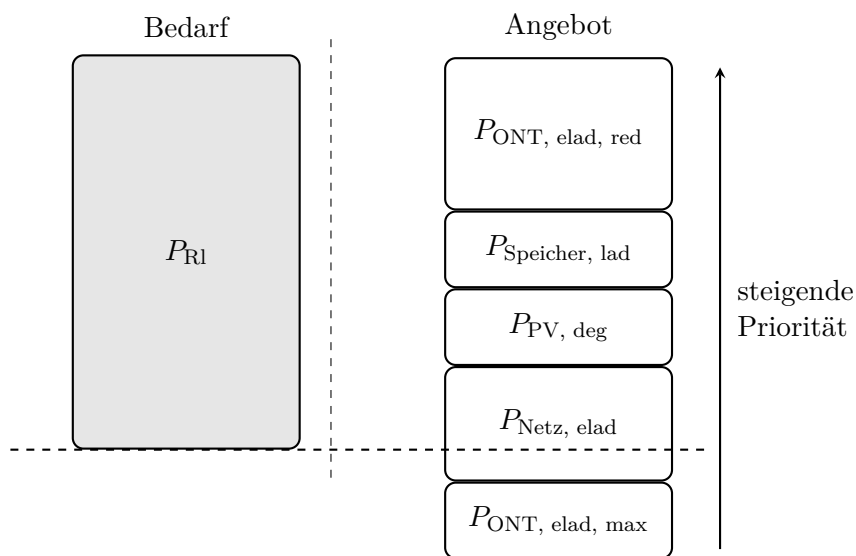
Hierbei ist allerdings zu beachten, dass dieses Vorgehen virtuelle und tatsächliche Leistungspakete erstellt. Das heißt für die steuerbaren Komponenten, wie Speicheranlagen und je nach Vorzeichen der Residuallast regelbare PV-Anlagen, werden tatsächliche Leistungswerte bestimmt und eingestellt. Die virtuellen Pakete werden aus Managementgründen aufgezeichnet und entsprechend mit Messvorrichtungen auf Eintreten überprüft. Hiermit sind nicht steuerbare Ressourcen wie der ONT oder höhere Netzebenen gemeint. Bei voll genutzten Paketen (wie in Abbildung 6.9 die Pakete für Speicher und PV-Anlagen) wird jedem einzelnen dem Paket zugeordneten Betriebsmittel die maximal verfügbare Leistung zugewiesen. Wird ein berechnetes Paket nur zum Teil eingesetzt, muss die entsprechend angeforderte Leistung durch geeignete Mechanismen auf die zugeordneten Betriebsmittel verteilt werden.



**Abb. 6.7** – Die Abbildung zeigt die Bildung der Teilpakete zur Aufnahme von Wirkleistung, welche über den Ortsnetztransformator (ONT) im Quartier realisiert werden. Die vertikalen Abmessungen der Blöcke stehen qualitativ für unterschiedlich große Potentiale beziehungsweise Pakete – nach Ergebnissen von [SA.16].



**Abb. 6.8** – Übersicht der unsortierten qualitativen Leistungsbilanz bei negativer Residuallast  $P_{RI}$  – nach Ergebnissen von [SA.16].



**Abb. 6.9** – Übersicht der sortierten qualitativen Leistungsbilanz bei negativer Residuallast  $P_{RI}$ . Pakete auf der Angebotsseite mit hoher Priorität werden solchen mit niedrigerer Priorität bei Leistungsausgleich vorgezogen. Die Priorisierung der Pakete entspricht einer Betriebsstrategie für die maximale Einspeisung aus PV-Anlagen – nach Ergebnissen von [SA.16].



Beispielsweise kann dies anhand der zur Verfügung stehenden Maximalleistung anteilmäßig auf diese aufgeteilt werden. Dies entspricht dem «Division PLUS» Verteil-Algorithmus des CEMS. Alternativ können andere Mechanismen zur Aufteilung der Paketleistung, wie die genannten Algorithmen des CEMS oder auch selbstlernende Ansätze, umgesetzt werden, die eine interne Bewertung innerhalb einer Betriebsmittelkategorie berücksichtigen.

## 6.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel vereint die Inhalte der vorhergehenden Kapitel zu einem aktiven und kybernetischen EMS, das kyELM genannt wird. Durch die anfängliche Betrachtung der Rekursionsebenen wird klar, dass die Anwendung des VSM eine klare Struktur vorgibt und die vorhandenen technischen Komponenten des Energieversorgungssystems zu einem großen Ganzen zusammengefügt werden. Wie eingangs erwähnt, sind Parallelen zu dem vom VDE vorgestellten zellularen Ansatz festzustellen. Die dort nicht genannte wissenschaftliche und methodische Basis der Vorgehensweise ist mit den ausgeführten Inhalten nun gegeben. Neben dem Aufbau des kyELM wurden mögliche Betriebsstrategien für die einzelnen Rekursionsebenen vorgestellt und implementiert. Hier zeigt sich, dass der Einsatz von theoretischen Ansätzen und Methoden rekursiv und skalierbar über die Ebenen hinweg möglich ist. Den Ausführungen nicht zu entnehmen ist eine konkrete Umsetzung in Hardware. Allerdings ist durch die Überprüfung auf Realisierbarkeit des in EEBatt umgesetzten kyELM light-Ansatzes ein erster Prototyp gegeben, wodurch die im folgenden Kapitel durchgeführten Simulationen ausreichen. Tatsache ist, dass eine vollständige Umsetzung eines kyELM in einem realen Netzquartier ohne entsprechende Projekte wie EEBatt schwierig bis unmöglich zu realisieren ist. Hier muss eine Initiative ähnlich dem zellularen Ansatz des VDE gegründet werden. Zum Abschluss dieses Kapitels und Vergleich der beiden im Rahmen dieser Arbeit entstandenen EMS-Varianten, die letzten Endes aufeinander aufbauen, wird in Tabelle 6.4 eine Gegenüberstellung vorgenommen, um die Entwicklung des kyELM zu zeigen.

**Tab. 6.4** – Die Tabelle zeigt die Unterschiede und Entwicklungsschritte für spezifische Aspekte zwischen den beiden in dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen für ein aktives kybernetisches EMS.

| Aspekt               | kyELM light  | kyELM  |
|----------------------|--|--|
| Hardwareumsetzung:   | realisiert in EEBatt   | ausstehend   |
| Testverfahren:       | simulativ, HiL, Prototyp   | simulativ  |
| Verteil-Algorithmen: | eine Standardauswahl   | 7 unterschiedliche Varianten                                       |
| VSM-Realisierung:    | Nur Idee der Rekursion und Skalierbarkeit verwendet                    | VSM-Struktur in jeder Rekursionsebene vorhanden (RVSM, CVSM, QVSM) |
| Umweltkopplung:      | nur bedingt über Vorgabe der Solleistung durch das CEMS berücksichtigt | jede VSM-Ebene besitzt entsprechende Schnittstelle und Sensoren    |
| Prädiktion:          | in Teilen vorhanden  | in der Theorie erarbeitet  |



## 7 Simulation und Validierung des Systemkonzeptes

Nach der Erstellung des kyELM und der Definition der zugehörigen Betriebsstrategien wird in diesem Kapitel eine Validierung des Konzeptes mit Hilfe der Simulation durchgeführt. Dazu werden die Modelle und die gewählten Vereinfachungen und Abstrahierungen aufgezeigt, die während der Ausführungen getroffen wurden. Eine Auswahl an Ergebnissen der durchgeführten Simulationen wird in Form von Tabellen und Plots präsentiert. Die Validierung durch Simulation wird gewählt, um eine reale Umsetzung mit entsprechendem Ressourcenbedarf (zahlreiche Instanzen wie Netzbetreiber, Haus- und PV-Anlagen-Besitzer und andere Personen) in effizienter Weise zu begrenzen. Durch den damit einhergehenden Aufwand und die Komplexität ist deshalb die Simulation das Mittel der Wahl für die Bestätigung der vorgestellten Methode. In der VDI-Richtlinie 3633 [229] wird der Begriff, wie folgt definiert:

73.)

---

*„[Simulation ist die] Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem System mithilfe eines experimentierfähigen Modells, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“*

---

[229]

Somit ist die Bestätigung der Anwendung des VSM in der stationären Energieversorgung durch entsprechend dimensionierte Simulationsmodelle gerechtfertigt. Die Ergebnisse der Simulation müssen jedoch immer im Bezug auf die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen diskutiert und eingeordnet werden. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Modelle erstellt. Ein Erstes für die Betrachtung des Speicher-Containers und der Verteil-Algorithmen. Ein Zweites für das Quartier und die vorgestellten Flexibilitätsoptionen samt Betriebszielen. An dieser Stelle sei auf die Arbeiten [SA.3, SA.16, SA.17] verwiesen, die einen wertvollen Beitrag zur Erstellung der Modelle leisteten.

Bevor die beiden Modelle im Detail betrachtet werden, wird auf die allgemeinen Abstrahierungen und getroffenen Vereinfachungen eingegangen. Generell werden alle Simulationen auf Basis der Datenlage des Netzquartiers Moosham und zur Verfügung stehender Informationen aus dem EEBatt-Projekt durchgeführt. Für beide betrachteten Modelle gelten folgende Punkte:

- Das Quartier ist mit dem ONT an die Mittelspannungsebene angeschlossen.
- Die Erhöhung des Eigenverbrauches im Quartier ist das Primärziel.
- Lediglich die Regelung der Wirkleistung wird betrachtet. Alle Schnittstellen, Implementierungen und Methode werden jedoch für die Blindleistungsbetrachtung vorbereitet.
- Im Netz treten nur symmetrische dreiphasige Belastungen ohne Unsymmetrien auf.
- Keine Betrachtung von Netzfehlern.
- Koppel-Effekte von Leitungen werden vernachlässigt.

## 7.1 Quartiersimulation und Datenlage

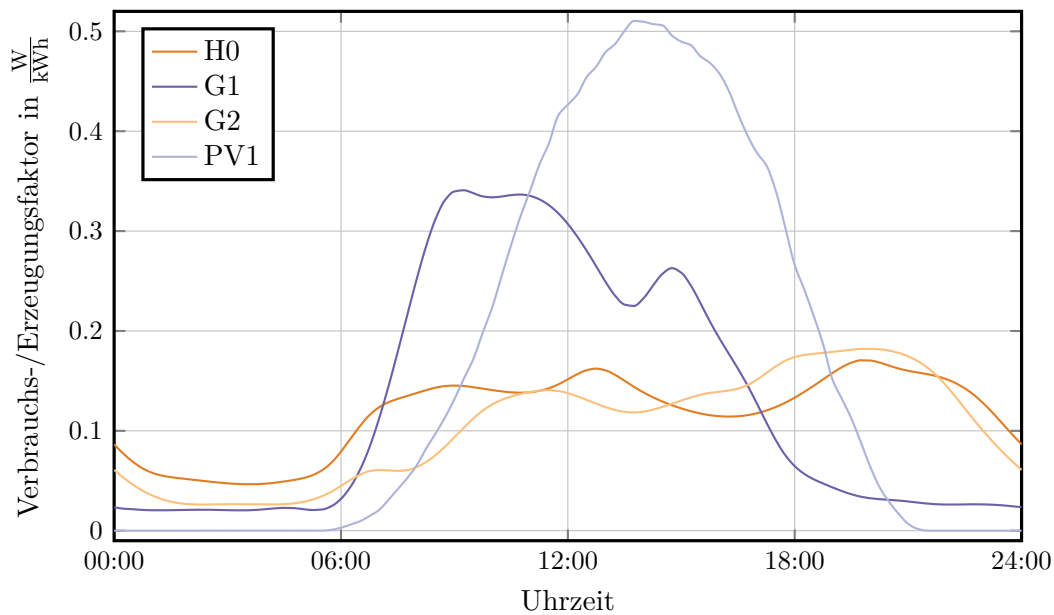
In diesem Teilkapitel wird zunächst auf die Modellerstellung und die Ergebnisse der Simulationen in der Quartierebene RE 2 eingegangen. Zu beachten sind die Beschreibungen des QVSM aus dem Abschnitt 6.2.4 und die zugehörigen Betriebsstrategien aus dem Abschnitt 6.3.3.

### Moosham in Zahlen

Das simulierte Quartier basiert auf dem Ortsnetz Moosham bei Haag in Oberbayern. In Zahlen ausgedrückt handelt es sich um 60 Hausanschlüsse und 18 PV-Anlagen. Aus Netzbetreibersicht liegt es auf der Niederspannungsebene und somit auf der untersten Ebene des Energieversorgungsnetzes. Die Anbindung erfolgt über einen ONT der Schaltgruppe DYN5 mit einer Nennscheinleistung von 0,315 MVA. Die Spannung wird für das Ortsnetz von 20 kV Mittelspannung auf 400 V Niederspannung herabgesetzt. Für die Anbindung an das Mittelspannungsnetz wird nur die Kurzschluss-Impedanz bezogen auf die Sekundärseite des ONT beachtet. Die Werte und Berechnung der Impedanz sind in Anhang C dargestellt. Generell ist das Netz, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, als Strahlennetz konzipiert. Es wird, bis auf wenige durch Freileitungen realisierte Ausnahmen, mit Erdkabeln gebildet. Die Leitungsbeläge bewegen sich hierbei für die verwendeten Erdkabel im Bereich zwischen  $0,1 \frac{\Omega}{\text{km}}$  und  $1,15 \frac{\Omega}{\text{km}}$  für den Widerstandsbelag  $R_L$  und zwischen  $0,087 \frac{\Omega}{\text{km}}$  und  $0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}$  für den Induktivitätsbelag  $X_L$ . Zusammengefasst sind circa 3,13 km dreiphasige Netzleitung verlegt. Der Gesamtjahresverbrauch von Moosham beträgt circa 400 MWh. Größten Anteil daran haben Haushalte, mit einem jährlichen Verbrauch von 263 MWh, und gewerbliche Abnehmer, mit circa 36,2 MWh. Die im Netz installierten PV-Anlagen besitzen zusammen etwa 303 kW Erzeugungsleistung. Die größte Anlage im Netz stellt mit 79,25 kW mehr als ein Viertel der Gesamtleistung bereit. Sie ist auf dem Dach des lokalen Gasthauses installiert und am Netzknotenpunkt N85 angeschlossen. In unmittelbarer Nähe am Knoten N86 – in Abbildung 5.1 – ist der Speicher-Container platziert. In der Ausgangskonfiguration besitzt dieser einen Nennenergieinhalt  $W_{N,\text{Speicher}}$  von 200 kWh und eine Nennleistung  $P_{N,\text{Speicher}}$  von 248 kW. Alle bis hierhin genannten Werte und für die Modellierung noch weitere Kennzahlen sind detailliert in den Tabellen im Anhang D zusammengefasst.

### Last- und Erzeugungsprofile

Mangels ausreichend real gemessener Daten aus dem Netz Moosham wird für die Simulationen, aufgrund der oben genannten Datenlage, auf Standardlast- und Standarderzeugungsprofile zurückgegriffen. Mit den vorhandenen Jahresverbräuchen der Haushalte, Gewerke und den Spitzenleistungen der PV-Anlagen besteht in der Simulation eine gleichbleibende Ausgangsbasis für die Erprobung der Methoden. Für die PV-Anlagen wird das Erzeugungsprofil (PV1) nach [166] und für die Haushalte und Gewerke das H0-, G1- und G2-Lastprofil des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) [20] verwendet. Die Wirkleistung lässt sich mit dem jeweiligen Verbrauchs- oder Erzeugungsfaktor (in  $\frac{\text{W}}{\text{kWh}}$ ) und Gesamtjahresverbrauch oder der Spitzenleistung für jeden Zeitpunkt des Tages bestimmen. Um die Variation während der Wochentage und des Wochenendes sowie der Unterschiede in Sommer, Winter und der Übergangszeit zu erhalten, sind jeweils Varianten der Profile vorhanden. Die genannten Zeiträume sind wie folgt gegliedert:



**Abb. 7.1** – Verlauf der Lastprofile H0, G1, G2 und des Erzeugungsprofils PV1 für einen Werktag im Sommer nach [20, 166].

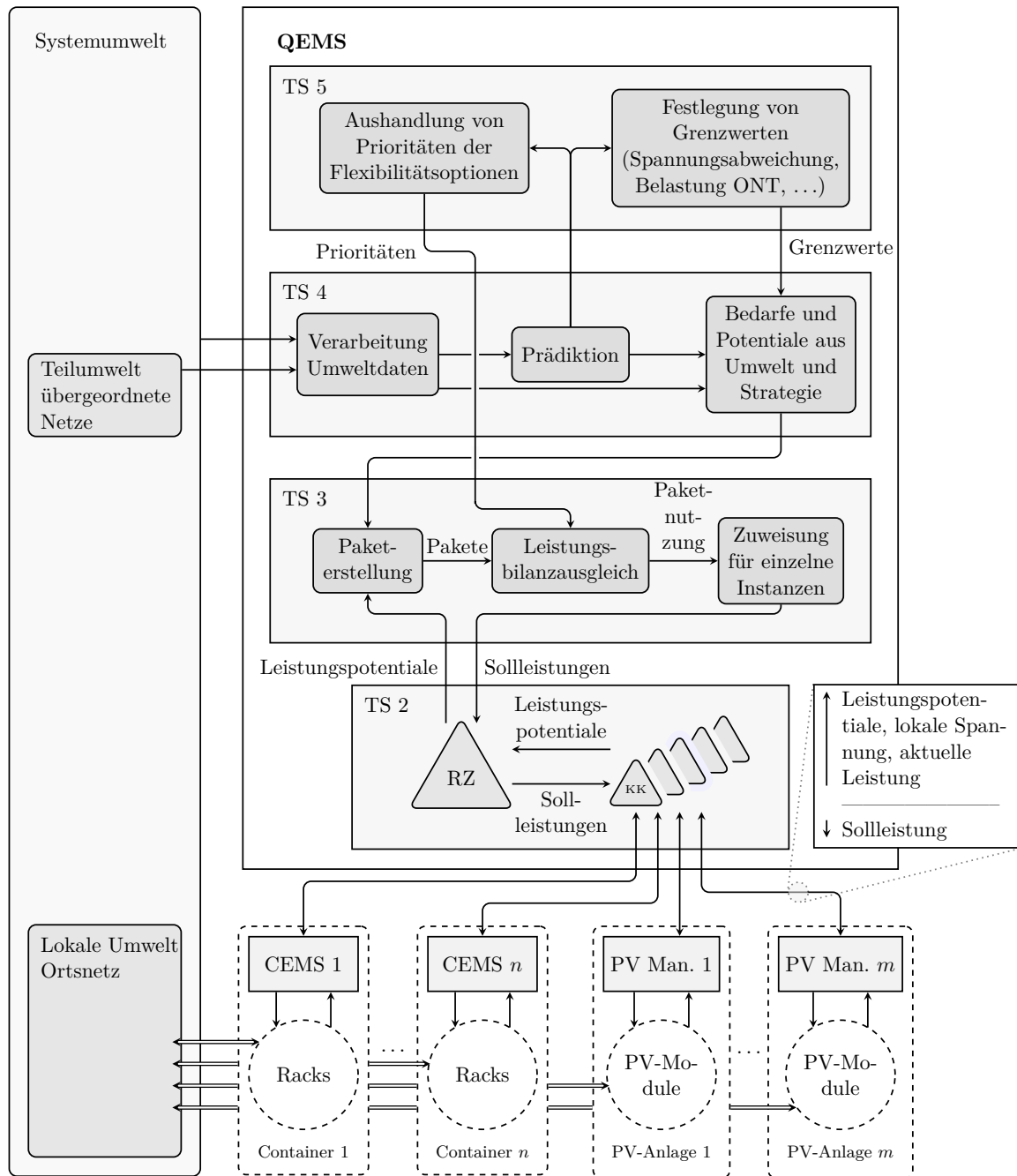
- Sommer-Profil: 15. Mai bis 14. September
- Winter-Profil: 01. November bis 20. März
- Übergangszeit: 21. März bis 14. Mai sowie 15. September bis 31. Oktober

Die Profile G1 und G2 unterscheiden sich durch die Lage der Lastspitzen im Tagesverlauf. In Abbildung 7.1 sind die genannten Profile exemplarisch für einen sommerlichen Werktag dargestellt.

### Rahmenbedingungen und allgemeiner Modellaufbau Quartier

Das Ortsnetzquartier wurde mit Hilfe von MATLAB/Simulink mit der Simscape-Toolbox in Form eines physikalischen Simulationsmodells dargestellt. Aufgrund der Fokussierung auf die Beobachtung des Systemverhaltens und der Umsetzung einer bestimmten Betriebsstrategie unter gegebenen Rahmenbedingungen ergibt sich für das Modell des QVSM im Quartier der in Abbildung 7.2 gezeigte strukturelle Aufbau. Hierbei wurden folgende Voraussetzungen für den Aufbau festgelegt:

- Parallele Simulation von physikalischen, informations- und regelungstechnischen Modellbestandteilen.
- Alle Messwerte liegen instantan vor, keine Betrachtung von Kommunikation-Totzeiten.
- Im Netz vorhandene Speicher- und Erzeugungsanlagen folgen präzise und verzögerungsfrei den Vorgaben des QEMS.
- Durch die gewählte Modellierungsart des QEMS weicht dieses minimal von der Struktur des QVSM ab. Das TS 2 ist als Filtereinheit auf der zentralen Kommunikationsachse zwischen TS 3 und TS 1 integriert.
- TS 3\* wird nicht implementiert, weil die OE und TS 1 fehlerfreies Verhalten aufweisen.



**Abb. 7.2** – Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des implementierten QEMS – in Zusammenarbeit mit [SA.16] erstellt. Abkürzungen: Koordinations-Knoten (KK), Photovoltaik (PV), Regelzentrale (RZ), Teilsystem (TS).

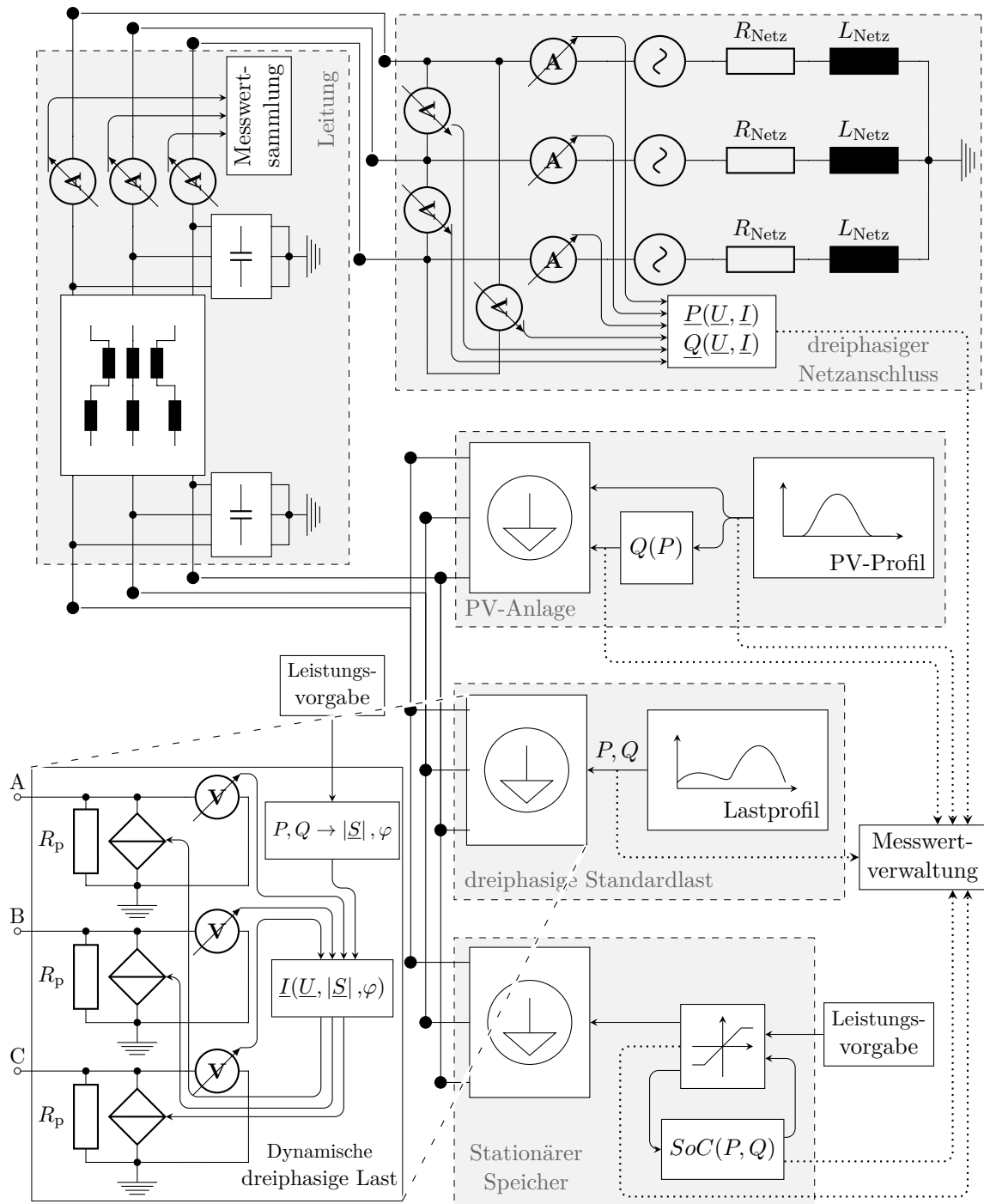
- Die Prädiktion des TS 4 ist stark vereinfacht. Das QEMS arbeitet mit einer fest definierten Betriebsstrategie. Diese wählt anhand gegebener Prioritäten die zur Verfügung stehenden Flexibilitätsoptionen aus. Die Betriebsstrategie wird vom Benutzer festgelegt.
- Das QEMS arbeitet nur in der Gegenwart. Der aktuelle Betriebszustand basiert auf abrufbaren Informationen der zum Bilanzausgleich zur Verfügung stehenden und erforderlichen Potentiale.
- Wenn nicht explizit genannt, werden wirtschaftliche Faktoren (wie zum Beispiel Strafzahlungen bei Abschaltungen von PV-Anlagen) vernachlässigt.

### 7.1.1 Modellbestandteile

Die folgende Darstellung der Modellbestandteile dient dem Verständnis für die Betrachtung der gezeigten Ergebnisse. Im Detail wird auf folgende Komponenten eingegangen: Leitungen, Lasten, Erzeuger (PV-Anlagen), Speichereinrichtungen, übergeordnetes Netz (ONT) und Netzknotenpunkt. Für das Modell wurde zusammen mit [SA.16] eine Modellbibliothek mit diesen Netzkomponenten zur Generierung eines Netzmodells erstellt. Hierzu sind entsprechend formatierte Netzdatentabellen nötig. In den Simulationen werden nur die Einflüsse der Wirkleistungsregelung und eine symmetrische Belastung des dreiphasigen Netzes betrachtet. Unsymmetrische Belastungsszenarien und die Blindleistungsregelung sind aber vorbereitet und implementiert. Im Bezug auf die Rechenzeit-Performanz werden alle Simulationen im Phasor-Modus [145] durchgeführt. Das heißt die Ergebnisse liegen als auf eine für die Simulation festgelegte Nennfrequenz des simulierten Netzes bezogene komplexwertige Zeiger vor. In Abbildung 7.3 ist ein vereinfachtes Schaubild eines exemplarischen Modells dargestellt mit den im Nachgang vorgestellten Komponenten.

#### Modellkomponente: Leitung

Als zentrales Verbindungselement der räumlich getrennten Netzteilnehmer eines Stromnetzes dient das Leitungsnetz. Je nach Spannungsebene, Art der Leistungsübertragung und -anforderung sind die Leitungen in verschiedenen Konfigurationen bezüglich Leiterquerschnittsfläche, -material, -anzahl je Phase und weiteren Details zum Aufbau umgesetzt. Im Modell wird mit dem in Abbildung 7.4 dargestellten  $\Pi$ -Ersatzschaltbild gearbeitet. In diesem ist es möglich, die Leitungen beliebiger Länge in einem Ersatzschaltbild mit konzentrierten Elementen, unter der Annahme des symmetrischen Betriebs, zu betrachten. Die Leitung wird bei dieser Betrachtung als homogen angesehen [107, 167]. Außerdem können bei einer bestimmten Frequenz  $f = 2\pi\omega$  Induktivitäts- und Kapazitätsbelag durch den Reaktanzbelag  $X' = \omega L'$  respektive Suszeptanzbelag  $B' = \omega C'$  ausgedrückt werden. Anzumerken ist, dass die Leitfähigkeit  $G$  des zwischen den Leitern befindlichen Dielektrikums meist bei Betrachtungen von insbesondere als Erdkabel ausgeführten Leitungen vernachlässigt wird. Auf Basis dieser Definitionen wird das Leitungsmodell in der Simscape-Toolbox von MATLAB/Simulink mit den vorhandenen Standardkomponenten für ohmschen Widerstand, Induktivität und Kapazität aufgebaut. Zu Dokumentationszwecken werden die über den nachgebildeten Leitungsabschnitt fließenden Ströme gemessen und ausgegeben. Die Koppel-Effekte der Leitungen werden mangels fehlender Daten nicht simuliert, können aber im Modell eingetragen werden. Schematisch wird das Modell der «Leitung» in Abbildung 7.3 gezeigt.



**Abb. 7.3** – Die Abbildung zeigt ein Beispielnetz mit Modellbestandteilen, der in [SA.16] entwickelten Modellbibliothek. Die Modellbestandteile «PV-Anlage», «dreiphasige Standardlast» und «Speicher» basieren auf der «dynamischen dreiphasigen Last». Ziel des vereinfachten Modells ist es, Aussagen über die entworfenen Managementansätze und -konzepte treffen zu können.



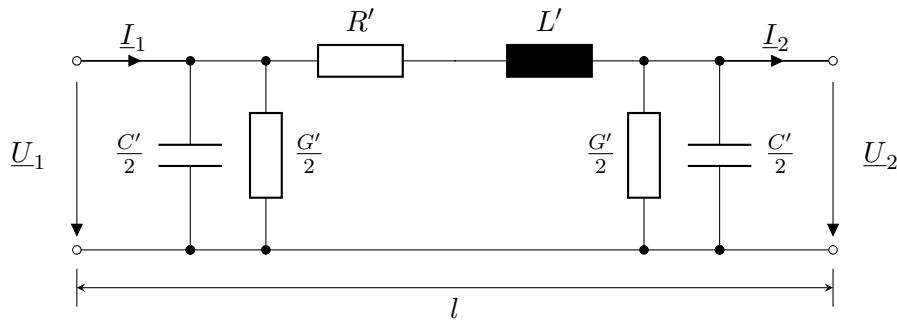


Abb. 7.4 – II-Ersatzschaltbild eines elektrischen Kabels nach [107].

### Modellkomponente: Last

Im Netz sind Lasten verteilt, die einen gewissen Energiebedarf über der Zeit aufweisen. Hierbei wird auf Ortsnetzebene zwischen Wohngebäuden und gewerblichen Abnehmern, wie landwirtschaftlichen Nutzgebäuden oder Gastronomie, unterschieden. Eventuell vorhandene PV-Anlagen werden als separate Erzeuger betrachtet. Im Modell wird die Last durch ihren vorhandenen Jahresenergiebedarf  $W_{\text{Jahr, Last}}$  charakterisiert. In Kombination mit den genannten Standardlastprofilen können ein Tagesverlauf oder beliebige andere Zeiträume abgebildet werden. Hierbei wird vernachlässigt, dass die Standardlastprofile des BDEW erst für Netze mit mehr als 150 Verbrauchern geeignet sind. Da das gesamte Quartier mit diesen Profilen abgebildet wird, ist die Tendenz ausgeglichen. Diese stellt somit eine gerechtfertigte Grundlage für die Beurteilung neuer EMS-Algorithmen dar. Die verwendete Art der Modellierung basiert auf der Tatsache, dass Lasten, Erzeuger und Speicher entsprechend ihrer Charakteristik, Wirk- und Blindleistung vom Netz beziehen oder in das Netz einprägen. Somit gilt für die Scheinleistung, ausgedrückt als komplexe Größe:

$$\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad (7.1)$$

Mit dieser Gleichung kann der komplexe Stromzeiger  $\underline{I}$  abhängig von der anliegenden Spannung  $\underline{U}$  so eingestellt werden, dass die Last am Verknüpfungspunkt zum Netz die gegebene Sollleistungs-Vorgabe einprägt. Die Berechnungsgrundlage wird im Anhang F gezeigt. Der so entstandene «dynamische dreiphasige Lastblock» repräsentiert dann mit der Charakteristik der entsprechenden Last, PV-Anlage oder Speicher, die gewünschte zu modellierende Instanz. Hierbei ist noch zu ergänzen, dass aus numerischen Gründen Parallelwiderstände ( $R_p \geq 1 \text{ M}\Omega$ ) erforderlich sind, um die Lösbarkeit des Differentialgleichungssystems zu gewährleisten, und zur Einprägung der erforderlichen Leistung muss eine Messung der Leiter-Erde-Spannung an jeder Phase erfolgen. Schematisch ist der «dynamische dreiphasige Lastblock» in Abbildung 7.3 gezeigt.

Die in Abbildung 7.1 gezeigten Lastprofile dienen als Eingangswerte für die beschriebene Sollleistungs-Vorgabe in der dreiphasigen Standardlast. Die vom BDEW abgeleiteten Kennlinien werden für den jeweils benötigten Last-Typ ausgewählt. Weiter wird der Jahresgesamtbedarf  $W_{\text{Jahr, Last}}$  in kWh zu jedem simulierten Zeitschritt mit dem entsprechenden Wert des Lastprofils  $p_{\text{Profil}}(t)$  in  $\frac{\text{W}}{\text{kWh}}$  multipliziert. Mit Hilfe des dynamischen Lastblocks werden die erhaltenen Momentanleistungswerte  $P_{\text{Last}}(t)$  in das modellierte Netz eingeprengt. Sollte

je nach Last-Typ und Netzlast ein Leistungsfaktor  $\cos \varphi \neq 1$  hinterlegt sein, so wird dieser durch die Bereitstellung einer entsprechenden Blindleistung berücksichtigt. Schematisch ist auch die «dreiphasige Standardlast» in Abbildung 7.3 gezeigt.

### Modellkomponente: Erzeuger und PV-Anlage

Neben den beschriebenen Lasten existieren weiterhin Erzeuger im Versorgungsnetz. Diese werden separat in der Modellierung auf Grundlage des «dynamischen dreiphasigen Lastblocks» implementiert. Im Falle Moosham werden die Erzeuger durch PV-Anlagen repräsentiert. Diese sind in der Regel als aufdach-montierte Module auf privaten oder gewerblich genutzten Gebäuden ausgeführt. In Kombination mit einem netzgeführten Wechselrichter und einem separaten Stromzähler werden die Module am Netzanschlusspunkt des jeweiligen Anwesens an das Niederspannungsnetz angebunden. Insbesondere in Kombination mit Heimspeichern sind verschiedene Konfigurationen hinsichtlich der Netzanbindung möglich. Charakterisiert werden PV-Anlagen durch die maximal zur Verfügung stehende Einspeiseleistung, auch installierte Leistung oder Spitzenleistung  $P_{\text{Spitze}}$  genannt, und eine leistungsabhängige Wirkungsgradkurve  $\eta_{\text{PV}}(P)$ . Für die Höhe der Leistung ist der Winkel und die Intensität des einfallenden Sonnenlichts auf die Anlage entscheidend. Aus diesem Grund müssen geographische (Längen- und Breitengrad des Aufstellungsortes, etc.) und montagebedingte Gegebenheiten (Winkel, Fläche, etc.) beachtet werden. In Form des Kapazitätsfaktors  $c_{\text{kap}}$  beziehungsweise seines jährlichen Mittelwertes  $\bar{c}_{\text{kap}}$  werden diese Gegebenheiten berücksichtigt. In Kombination des Faktors mit der installierten Spitzenleistung  $P_{\text{Spitze}}$  kann der Jahresertrag  $W_{\text{Jahr, PV}}$  einer Anlage bestimmt werden:

$$W_{\text{Jahr, PV}} = \bar{c}_{\text{kap}} \cdot P_{\text{Spitze}} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} \quad (7.2)$$

Mit dem Jahresertrag und rechtlichen Rahmenbedingungen für PV-Anlagen ergibt sich für das Modell folgende Funktionsweise. Zusammen mit der dreiphasigen dynamischen Last, die dem realen Wechselrichter entspricht und als Schnittstelle zum Netz dient, wird im Rest des Modells nur die funktionale Seite der PV-Anlage modelliert. Das heißt, das Standard-PV-Einspeiseprofil wird zum jeweiligen Zeitpunkt unter Beachtung des entsprechenden Kapazitätsfaktor ausgewertet. Die daraus gewonnene Leistung  $P_{\text{PV}}(t)$  wird unter Berücksichtigung der rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen ins Netz eingespeist. Bei den Rahmenbedingungen sind zum einen die vorliegenden Grenzwerte und Vorgaben des EMS bei fernsteuerbaren Anlagen zu beachten. Zum anderen muss bei nicht fernsteuerbaren Anlagen die nach §14 EEG definierte Leistungsgrenze von 70 % der installierten Leistung eingehalten werden. Außerdem muss die vom Netzbetreiber vorgegebene, wirkleistungsabhängige Kennlinie, gezeigt in Abbildung 2.6, für die Blindleistungseinspeisung beachtet werden. Schematisch ist diese «PV-Anlage» in Abbildung 7.3 dargestellt.

Sollen andere Erzeugungsanlagen, wie Windturbinen oder dergleichen, in der Simulation dargestellt werden, so kann durch die entsprechende Charakterisierung der Anlage mit der installierten Maximalleistung  $P_{\text{Spitze}}$  oder anderen anlagentypischen Faktoren (Windstärke und -richtung, Zufuhr an Biomasse, Wirkungsgrad etc.) eine Leistungsvorgabe für das Modell generiert werden. Bei einer rein auf den Leistungsaustausch konzentrierten Betrachtung stellt die Art der Anlage keinen Unterschied dar.

## Modellkomponente: Speicher

Als letzte Komponente, die auf den «dreiphasigen dynamischen Lastblock» als physikalische Schnittstelle und Repräsentation für den Wechselrichter zurückgreift, sind Speicher zu nennen. Hierbei kann der Energy Neighbor neben handelsüblichen Heimspeichern als Vorbild genommen werden. Die Funktionen von Speichern im Niederspannungsnetz sind zum einen die Entlastung von anderen Betriebsmitteln, wie Transformatoren und Leitungen, indem Leistungsflüsse im Netz durch Zwischenspeicherung geglättet werden. Und zum anderen dienen Speicher als Puffer für Inselnetze und bei entsprechender Größe können sie ein autarkes Inselnetz herstellen. Zudem kann ein Speicher durch die Bereitstellung von Blindleistung zur Spannungshaltung beitragen. Wirtschaftliche Einsatzmodelle, wie die Vermarktung von Regelleistung oder der Handel an der Strombörse, sind ebenso denkbare Einsatzszenarien.

Technisch ist der Speicher durch die Speicherkapazität oder den Nennenergieinhalt  $W_{N, \text{Speicher}}$  und die maximale Ladeleistung  $P_{\text{Speicher, lad, max}}$  und die Entladeleistung  $P_{\text{Speicher, elad, max}}$  charakterisiert. Lade- und Entladeleistung werden oft als vorzeichenlose Speichernennleistung  $P_{N, \text{Speicher}}$  angegeben. Weiter können bei detaillierteren Betrachtungen Kennwerte, wie die Selbstentladung und verschiedene Umwelteinflüsse, eine Rolle für die Speichereffizienz spielen.

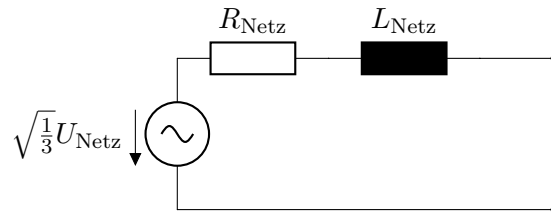
Die Nennleistung und der Nennenergieinhalt beschränken den Betrieb im Modell wie folgt. Zunächst wird die vom EMS angeforderte Wirkleistung durch die Nennleistung begrenzt. Anschließend wird geprüft, ob der aktuelle SoC des Speichers den für das Vorzeichen der Wirkleistungsanforderung  $P_{\text{in}}$  relevanten Grenzwert erreicht hat. Ist der obere Grenzwert  $SoC_{\text{max}}$  erreicht, kann der Speicher keine weitere Energie aufnehmen, eine negative Wirkleistung kann folglich nicht bedient werden. Analog verhält es sich mit der Bereitstellung von positiver Wirkleistung bei Erreichen des unteren Grenzwertes  $SoC_{\text{min}}$ . Somit ergibt sich die resultierende Berechnungsvorschrift für die an den Lastblock gegebene Wirkleistungsanforderung  $P_{\text{out}}$  wie folgt:

$$P_{\text{out}}(t) = \begin{cases} 0 & : P_{\text{in}}(t) \leq 0 \quad \wedge \quad SoC(t) \geq SoC_{\text{max}} \\ \max(P_{\text{in}}(t), -P_{N, \text{Speicher}}) & : P_{\text{in}}(t) \leq 0 \quad \wedge \quad SoC(t) < SoC_{\text{max}} \\ \min(P_{\text{in}}(t), P_{N, \text{Speicher}}) & : P_{\text{in}}(t) > 0 \quad \wedge \quad SoC(t) > SoC_{\text{min}} \\ 0 & : P_{\text{in}}(t) > 0 \quad \wedge \quad SoC(t) \leq SoC_{\text{min}} \end{cases} \quad (7.3)$$

mit  $SoC_{\text{min}}, SoC_{\text{max}} \in \mathbb{R} \setminus \{SoC_{\text{min}} < SoC_{\text{max}} \leq 1\}$

Für die Betrachtung der Blindleistung im vereinfachten Speichermodell gilt es, die im realen Speicher durch die Leistungselektronik bereitgestellte Blindleistung zu modellieren. Die eigentliche Speichereinheit, alle verbauten Speicherzellen, liefern oder beziehen lediglich Wirkleistung. Deshalb wird die geforderte Blindleistung durch die Nennleistung des Speichers begrenzt. Der Speicher kann zu jedem Zeitpunkt eine maximale Scheinleistung,

$$\underline{S}_{\text{out}} = P_{\text{out}} + jQ_{\text{out}} \quad (7.4)$$



**Abb. 7.5** – Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Netzanschlusses.

bereitstellen, die betragsmäßig der maximalen verfügbaren Wirkleistung  $P_{N, \text{Speicher}}$  entspricht. Somit ergibt sich für die im Modell an den Lastblock gestellte Blindleistungsanforderung  $Q_{\text{out}}$  die nachfolgend dargestellte Berechnungsvorschrift:

$$\begin{aligned} |\underline{S}_{\text{out}}| &= |P_{\text{out}} + jQ_{\text{out}}| \leq |P_{N, \text{Speicher}} + j0| \quad \text{mit } |\underline{x}| = \sqrt{\text{Re}(\underline{x})^2 + \text{Im}(\underline{x})^2} \\ &\Rightarrow |Q_{\text{out}}| \leq P_{N, \text{Speicher}}^2 - P_{\text{out}}^2 \\ &\Rightarrow Q_{\text{out}}(t) = \text{sign}(Q_{\text{out}}(t)) \cdot \min(|Q_{\text{out}}(t)|, P_{N, \text{Speicher}}^2 - P_{\text{out}}(t)^2) \end{aligned} \quad (7.5)$$

Schlussendlich bilden die ermittelten Leistungsvorgaben die Grundlage für die Bestimmung des aktuellen SoCs, der durch Integration über den Betrag der vom Speicher bereitgestellten Scheinleistung ermittelt wird. Alle beschriebenen Größen werden zusätzlich an die Messwertverwaltung des Netzmodells weitergegeben und sind damit für die Planung des EMS abrufbar. Die schematische Darstellung des «stationären Speichers» ist in Abbildung 7.3 gezeigt.

### Modellkomponente: ONT und höhere Netzebene

Das Ortsnetz ist über den ONT an die nächst höhere Spannungsebene gekoppelt. Über diese Verbindung kann sowohl Leistung bezogen als auch abgegeben werden. Die Anpassung der Spannung für die einzelnen Spannungsebenen, im Beispiel Mittel- und Niederspannung, übernimmt der ONT. Diese Funktionen können stark vereinfacht durch das in Abbildung 7.5 dargestellte Ersatzschaltbild realisiert werden. Jede Phase wird durch eine Wechselspannungsquelle und eine in Reihe geschaltete Impedanz repräsentiert. Hierbei liefert die Spannungsquelle eine sinusförmige Spannung mit Frequenz und Amplitude entsprechend der Netzfrequenz und Nennspannung (Leiter-Erde) des gewählten Netzes. Die Innenimpedanz repräsentiert den Einfluss des Transformators und der Zuleitungen des übergeordneten Netzes. Ihre Bestimmung für das Ortsnetz Moosham wird im Anhang C präsentiert.

Für das Modell bedeutet das, dass die Innenimpedanz je Phase mit einer Wechselspannungsquelle und dem jeweiligen physikalischen Verbindungsport des Komponentenmodells in Reihe geschaltet wird. Die Höhe der eingestellten Spannung  $|U_{AC, i}|$  an jeder Phase  $i$  entspricht dabei dem Effektivwert der Leiter-Erde-Spannung am Netzanschluss:

$$|U_{AC, i}| = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot U_{\text{Netz}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (7.6)$$

Entsprechend der Definition des synchronen Drehstromsystems liegt zwischen den drei Phasen ein Phasenversatz von je  $120^\circ$ . Dieser muss in den Spannungsquellen entsprechend berücksichtigt werden:

$$\angle U_{AC, i} = -120^\circ \cdot (i - 1) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7.7)$$

Im Komponentenmodell wird die aus dem übergeordneten Netz bezogene Leistung gemessen und an die Messwertverwaltung des Netzmodells weitergegeben. Abbildung 7.3 zeigt den schematischen Aufbau des «dreiphasigen Netzanschlusses».

### Modellkomponente: Netzknoten

Für die Validierung und dem Aufbau des Netzmodells wird die Komponente des Netzknotens eingeführt. Mit diesem werden alle Punkte im Netz modelliert, die eine Leitungsverzweigung darstellen oder von denen Zugangsleitungen vom Hauptstrang zu den einzelnen Lasten abgehen. In der Realität wären dies die Sammelschiene am ONT oder Verteil- und Anschlusskästen. Weiter stellt der Netzknoten in der Modellierung zum einen die nötige Infrastruktur, um über die Modellaufbauroutine die anderen Netzkomponenten einfach verbinden zu können, und zum anderen dient er der Erfassung von Messgrößen, wie der Spannung, zur Validierung des Modells.

#### 7.1.2 Szenarien und Ergebnisse

Nach der Vorstellung des Simulationsmodells wird in diesem Abschnitt auf eine Auswahl an Ergebnissen der durchgeführten Simulationen eingegangen. Dazu soll folgende Reihe an Szenarien betrachtet werden. Der Ausgangszustand der Betrachtungen ist das Ortsnetzquartier Moosham ohne Batteriespeicher, ohne EMS und somit nur mit der gesetzlich vorgeschriebenen Abregelung der PV-Anlagen, dargestellt im Szenario  $S_1$ .

Im Szenario  $S_2$  wird ein Speicher eingebaut, wie er in EEBatt realisiert wurde. Hierin erfolgt die Bewertung der Netzsituation inklusive dem kyELM. Allerdings beeinflusst das QEMS nur die große PV-Anlage ( $P_N \geq 30 \text{ kW}$ ) und keine Verbraucher. Generell sei an dieser Stelle festgehalten, dass die Verbraucherregelung nicht in dieser Arbeit betrachtet wird. Das Modell ist allerdings dazu in der Lage.

Als nächste Ausbaustufe werden alle PV-Anlagen in den Berechnungen des QEMS berücksichtigt. Das heißt selbst kleine Anlagen ( $P_N \leq 30 \text{ kW}$ ), die in Realität nicht steuerbar sind, können vom QEMS beeinflusst werden. Entsprechende Ergebnisse sind unter dem Szenario  $S_3$  aufgeführt.

Im Laufe des Projektes EEBatt wurde in Moosham ein Ringschluss der beiden Hauptstränge veranlasst. Das heißt, zwischen den beiden Knotenverteilern NKV4 und NKV7 wurde eine Verbindung per Erdkabel hergestellt. In der Simulation soll deshalb der Einfluss dieser Leitung betrachtet werden. Aus diesem Grund wird in den Szenarien  $S_{2, \text{Ring}}$  und  $S_{3, \text{Ring}}$  der Netzplan aus den Szenarien  $S_2$  und  $S_3$  um den Ringschluss ergänzt.

Abweichend von der realen Quartiersituation wird im Szenario  $S_4$  die Speichergröße auf 400 kWh verdoppelt, um die Auswirkungen auf das gesamte Netz zu sehen. In  $S_{4, \text{Ring}}$  wird die Ringleitung hinzugenommen.

Im Szenario  $S_5$  wird ein zweiter identischer Speicher am Netzknoten N44 angeschlossen, hiermit sind auch 400 kWh im Netz vorhanden, aber verteilt auf zweimal 200 kWh. Für diese Konfiguration wird in  $S_6$  ebenso die doppelte Speichergröße angenommen. In den Szenarien  $S_{5, \text{Ring}}$  und  $S_{6, \text{Ring}}$  wird erneut der Ringschluss vollzogen.

Zuletzt wird in den Szenarien  $S_7$  und  $S_8$  die verwendete Speicherzahl auf vier und sechs erhöht. Hierzu wird je nach Szenario an den Netzknoten N20, N34, N37 und N60 jeweils ein Speicher angeschlossen. In den Szenarien  $S_{7, \text{Ring}}$  und  $S_{8, \text{Ring}}$  wird ebenfalls die Ringleitung im Netz geschlossen.

Generell gilt für alle Simulationen, dass die QEMS-Vorgaben in einem festen Intervall von zwei Sekunden übermittelt werden. Das heißt, sollte in dieser Zeit ein Fehler oder eine zu große Abweichung vom Sollwert auftreten, regelt das entsprechende TS 2 nach. In den Simulationen von [SA.16] wurde diese Verzögerung nicht berücksichtigt. Außerdem ist das oberste Ziel des QEMS, dass der Leistungsaustausch des Quartiers am ONT quasi Null sein soll und damit der Autarkiegrad des Quartiers maximal. Dazu werden folgende Prioritäten bei der Benutzung und Abschätzung der Flexibilitätsoptionen definiert:

1. Nutze den/die Speicher immer als erstes.
2. QEMS-Vorgabe für den ONT: Belaste den ONT mit maximal 1 % seiner Nennleistung, entspricht 4 kW in beiden Richtungen.
3. Begrenze die Leistung der PV-Anlagen entsprechend der Netzsituation unter Berücksichtigung des Betriebszieles.
4. Netzbetreibervorgabe an das QEMS für den ONT: Belaste den ONT mit maximal 10 kW Rückspeisung und 50 kW Bezugsleistung.
5. Nutze die volle Leistung des ONT.

In Tabelle 7.1 sind die Szenarien und ihre Eigenschaften in einer Übersicht dargestellt. Für die hier gezeigten Ergebnisse soll außerdem nur ein sommerlicher Werktag betrachtet werden. Im Sommer ist die PV-Einspeisung am größten und somit die Belastung für das Netz. Wenn hier das EMS seine Sollvorgaben erreicht, dann auch in den beiden anderen Zeiträumen.

Als ausgewähltes Resultat wird im Folgenden gezeigt, wie sich die Austauschleistung am ONT in den einzelnen Szenarien darstellt. Hierzu wird in jedem grafischen Vergleich das Szenario

**Tab. 7.1** – Die Tabelle zeigt die einzelnen Konfigurationen der Simulations-Szenarien. Für die Position der Knoten im Netz sei auf Abbildung 5.1 verwiesen.

| Szenario             | Speicher   | PV-Regelung  | Ringschluss  | QEMS, CEMS   |
|----------------------|--|--------------|--------------|--------------|
| $S_1$                | n. vorhanden   | n. vorhanden | n. vorhanden | n. vorhanden |
| $S_2$                | 200 kWh (N86)  | gesetzlich   | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{2, \text{Ring}}$ | 200 kWh (N86)  | gesetzlich   | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_3$                | 200 kWh (N86)  | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{3, \text{Ring}}$ | 200 kWh (N86)  | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_4$                | 400 kWh (N86)  | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{4, \text{Ring}}$ | 400 kWh (N86)  | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_5$                | je 200 kWh (N44, N86)                                  | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{5, \text{Ring}}$ | je 200 kWh (N44, N86)                                  | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_6$                | je 400 kWh (N44, N86)                                  | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{6, \text{Ring}}$ | je 400 kWh (N44, N86)                                  | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_7$                | je 200 kWh (N21, N44, N60, N86)                        | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{7, \text{Ring}}$ | je 200 kWh (N21, N44, N60, N86)                        | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |
| $S_8$                | je 200 kWh (N44, N86), je 100 kWh (N21, N34, N37, N60) | vorhanden    | n. vorhanden | vorhanden    |
| $S_{8, \text{Ring}}$ | je 400 kWh (N44, N86), je 100 kWh (N21, N34, N37, N60) | vorhanden    | vorhanden    | vorhanden    |

$S_1$  als Ausgangspunkt von Moosham mit betrachtet. Im Vergleich 7.6 werden die Szenarien  $S_2$  und  $S_{2, \text{Ring}}$  mit aufgetragen. Hier zeigt sich, dass der Speicher alleine zu einer Reduzierung der Rückspeisung beiträgt. Allerdings ist er für die im Netz vorhandene PV-Leistung mit 200 kWh zu klein dimensioniert, um die Leistung im Quartier quasi gegen Null regeln zu können. Auch der Einbau des Ringschlusses bringt nur minimale Verbesserungen mit sich. Am Morgen kann der Speicher mit der gewählten SoC-Initialisierung bis etwa 4:45 Uhr den Bezug von Leistung aus der höheren Spannungsebene verhindern. Danach ist er leer und wird mit Sonnenaufgang und PV-Erzeugung wieder vollgeladen. Dies passiert bis circa 12:45 Uhr. Ab hier ist der Speicher voll und muss seinen Betrieb pausieren. Im Verlauf ist zu dieser Zeit ein Bezug von Wirkleistung zu sehen. Dies ist erklärbar durch die implementierte Betriebsstrategie. Zum einen erfolgt nur eine Abschätzung der auftretenden Verluste im Netz. Hier zeigt sich, dass diese noch zu ungenau bestimmt werden und aufgrund der gewählten Priorisierung keine Reduktion des Speicherladevorgangs unternommen wird. Zum anderen ist an dem Punkt, ab dem der Speicher voll ist, ein Sprung in der Wirkleistungsrückspeisung zu sehen. Dies ist durch das Fehlen einer Prädiktion erklärbar. Diese wurde nicht im Modell umgesetzt, zeigt aber, dass das EMS in der Lage ist, die Fehlkalkulation innerhalb ein bis drei EMS-Berechnungstakte durch entsprechende Maßnahmen wieder zu kontrollieren. Durch den Einsatz der fehlenden Prädiktion ist ein solcher Verlauf vermeidbar. Dieser Sprung ist in den nachfolgenden Vergleichen weiterhin zu beobachten, allerdings aufgrund der Veränderung des Speicherinhalts erst zu späteren Zeitpunkten.

Wird das QEMS um die Regelung für alle PV-Anlagen erweitert, so kann sowohl die Rückspeisung als auch der Bezug der Leistung von der höheren Netzebene gesenkt werden. Gezeigt wird dies im Vergleich 7.7. Allerdings muss dazu die Leistungsgenerierung der PV-Anlagen gegen 12:45 Uhr abgeregelt werden, weil der Speicher vollgeladen wurde.

Die Abregelung ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar. Deshalb wird der Energieinhalt des Speichers auf 400 kWh vergrößert. Dieser Fall ist in den Szenarien  $S_4$  und  $S_{4, \text{Ring}}$  in Abbildung 7.8 dargestellt. Hier zeigt sich, dass der Speicher besser dimensioniert ist, um das Quartier morgens und Nachmittags zu entlasten. Allerdings muss auch hier die PV-Erzeugung gegen 14:30 Uhr eingestellt werden.

Wenn nun anstatt einer Speichervergrößerung eine Aufteilung des Inhalts in zwei Speicher mit jeweils 200 kWh vorgenommen wird, ist ein ähnlicher Verlauf in Abbildung 7.9 in den Szenarien  $S_5$  und  $S_{5, \text{Ring}}$  zu sehen. Hierin wird der zweite Speicher am Knoten N44 installiert. Auch hier muss die PV-Erzeugung gegen 14:30 Uhr abgeregelt werden. Für die bis jetzt beschriebenen Szenarien ist der jeweilige SoC-Verlauf in Abbildung H.1 im Anhang dargestellt.

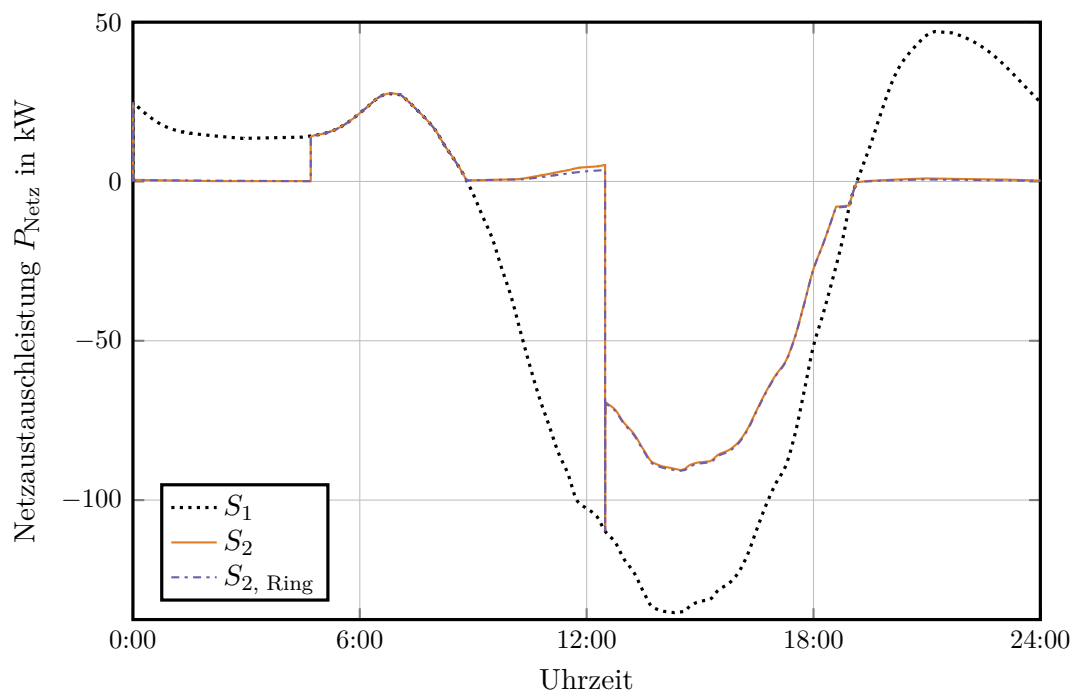
Um die PV-Erzeugung länger zu erhalten, werden diese beiden Speicher in den Szenarien  $S_6$  und  $S_{6, \text{Ring}}$  erneut auf 400 kWh vergrößert. Damit lässt sich der morgendliche Bezug von Leistung vollständig durch den Speicher kompensieren und die PV-Erzeugung bis 16:15 Uhr erhalten, wie es in Abbildung 7.10.

Versuchsweise wird in den Szenarien  $S_7$  und  $S_{7, \text{Ring}}$  eine Verteilung der Speicher im Quartier angenommen. Das heißt, es werden je 200 kWh an den Knoten N21, N44, N60 und N86 installiert. Das Resultat ist in Abbildung 7.11 zu sehen und es zeigt sich, dass die räumliche Verteilung eine Glättung der Spannungskennlinien mit sich bringt. Dies ist in den gezeigten Spannungs-Verläufen in den Abbildungen im Anhang G zu sehen. Die PV-Anlagen werden für diesen Fall erst gegen 16:45 Uhr abgeregelt.

Zuletzt wird, wie in den Szenarien  $S_8$  und  $S_{8, \text{Ring}}$  aufgebaut, die gleiche Energie von 800 kWh räumlich weiter unterteilt. Hierzu werden an den Knoten N20, N34, N37 und N60 je 100 kWh und an den Knoten N44 und N86 je 200 kWh Speicher positioniert. Die Resultate zeigt Abbildung 7.12. Für diesen Fall liegt sowohl eine Glättung der Spannungskurve als auch eine Glättung der ONT-Leistungskurve vor. Die PV-Abregelung kann außerdem bis 17 Uhr hinausgezögert werden. Für die Szenarien 6 bis 8 sind die entsprechenden SoC-Werte in Abbildung H.2 gezeigt.

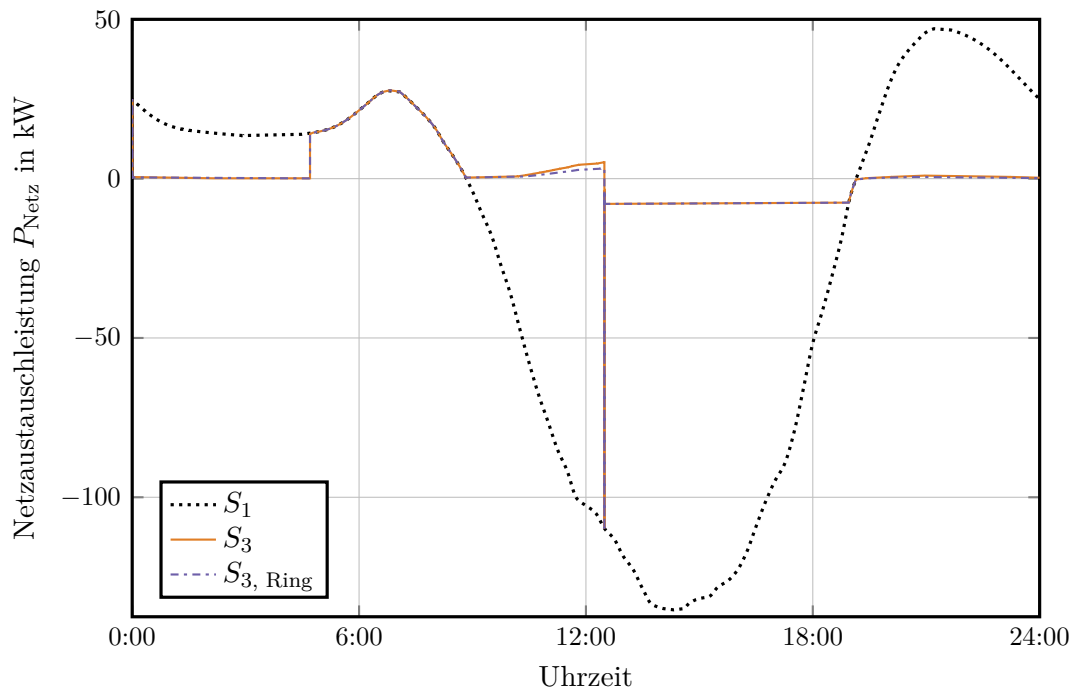
Um die generelle Einhaltung der Spannungsgrenzen im Quartier zu betrachten, werden die Spannungsverläufe bezogen auf die Netzspannung von 400 V an fünf ausgewählten Knoten wie schon erwähnt im Anhang G gezeigt. Die Verläufe zeigen, dass mit den Maßnahmen eine Verbesserung der Abweichung von der Nennspannung erreicht wird. Gerade die Abregelung der PV-Anlagen sorgt aber für Spannungsschwankungen. Hier sind die aktuell gewählten Regelgrenzen noch nachzustellen. In Summe werden jedoch die gesetzlichen Vorgaben immer eingehalten.

In den gezeigten Szenarien wird deutlich, dass die Betriebsstrategien und Flexibilitätsoptionen, die im Abschnitt 6.3.2 eingeführt wurden, ihren Zweck erfüllen und plausible sowie sinnvolle Leistungsvorgaben für die unterlagerten EMS generiert werden. Somit konnte die grundsätzliche Funktionsweise des EMS und der eingesetzten Methoden und Algorithmen gezeigt werden. Im Rahmen einer Nachfolgearbeit wird jedoch an dieser Stelle eine Optimierung der Speichergröße und Positionierung sowie der Einbau der vorgeschlagenen Prädiktion des VSM empfohlen.

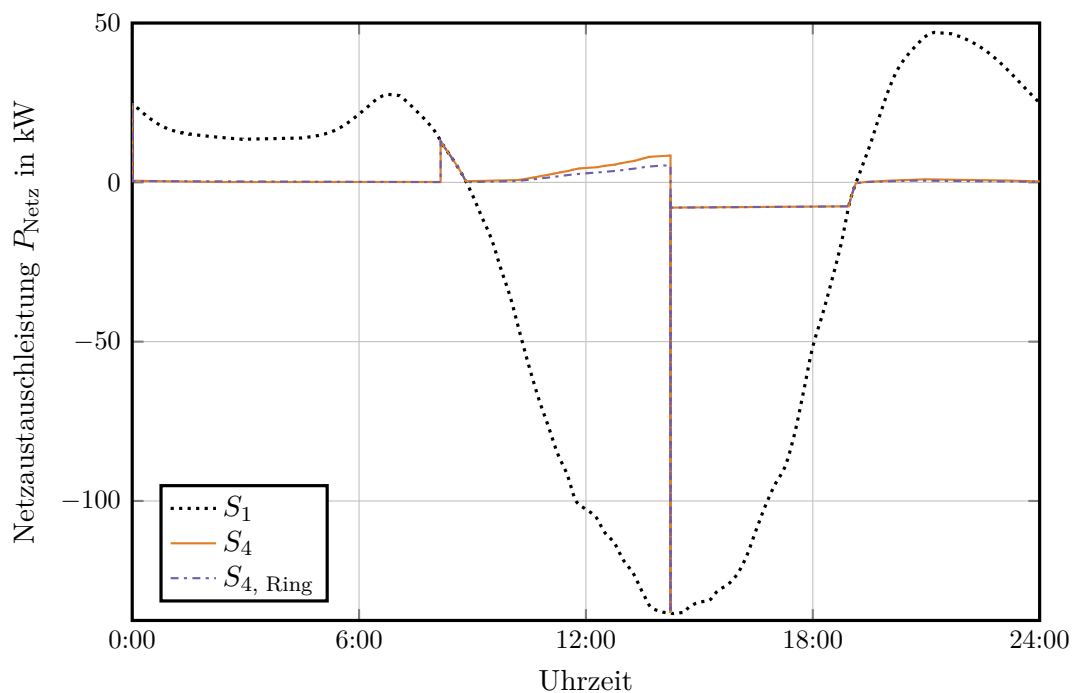


**Abb. 7.6** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  und  $S_2$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass der Speicher am Morgen bis etwa 12:45 Uhr den ONT Anfangs entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.

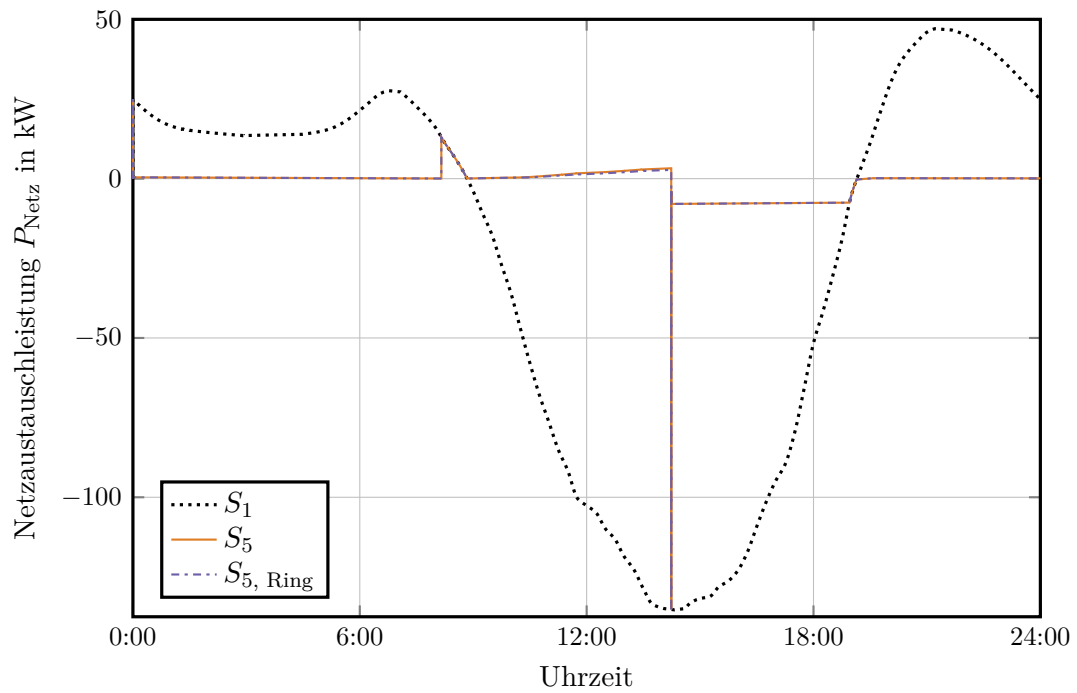




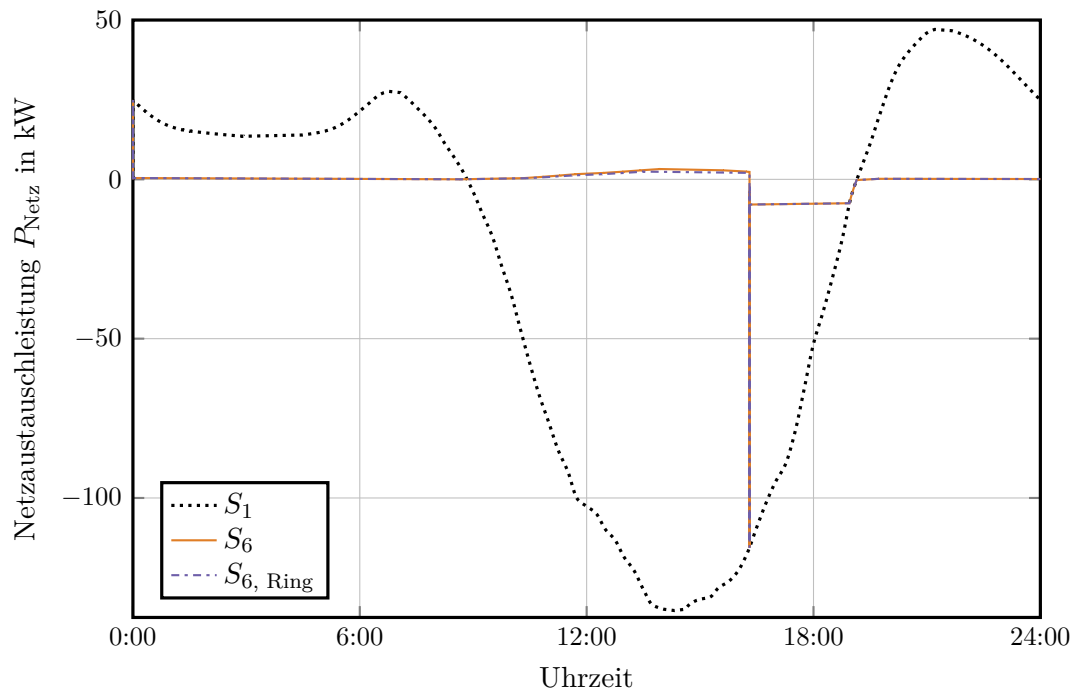
**Abb. 7.7** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  und  $S_3$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass der Speicher am Morgen bis etwa 12:45 Uhr den ONT anfangs entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.



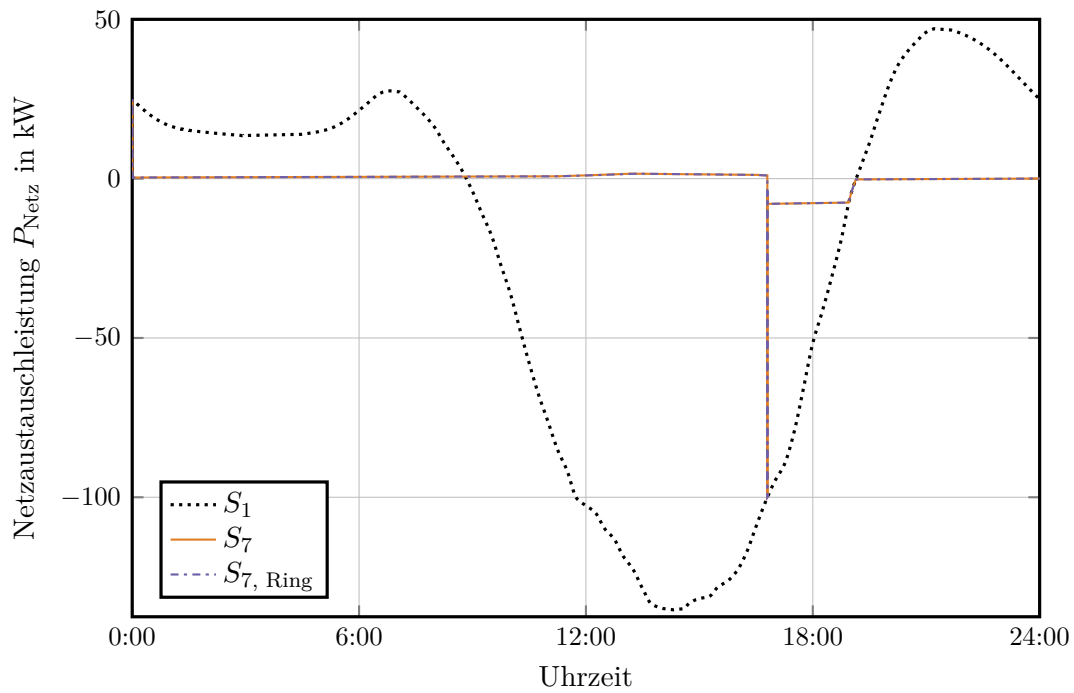
**Abb. 7.8** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  &  $S_4$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass der Speicher am Morgen und bis etwa 14:30 Uhr den ONT entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.



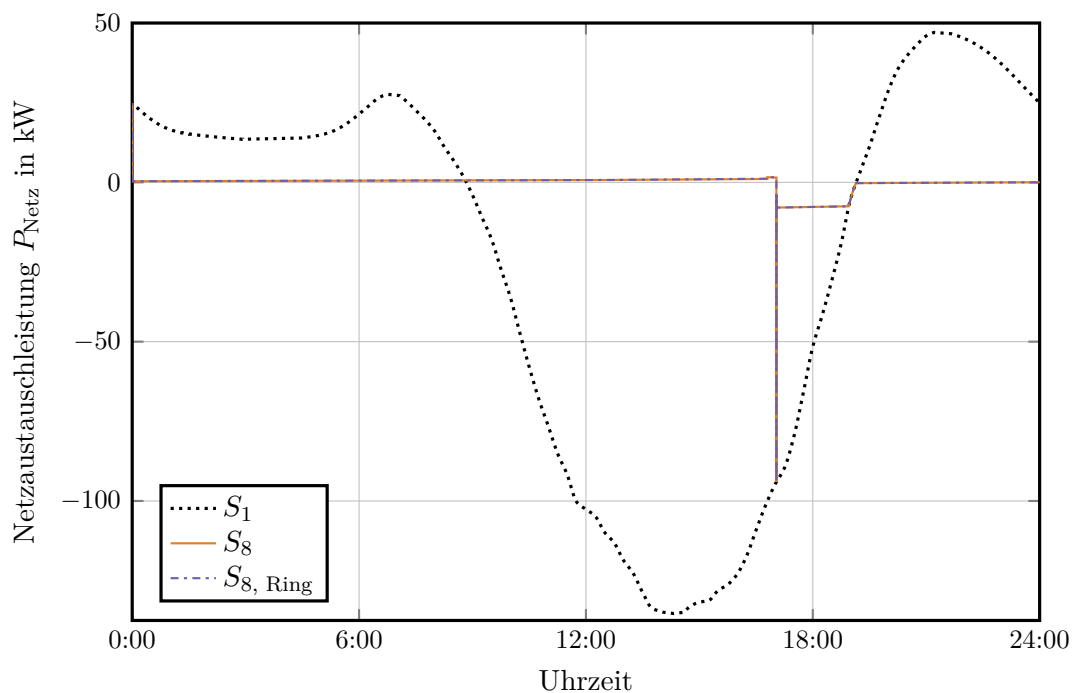
**Abb. 7.9** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  &  $S_5$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass die Speicher am Morgen und bis etwa 14:30 Uhr den ONT entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.



**Abb. 7.10** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  &  $S_6$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass die Speicher erst ab etwa 16:15 Uhr den ONT nicht mehr entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.



**Abb. 7.11** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  &  $S_7$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich, dass die Speicher erst ab etwa 16:45 Uhr den ONT nicht mehr entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.



**Abb. 7.12** – Verlauf der Netzaustauschleistung am ONT in den Szenarien  $S_1$  &  $S_6$ . Positive Leistungswerte bedeuten einen Bezug von Wirkleistung aus dem Mittelspannungsnetz. Es zeigt sich auch hier, dass die Speicher erst ab etwa 17:00 Uhr den ONT nicht mehr entlasten kann, indem er Energie bereitstellt oder die Energie der PV-Anlagen aufnimmt.

## 7.2 Containersimulation und Datenlage

Nach der Darstellung des Quartiermodells und dessen Ergebnisse wird in diesem Teilkapitel auf das Modell für den Speicher-Container und den dadurch möglichen Vergleich der Verteil-Algorithmien aus Abschnitt 6.3.2 fokussiert.

### Speicher-Container in Zahlen

Das Speicher-Container-Modell wurde ebenfalls mit Hilfe von MATLAB/Simulink und der Simscape-Toolbox in einem physikalischen Simulationsmodell aufgebaut. Den detaillierten Aufbau des Containers beschreiben die Abschnitte 6.2.2 und 6.2.3. Im Folgenden sind die wichtigsten Daten zusammengefasst: Es werden acht Racks mit je 25 kWh betrachtet. In Summe ergeben sich 200 kWh Energieinhalt für den Container. Bei der LE kommen zwei Leistungsvarianten zum Einsatz. Zwei Racks werden mit je 16 kW Invertern und sechs Racks mit 36 kW Invertern betrieben. Eine Gesamtleistung von 248 kW ist somit möglich.

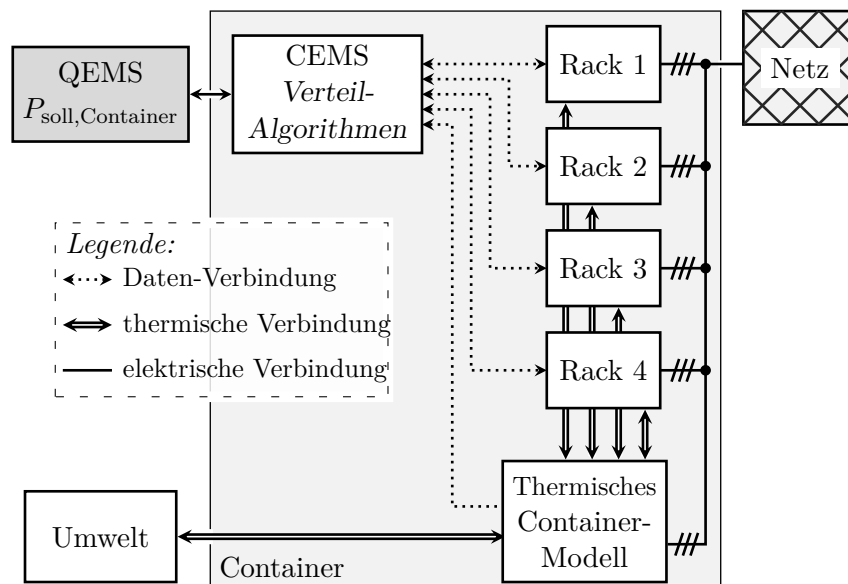
### Leistungsprofilvorgabe durch das QVSM

Zur alleinigen Beurteilung der Rechenzeit der Verteil-Algorithmien und aus Gründen der Modellteilung wird die geforderte Sollleistung aus einer separaten Simulation des QEMS erhalten. In ihr existiert der Container wie beschrieben als Ganzes und kann zu jeder Zeit die geforderte Leistung bereitstellen. In der Sollleistungs-Vorgabe sind die im Quartier erzeugte und benötigte Energie durch die PV-Anlagen und die Haushalte integriert. Somit beschreibt der Sollverlauf die sekundliche Leistung am Ausgang des Containers. Im Sinne der Skalierbarkeit werden die Simulationen für einen Container mit vier und acht Racks durchgeführt und die Algorithmen verglichen. Bei der kleineren Variante werden eine 16 kW und drei 36 kW Umrichter verwendet. Die Sollleistungs-Vorgaben werden als  $P_{\text{Ziel, Container, 4}}$  für vier Racks und  $P_{\text{Ziel, Container, 8}}$  für acht Racks, bezeichnet. In Abbildung 7.16 und 7.17 sind diese im Ergebnisteil dargestellt.

### Rahmenbedingungen und allgemeiner Modellaufbau Container

Das Modell des Speicher-Containers wird ähnlich dem Quartier so exakt wie nötig, aber so einfach wie möglich im Sinne der Rechenzeit und der zu modellierenden Komplexität ausgeführt. Das in Zusammenarbeit mit [SA.2, SA.3, SA.11, SA.18, SA.28] erstellte und erweiterte Modell zum Vergleich der Verteil-Algorithmien ist so aufgebaut, dass das CEMS jede Sekunde eine neue Leistungsvorgabe an die Racks sendet. Das CEMS und hier vor allem das TS 2 achtet auf die Einhaltung dieser Vorgabe im genannten Zeitraum. Um dies leisten zu können, wurden folgende Vereinfachungen im Modell des Speicher-Containers getroffen:

- Die LE wird als ideal arbeitend angesehen, das heißt sie arbeitet instantan und erfüllt ihre Aufgabe zuverlässig. Hierbei werden keine PWM und Schaltvorgänge der Halbleiter modelliert.
- Der Batteriestrang im Rack wird als eine Einheit angesehen. Einzelne Zellen und deren Größen werden nicht beachtet. Ausnahmen bilden gezielte Vorgaben des BMS.



**Abb. 7.13** – Überblick über das Modell und dessen Schnittstellen für die Speicher-Containersimulation mit vier Racks.

- Die Temperaturcharakteristika werden separat für das Rack samt Modulstrang, die LE und den gesamten Container in Form von Punktmassen betrachtet. Das heißt die Racks und die LE beeinflussen sich über definierte Klimazonen, die von einer Klimaanlage reguliert werden.
- Die Aktoren des Klimareglers basieren ausschließlich auf einem Lüfter.
- Es werden thermische Punktmassen angenommen und somit Wärmeleitungseffekte und Temperaturgradienten innerhalb eines Festkörpers vernachlässigt.
- LE und Netzfilter sind in einer Punktmasse zusammengefasst.
- Der Verlauf der Außentemperatur ist nur aufgrund grober Randwerte angenommen.
- Wenn nicht explizit genannt, werden wirtschaftliche Faktoren (wie zum Beispiel die Teilnahme am Sekundärregelleistungsmarkt) vernachlässigt.

Zusammengefasst erlaubt das Modell die Simulation eines ganzen Tages in wenigen Minuten und einen vereinfachten thermischen sowie elektrischen Vergleich der Algorithmen. Im aktuellen Zustand sind nur die Wirkungsgrade eines B6-Umrichters hinterlegt. Für einen Vergleich und eine schnelle Entwicklung der Verteil-Algorithmen ist dies ausreichend. Dies zeigen die Ergebnisse im Abschnitt 7.2.2. Dank des modularen Aufbaus des CEMS und des Modelles können aber andere Wirkungsgradkurven bei entsprechender Verfügbarkeit integriert werden. In Abbildung 7.13 ist das Modell des Speicher-Containers in der Übersicht dargestellt.

### 7.2.1 Modellbestandteile

Bevor die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen gezeigt werden, sollen ausgewählte Modellbestandteile näher erläutert werden. Im Detail sind dies die thermische Simulation des Containers sowie seiner Komponenten und die Modellierung der Racks.

## Thermische Simulation

Weil sowohl die Halbleiter der LE als auch die Batteriezellen in den Modulen ein thermisches Verhalten aufweisen, ist für die Containersimulation ein vereinfachtes thermisches Modell in [SA.3] aufgebaut worden. Im Folgenden werden die wesentlichen Punkte kurz dargestellt.

Die betrachteten Komponenten des Containers werden als Punktmassen abstrahiert. Das bedeutet, dass die gesamte Masse und räumliche Abmessung der Komponente in einen virtuellen Punkt zusammengefasst wird. Somit lässt sich der Wärmeaustausch zwischen den betrachteten Komponenten innerhalb des Containers vereinfacht analysieren. Temperaturgradienten innerhalb der Bauteile werden vernachlässigt, wodurch auch keine Wärmeleitung innerhalb der Komponenten beachtet wird. Es bleibt die Betrachtung der Wärmeströme  $\dot{q}_{th}$ , die zwischen den Bauteilen ausgetauscht oder durch Wärmequellen und -senken verursacht werden. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich aus der Summe aller zu- und abgeführten Wärmeströme die zeitliche Änderung der Temperatur  $\vartheta$  einer Punktmasse. Die erhaltene Temperaturänderung wird durch die Wärmekapazität  $C_{th}$  des Bauteils bestimmt.

Wärmestrahlung, -leitung und Konvektion werden bei der Betrachtung der Wärmeströme berücksichtigt. Die Wärmestrahlung  $\dot{q}_{rad}$  umfasst neben der Solarstrahlung durch die Sonne auch den Strahlungsaustausch zwischen zwei Festkörpern und die Strahlung eines Festkörpers in ein Fluid und umgekehrt. [52, 90]

Die Wärmeleitung  $\dot{q}_{Leitung}$  betrachtet die Isolierung der Containerwand. Entsprechend wird der Wärmedurchgang durch diese Isolierschicht modelliert. [52]

Bei der Beachtung der Konvektion  $\dot{q}_{konv}$  wird hauptsächlich die natürliche und erzwungene Konvektion an der fluiden Grenzschicht eines Festkörpers modelliert. Wegen der Eingriffe der Klimaanlage in die Temperaturregelung wird an dieser Stelle der konvektive Wärmeaustausch zwischen zwei strömenden Fluiden mit einbezogen. [52]

Die Gleichungen (I.1) bis (I.6), die im Simscape-Modell implementiert sind und die diese Prozesse beschreiben, sind im Anhang I gelistet.

Eine Übersicht der thermischen Zusammenhänge bietet Abbildung 7.14. Zusätzlich gilt es, im Modell noch die Verlustleistungen der LE und der Racks, die anhand der Wirkungsgrade ermittelt werden können, zu beachten, da sie während des Betriebes zur Erwärmung beider Komponenten beitragen. Aufgrund des Konzeptes der getrennten Klimazonen zwischen LE und Batteriemodulen, wurde im Modell zusätzlich ein vereinfachter Temperaturregler zwischen den Zonen implementiert. Die Regelung soll die Einhaltung der vom CEMS vorgegebenen Soll-Temperaturen gewährleisten. In Anlehnung an die reale Umsetzung im Energy Neighbor werden P-Regler verwendet, sodass ein stabiles Regelverhalten garantiert werden kann. Trotz dieser Vereinfachungen sind erste Bestandteile eines geregelten Klimasystems umgesetzt. Das heißt, mit Hilfe der Lüfter-Regelung ist die Kopplung der zwei Klimazonen gegeben. Sollte demnach die Temperatur der Klimazone-Rack unter der Soll-Temperatur liegen, wird die Klimazone-Rack gezielt mit der warmen Luft der Klimazone-LE geheizt. Abschließend muss festgehalten werden, dass das umgesetzte thermische Modell eine starke Vereinfachung der Realität darstellt. Es bietet eine Basis, um ein plausibles Temperaturverhalten des Containers in den Verteil-Algorithmen berücksichtigen zu können.

## Modellierung Racks und REMS

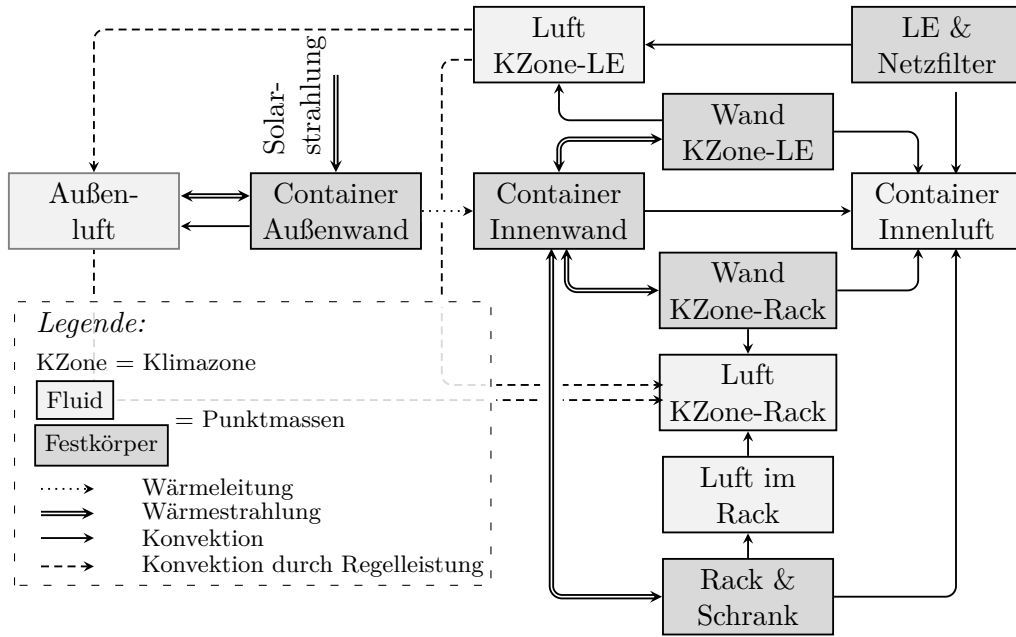
Das Rack wird vereinfacht repräsentiert durch die LE und den Modul-Strang inklusive dem BMS, um eine Aussage über die im CEMS realisierten Verteil-Algorithmen treffen zu können. In Abbildung 7.15 ist eine Übersicht über die Schnittstellen und die übertragenen Daten im Simulationsmodell gegeben. Vom CEMS wird die Leistungs-Vorgabe  $P_{\text{Ziel}}$  an die REMS weitergegeben und diese liefern aktuelle Zustandsdaten an das CEMS zurück. In Kombination mit der Annahme an die LE, dass diese den geforderten Strom instantan realisieren kann, und einem vereinfachten BMS sind die angesprochenen Simulationen zum Vergleich der Algorithmen möglich. Das Rack kann theoretisch beliebig konfiguriert werden. Für die hier gezeigten Simulationen werden die Daten der Zellen aus dem Energy Neighbor verwendet. Außerdem kann im Modell eine beliebige Anzahl an Racks mit unterschiedlichen Konfigurationen in den Container eingebaut werden. Die Anzahl der Schnittstellen wird entsprechend in den CEMS-Algorithmen angepasst.

### 7.2.2 Szenarien und Ergebnisse

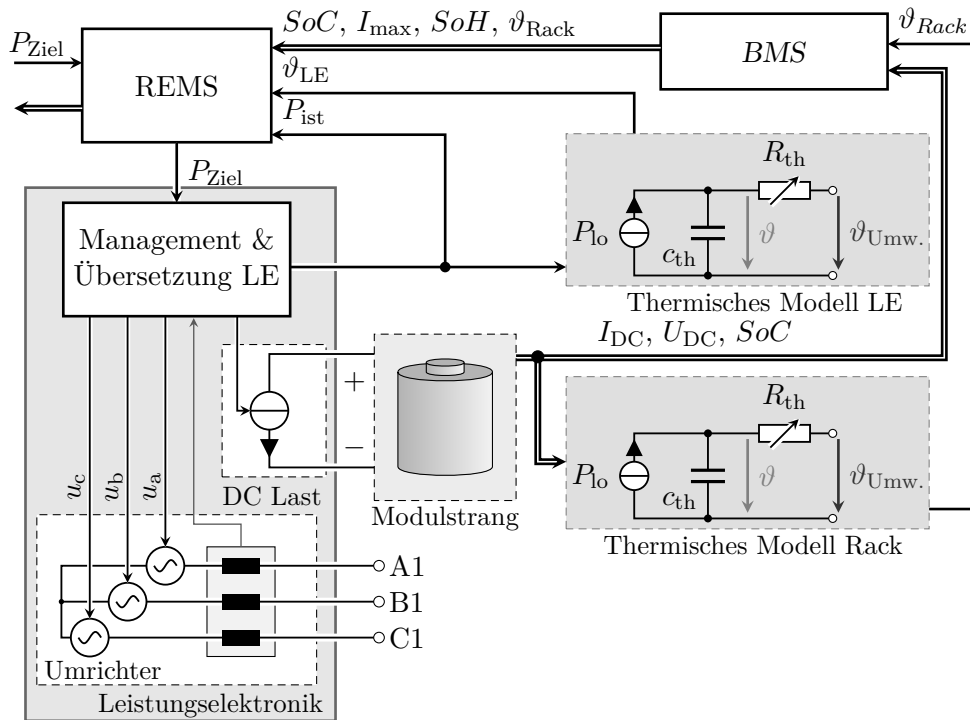
Wie bei der Erstellung des CEMS bereits erläutert wird, ist es dessen oberstes Ziel, die Sollleistungs-Vorgabe des QEMS zu erreichen. Gleiches gilt für die REMS im Falle der Vorgaben des CEMS. Hier kommt die Annahme zum Tragen, dass der Container im Quartier genau das tut, was das QEMS von ihm fordert. Die Simulationen zeigen deshalb, um die Skalierbarkeit des Containers deutlich zu machen, Container-Konfigurationen mit vier und acht Racks. In beiden Fällen wurde die Sollvorgabe im QEMS bestimmt und mit den Verbrauchs- und Erzeugerdaten von Haushalten und PV-Anlagen im Quartier abgestimmt. Diese Sollvorgaben  $P_{\text{Ziel, Container}, x}$  werden sekundlich an das CEMS übermittelt und sind neben je drei gewählten Verteil-Algorithmen in den Abbildungen 7.16 und 7.17 zu sehen. Zu ergänzen ist an dieser Stelle noch, dass in der Simulation neben der Rackanzahl auch der Initialzustand des Racks definiert werden kann. Dafür wurden zwei Szenarien definiert. Im Szenario «nah» sind die Racks zu 80 % geladen bei ähnlicher Temperatur. Im Szenario «diverse» liegen variierende Startbedingungen der Racks (unterschiedliche SoC und Temperaturen) vor.

Für den Vergleich der Verteil-Algorithmen werden drei Werte miteinander verglichen. Zum einen wird der durchschnittliche Wirkungsgrad der Leistungselektronik  $\bar{\eta}_{\text{PE}}$  betrachtet, der während des Betriebes anhand einer hinterlegten Tabelle erreicht werden kann. Zum anderen wird das Quantil  $Q_p \left( \frac{P_{\text{Ziel}}}{P_{\text{Ist}}} \leq \pm 1 \% \right)$  bestimmt. In Bezug auf die Abweichung der Sollvorgabe, betrachtet über einen vollständigen Simulationsverlauf, repräsentiert das Quantil den Anteil  $Q_p \cdot 100 \%$  der Abweichungen, die kleiner oder gleich 1 % sind. Abschließend werden die Algorithmen anhand des Quantils  $Q_p (\eta_{\text{LE}} \geq 90 \%)$  verglichen. Das heißt, in Bezug auf den Wirkungsgrad der LE, betrachtet über einen vollständigen Simulationsverlauf, repräsentiert das Quantil den Anteil  $Q_p \cdot 100 \%$  der Wirkungsgrade, die größer oder gleich 90 % sind. Die Werte für die Vergleichskriterien sind in Tabelle 7.2 gesammelt.

Werden die Algorithmen anhand der gewählten Kriterien verglichen, so zeigt sich, dass die unterschiedlichen Startbedingungen durch die in den Verteil-Algorithmen eingebaute Vorauswahl und den Sicherheitscheck ausgeglichen werden können. Außerdem wird deutlich, dass der Algorithmus nicht alle vorhandenen Informationen verarbeiten muss, um relativ hohe Wirkungsgrade erreichen zu können und fast über den gesamten Simulationsverlauf der Sollvorgabe folgen kann. Nur gegen Ende des betrachteten Zeitraumes zeigen sich

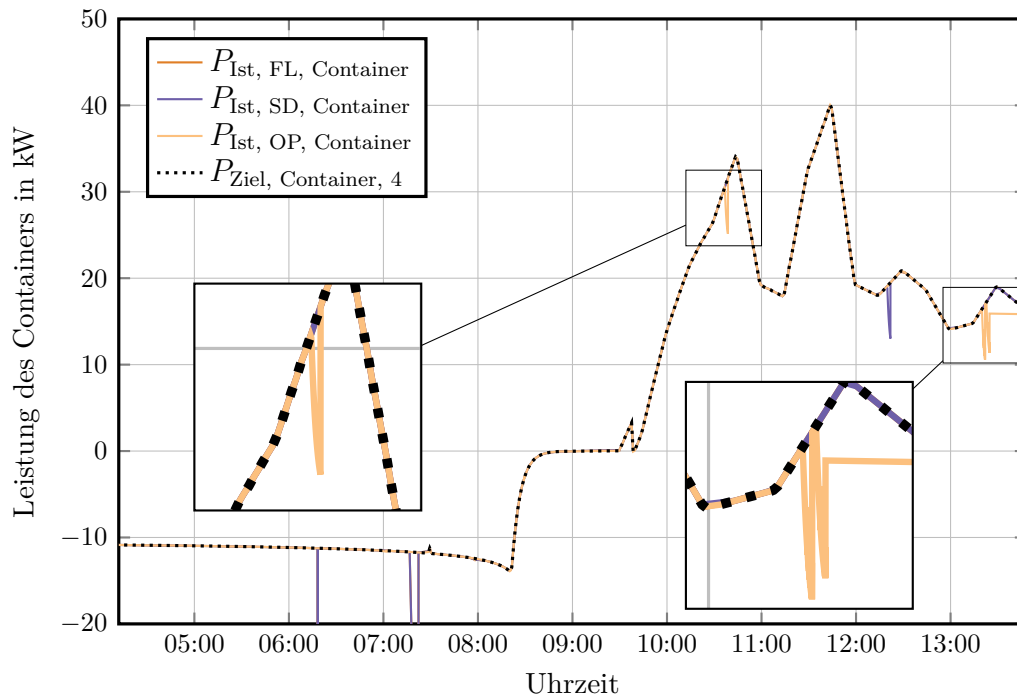


**Abb. 7.14** – Die Abbildung zeigt eine Übersicht der thermischen Punktmassen sowie deren Wärmeströme nach [SA.3]. Die Richtungen dieser Wärmeströme geben zudem die Zählpfeilkonvention des Modells wieder.

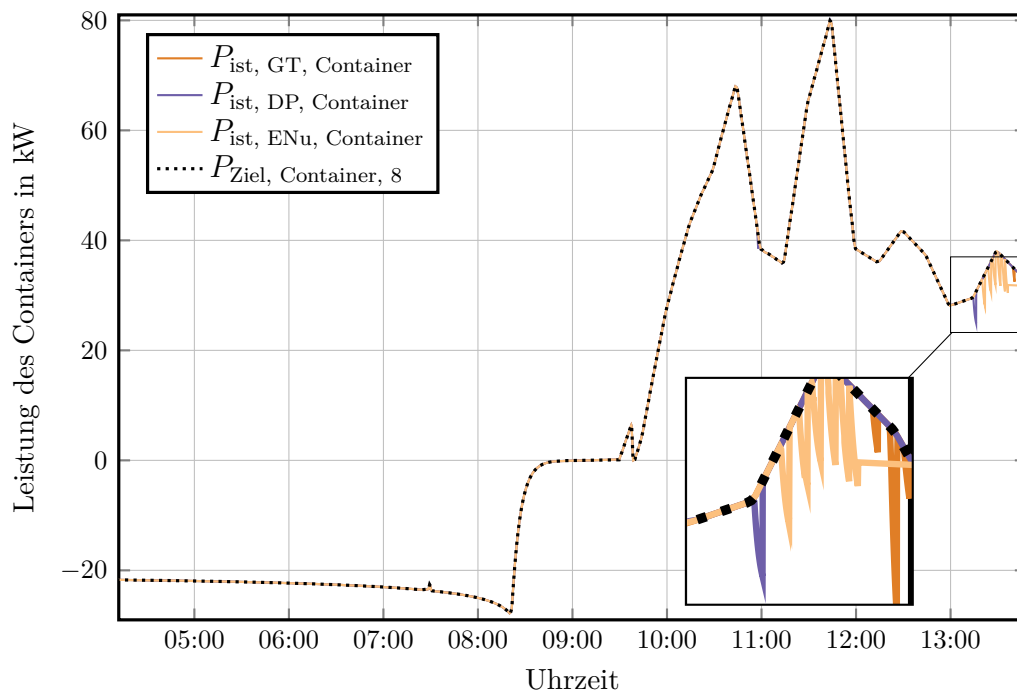


**Abb. 7.15** – Detaillierte Darstellung der Schnittstellen des Speicher-Container-Modells – nach Ergebnissen aus [SA.3].





**Abb. 7.16** – Der Verlauf zeigt den Vergleich der drei Verteil-Algorithmen «Full Load» (FL), «Simple Division» (SD), «Optimization» (OP) sowie in vergrößerter Darstellung die Abweichung vom Sollverlauf an interessanten Stellen. Als Szenario wurden vier Racks in der Rack-Konfiguration «diverse» gewählt.



**Abb. 7.17** – Der Verlauf zeigt den Vergleich der drei Verteil-Algorithmen «Game Theory» (GT), «Division PLUS» (DP), «Enumeration» (ENU) sowie in vergrößerter Darstellung die Abweichung vom Sollverlauf an interessanten Stellen. Als Szenario wurden acht Racks in der Rack-Konfiguration «diverse» gewählt.

**Tab. 7.2** – Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Simulation anhand definierter Auswertungskriterien. Generell werden zwei unterschiedliche Startbedingungen angenommen. In der Startbedingung «nah» liegen die Rackzustände nahe zusammen oder sind gleich, in der Startbedingung «diverse» herrschen Unterschiede beim Ladungszustand und der Temperatur. Es zeigt sich allerdings, dass die wechselnden Startbedingungen keinen großen Einfluss auf das weitere Verhalten haben. Hierzu werden im Folgenden von den Verteil-Algorithmmen folgende Werte verglichen: das Quantil der Abweichung der Soll- zur Istleistung, der durchschnittliche Wirkungsgrad der LE  $\eta_{LE}$  und das Quantil des Wirkungsgrades der LE.

| Kriterium:<br>Szenario: | $Q_p \left( \frac{P_{Ziel}}{P_{Ist}} \leq \pm 1 \% \right)$ |         | $\bar{\eta}_{LE}$ |         | $Q_p (\eta_{LE} \geq 90 \%)$ |         |
|-------------------------|---|---------|-------------------|---------|------------------------------|---------|
|                         | nah   | diverse | nah               | diverse | nah                          | diverse |
| Vier Racks:             |   |         |                   |         |                              |         |
| Full Load (FL)          | 0,999   | 0,999   | 92,7 %            | 94,1 %  | 0,871                        | 0,911   |
| SoC-Balance (SB)        | 0,944   | 0,944   | 93,9 %            | 93,8 %  | 0,919                        | 0,918   |
| Simple Division (SD)    | 0,944   | 0,996   | 94,5 %            | 94,5 %  | 0,944                        | 0,952   |
| Optimization (OP)       | 0,948   | 0,951   | 93,7 %            | 94,1 %  | 0,921                        | 0,939   |
| Game Theory (GT)        | 0,999   | 0,997   | 93,7 %            | 93,7 %  | 0,883                        | 0,884   |
| Divison Plus (DP)       | 0,939   | 0,996   | 94,5 %            | 94,5 %  | 0,944                        | 0,954   |
| Enumeration (ENu)       | 0,943   | 0,997   | 94,5 %            | 94,5 %  | 0,944                        | 0,952   |
| Acht Racks:             |   |         |                   |         |                              |         |
| Full Load (FL)          | 0,999   | 0,999   | 91,2 %            | 91,0 %  | 0,882                        | 0,880   |
| SoC-Balance (SB)        | 0,980   | 0,979   | 91,3 %            | 90,8 %  | 0,905                        | 0,897   |
| Simple Division (SD)    | 0,976   | 0,984   | 92,7 %            | 92,5 %  | 0,923                        | 0,926   |
| Optimization (OP)       | 0,991   | 0,898   | 92,3 %            | 91,9 %  | 0,922                        | 0,922   |
| Game Theory (GT)        | 0,976   | 0,984   | 92,7 %            | 92,5 %  | 0,923                        | 0,926   |
| Divison Plus (DP)       | 0,987   | 0,989   | 93,0 %            | 92,8 %  | 0,940                        | 0,935   |
| Enumeration (ENu)       | 0,983   | 0,957   | 92,8 %            | 92,4 %  | 0,934                        | 0,926   |

Abweichungen die aufgrund der Rackzustände erklärbar sind. Durch das Erreichen von Temperatur- und SoC-Grenzen ist die Leistungsbereitstellung der Racks erschöpft. Somit ist eine Änderung der Betriebsstrategie erforderlich und nicht eine Anpassung der Modellierung der einzelnen Komponenten von Nöten. Am Beispiel des «Full Load»-Algorithmus zeigt sich jedoch, dass beides, eine einfache Implementierung und hohe Wirkungsgrade, nicht immer erreicht werden können. Werden die generellen durchschnittlichen Wirkungsgrade betrachtet, so liegen diese im Bereich von 90 % bis 95 %. In diesem Sinne muss der Anwender entscheiden, wie detailliert und auf welcher Datenbasis sein Verteil-Algorithmus arbeiten soll und welches Zeitintervall er einhalten will oder muss.

In der Simulation wurde vernachlässigt, dass der «Enumeration»-Algorithmus bei unzureichenden Hardwareressourcen auch länger als eine Sekunde zur Bestimmung der neuen Leistungs-Verteilung brauchen kann. Dies könnte aber auch durch ein effizienteres Coding behoben werden. Beim aktuellen Coding wurde auf die Funktion des Algorithmus und nicht auf die Effizienz und die Laufzeit geachtet. Aufgrund des Ansatzes sind die Algorithmen aber modular aufbau- und kombinierbar. Außerdem können durch die Vorauswahl und die Bewertungsfaktoren zusätzlich die Rahmenbedingungen angepasst werden. Zusammengefasst

ist der Container in über 91 % der Zeit in der Lage, die Sollvorgaben bei einer Abweichung von weniger als 1 % zu erfüllen.

## 7.3 Validierung der Simulationen

Ein Vergleich mit realen Messwerten war aus finanziellen und technischen Gründen im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit nicht möglich. Wie sich aber zeigen wird, reicht die gewählte Art der Validierung aus, um zu bestätigen, dass sowohl die entwickelten Modellbestandteile als auch die Routinen zum Netzaufbau ihre Aufgabe in zufriedenstellendem Umfang erfüllen und somit das Vorgehen plausibel ist. Aussagekräftige Simulationen zur Beurteilung des Netzverhaltens ohne und mit aktivem kybernetischem EMS sind dementsprechend möglich. Als Einschränkung muss allerdings festgehalten werden, dass diese Aussage nur unter Beachtung der getroffenen Rahmenbedingungen gültig sind. Eine qualitative Validierung der Ansätze mit realen Messwerten ist ein konsequenter und nötiger nächster Schritt im EMS-Entwurf.

### Quartierebene

Die Validierung des Modells auf Quartierebene wird durch einen Vergleich mit einem Energieflussberechnungs-Tool auf MATLAB-Basis durchgeführt. Der Vergleich erfolgt mit Ergebnissen aus einer mit dem Lastflussrechnungstool PSAT durchgeführten Netzberechnung. Die sogenannte Power-System-Analysis-Toolbox wurde von MILANO am University College Dublin, Irland, entwickelt und in [148, 149] vorgestellt. Sie bietet die grundlegenden Funktionalitäten zur benötigten statischen und dynamischen Lastflussberechnung sowie einen grafischen Editor zur Modellierung von zu berechnenden Netzen auf Basis von MATLAB/Simulink.

Als Simulationsszenario wird ein sommerlicher Wochentag ohne aktive Spannungshaltungsmaßnahmen des EMS gewählt, das heißt nur die nach [12] geltende Blindleistungsregelung ist bei den PV-Anlagen aktiv. Die daraus erhaltenen Abweichungen in den Ergebnissen des Simulationsmodells und den Ergebnissen aus PSAT geben Aufschluss über die Genauigkeit des Quartier-Modells. Als Vergleichswerte dienen die Spannungswerte an den Netzknoten zu ausgewählten, über den Tag verteilten Zeitpunkten. Dies entspricht einer stationären Lastflussberechnung. In Summe wurden für jede Stunde, insgesamt 23, stationäre Lastflussberechnungen mit PSAT durchgeführt. Die hieraus gewonnenen Spannungsbeträge an den Netzknoten werden dann mit den aus der Quartiersimulation gewonnenen Daten verglichen.

In Tabelle 7.3 sind die Durchschnittswerte des relativen Fehlers  $\Delta\bar{U}_{\text{rel}}$  und die des Betrags des relativen Fehlers  $|\Delta\bar{U}_{\text{rel}}|$  für jeweils die vollen Stunden des Tages gezeigt. Es ist ersichtlich, dass sich die Werte im Bereich um die 0,5 ‰ einordnen. Abweichungen dieses Ausmaßes können auf numerische Ungenauigkeiten zurückgeführt werden.

Im Anhang J sind in Tabelle J.1 die von PSAT generierten Spannungsbeträge  $U_{\text{N, PSAT}}$  sowie die aus der dynamischen Netzsimulation hervorgegangenen  $U_{\text{N, Sim}}$  für die beiden Zeitpunkte  $t = 1 \text{ h}$  und  $t = 12 \text{ h}$  beispielhaft für alle Netzknoten gezeigt. Unter der Annahme, dass PSAT zutreffende Resultate liefert, wird deutlich, dass die gefundenen Abweichungen an jedem Knoten für beide Zeitpunkte unterhalb des Promillebereichs liegen und somit als äußerst gering angesehen werden können.

**Tab. 7.3** – Die Tabelle zeigt die Werte der gemittelten relativen Abweichung der Simulationsergebnisse bei Vergleich mit dem dynamischen Netzmodell und den von PSAT gewonnenen Werten, nach [SA.16]. Die Fehler sind als ausreichend klein anzusehen.

| Kennwert                        | $t = 0$ h   | $t = 1$ h   | $t = 2$ h   | $t = 3$ h   | $t = 4$ h   |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$   | -           | -1,5768E-05 | -1,4515E-05 | -1,3059E-05 | -1,2857E-05 |
| $ \Delta \bar{U}_{\text{rel}} $ | -           | 1,5961E-05  | 1,4781E-05  | 1,3394E-05  | 1,3097E-05  |
| Kennwert                        | $t = 5$ h   | $t = 6$ h   | $t = 7$ h   | $t = 8$ h   | $t = 9$ h   |
| $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$   | -1,5204E-05 | -2,1851E-05 | -2,9985E-05 | -1,7287E-05 | -2,4197E-06 |
| $ \Delta \bar{U}_{\text{rel}} $ | 1,5211E-05  | 2,1851E-05  | 2,9985E-05  | 1,7287E-05  | 2,4228E-05  |
| Kennwert                        | $t = 10$ h  | $t = 11$ h  | $t = 12$ h  | $t = 13$ h  | $t = 14$ h  |
| $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$   | -3,2378E-06 | -3,6042E-05 | -7,8917E-05 | -1,2255E-04 | -1,6144E-04 |
| $ \Delta \bar{U}_{\text{rel}} $ | 5,7962E-05  | 1,3920E-04  | 2,1627E-04  | 2,8032E-04  | 3,3964E-04  |
| Kennwert                        | $t = 15$ h  | $t = 16$ h  | $t = 17$ h  | $t = 18$ h  | $t = 19$ h  |
| $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$   | -1,5153E-04 | -1,2209E-04 | -5,7047E-05 | -1,0588E-05 | -2,5856E-06 |
| $ \Delta \bar{U}_{\text{rel}} $ | 3,2607E-04  | 2,8576E-04  | 1,8487E-04  | 8,2222E-05  | 2,3763E-05  |
| Kennwert                        | $t = 20$ h  | $t = 21$ h  | $t = 22$ h  | $t = 23$ h  | $t = 24$ h  |
| $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$   | -4,8958E-03 | -5,9117E-05 | -5,8577E-05 | -4,4538E-05 | -           |
| $ \Delta \bar{U}_{\text{rel}} $ | 4,8958E-03  | 5,9117E-05  | 5,8577E-05  | 4,4538E-05  | -           |

Es ist folglich davon auszugehen, dass die Simulationsergebnisse mit dem beschriebenen Netzmodell eine ausreichende Genauigkeit zum Vergleich der Betriebsstrategien und des EMS-Konzeptes aufweisen.

### Containerebene

Die Validierung der Containersimulation ist indirekt bereits im Abschnitt 7.2.2 zu den Ergebnissen, durch die verwendete Sollleistungs-Kurve und deren Abweichung von der Istleistung gezeigt. Diese ist einerseits abgeleitet aus einer Messung, mit ausreichenden Messdaten aus Moosham. Andererseits stammt sie aus einer Berechnungsgrundlage für Quartiersimulationen, die in [246] von ZEH vorgestellt wird. Die minimalen Abweichungen der jeweiligen Istleistungen aus Tabelle 7.2 und die visuellen Abweichungen der Verläufe in den Abbildungen 7.16 und 7.17 zeigen, dass eine ausreichende Genauigkeit des Modells und seiner Bestandteile vorliegt sowie eine Legitimation der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen gegeben ist. Hinzu kommt, dass die am Ende des Verlaufes zu sehenden Abweichungen, wie schon beschrieben, nicht aufgrund des Modelles, sondern wegen der Rackzustände entstehen. Hier

wird empfohlen, neue Leistungsvorgaben auf Basis des vorgestellten Quartiermodelles zu erzeugen und diese mit dem möglichen Einbau von weiteren Speichern und der Wirkung auf die einzelnen Rackzustände zu vergleichen. Ideal wäre an dieser Stelle auch noch das Einbringen von gemessenen Erzeugungs- und Lastprofilen. Eine Funktion die das implementierte Modell bereits unterstützt.

## 7.4 Zusammenfassung

Zusammengefasst wurde in diesem Kapitel gezeigt, wie das kyELM mit Hilfe geeigneter Simulationsmodelle auf seine Funktion überprüft werden kann. Es wurden vereinfachte Modelle für die Quartier- und Container-Ebene präsentiert. Ersteres kann bei entsprechend vorhandenen Netzdaten automatisch aufgebaut und konfiguriert werden. Demgegenüber stehen allerdings angewendete Vereinfachungen der Realität. Durch das Wissen über die Vereinfachungen können die Ergebnisse der Simulationen eingeordnet und in Relation zu der Realität gesetzt werden. Schlussendlich bieten die Modelle samt ihrer Struktur einen Ausgangspunkt für die Verbesserung und die Implementierung weiterer Komponenten, Optimierungs- oder Management-Ansätze. Das kyELM konnte im Rahmen dieser Arbeit mit den Modellen erfolgreich entwickelt, verbessert und getestet werden. Mögliche nächste Schritte im Entwicklungsprozess und Potentiale werden im nächsten und letzten Kapitel dieser Arbeit vorgeschlagen.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das letzte und schließende Kapitel der Arbeit gibt eine Zusammenfassung der behandelten Themen und zeigt Potentiale der entstandenen Methode auf. Außerdem wird im Ausblick ein mögliches Szenario vorgestellt, wie sich das Energieversorgungsnetz in den nächsten Jahren auf Grundlage der vorgestellten Theorie entwickeln könnte.

### 8.1 Ergebnis dieser Arbeit

In dieser Arbeit wurde ein auf kybernetischen Methoden basierendes, aktives und kybernetisches EMS für die stationäre Energiespeicherung und damit für die Energieverteilung vorgestellt. Hierzu wurde erst eine Einführung in die Themen des Managements aus verschiedenen Bereichen und in die Grundlagen der Energiebereitstellung, -verteilung und -speicherung gegeben. Nach einer Vorstellung der Kybernetik und ihrer Prinzipien wurde das VSM im Detail eingeführt und für die Anwendung in der Technik diskutiert. Ein in die Technik umgewandeltes Schema zur Identifizierung der einzelnen Teilsysteme des VSM wurde präsentiert und für das Energiemanagementsystem in einem Ortsnetzquartier angewendet. In dem daraus entstandenen kybernetischen Energie- und Leistungsmanagement (kyELM) konnten mehrere Rekursionsebenen und die nötigen zu realisierenden Funktionen definiert werden. Zur Überprüfung des Konzeptes wurden zwei Simulationsmodelle in Form von studentischen Arbeiten entwickelt und vorgestellt. Mit diesen konnten die Hauptbestandteile des Managementsystems, das QEMS und das CEMS adäquat auf ihre Funktion und plausible Arbeitsweise überprüft werden.

Somit können die eingangs gestellten Fragen wie folgt beantwortet werden:

*Was ist Management allgemein und wie ist ein EMS aufzubauen?*

Dank der Auseinandersetzung und des in Kapitel 2 dargestellten Vergleiches mit unterschiedlichen Managementmethoden in ausgewählten Bereichen konnte die Basis für die essentiellen Bestandteile eines Energiemanagements im Teilkapitel 2.2 gelegt werden. Der Aufbau eines EMS ist in der Norm EN ISO 50001:2011 [159] definiert und kann durch die im Teilkapitel 3.3 erläuterten kybernetischen Prinzipien und den Methoden und der Struktur des VSM wie in den Kapitel 4 gezeigt, ergänzt und erweitert werden.

*Auf welchen Grundlagen basiert die Kybernetik und im Speziellen das VSM?*

Hier sind die im Teilkapitel 3.3 vorgestellten kybernetischen Prinzipien und im Speziellen die Autonomie, Rekursivität und Lebensfähigkeit zu nennen. Das VSM wurde im Kapitel 4 detailliert mit Hilfe der Literatur von BEER und MALIK eingeführt und für die Anwendung in der Technik diskutiert.

*Ist das VSM für die Anwendung in der stationären Energieversorgung geeignet?*

In der Simulation und dem kyELM light-Ansatz, einer in Hardware umgesetzten Vorstufe des

kyELM, konnte gezeigt werden, dass die EMS-Komponenten REMS, CEMS und QEMS in ihrer Kombination funktionieren und entsprechende Leistungsvorgaben und Betriebsstrategien erfüllen. Weiter konnte gezeigt werden, dass Algorithmen und Kommunikationsstrukturen und Protokolle in den Rekursionsebenen wiederverwendet werden können. Somit ist das VSM geeignet in der technischen Anwendung. Ein detaillierter Test des kyELM in Hardware aufgrund der vorgeschlagenen Prüfstandslandschaft oder in eigens dafür organisierten Projekten sollte weiter durchgeführt werden. Hierdurch können die in der Theorie geeigneten Vorgehensweisen praktisch gezeigt werden.

*Wie kann die technische Problemstellung in einem VSM umgesetzt werden?*

Die Antwort darauf wird detailliert im Kapitel 6 gegeben. Zusammengefasst bietet das VSM die nötige Struktur technisch komplexe Problemstellungen zu lösen. In Abschnitt 4.2.9 bietet das gezeigte Schema einen Leitfaden zur Erstellung des Gesamtsystems kyELM. Gegebenenfalls sind im Rahmen der Implementierung weitere methodische und technische Lösungsansätze zu ergänzen. Diese müssen im Bedarfsfall entsprechend recherchiert und angewendet werden.

*Welche Betriebsstrategien können verfolgt werden?*

Hierzu sei auf die Abschnitte 6.3.2 und 6.3.3 verwiesen. Dort werden mögliche Betriebsstrategien für das Quartier und den Container gezeigt. Diese stellen bei Weitem aber nicht alle möglichen Lösungen dar. Hier kann die Kreativität der Entwickler und Netzbetreiber sowie die sich ändernde Technik und Gesetzeslage neue Ansätze hervorbringen. Entscheidend ist, dass das kyELM ein offenes und evolutionär anpassbares System (zum Beispiel: austauschbare Betriebsstrategien oder Verteil-Algorithmen) ist, da es nach dem Vorbild des VSM entwickelt wurde. Dies ist das Hauptunterscheidungsmerkmal zu dedizierten konstruktivistischen Lösungsansätzen.

*Ist ein modularer und skalierbarer Aufbau im Versorgungsnetz möglich?*

Das entstandene kyELM bejaht diese Frage. Vor allem in Abbildung 6.1 ist der modulare und skalierbare Aufbau zu sehen. Wird wie vorgeschlagen die Leistungselektronik angepasst und in der möglichen Multilevel-Topologie ausgeführt, so kann in dessen Modulen ebenfalls ein aktives und kybernetisches EMS integriert werden.

Zusammengefasst sind hier die wichtigsten Systemeigenschaften und Funktionen des kyELM aufgeführt:

- modularer und skalierbarer Aufbau über die betrachteten Rekursionsebenen.
- nach kybernetischen Prinzipien und der Theorie des VSM aufgebaut und strukturiert.
- lebensfähig im Sinne des VSM.
- definierte Schnittstellen in den drei Bereichen: Kommunikation, Sicherheit und Energie.
- Einteilung eines Quartiernetzes in definierte Rekursionsebenen.
- gezielte und aktive Umweltkopplung auf jeder Rekursionsebene.
- Vorschlag zur aktiven Prädiktion zukünftig nötiger Betriebszustände.

## 8.2 Ausweitung des Anwendungsbereichs und Potential der Arbeit

Das Thema des Energiemanagements ist mit dieser Arbeit nicht allumfassend behandelt. Wie in der Arbeit an einigen Stellen gezeigt, gibt es noch Potentiale und Angriffspunkte zur Verbesserung der Ergebnisse und des Resultats «kyELM» selbst. Konstruierte Erkenntnisse,



wie der hier präsentierte Vorschlag für ein aktives und kybernetisches EMS in der stationären Energiespeicherung, besitzen nach der Philosophie des radikalen Konstruktivismus keinen Anspruch auf Objektivität und Allgemeingültigkeit. Stattdessen bestimmt die Viabilität die Qualität der gezeigten Erkenntnisse. Die vorliegende Arbeit ist das Resultat einer konzeptionellen und theoretischen Forschungsarbeit, in der die Umsetzung der entworfenen Modell-Konzepte für das kyELM in einen Prototypen gegeben ist. Um dabei dem Anspruch auf höchstmögliche Gangbarkeit gerecht zu werden sowie den blinden Fleck des Beobachters zu beleuchten und zu minimieren, erfolgte neben der Selbst-Reflexion eine regelmäßige Überprüfung und Spiegelung der Ergebnisse mit Kollegen aus der Energie-, Regelungs- und Steuerungstechnik. Für weiterführende Arbeiten werden folgende Zielsetzungen empfohlen:

- Die in dieser Arbeit verwendeten Erzeugungsprofile nach [166] und Lastprofile des BDEW können durch reale Messdaten oder entsprechend dimensionierte Simulationsmodelle ersetzt werden. Somit ist eine Überprüfung der Algorithmen und Betriebsstrategien mit mehr Realitätsbezug gegeben und vor allem das Verhalten des EMS auf dynamische Änderungen besser diskutierbar. An dieser Stelle sei auf ein vielleicht adäquates Werkzeug zur Erstellung von Lastprofilen für Haushalte in Netzen mit weniger als 150 Teilnehmern hingewiesen. Dies stellen WAGLER und WITZMANN in [232] vor.
- Für das QEMS wurde ein erster Vorschlag für die Betriebsstrategie gezeigt. Hier können durch gezielte Optimierungen und definierte Rahmenbedingungen neue Ansätze generiert werden.
- Es wurde von einem fehlerfreien und symmetrischen Netzbetrieb ausgegangen. Da dies eine sehr starke Vereinfachung der Realität darstellt, muss eine Überprüfung der Ergebnisse für spezifische Fehlerfälle und den unsymmetrischen Betrieb durchgeführt werden.
- Ein nächster konsequenter Schritt nach der simulativen Validierung ist die Entwicklung der entsprechenden Hardware-Komponenten und die Umsetzung des EMS in einem Feldtestgebiet ähnlich Moosham oder einem geeigneten Smart-Grid-Labor.
- Außerdem muss die Idee zur Umsetzung des VSM in vergleichbarer Weise in den angesprochenen Hardware-Komponenten betrachtet werden. Das heißt entsprechende Platinendesigns und Architekturen, die über mehrere Rekursionsebenen und in mehreren Komponenten modular und skalierbar mit einheitlichen Schnittstellen aufgebaut werden können.
- In dieser Arbeit wurde nur die Domäne der elektrischen Energie betrachtet. Hier ist es ebenso denkbar, das EMS domänenübergreifend einzusetzen. Der Ansatz und die Methode sollten nur geringe Anpassungen und eine Definition der anderen Domänen-Schnittstellen erfordern. Im Grunde sollte hierbei in der Meta-Sprache «Energie» gesprochen und die spezifischen Zeitcharakteristika der jeweiligen betrachteten Domäne berücksichtigt werden.
- Nachdem mit dem fEPM ein intelligentes und VSM-basiertes EMS im Fahrzeug verbaut ist, wird eine Zusammenführung im Sinne einer technischen Kooperation von kyELM und fEPM im Rahmen des Forschungsfeldes V2G empfohlen.
- Im Aufgabengebiet der Ebene Quartier selbst ist eine Einführung zusätzlicher Rekursionsebenen zu prüfen. Die Portierung der Idee in höhere Spannungsebenen verspricht eine weitere Flexibilisierung im Sinne der Befähigung der politisch motivierten Energiewende
- Im Rahmen der Kybernetik kann eine Sensitivitätsanalyse nach VESTER, vorgestellt in [230], durchgeführt werden, um die entsprechenden Parameter zu identifizieren, die

ein tieferes Verständnis der systemischen Vorgänge einer zukünftigen regenerativen Energieversorgung versprechen.

- Der genannte zelluläre Ansatz des VDE kann und muss mit der hier vorgestellten Methode kombiniert werden. Daraus sollte sich für beide Ideen eine gemeinsame und gewinnbringende Symbiose entwickeln lassen.
- Im Rahmen der Rack-Auswahl und der aktuellen Diskussion um den Einsatz künstlicher Intelligenz und selbstlernenden Algorithmen sollten auch hier Konzepte für Verteil-Algorithmen und -Methoden betrachtet werden.
- Nachdem in höheren Spannungsebenen eine Vermischung von AC- und DC-Netzen zu sogenannten Mischnetzen stattfindet, ist auch der Einsatz des kyELM (AC-Netz) und in Kooperation mit dem fEPM (DC-Netz) ein potentielles Forschungsthema.

### 8.3 Ausblick

Schlussendlich soll noch ein Ausblick für die Entwicklung des EMS gegeben werden, dazu sei eine längere Passage aus [32] zitiert. In dieser geht BRAUNER auf die Idee ein, das Energieversorgungsnetz anhand des Vorbildes der Biologie zu entwickeln.

74.)

---

*„Die Biologie kann als Vorbild für die sichere Energieversorgung dienen:*

- *Der Stoffwechsel bei den Warmblütern funktioniert auch, wenn die Funktion des Großhirns vorübergehend (z. B. durch Ohnmacht) ausfällt.*
- *Die Grundversorgung ist dezentral und redundant organisiert. Der Sinusknoten als physiologischer Schrittmacher des Herzens wird nicht vom Großhirn gesteuert, sondern bekommt Informationen über den [CO<sub>2</sub>]-Gehalt des Blutes über zwei Sensoren in der Halsschlagader. Bei Ausfall des Sinusknotens übernimmt der Atrioventrikularknoten weiterhin die Funktion zur Auslösung von koordinierten Kontraktionen der Vorhöfe und der Herzkammern.*
- *Das Großhirn kann nicht in den Stoffwechsel eingreifen und weder Herzschlagfrequenz, Verdauung oder Grundumsatz beeinflussen. Dies stellt eine Art biologischer Cyber Security dar.*
- *Das Nachhirn steuert viele zell- oder organnahe Vorgänge nicht über Nervenstränge (das wären sehr viele) sondern über Hormone und teilt damit allen Zellen Mangel- oder Überschusssituationen mit. Die Zellen oder Organe können entsprechend ihrer augenblicklichen Situation oder funktionalen Bedeutung aber selbst entscheiden, welches Verhalten sie daraus ableiten.*

*Dezentrale Energiesysteme könnten die Biologie als Vorbild für eine robuste und sichere Versorgungsstruktur nehmen:*

- *Spannung und Frequenz können ähnlich wie ein Hormon in der Biologie als Indikator für eine Versorgungssituation sein.*
- *Intelligente Endgeräte könnten hieraus ein systemangepasstes Verhalten ableiten. Bei größeren Abweichungen der Spannung können sie sich lokal an der Spannungsregelung und Blindleistungseinspeisung beteiligen. Bei Frequenzabweichungen können sie durch Änderungen der Einspeiseleistung oder Leistungsentnahme helfen, Engpasssituationen zu vermeiden.*

- *Diese dezentralen Systeme funktionieren auch, wenn sich ein Netz in mehrere Inseln auflöst. In jeder Insel können so die geeigneten und häufig unterschiedlichen Maßnahmen dezentral ergriffen werden.*
- *Einzelne Geräte oder Anlagen müssen sich nicht beteiligen, wenn dies aufgrund ihrer Bedeutung oder Funktion nicht notwendig ist.*

*[...] Das Einfamilienhaus oder Wohngebäude bildet die kleinste Informationszelle. Im Einfamilienhaus kann ein eigenes Informationssystem [...] vorhanden sein, das mit dem Smart Meter kommuniziert und die dort vom überlagerten Versorger empfangenen variablen Tarife für die interne Verbrauchssteuerung nutzt. Dieses System ist von außen nicht sichtbar und führt auch aus Sicherheitsgründen keine Kommunikation mit äußeren Systemen. Weiterhin gibt es keinen Zwang ein solches System zu betreiben und die Systeme können auch unterschiedliche sein. Im Wohngebäude kann ein hauseigenes Energieautomatisierungs- und Abrechnungssystem den internen Energieaustausch zwischen mehreren Parteien organisieren und abrechnen. Zum überlagerten System wird nur die Differenzenergie zwischen Eigenerzeugung und Eigenbedarf nach Tarifoptionen gehandelt. Die Siedlung bzw. das Niederspannungsnetz können ebenfalls ein eigenes unabhängiges Energieautomatisierungssystem mit erweiterten Funktionen für Kleinkraftwerke und KWK-Kopplung haben. Übergeordnet sind Systeme für Regionen und schließlich für Regelzonen möglich. Es ist aber nicht erforderlich, die Informationen aller Teilkomponenten in einem großen zentralen Informationssystem zu sammeln. Dezentralität erlaubt, viele verschiedene dezentrale Automatisierungssysteme mit unterschiedlichen Aufgaben und aus verschiedenen Technikgenerationen im kooperativen Betrieb zu verbinden, ohne dass ein übermäßiger Datenaustausch notwendig ist. Nichts wäre schlimmer, als wenn die durch Dezentralität mit Eigenerzeugung gewonnene Unabhängigkeit und Versorgungssicherheit durch eine zentrale und störungsanfällige Informations- und Automatisierungstechnologie teilweise oder ganz aufgehoben würde.“*

[32, S. 181–183]

Dieses Zitat zeigt, dass der Blick in die Natur helfen kann, ihre komplexen Probleme zu lösen. Wie BEER es mit der Betrachtung des Nervensystems zur Entwicklung des VSM gemacht hat, so kann auch im Sinne des EMS ein Vergleich mit der Natur gewinnbringende Erkenntnisse bringen, wie der Auszug von BRAUNER zeigt. Die im Zitat genannten Aspekte zeigen, dass die Kombination des Ansatzes von BEER und die in dieser Arbeit ergänzenden Ideen im Bereich des EMS in die geschilderte Richtung gehen. Wird nun noch die Idee des zellularen Ansatzes genutzt, die auch in Argumenten des Zitates wiederzufinden ist, so sollte das eingangs geschilderte Problem der Energieversorgung und -wende gelöst werden können.

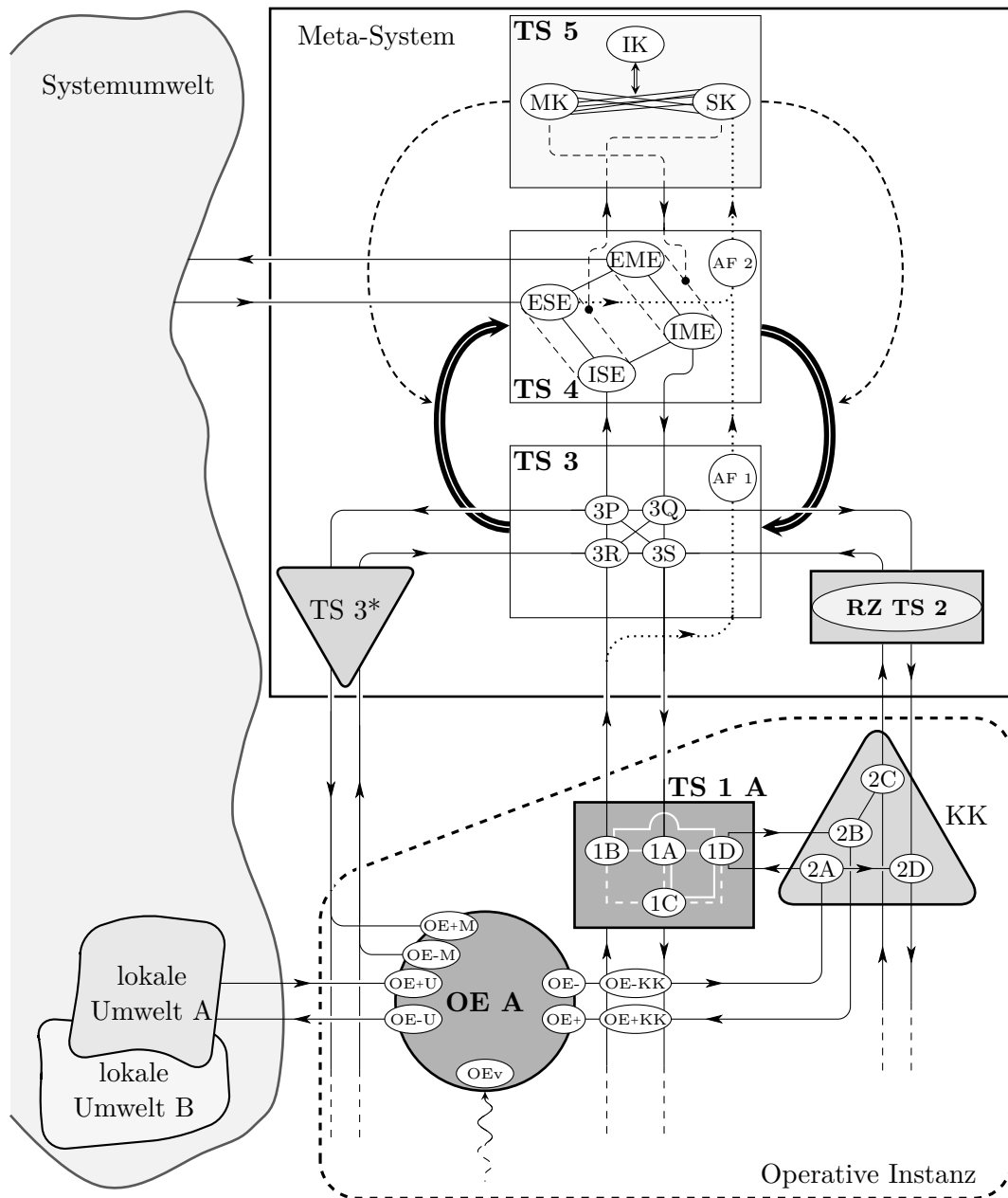


# A VSM-Schnittstellen-Knoten

Wie in Kapitel 4 gezeigt enthält das VSM spezifische Schnittstellen, über die die Teilsysteme ihre Informationen und Vorgaben austauschen. Für einen Gesamtüberblick sind diese in Tabelle A.1 beschrieben und in Abbildung A.1 dargestellt. Sie können als Vorlage für die in Kapitel 6 vorgestellte Umsetzung in die Technik der einzelnen VSM-Ebenen dienen.

**Tab. A.1** – Übersicht über die Funktionen der Schnittstellen-Knoten zur Informationsverarbeitung in Anlehnung an [23, S. 147, 176 & 189] und [141, S. 130 & 136].

| Knoten          | Aufgaben   |
|-----------------|--|
| OE+/OE-         | Ein- und Ausgang der OE ihrer Hauptfunktion  |
| OE+U/OE-U       | Verbindung der OE zu ihrer Umwelt (Sensor, Datenverbindung, etc.)  |
| OE+M/OE-M       | Schnittstelle für den direkten Meta-System-Eingriff des TS 3*  |
| OE <sub>v</sub> | operationale Verbindung zwischen den OE – je nach System-Definition vorhanden  |
| 1A              | Empfangen der Soll-, Umwelt- und Normativen-Daten des TS 3, 4 und 5  |
| 1B              | Senden der verdichteten Ist-Daten an TS 3  |
| 1C              | Planungsfunktion des TS 1 (TS 4 und 5 der nächst niedrigeren Rekursionsebene)  |
| 1D              | Stellen der Soll- und Regelgrößen sowie Einleiten von Reflexen   |
| 2A              | Überwachung der Einhaltung von Regelvorgaben für die OE  |
| 2B              | Generieren der angepassten, koordinierten Sollwerte  |
| 2C              | Senden von abstrahierten und gefilterten Informationen an die RZ<br>⇒ Empfang von Informationen anderer Koordinations-Knoten |
| 2D              | Senden von Informationen an andere Divisionen<br>⇒ Empfang von Informationen der RZ  |
| 3P              | Anfordern von Informationen aus RZ TS 2 und TS 3*  |
| 3Q              | Empfang von Befehlen der planerischen Ebene  |
| 3R              | Empfang der Informationen der TS 1 für die planerische Ebene sowie gezieltes Anfordern von Informationen aus den TS 1        |
| 3S              | stetiger Empfang von gefilterten Informationen von der RZ des TS 2 sowie Senden von Vorgaben an die TS 1                     |
| ESE             | Erfassen der Umwelt und Ausgabe der Zustandsbeschreibungen der Umweltsituation   |
| ISE             | Empfang der Informationen des Autonomen Managements und Abgleich dieser mit Umweltinformationen                              |
| EME             | Empfang der Beobachtungsziele für die Auswertung der Umweltdaten   |
| IME             | Empfang der Betriebsziele und -strategien des TS 5 und Abgleich dieser mit den Umweltinformationen                           |
| MK              | Umsetzung des Management-Leitbildes in den konkreten Aktorik-Komponenten oder Ausführungsorganen                             |
| IK              | Methodik, Regeln wie Aushandlungsprozesse zwischen SK und MK stattfinden   |
| SK              | Aufnahme der Informationen der zentralen Befehlsachse, repräsentiert durch Daten von TS 3, TS 4 und dem AF 2                 |



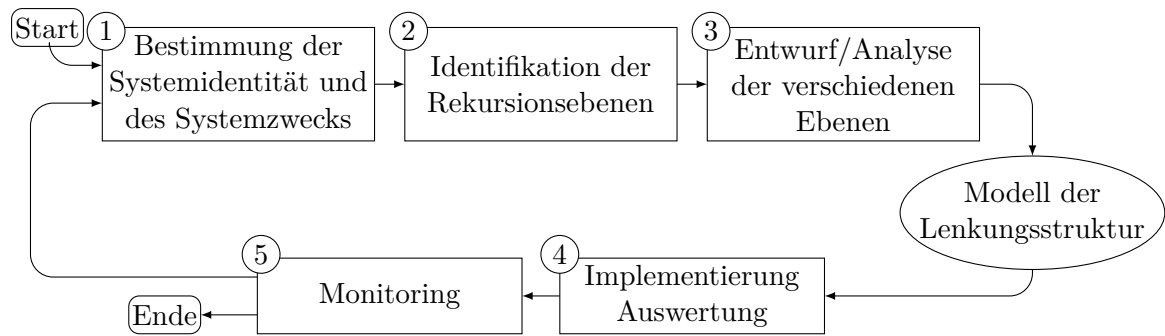
**Abb. A.1** – Das Bild zeigt das VSM nach BEER sowie die Schnittstellen-Knoten im Abgleich mit den Ausführungen von MALIK nach den Quellen [21, 23, 141]

## B Konzepte zur Identifizierung der VSM-Bestandteile

Im Folgenden ist das im Abschnitt 4.2.9 erwähnte Original «A GUIDE FOR USING THE VSM» von BRITTON aus [35, S. 259–263] wiedergegeben. Außerdem zeigt Abbildung B.1 ein ähnliches Vorgehen zur VSM-Bestandteil-Identifizierung. Es wird von ESPINOSA in [71] vorgestellt und angewendet. Tabelle B.1 zeigt ergänzend noch die Erkenntnisse von ADAM, der einen Vergleich der VSM-Entwurfskonzepte von ESPEJO, GOMEZ, HEROLD und MALIK zeigt.

**Tab. B.1** – VSM-Entwurfskonzept-Vergleich nach ADAM in [3, S. 253]

| ESPEJO [65]                    | GOMEZ [96]   | MALIK [142]   | HEROLD [103]   |
|--------------------------------|--|---|--|
|                                |  |   | Analyse der Komplexität des zu bewältigenden Problems  |
| Bestimmung der Rekursionsebene | Gestaltung der obersten Rekursionsebene                      | Bestimmung der Rekursionsebene                      | Grobe Konzeption der zukünftigen Unternehmensstruktur  |
| Bestimmung der OE der TS 1     |  |   | Detaillierte Gestaltung der TS 1 (1. RE)   |
|                                | Gestaltung der Lenkungsstruktur der Tätigkeitsbereiche       |   | Zentralisierung und Dezentralisierung der «supporting functions»                             |
|                                | Gestaltung der Koordination der TS 1 durch die TS 2, 3, 4, 5 | Gestaltung der Interaktion zwischen den OE der TS 1 | Gestaltung des Managements (1. RE) – TS 2, 3, 4, 5   |
|                                |  |   | Gestaltung des Managements (2. RE)   |
|                                |  | Gestaltung des Meta-Systems (persönliches Netzwerk) | Lösung der Probleme zwischen den TS 1 einer Rekursionsebene                                  |
|                                |  |   | Ausnutzung der Synergien zwischen den TS 1 einer Rekursionsebene                             |
|                                |  | Synchronisierung der Teilsysteme (Zeit, Rhythmus)   | Sicherstellung des Informationsflusses innerhalb und zwischen den RE – Gremien, Sitzungstakt |
|                                |  | Implementierung                                     | Implementierung und Überwachung  |



**Abb. B.1** – Die Abbildung zeigt den zirkularen Kreislauf wenn das VSM als Entwurfs- oder Analysetool verwendet wird. Der Prozess ist angelehnt an die Ausführungen ESPINOSA in [71].

75.)

„A GUIDE FOR USING THE VSM

*This section describes a procedure for applying the VSM. It is particularly suited for qualitative diagnostic and design applications. The major steps I use are listed below in the order I usually start them. However, in some cases, it is better to start by identifying operational elements first and then work up to the whole, rather than starting with the whole and working down. The sequence of steps is not linear. Each step feeds back on previous steps. You may cycle through several steps before you are fully satisfied with the results.*

**Step 1.** *Name the viable system you are going to investigate or design (hereafter called the system-in-focus), the level above, and the level below. You must consider a minimum of three levels for your analysis or design to be effective. If you only consider one level then you run the risk of assuming the organizational unit is viable when it is not nor should be.*

**Step 2.** *Specify the espoused purpose of the system-in-focus. (Note: your initial specification of purpose may change once you have completed further steps.) The initial purpose defines your viewpoint in broad terms. If there is doubt about the espoused purpose, that is, you suspect there is not a coherent identity, then go to step 12 and then to step 3. Alternatively, assume a purpose and continue.*

**Step 3.** *Identify all the people whom you consider to be included in the system-in-focus, given the system name (step 1) and the purpose (step 2). Record the total number of people.*

**Step 4.** *Identify the operational elements. These are the major subgroups of people who act to achieve the purpose defined in step 2. To do this you may need to identify the major processes that are essential for achieving the purpose. Compare the elements with your preliminary mapping of levels of recursion in step 1. Do they coincide? Change as necessary.*

**Step 5.** *List and describe the major interactions between the operational elements. There are three types of interaction that must be considered: direct, indirect, and management. The direct interactions are those that occur between the operations internally. The indirect interactions between the operations occur externally through the System 1 environment. The management interactions occur between the management units of the operational elements. There may be more than one*



---

actual interaction of any type. It is possible that managers at System 1 also have managerial roles at System 3. If so, it is important to distinguish between the System 1 and 3 roles. System 1 behavior occurs when a manager makes decisions from the viewpoint of the operational element which (s)he manages. System 3 behavior occurs when the manager makes decisions for the benefit of all the operational elements (i.e., for the benefit of System 1 in total). Process flow charts, information flow charts, and activity networks are useful instruments for describing the interactions between the operational elements. Sometimes it is useful to overlay the charts on a scale diagram of the facility being studied.

**Step 6.** Using the interactions described in step 5, identify System 2, 3\*, and the three major functions of System 3. A major function of System 3 is required to manage each of the types of interactions: direct, indirect, and management. In general, only one function is needed to control the interactions of each type. System 2 and System 3\* will each contain more than one subsystem: identify all the major ones. For example, a manufacturing operation will have at least three subsystems of System 2: production control, quality control, and equipment maintenance.

**Step 7.** Identify who performs the major functions of System 3 and describe how they integrate and coordinate their behavior.

**Step 8.** Identify who performs the System 2 activities. Describe how these people integrate and coordinate their behavior. To whom are the System 2 people accountable in System 3? Do the subsystems of System 2 coordinate their approach to System 1? If each subsystem has its own «rules and language,» and if these are imposed on System 1, then it will experience a variety overload due to the different «rules and languages». For an actual example of this occurrence, see Britton and McCallion (1985).

**Step 9.** Identify who performs the System 3\* activities. Describe how these people integrate and coordinate their behavior. To whom are the System 3\* people accountable in System 3? Are the auditing and improvement functions of System 3\* being properly carried out? Are there any missing functions?

**Step 10.** Describe how the resources bargaining is carried out and list and describe the main rules and regulations of the organization that are imposed on System 1 (command channel). How much autonomy does System 1 have? Is the command channel overloaded? How? Why? One difficulty that may be encountered is distinguishing between command channel, System 2, and System 3\* communication to System 1. Command channel communication is always of the type: «You (System 1) must do this or else I (System 3) will punish you.» System 2 communication is advisory: «I advise you (System 1) to do this so that you may efficiently perform your function. If you ignore my advice and fail to efficiently perform your function then System 3 may punish you.» System 3\* communication is informative: «I recommend you (System 1) do this to improve the way you perform your function. If you ignore my recommendation and fail to improve then System 3 may punish you.»

**Step 11.** a. Identify the major functions of System 4. These will be concerned with improving the capability of System 1 as a whole. (Improving just one operational element is not considered at this level of recursion, but at the next lower level.)  
b. Identify the people or groups of people who perform these functions. Describe the existing procedures for integrating and coordinating their behavior. Describe how they review these procedures. Do they have a common view of the organization? Are they using a common data base? Are they using a coherent and

*consistent set of assumptions for producing their development plans?*

*c. Describe how the people at System 4 interact with those at System 3. How are management attention and organizational resources apportioned between System 3 and System 4 activities. Is there a proper balance between System 3 and System 4 activity? Too much System 4 activity can lead to cash flow problems and bankruptcy or takeover. Too much System 3 activity can lead to loss of market share and thus to bankruptcy or takeover. Helpful hint: If the key person at System 5 (e.g., a managing director) has come up through the ranks there is every likelihood (s)he will spend too much time at the System 3 level. If this happens, you can be sure that System 4 will be ineffective, and it is unlikely that there will be a strong and coherent identity at System 5.*

**Step 12.** *a. Identify the major stakeholders of the system-in-focus. The stakeholders are any person or group of people who are directly affected by the behavior of the system-in-focus. Six major types of stakeholders should be considered: customers/clients, employees, suppliers, debtors, creditors, and government.*

*b. Describe how the stakeholders contribute to the identity of the system-in-focus (i.e., describe how the values of the system-in-focus are determined). Is there a coherent and accepted identity, that is, do the stakeholders share a common set of values with respect to the system-in-focus? Is the identity explicitly formulated? (If it is it will normally take the form of a mission statement or a defined set of values.) Describe how the values are maintained and promulgated.*

**Step 13.** *Do the people at Systems 3, 4, and 5 have a common view of the system-in-focus? Do they use a common data base? Do they use a common set of assumptions for decision making?*

**Step 14.** *Describe the alerting channel. How well does it work?*

**Step 15.** *Could System 1 be reorganized to better enable it to meet environmental demands and therefore reduce the amount of work that Systems 2, 3\*, 3, 4, and 5 need to do? This question has been placed last for two reasons. First, it can't be answered properly until the viable system has been described. Second, it is less important than the first 13 steps. If the viable system is working effectively, the System 1 will be gradually improved (reorganized) to better enable it to meet environmental demands. Again I emphasize that the starting point is less important than ensuring that the management system can learn and adapt. Notwithstanding this comment, one can use experience to provide a starting point that will reduce the learning time, for example, by using group technology and/or sociotechnical theory."*

---

[35, S. 259–263]

## C Bestimmung elektrischer Kurzschlussgrößen des Netzes

Für die Simulation des Quartiers ist es nötig, das Netz der überlagerten Ebene zu charakterisieren. Für die Vereinfachung und die Netzmodellierung mit allen Verbrauchern und Leitungen wird deshalb die Kurzschlussimpedanz und -reaktanz der höheren Netzebene bis zum ONT bestimmt. Die Berechnung der Kurzschlussgrößen wird nach der Norm DIN 60909 [158] durchgeführt und ist im Folgenden erläutert.

Für die Zusammenfassung der Größen vor dem Ortsnetzquartier – Größen auf der Primärseite des Transformators – werden die Größen der Zuleitung, des Mittelspannungstransformators und des Niederspannungstransformators berücksichtigt. Die Daten für diese Größen wurden vom Netzbetreiber – Kraftwerke Haag – bekannt gegeben. Diese Größen werden zusammengefasst zu den Netz-Ersatz-Größen, die auf die Sekundärseite – Quartierseite – des Niederspannungstransformators bezogen werden.

Im Folgenden werden die Gleichungen zur Berechnung der Kurzschlussimpedanz eines Transformators vorgestellt. Gleichzeitig erfolgt die Berechnung der Größen für einen Mittelspannungstransformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 110 kV auf 20 kV, einer Nennscheinleistung von  $S_{rTMS} = 20 \text{ MVA}$ , einer relativen Kurzschlussspannung  $u_k = 8 \%$  und der Wirkkomponente der relativen Kurzschlussspannung  $u_r = 0,6 \%$ :

$$Z_{TMS} = \frac{u_k \cdot U_{rTMS}^2}{100 \% \cdot S_{rTMS}} = \frac{8 \% \cdot (20 \text{ kV})^2}{100 \% \cdot 20 \text{ MVA}} = 1,60 \Omega \quad (\text{C.1})$$

$$R_{TMS} = \frac{u_r \cdot U_{rTMS}^2}{100 \% \cdot S_{rTMS}} = \frac{0,6 \% \cdot (20 \text{ kV})^2}{100 \% \cdot 20 \text{ MVA}} = 120 \text{ m}\Omega \quad (\text{C.2})$$

$$X_{TMS} = \sqrt{Z_{TMS}^2 - R_{TMS}^2} = \sqrt{(160 \Omega)^2 - (120 \text{ m}\Omega)^2} = 1,59 \Omega \quad (\text{C.3})$$

Diese Größen werden im nächsten Schritt auf die Sekundärseite des Niederspannungstransformators bezogen. Hierbei gilt das Übersetzungsverhältnis von  $\ddot{u}_{NS} = \frac{20000}{400}$ :

$$R'_{TMS} = R_{TMS} \cdot (\ddot{u}_{NS})^2 = 120 \text{ m}\Omega \cdot \left( \frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 = 48 \mu\Omega \quad (\text{C.4})$$

$$X'_{TMS} = X_{TMS} \cdot (\ddot{u}_{NS})^2 = 1,595 \Omega \cdot \left( \frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 = 638 \mu\Omega \quad (\text{C.5})$$

Weiter ergeben sich für die Berechnung der Größen eines Niederspannungstransformators mit einem Übersetzungsverhältnis von 20 kV auf 400 V, einer laut Datenblatt gegebenen

Nennscheinleistung von  $S_{rTNS} = 315 \text{ kVA}$ , einer relativen Kurzschlussspannung  $u_k = 4\%$  und der Wirkkomponente der relativen Kurzschlussspannung  $u_r = 1\%$ :

$$Z_{TNS} = \frac{u_k \cdot U_{rTNS}^2}{100\% \cdot S_{rTNS}} = \frac{4\% \cdot (400 \text{ V})^2}{100\% \cdot 315 \text{ kVA}} = 20,3 \text{ m}\Omega \quad (\text{C.6})$$

$$R_{TNS} = \frac{u_r \cdot U_{rTNS}^2}{100 \cdot S_{rTNS}} = \frac{1\% \cdot (400 \text{ V})^2}{100\% \cdot 315 \text{ kVA}} = 5,1 \text{ m}\Omega \quad (\text{C.7})$$

$$X_{TNS} = \sqrt{Z_{TNS}^2 - R_{TNS}^2} = \sqrt{20,3 \Omega^2 - 5,1 \text{ m}\Omega^2} = 19,6 \text{ m}\Omega \quad (\text{C.8})$$

Als nächstes folgt die Impedanz der Leitung zwischen dem Mittel- und Niederspannungs-  
transformator, die auf die Sekundärseite des Niederspannungstransformators bezogen wird:

$$Z_{LMS-NS} = 1,74 \Omega + i \cdot 1,27 \Omega \quad (\text{C.9})$$

$$R'_{LMS-NS} = 1,74 \Omega \cdot \left( \frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}} \right)^2 = 696 \mu\Omega \quad (\text{C.10})$$

$$X'_{LMS-NS} = 1,27 \Omega \cdot \left( \frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}} \right)^2 = 508 \mu\Omega \quad (\text{C.11})$$

Aus diesen drei Teil-Impedanzen lässt sich die Kurzschlussimpedanz des Netzes  $Z_{\text{Netz}}$  berechnen:

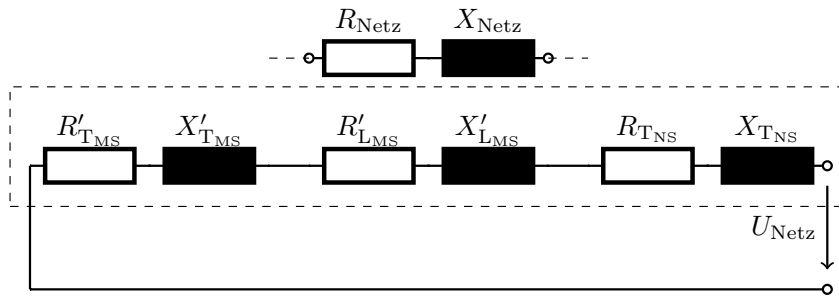
$$Z_{\text{Netz}} = R_{\text{Netz}} + i \cdot X_{\text{Netz}} \quad (\text{C.12})$$

$$= (R'_{TMS} + R'_{LMS-NS} + R_{TNS}) + i \cdot (X'_{TMS} + X'_{LMS-NS} + X_{TNS}) \quad (\text{C.13})$$

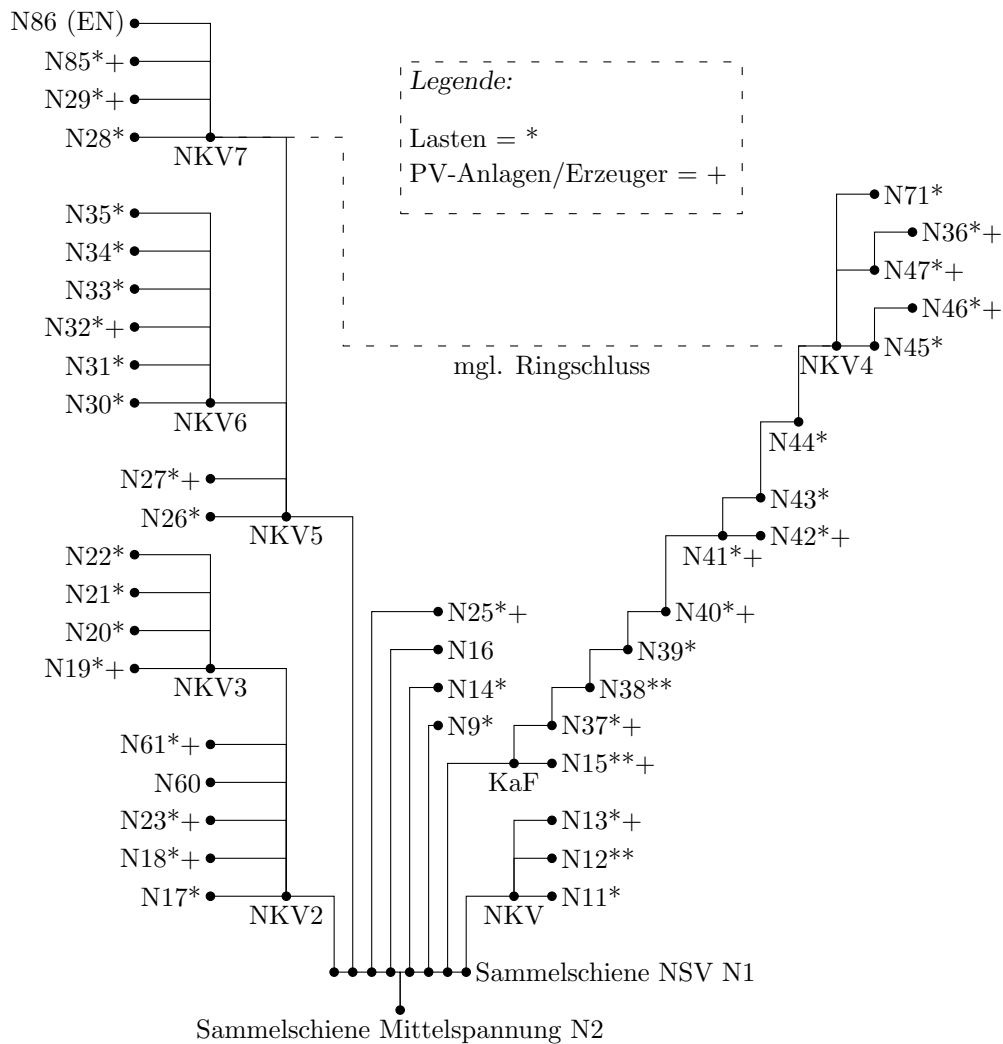
$$= (0,048 \text{ m}\Omega + 0,696 \text{ m}\Omega + 5,1 \text{ m}\Omega) + i \cdot (0,638 \text{ m}\Omega + 0,508 \text{ m}\Omega + 19,6 \text{ m}\Omega) \quad (\text{C.14})$$

$$= 5,84 \text{ m}\Omega + i \cdot 20,75 \text{ m}\Omega \quad (\text{C.15})$$

Grafisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung C.1 dargestellt. Nachdem die Ersatzgrößen für das Netz bestimmt wurden, gilt es die Leitungen im Netz von Moosham zu charakterisieren. Die Daten der einzelnen Leitungsabschnitte wurden von den Kraftwerken Haag geliefert. Für das Netz von Moosham selbst ist Abbildung C.2 zu beachten. Hier sind alle möglichen Arme des Strahlennetzes aufgezeigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, zwischen den Knoten NKV4 und NKV7 einen Ringschluss herzustellen. Die einzelnen Leitungsgrößen werden in Tabelle D.5 zusammengefasst. Mit diesen Daten kann ein vereinfachtes Netzmodell für das Netz aufgebaut werden. Der Aufbau wird im Teilkapitel 7.1 beschrieben.



**Abb. C.1** – Hier werden relevanten Größen des Netzes auf der Primärseite des ONT zusammengefasst zu  $R_{\text{Netz}}$  und  $X_{\text{Netz}}$ . Beide Größen sind bezogen auf die Sekundärseite des Niederspannungstransformators. Die Abkürzungen MS und NS stehen für Größen der Mittel- und Niederspannung.



**Abb. C.2** – Das verwendete Referenzortsnetz in Moosham im Überblick aus elektrischer Sicht.



## D Kenndaten des Ortsnetzes Moosham

Dieses Kapitel fasst die gegebenen Kenndaten des EEBatt Feldtest-Gebietes Moosham zusammen. Die Daten wurden für alle im Rahmen dieser Arbeit erstellen Simulationsmodelle verwendet. Gegebene Betriebsmittel-Daten sind:

- Kenndaten des ONT (Tabelle D.1)
- Netz-Knoten-Werte (Tabelle D.2)
- Kenndaten der Lasten (Tabelle D.3)
- Kenndaten der Speicher (Tabelle D.4)
- Leitungen (Tabelle D.5)
- Daten der PV-Anlagen (Tabelle D.6)

Für die Übersichtlichkeit beschränken sich die aufgeführten Datensätze auf diejenigen Werte, die für die vorliegende Arbeit relevant sind. Gekürzt wurden vor allem standardmäßig angelegte Platzhalter für Betriebsmittelkennwerte, die in den für Moosham zur Verfügung gestellten Datensätzen nicht ausgefüllt waren.

**Tab. D.1** – Kennwerte des ONT in Moosham.

| Knoten 1 | Knoten 2 | Netz-<br>ebene | $U_{n1}$ /<br>kV | $U_{n2}$ /<br>kV | $S_n$ /<br>MVA | $u_k$ /<br>% | $u_r = V_{fe} = i_0$ /<br>% / kW / % | Schalt-<br>gruppe |
|----------|----------|----------------|------------------|------------------|----------------|--------------|--------------------------------------|-------------------|
| N2       | N1       | MS             | 20               | 0,4              | 0,25           | 8            | 0                                    | DYN5              |

**Tab. D.2** – Kennwerte der Knoten im Ortsnetz Moosham.

| Netzebene | Name       | Kurzname | Knotentyp  | $U_{soll}$ / kV |
|-----------|------------|----------|------------|-----------------|
| NS        | Sa.-schie. | N1       | Sa.-schie. | 0               |
| NS        | NKV        | N10      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N11        | N11      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N12        | N12      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N13        | N13      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N14        | N14      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N15        | N15      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N16        | N16      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N17        | N17      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N18        | N18      | Knoten     | 0,4             |
| NS        | N19        | N19      | Knoten     | 0,4             |
| MS        | N2         | N2       | Sa.-schie. | 0               |

Fortsetzung auf nächster Seite

Tab. D.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

| Netzebene | Name | Kurzname | Knotentyp | $U_{\text{soll}}$ / kV |
|-----------|------|----------|-----------|------------------------|
| NS        | N20  | N20      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N21  | N21      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N22  | N22      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N23  | N23      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N25  | N25      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N26  | N26      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N27  | N27      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N28  | N28      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N29  | N29      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N30  | N30      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N31  | N31      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N32  | N32      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N33  | N33      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N34  | N34      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N35  | N35      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N36  | N36      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N37  | N37      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N38  | N38      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N39  | N39      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N40  | N40      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N41  | N41      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N42  | N42      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N43  | N43      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N44  | N44      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N45  | N45      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N46  | N46      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N47  | N47      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV2 | N49      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV3 | N56      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N60  | N60      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N61  | N61      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | KaF  | N66      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV4 | N70      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N71  | N71      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV5 | N76      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV6 | N79      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | NKV7 | N81      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N85  | N85      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N86  | N86      | Knoten    | 0,4                    |
| NS        | N9   | N9       | Knoten    | 0,4                    |



**Tab. D.3** – Kennwerte der Lasten im Ortsnetz Moosham.

| Knoten | Profil | Netz-<br>ebene | Lasttyp    | Lastfluss-<br>typ | $W_{P, \text{Jahr}} /$<br>kWh | $W_{Q, \text{Jahr}} /$<br>kVarh |
|--------|--------|----------------|------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| N11    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 10.920                        | 0                               |
| N12    | G1     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.000                         | 0                               |
| N12    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 7.520                         | 0                               |
| N13    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 3.905                         | 0                               |
| N14    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 16.234                        | 0                               |
| N15    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 14.220                        | 0                               |
| N15    | G1     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.000                         | 0                               |
| N17    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.120                         | 0                               |
| N18    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 25.305                        | 0                               |
| N19    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.400                         | 0                               |
| N20    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.796                         | 0                               |
| N21    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 7.360                         | 0                               |
| N22    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 4.900                         | 0                               |
| N23    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.220                         | 0                               |
| N25    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 14.506                        | 0                               |
| N26    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 540                           | 0                               |
| N27    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.716                         | 0                               |
| N28    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.053                         | 0                               |
| N29    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 5.813                         | 0                               |
| N30    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.849                         | 0                               |
| N31    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.277                         | 0                               |
| N32    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.961                         | 0                               |
| N33    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 3.095                         | 0                               |
| N34    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.670                         | 0                               |
| N35    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 4.870                         | 0                               |
| N36    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 16.080                        | 0                               |
| N37    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.428                         | 0                               |
| N38    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.070                         | 0                               |
| N38    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 3.623                         | 0                               |
| N39    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.586                         | 0                               |
| N40    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.100                         | 0                               |
| N41    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.451                         | 0                               |
| N42    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 3.437                         | 0                               |
| N43    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 6.745                         | 0                               |
| N44    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 8.245                         | 0                               |
| N45    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 1.642                         | 0                               |
| N46    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 4.690                         | 0                               |
| N47    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 8.630                         | 0                               |
| N60    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 13.700                        | 0                               |
| N61    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 16.118                        | 0                               |
| N71    | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 4.570                         | 0                               |
| N85    | G2     | NS             | allg. Last | PQconst           | 34.165                        | 0                               |
| N9     | H0     | NS             | allg. Last | PQconst           | 2.691                         | 0                               |

Tab. D.4 – Kennwerte der verwendeten Speicher im Ortsnetz Moosham.

| Knoten | Netz-<br>ebene | Typ      | Anbin-<br>dung | $\cos \varphi$ | $E_{N, \text{Speicher}} /$<br>kWh | $\eta /$<br>% | $U_{\min} /$<br>% | $U_{\max} /$<br>% | $U_n /$<br>kV |
|--------|----------------|----------|----------------|----------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|
| N86    | NS             | Batterie | LE             | -              | 200; 400                          | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N44    | NS             | Batterie | LE             | -              | 200; 400                          | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N60    | NS             | Batterie | LE             | -              | 100; 200                          | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N37    | NS             | Batterie | LE             | -              | 100                               | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N34    | NS             | Batterie | LE             | -              | 100                               | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N21    | NS             | Batterie | LE             | -              | 100; 200                          | 85            | 80                | 110               | 0,4           |

Tab. D.5 – Kennwerte der Leitungen im Ortsnetz Moosham.

| Knoten 1 | Knoten 2 | Netz-<br>ebene | Leitungs-<br>typ | Konfigu-<br>ration | $l /$<br>km | $R' /$<br>$\frac{\Omega}{\text{km}}$ | $X' /$<br>$\frac{\Omega}{\text{km}}$ | $I_{\text{th}} /$<br>kA | $I_{1s} /$<br>kA | $q /$<br>$\text{mm}^2$ |
|----------|----------|----------------|------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| KaF      | N15      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0282      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| KaF      | N37      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0526      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| N37      | N38      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0455      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N38      | N39      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0275      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N39      | N40      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,031       | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N40      | N41      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0486      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N41      | N43      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0329      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N41      | N42      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0301      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N43      | N44      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0179      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N44      | NKV4     | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,0336      | 0,443                                | 0,091                                | 0,204                   | 6,58             | 70                     |
| N45      | N46      | NS             | Kabel            | NYY                | 0,0122      | 1,15                                 | 0,089                                | 0,076                   | 1,84             | 16                     |
| N47      | N36      | NS             | Freil.           | F-AL               | 0,0537      | 0,886                                | 0,3878                               | 0,17                    | 2,45             | 35                     |
| NKV      | N12      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,028       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV      | N13      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0533      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV      | N11      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0198      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV2     | N17      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0297      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV2     | N18      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0867      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV2     | NKV3     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1252      | 0,206                                | 0,091                                | 0,284                   | 11,4             | 150                    |
| NKV2     | N23      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,106       | 0,443                                | 0,097                                | 0,185                   | 5,32             | 70                     |
| NKV2     | N60      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0841      | 0,443                                | 0,097                                | 0,185                   | 5,32             | 70                     |
| NKV2     | N61      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1109      | 0,443                                | 0,097                                | 0,185                   | 5,32             | 70                     |
| NKV3     | N20      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0557      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV3     | N21      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,017       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV3     | N22      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0404      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV3     | N19      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0706      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV4     | N47      | NS             | Freil.           | F-AL               | 0,0276      | 0,886                                | 0,3878                               | 0,17                    | 2,45             | 35                     |
| NKV4     | N71      | NS             | Freil.           | F-AL               | 0,0286      | 0,886                                | 0,3878                               | 0,17                    | 2,45             | 35                     |
| NKV4     | N45      | NS             | Kabel            | NYY                | 0,042       | 1,15                                 | 0,089                                | 0,076                   | 1,84             | 16                     |
| NKV4     | NKV7     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1611      | 0,206                                | 0,091                                | 0,284                   | 11,4             | 150                    |
| NKV5     | N27      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,037       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV5     | N26      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,035       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV5     | NKV6     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0712      | 0,206                                | 0,091                                | 0,284                   | 11,4             | 150                    |
| NKV5     | NKV7     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,062       | 0,206                                | 0,091                                | 0,284                   | 11,4             | 150                    |
| NKV6     | N30      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0115      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV6     | N31      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,023       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV6     | N32      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0327      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV6     | N35      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,052       | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV6     | N34      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0557      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV6     | N33      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0899      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |
| NKV7     | N86      | NS             | Kabel            | NA2XY              | 0,1328      | 0,164                                | 0,087                                | 0,395                   | 17,4             | 185                    |
| NKV7     | N28      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0219      | 0,641                                | 0,102                                | 0,151                   | 3,8              | 50                     |

Fortsetzung auf nächster Seite

**Tab. D.5** – Fortsetzung von vorheriger Seite

| Knoten 1   | Knoten 2 | Netz-<br>ebene | Leitungs-<br>typ | Konfigu-<br>ration | $l$ /<br>km | $R_L$ /<br>$\frac{\Omega}{\text{km}}$ | $X_L$ /<br>$\frac{\Omega}{\text{km}}$ | $I_{th}$ /<br>kA | $I_{1s}$ /<br>kA | $q$ /<br>$\text{mm}^2$ |
|------------|----------|----------------|------------------|--------------------|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------------|
| NKV7       | N29      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0256      | 0,641                                 | 0,102                                 | 0,151            | 3,8              | 50                     |
| NKV7       | N85      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0757      | 0,206                                 | 0,091                                 | 0,284            | 11,4             | 150                    |
| Sa.-schie. | N25      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1174      | 0,641                                 | 0,102                                 | 0,151            | 3,8              | 50                     |
| Sa.-schie. | NKV2     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1693      | 0,206                                 | 0,091                                 | 0,284            | 11,4             | 150                    |
| Sa.-schie. | KaF      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,14        | 0,206                                 | 0,091                                 | 0,284            | 11,4             | 150                    |
| Sa.-schie. | NKV      | NS             | Kabel            | -                  | 0,1086      | 0,1                                   | 0,4                                   | -                | -                | -                      |
| Sa.-schie. | N9       | NS             | Kabel            | -                  | 0,0673      | 0,1                                   | 0,4                                   | -                | -                | -                      |
| Sa.-schie. | NKV5     | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,2721      | 0,206                                 | 0,091                                 | 0,284            | 11,4             | 150                    |
| Sa.-schie. | N16      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,0846      | 0,641                                 | 0,102                                 | 0,151            | 3,8              | 50                     |
| Sa.-schie. | N14      | NS             | Kabel            | NAYY               | 0,1082      | 0,443                                 | 0,097                                 | 0,185            | 5,32             | 70                     |

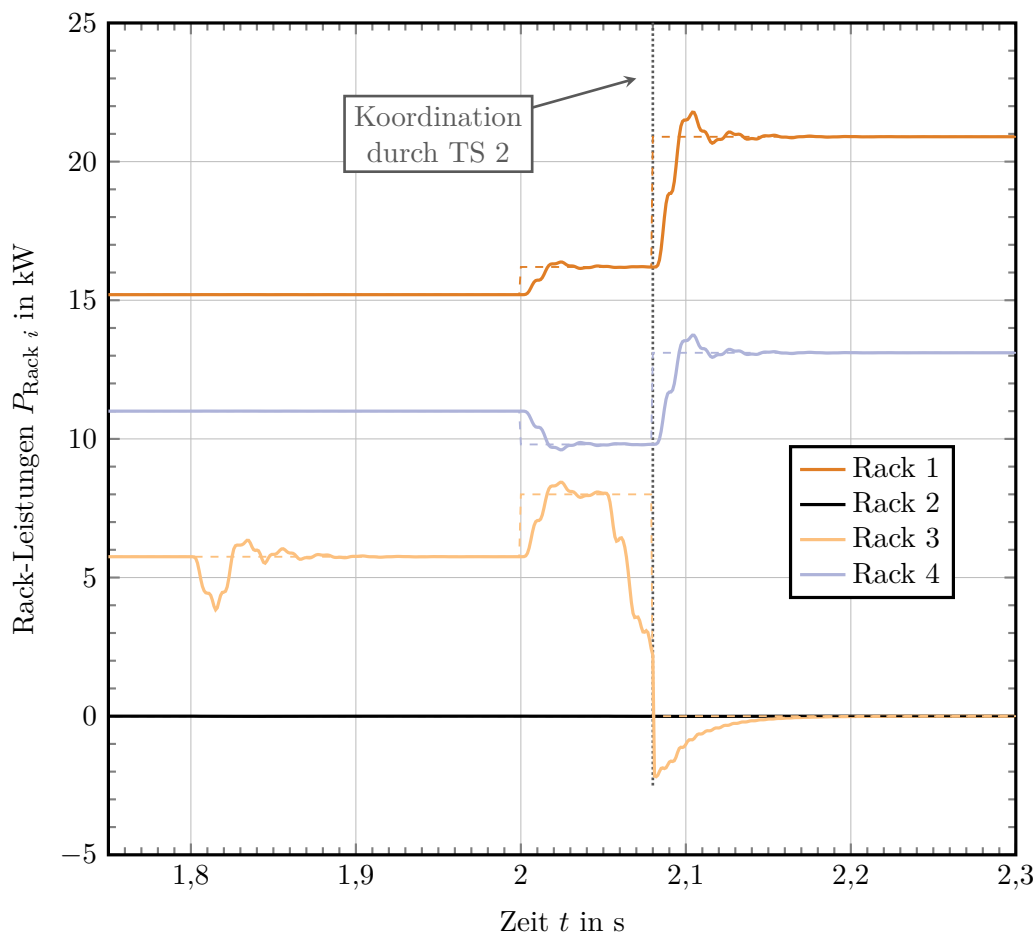
**Tab. D.6** – Kennwerte der PV-Anlagen im Ortsnetz Moosham.

| Knoten | Netz-<br>ebene | Anbin-<br>dung | $\cos \varphi$ | $P_{\text{Spitze}}$ /<br>kW | $\eta$ /<br>% | $U_{\min}$ /<br>% | $U_{\max}$ /<br>% | $U_n$ /<br>kW |
|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|
| N13    | NS             | LE             | -              | 6,88                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N15    | NS             | LE             | -              | 23,94                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N18    | NS             | LE             | -              | 29,64                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N19    | NS             | LE             | -              | 8,28                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N23    | NS             | LE             | -              | 15,84                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N25    | NS             | LE             | -              | 13,8                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N27    | NS             | LE             | -              | 6,5                         | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N29    | NS             | LE             | -              | 15,99                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N32    | NS             | LE             | -              | 4,2                         | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N36    | NS             | LE             | -              | 15,74                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N37    | NS             | LE             | -              | 23,52                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N40    | NS             | LE             | -              | 10                          | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N41    | NS             | LE             | -              | 7,99                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N42    | NS             | LE             | -              | 7,98                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N46    | NS             | LE             | -              | 6,37                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N47    | NS             | LE             | -              | 9,37                        | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N61    | NS             | LE             | -              | 17,63                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |
| N85    | NS             | LE             | -              | 79,25                       | 85            | 80                | 110               | 0,4           |



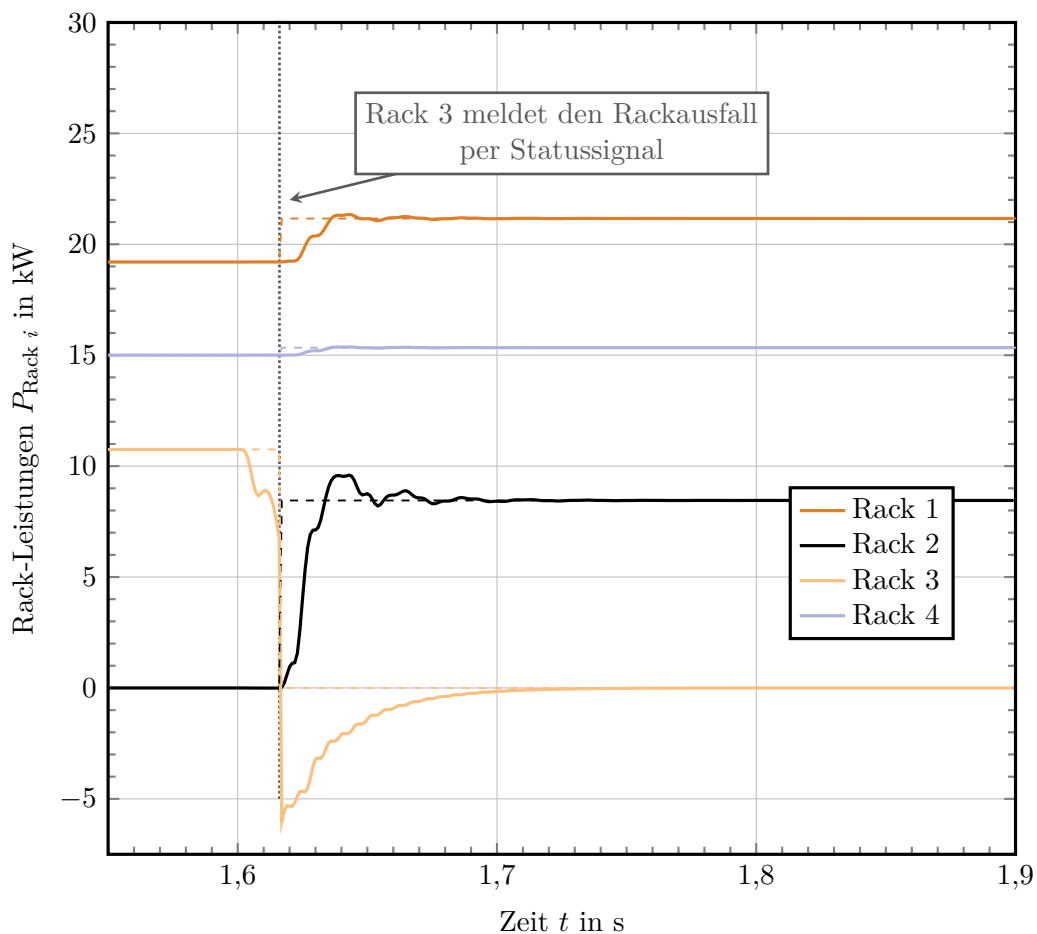
## E Beispiel Rack-Koordination des Teilsystem 2

Dieses Kapitel zeigt die in [SA.3] mitentwickelte und in Abschnitt 6.2.3 beschriebene Rack-Koordination, die die Funktion des TS 2 im CEMS repräsentiert anhand einer Beispielsimulation. In Abbildung E.1 tritt ein Fehler bei  $t = 1,8\text{ s}$  auf. Diesen Fehler kann Rack 3 innerhalb von  $t_{\text{aus,max}}$  autonom beheben. Aus diesem Grund schreitet TS 2 nicht ein, sondern ist lediglich in Bereitschaft. Bei  $t = 2\text{ s}$  gibt das TS 3 neue Sollleistungen vor. Aufgrund des anhaltenden



**Abb. E.1** – Verläufe der Soll- (gestrichelt) und Istleistungen (durchgezogen) der Racks in einem Fehlerszenario. Den ersten Fehlereintritt bei  $t = 1,8\text{ s}$  kann Rack 3 autonom beheben. Die neue Sollleistung, die von TS 3 bei  $t = 2\text{ s}$  vorgegeben wird, kann Rack 3 aufgrund des Fehlers jedoch nicht einhalten, sodass TS 2 dessen Leistung bei  $t = 2,08\text{ s}$  auf Rack 1 und Rack 4 verteilt – angelehnt an Ergebnisse nach [SA.3].

Fehlers kann Rack 3 diese Vorgaben nicht erfüllen. Die Leistung, die Rack 3 erbringen sollte, wird deshalb auf die übrigen Racks verteilt. Rack 1 und 4 werden von der Rack-Koordination bevorzugt, weil sie in Betrieb sind und die Sollleistung von Rack 3 übernehmen können, ohne dass Rack 2 zusätzlich in Betrieb genommen werden muss. Das TS 2 hält die Sollleistung von Rack 2 weiterhin auf Null, wie es von der Rack-Auswahl beabsichtigt ist. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung E.2 den koordinierenden Eingriff des TS 2, aufgrund eines gemeldeten Rack-Ausfalls durch Rack 3. Nachdem bei  $t \approx 1,6$  s ein erstes Fehlverhalten des Racks zu beobachten ist, meldet Rack 3 bei  $t = 1,615$  s den Fehlerfall direkt per Statussignal an das TS 2. Im Gegensatz zu dem Szenario in Abbildung E.1 werden in diesem Fall keine zeitlichen Kriterien abgewartet, sondern die Leistungen sofort neu koordiniert. Die Leistungen sind in diesem Fall zudem so gewählt, dass die Sollleistung von Rack 3 nicht mehr allein durch Rack 1 und 4 übernommen werden kann. Folglich schaltet die Rack-Koordination auch Rack 2 hinzu, um so weiterhin die angeforderte Gesamtleistung des Systems einhalten zu können. Mit diesen Ausführungen konnte gezeigt werden, dass die umgesetzte Rack-Koordination den bisher identifizierten Anforderungen gerecht wird.



**Abb. E.2** – Verläufe der Soll- (gestrichelt) und Istleistungen (durchgezogen) der Racks. Der eintretende Fehler kann von Rack 3 nicht autonom ausgeglichen werden, so dass es bei  $t = 1,615$  s einen Rack-Ausfall meldet. Da Rack 1 und Rack 4 die Leistung von Rack 3 nicht allein übernehmen können, schaltet die Rack-Koordination Rack 2 hinzu– angelehnt an Ergebnisse nach [SA.3].

## F Solleistungs-Berechnung dynamischer dreiphasiger Lastblock

Zur Berechnung der Solleistungsvorgabe des dynamischen dreiphasigen Lastblockes sind hier noch die nötigen Gleichungen nach [SA.16] aufgezeigt. Ausgehend von der Gleichung der Scheinleistung:

$$\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad (\text{F.1})$$

ist folgendes zu beachten. Bei der Betrachtung der Scheinleistung, Spannung und Strom als komplexe Raumzeiger, lassen sich  $\underline{U}$  und  $\underline{I}$  wie in den Gleichungen (F.2) und (F.3) darstellen.

$$\underline{U} = U_{\text{eff}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{u0})} \quad (\text{F.2})$$

$$\underline{I}^* = I_{\text{eff}} \cdot e^{j(\omega t - \varphi_{i0})} \quad (\text{F.3})$$

Eingesetzt in Gleichung (F.1) führt dies mit einigen Vereinfachungen zu dem in Gleichung (F.4) dargestellten Zusammenhang für jeden der drei Stränge. Der Faktor  $k_{\underline{S},i}$  stellt dabei den Anteil  $\underline{S}_i$  der gesamten Scheinleistung dar, der über den betrachteten Strang  $i$  realisiert wird.

$$\begin{aligned} \underline{S}_i &= 3 \cdot k_i \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{I}_i^* \\ &= 3 \cdot k_i \cdot U_{\text{eff},i} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{u0,i})} \cdot I_{\text{eff},i} \cdot e^{j(\omega t - \varphi_{i0,i})} \\ &= 3 \cdot k_i \cdot U_{\text{eff},i} \cdot I_{\text{eff},i} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j\omega t} \cdot e^{j\varphi_{u0,i}} \cdot e^{-j\varphi_{i0,i}} \\ &= 3 \cdot k_i \cdot U_{\text{eff},i} \cdot I_{\text{eff},i} \cdot e^{j(\varphi_{u0,i} - \varphi_{i0,i})} \end{aligned} \quad (\text{F.4})$$

Verwendet man hier die komplexe Scheinleistung  $\underline{S} = |\underline{S}| \cdot e^{j\angle \underline{S}}$  in der Zeigerdarstellung und nimmt symmetrische Belastung der drei Stränge der Last an ( $k_{\underline{S},i} = \frac{1}{3} \forall i \in 1,2,3$ ), so ergibt sich für den einzustellenden Strom  $\underline{I}_i$  der in Gleichung (F.5) dargestellte Betrag sowie der in Gleichung (F.6) dargestellte Phasenversatz zur jeweiligen Strangspannung.

$$\begin{aligned}
 |\underline{S}_i| \cdot e^{j\angle \underline{S}_i} &= 3 \cdot k_i \cdot U_{\text{eff},i} \cdot I_{\text{eff},i} \cdot e^{j(\varphi_{u0,i} - \varphi_{i0,i})} \\
 \Rightarrow U_{\text{eff},i} \cdot I_{\text{eff},i} &= |\underline{S}_i| \\
 I_{\text{eff},i} &= \frac{|\underline{S}_i|}{U_{\text{eff},i}} \\
 |\underline{I}_i| &= \frac{|\underline{S}_i|}{|\underline{U}_i|} \tag{F.5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \varphi_{u0,i} - \varphi_{i0,i} &= \angle \underline{S}_i \\
 \varphi_{i0,i} &= \varphi_{u0,i} - \angle \underline{S}_i \\
 \angle \underline{I}_i &= \angle \underline{U}_i - \angle \underline{S}_i \tag{F.6}
 \end{aligned}$$

Folglich ergibt sich die im Modell umgesetzte Funktion zur Berechnung der einzuprägenden Strangströme  $\underline{I}$  gemäß Gleichung (F.7). Im verwendeten Phasor-Simulationsmodus kann diese Funktion direkt in den von Simulink bereitgestellten Blöcken als Signalfussplan umgesetzt werden, da hier Spannungen direkt als komplexe Zeiger gemessen und steuerbare Stromquellen mit komplexen Stromzeigern angesprochen werden können.

$$\begin{aligned}
 \underline{I}(\underline{U}, \underline{S}) &= (\underline{I}_i(\underline{U}_i, \underline{S})) \quad i = (1,2,3) \\
 \underline{I}_i(\underline{U}_i, \underline{S}_i) &= \frac{|\underline{S}_i|}{|\underline{U}_i|} \cdot e^{j(\angle \underline{U}_i - \angle \underline{S}_i)} \\
 \underline{I}_i(\underline{U}_i, \underline{S}) &= \frac{|\underline{S}| \cdot k_i}{|\underline{U}_i|} \cdot e^{j(\angle \underline{U}_i - \angle \underline{S})} \tag{F.7}
 \end{aligned}$$



## G Knotenspannungs-Betrachtung Netzsimulation

Diese Kapitel zeigt, ergänzend zu den Leistungsverläufen am ONT in Abschnitt 7.1.2, die zugehörigen Spannungsverläufe an den Knoten N1, N20, N23, N71 und N85. Generell ist festzustellen, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen einer Abweichung der Spannung von maximal  $\pm 10\%$  an jedem Knoten und in jedem Szenario eingehalten werden.

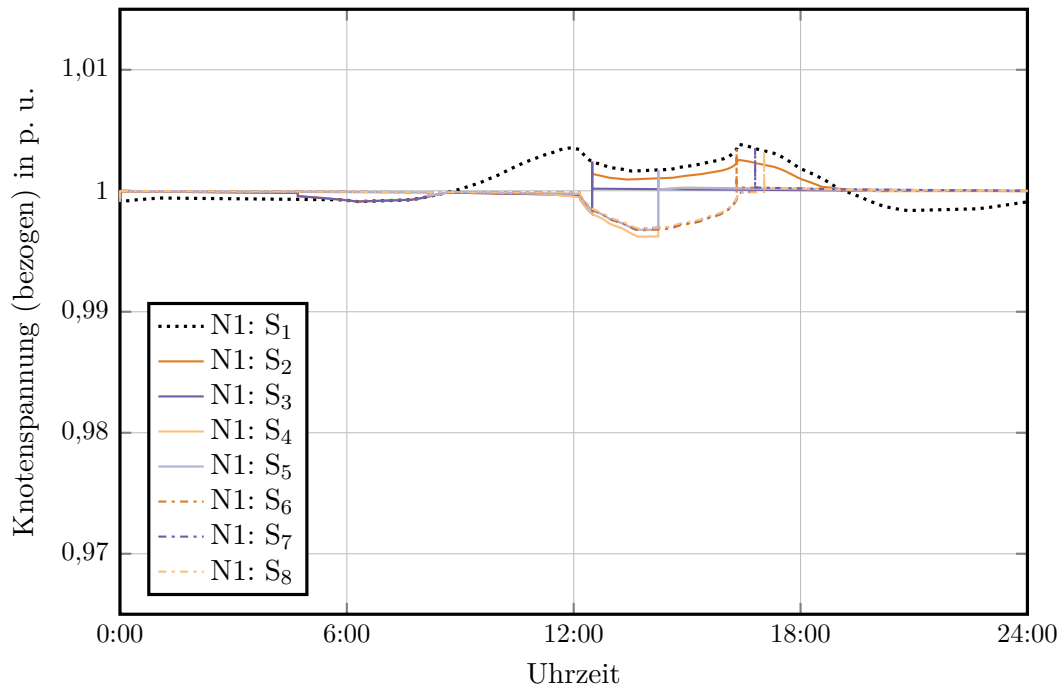
Je nach Lage kommt es zu unterschiedlichen Abweichungen der Spannungsamplitude. Hierbei ist der Knoten N1 am nächsten zum ONT gelegen. Aus diesem Grund ist die Spannungsabweichung am geringsten im Bezug auf die Nennspannung von 400 V.

Die Knoten N71 und N85 sind am weitesten vom ONT entfernt und in zwei Strängen des Netzes gelegen, in welchen ein großer Anteil der Verbraucher und Erzeuger liegt. Somit kommt es hier im Bezug auf die Blindleistungskompensation zu größeren Spannungsschwankungen wie am Knoten N1.

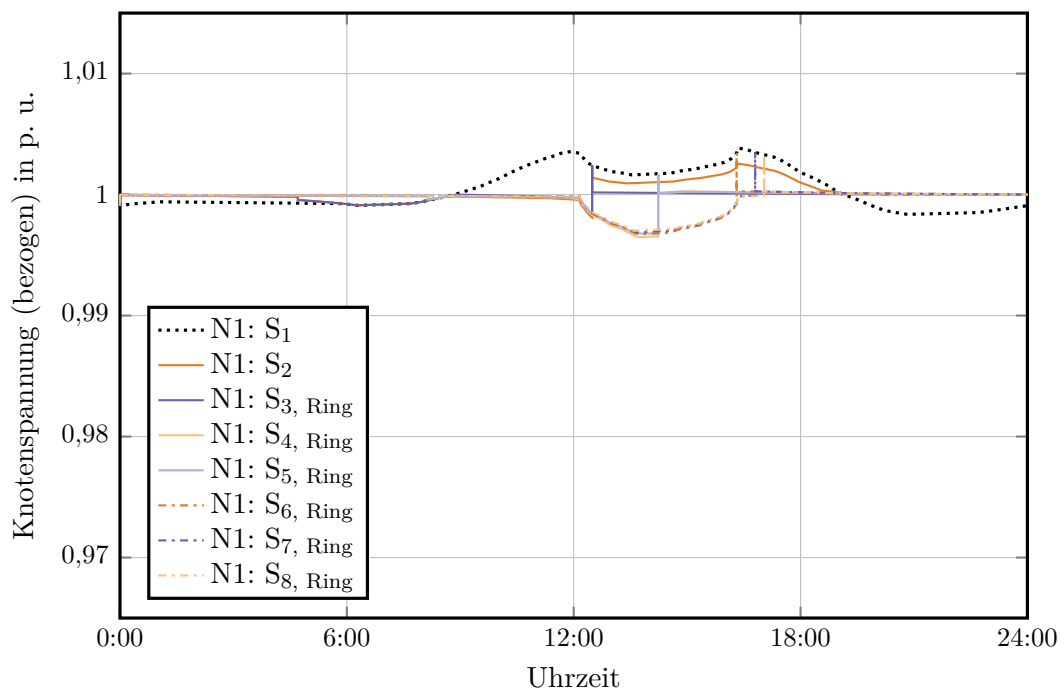
Für die beiden Knoten N20 und N23, die entgegengesetzt von den Knoten N71 und N85 und in Strängen mit geringerem Verbrauch und Erzeugung liegen, kommt es erst durch den Einbau von Speichern in den Szenarien S<sub>7...</sub> und S<sub>8...</sub> zu größeren Abweichungen.

Die Spannungsverläufe sind jeweils je Knoten für den Fall mit und ohne Ringleitung aufgetragen. Hierbei ist zu beobachten, dass die Ringleitung bei den Knoten N71 und N85 die Amplitude der Abweichung kleiner werden lässt. Dies liegt daran, dass die beiden Knoten örtlich gesehen am nächsten zu den Knoten NKV4 und NKV7 liegen. Die Spannungsverläufe an den anderen Knoten weisen in der gewählten Auflösung keine nennenswerten Veränderungen auf.

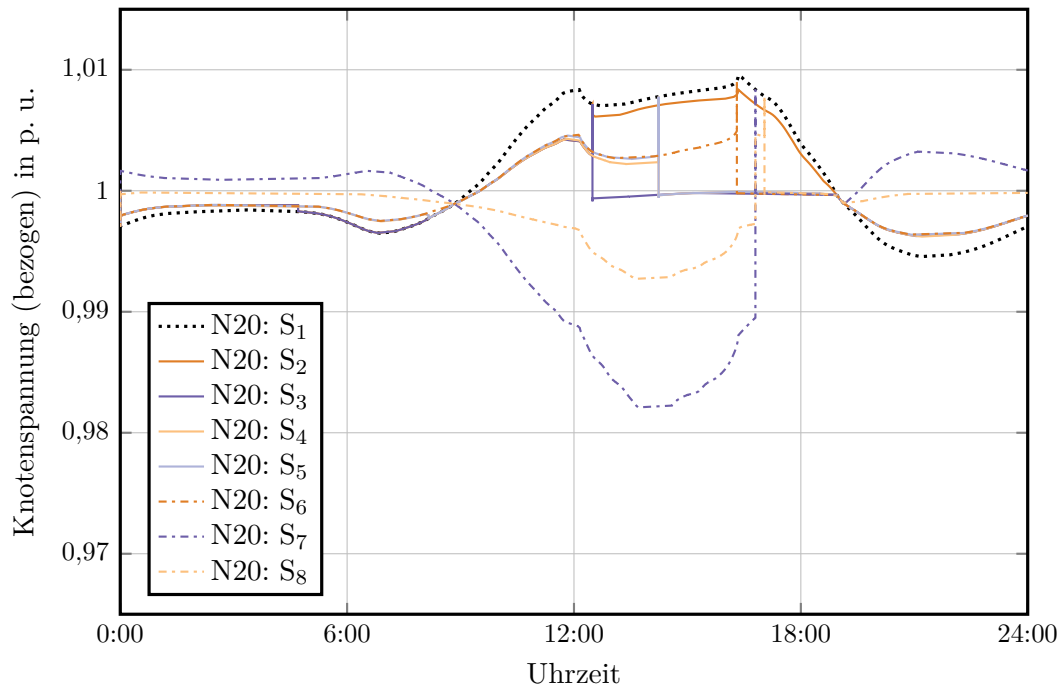
Für den Verlauf der Szenarien S<sub>1</sub>–S<sub>8</sub> kann zusammengefasst gesagt werden, dass eine gezielte Verteilung der Speicher und definierte Anpassung des Inhalts die Spannungsschwankungen vermindern kann und dies auch mit den getroffenen Vereinfachungen im Modell repräsentiert wird.



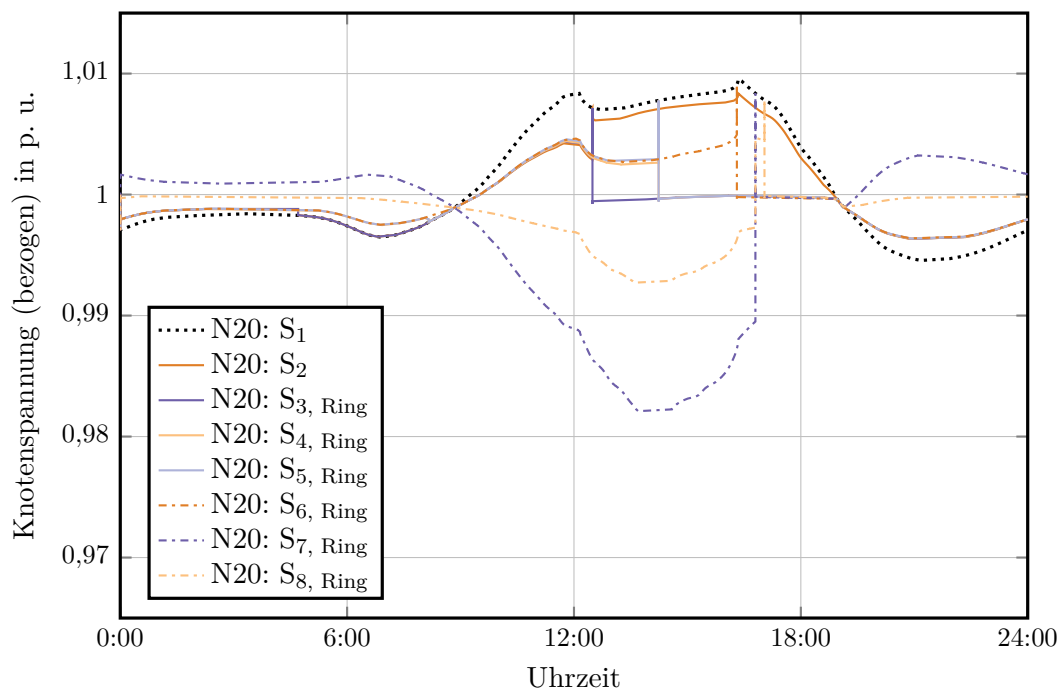
**Abb. G.1** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N1. Dieser weist als dem ONT nächster Knoten die geringsten Spannungsschwankungen auf.



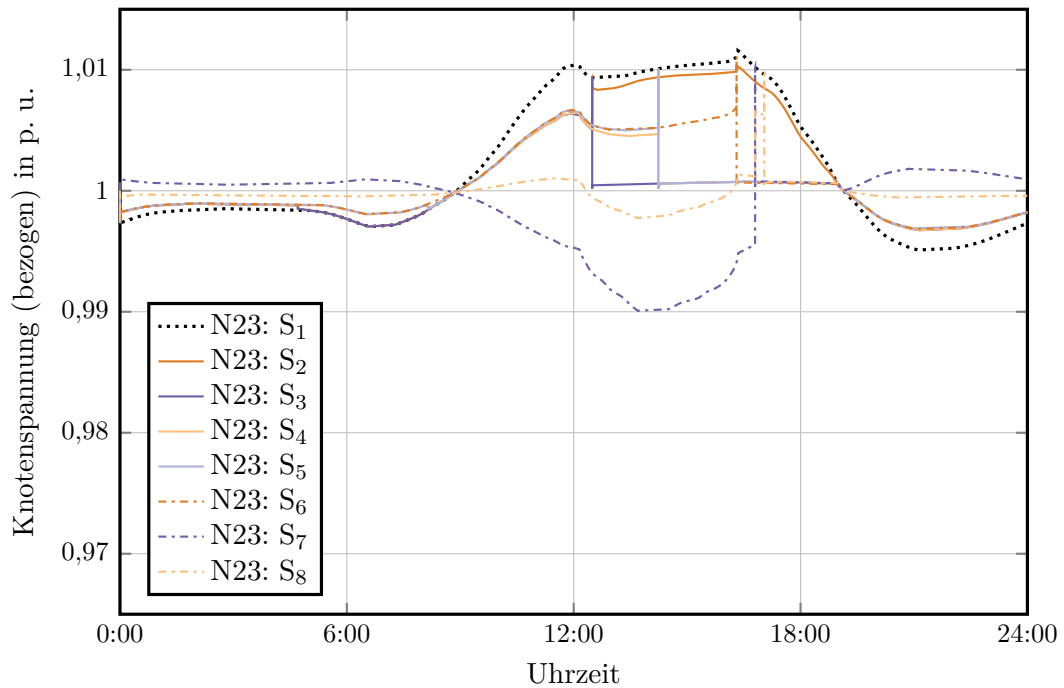
**Abb. G.2** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N1 samt Ringleitung. Dieser weist als dem ONT nächster Knoten die geringsten Spannungsschwankungen auf. Die Ringleitung führt zu keinem Nennenswerten Einfluss auf die Spannung an diesem Knoten, ersichtlich durch den Vergleich mit Abbildung G.1.



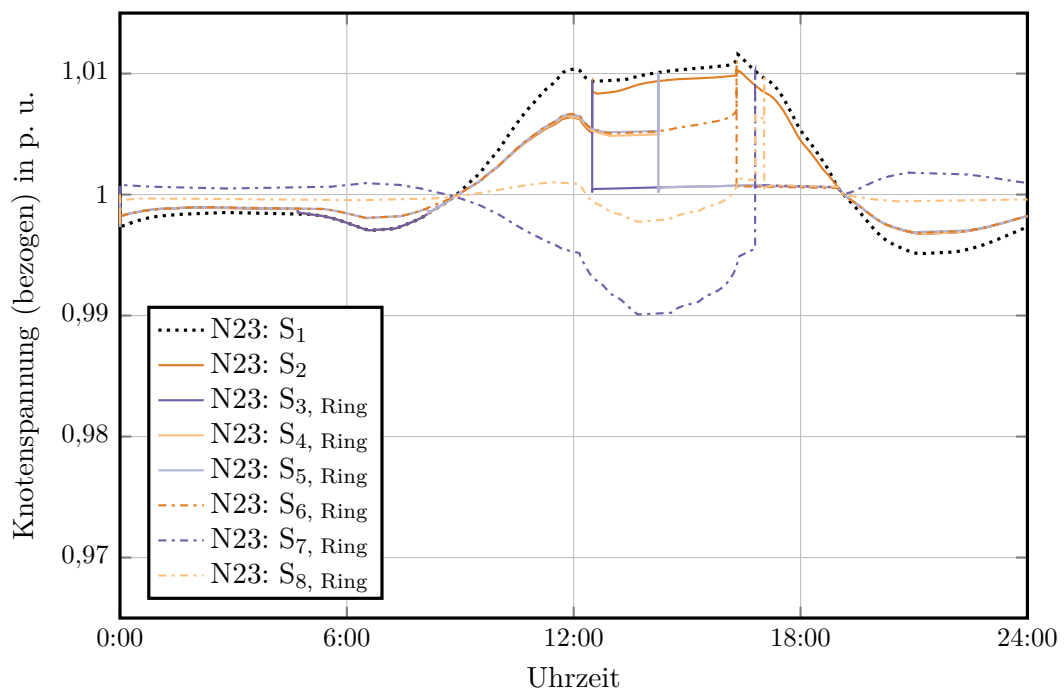
**Abb. G.3** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N20. Erst der Einbau der Speicher nach dem Szenario S<sub>8</sub> dämpft die Schwankungen am besten.



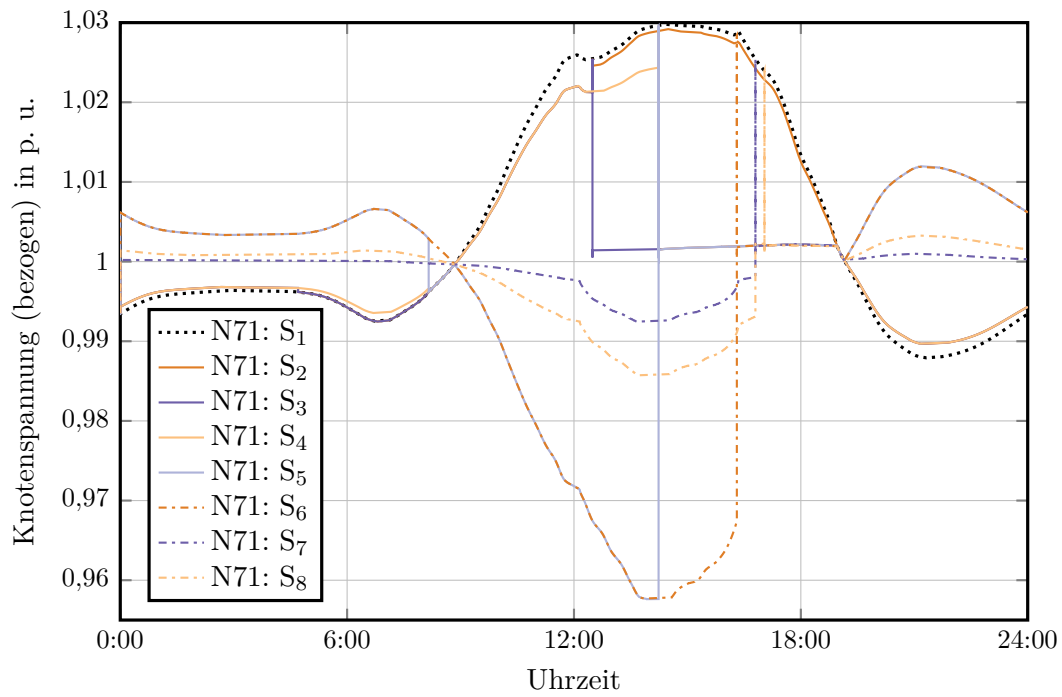
**Abb. G.4** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N20 samt Ringleitung. Erst der Einbau der Speicher nach dem Szenario S<sub>8</sub> dämpft die Schwankungen am besten. Die Ringleitung führt hingegen zu keinem Nennenswerten Einfluss auf die Spannung an diesem Knoten, ersichtlich durch den Vergleich mit Abbildung G.3.



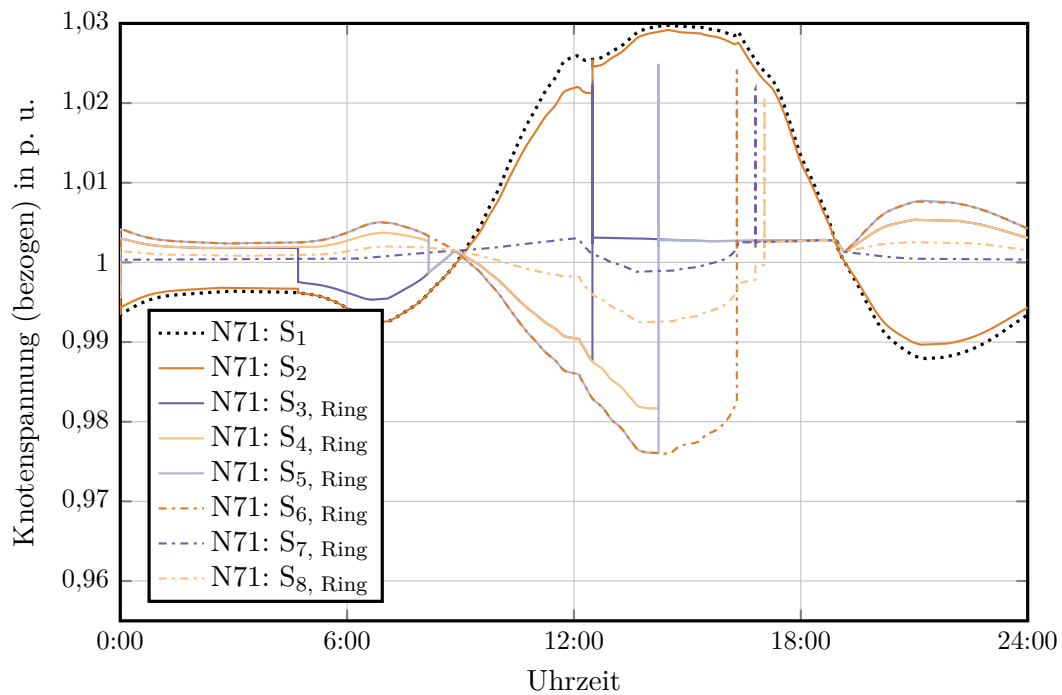
**Abb. G.5** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N23. Erst der Einbau der Speicher nach dem Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten.



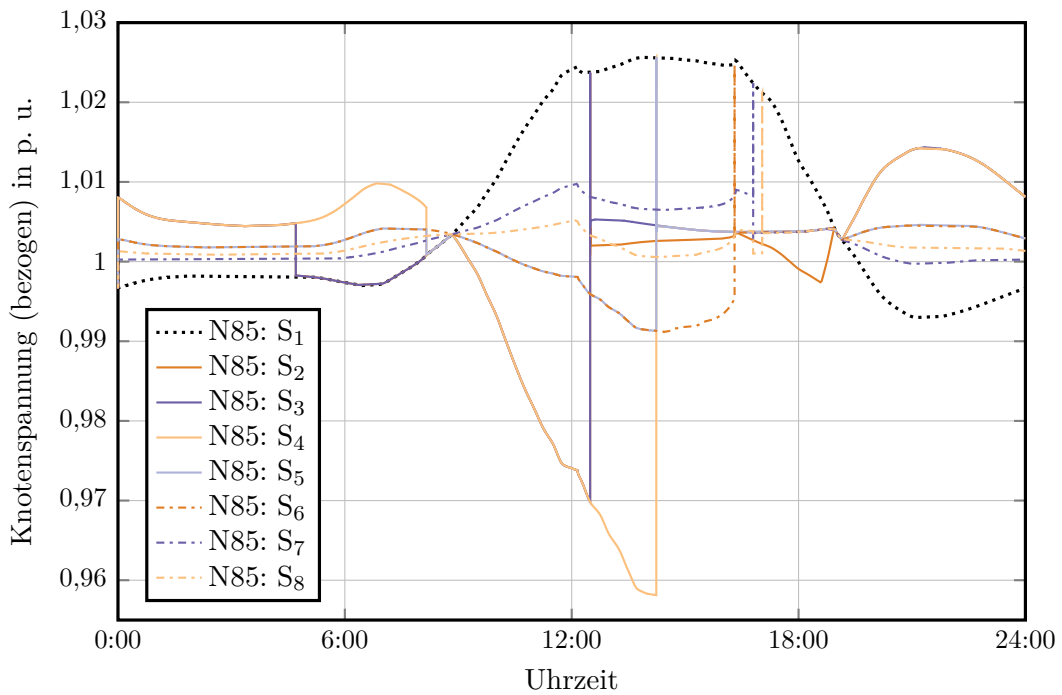
**Abb. G.6** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Netzknotenpunkt N23 samt Ringleitung. Erst der Einbau der Speicher nach dem Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten. Die Ringleitung führt hingegen zu keinem Nennenswerten Einfluss auf die Spannung an diesem Knoten, ersichtlich durch den Vergleich mit Abbildung G.5.



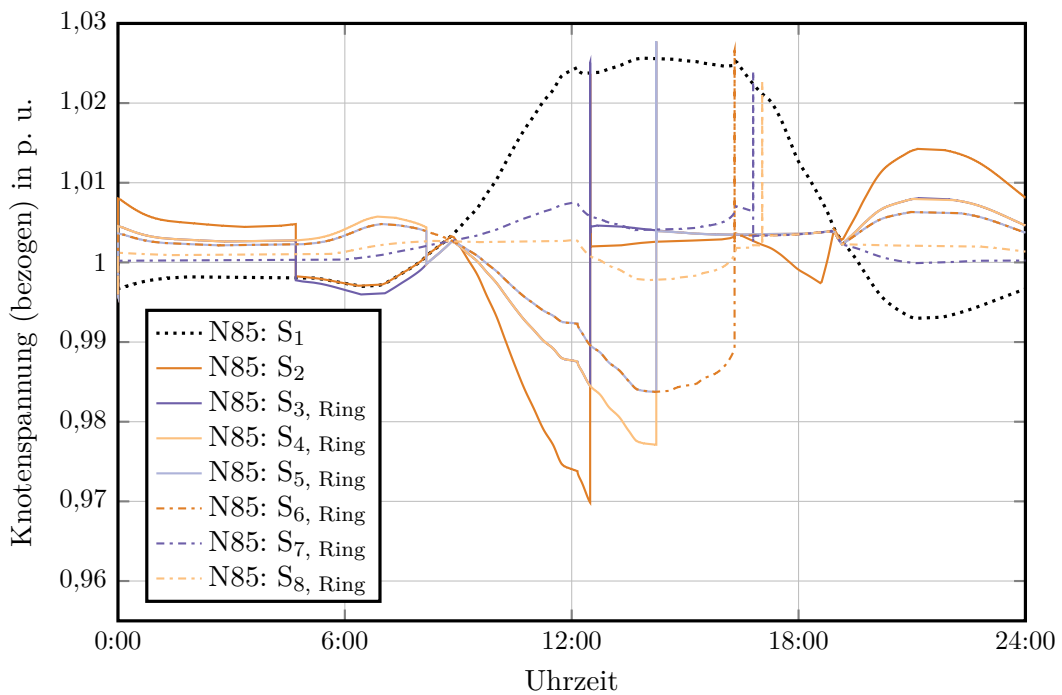
**Abb. G.7** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Knoten N71. Durch die Entfernung zum ONT und der vorhandenen Erzeuger und Verbraucher ist eine stetige Variation im zulässigen Spannungsband zu sehen. Erst der Einbau der Speicher im Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten.



**Abb. G.8** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Knoten N71 samt Ringleitung. Durch die Entfernung zum ONT und der vorhandenen Erzeuger und Verbraucher ist eine stetige Variation im zulässigen Spannungsband zu sehen. Erst der Einbau der Speicher im Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten. Die Ringleitung führt zu einer Verbesserung der Spannung, aufgrund der räumlichen Nähe, ersichtlich durch den Vergleich mit Abbildung G.7.



**Abb. G.9** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Knoten N85. Durch die Entfernung zum ONT und der vorhandenen Erzeuger und Verbraucher ist eine stetige Variation im zulässigen Spannungsband zu sehen. Erst der Einbau der Speicher im Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten.



**Abb. G.10** – Verlauf der bezogenen Netzspannung am Knoten N85 samt Ringleitung. Durch die Entfernung zum ONT und der vorhandenen Erzeuger und Verbraucher ist eine stetige Variation im zulässigen Spannungsband zu sehen. Erst der Einbau der Speicher im Szenario  $S_8$  dämpft die Schwankungen am besten. Die Ringleitung führt zu einer Verbesserung der Spannung, aufgrund der räumlichen Nähe, ersichtlich durch den Vergleich mit Abbildung G.9.

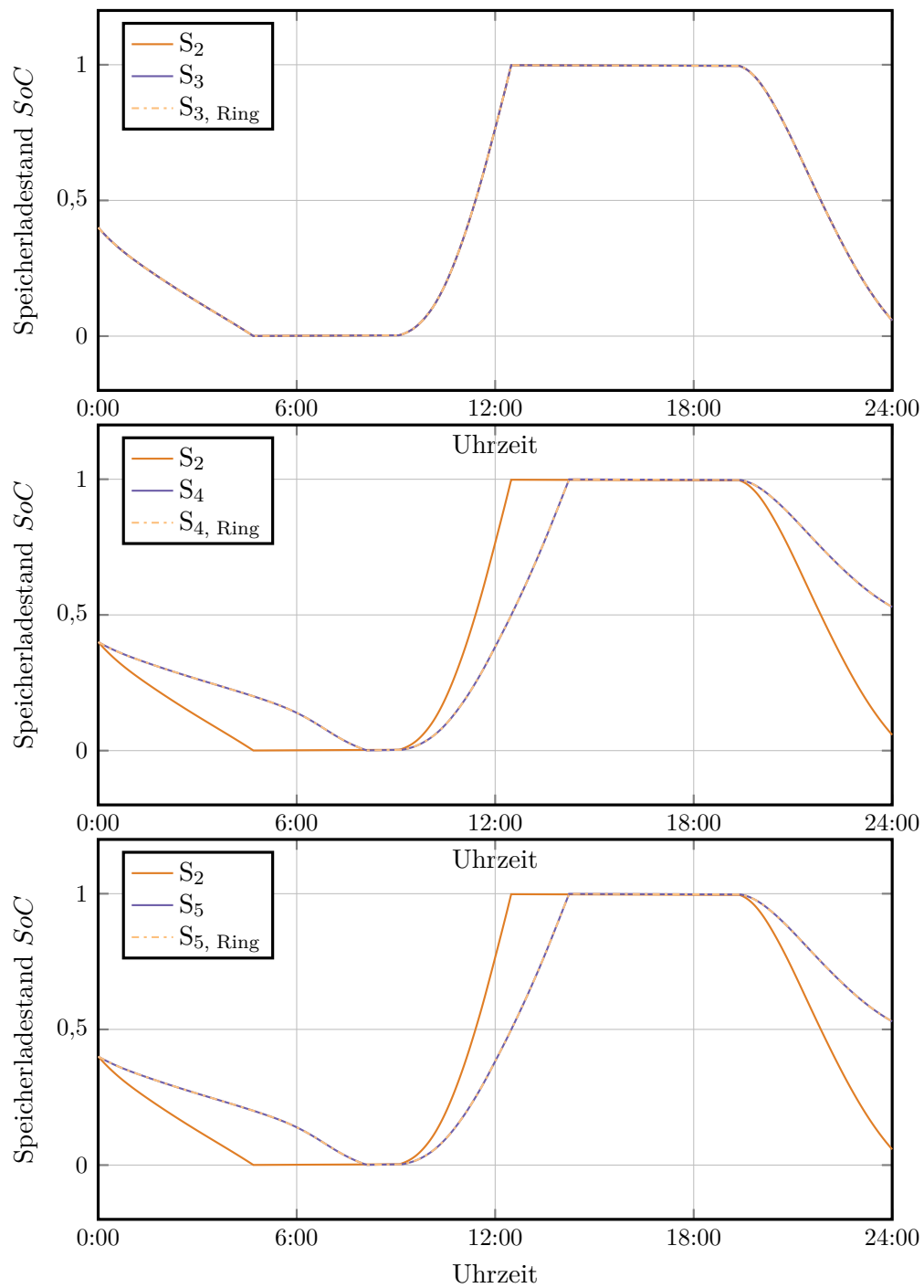
## H SoC-Betrachtung Netzsimulation

Auf den nächsten beiden Seiten sind die SoC-Verläufe zu den im Abschnitt 7.1.2 vorgestellten Szenarien gezeigt. Zum Vergleich ist immer der Verlauf des Szenarios  $S_2$  mit eingetragen. Wie schon bei den Verläufen der Netzaustauschleistung zeigt sich auch bei den SoC-Verläufen inklusive dem Ringschluss keine große Veränderung.

Es ist anzumerken, dass beim Einsatz von mehreren Speichern nur ein SoC-Verlauf in der Abbildung aufgetragen wurde, weil in den Szenarien die Startbedingungen für jeden Speicher gleich gewählt wurden und die entsprechenden Leistungen auf die vorhandenen Speicher immer gleich verteilt werden, das heißt, die SoC-Verläufe decken sich.

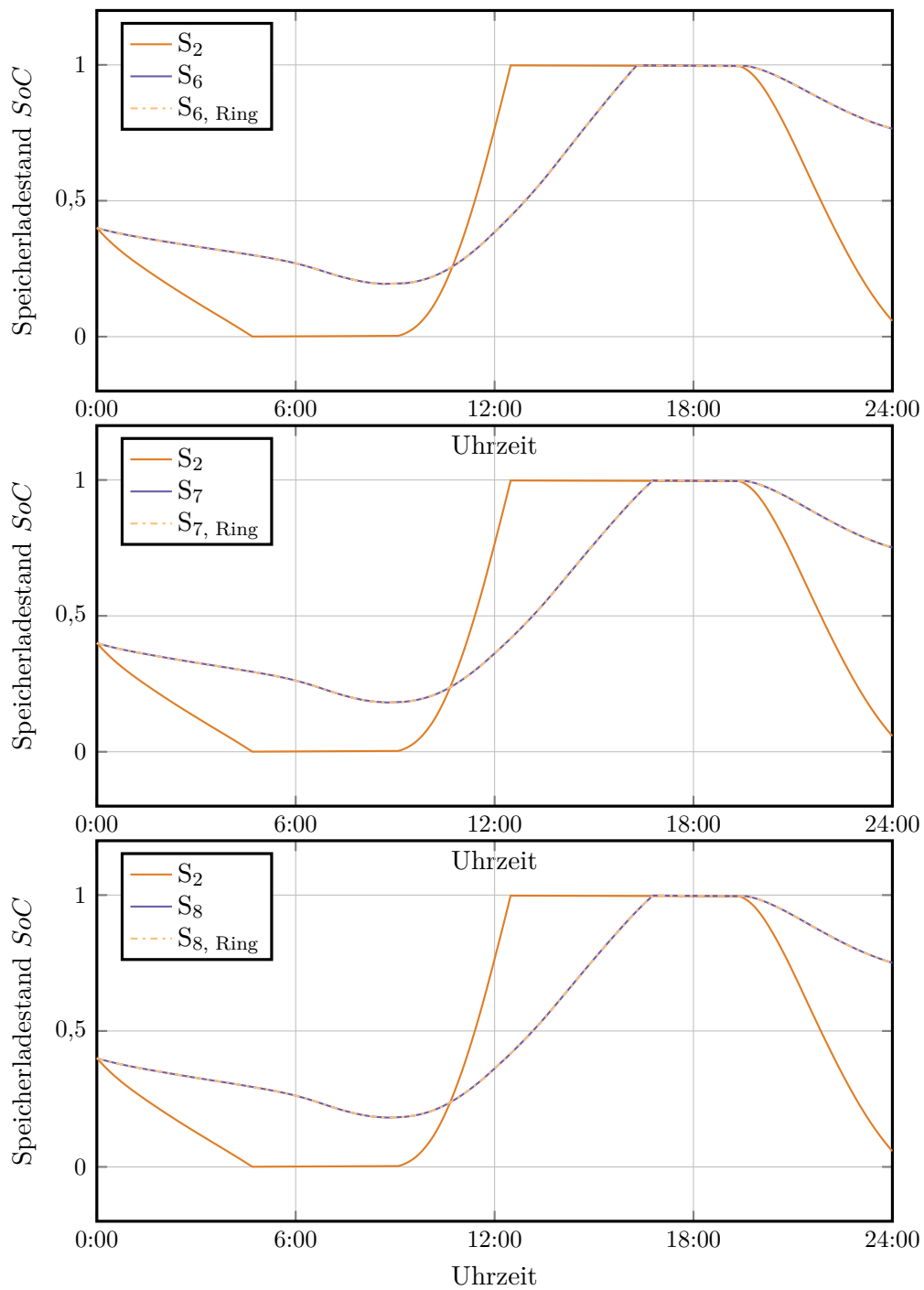
In den Szenarien  $S_6$ – $S_8$  zeigt sich, dass die Speicherinhalte beziehungsweise die Position oder auch die Verteilung der Energie auf die Speicher noch nicht optimal gewählt und konfiguriert ist. Dies kann über die Betriebsstrategie und die gewählten Verteil-Algorithmen geschehen. Eine Veränderung des initialen Startzustandes wäre auch noch als Möglichkeit zu sehen. Hierbei gilt es aber zu beachten, dass bei Simulationen von mehreren Tagen Wechselwirkungen auftreten.

Es wird empfohlen ausgehend von der gewählten Konfiguration des Quartiers entsprechende Optimierungsverfahren zu durchlaufen.



**Abb. H.1** – Verlauf der Speicherladezustände in den Szenarien  $S_2$ – $S_5$ . In jedem der Einzelszenarien wurde der/die Speicher bei  $SoC(t = 0\text{h}) = 0,4$  initialisiert. Durch das Zusammenwirken von Betriebsstrategie und Leistungsflüssen im Netz konnte die Plateau-Phase zeitlich nach hinten geschoben und so länger Energie der PV-Anlagen eingespeichert werden.





**Abb. H.2** – Verlauf der Speicherladestände in den Szenarien  $S_2$  &  $S_6$ – $S_8$ . In jedem der Einzelszenarien wurde der/die Speicher bei  $SoC(t = 0\text{ h}) = 0,4$  initialisiert. Durch das Zusammenwirken von Betriebsstrategie und Leistungsflüssen im Netz konnte die Plateau-Phase zeitlich nach hinten geschoben und so länger Energie der PV-Anlagen eingespeichert werden.



# I Ergänzungen zur thermischen Modellierung des Speicher-Containers

Im Folgenden sind die physikalischen Daten der thermischen Modelle zusammengefasst, angelehnt an die Ausführungen in [SA.3] aufgrund der Datenbasis nach [52, 116, 135, 203] und dem Projekt EEBatt. In den folgenden Gleichungen sind alle angeführten Temperaturen  $T$  als absolute Temperaturen in Kelvin zu berücksichtigen.

$$\dot{q}_{\text{rad,solar}} = \epsilon \cdot P_{\text{solar}} \cdot A_{\text{w,solar}} \quad (\text{I.1})$$

$$\dot{q}_{\text{rad,FK-F1}} = \epsilon \cdot k_{\text{B}} \cdot A_{\text{w,rad}} \cdot \left( T_{\text{FK}}^4 - T_{\text{Fluid}}^4 \right) \quad (\text{I.2})$$

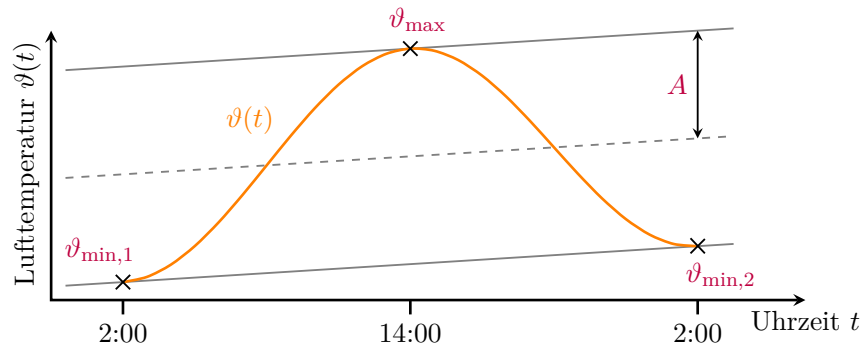
$$\dot{q}_{\text{rad,FK1-FK2}} = \frac{k_{\text{B}} \cdot (T_{\text{FK1}}^4 - T_{\text{FK2}}^4)}{\frac{1}{A_{\text{w,1}} \cdot \epsilon_1} + \frac{1}{A_{\text{w,2}}} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (\text{I.3})$$

$$\dot{q}_{\text{Leitung}} = k_{\text{th}} \cdot A_{\text{w,leit}} \cdot (T_{\text{FK1}} - T_{\text{FK2}}) \quad (\text{I.4})$$

$$\dot{q}_{\text{konv,FK-F1}} = \alpha_{\text{konv}} \cdot A_{\text{w,konv}} \cdot (T_{\text{FK}} - T_{\text{F1}}) \quad (\text{I.5})$$

$$\dot{q}_{\text{konv,F11-F12}} = \frac{\partial V}{\partial t} \cdot \rho_{\text{F1}} \cdot c_{\text{v}} \cdot (T_{\text{F11}} - T_{\text{F12}}) \quad (\text{I.6})$$

In den Gleichungen (I.1) bis (I.3) bezeichnet  $\epsilon$  den Emissionskoeffizienten des Fluidkörpers und  $k_{\text{B}}$  die Boltzmann-Konstante mit  $k_{\text{B}} = 4,567 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ . Die Einstrahlungsleistung der Sonne  $P_{\text{solar}}$  wird anhand von Daten einer Referenz-PV-Anlage des Quartiers modelliert. Für diese Referenz-Anlage existieren Kurven der normierten Einspeiseleistung, sodass in diese Daten näherungsweise auch der Sonnenstand und die Verschattung einfließen. Der Maximalwert der Einstrahlungsleistung wird dabei zu  $1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  angenommen.  $\alpha_{\text{konv}}$  repräsentiert in Gleichung (I.5) den Wärmeübergangskoeffizienten der Konvektion. Für die erzwungene Konvektion wird der natürliche Wärmeübergangskoeffizient vereinfacht mit einem konstanten Faktor skaliert. Durch die Verwendung von Gleichung I.3 sind alle Oberflächen innerhalb des Containers als konkav und vom Container vollständig umschlossen angenommen. Die Verläufe der Lufttemperatur am Standort des Speicher-Containers sind nach groben Daten aus Online-Wetterdatenbanken modelliert. Diese Modellierung setzt sich aus einem linearen Temperaturverlauf von der Minimaltemperatur des betrachteten Tages  $\vartheta_{\text{min},1}$  zu der Minimaltemperatur des Folgetages  $\vartheta_{\text{min},2}$  sowie einem überlagerten cosinusförmigen Anstieg nach Gleichung (I.7) auf die Maximaltemperatur  $\vartheta_{\text{max}}$  zusammen. Abbildung I.1 zeigt den daraus gewonnenen Verlauf. Zudem wird angenommen, dass sowohl die Minimal- als auch die Maximaltemperaturen an jedem Tag um 2 Uhr beziehungsweise 14 Uhr erreicht werden und dieser Temperaturverlauf von den Temperaturen des Containers unbeeinflusst bleibt.



**Abb. I.1** – Darstellung der Kenngrößen und des erzeugten Verlaufs der Außentemperatur  $\vartheta(t)$ . Dieser setzt sich als Superposition von linearem Verlauf zwischen  $\vartheta_{\min,1}$  und  $\vartheta_{\min,2}$  sowie dem Cosinus mit Amplitude  $A$  zusammen. – nach [SA.3]

$$\vartheta(t) = \vartheta_{\min,1} + \Delta\vartheta \cdot (t - 2\text{h}) + A \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{t - 2\text{h}}{24\text{h}} \cdot 2\pi\right) \right] \quad (\text{I.7})$$

mit  $\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{\min,2} - \vartheta_{\min,1}}{24\text{h}}$ ;  $A = \frac{\vartheta_{\max}}{2} - \frac{\vartheta_{\min,2} + \vartheta_{\min,1}}{4}$

**Tab. I.1** – Allgemeine physikalische Daten der thermischen Modelle des Speicher-Containers inklusive der Komponenten Rack und LE

| Parameter                  | Bedeutung   | Wert                                  |
|----------------------------|---|---------------------------------------|
| $\epsilon$                 | Emissionskoeffizient aller modellierten Festkörper  | 0,5                                   |
| $\rho_{Al}$                | Dichte von Aluminium  | $2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$   |
| $\rho_{\text{Luft}}$       | Dichte trockener Luft   | $1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$    |
| $c_{v,Al}$                 | spezifische Wärmekapazität von Aluminium  | $897 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$    |
| $c_{v,\text{Luft}}$        | spezifische Wärmekapazität von Luft   | $1005 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$   |
| $c_{v,Si}$                 | spezifische Wärmekapazität von Silizium   | $700 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$    |
| $c_{v,\text{Stahl}}$       | spezifische Wärmekapazität von Stahl  | $500 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$    |
| $\alpha_{\text{konv,nat}}$ | natürlicher Konvektionskoeffizient  | $4 \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$     |
| $k_{\text{konv,forc}}$     | Koeffizient zur Berücksichtigung erzwungener Konvektion   | 3                                     |
| $k_{\text{th}}$            | k-Wert der Containerwandisolierung  | $0,31 \frac{\text{W}}{\text{kg m}^2}$ |
| $\alpha_{\text{konv,nat}}$ | natürlicher Konvektionskoeffizient  | $4 \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$     |
| $c_{v,LE}$                 | massenanteilig kombinierte spezifische Wärmekapazität von Kupfer und Silizium für LE und Filter | $495 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$    |
| $c_{v,\text{Rack}}$        | spezifische Wärmekapazität eines Racks  | $708 \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$    |
| $m_{LE}$                   | kombinierte Massen von LE und Filter  | 18,6 bzw. 29 kg                       |
| $A_{w,\text{Rack,konv}}$   | kombinierte konvektions Oberfläche der Racks  | $18,8 \text{ m}^2$                    |
| $A_{w,\text{Rack,rad}}$    | kombinierte Oberflächen von LE und Filter   | $5,5 \text{ m}^2$                     |
| $m_{\text{Rack}}$          | kombinierte Massen von Zellen und Peripherie  | 29 kg                                 |

# J Ergebnisse der Validierung mit Simulink-Tool PSAT

Es erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse der Validierung des Netzmodells mit PSAT als Ergänzung zu Teilkapitel 7.3. Die Tabelle J.1 zeigt die durch Simulation mit dem Netzmodell generierten sowie die durch Lastflussberechnung gewonnenen Knotenspannungen, bezogen auf die Nennspannung des Netzes. Beispielhaft ist dies für die Zeitpunkten  $t = 1$  h und  $t = 12$  h aufgeführt. Weiter sind in der Tabelle die relativen Abweichungen zwischen beiden Ergebnissen  $\Delta U_{\text{rel}}$  für jeden Netzknoten berechnet. Ergänzt wird dies durch den durchschnittlichen relativen Fehler zum gegebenen Zeitpunkt  $\Delta \bar{U}_{\text{rel}}$ , sowie den Durchschnitt des betragsmäßigen relativen Fehlers  $|\Delta \bar{U}_{\text{rel}}|$ .

**Tab. J.1** – Gegenüberstellung der an den Netzknoten zum Zeitpunkt  $t = 1$  h und  $t = 12$  h berechneten und bezogenen Spannungswerte aus der Netzsimulation und der Lastflussberechnung mit PSAT. Die durchschnittliche relative betragsmäßige Abweichung beträgt in etwa 0,016 ‰ und 0,216 ‰.

| Knoten    | $U_{\text{N, PSAT}}$<br>in p.u. | $U_{\text{N, Sim}}$<br>in p.u. | $\Delta U_{\text{rel}}$ | $U_{\text{N, PSAT}}$<br>in p.u. | $U_{\text{N, Sim}}$<br>in p.u. | $\Delta U_{\text{rel}}$ |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| $t = 1$ h |                                 |                                | $t = 12$ h              |                                 |                                |                         |
| N1        | 9,9939E-01                      | 9,9939E-01                     | 9,8341E-07              | 1,0037E00                       | 1,0036E00                      | -1,2826E-04             |
| N10       | 9,9930E-01                      | 9,9930E-01                     | 1,2385E-06              | 1,0037E00                       | 1,0036E00                      | -1,4865E-04             |
| N11       | 9,9925E-01                      | 9,9925E-01                     | 8,3334E-07              | 1,0036E00                       | 1,0034E00                      | -1,7925E-04             |
| N12       | 9,9925E-01                      | 9,9925E-01                     | -1,7175E-07             | 1,0035E00                       | 1,0034E00                      | -1,1049E-04             |
| N13       | 9,9926E-01                      | 9,9925E-01                     | -7,3452E-06             | 1,0043E00                       | 1,0041E00                      | -1,5304E-04             |
| N14       | 9,9911E-01                      | 9,9911E-01                     | -2,0362E-06             | 1,0030E00                       | 1,0028E00                      | -1,6246E-04             |
| N15       | 9,9844E-01                      | 9,9843E-01                     | -6,9164E-06             | 1,0117E00                       | 1,0115E00                      | -1,8714E-04             |
| N16       | 9,9939E-01                      | 9,9939E-01                     | 9,8341E-07              | 1,0037E00                       | 1,0036E00                      | -1,2826E-04             |
| N17       | 9,9830E-01                      | 9,9830E-01                     | -2,5044E-06             | 1,0085E00                       | 1,0083E00                      | -1,5532E-04             |
| N18       | 9,9780E-01                      | 9,9780E-01                     | 1,9964E-08              | 1,0122E00                       | 1,0121E00                      | -1,1733E-04             |
| N19       | 9,9808E-01                      | 9,9807E-01                     | -9,0158E-06             | 1,0097E00                       | 1,0096E00                      | -1,4317E-04             |
| N2        | 1,0000E 00                      | 9,9939E-01                     | -6,0902E-04             | 1,0000E00                       | 1,0036E00                      | 3,5713E-03              |
| N20       | 9,9803E-01                      | 9,9802E-01                     | -7,7542E-06             | 1,0084E00                       | 1,0083E00                      | -1,1308E-04             |
| N21       | 9,9809E-01                      | 9,9808E-01                     | -8,5936E-06             | 1,0086E00                       | 1,0084E00                      | -1,6019E-04             |
| N22       | 9,9807E-01                      | 9,9806E-01                     | -5,6000E-06             | 1,0086E00                       | 1,0084E00                      | -2,0364E-04             |
| N23       | 9,9821E-01                      | 9,9821E-01                     | -4,2035E-06             | 1,0105E00                       | 1,0104E00                      | -1,2281E-04             |
| N25       | 9,9900E-01                      | 9,9899E-01                     | -6,1874E-06             | 1,0059E00                       | 1,0057E00                      | -1,7322E-04             |
| N26       | 9,9813E-01                      | 9,9813E-01                     | -3,5115E-06             | 1,0178E00                       | 1,0177E00                      | -1,2764E-04             |
| N27       | 9,9811E-01                      | 9,9811E-01                     | -2,5728E-06             | 1,0182E00                       | 1,0181E00                      | -1,0997E-04             |
| N28       | 9,9795E-01                      | 9,9795E-01                     | -2,2281E-06             | 1,0209E00                       | 1,0208E00                      | -1,4322E-04             |
| N29       | 9,9795E-01                      | 9,9794E-01                     | -6,0475E-06             | 1,0217E00                       | 1,0215E00                      | -1,6089E-04             |
| N30       | 9,9799E-01                      | 9,9799E-01                     | -4,1922E-06             | 1,0177E00                       | 1,0175E00                      | -1,9909E-04             |
| N31       | 9,9796E-01                      | 9,9796E-01                     | -2,3720E-07             | 1,0176E00                       | 1,0174E00                      | -1,6622E-04             |

Fortsetzung auf nächster Seite

**Tab. J.1** – Fortsetzung von vorheriger Seite

| Knoten                               | $U_{N, \text{PSAT}}$ in<br>p.u. | $U_{N, \text{Sim}}$ in<br>p.u. | $\Delta U_{\text{rel}}$ | $U_{N, \text{PSAT}}$ in<br>p.u. | $U_{N, \text{Sim}}$ in<br>p.u. | $\Delta U_{\text{rel}}$ |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| N32                                  | 9,9798E-01                      | 9,9798E-01                     | -1,5399E-06             | 1,0179E00                       | 1,0177E00                      | -1,5208E-04             |
| N33                                  | 9,9793E-01                      | 9,9793E-01                     | -1,5253E-06             | 1,0175E00                       | 1,0174E00                      | -1,4644E-04             |
| N34                                  | 9,9791E-01                      | 9,9791E-01                     | -3,2778E-06             | 1,0175E00                       | 1,0173E00                      | -2,0108E-04             |
| N35                                  | 9,9794E-01                      | 9,9793E-01                     | -5,6748E-06             | 1,0175E00                       | 1,0174E00                      | -1,3177E-04             |
| N36                                  | 9,9513E-01                      | 9,9513E-01                     | -2,9865E-06             | 1,0289E00                       | 1,0287E00                      | -1,7053E-04             |
| N37                                  | 9,9771E-01                      | 9,9770E-01                     | -9,6374E-06             | 1,0167E00                       | 1,0166E00                      | -1,0506E-04             |
| N38                                  | 9,9723E-01                      | 9,9722E-01                     | -7,1379E-06             | 1,0190E00                       | 1,0189E00                      | -1,3325E-04             |
| N39                                  | 9,9696E-01                      | 9,9696E-01                     | -4,8750E-06             | 1,0204E00                       | 1,0203E00                      | -1,0776E-04             |
| N40                                  | 9,9667E-01                      | 9,9666E-01                     | -8,7528E-06             | 1,0221E00                       | 1,0219E00                      | -1,7840E-04             |
| N41                                  | 9,9622E-01                      | 9,9622E-01                     | -2,9051E-06             | 1,0240E00                       | 1,0239E00                      | -1,3452E-04             |
| N42                                  | 9,9621E-01                      | 9,9620E-01                     | -9,6719E-06             | 1,0243E00                       | 1,0241E00                      | -1,5618E-04             |
| N43                                  | 9,9595E-01                      | 9,9595E-01                     | -2,2265E-06             | 1,0247E00                       | 1,0246E00                      | -1,3889E-04             |
| N44                                  | 9,9583E-01                      | 9,9582E-01                     | -9,2654E-06             | 1,0251E00                       | 1,0250E00                      | -1,1173E-04             |
| N45                                  | 9,9552E-01                      | 9,9552E-01                     | -4,6304E-06             | 1,0267E00                       | 1,0265E00                      | -1,5283E-04             |
| N46                                  | 9,9550E-01                      | 9,9549E-01                     | -8,6919E-06             | 1,0269E00                       | 1,0268E00                      | -1,4546E-04             |
| N47                                  | 9,9541E-01                      | 9,9541E-01                     | -3,5624E-06             | 1,0273E00                       | 1,0272E00                      | -1,1152E-04             |
| N49                                  | 9,9832E-01                      | 9,9831E-01                     | -7,8056E-06             | 1,0085E00                       | 1,0084E00                      | -1,1775E-04             |
| N56                                  | 9,9811E-01                      | 9,9811E-01                     | 6,3011E-07              | 1,0087E00                       | 1,0085E00                      | -1,8470E-04             |
| N60                                  | 9,9813E-01                      | 9,9813E-01                     | -3,6293E-06             | 1,0081E00                       | 1,0079E00                      | -1,9633E-04             |
| N61                                  | 9,9803E-01                      | 9,9802E-01                     | -6,1736E-06             | 1,0104E00                       | 1,0103E00                      | -1,1766E-04             |
| N66                                  | 9,9853E-01                      | 9,9853E-01                     | -9,9898E-07             | 1,0106E00                       | 1,0105E00                      | -1,3132E-04             |
| N70                                  | 9,9563E-01                      | 9,9563E-01                     | -2,8584E-06             | 1,0261E00                       | 1,0259E00                      | -1,9319E-04             |
| N71                                  | 9,9559E-01                      | 9,9558E-01                     | -5,1541E-06             | 1,0260E00                       | 1,0258E00                      | -1,9987E-04             |
| N76                                  | 9,9814E-01                      | 9,9813E-01                     | -9,0896E-06             | 1,0178E00                       | 1,0177E00                      | -1,1655E-04             |
| N79                                  | 9,9800E-01                      | 9,9799E-01                     | -6,5438E-06             | 1,0177E00                       | 1,0175E00                      | -1,7989E-04             |
| N81                                  | 9,9798E-01                      | 9,9798E-01                     | -1,2765E-06             | 1,0210E00                       | 1,0208E00                      | -1,6399E-04             |
| N85                                  | 9,9786E-01                      | 9,9786E-01                     | 3,2826E-07              | 1,0243E00                       | 1,0241E00                      | -1,9361E-04             |
| N86                                  | 9,9798E-01                      | 9,9798E-01                     | -1,2983E-06             | 1,0210E00                       | 1,0208E00                      | -1,6401E-04             |
| N9                                   | 9,9939E-01                      | 9,9938E-01                     | -5,6117E-06             | 1,0037E00                       | 1,0036E00                      | -1,4528E-04             |
| $\overline{\Delta U}_{\text{rel}}$   |                                 |                                | -1,5768E-05             |                                 |                                | -7,8917E-05             |
| $ \overline{\Delta U}_{\text{rel}} $ |                                 |                                | 1,5961E-05              |                                 |                                | 2,1627E-04              |

# Liste eigener Veröffentlichungen

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Beiträgen veröffentlicht:

- [V.1] EBENTHEUER, A. W.; HERZOG, M.; HERZOG, H.-G.: „Concept for a Scalable Cybernetic Energy Management System and its Environmental Coupling for a Battery Storage System“. In: EVER 2019. Monte-Carlo, Monaco: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/EVER.2019.8813593.
- [V.2] EBENTHEUER, A. W.; HERZOG, M.; HERZOG, H.-G. et al.: „Skalierbarer Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für ein Energiemanagementsystem eines Batteriespeichers“. In: *Virtuelle Instrumente in der Praxis 2015*. Hrsg. von R. JAMAL. VDE-Verlag, 2015.
- [V.3] EBENTHEUER, A. W.; HERZOG, M.; LAHLOU, T. et al.: „Comparison of Different Power Distribution Algorithms in a Scalable Energy Management Concept“. In: Int. ETG Congress 2017. Bonn, Germany: VDE, 2017. ISBN: 978-3800745050.
- [V.4] HERZOG, M.; EBENTHEUER, A. W.; HERZOG, H.-G.: „State Of Charge Balancing during Fault Tolerant Operation of Battery Storage Systems Based on Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter“. In: EVER 2019. Monte-Carlo, Monaco: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/EVER.2019.8813558.
- [V.5] HERZOG, M.; EBENTHEUER, A. W.; LAHLOU, T. et al.: „Management Algorithms for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters“. In: UPEC 2018. Glasgow, Scotland: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/UPEC.2018.8542005.
- [V.6] HERZOG, M.; EBENTHEUER, A. W.; WINTER, M. et al.: „Applications of the Viable System Model in Automotive and Battery Storage Systems“. In: SMC 2016. Budapest, Hungary: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844490.
- [V.7] HERZOG, M.; LAHLOU, T.; EBENTHEUER, A. W. et al.: „Decentralized Management of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters Based on Cybernetic System Theory“. In: Int. ETG Congress 2017. Bonn, Germany: VDE, 2017. ISBN: 978-3800745050.
- [V.8] MUNICH SCHOOL OF ENGINEERING: *EEBatt – Dezentrale Stationäre Batteriespeicher zur effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien und Unterstützung der Netzstabilität – Zwischenbericht*. 2015. URL: [https://www.mse.tum.de/fileadmin/w00bvc/www/EEBatt/Veroeffentlichungen/TUM14007\\_Zwischenbericht2015\\_LO-1.pdf](https://www.mse.tum.de/fileadmin/w00bvc/www/EEBatt/Veroeffentlichungen/TUM14007_Zwischenbericht2015_LO-1.pdf) (besucht am 18.09.2019).
- [V.9] REHBERGER, S.; VOGEL-HEUSER, B.; EBENTHEUER, A. W. et al.: „A cybernetic multi-agent approach for a micro grid in rural areas“. In: INDIN 2015. Cambridge, UK: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/INDIN.2015.7281704.





# Liste betreuter studentischer Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts betreut:

- [SA.1] BLANCATO, A.: „Research on different energy management systems with focus on Energy Supply application“. Hauptseminar. Technische Universität München, Januar 2014.
- [SA.2] BRATKE, C.: „Entwicklung und Evaluierung einer kombinatorischen Rackauswahl für einen modularen Energiespeicher“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Oktober 2016.
- [SA.3] FISCHER, M.: „Entwicklung eines kybernetischen Energiemanagementkonzepts für stationäre elektrische Energiespeicher“. Masterarbeit. Technische Universität München, Oktober 2015.
- [SA.4] HULM, P.: „Ansatz für ein domänenübergreifendes Energiemanagementsystem in dezentralen Energiespeichern“. Hauptseminar. Technische Universität München, März 2016.
- [SA.5] HULM, P.: „Ansatz für eine intelligente Regelung eines dezentralen Energiespeichers“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, September 2014.
- [SA.6] JURISIC, N.: „Ansatz zur prädiktiven kybernetischen Umweltkopplung im Energiemanagement eines stationären Energiespeichers“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Februar 2018.
- [SA.7] KRONAWITTER, M.: „Definition einer Schnittstelle für ein Energie- und Batteriemanagementsystem in einem stationären Speichersystem“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, März 2015.
- [SA.8] KUPAS, L.: „Untersuchung der Darstellbarkeit von Stafford Beers Viable System Model mithilfe von Systemmodellierungssprachen“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Juni 2019.
- [SA.9] LADHARI, O.: „Recherche, Definition, Deklaration und Vergleich von Speichermanagementsystemen“. Hauptseminar. Technische Universität München, September 2015.
- [SA.10] LINDERMAYR, M.: „Ansatz eines Testkonzepts für ein elektrisches Energiemanagementsystem“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, August 2014.
- [SA.11] MAIER, D.: „Konzept für eine intelligente Rackauswahl für ein stationäres Batteriespeichersystem“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, April 2015.
- [SA.12] MITTERER, T.: „Ansatz zur Weiterentwicklung von Subsystemen eines stationären Batteriespeichers hin zu lebensfähigen Systemen nach dem Viable System Model“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, November 2016.

- [SA.13] MNEJJA, O.: „Komplexitätsreduzierung und Datenverarbeitung im Energiemanagement eines stationären Energiespeichers“. Hauptseminar. Technische Universität München, Januar 2018.
- [SA.14] NIEDERLE, S.: „Anschlussbedingungen und Möglichkeiten der Netzregulierung und Netzstützung im Niederspannungsnetz“. Hauptseminar. Technische Universität München, Dezember 2018.
- [SA.15] NIEDERLE, S.: „Erweiterung eines EMS-Simulationsmodells und Prüfstandsbetreuung“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, Juli 2016.
- [SA.16] NIEDERLE, S.: „Erweiterung, Regelung und Validierung eines vereinfachten Netzmodells für ein Niederspannungsquartier in Bayern“. Masterarbeit. Technische Universität München, Juli 2019.
- [SA.17] NIEDERLE, S.: „Vereinfachte Netzmodellierung für ein Niederspannungsquartier in Bayern“. Forschungspraxis. Technische Universität München, Juli 2018.
- [SA.18] NIEDERLE, S.: „Vergleich von unterschiedlichen Leistungsverteilungsalgorithmen für stationäre Batteriespeicher“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, April 2016.
- [SA.19] PHAM, T. S.: „Fehler- und mögliche Testfälle eines dezentralen Energiespeichersystems“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, März 2015.
- [SA.20] ROTH, S.: „Strukturierung kybernetischer Prinzipien in technischen Systemen mit Anwendung auf einen stationären Batteriespeicher“. Hauptseminar. Technische Universität München, August 2016.
- [SA.21] SCHNEIDER, D.: „Physikalische Kommunikation und die Größen Spannung, Strom und Frequenz in der elektrischen Energieversorgung“. Hauptseminar. Technische Universität München, Februar 2018.
- [SA.22] SHORAJ, F.: „Recherche und Vergleich zu unterschiedlichen Bussystemen und ihre Erweiterbarkeit in Echtzeitsysteme (Ethernet, CAN, Alternativen)“. Hauptseminar. Technische Universität München, Januar 2015.
- [SA.23] TABACARU, V.: „Research on different energy management systems with focus on vehicles and mobile applications“. Hauptseminar. Technische Universität München, Januar 2014.
- [SA.24] TURAK, D.: „Recherche über verschiedene Energiemanagementsysteme in der Fahrzeug- und der Energieversorgungstechnik mit Einflüssen aus der Kybernetik“. Hauptseminar. Technische Universität München, Januar 2014.
- [SA.25] WEISS, M.: „Konzept zur Bestimmung der kybernetischen Varietät von technischen Systemen am Beispiel eines stationären Energiespeichers“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Februar 2018.
- [SA.26] YANG, H.: „Energiemanagement in der Energieerzeugung“. Hauptseminar. Technische Universität München, September 2014.
- [SA.27] ZAHN, M.: „Selbstorganisation und Lebensfähigkeit von technischen Systemen“. Hauptseminar. Technische Universität München, März 2018.
- [SA.28] ZHENG, M.: „Vereinheitlichung von Leistungsauswahl Algorithmen in C für ein Simulink-Modell“. Forschungspraxis. Technische Universität München, Januar 2018.

# Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D.: „Konzept einer bionischen E/E-Architektur für Fahrzeuge nach dem Vorbild des menschlichen Körpers“. Dissertation. Deutschland: Technische Universität München, 2016. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/1285557>.
- [2] ADAM, D.; FRÖSCHL, J.; BAUMGARTEN, U. et al.: „Cyber Organic System-Model – New Approach for Automotive System Design“. In: ADAPTIVE. Nice, France, 2015, S. 92–97. ISBN: 978-1612083919.
- [3] ADAM, M.: „Lebensfähigkeit sozialer Systeme – Stafford Beer’s Viable System Model im Vergleich“. Dissertation. Schweiz: Universität St. Gallen, 2001.
- [4] AG ENERGIEBILANZEN E.V.: *Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 –2018*. 2018. URL: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=20181214\\_brd\\_stromerzeugung1990-2018.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20181214_brd_stromerzeugung1990-2018.pdf) (besucht am 18.09.2019).
- [5] ALLRUTZ, R.; KREBS, J.; SCHANZ, V.: „Organic Computing – Computer- und Systemarchitekturen im Jahr 2010“. In: *VDE/ITG/GI - Positionspapier* (2010).
- [6] ÁLVAREZ-MOLINA, E. R.; MARTÍNEZ, L. G.; CASTA NÓN-PUGA, M.: „A Neuro-Fuzzy System as a complex system of emergent behavior in organizations“. In: 2nd World Conference on Complex Systems. Agadir, Morocco, 2014, S. 463–468. DOI: 10.1109/ICoCS.2014.7060893.
- [7] AMAN, S.; SIMMHAN, Y.; PRASANNA, V. K.: „Energy management systems: state of the art and emerging trends“. In: *IEEE Communications Magazine* 51 (2013), S. 114–119. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6400447.
- [8] ANSOFF, I. H.: *Strategic Management*. Pal. Macmillan, 1979. ISBN: 978-1349029730.
- [9] ANWENDUNGSREGEL: *VDE-AR-E 2510-2 Anwendungsregel:2015-09 Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz*. VDE Verlag, Berlin, 2015.
- [10] ANWENDUNGSREGEL: *VDE-AR-E 2510-50 Anwendungsregel:2017-05 Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien*. VDE Verlag, Berlin, 2017.
- [11] ANWENDUNGSREGEL: *VDE-AR-N 4100 Anwendungsregel:2019-04 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung)*. VDE Verlag, Berlin, 2019.
- [12] ANWENDUNGSREGEL: *VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel:2018-11 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*. VDE Verlag, Berlin, 2018.
- [13] APPELRATH, H.-J.: *Hybridnetze für die Energiewende - Forschungsfragen aus Sicht der IKT*. Studie. Acatech – Dt. Akad. der Technikwissenschaften, 2012.
- [14] ASHBY, W. R.: *Design for a brain: The origin of adaptive behaviour*. 2. Aufl. Chapman und Hall, 1960. ISBN: 978-0412200908.

- [15] ASHBY, W. R.: *Einführung in die Kybernetik*. 2. Aufl. Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 1974. ISBN: 978-3518276341.
- [16] ASHBY, W. R.: „Principles of the self-organizing system“. In: *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium* (1962), S. 255–278.
- [17] AULIN-AHMAVAARA, A.: „The Law of Requisite Hierarchy“. In: *Kybernetes* 8-4 (1979), S. 259–266. DOI: 10.1108/eb005528.
- [18] BABAR, M.; GRELA, J.; OZADOWICZ, A. et al.: „Energy Flexometer: An Effective Implementation of Internet of Things for Market-based Demand Response in an Energy Management System“. In: *Int. Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Milan, Italy, 2014. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977423.
- [19] BABAZADEH, H.; GAO, W.; WU, Z. et al.: „Optimal energy management of wind power generation system in islanded microgrid system“. In: *North American Power Symposium (NAPS)*. Manhattan, KS, USA, 2013. DOI: 10.1109/NAPS.2013.6666871.
- [20] BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *Standardlastprofile Strom*. 2017. URL: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/> (besucht am 18.09.2019).
- [21] BEER, S.: *Diagnosing the system for organizations*. 4. Aufl. Wiley, Chichester, 1995. ISBN: 0471951366.
- [22] BEER, S.: *Kybernetik und Management*. 4. Aufl. S. Fischer, 1970. ISBN: 978-3101068018.
- [23] BEER, S.: *Kybernetische Führungslehre*. Herder Herder, 1973. ISBN: 978-3585320008.
- [24] BEER, S.: „National government: disseminated regulation in real time, or 'How to run a country'“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer's VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 333–360. ISBN: 0471922889.
- [25] BEER, S.: *The heart of Enterprise*. John Wiley und Sons Ltd., 1995. ISBN: 978-0471948377.
- [26] BEER, S.: „The Viabe System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathodology“. In: *Journal of the Operational Research Society* (1984). DOI: 10.1057/jors.1984.2.
- [27] BEER, S.: „Towards the Cybernetic Factory“. In: *Principles of Self-Organization. Transactions of the University of Illinois Symposium of Self-Organization*. Hrsg. von H. FOERSTER; G. W. ZOPF. Pergamon Press Ltd., 1962.
- [28] BERNDT, H.; HERMANN, M.; KREYE, H. D. et al.: *TransmissionCode 2007: Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber*. Regelwerk Ver. 1.1. Verband der Netzbetreiber – VDN, 2007.
- [29] BING; HERE MAPS; DIGITAL GLOBE: *Kartenausschnitt Moosham*. 2019. URL: <https://binged.it/2ZIZ2es> (besucht am 18.09.2019).
- [30] BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R.; LISERRE, M.: „Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 5 (2006), S. 1398–1409. DOI: 10.1109/TIE.2006.881997.

- 
- [31] BMWI: *Gesetzeskarte für das Energieversorgungssystem*. 2018. URL: [www.bmwi.de/gesetzeskarte](http://www.bmwi.de/gesetzeskarte) (besucht am 18.09.2019).
- [32] BRAUNER, G.: *Energiesysteme: regenerativ und dezentral*. Springer, 2016. ISBN: 978-3658127541.
- [33] BRENA, R. F.; HANDLIN, C. W.; ANGULO, P.: „A smart grid electricity market with multiagents, smart appliances and combinatorial auctions“. In: *IEEE First Int. Smart Cities Conference*. Guadalajara, Mexico, 2015. DOI: 10.1109/ISC2.2015.7366213.
- [34] BRITTON, G. A.; MCCALLION, H.: „Application of the VSM to the trade training network in New Zealand“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 145–174. ISBN: 0471922889.
- [35] BRITTON, G.: „A Methodology for using Beer’s Viable System Model“. In: *Journal of Cybernetics and Systems* 20 (1989). DOI: 10.1080/01969728908902207.
- [36] BROCKLESBY, J.; CUMMINGS, S.: „Designing a viable organization structure“. In: *Long Range Planning* 29 (1996), S. 49–57. DOI: 10.1016/0024-6301(95)00065-8.
- [37] BROCKLESBY, J.; MINGERS, J.: „The use of the concept autopoiesis in the theory of viable systems“. In: *Systems Research and Behavioral Science* 22 (2005), S. 3–9. DOI: 10.1002/sres.603.
- [38] BROSZE, T.; SCHÜRMEYER, M.; BAUHOFF, F. et al.: „High resolution production control by real time information“. In: *17th Int. Conference on Concurrent Enterprising*. Aachen, Germany, 2011.
- [39] BRÜCKLER, F. M.: *Geschichte der Mathematik kompakt – Das Wichtigste aus Analysis, Wahrscheinlichkeitstheorie, angewandter Mathematik, Topologie und Mengenlehre*. Springer, 2018. ISBN: 978-3662555736.
- [40] BUCHHOLZ, B. M.; STYCZYNSKI, Z. A.: *Smart Grids – Grundlagen und Technologien der elektrischen Netze der Zukunft*. VDE-Verlag, 2014. ISBN: 978-3800735624.
- [41] BÜCHTER, A.; HENN, H.-W.: *Eine Einführung in die Mathematik der Daten und des Zufalls*. 2. Aufl. Springer, 2007. ISBN: 978-3540453819.
- [42] BUCKL, S.; MATTHES, F.; SCHWEDA, C. M.: „A viable system perspective on enterprise architecture management“. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. San Antonio, Texas, 2009, S. 1483–1488. DOI: 10.1109/ICSMC.2009.5346262.
- [43] BÜHRING, W.; REINHART, M.; GOLLE, H. et al.: „The Cellular Approach – Business Models Using Efficient Smart Buildings to Push Renewable Energy“. In: *Int. ETG Congress 2019*. Esslingen, Germany: VDE, 2019. ISBN: 978-3800749546.
- [44] BUNDESAMT FÜR JUSTIZ: *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017)*. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/BJNR106610014.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html) (besucht am 18.09.2019).
- [45] BVES: *Brüssel für mehr Flexibilität im System – EU-Trilog zum Strommarktdesign entscheidet für netzdienlich eingesetzte Energiespeicher*. 2018. URL: [https://www.bves.de/eu\\_speicher-doppelbelastung\\_trilogergebnis/](https://www.bves.de/eu_speicher-doppelbelastung_trilogergebnis/) (besucht am 18.09.2019).

- [46] COMFORT, L. K.; SUNGU, Y.; JOHNSON, D. et al.: „Complex Systems in Crisis: Anticipation and Resilience in Dynamic Environments“. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 9 (2001), S. 144–158. DOI: 10.1111/1468-5973.00164.
- [47] CONANT, R. C.; ASHBY, W. R.: „Every good regulator of a system must be a model of that system“. In: *Workshop on Engineering Applications – Int. Congress on Engineering* (2015). DOI: 10.1109/WEA.2015.7370146.
- [48] COUFFIGNAL, L.: *Kybernetische Grundbegriffe*. agis, 1962.
- [49] CRASTAN, V.: *Elektrische Energieversorgung 1. Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*. 4. Aufl. Springer, 2015. ISBN: 978-3662459843.
- [50] CRASTAN, V.: *Elektrische Energieversorgung 2. Energiewirtschaft und Klimaschutz Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung*. 4. Aufl. Springer, 2018. ISBN: 978-3662489642.
- [51] CRASTAN, V.; WESTERMANN, D.: *Elektrische Energieversorgung 3. Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -führung, Leit- und Informationstechnik FACTS, HGÜ*. 2. Aufl. Springer, 2018. ISBN: 978-3662490204.
- [52] CZICHOS, H.: *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 2. Aufl. Springer, 2000. ISBN: 978-3662066539.
- [53] DEUTSCHER BUNDESTAG: *Doppelbelastung für Stromspeicher- hib 262/2019*. 2019. URL: <https://www.bundestag.de/presse/hib/628408-628408> (besucht am 18.09.2019).
- [54] DEVINE, S.: „The Viable Systems Model Applied to a National System of Innovation to Inform Policy Development“. In: *Systemic Practice and Action Research* 18 (2005), S. 491–517. DOI: 10.1007/s10979-005-8485-y.
- [55] DHILLON, S. K.; IBRAHIM, R.; SELAMAT, A.: „Social cognitive theory and Viable System Model for diagnosing publication productivity“. In: *IEEE Int. Conference on Software Engineering and Computer Systems*. Kuantan, Malaysia, 2015, S. 201–206. DOI: 10.1109/ICSECS.2015.7333110.
- [56] DI PIAZZA, M. C.; LUNA, M.; LA TONA, G. et al.: „Energy Management of Hybrid PV-Storage Systems for Improved Grid Integration“. In: *Int. Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Milan, Italy, 2014. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977539.
- [57] DIMEAS, A.; HATZIARGYRIOU, N.: „A MAS Architecture for Microgrids Control“. In: *Int. Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*. Arlington, USA, 2005. DOI: 10.1109/ISAP.2005.1599297.
- [58] DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A.: „Ant system: optimization by a colony of cooperating agents“. In: *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics* 1 (1996), S. 29–41. DOI: 10.1109/3477.484436.
- [59] DUCROCQ, A.: *Die Entdeckung der Kybernetik*. Europ. Verl.-Anst., 1959.
- [60] DUDENREDAKTION: *Management*. 2019. URL: <https://www.duden.de/node/673152/revisions/1994563/view> (besucht am 18.09.2019).

- 
- [61] EHSANI, M.; N. SHIDORE, N.; GAO, Y.: „On board power management“. In: *Power Electronics in Transportation* (2004). DOI: 10.1109/PET.2004.1393783.
- [62] ELEZI, F.; SCHMIDT, M. T.; TOMMELEIN, I. et al.: „Analyzing implementation of lean production control with the Viable System Model“. In: *IEEE Int. Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Bandar Sunway, 2014, S. 443–447. DOI: 10.1109/IEEM.2014.7058677.
- [63] ELEZI, F.; SCHMIDT, M. T.; TOMMELEIN, I. et al.: „Enhanced viability in organizations: An approach to expanding the requirements of the viable system model“. In: *IEEE Int. Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Bangkok, Thailand, 2013, S. 605–610. DOI: 10.1109/IEEM.2013.6962483.
- [64] ERBSEN, A.: „Krankheit im Zentrum – Gestaltung von krankheitsorientierten Spitalstrukturen aus kybernetisch-konstruktivistischer Sicht“. Dissertation. Schweiz: Universität St. Gallen, 2012. ISBN: 978-3658004378.
- [65] ESPEJO, R.: „A cybernetic method to study organizations“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 333–360. ISBN: 0471922889.
- [66] ESPEJO, R.: „The VSM revisited“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 77–100. ISBN: 0471922889.
- [67] ESPEJO, R.; BOWLING, D.; HOVERSTADT, P.: „The viable system model and the Viplan software“. In: *Kybernetes* (1999). DOI: 10.1108/03684929910282944.
- [68] ESPEJO, R.; REYES, A.-A.: *Organizational systems: Managing complexity with the viable system model*. Springer, 2011. ISBN: 978-3642191091.
- [69] ESPINOSA, A.; HARNDEN, R.; WALKER, J.: „A complexity approach to sustainability – Stafford Beer revisited“. In: *European Journal of Operational Research* 2 (2008), S. 636–651. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.03.023.
- [70] ESPINOSA, A.; REFICCO, E.; MARTÍNEZ, A. et al.: „A methodology for supporting strategy implementation based on the VSM: A case study in a Latin-American multi-national“. In: *European Journal of Operational Research* 240 (2015), S. 202–212. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.06.014.
- [71] ESPINOSA, A.; WALKER, J.: „Complexity management in practice: A Viable System Model intervention in an Irish eco-community“. In: *European Journal of Operational Research* 225 (2013), S. 118–129. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.09.015.
- [72] FARROKHABADI, M.: „Energy Storage in Microgrids: Compensating for Generation and Demand Fluctuations While Providing Ancillary Services“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 15 (2017), S. 81–91. DOI: 10.1109/MPE.2017.2708863.
- [73] FLECHTNER, H.-J.: *Grundbegriffe der Kybernetik: Eine Einführung*. 2. Aufl. WVA, 1967.
- [74] FLOUDAS, C. A.: *Deterministic Global Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer, 2000. ISBN: 978-1475749496.
- [75] FLOUDAS, C. A.: *Operations Research: A Model-Based Approach*. Springer, 2012. ISBN: 978-3642310546.

- [76] FONSECA, C.; ANGEL, M.; DIAZ, R.: „Methodology for the design and implementation of strategy based on Cybernetics and Complexity Science: A case study in Rafael Uribe Uribe Hospital Bogotá D.C., Colombia“. In: Workshop on Engineering Applications – Int. Congress on Engineering. Bogotá, Colombia, 2014. DOI: 10.1109/WEA.2015.7370146.
- [77] FORRESTER, J. W.: *Grundzüge einer Systemtheorie*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1972. ISBN: 978-3663020950.
- [78] FOSS, R.: „The organization of a Fortress Factory“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 121–143. ISBN: 0471922889.
- [79] FRANK, H.: *Kybernetik und Philosophie – Materialien und Grundriß zu einer Philosophie der Kybernetik*. Duncker & Humblot, 1969. ISBN: 978-3428004331.
- [80] FREY, H.: *Energieautarke Gebäude – Auf dem Weg zu Smart Energy Systems*. Springer, 2019. ISBN: 978-3662578735.
- [81] FRÖSCHL, J.: „Another Revolution in the BMW 7 series: Maximizing efficiency and stability with ConnectedPowerManagement“. In: Int. Congress Electronics in Vehicles. Düsseldorf, Germany, 2015.
- [82] FRÖSCHL, J.: „Cybernetic aspects of a design for resiliency“. In: Int. Workshop on Cross-Layer Resilience. Munich, Germany, 2015.
- [83] FRÖSCHL, J.: „Investigation of the stability of a State Triggered Energy Management System“. In: Electric and Electronic Systems in Hybrid and Electrical Vehicles and Electrical Energy Management. Bamberg, Germany, 2014.
- [84] FRÖSCHL, J.: „Kybernetisches Energiemanagement elektrischer Energiewandlung in Kraftfahrzeugen“. Dissertation. Technische Universität München, 2020. ISBN: 978-3843945264.
- [85] FRÖSCHL, J.; EPPELEIN, A.; WENDLER, R. et al.: „ConnectedPowerManagement Monitor as a view into a cybernetic energy and power management – An isomorphic tool design concept“. In: *Haus der Technik-Fachbuch* 142 (2016), S. 526–532.
- [86] FRÖSCHL, J.; HERZOG, H.-G.: „The graphical representation of complex cybernetic systems“. In: EEHE - Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement. Bamberg, Germany, 2017.
- [87] FRÖSCHL, J.; IMMEL, G.; BRUNNER, A. et al.: „Die nächste Revolution im BMW 7er: Maximale Effizienz und Stabilität mit ConnectedPowerManagement“. In: VDI-Berichte. Bd. 2249. 2015, S. 469–481. ISBN: 978-3180922492.
- [88] FRÖSCHL, J.; KURTZ, S.; WINTER, M. et al.: „Concept of a decision system for an operating strategy in a cybernetic energy and power management“. In: *Haus der Technik-Fachbuch*. Bd. 142. 2016, S. 472–482. ISBN: 978-3816933465.
- [89] GEILHAUSEN, M.; BRÄNZEL, J.; ENGELMANN, D. et al.: *Energiemanagement – Für Fachkräfte, Beauftragte und Manager*. Springer, 2015. ISBN: 978-3658028343.
- [90] GIANCOLI, D.: *Physik: Lehr- und Übungsbuch*. Pearson Deutschland GmbH, 2009. ISBN: 978-3863265694.
- [91] GIOVANAZZI, T. P.: „Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen“. Dissertation. Technische Universität München, 2014. ISBN: 978-3658050122.



- 
- [92] GITIS, A.; ECHTERNACHT, D.; KLEIMAIER, M.: „Dezentrale Energiespeicher: Einsatzmöglichkeiten, Bedarf und Wirtschaftlichkeit“. In: KREUSEL, W. *VDE-Kongress 2014 – Smart Cities*. VDE Verlag, 2014, S. 117–123. ISBN: 978-3800736416.
- [93] GLAUNSINGER, W.; JOSSEN, A.; REHTANZ, C.: *Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene: Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze*. Studie. VDE, 2015.
- [94] GLAUNSINGER, W.; MOSER, A.; STERNER, M. et al.: *Energiespeicher für die Energiewende – Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050*. Studie. VDE, 2012.
- [95] GOLNAM, A.; REGEV, G.; WEGMANN, A.: „On Viable Service Systems: Developing a Modeling Framework for Analysis of Viability in Service Systems“. In: *Exploring Services Science: Second Int. Conference*. Geneva, Switzerland, 2011, S. 30–41. DOI: 10.1007/978-3-642-21547-6\_3.
- [96] GOMEZ, P.: *Modelle und Methoden des systemorientierten Managements: eine Einführung*. Schriftenreihe des Management-Zentrums Sankt Gallen. P. Haupt, 1981. ISBN: 978-3258030388.
- [97] GROB, C.: *Gehirn: Aufbau und Funktion*. URL: [http://www.onmeda.de/anatomie/gehirn\\_anatomie.html](http://www.onmeda.de/anatomie/gehirn_anatomie.html) (besucht am 18.09.2019).
- [98] GUMPERT, N.: *Nervensystem*. 2018. URL: <http://www.dr-gumpert.de/html/nervensystem.html> (besucht am 18.09.2019).
- [99] GÜNTHER, M.: *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien – Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Springer, 2015. ISBN: 978-3658067533.
- [100] HEIMRATH, A.; FROESCHL, J.; BAUMGARTEN, U.: „Reflex-Augmented Reinforcement Learning for Electrical Energy Management in Vehicles“. In: ARABNIA, H. R. *Proceedings of the 2018 Int. Conference on Artificial Intelligence*. CSREA Press, 2018, S. 429–430. ISBN: 1-60132-480-4.
- [101] HEIMRATH, A.; FRÖSCHL, J.; BARBEHÖN, K. et al.: „Künstliche Intelligenz für das elektrische Energiemanagement: Zukunft kybernetischer Managementsysteme“. In: *Elektronik automotive* (Aug. 2019), S. 42–46.
- [102] HENN, V.: „Materialien zur Vorgeschichte der Kybernetik“. In: *Studium Generale, Band 22*. De Gruyter Verlag, Berlin, 1969, S. 164–190.
- [103] HEROLD, C.: „Ein Vorgehenskonzept zur Unternehmensstrukturierung: eine heuristische Anwendung des Modells Lebensfähiger Systeme“. Dissertationen. Hochschule St. Gallen, 1991.
- [104] HEROLD, G.: *Elektrische Energieversorgung – Eine kleine Einführung*. Schlembach-Fachverlag, 2013. ISBN: 978-3935340762.
- [105] HERRING, C.; KAPLAN, S.: „Viable systems: the control paradigm for software architecture revisited“. In: *Software Engineering Conference*. Canberra, Australia, 2000. ISBN: 10.1109/ASWEC.2000.844566.
- [106] HERWIG, H.: *Energie: Richtig bewerten und sinnvoll nutzen*. Springer, 2016. ISBN: 978-3658129194.
- [107] HEUCK, K.; DETTMANN, K.-D.; SCHULZ, D.: *Elektrische Energieversorgung – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. Springer, 2013. ISBN: 978-3834821744.

- [108] HEYLIGHEN, F.; JOSLYN, C.: „Cybernetics and Second-Order Cybernetics“. In: MEYERS, R. A. *Encyclopedia of physical science and technology*. Acad. Press, 2002. ISBN: 978-0122274107.
- [109] HUTCHINSON, B.; WARREN, M.: „Information warfare: using the viable system model as a framework to attack organisations“. In: *Australian journal of information systems* 9 (2002), S. 67–74. URL: <http://hdl.handle.net/10536/DRO/DU:30008561> (besucht am 18.09.2019).
- [110] JACKSON, M. C.: „Evaluating the managerial significance of the VSM“. In: *The Viable System Model – Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*. Hrsg. von R. ESPEJO; R. HARNDEN. John Wiley & Sons, 1989, S. 407–439. ISBN: 0471922889.
- [111] JAFAROV, N.; LEWIS, E.: „Reinterpreting the principles of SOA through the cybernetic concepts of VSM to design the ESB as iPaaS in the cloud“. In: Science and Information Conference. London, UK, 2015, S. 850–858. DOI: 10.1109/SAI.2015.7237243.
- [112] JESCHKE, S.; SCHMITT, R.; DRÖGE, A.: *Exploring Cybernetics – Kybernetik im interdisziplinären Diskurs*. Springer, 2015. ISBN: 978-3658117542.
- [113] JIA, L.; ZHU, Q.: „The research on electromagnetic launch system based on VSM“. In: Int. Conference on Systems and Informatics. Yantai, China, 2012, S. 487–490. DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223042.
- [114] JONES, S. J.; RODRIGUEZ-DIAZ, A.: „A cybernetic approach to multi-agent system simulation in Tijuana-San Diego using the Viable Systems Model“. In: IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics. Montreal, Que., 2007. DOI: 10.1109/ICSMC.2007.4413698.
- [115] JOOS, G.: „The Need for Standardization: The Benefits to the Core Functions of the Microgrid Control System“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 15 (2017), S. 32–40. DOI: 10.1109/MPE.2017.2690518.
- [116] JOSSEN, A.; WEYDANZ, W.: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Reichardt Verlag, 2006. ISBN: 978-3939359111.
- [117] KARL, J.: *Dezentrale Energiesysteme – Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt*. 3. Aufl. De Gruyter, 2012. ISBN: 978-3486714920.
- [118] KEPHART, J. O.: „The vision of autonomic computing“. In: *Computer* 36 (2003). DOI: 10.1109/MC.2003.1160055.
- [119] KESSELS, J.: „Energy management for automotive power nets“. Dissertation. Technische Universität Eindhoven, 2007. DOI: 10.6100/IR617399.
- [120] KIRCHHOF, R.: *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement – Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen*. Deutscher Universitätsverlag, 2003. ISBN: 978-3663101291.
- [121] KOHLER, T. P.; EBENTHEUER, A. W.; THANHEISER, A. et al.: „Development of an intelligent cybernetic load control for power distribution management in vehicular power nets“. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago, USA, 2011. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043048.

- 
- [122] KOHLER, T. P.; FROESCHL, J.; BERTRAM, C. et al.: „Approach of a Predictive, Cybernetic Power Distribution Management“. In: 25th World Electric Vehicle Symposium and Exposition. Shenzhen, China, 2010, S. 22–30.
- [123] KOULOURA, T. C.; PANAGIOTAKOPOULOS, P. D.; SAFIGIANNI, A. S.: „A Systems Approach to Corporate Sustainability in Energy Management of Industrial Units“. In: *IEEE Systems Journal* 2 (2008), S. 442–452. DOI: 10.1109/JSYST.2008.2003296.
- [124] KROPOSKI, B.; JOHNSON, B.; ZHANG, Y. et al.: „Achieving a 100 Percent Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 2 (2017), S. 61–73. DOI: 10.1109/MPE.2016.2637122.
- [125] KUMMAMURU, S.; HUSSAINI, S. W.: „Designing an Organization Structure for large and complex IT Programs using The Viable System Model“. In: IEEE Region 10 Conference TENCN. Macao, China, 2015. DOI: 10.1109/TENCON.2015.7372958.
- [126] KÜPPERS, E. W. U.: *Eine transdisziplinäre Einführung in die Welt der Kybernetik*. Springer, 2019. ISBN: 978-3658237240.
- [127] KURZWEIL, P.; DIETLMEIER, O. K.: *Elektrochemische Speicher – Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*. Springer, 2015. ISBN: 978-3658109004.
- [128] LAGORSE, J.; PAIRE, D.; MIRAOU, A.: „A multi-agent system for energy management of distributed power sources“. In: *Renewable Energy* 35 (2010), S. 174–182. DOI: 10.1016/j.renene.2009.02.029.
- [129] LAHLOU, T.; MURESAN, V. I.; BOLVASHENKOV, I. et al.: „Space Vector Modulation for 17-Level Cascaded H-Bridge Inverter for Use in Battery Energy Storage Systems“. In: EVER 2018. Monte-Carlo, Monaco, 2018. DOI: 10.1109/EVER.2018.8362379.
- [130] LAHLOU, T.; TIEFNIG, R.; BOLVASHENKOV, I. et al.: „Physical Simulation of an H-Bridge Inverter on Component-Level for Use in Energy Storage System with Measurement Assessment“. In: EVER 2018. Monte-Carlo, Monaco, 2018. DOI: 10.1109/EVER.2018.8362378.
- [131] LEHNHOFF, S.: „Dezentrales vernetztes Energiemanagement: Ein Ansatz auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems“. Dissertation. Technischen Universität Dortmund, 2010. ISBN: 978-3834812704.
- [132] LEONARD, A.: „Modelling Response to Catastrophe Using Beer’s VSM: Viability for Effective Action“. In: *Kybernetes* 22.6 (1993), S. 79–90. DOI: 10.1108/eb005993.
- [133] LEW, D.; ASANO, M.; BOEMER, J. et al.: „Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 6 (2017), S. 50–60. DOI: 10.1109/MPE.2017.2729104.
- [134] LOMBARDI, P.; POWALKO, M.; RUDION, K.: „Optimal operation of a virtual power plant“. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada, 2009. DOI: 10.1109/PES.2009.5275995.

- [135] LOOS, S.: „Olivin-Typ Lithiumeisenphosphat ( $\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$ ) – Synthese, Li-Ionen-transport und Thermodynamik“. Dissertation. Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2015. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa-160947>.
- [136] LUKOVIC, S.; KAITOVIC, I.; MURA, M.: „Virtual Power Plant As a Bridge between Distributed Energy Resources and Smart Grid“. In: 43rd Hawaii Int. Conference on System Sciences. Honolulu, HI, USA, 2010. DOI: 10.1109/HICSS.2010.437.
- [137] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1, Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 11. Aufl. Springer, 2016. ISBN: 978-3258073965.
- [138] MAIER, T. G.; ELEZI, F.; LINDEMANN, U.: „A snapshot approach for applying the Viable System Model in management systems“. In: 7th IEEE Int. Systems Conference. Orlando, Florida, 2013, S. 431–436. DOI: 10.1109/SysCon.2013.6549918.
- [139] MAINZER, K.: „Künstliche Intelligenz: Grundlagen und Herausforderungen“. In: *Technik in Bayern* (März 2018). URL: [https://www.technik-in-bayern.de/fileadmin/mediapool\\_tib/bilder/Aktives\\_Archiv/TiB\\_03-2018\\_KI\\_gesamt.pdf](https://www.technik-in-bayern.de/fileadmin/mediapool_tib/bilder/Aktives_Archiv/TiB_03-2018_KI_gesamt.pdf) (besucht am 18.09.2019).
- [140] MALIK, F.: *Komplexität – was ist das?* 1998. URL: [www.kybernetik.ch/dwn/Komplexitaet.pdf](http://www.kybernetik.ch/dwn/Komplexitaet.pdf) (besucht am 18.09.2019).
- [141] MALIK, F.: *Strategie des Managements komplexer Systeme*. 10. Aufl. Haupt Verlag, 2008. ISBN: 978-3258079189.
- [142] MALIK, F.: „Understanding a Knowledge Organization as a Viable System“. In: ESPEJO, R.; SCHWANINGER, M. *Organisational Fitness*. Campus Verlag, 1992. ISBN: 978-3593347837.
- [143] MARENBACH, R.; NELLES, D.; TUTTAS, C.: *Elektrische Energietechnik – Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*. Springer, 2013. ISBN: 978-3834821904.
- [144] MARTIRANO, L.; PARISE, G.; GRECO, G. et al.: „Aggregation of Users in a Residential/Commercial Building Managed by a Building Energy Management System (BEMS)“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 55 (2019), S. 26–34. DOI: 10.1109/TIA.2018.2866155.
- [145] MATHWORKS DEUTSCHLAND: *Introducing the Phasor Simulation Method - MATLAB & Simulink - MathWorks Deutschland*. 2019. URL: <https://de.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/introducing-the-phasor-simulation-method.html> (besucht am 18.09.2019).
- [146] MATURANA, H. R.; VARELA, F. J.: *Autopoiesis and Cognition*. Reidel, 1980. ISBN: 978-9027710154.
- [147] MEINECKE, M.: *Netzentwicklungsplan Strom*. 2019. URL: <https://www.netzentwicklungsplan.de/> (besucht am 18.09.2019).
- [148] MILANO, F.: „An open source power system analysis toolbox“. In: IEEE Power Engineering Society – General Meeting. Montreal, Canada, 2006. DOI: 10.1109/PES.2006.1708946.

- 
- [149] MILANO, F.: *PSAT: Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0*. 2008. URL: <https://www.eecs.wsu.edu/~ee521/Material/20120927/psat-20080214.pdf> (besucht am 18.09.2019).
- [150] MILLING, P.: *Systemtheoretische Grundlagen zur Planung der Unternehmenspolitik*. Duncker Humblot, 1981. ISBN: 978-3428049318.
- [151] MINGERS, J.; ROSENHEAD, J.: „An Overview of Related Methods: VSM, System Dynamics and Decision Analysis“. In: *Rational Analysis for a Problematic World Revisited*. John Wiley und Sons Ltd, S. 267–288. ISBN: 978-0471495239.
- [152] MIROW, H. M.: *Kybernetik: Grundlage einer allgemeinen Theorie der Organisation*. Gabler Verlag, 1969. ISBN: 978-3663029731.
- [153] MÜLLER-SCHLOER, C.; SCHMECK, H.; T., U.: *Organic Computing – A Paradigm Shift for Complex Systems*. Springer, 2011. ISBN: 978-3034801294.
- [154] MÜLLER, A.: „Geschichte der Kybernetik“. In: *Österreichische Zeitschrift für Geschichtswissenschaften* 19 (2008).
- [155] MÜLLER, M.; VIERNSTEIN, L.; TRUONG, C. et al.: „Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe“. In: *Journal of Energy Storage* 9 (2017), S. 1–11. DOI: 10.1016/j.est.2016.11.005.
- [156] NAKRANI, S.; TOVEY, C.: „On Honey Bees and Dynamic Server Allocation in Internet Hosting Centers“. In: *Adaptive Behavior* 3–4 (2004), S. 223–240. DOI: 10.1177/105971230401200308.
- [157] NIEDERHAUSEN, H.; BURKERT, A.: *Elektrischer Strom – Gesteuerung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie im Kontext der Energiewende*. Springer, 2014. ISBN: 978-3834824936.
- [158] NORM: *DIN EN 60909-0, VDE 0102: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen*. Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [159] NORM: *DIN EN ISO 50001: Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [160] NORM: *DIN EN ISO 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [161] OEDING, D.; OSWALD, B. R.: *Elektrische Kraftwerke und Netze*. Springer, 2016. ISBN: 978-3662527030.
- [162] ORLOFF, M. A.: *Grundlagen der klassischen TRIZ – Ein praktisches Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure*. 3. Aufl. Springer, 2006. ISBN: 978-3540340584.
- [163] OSTERHAGE, W.: *Chancen und Grenzen der Energieverwertung*. Springer, 2019. ISBN: 978-3658239015.
- [164] PÉREZ-RÍOS, J.: *Design and Diagnosis for Sustainable Organizations. The Viable System Method*. Springer, 2012. ISBN: 978-3642223181.
- [165] PÉREZ-RÍOS, J.: „Models of organizational cybernetics for diagnosis and design“. In: *Kybernetes* 9 (2010), S. 1529–1550. DOI: 10.1108/03684921011081150.
- [166] PFENNINGER, S.; STAFFELL, I.: „Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data“. In: *Energy* 114 (2016), S. 1251–1265. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.060.

- [167] PLASSMANN, W.; SCHULZ, D.: *Handbuch Elektrotechnik*. Springer, 2016. ISBN: 978-3658070489.
- [168] PREZEMYSŁAW, T.; WOLTER, M.; PREZEMYSŁAW, K.: „Agent Based Power System Management – Concept of Congestion Management“. In: 18th Int. Scientific Conference. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967295.
- [169] PROBST, G. J.: „Some Cybernetic Principles for the Design, Control, and Development of Social Systems“. In: *Cybernetics and System* 16:2-3 (1985), S. 171–180. DOI: 10.1080/01969728508927764.
- [170] PROJEKTHOME PAGE: *EEBatt - Interdisziplinäre Energiespeicherforschung*. 2013. URL: <https://www.mse.tum.de/eebatt/> (besucht am 18.09.2019).
- [171] RAI, V. K.: „Systems Oriented Approach to Production Support – A Viable Framework“. In: IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, UK, 2013, S. 4427–4432. DOI: 10.1109/SMC.2013.841.
- [172] RANAWEERA, I.; MIDTGARD, O.-M.; KOPAS, M. et al.: „Control strategies for residential battery energy storage systems coupled with PV systems“. In: Int. Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Italy, 2014. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977466.
- [173] RAUBITSCHKE, C.: „Beitrag einer Fahrzeug-Umfeld-Kommunikation zu vorausschauendem Energiemanagement“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2013. ISBN: 978-3843910965.
- [174] REYNOLDS, C.: „Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model“. In: 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, USA, 1987. DOI: 10.1145/37401.37406.
- [175] RICHTER, J.; BASTEN, D.: „Applications of the Viable Systems Model in IS Research – A Comprehensive Overview and Analysis“. In: Hawaii Int. Conference on System Sciences. Waikoloa, HI, 2014. DOI: 10.1109/HICSS.2014.565.
- [176] RINK, L.; KRUSE, A.; HAASE, H.: *Immunologie für Einsteiger*. 2. Aufl. Springer, 2015. ISBN: 978-3662448434.
- [177] RIPPEL, F. J.: „Biologische und organisationale Resilienz – Das menschliche Immunsystem als Inspirationsquelle resilienter Verhaltensmuster“. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, 2017. ISBN: 978-3844105186.
- [178] ROTH, M.: „Dezentrales Management von großen verteilten Systemen“. Dissertation. Deutschland: Universität Augsburg, 2016. URL: [urn:nbn:de:bvb:384-opus4-33905](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-33905).
- [179] RUSSEL, S.; NORVIG, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3. Aufl. Pearson, 2010. ISBN: 978-0136042594.
- [180] SACHSSE, H.: *Einführung in die Kybernetik*. Vieweg und Teubner Verlag, 1971. ISBN: 978-3663020073.
- [181] SALCHER, T.: „Optimierte Betriebsstrategie hybrider Antriebssysteme für den Serieneinsatz“. Dissertation. Deutschland: Technische Universität München, 2013. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20131104-1098275-0-7>.

- 
- [182] SCHÄFER, B.; MATTHIAE, M.; TIMME, M.: „Decentral Smart Grid Control“. In: *New Journal of Physics* 17 (2015), S. 544–569. DOI: 10.1088/1367-2630/17/1/015002.
- [183] SCHEFFLER, J.: *Verteilnetze auf dem Weg zum Flächenkraftwerk – Rechtlicher Rahmen, Erzeuger, Netze*. Springer, 2016. ISBN: 978-3642552977.
- [184] SCHMIDT, R. F.: *Physiologie kompakt*. 4. Aufl. Springer, 2001. ISBN: 978-3642565014.
- [185] SCHOENEBERG, K.-P.: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*. Springer, 2014. ISBN: 978-3658012830.
- [186] SCHOOP, E.: *Stationäre Batterie-Anlagen: Auslegung, Installation und Wartung*. 2. Aufl. Huss-Medien, 2018. ISBN: 978-3341016336.
- [187] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe — Regelung von Antriebssystemen*. 4. Aufl. Springer, 2015. ISBN: 978-3642300967.
- [188] SCHWAB, A. J.: *Elektroenergiesysteme – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. 5. Aufl. Springer, 2017. ISBN: 978-3662553152.
- [189] SCHWANINGER, M.: „Design for viable organizations: The diagnostic power of the viable system model“. In: *Kybernetes* 35 (2006), S. 955–966. DOI: 10.1108/03684920610675012.
- [190] SCHWANINGER, M.: „Governance for intelligent organizations: a cybernetic contribution“. In: *Kybernetes* 39 (2018), S. 333–358. DOI: 10.1108/K-01-2018-0019.
- [191] SCHWANINGER, M.: „Integrative systems methodology: Heuristic for requisite variety“. In: *International Transactions in Operational Research* 4 (1997), S. 109–123. DOI: 10.1016/S0969-6016(97)00009-9.
- [192] SCHWANINGER, M.: *Intelligent Organizations*. 2. Aufl. Springer, 2008. ISBN: 978-3540851615.
- [193] SCHWANINGER, M.: „Making change happen – Recollections of a systems professional“. In: *Kybernetes* 41 (2012), S. 333–367. DOI: 10.1108/03684921211229451.
- [194] SCHWANINGER, M.: „Methodologies in conflict: achieving synergies between system dynamics and organizational cybernetics“. In: *System, Research and Behavioral Science* 4 (2004), S. 411–431. DOI: 10.1002/sres.649.
- [195] SCHWANINGER, M.: „System dynamics in the evolution of the systems approach“. In: MEYERS, R. A. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, 2009, S. 8974–8986. DOI: 10.1007/978-1-4419-7701-4\_41.
- [196] SCHWANINGER, M.: „Theories of viability: a comparison“. In: *Systems Research and Behavioral Science* 23 (2006), S. 337–347. DOI: 10.1002/sres.731.
- [197] SCHWANINGER, M.; AMBROZ, K.; OLAYA, C.: „A Model for Systemic Control“. In: AIP Conference Proceedings. Melville, New York, 2005, S. 549–559. DOI: 10.1063/1.2216666.
- [198] SCHWANINGER, M.; PÉREZ-RÍOS, J.: „System dynamics and cybernetics: a synergetic pair“. In: *System Dynamics Review* 24 (2008), S. 145–174. DOI: 10.1002/sdr.400.
- [199] SCHWANINGER, M.; SCHEEF, C.: „A Test of the Viable System Model – Theoretical Claim vs. Empirical Evidence“. In: *Cybernetics and Systems* 7 (2016), S. 544–569. DOI: 10.1080/01969722.2016.1209375.

- [200] SCHWEGLER, J.; RUNHILD, L.: *Der Mensch: Anatomie und Physiologie*. 5. Aufl. Thieme, 2011. ISBN: 3131001550.
- [201] SHAHIDEHPOUR, M.; LI, Z.; BAHRAMIRAD, S.: „Networked Microgrids – Exploring the Possibilities of the IIT-Bronzeville Grid“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 4 (2017), S. 63–71. DOI: 10.1109/MPE.2017.2688599.
- [202] SHARMA, S.; XU, Y.; VERMA, A. et al.: „Time-Coordinated Multi-Energy Management of Smart Buildings under Uncertainties“. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (2019), S. 4788–4798. DOI: 10.1109/TII.2019.2901120.
- [203] SIEMENS AG: *SINAMICS S120 – Leistungsteile Booksize. Gerätehandbuch. (GH2) 04/2015*. September 2015. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/%20109479611/sinamics-s120-leistungsteile-booksize?dti=0&lc=de-ww>. (besucht am 18.09.2019).
- [204] SINSEL, A.: „Organic Computing als Konzept zur Steuerung interagierender Prozesse in verteilten Systemen“. Dissertation. Deutschland: Universität Heidelberg, 2011.
- [205] SMITHA, S. D.; FOSSY, M. C.: „Intelligent Energy Management in Smart and Sustainable Buildings with Multi-agent Control System“. In: Int. Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s). Kottayam, India, 2013. DOI: 10.1109/iMac4s.2013.6526406.
- [206] SMITHA, S. D.; SAVIER, J. S.; FOSSY, M. C.: „Intelligent control system for efficient energy management in commercial buildings“. In: Int. Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (ICMiCR). Kanjirapally, India, 2013. DOI: 10.1109/AICERA-ICMiCR.2013.6575942.
- [207] SPECKMANN, E.-J.; WITTKOWSKI, W.: *Bau und Funktion des menschlichen Körpers: Praxisorientierte Anatomie und Physiologie*. 20. Aufl. Urban & Fischer, 2004. ISBN: 3437261916.
- [208] STEINBUCH, K.: *Automat und Mensch – Kybernetische Tatsachen und Hypothesen*. 3. Aufl. Springer, 1965. ISBN: 978-3662006047.
- [209] STEPKEN, G.: *Einführung in die Kybernetik*. Oktober 2007. URL: <https://www.yumpu.com/de/document/view/10714603/einfuehrung-in-die-kybernetik-little-idiotde> (besucht am 18.09.2019).
- [210] STEPKEN, G.: *Kybernetik der Kybernetik - Gesetze der Netze*. Februar 2008. URL: <https://www.yumpu.com/de/document/view/21251269/danke-fur-die-beachtung-dieser-schrift-little-idiotde/5> (besucht am 18.09.2019).
- [211] STERNER, M.; STADLER, I.: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3662488928.
- [212] STOYANOV, E. A.; MACWILLIAMS, A.; WISCHY, M. A. et al.: „Distributed Software Maintenance Using an Autonomic System Management Approach based on the Viable System Model“. In: Int. Conference on Autonomic and Autonomous Systems. Silicon Valley, CA, 2006. DOI: 10.1109/ICAS.2006.22.
- [213] SUERBAUM, S.; BURCHARD, G.-D.; KAUFMANN, S. H. E. et al.: *Medizinische Mikrobiologie und Infektiologie*. 8. Aufl. Springer, 2016. ISBN: 978-3662486771.
- [214] SYNWOLDT, C.: *Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien – Technik, Märkte, kommunale Perspektiven*. Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3658130473.



- 
- [215] TAUBE, J.; TIPPE, L.; HERZOG, H.-G.: „Upgradeable Power Net and its Energy Management Structures“. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hanoi, Vietnam, 2019. DOI: 10.1109/VPPC46532.2019.8952266.
- [216] TAUBE, J.; TIPPE, L.; FRÖSCHL, J. et al.: „Concept for a 48 V/12 V Power Rail with Integrated Power Converter and ECUs“. In: SIRCH, O.; HOFF, C. *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IX*. Haus der Technik Fachbuch. expert verlag, 2019. ISBN: 978-3816984641.
- [217] THOMPSON, R. J.; LAWS, A. G.; REILLY, D. et al.: „Towards viable computer systems: a set theory interpretation of ecological dependence within Beer’s self-organizing viable system model“. In: MEDES. Lyon, France, 2009. DOI: 10.1145/1643823.1643837.
- [218] TIPPE, L.; TAUBE, J.; EBERSPÄCHER, S. et al.: „Development of a Cybernetic Energy and Power Management for Automotive Ring Bus Power Nets“. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hanoi, Vietnam, 2019. DOI: 10.1109/VPPC46532.2019.8952541.
- [219] TIPPE, L.; TAUBE, J.; FRÖSCHL, J. et al.: „Introduction of Ring Structures in Future Car Generations’ Electrical Systems“. In: Int. Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Nottingham, UK, 2018. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607339.
- [220] TRUONG, C. N.; SCHIMPE, M.; NAUMANN, M. et al.: „Impact of Sub-Components on the Overall Performance of Stationary Battery Systems: Insights on the Prototype Energy Neighbor“. In: Int. ETG Congress 2017. Bonn, Germany: VDE, 2017. ISBN: 978-3800745050.
- [221] UNNERSTALL, T.: *Faktencheck Energiewende – Konzept, Umsetzung, Kosten Antworten auf die 10 wichtigsten Fragen*. Springer, 2016. ISBN: 978-3662497777.
- [222] VAAHEDI, E.; NODEHI, K.; HEIM, D.: „The Emerging Transactive Microgrid Controller: Illustrating Its Concept, Functionality, and Business Case“. In: *IEEE Power and Energy Magazine* 4 (2017), S. 80–87. DOI: 10.1109/MPE.2017.2688619.
- [223] VAHIDI, A.; ALIAHMADI, A.: „Describing the Necessity of Multi-Methodological Approach for Viable System Model: Case Study of Viable System Model and System Dynamics Multi-Methodology“. In: *Systemic Practice and Action Research* 1 (2019), S. 13–37. DOI: 10.1007/s11213-018-9452-0.
- [224] VAHIDI, A.; ALIAHMADI, A.; TEIMOURI, E.: „Evolution of Management Cybernetics and Viable System Model“. In: *Systemic Practice and Action Research* 9 (2019), S. 1–18. DOI: 10.1007/s11213-019-9478-y.
- [225] VAHIDI, A.; ALIAHMADI, A.; TEIMOURI, E.: „Researches status and trends of management cybernetics and viable system model“. In: *Kybernetes* 2 (2018). DOI: 10.1108/K-11-2017-0433.
- [226] VARELA, F. G.; MATURANA, H. R.; URIBE, R.: „Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model“. In: *Biosystems* 5 (1974). DOI: 10.1016/0303-2647(74)90031-8.

- [227] VDE: *Der zellulare Ansatz: Grundlage einer erfolgreichen, Regionen übergreifenden Energiewende*. Studie. Frankfurt am Main, Deutschland: Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2015.
- [228] VDE: *Zellulares Energiesystem: Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen*. Studie. Frankfurt am Main, Deutschland: Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2019.
- [229] VDI-RICHTLINIE: *VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [230] VESTER, F.: *Die Kunst vernetzt zu denken*. Deutscher Taschenbuchverlag, 2012. ISBN: 978-3423330770.
- [231] VESTER, F.: *Unsere Welt – Ein vernetztes System*. Klett-Cotta, 1978. ISBN: 978-3129897201.
- [232] WAGLER, M.; WITZMANN, R.: „Erstellung und Evaluierung eines synthetischen Haushaltslastprofilgenerators für Wirk- und Blindleistung“. In: 14. Symposium Energieinnovation. Graz, Schweiz, 2016. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1296856/1296856.pdf> (besucht am 18.09.2019).
- [233] WALKER, J.: *The Viable Systems Model a guide for co-operatives and federations*. 2001. URL: [http://www.scio.org.uk/resource/vsmg\\_3/pdf/vsmg\\_2\\_2.pdf](http://www.scio.org.uk/resource/vsmg_3/pdf/vsmg_2_2.pdf) (besucht am 18.09.2019).
- [234] WENSKY, D.: *Elektrische Energieversorgung auf dem Weg nach 2050 – Ein Leitfaden für Politik, Medien und Öffentlichkeit*. Studie. Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2013.
- [235] WHITE, S.: „Systems theory, systems thinking“. In: 9th Annual IEEE Int. Systems Conference. Vancouver, BC, 2015, S. 420–425. DOI: 10.1109/SYSCON.2015.7116787.
- [236] WIENER, N.: *Kybernetik – Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine*. ECON Verlag, 1992. ISBN: 978-3430196529.
- [237] WIETSCHEL, M.; ULLRICH, S.; MARKEWITZ, P. et al.: *Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. Springer, 2015. ISBN: 978-3658071295.
- [238] WILBERG, J.; TOMMELEIN, I. D.; ELEZI, F. et al.: „Supporting the Implementation of Engineering Change Management with the Viable System Model“. In: IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Kowloon Tong, Hong Kong, 2015, S. 731–736. DOI: 10.1109/SMC.2015.137.
- [239] WILDE, A.: „Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen“. Dissertation. Deutschland: Technische Universität München, 2010. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20081112-679109-1-3>.
- [240] WINTER, M.: „Zur Optimierung und Validierung von Managementsystemen für elektrische Energiebordnetze im Kraftfahrzeug“. Dissertation. Deutschland: Technische Universität München, 2019. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20190206-1364664-1-4>.

- 
- [241] WINTER, M.; FETTKE, S.; FROESCHL, J. et al.: „Using the Viable System Model to control a system of distributed DC/DC converters“. In: IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Budapest, Hungary, 2016, S. 2768–2773. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844658.
- [242] WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N.: „Intelligent agents: Theory and practice“. In: *The Knowledge Engineering Review* 10 (1995), S. 115–152. DOI: 10.1017/S0269888900008122.
- [243] WÜRTZ, R. P.: *Organic Computing*. Springer, 2008. ISBN: 978-3540776567.
- [244] ZADEH, M. E.; LEWIS, E.; MILLAR, G. et al.: „The use of Viable System Model to develop guidelines for generating Enterprise Architecture Principles“. In: IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics. San Diego, CA, 2014, S. 1020–1026. DOI: 10.1109/SMC.2014.6974047.
- [245] ZAHORANSKY, R.: *Energietechnik*. 8. Aufl. Springer, 2019. ISBN: 978-3658218461.
- [246] ZEH, A.: „Integration von Batteriespeichern in das deutsche Nieder- und Mittelspannungsnetz“. Dissertation. Deutschland: Technische Universität München, 2017. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20171130-1351963-1-0>.
- [247] ZWISCHENBERICHT: *EEBatt - Dezentrale Stationäre Batteriespeicher zur effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien und Unterstützung der Netzstabilität*. Oktober 2015. URL: [https://www.mse.tum.de/fileadmin/w00bvc/www/EEBatt/Veroeffentlichungen/TUM14007\\_Zwischenbericht2015\\_LO-1.pdf](https://www.mse.tum.de/fileadmin/w00bvc/www/EEBatt/Veroeffentlichungen/TUM14007_Zwischenbericht2015_LO-1.pdf) (besucht am 18.09.2019).