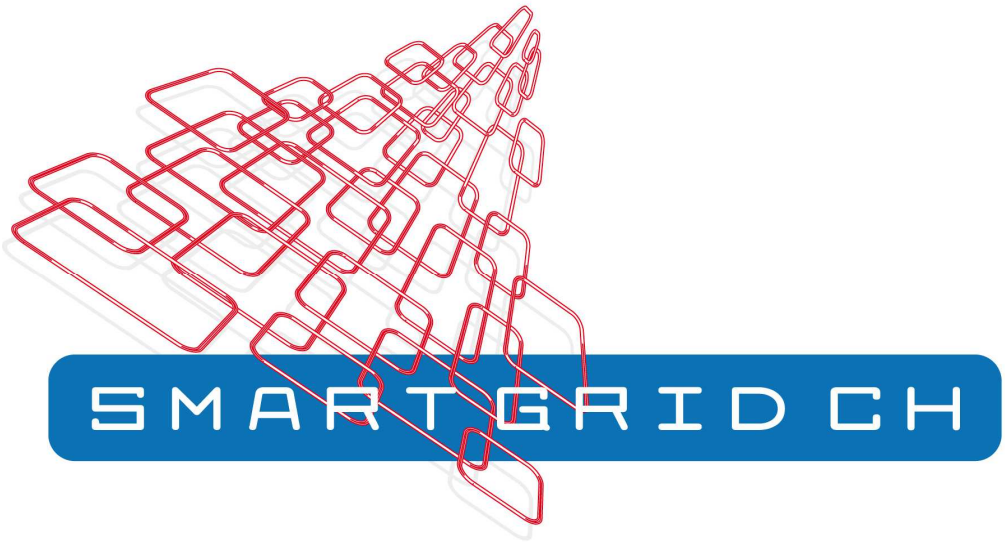
Berner
Fachhochschule



Kausales Smart Market Modell als Basis für Interventionen: Abschlussbericht der Arbeitsgruppe Smart Market des Vereins Smart Grid Schweiz

Auftraggeber
Maurus Bachmann, Verein Smart Grid Schweiz

Auftragnehmer/Autoren
Stefan N. Grösser, Projektleiter
Markus Schwenke, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Strategy and Simulation Lab (S-Lab)
Institut Unternehmensentwicklung, Berner Fachhochschule

Mitglieder der Arbeitsgruppe
A. Steiner, Repower AG
C. Bittig, Axpo Trading AG
D. Grossenbacher, IWB – Industrielle Werke Basel
D. Guth, Axpo Trading AG
D. Scheller, CKW – Centralschweizerische Kraftwerke AG
F. Frei, ewz – Elektrizitätswerk der Stadt Zürich
F. Paul, Groupe E.S.A.
I. Käser, ewb – Energie Wasser Bern
J. Jenni, IWB – Industrielle Werke Basel
M. Bachmann, Verein Smart Grid Schweiz
M. Möckli, EKZ – Elektrizitätswerke des Kt. Zürich
S. Waldis, BKW Energie AG

Beobachter
F. Kämpfer, BFE – Bundesamt für Energie

I Management Summary

Das vorliegende Dokument schafft ein Verständnis für die kausalen Verbindungen im heutigen und zukünftigen Schweizer Elektrizitätssystem aus einer übergeordneten Perspektive betrachtet. Im Vergleich zur heutigen hierarchisch organisierten Energieverteilung soll das Smart Grid lokale, dezentrale Effekte effizienter im Gesamtelektrizitätssystem berücksichtigen und dadurch volkswirtschaftliche und ökologische Vorteile schaffen. Das kausale Smart-Market-Modell (kSMM) geht einen Schritt weiter. Es berücksichtigt unter den Bedingungen der Herausforderungen einer regulierten Verteilnetzinfrastruktur das integrative Zusammenwirken der Smart Markets. Das Verständnis über die Zusammenhänge zwischen Smart Market und Smart Grid ermöglicht es, Schwachstellen und mögliche Ungleichgewichte zu erkennen und diese mit konkreten Interventionsvorschlägen zu korrigieren, um für eine optimale Ausgestaltung der Smart Markets und Smart Grids zu sorgen.

Basierend auf wichtigen Trends im heutigen Elektrizitätssystem wurden mit Hilfe des kSMM verschiedene Kernmechaniken (Regelkreise) identifiziert. Diese zeigen, wie wichtige Einflussgrössen (Variablen) auf Bestandsgrössen und Zielgrössen wirken. Neben ausgleichenden oder zielsuchenden Regelkreisen (balancing loops) bestehen auch selbstverstärkende Effekte (reinforcing loops). Deren Auswirkungen müssen bei der Ausgestaltung eines Smart Markets besonders beachtet werden. Zur Nutzung der Kernmechaniken im Sinne der Energiewende wurden verschiedene Interventionsmöglichkeiten für Angebot und Nachfrage im Energiemarkt und Netz identifiziert. Eine vertiefte Betrachtung zeigte, dass die Kopplung zwischen dem Energiemarkt und dem Netz heute asymme-trisch ausgeprägt ist. Insbesondere ist die Rückkopplung vom Netz zum Markt schwach ausgeprägt.

Für konkrete Handlungsempfehlungen zur Ausgestaltung eines Smart Markets ist dies eine wichtige Erkenntnis. Ein konkretes Beispiel für eine stärkere Kopplung von Netz zum Markt könnten dynamische, kapazitätsbasierte Netztarife sein. Deren Wirkung könnte als Weiterführung dieser Arbeiten quantitativ simuliert werden. Es wird empfohlen, die identifizierten Kernmechaniken und Kopplungsmechanisen sowie die Interventionsmöglichkeiten vertieft zu diskutieren.

Kapitel 1 führt in das Thema ein und beschreibt das Ziel der vorliegenden Arbeiten: Es soll ein kausales Modell für den Schweizer Elektrizitätsmarkt erstellt werden. Die Arbeitsgruppe „Smart Market“ des Vereins Smart Grid Schweiz (VSGS) und das Strategy and Simulation Lab der Berner Fachhochschule haben dieses gemeinsam entwickelt.

Kapitel 2 beschreibt die wesentlichen Herausforderungen und Trends für das Elektrizitätssystem der Schweiz. Wichtigste Treiber der Veränderungen sind dabei der Klimawandel, die Reduktion der CO_2-Emissionen, die Energiewende, die Marktöffnung. Die konkreten Trends für den Schweizer Elektrizitätsmarkt sind dabei die dezentrale Produktion elektrischer Energie, das Demand Side Ma-

nagement, die Energieeffizienz im System sowie der steigende Kostendruck. Die Trends wurden in Variablen und Zielgrössen übersetzt und fliessen so in das kSMM ein. Wichtige Zielgrössen eines optimalen Smart Markets sind die Sicherstellung der Versorgungssicherheit bei gleichzeitiger Ausgestaltung einer hohen dezentralen, stochastischen Elektrizitätserzeugung.

Kapitel 3 detailliert das kSMM. Es ist in vier Sektoren unterteilt: (1) Smart-Grid-Nachfrage, (2) Smart-Grid-Angebot, (3) Smart-Market-Nachfrage und (4) Smart-Market-Angebot. Die Sektoren sind interdependent. Entwicklungen oder Interventionen in einem Quadranten bewirken entsprechende Veränderungen in den anderen Quadranten. Zwölf ausgewählte Kernmechaniken zeigen dies im Detail. Das Ziel ist, eine optimale Entwicklung der Zielgrössen zu bewirken, wobei das Gleichgewicht der vier Sektoren gewahrt bleiben muss. Das kSMM ist ein qualitatives Modell; seine Grenzen sind am Ende des Kapitels dargelegt.

Kapitel 4 zeigt, basierend auf den im kSMM identifizierten Kernmechaniken, Interventionsmöglichkeiten für Akteure aus Politik und Branche, um die beschriebenen Zielgrössen eines optimalen Smart Market mittel- bis langfristig zu erreichen. Die einzelnen Interventionsmöglichkeiten werden zuerst beschrieben und dann entsprechend ihrer Wirkung auf die einzelnen Sektoren strukturiert.

Kapitel 5 identifiziert wichtige Interventionsmöglichkeiten. Es sind dies der Einsatz von Speichern, die Steuerung der Produktion und der Lasten, das Lastenpooling sowie die Eigenverbrauchslösung. Für diese Interventionsmöglichkeiten sollen in einem weiteren Schritt konkrete Handlungsempfehlungen ausgearbeitet werden. Die Untersuchungen führten zur weiteren Erkenntnis, dass die aktuelle Kopplung zwischen Markt und Netz asymmetrisch ist. Insbesondere die Rückkopplung vom Netz zum Markt ist schwach ausgeprägt. Es braucht smarte Lösungen, um die Rückkopplung vom Netz zum Markt zu verstärken. Mögliche Beispiele werden gezeigt. Das Kapitel schliesst mit einem Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

04. Februar 2015

II Inhaltsverzeichnis

I Management Summary **2**

II Inhaltsverzeichnis **4**

III Verzeichnis der Abbildungen **5**

IV Verzeichnis der Tabellen **5**

V Abkürzungsverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**
- **1.1 Thema** **7**
- **1.2 Ziel** **7**
- **1.3 Stand der Forschung zur Kausalmodellierung von Smart Grids und Smart Markets** **9**
- **1.4 Forschungsdesign** **10**
- **1.5 Grundannahmen für die Arbeit mit Modellen** **12**
- **1.6 Begriffe** **14**

2 Trends und Zielgrössen eines Smart Markets **18**
- **2.1 Entwicklung des Elektrizitätssystems** **18**
- **2.2 Übersicht zu den Trends im Schweizer Elektrizitätssystem** **20**
- **2.3 Definition relevanter Trends** **21**
- **2.4 Zielgrössen im Schweizer Elektrizitätssystem** **22**

3 Kausales Smart-Market-Modell **26**
- **3.1 Modellübersicht** **26**
- **3.2 Kernmechaniken des kausalen Smart-Market-Modells** **27**
- **3.3 Modellgrenzen** **40**

4 Interventionsmöglichkeiten **41**
- **4.1 Interventionsmöglichkeit im Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“** **42**
- **4.2 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Grid-Angebot“** **48**
- **4.3 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Market-Nachfrage“** **50**
- **4.4 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Market-Angebot“** **53**

5 Fazit und Ausblick **54**
- **5.1 Fazit** **54**
- **5.2 Ausblick** **55**

VI Referenzen **57**

III Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Forschungsdesign der Studie 11
Abbildung 1-2: Modi bei der Arbeit mit Modellen 13
Abbildung 2-1: Megatrends und Trends 20
Abbildung 3-1: Vier-Felder-Matrix zu Smart Market und Smart Grid 26
Abbildung 3-2: Selbstverstärkender Regelkreis 28
Abbildung 3-3: Selbstverstärkender und ausgleichender Regelkreis 29
Abbildung 3-4: Hintereinander abgebildete Bestandsgrössen 30
Abbildung 3-5: Verzögerung 30
Abbildung 3-6: Kernmechaniken des kSMM (ohne Vier-Felder-Matrix-Struktur) 31
Abbildung 3-7: Kernmechaniken des kSMM in der Vier-Felder-Matrix 33
Abbildung 4-1: Übersicht zu den Interventionsmöglichkeiten 42
Abbildung 4-2: Intervention SG-N1 43
Abbildung 4-3: Intervention SG-N2 44
Abbildung 4-4: Intervention SG-N3 46
Abbildung 4-5: Intervention SG-N4 47
Abbildung 4-6: Intervention SG-A1 48
Abbildung 4-7: Intervention SG-A2 49
Abbildung 4-8: Intervention SM-N1 51
Abbildung 4-9: Intervention SM-N2 52
Abbildung 4-10: Intervention SM-A1 53
Abbildung 5-1: Illustration der asymmetrischen Kopplung zwischen Markt und Netz 55

IV Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1: Umfeldanalyse durch PESTEL-Methode 19
Tabelle 2-2: Konkrete Ausgestaltung von Trends 22
Tabelle 2-3: Wichtige Zielgrössen 24
Tabelle 2-4: Weitere Zielgrössen 25
Tabelle 3-1: Darstellung der kausalen Pfade der Kernmechaniken 33
Tabelle 3-2: Modellgrenzen des kSMM 40

V Abkürzungsverzeichnis

A	Angebot
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BFH	Berner Fachhochschule
BHWK	Blockheizkraftwerk
DSM	Demand Side Management
el.	Elektrisch in Tabellen und Grafiken
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
ff.	fortfolgende
GuD	Gas- und Dampfkombikraftwerk
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HKN	Herkunftsnachweis
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
kSMM	kausales Smart-Market-Modell
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
N	Nachfrage
PV	Photovoltaik
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SD	Systemdynamik
SG	Smart Grid
SM	Smart Market
VNB	Verteilnetzbetreiber
VSE	Verband Schweizer Elektrizitätsunternehmen
VSGS	Verein Smart Grid Schweiz

1 Einleitung

1.1 Thema

Unter dem Begriff „Smart Grid“[1] werden in den Fachdiskussionen in Europa und in der Schweiz Lösungsansätze verstanden, die weit über Elektrizitätsnetze hinausreichen. Die Lösungsansätze in der Schweiz verfolgen das Ziel, die Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates mittels verstärktem Einsatz von erneuerbaren, dezentralen Energien und der dafür notwendigen Lösungen von Integrationsproblemen umzusetzen. Die Integrationsprobleme sind vielfältig. Dazu gehört z. B. die starke Abhängigkeit vom Wetter bei der Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaikanlagen oder die Integration von dezentraler Energieerzeugung in ein konventionelles Erzeugungssystem. Produktionsanlagen für erneuerbare Energien müssen nicht nur in das Elektrizitätsnetz, sondern auch in den Elektrizitätsmarkt integriert werden. Oftmals hängen Lösungen und Regeln zur Beseitigung von Integrationsproblemen voneinander ab. Andere ergänzen sich oder schliessen einander aus. Probleme im Elektrizitätsnetz lassen sich durch verordnete bzw. zentral gesteuerte technische Eingriffe oder durch ein freiwilliges, zweckmässiges Verhalten der Endverbraucher und der dezentralen Erzeugungseinheiten lösen. Da die beteiligten Akteure wirtschaftlich orientiert handeln, sind für ein geordnetes und volkswirtschaftlich effizientes Zusammenspiel von zentral gesteuerten und freiwilligen Aktivitäten im Elektrizitätssystem Regeln notwendig. Diese Regeln sollen eine sinnvolle, d. h. im Sinne der Volkswirtschaft und der Energiestrategie 2050, Koordination aller Akteure sicherstellen. Ein Smart Market kann die freiwilligen Aktivitäten der Akteure in die gewünschte Richtung lenken. Mit geeigneten Regeln kann die Schnittstelle und Integration zu den ebenfalls notwendigen zentral gesteuerten bzw. koordinierten Aktivitäten sichergestellt werden.

1.2 Ziel

Der Verein Smart Grid Schweiz (VSGS) fördert eine gemeinsame schweizerische Smart-Grid-Lösung, die kosteneffizient und auf Weitsicht gebaut ist und die dem Energiemarkt als Basis für innovative Angebote und Dienstleistungen dienen kann. Der VSGS wurde im Sommer 2011 gegründet und bündelt die Aktivitäten von 13 Schweizer Elektrizitätsunternehmen im Bereich Smart Grid. Der Verein entwickelte seit seiner Gründung ein gemeinsames Verständnis für Begriff und Funktionalität des Smart Grids. Im Februar 2013 wurde ein Weissbuch publiziert, das die Hauptresultate dieser Arbeiten mit einem Fokus auf Smart Grid und Smart Meter zusammenfasst. In der Arbeitsgruppe „Smart Market“ wird untersucht, wie der zukünftige Elektrizitätsmarkt in der Schweiz ausgestaltet werden könnte, so dass die Ziele der Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates optimal unterstützt werden.

Das Strategy and Simulation Lab der Berner Fachhochschule (BFH) ist spezialisiert auf die Analyse von komplexen, sozio-technischen Systemen und die Er-

[1] Die Begriffe Smart Market und Smart Grid sind in Abschnitt 1.6 definiert.

stellung von Systemmodellen mittels derer Erkenntnisse über wesentliche kausale Zusammenhänge im untersuchten System sowie Ansätze zu dessen Beeinflussung und Steuerung gewonnen werden.

Das vorliegende Projekt nimmt die Handlungsempfehlung aus dem Schlussbericht der Arbeitsgruppe „Smart Market“ 2013 auf, ein Marktmodell „Smart Market“ zu definieren. Das Ziel dieses Projektes ist es, ein kausales Modell zum Schweizer Elektrizitätsmarkt — nachfolgend als kausales Smart-Market-Modell (kSMM) bezeichnet — zu erstellen. Dieses soll einen Überblick über die wesentlichen Elemente und Faktoren im sozio-technischen System „Schweizer Elektrizitätsmarkt“ geben. Es beinhaltet sowohl die Verteilnetzebene („Smart Grid“) als auch die Marktebene („Smart Market“). Der Zeithorizont des Modells erstreckt sich bis ins Jahr 2035. Das Modell soll insbesondere zeigen, wie die aktuellen Herausforderungen der Branche auf den Elektrizitätsmarkt einwirken. Das kSMM dient der Identifikation und Strukturierung wesentlichster kausaler Zusammenhänge und soll ein gemeinsames Verständnis für einen Smart Market und darauf aufbauende Diskussionen schaffen. Es stellt dar, wo und wie die Einflussfaktoren für die Energiewende und die Liberalisierung im relevanten System wirken. Marktregeln sollen dazu beitragen, das Elektrizitätssystem an die erwarteten Veränderungen anzupassen. Ausserdem werden die relevanten Rückkopplungsbeziehungen zwischen technischen und sozialen Systemstrukturen sowie wichtige Verzögerungen und Entscheidungsregeln der Akteure im System dargestellt. Die Arbeitsgruppe erstellt anhand des kSMM Interventionsmöglichkeiten, wie ein Smart Market in der Schweiz zur Lösung der genannten Herausforderungen beitragen kann. Basierend auf diesen Interventionsmöglichkeiten werden Handlungsempfehlungen formuliert. Adressaten des Abschlussberichts sind interessierte Schweizer Elektrizitätsunternehmen, der Verband Schweizer Elektrizitätsunternehmen (VSE), das Bundesamt für Energie (BFE) sowie weitere Akteure der Energiepolitik.

Das kSMM ist ein qualitatives, kausales Strukturmodell. Es erfolgt keine Quantifizierung der kausalen Zusammenhänge. Die Inhalte des Modells sowie die Modellgrenze sind in diesem Abschlussbericht dargelegt. Das kSMM berücksichtigt den Zeitraum bis zum Jahr 2035. Diese zeitlich konkrete Abgrenzung erweist sich als nützlich, da sie im Einklang mit dem mittelfristigen Abstützpunkt der Energiestrategie des Schweizer Bundesrates steht. Das Modell betrachtet die Aggregationsebene der gesamten Schweiz, d. h., einzelne Kantone oder Bilanzgruppen werden nicht adressiert. Weitere ausgeschlossene Inhalte sind Systemdienstleistungen (SDL), das Übertragungsnetz sowie Import und Export von Elektrizität. Das Modell abstrahiert von operativen Details und fokussiert auf strategisch relevante Elemente für den Schweizer Elektrizitätsmarkt. Es erfolgt keine Modellierung der Beziehungen zum europäischen Elektrizitätsnetz bzw. -markt. Abschnitt 3.3 zeigt weitere Details zur gewählten Modellgrenze.

1.3 Stand der Forschung zur Kausalmodellierung von Smart Grids und Smart Markets

Welche kausalen Modelle existieren bereits, um die Auswirkung der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes und der Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates auf Schweizer Verteilnetze abschätzen zu können?

Eine Recherche zu öffentlich verfügbarer Forschung über Elektrizitätsmärkte generell[2] führt zu einer grossen Anzahl an Ergebnissen. Es lassen sich Studien mit Optimierungsmodellen, Gleichgewichtsmodellen und Simulationsmodellen unterscheiden [1]. Die meisten der verfügbaren Ergebnisse in wissenschaftlichen Publikationen basieren auf zeitpunkt- oder zeitraumbasierten Studien mit statistischen Modellierungen. Es werden unter anderem Investitionsentscheidungen [2, 3], das Verhalten von Endverbrauchern [4, 5], das Marktdesign in liberalisierten Elektrizitätsmärkten [6] und die Ausgestaltung von Übertragungsnetzen [7–9] adressiert.[3] Durch diese Themenbreite variiert der Untersuchungsgegenstand stark. So werden sowohl makroökonomische, z. B. Gesamtmarktentwicklung von Angebot und Nachfrage [10], als auch atomistische Perspektiven, wie z. B. die statistische Modellierung von zukünftigen Preisentwicklungen [11–13], bei der Analyse des Systems „Elektrizitätsmarkt“ eingenommen. Neben statistischen quantitativen Modellen existieren nur wenige Publikationen, welche kausale Simulationsmodelle zur Entwicklung von Elektrizitätsmärkten verwenden.

Studien mit kausalen Simulationsmodellen haben meist einen direkten Bezug zu einzelnen Ländern, z. B. zu den USA [14–17], Lateinamerika [18] oder den Niederlanden [19]. Nur wenige, wissenschaftlich publizierte Simulationsstudien fokussieren auf den Schweizer Elektrizitätsmarkt [z. B. 3]. Die verwendeten Simulationsmodelle für diese Studien sind nicht öffentlich verfügbar.

Eine Recherche zu „Smart Grid“ in Kombination mit der „Simulationsmethodik“ resultierte in einer relevanten Studie. Diese Studie [20] untersuchte das Projektmanagement im Rahmen von kapitalintensiven Smart-Grid-Projekten und folgt damit bekannten Strukturen aus der Projektdynamik [21, 22].

Eine spezifische Recherche zur Schweiz förderte das Marktmodell des VSE [23] zutage. Dieses Modell dient als Branchenrichtlinie zur Ausgestaltung des heutigen Elektrizitätsmarktes der Schweiz. Es ist ein Grundlagenwerk, welches die rechtlichen Beziehungen klärt und die Rollen der verschiedenen Akteure in der Elektrizitätswirtschaft aufeinander abstimmt. Dieses Modell nimmt eine starke Koordinationsfunktion wahr. Es ist jedoch kein Kausalmodell. Die Auswirkungen, welche durch die Liberalisierung des Schweizer Energiemarkts sowie durch die Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundrates im Elektrizitätsmarkt verursacht werden, können anhand des normativen Marktmodells des VSE nicht abgeschätzt werden.

---

[2] Die Suche erfolgte in der wissenschaftlichen Datenbank „Web of Science (SSCI)“.

[3] Diese Studie versucht keinen Überblick zu den existierenden Studien zu Elektrizitätsmärkten zu geben. Diese Ausführungen haben indikativen Charakter.

Die betrachteten öffentlich zugänglichen Studien sind unzureichend aus drei Gründen: Erstens werden meist statistische Modelle erstellt, die den Fokus auf Einzelsachverhalte legen. Dadurch können die Auswirkungen der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes und der Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates auf Schweizer Verteilnetze nicht abgeschätzt werden. Zweitens gibt es nur wenige relevante Studien spezifisch zum Schweizer Elektrizitätsmarkt. Und drittens werden meist makroökonomische Modelle verwendet, welche die Übertragungsnetzebene und/oder Verteilnetzebene nicht berücksichtigen. Mit anderen Worten: Es sind aktuell keine kausalen Modelle verfügbar, um die Auswirkung der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes und der Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates auf Schweizer Verteilnetze abzuschätzen.

Ein integriertes Kausalmodell fehlt für den Schweizer Elektrizitätsmarkt. Dadurch basieren Diskussionen zu den Auswirkungen von relevanten Trends hauptsächlich auf eigenen Vorstellungen der teilnehmenden Personen [24]. Das in diesem Projekt erstellte integrierte Kausalmodell soll eine auf Kausalitäten basierte Diskussion anhand eines von den beteiligten Experten externalisierten Modells zu den Auswirkungen im Elektrizitätsmarkt ermöglichen. Es ist ein erster Ansatz, eine wichtige Lücke zu schliessen – sowohl der Schweizer als auch die weitere internationale Elektrizitätsbranche können von den Erkenntnissen in diesem Bericht profitieren.

1.4 Forschungsdesign

Das Projekt wurde im Zeitrahmen von März 2014 bis November 2014 durchgeführt. Zur Bearbeitung der Fragestellung wurden verschiedene Methoden kombiniert. Es wurde ein vierstufiges Forschungsdesign genutzt (Abbildung 1-1):

1. Erfassung wesentlicher Trends im Elektrizitätsmarkt
2. Erstellung von relevanten Zielgrössen
3. Erstellung eines kausalen Smart-Market-Modells (kSMM)
4. Festlegung von Interventionsmöglichkeiten zur Zielerreichung und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Zu Beginn wurde eine Übersicht zu wesentlichen Trends im Elektrizitätsmarkt anhand einer allgemein bekannten Umfeldanalysemethode [25] erstellt. Die Trends wurden in Megatrends und Trends differenziert. Anschliessend wurden die Trends ausgewählt, welche im kSMM berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt definierte die Arbeitsgruppe zu den Trends und zum Elektrizitätssystem passende Zielgrössen. Diese Zielgrössen sind Richtgrössen für die Erstellung des kSMM.

Das kSMM wurde von den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe mehrerer Workshops erstellt. Für die Umsetzung des Modells wurdedas System Dynamics Ansatz verwendet. System Dynamics (abgekürzt: SD; dt., Systemdynamik) ist eine von Jay W. Forrester an der Sloan School of Management des Massachusetts Instituts of Technology (MIT), USA, entwickelte Methodik zur integrierten Analyse komplexer und dynamischer, sozio-technischer Systeme [26]. Mit SD können die Aus-

wirkungen von Entscheidungen auf die Systemstruktur und das Systemverhalten, wie z. B. den Unternehmenserfolg oder die Versorgungssicherheit im System, simuliert und entsprechende Interventionsmöglichkeiten abgeleitet werden.

Die Analyse und Gestaltung von sozio-ökonomischen Sachverhalten und Problemsituationen erfolgt durch qualitative und quantitative Modelle. In diesem Projekt wird das kSMM als qualitatives Modell ausgestaltet; es ist nicht simulationsfähig. Jedoch bildet das qualitative Modell die Basis für eine Ausgestaltung als Simulationsmodell in einem weiteren Projekt. Im vierten Schritt werden anhand des kSMM Interventionsmöglichkeiten abgeleitet sowie deren mögliche Wirkungen beurteilt und Handlungsempfehlungen gegeben.

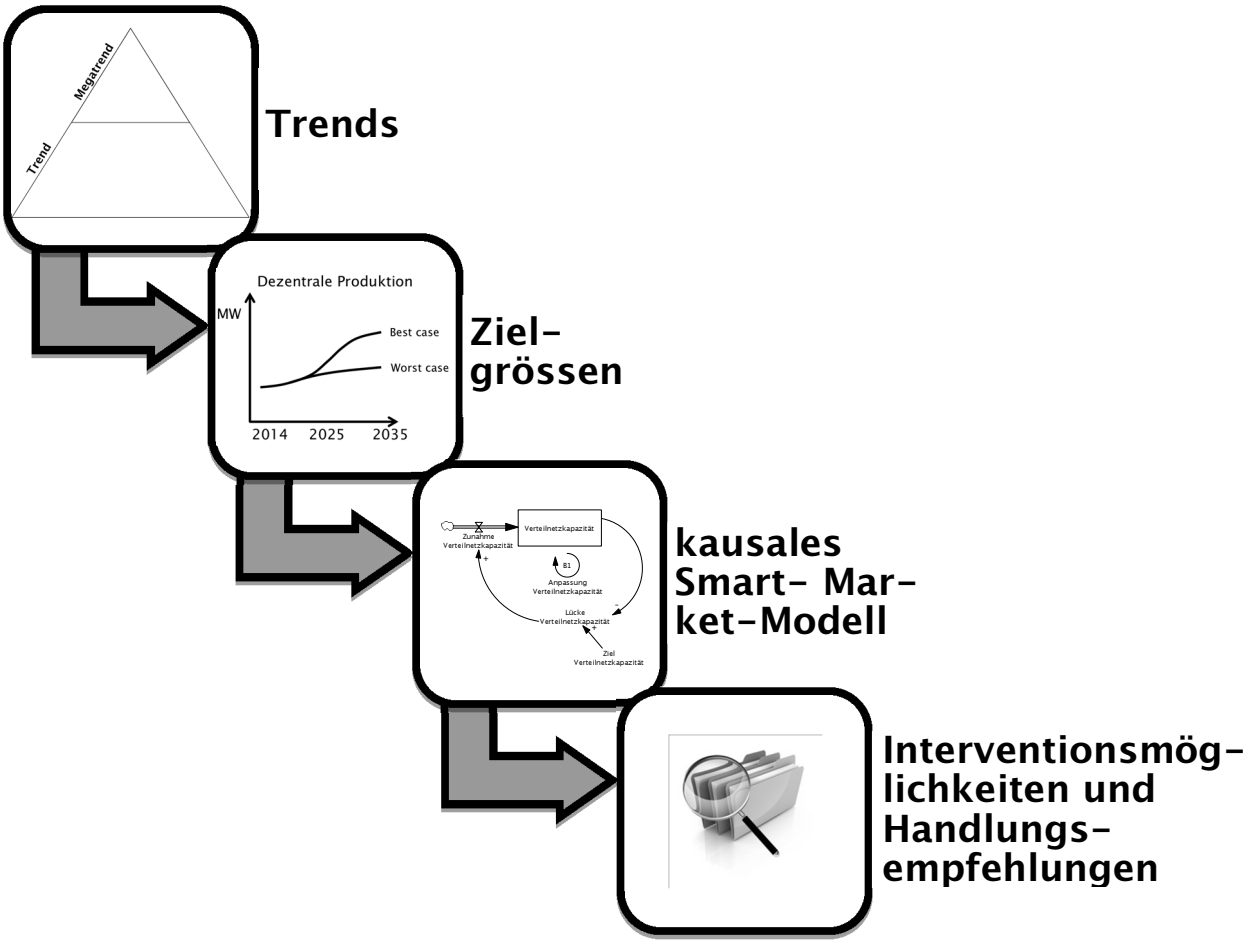


Abbildung 1-1: Forschungsdesign der Studie

1.5 Grundannahmen für die Arbeit mit Modellen

Für die Arbeit mit Modellen müssen Grundannahmen getroffen werden. Um mit Modellen sinnvoll arbeiten zu können, ist es wichtig, sich diese Grundannahmen zur Verwendung von Modellen zu vergegenwärtigen.

1. Der **Modellzweck** wird durch die beteiligten Experten definiert und wird mittels Systemelementen und ihrer kausalen Wirkungsstruktur abgebildet. Das Modell hat den Zweck, **Analysen zu ermöglichen**, welche im realen System nur unter prohibitiv hohen Kosten oder unter ethischen Bedenken möglich wären. Das Modell ermöglicht durch seine grafische Ausgestaltung die Erfassung, Darstellung, Erklärung und Diskussion hoch komplexer Zusammenhänge. Auf dieser Basis sind auch Aussagen z. B. über das Systemverhalten oder das Verhalten einzelner Variablen im Zeitverlauf möglich.

2. Ein Modell ist eine **zweckgeleitete Abstraktion der Wirklichkeit** („des zu modellierenden, realen Systems“); es bildet wesentliche Sachverhalte ab. Es wird stets Sachverhalte geben, die noch aufgenommen werden könnten. Für Sachverhalte, die nicht berücksichtigt werden, gilt die Annahme gleichbleibender Umstände.

3. **Kriterien zur Reduktion** des zu modellierenden Systems sind (1) die Relevanzeinschätzung der beteiligten Experten für den Zweck des Modells sowie (2) die logische Konsistenz der kausalen Zusammenhänge im Modell.

4. Eine **Balance** zwischen exakter Repräsentation der Realität und Verständlichkeit des Modells ist notwendig. Die Herausforderung ist, relevante Sachverhalte in das Modell aufzunehmen und nicht relevante Sachverhalte auszuschliessen. Dafür ist eine Definition der Modellgrenze notwendig (siehe Diagramm der Modellgrenze in Abschnitt 3.3).

Bei der Arbeit mit Modellen werden generell drei Modi unterschieden: (1) Modellierung, (2) Analyse und (3) Design (Abbildung 1-2).

Im **Modellierungsmodus** wird das Modell in einem iterativen Prozess erstellt. Ziel ist es, die Realität zu reduzieren und dabei die wesentlichen kausalen Zusammenhänge herauszuarbeiten, die notwendig sind, die Fragestellung zu beantworten bzw. die Aufgabenstellung zu lösen. Durch die Modellierung soll generell das Verständnis für ein komplexes Problem verbessert werden. Die Validierung eines Modells ist ein Teil der Modellierung, d. h. die kontinuierliche Verbesserung des Modells in Zusammenarbeit mit Experten.

Im **Analysemodus** wird mit der aktuell vorhandenen Modellstruktur gearbeitet. Verbindungen zwischen einzelnen Modellelementen werden dabei im grösseren Zusammenhang gesehen. So sollen Systemeinsichten generiert und Diskussionen angestossen werden. Analysearbeit ist somit die Nutzung des Modells, um Einsichten zu erzeugen.

Im **Designmodus** werden Veränderungen am System eingebracht, z. B. in Form

von Entscheidungsregeln, um das betrachtete System der Zielvorstellung anzunähern. Designarbeit versucht eine Verbesserung des Modells zu erreichen mit dem Ziel, das reale System in eine positive Richtung zu beeinflussen.

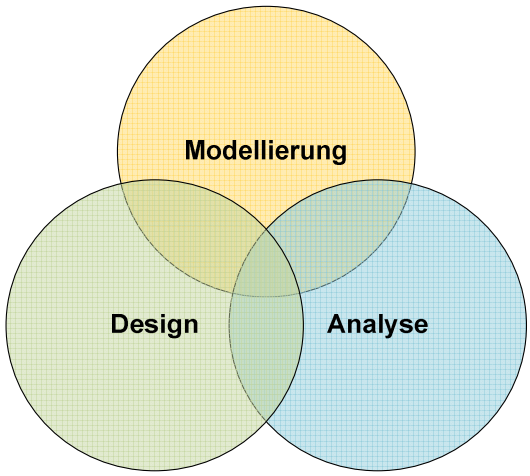


Abbildung 1-2: Modi bei der Arbeit mit Modellen

Alle drei Modi sind miteinander verwoben und werden in unspezifischer Reihenfolge durchgeführt. Wechsel von Modellierung zu Analyse zu Modellierung, zu Analyse zu Design sind innerhalb weniger Augenblicke möglich.

Zusätzliche Annahmen für systemdynamische Modelle:

1. Die Grundsubstanz eines systemdynamischen Modells sind **Variablen**. Es wird stets zusätzliche Variablen geben, die aufgenommen werden können. Die Frage ist eher, ob das aktuell bestehende systemdynamische Modell den Zweck des Modells mit hinreichender Zuverlässigkeit erfüllen kann.
2. Ein systemdynamisches Modell besteht aus **Annahmen** zu wichtigen Variablen sowie deren **kausalen Abhängigkeiten** im realen System.
3. Eine systemdynamische Analyse ist eine **sozio-technische Analyse**. Es werden sowohl relevante technische wie auch soziale und ökonomische Faktoren in der Analyse betrachtet. Somit werden die Schwächen des „technokratischen"-Ansatzes reduziert, welcher davon ausgeht, dass das zu analysierende Problem eindeutig definierbar ist [27].[4]

4 „The technocratic view is faulty, not because it is incorrect, but because it is incomplete.” [28] A. Tinker, A. Lowe, One-Dimensional Management Science: The making of a technocratic consciousness, Interfaces, 14 (1984), 40-49.

1.6 Begriffe

Zentrale Begriffe des Dokuments sind „Smart Grid“ und „Smart Market“. Die Begriffe leiten sich aus den Definitionen im „Weissbuch Smart Grid“ [29] ab und wurden im Rahmen dieses Projektes leicht angepasst.

Aktive Steuerungselemente:

- Ein aktives Steuerungselement erlaubt einen zentral „verordneten“ bzw. gesteuerten Eingriff. Aktive Steuerungselemente ermöglichen es, den Bedarf an elektrischer Energie bzw. das Angebot an elektrischer Energie von Lasten und Quellen zeitlich zu verschieben.

Beeinflussbare Energiequellen:

- Sind alle Energiequellen, die sich durch ein Management gezielt an- bzw. abschalten lassen (z. B. BHKW, Speicherkraftwerke, GuD), weitgehend unabhängig von Umweltbedingungen sind und somit sehr flexibel zur Verfügung stehen.

Dezentrale Energiequellen:

- Elektrische Energie, die nicht zentral erzeugt wird. Dezentrale Energiequellen werden auf Netzebene 5, 7 und evtl. 3 eingespeist. Energiequellen sind die Quellen der Energieproduktion, z. B. Speicher.
- Gemessen wird das Leistungsvermögen der installierten dezentralen Energiequellen in MW.

Elektrische Energie:

- Bezeichnet die Energie, die mittels Elektrizität übertragen wird. Auch bekannt als Strommenge.

Elektrische Energie ohne Herkunftsnachweis:

- Auch als grauer Strom bezeichnet, ist elektrische Energie ohne Herkunftsnachweis (HKN).

Grüne elektrische Energie:

- Grüne elektrische Energie (auch grüner Strom) ist elektrische Energie mit Herkunftsnachweis aus erneuerbaren Energiequellen, wie Wasser, Sonne, Biomasse und Wind.

Kapazität:

- Transportkapazität der Verteilnetze und das Leistungsvermögen der Lasten und Energiequellen; gemessen in MW.

Kernmechanik:

- Eine Kernmechanik beschreibt eine zentrale kausale Funktionsweise in Form eines Regelkreises innerhalb des Schweizer Elektrizitätssystems.

Last:

- Als Gegenstück zur Energiequelle handelt es sich bei der elektronischen Last um eine Stromsenke.
- Gemessen wird das Leistungsvermögen der installierten Lasten in MW.

Nicht verschiebbare Lasten:

- Nicht verschiebbare Lasten lassen sich von der Art ihrer Nachfrage nicht verschieben, z. B. kontinuierliche Produktionsprozesse.

Passive Steuerungselemente:

- Ein passives Steuerungselement schafft Anreize zur Verhaltensänderung von Verbrauchern oder Erzeugern, z. B. durch Informationen über den aktuellen Energieverbrauch oder den Stromtarif. Letztendlich verbleibt die Steuerung der Lasten oder Quellen jedoch bei den Verbrauchern oder Erzeugern.

Potenziell verschiebbare Lasten:

- Potenziell verschiebbare Lasten könnten aufgrund ihrer Eigenschaften bzw. der Art der Nachfrage, z. B. Wärmepumpen oder Kühlaggregate, im Tagesverlauf verschoben werden. Es bestehen jedoch Beschränkungen in der tatsächlichen Ausführung dieser Verschiebung, z. B. technisch noch nicht möglich.

Smart Energy:

- Sammelbegriff für alle intelligenten („smarten“) Energiethemen. Den Begriff „Smart Energy“ differenzieren wir in dieser Arbeit in Smart Grid und Smart Market.

Smart Grid:

- Intelligentes Zusammenspiel zwischen Energieproduktion, -speicherung und -verbrauch, das zu einer wirtschaftlich sinnvollen, verbesserten Integration und Nutzung erneuerbarer Energien und/oder einer höheren Energieeffizienz führt. Im Vergleich zur heutigen hierarchisch organisierten Energieverteilung soll das Smart Grid lokale, dezentrale Effekte effizienter im Gesamtelektrizitätssystem berücksichtigen und dadurch volkswirtschaftliche und ökologische Vorteile schaffen.
- Ein Smart Grid schafft die Fähigkeit, räumlich getrennte Produzenten, Verbraucher und Speicher geeignet zu koordinieren. Dies kann durch traditionelle Methoden, Anreiz-gesteuert (z. B. zeitgerechte Übermittlung von Tarifinformationen), zentral gesteuerte Eingriffe (z. B. Rundsteuerung, Lastabwurf) oder dezentrale, lokale Intelligenz (z. B. Smart Home mit Optimierung des PV-Eigenverbrauchs) erfolgen.
- Beinhaltet die Gesamtheit der zu erwartenden Änderungen im Elektrizitätssystem (Sensoren, Steuerung, IKT) zum optimalen Umgang mit komplexen Situationen im Stromnetz.
- In einem Smart Grid werden die im System vorhandenen Kapazitäten der Energiequellen und Lasten (meist) gemessen in MW (bzw. abgeleitete Einheiten) betrachtet.

Smart Market:

- Ein Smart Market ist ein speziell ausgestalteter Elektrizitätsmarkt, der die Energiewende unterstützt. Unter Energiewende verstehen wir in dieser Arbeit die Ziele der Energiestrategie des Schweizer Bundesrates, wie z. B. die Stabilisierung des Bedarfs an elektrischer Energie bis zum Jahr 2020, die Reduktion der CO_2-Emissionen, aber auch die Erhaltung der bestehenden guten Versorgungssicherheit und einer wirtschaftlichen und gesellschaftlich fairen Energieversorgung.
- Ein Smart Market schafft die Fähigkeit, benötige Energie und/oder Leistung wirtschaftlich bereitzustellen; das Smart Grid die Fähigkeit die Verbraucher und Produzenten räumlich geeignet zu koordinieren. Ein Smart Market umfasst die Gesamtheit der Energiemengen der Energiequellen und Lasten, (meist) gemessen in MWh (bzw. abgeleitete Einheiten).

Stochastische Energiequellen:

- Die Möglichkeit, Energie zu erzeugen, ist von externen Faktoren abhängig. Diese Energiequellen unterliegen Schwankungen und Unsicherheiten, welche durch Betreiber kaum beeinflusst werden können, z. B. aktuelle Windverhältnisse oder Sonneneinstrahlung.

Stromkosten:

- Die Stromkosten umfassen die Netzkosten, die Kosten für Energie und weitere Abgaben.

Verschiebbare Lasten:

- Verschiebbare Lasten sind Lasten mit der Eigenschaft, dass ihr Bedarf an elektrischer Energie zeitlich im Tagesverlauf verlagert werden kann, z. B. die Last der Wärmepumpen. Technisch wird dies durch aktive Steuerungselemente ermöglicht.
- Verschiebbare Lasten lassen sich zusammenfassen (poolen) und zentral steuern, z. B. durch EVU oder weitere Akteure.

Zentrale Energiequellen:

- Die zentrale Energieerzeugung erfolgt in Grosskraftwerken, z. B. in Kern- oder Wasserkraftwerken. Zentrale Energiequellen werden primär auf Netzebene 1 eingespeist.
- Gemessen wird das Leistungsvermögen der installierten zentralen Energiequellen in MW.

2 Trends und Zielgrössen eines Smart Markets

2.1 Entwicklung des Elektrizitätssystems

Um die Entwicklung des Elektrizitätssystems und seine Herausforderungen abzubilden, wurde eine Umfeldanalyse (PESTEL-Analyse) vorgenommen. Die PESTEL-Analyse ist ein Analyserahmen der externen Umweltanalyse zur Exploration und Strukturierung von relevanten Informationen und Trends. PESTEL ist die Abkürzung für die sechs betrachteten Bereiche: *Political, Economic, Social, Technological, Environmental and Legislative Analysis*.

Ein Trend im Schweizer Elektrizitätssystem beschreibt eine potenziell tiefgreifende Veränderung der Systemstruktur des Elektrizitätssystems. Die PESTEL-Analyse eignet sich, um die relevante Realität einer Industrie abzubilden und wird zur Strukturierung und Auswahl aus einer grossen Informationsmenge verwendet. Das Ziel ist es, aus den sechs Bereichen relevante Merkmale und Merkmalsausprägungen zu finden und auf eine konkrete Situation anzuwenden. Die Ergebnisse der erstellten PESTEL-Analyse für die Entwicklung des Elektrizitätssystems sind in Tabelle 2-1 dargestellt. Die Ergebnisse in Tabelle 2-1 zeigen die hohe Komplexität des Elektrizitätssystems. In den folgenden Abschnitten werden die erhobenen Trends priorisiert und eine Auswahl davon konkretisiert.

PESTEL-Dimension	Trends (alphabetisch geordnet)
Political (politisch)	Ausstieg AKW EU-Politik geopolitische Unsicherheiten Konzessionsleistungen Reduktion fossiler Energieverbraucher Streben nach mehr Autonomie Energiekosten, Energieeffizienz Subventionen
Economic (wirtschaftlich)	Angebot SDL Asset Effizienz/ -auslastung CO_2-Marktentwicklung & -Preise dynamische Stromtarife, Lieferantenwechsel Effizienz (Kosten und Energie) Flexibilität am Markt Kapazitätsmärkte Kosteneffizienz, Energieeffizienz neue Energiedienstleistungen neue Marktakteure/neue Märkte/neue Ausrichtung der Produktion Pooling Produktionsoptimierung Strommarktpreis, Spot Preis wirtschaftliche Marktkopplung

PESTEL-Dimension	Trends (alphabetisch geordnet)
Social (sozial)	Eigenverbrauch neue energieinteressierte Zielgruppen neue Energie-Verbrauchgewohnheiten Prosumer Versorgungssicherheit Versorgungsqualität
Technology (technologisch)	Big Data Demand Side Management dezentrale Energieproduktion E-Mobilität Flexibilität im Netz HGÜ-Netze IKT Leitungsausbau neue Speichermöglichkeiten Pooler Smart Home Smart Metering Steuerung im Netz technische Marktkopplung
Ecological (ökologisch)	Knappheit Öl und Gas Landschaftsschutz Nachhaltigkeit Reduktion CO_2-Emissionen Ressourcenverbrauch
Legal (rechtlich)	CO_2-Emissionen Datensicherheit und Datenschutz EU-Verträge Kostenkontrolle, -optimierung Liberalisierung Ökosteuer Regulierung Unbundling Verhältnis zwischen Marktakteuren

Tabelle 2-1: Umfeldanalyse durch PESTEL-Methode

2.2 Übersicht zu den Trends im Schweizer Elektrizitätssystem

Aus der PESTEL-Umfeldanalyse in Tabelle 2-1 lassen sich wesentliche Trends identifizieren. Die Gesamtheit an Trends lässt sich mittels Priorisierung und Bewertung auf die folgende Liste reduzieren:

1. Dezentrale Produktion
2. Demand Side Management (DSM)
3. Energieeffizienz
4. Kostendruck

Neben diesen konkreten Trends sind Megatrends zu erwähnen. Diese wurden für die Erarbeitung des kSMM ausgeklammert, da sie sich auf sämtliche operativen und konkreten Trends auswirken. Der Klimawandel und das durch den Schweizer Bundesrat lancierte Ziel zur Reduktion der CO_2-Emissionen stellen die wesentlichen Megatrends dar (Abbildung 2-1). Im regulierten Energiemarkt nimmt die Politik durch Erlasse und rechtliche Vorgaben massgeblich auf dessen Entwicklung Einfluss.

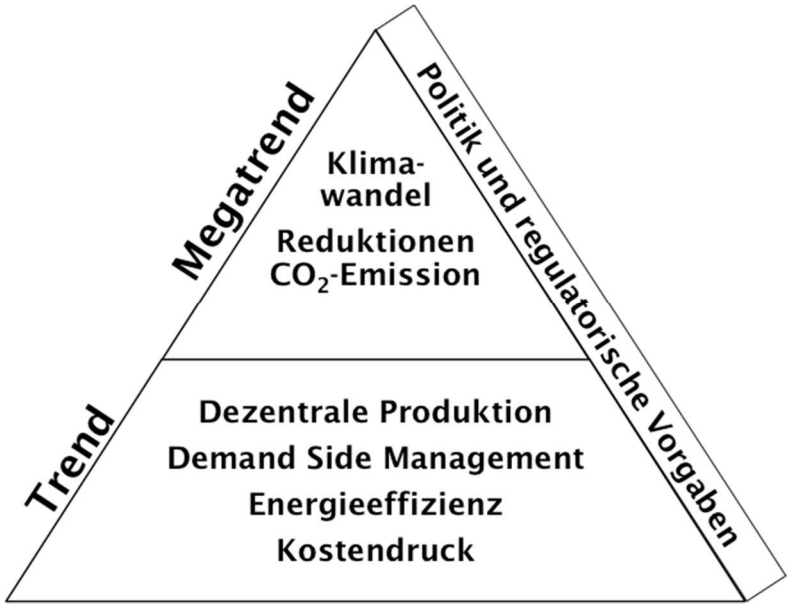


Abbildung 2-1: Megatrends und Trends

2.3 Definition relevanter Trends

Um die Komplexität für das Projekt beherrschbar zu halten, werden nur die Trends mit der höchsten Priorität (Perspektive: Arbeitsgruppe) in das kSMM aufgenommen. Die Trends werden dazu in Zielgrössen (Abschnitt 2.4) und Variablen übersetzt und greifbar gemacht. Variablen sind Entitäten, die zur Beschreibung eines Systemelements gewählt werden.

Die Trends werden in Tabelle 2-2 beschrieben. Zudem wird festgelegt, auf welche Zielgrössen die Trends wirken, durch welche Variablen die Trends am besten formalisiert werden und auf welcher Ebene, d. h. im Smart Grid oder im Smart Market, die Trends primär wirken.

Trend	Definition	beeinflusst Zielgrösse	relevante Variablen im kSMM[5]
1. Dezentrale Produktion	Die dezentrale Energieproduktion ist ein Bestandteil der Energiestrategie 2050. Grosse zentrale Produktionsblöcke werden durch kleine, stochastisch einspeisende Einheiten substituiert bzw. ergänzt. Die geringe Vorhersehbarkeit dieser Energieproduktion erschwert die Planung von Beschaffung und Verbrauch. Unabhängige Produzenten können ihren eigenproduzierten Strom zeitgleich auch selbst verbrauchen. Dies hat Konsequenzen für die Ausrichtung der bestehenden und neuen Marktteilnehmer sowie für VNB, die für die Netzinfrastruktur verantwortlich sind.	• Anteil dezentrale Produktion • Versorgungssicherheit	• el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen • Anteil Selbstversorger • Förderung erneuerbarer Energien • Gesamtangebot el. Energie durch Quellen
2. Demand Side Management (DSM)	Eine Erhöhung des DSM führt zu einer Anpassung des Verbrauchs an die Produktion, um das Gleichgewicht zwischen Nachfrage und Angebot sicherzustellen. Durch das aktive Steuern (indirekt durch Kunden oder direkt durch Dritte) von Verbrauchern, können Lasten zeitlich verschoben werden.	• Energiekosten Schweiz • Lastenflexibilität • Versorgungssicherheit	• el. Leistung tatsächlich verschiebbarer Lasten im System • el. Leistung von Energiespeichern für Quellen und Lasten • Grosshandelspreis • Strompreis • Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie

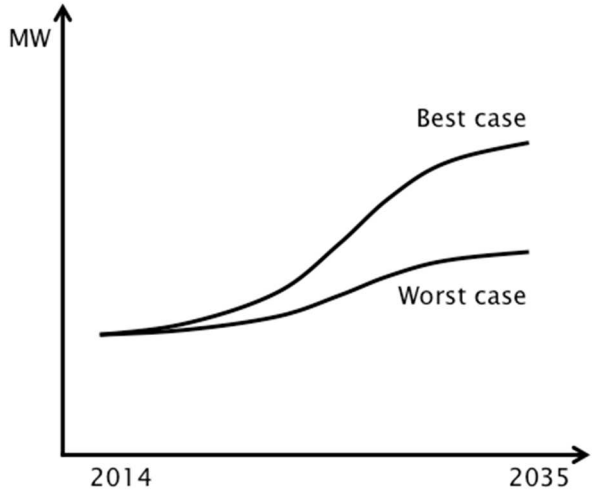
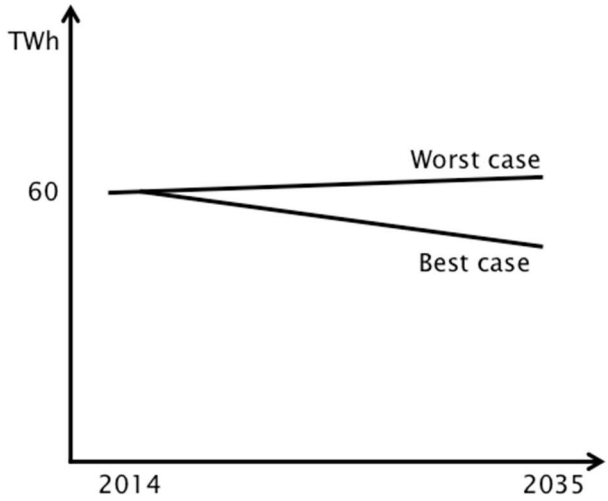
[5] Variable des Bereichs „Smart Grid“ werden in der Tabelle **blau** dargestellt. Variable des Bereichs „Smart Market“ werden **grün** dargestellt. Die im kSMM aufgenommenen Zielgrössen werden in der Tabelle **rot** dargestellt.

Trend	Definition	beeinflusst Zielgrösse	relevante Variablen im kSMM[5]
3. Energieeffizienz	Die Energieeffizienz ist ein Pfeiler der neuen Energiestrategie des Schweizer Bundrates für 2050. Sie beinhaltet insgesamt eine Reduktion des Energieverbrauchs und die Minimierung von Netzverlusten.	• durchschnittlicher Auslastungsgrad der Energiequellen • gesamt el. Leistung der Energiequellen und Lasten im System • gesamter Bedarf an el. Energie pro Jahr	• Anteil Übertragungsverluste durch Verteilnetz • Gesamte el. Leistung der Energiequellen • Tatsächlich übertragene Energie mittels Verteilnetz
4. Kostendruck	Die Kosten im Elektrizitätssystem steigen weiter an, dadurch erhöht sich für alle Teilnehmer im System der Druck effizient zu arbeiten. Das zukünftige Elektrizitätssystem ist weiterhin kosteneffizient auszugestalten.	• Energiekosten Schweiz	• Kosten Verteilnetz • Kosten für aktive Steuerungselemente • Kosten für Energiespeicher

Tabelle 2-2: Konkrete Ausgestaltung von Trends

2.4 Zielgrössen im Schweizer Elektrizitätssystem

Ein erfolgreiches Zusammenspiel zwischen Smart Grid und Smart Market lässt sich anhand des Verhaltens relevanter Zielgrössen erkennen. Die wichtigsten Zielgrössen sind in Tabelle 2-3 dargestellt und zeigen ihre erwartete Entwicklung im Zeitverlauf. Jede Zielgrösse hat einen Zielwert, d. h. eine konkrete Ausprägung. Versorgungssicherheit ist z. B. die Zielgrösse, und der Zielwert ist eine hohe Versorgungssicherheit. Auf der x-Achse ist der Zeithorizont in Jahren und auf der y-Achse ist der Zielwert abgetragen. Das abgebildete Verhalten im Zeitverlauf gilt als erste Annäherung und soll ein Verständnis über den Verlauf und den Wertebereich schaffen und keinen exakten Wert definieren.

Zielgrösse	Beschreibung
Dezentrale Produktion 	Dezentrale Produktion bezeichnet die installierte Leistung der (dezentral) mit neuen erneuerbaren Energien stochastisch produzierenden Erzeugungseinheiten in der Schweiz. Aufgrund der Energiestrategie 2050 wird mit einer Zunahme gerechnet. <u>Begründung des Verlaufs:</u> Die dominante dezentrale Produktionstechnologie ist Photovoltaik (PV). Gegenwärtig ist diese in der Schweiz noch wenig verbreitet, es besteht jedoch ein sehr grosses Zubaupotenzial, das in den nächsten Jahren erschlossen werden könnte. Gegen 2035 ist mit einem Abflachen des Zubaus zu rechnen, da bis dahin bereits eine hohe Verbreitung erreicht sein sollte.
Gesamter Bedarf an el. Energie pro Jahr 	Der Bedarf an el. Energie bezeichnet den auf die Bevölkerung normierten Bedarf nach el. Energie durch die Industrie und Haushalte in der Schweiz in einem Jahr. <u>Begründung des Verlaufs:</u> Aufgrund der Effizienzmassnahmen der Energiestrategie 2050 erwarten wir einen stabileren bzw. leicht sinkenden Bedarf an el. Energie insgesamt und pro Kopf (Best case).

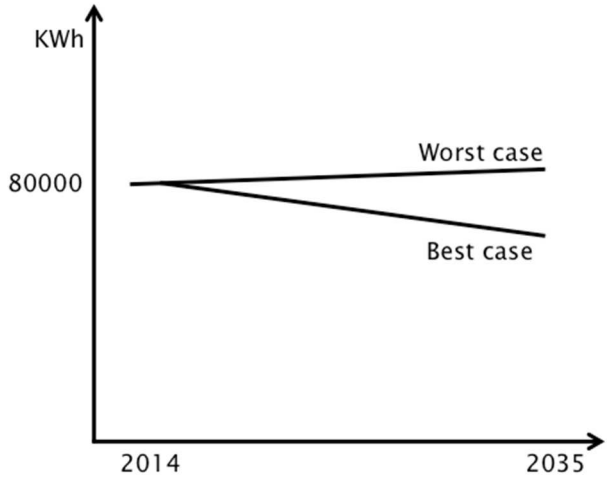
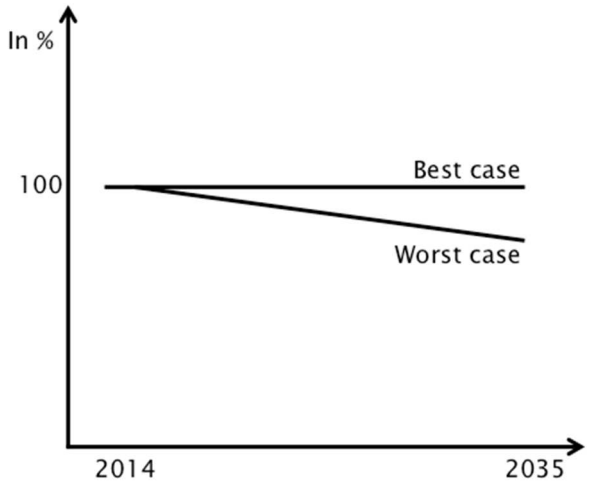
Zielgrösse	Beschreibung
Gesamter Bedarf an el. Energie pro Kopf pro Jahr  h	
Versorgungssicherheit  	Versorgungssicherheit bezeichnet die Zuverlässigkeit der el. Energieversorgung in der Schweiz. Als ein möglicher Indikator wird SAIDI (System Average Interruption Duration Index) verwendet (IEEE Standard 1366-1998). SAIDI wird in Minuten gemessen. SAIDI = (Summe aller Versorgungsunterbrechungen [min])/(Gesamtzahl aller Verbraucher). Unter Berücksichtigung der Gesamtjahreszeit lässt sich die Versorgungssicherheit auch in Prozent darstellen. Ausgeschlossen sind im Rahmen dieser Arbeit weitere Indikatoren, wie z. B. die internationale Vernetzung. <u>Begründung des Verlaufs:</u> Es ist davon auszugehen, dass die bestehende, hohe Versorgungssicherheit auch bis 2035 erhalten bleiben soll, da eine hohe Versorgungssicherheit eines der Grundziele der CH-Energieversorgung ist. Destabilisierende Einflüsse, wie z. B. der Zubau an stochastischen Einspeisungen, werden durch Gegenmassnahmen kompensiert werden.

Tabelle 2-3: Wichtige Zielgrössen

Neben den wichtigen Zielgrössen gibt es eine Reihe weiterer Zielgrössen bzw. Indikatoren, die auf eine optimale Koordination zwischen Smart Grid und Smart Market schliessen lassen. Für sie existieren jedoch noch keine konkreten Vorgaben über die Entwicklung im Zeitverlauf (Tabelle 2-4).

Zielgrösse	Beschreibung
durchschnittlicher Auslastungsgrad der beeinflussbaren Energiequellen[6]	Ist der Quotient der marktseitigen Nutzung der beeinflussbaren Energiequellen und der maximal möglichen Nutzung pro Jahr.
durchschnittlicher Auslastungsgrad von stochastischen Energiequellen[4]	Ist der Quotient der marktseitigen Nutzung der stochastischen Energiequellen und der maximal möglichen Nutzung pro Jahr.
Energiekosten Schweiz[4]	Die Energiekosten der Schweiz beinhalten Erdölbrennstoffe, Treibstoffe, Elektrizität, Gas, Kohle, Holz und Fernwärme. Die Endverbraucher gaben dafür im Jahr 2013 32.860 Millionen SFr. aus[7].
gesamte el. Leistung der Quellen im System[4]	Setzt sich zusammen aus der Summe der beeinflussbaren und stochastischen Energiequellen im System.
Lastenflexibilität auf dem Elektrizitätsnetz[4]	Prozentualer Anteil zeitlich verschiebbarer Lasten, die zu jedem Zeitpunkt an- und abschaltbar sein müssen.

Tabelle 2-4: Weitere Zielgrössen

6 Im kSMM enthalten, aber für eine Bewertung dieser Zielgrössen ist eine Quantifizierung des Modells nötig.
7 Gesamtenergiestatisktik 2013, BFE.

3 Kausales Smart-Market-Modell

3.1 Modellübersicht

Das kSMM ist ein qualitatives Modell, welches die Zusammenhänge und Beziehungen im System Schweizer Elektrizitätsmarkt darstellt. Es beinhaltet sowohl die Verteilnetzebene („Smart Grid“) mit den installierten Leistungen als auch die Marktebene („Smart Market“) mit der übertragenen Energie. Mit Hilfe des kSMM lassen sich Szenarien erstellen und Interventionsmöglichkeiten konkret diskutieren. Das kSMM besteht aus Variablen, die entweder dem Smart Grid (SG) oder dem Smart Market (SM) zugeordnet werden können. Zusätzlich unterteilen wir in Angebotsseite (A) und Nachfrageseite (N) Zur besseren Unterscheidung werden die Modellsektoren farblich gekennzeichnet (Abbildung 3-1). Bestandteile des Smart Grids sind **blau** (Sektoren SG-N und SG-A); Bestandteile des Smart Markets sind **grün** (Sektoren SM-N und SM-A). Zusätzlich gibt es im kSMM Interventionsvariablen (**orange**). Zielgrössen werden in **rot** dargestellt.

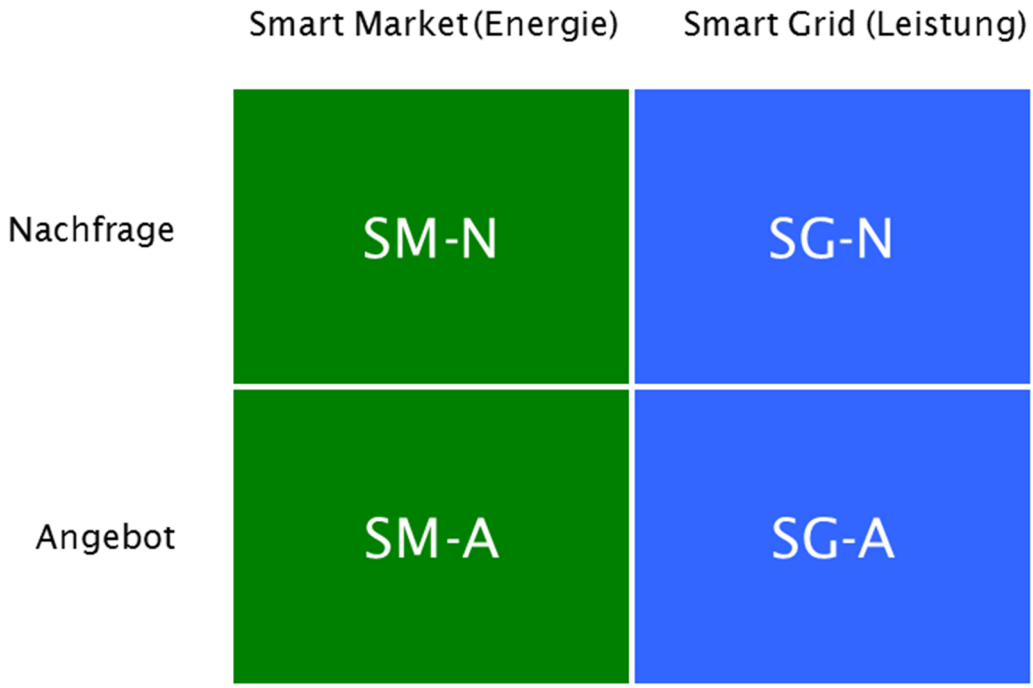


Abbildung 3-1: Vier-Felder-Matrix zu Smart Market und Smart Grid

Im Elektrizitätssystem müssen zu jedem Zeitpunkt erzeugte und nachgefragte Leistung im Gleichgewicht sein. Ein Gleichgewicht der marktseitigen Energieebene hat jedoch nicht automatisch ein Gleichgewicht auf der netzseitigen Leistungsebene zur Folge. Ziel des kSMM ist es, mögliche Ungleichgewichte transparent zu machen und Interventionsvorschläge zu erarbeiten, die das Gleichgewicht sicherstellen.

Im kSMM werden solche Ausgleichsprozesse zur Förderung des Gleichgewichts durch Verbindungen zwischen den Sektoren abgebildet. Ein Beispiel: Das Ange-

bot an elektrischer Energie befindet sich im Sektor „Smart-Market-Angebot“, der Bedarf an elektrischer Energie befindet sich im Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“. Dazwischen befindet sich das Verhältnis von Angebot zu Nachfrage, das massgeblich für den Grosshandelspreis im Sektor „Smart-Grid-Angebot“ ist.

Jeder der vier Sektoren aus Abbildung 3-1 wird durch Variablen im kSMM abgebildet. Im Sektor „Smart-Grid-Angebot“ sind stochastische und beeinflussbare Quellen enthalten.

Im Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“ sind dies die Lasten in den verschiedenen Ausbaustufen „nicht verschiebbar“, „potenziell verschiebbar“ und „verschiebbar“. Daneben gehören zum Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“ die Variablen „Anteil verschiebbarer Lasten“ und die Verteilnetzkapazität.

Der Sektor „Smart-Market-Angebot“ enthält die CO_2-Emissionen der Quellen, die Berechnung des Energieangebots in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Lasten sowie den Grosshandelspreis.

Der Sektor „Smart-Market-Nachfrage“ umfasst die Berechnung der Energienachfrage und den Strompreis für die Endkunden. Zwischen den Sektoren „Smart-Market-Angebot und „Smart-Market-Nachfrage“ werden Angebot und Nachfrage aufeinander abgestimmt und die tatsächlich zu übertragende elektrische Energie mittels Verteilnetz bestimmt. Die Kernmechaniken des kSMM werden im nächsten Abschnitt erklärt.

3.2 Kernmechaniken des kausalen Smart Market Modells

Das kSMM beinhaltet wesentliche Variablen und Zielgrössen aus den vier zuvor benannten Sektoren, welche mittels Kernmechaniken in kausaler Verbindung stehen. Die Kernmechaniken helfen die Entwicklung der relevanten Zielgrössen des Systems (Kapitel 2) mit der zugrundeliegenden Struktur des Elektrizitätssystems zu verknüpfen. Auswirkungen des antizipierten Verhaltens der Zielgrössen lassen sich eher abschätzen, wenn die Konsequenzen für das Elektrizitätssystem transparent dargestellt werden können. Auf den Kernmechaniken des kSMM aufbauend werden dann in Kapitel 4 Interventionsmöglichkeiten beschrieben und in Kapitel 5 Handlungsempfehlungen vorgeschlagen, die dazu beitragen, ein Smart Grid zu ermöglichen. Dadurch soll die Etablierung eines Schweizer Smart Markets unterstützt werden.

Abbildungen 3-6 und 3-7 zeigen die Kernmechaniken des kSMM. Abbildung 3-6 zeigt die Kernmechaniken auf eine einfach nachvollziehbare Art und Weise, da hier das kSMM noch nicht an die vier Sektoren-Matrix angepasst ist. Dies soll dem Lesenden den Zugang zu den Modellinhalten erleichtern. Wir empfehlen, sich die Kernmechaniken in Abbildung 3-6 zuerst zu vergegenwärtigen. Dafür ist auch der Methodenexkurs auf der folgenden Seite hilfreich. Tabelle 3-1 zeigt die kausalen Pfade der Kernmechaniken. In der Tabelle unterteilen wir in bestehende und neue Mechaniken. Die neuen Mechaniken entstehen durch das Zusammenspiel von Smart Grid und Smart Market.

Exkurs: Methodik der qualitativen Systemdynamik
(weitere Details finden Sie auf www.systemdynamics.ch)

Notation
Ein (schwarzer) Kausalpfeil, der zwei Variablen A und B miteinander verbindet, impliziert, dass eine Veränderung von Variable A Auswirkungen auf Variable B hat. Die qualitative Ausgestaltung der Verbindung wird durch die Polarität des Kausalpfeils verdeutlicht. Es gibt zwei Polaritäten:

- (+): Die beiden Variablen verändern sich, unter sonst gleichen Umständen, in dieselbe Richtung.
- (–): Die beiden Variablen verändern sich, unter sonst gleichen Umständen, in unterschiedliche Richtungen.

Die Polarität der Kausalverbindung macht keine Aussage über die Grösse oder Stärke der Veränderung. Der entstehende Effekt ist ausschliesslich qualitativer Natur. Es lassen sich auch keine Rückschlüsse auf eine lineare Beziehung zwischen den Variablen ziehen.

Zwei Arten von Regelkreisen

- (R): Selbstverstärkende Regelkreise (reinforcing loops) verhalten sich so, dass die Entwicklung von Variablen im Zeitverlauf verstärkt wird. Im Zeitverlauf tritt ein Schneeball-Effekt ein, der sich nach oben oder nach unten beschleunigt. Ist das Verhalten erwünscht, nennt man diese Struktur einen Erfolgsregelkreis (virtuous circle). Ist das Verhalten nicht erwünscht, nennt man es einen Teufelskreis (vicious circle). Das Beispiel in Abbildung 3-2 zeigt dieses Verhalten am Verhalten einer Bevölkerung. Angenommen, es gibt innerhalb dieser Bevölkerung eine fixe Geburtsrate pro Einwohner, so sorgt bereits ein kleiner Impuls in Form einer Bevölkerungszunahme zu einer Erhöhung der absoluten Geburten. Diese vergrössern dann ihrerseits die Bevölkerung. Gibt es keine ausgleichenden Effekte oder Wachstumsschranken nimmt die Bevölkerung unbegrenzt zu.

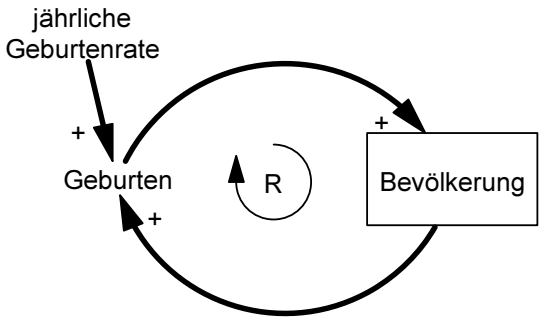


Abbildung 3-2: Selbst verstärkender Regelkreis

- (B): Ausgleichende oder zielsuchende Regelkreise (balancing loops) nähern den Wert einer Variablen einem Gleichgewicht oder einem externen Ziel an. Im Zeitverlauf pendeln sich Variablen auf den Zielwert ein; ihre Werte entsprechen dann den extern vorgegebenen Zielen oder stimmen mit Ressourcen-Restriktionen überein, die ihre Werte beschränken. Abbildung 3-3 erweitert den selbst verstärkenden Kreislauf aus Abbildung 3-2 um einen ausgleichenden Regelkreis, der die Mortalität beschreibt. Eine konstante jährliche prozentuale Sterberate würde bei einer Bevölkerungszunahme gleichzeitig die absolute Sterberate (Mortalität) erhöhen. Dies reduziert die Bevölkerung und wirkt somit dem selbst verstärkenden Regelkreis entgegen.

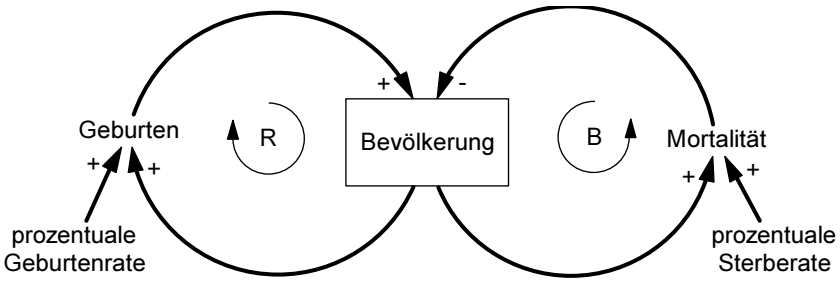


Abbildung 3-3: Selbst verstärkender und ausgleichender Regelkreis

Beide Beschreibungen treffen nur auf isolierte, eigenständige Regelkreise zu. Ein System, dass aus vielen verschiedenen Regelkreisen besteht, die sich gegenseitig beeinflussen, erzeugt ein komplexes Verhalten. Der normalen menschlichen Intuition sind Grenzen gesetzt, ein solches System intuitiv zu verstehen.

Bestandsgrösse

Eine Bestandsgrösse ist im Prinzip alles, was im Zeitverlauf vermehrt oder verringert werden kann. Das Wasser in einer Badewanne, das Guthaben auf einem Bankkonto, das Inventar in einem Lagerhaus sind Beispiele für Bestandsgrössen. In der systemdynamischen Visualisierung werden Bestandsgrössen ausschliesslich als Rechtecke dargestellt. Mehrere Bestandsgrössen derselben Art werden hintereinander abgebildet (siehe Abbildung 3-4). Zu *elektrischer Leistung Lasten*gehören die Bestandsgrössen *elektrische Leistung nicht verschiebbare Lasten*, *elektrische Leistung potenziell verschiebbare Lasten* und *elektrische Leistung verschiebbare Lasten*. Eine Bestandsgrösse wird auch als Stock, Level, Akkumulator oder Zustandsgrösse bezeichnet.



Abbildung 3-4: Hintereinander abgebildete Bestandsgrössen

Verzögerungen
In den Kernmechaniken sind einige Kausalpfeile mit senkrechten Strichen versehen. Diese Striche symbolisieren signifikante Verzögerungen. Diese Wirkungsverzögerungen sind in einem System vorhanden, wenn Ursache und Wirkung zeitlich merklich voneinander getrennt sind. Das Beispiel in Abbildung 3-5 zeigt die Verzögerung zwischen Versorgungssicherheit und Verteilnetzkapazität. Der Ausbau des Verteilnetzes ist eine von vielen Massnahmen, wenn die Versorgungssicherheit abnimmt. In der Realität passiert dies jedoch nicht sofort, sondern es folgen z. B. rechtliche und bauliche Prozesse, die den Ausbau verzögern.

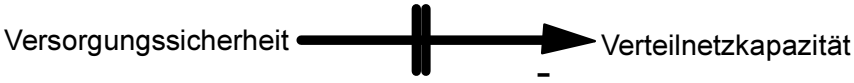


Abbildung 3-5: Verzögerung

Abbildung 3-7 beinhaltet die gleichen Kernmechaniken wie Abbildung 3-6, jedoch ist Abbildung 3-7 an die Positionen der Kernmechaniken angepasst, um nun die zuvor eingeführten vier Sektoren-Matrix darzustellen. Diese Zusatzinformation der vier Sektoren ist nach der Einführung des kSMM einfacher nachvollziehbar und für die Darstellung der Interventionsmöglichkeiten in Kapitel 4 notwendig.

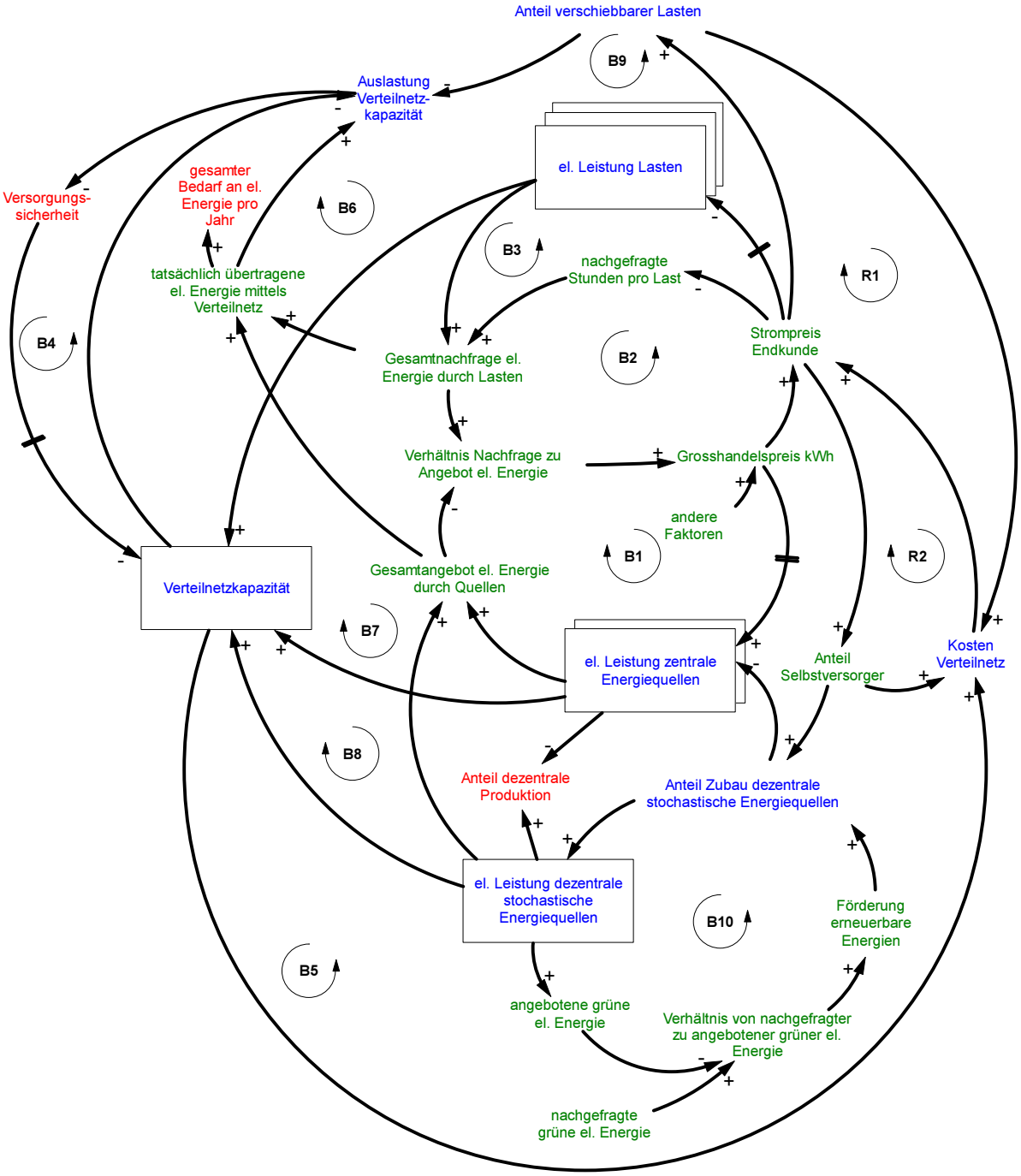


Abbildung 3-6: Kernmechaniken des kSMM (ohne Vier-Felder-Matrix-Struktur)[8]

Neben den Variablen aus den Bereichen Smart Grid (blau) und Smart Market (grün) enthält Abbildung 3-6 die drei wichtigen Zielgrössen (rot) „Versorgungs-

[8] Variablen-Legende: blau = Smart Grid, grün = Smart Market; rot = Zielgrössen (Kapitel 2). R sind selbst verstärkende Regelkreise und B ausgleichende Regelkreise.

sicherheit“, „Anteil dezentrale Produktion“ und den „gesamten Energiebedarf elektrischer Energie“. Die Zielgrössen Anteil der dezentralen Produktion und gesamter Energiebedarf sind selbst nicht Teil einer Kernmechanik, werden jedoch massgeblich durch Kernmechaniken beeinflusst. Wie die Kernmechaniken die Ziele beeinflussen, ist in der nachfolgenden Tabelle beschrieben.

Das Ziel des kSMM ist es, den kausalen Zusammenhang von Kernmechaniken und Zielgrössen des Elektrizitätssystems zu verdeutlichen. Aufgrund dieser Einsicht wird es dann möglich, mittels einer systematischen Beeinflussung der Kernmechaniken die Zielgrössen in die gewünschte Richtung zu entwickeln.

Kernmechanik	Kausaler Pfad der Kernmechanik
B1: Beeinflussung des Grosshandelspreises durch Angebot el. Energie	Grosshandelspreis kWh → el. Leistung zentrale Energiequellen → Gesamtangebot el. Energie durch Quellen → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis kWh
B2: Beeinflussung des Grosshandelspreises durch die Nachfrage el. Energie	Grosshandelspreis kWh → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis kWh
B3: Einfluss des Grosshandelspreises auf Lasten	Grosshandelspreis kWh → Strompreis Endkunde → el. Leistung Lasten → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis kWh
B4: Ausbau Verteilnetze durch Auslastung	Verteilnetzkapazität → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität
B5: Ausbau Verteilnetze durch Lasten	Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbare Lasten → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität
B6: Auslastung des Verteilnetzes durch Nachfrage nach el. Energie	Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → tatsächlich übertragene Energie mittels Verteilnetz → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität
B7: Ausbau Verteilnetze durch übertragene zentrale el. Energie	Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis kWh → el. Leistung zentrale Energiequellen → Verteilnetzkapazität
B8: Ausbau Verteilnetze durch übertragene dezentrale el. Energie	Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil Selbstversorger → Anteil Zubau dezentrale stochastische Energiequellen → el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen → Verteilnetzkapazität
B9: Entlastung Verteilnetze durch verschiebbare Lasten	Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbarer Lasten → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität
B10: Ausbau dezentrale stochastische Energiequellen durch grüne el. Energie	el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen → angebotene grüne el. Energie → Verhältnis von nachgefragter zu angebotener grüner Energie → Förderung erneuerbarer Energien → Anteil Zubau dezentrale stochastische Energiequellen → el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen
R1: Kostenfalle verschiebbare Lasten	Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbare Lasten → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde
R2: Umverteilung der Netzkosten	Strompreis Endkunde → Anteil Selbstversorger → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde

Tabelle 3-1: Darstellung der kausalen Pfade der Kernmechaniken[9]

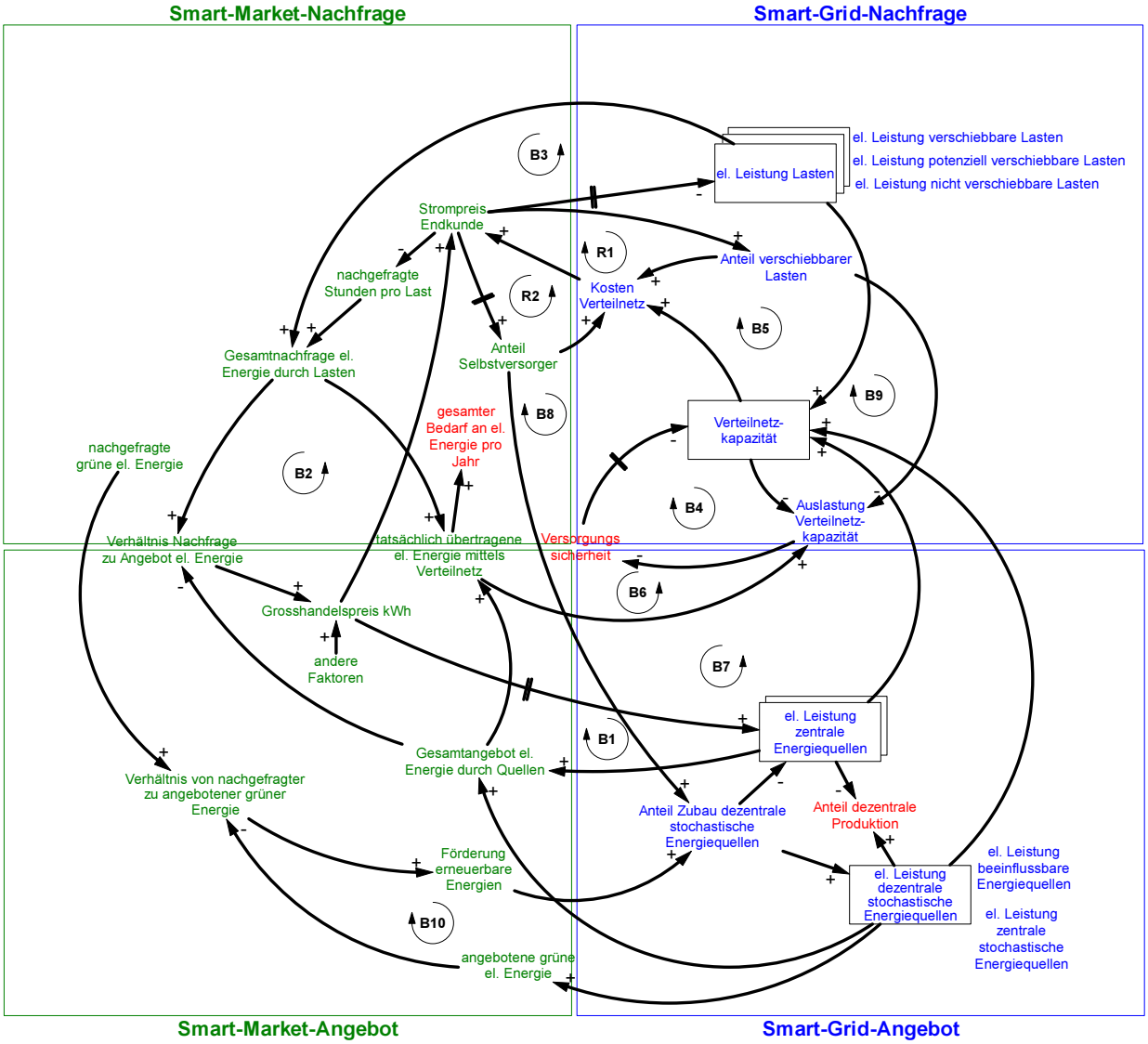


Abbildung 3-7: Kernmechaniken des kSMM in der Vier-Felder-Matrix

B1- Beeinflussung des Grosshandelspreises durch Angebot el. Energie:

Pfad B1: Grosshandelspreis kWh → el. Leistung zentrale Energiequellen → Gesamtangebot el. Energie durch Quellen → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis je kWh

Die Kernmechanik B1 beschreibt die Veränderung des Angebots an elektrischer Energie und der installierten elektrischen Leistung auf der Basis des Grosshan-

[9] Variablen-Legende: hellgrau = bestehende Mechanismen im konventionellen Markt, dunkelgrau = neue Mechanismen im Smart Market.

delspreises. Ein langfristig hoher Grosshandelspreis führt zu Investitionen in zentrale Energiequellen. Dadurch erhöht sich die angebotene elektrische Energie. Bei gleichbleibender Nachfrage sinkt der Grosshandelspreis, und es wird weniger in neue Energiequellen investiert. Zu beachten ist, dass der Ausbau von Energiequellen zeitlich verzögert ist. So kann es sein, dass Investitionsentscheidungen in Erwartung hoher Preise getroffen werden und das zusätzliche Angebot an elektrischer Energie erst zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung steht, wenn die Preise dann eventuell niedrig sind.

B1 ist eine ausgleichende Kernmechanik, welche die verzögerte Interaktion zwischen Energieangebot und Preis erfasst. Sie verbindet die Sektoren „Smart Market – Angebot“ und „Smart Grid Angebot“. B1 wirkt indirekt auf die Zielgrössen „gesamter Bedarf an elektrischer Energie pro Jahr“ und „Anteil dezentrale Produktion“.

B2 – Beeinflussung des Grosshandelspreises durch die Nachfrage nach elektrischer Energie:

Pfad B2: Grosshandelspreis kWh → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis je kWh

Den Ausgangspunkt für diesen Regelkreis bildet der Grosshandelspreis. In die gleiche Richtung wie der Grosshandelspreis verändert sich der Strompreis für Endkunden. Der Strompreis für Endkunden bestimmt deren Konsumverhalten. Ein hoher Strompreis führt zu weniger nachgefragten Stunden pro installierter Last. Fragen Kunden weniger Strom nach, reduziert sich entsprechend auch die Gesamtnachfrage nach elektrischer Energie durch Lasten. Die Gesamtnachfrage geht dann als ein Teil in das Verhältnis Nachfrage zu Angebot nach elektrischer Energie ein, welche wiederum den Strompreis für Endkunden bestimmt.

B2 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die eher kurzfristige Interaktionen von Preis und Nachfrage sowie die Verhaltensänderung erfasst. Sie verbindet die Sektoren „Smart-Market-Nachfrage“ und „Smart-Market-Angebot“. B2 wirkt indirekt auf die Zielgrössen „gesamter Bedarf an elektrischer Energie pro Jahr“ und „Anteil dezentrale Produktion“.

B3 – Einfluss des Grosshandelspreises auf Lasten:

Pfad B3: Grosshandelspreis kWh → Strompreis Endkunde → el. Leistung Lasten → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis je kWh

Ein über längere Zeit hoher Strompreis führt zu einer Verringerung der elektrischen Lasten im Elektrizitätssystem. Im Gegensatz zum kurzfristigen Effekt der

Nachfragereduzierung (B2) wirkt dieser Effekt erst in der mittleren bis langen Frist. Bestehende Lasten werden z. B. durch effizientere Lasten substituiert. Das reduziert die Gesamtnachfrage nach elektrischer Energie, der Strompreis sinkt und die Lasten werden wieder dem Elektrizitätssystem hinzugefügt.

B3 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die mittel- bis langfristige Interaktionen von Preis und installierten Lasten sowie die Verhaltensänderung erfasst. Sie verbindet die Sektoren „Smart-Market-Nachfrage“ und „Smart-Grid-Nachfrage“. B3 wirkt indirekt auf die Zielgrössen „gesamter Bedarf an elektrischer Energie pro Jahr“ und „Anteil dezentrale Produktion“.

B4 – Ausbau der Verteilnetze durch Auslastung:

Pfad B4: Verteilnetzkapazität → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität

Eine niedrige Versorgungssicherheit im Elektrizitätssystem führt zunächst zu einem sukzessiven, wenn auch zeitlich verzögerten, Ausbau der Verteilnetzkapazität. Durch den Ausbau dieser Kapazität kann die Auslastung des Verteilnetzes wieder reduziert werden. Durch eine reduzierte Auslastung des Verteilnetzes verbessert sich die Versorgungssicherheit wieder. Hier besteht jedoch das Risiko eines Ungleichgewichts im Smart Grid zwischen benötigter und erforderlicher Verteilnetzkapazität. Wenn die Verteilnetzkapazität kurzfristig voll ausgelastet ist (die Versorgungssicherheit entsprechend abnimmt) gibt es innerhalb dieser Kernmechanik aufgrund der Verzögerung beim Zubau der Verteilnetzkapazität keine Möglichkeit, kurzfristig die Verteilnetzkapazität auszuweiten.

B4 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die mittel- bis langfristige Interaktionen zwischen Versorgungssicherheit und Verteilnetzkapazität erfasst. Sie umfasst den Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“. B4 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B5 – Ausbau der Verteilnetze durch Lasten:

Pfad B5: Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbare Lasten → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität

Werden neue Lasten installiert, müssen diese auch in das Verteilnetz integriert werden. Sie beanspruchen also Verteilnetzkapazität. Zu einem Ungleichgewicht zwischen benötigter und vorhandener Verteilnetzkapazität kann es kommen, wenn die elektrische Leistung von Lasten aufgrund eines hohen Strompreises reduziert wird. In diesem Fall gibt es Anreize, die Verteilnetzkapazität zu reduzieren. Der Regelkreis wird geschlossen durch die Verbindung der Verteilnetz-

kapazität mit den Kosten für das Verteilnetz. Diese beeinflussen dann wieder direkt den Strompreis.

B5 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die mittel- bis langfristige Interaktionen zwischen Verteilnetzkapazitäten und Lasten erfasst. Sie verbindet die Sektoren „Smart-Grid-Nachfrage“ und „Smart-Market-Nachfrage. B5 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B6 – Auslastung des Verteilnetzes durch Nachfrage nach elektrischer Energie:

Pfad B6: Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → tatsächlich übertragene Energie mittels Verteilnetz → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität

Ein wesentlicher Treiber der Auslastung der Verteilnetzkapazität ist die übertragene elektrische Energie. Nimmt diese elektrische Energie zu, erhöht sich die Auslastung des Verteilnetzes. Dadurch wird ein Ausbau der Verteilnetzkapazität gefördert, der sowohl die Kosten als auch den Strompreis erhöht. Ein hoher Strompreis verringert die Nachfrage, die tatsächlich übertragene elektrische Energie nimmt ab.

B6 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die eher kurzfristige Interaktionen zwischen tatsächlich übertragener elektrischer Energie und Verteilnetzkapazität erfasst. Sie verbindet alle vier Sektoren. B6 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B7 – Ausbau der Verteilnetze durch übertragene zentrale elektrische Energie:

Pfad B7: Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → nachgefragte Stunden pro Last → Gesamtnachfrage el. Energie durch Lasten → Verhältnis Nachfrage zu Angebot el. Energie → Grosshandelspreis je kWh → el. Leistung zentrale Energiequellen → Verteilnetzkapazität

Neben den nachfragenden elektrischen Lasten (B5) müssen auch zentrale Energiequellen ins Verteilnetz integriert werden. Der Zubau von zentralen Energiequellen aus dem Sektor „Smart-Grid-Angebot“ erhöht die benötigte Verteilnetzkapazität. Dadurch steigt der Strompreis und die Nachfrage nach elektrischer Energie nimmt ab. Der Grosshandelspreis sinkt, es wird weniger in neue zentrale Energiequellen investiert.

B7 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die eher mittel- bis langfristige Inter-

aktionen zwischen zentralen Energiequellen und Verteilnetzkapazität erfasst. Sie verbindet alle vier Sektoren. B7 wirkt indirekt auf die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B8 – Ausbau der Verteilnetze durch übertragene dezentrale elektrische Energie:

Pfad B8: Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil Selbstversorger → Anteil Zubau dezentrale stochastische Energiequellen → el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen → Verteilnetzkapazität

Nicht nur die zentralen Energiequellen (B7), sondern auch dezentrale stochastische Energiequellen müssen ins Verteilnetz integriert werden. Der Zubau von dezentralen stochastischen Energiequellen aus dem Sektor „Smart-Grid-Angebot“ erhöht die benötigte Verteilnetzkapazität. Dies erhöht die Kosten für das Verteilnetz. Höhere Kosten erhöhen den Strompreis und Endkunden versuchen dann vermehrt, sich selbst zu versorgen, indem sie z. B. PV-Anlagen installieren. Dies erhöht den Anteil an dezentralen stochastischen Energiequellen.

B8 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die eher mittel- bis langfristige Effekte von hohen Strompreisen auf den Anteil der Selbstversorger erfasst. Sie verbindet die Sektoren „Smart-Market-Nachfrage“, „Smart-Grid-Angebot“ und „Smart-Grid-Nachfrage“. B8 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Anteil dezentrale Produktion“.

B9 – Entlastung der Verteilnetze durch verschiebbare Lasten:

Pfad B9: Verteilnetzkapazität → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbarer Lasten → Auslastung Verteilnetzkapazität → Versorgungssicherheit → Verteilnetzkapazität

B9 verknüpft den Anteil verschiebbarer Lasten mit der Auslastung der Verteilnetzkapazität. Nehmen die verschiebbaren Lasten zu, nimmt die Auslastung der Verteilnetzkapazität ab, denn verschiebbare Lasten können zu einer kurzfristigen Reduktion der Auslastung der Verteilnetzkapazität beitragen. Wie alle anderen Lasten sind diese auch in das Verteilnetz integriert, können aber bei kurzfristig hoher Auslastung des Verteilnetzes auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. Die Versorgungssicherheit wird erhöht und die notwendige Verteilnetzkapazität wird reduziert. Dadurch sinken die Kosten für das Verteilnetz und der Strompreis sinkt. Das reduziert die Anreize, in verschiebbare Lasten zu investieren. Diese Kernmechanik hilft das Elektrizitätssystem im Gleichgewicht zu halten. So ist es möglich, neue Lasten ins Elektrizitätssystem aufzu-

nehmen, ohne das Verteilnetz ausbauen zu müssen.

B9 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die kurzfristige Interaktionen zwischen den verschiebbaren Lasten und der Auslastung der Verteilnetzkapazität erfasst. Sie umfasst den Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“. B9 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B10 – Ausbau dezentraler stochastischer Energiequellen durch grüne elektrische Energie:

Pfad B10: el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen → angebotene grüne el. Energie → Verhältnis von nachgefragter zu angebotener grüner Energie → Förderung erneuerbarer Energien → Anteil Zubau dezentrale stochastische Energiequellen → el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen

Um das Ziel, den Anteil der dezentralen elektrischen Energieproduktion in der Schweiz zu erhöhen, wird von einer nachfragegesteuerten Lösung ausgegangen. Das bedeutet, dass bei zunehmender Liberalisierung grüne elektrische Energie vermehrt nachgefragt und so der Anteil an dezentraler Produktion ansteigen wird. Ist die Nachfrage jedoch nicht vorhanden, wird ein zusätzliches Förderinstrument eingesetzt (R1). Ist die Nachfrage nach grüner elektrischer Energie höher als das Angebot, wird durch einen Förderbeitrag der Zubau von dezentralen, stochastischen Energiequellen gefördert. Diese dezentralen, stochastischen Quellen müssen wieder ins Verteilnetz integriert werden und erhöhen so die benötigte Verteilnetzkapazität.

B10 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die mittelfristige Interaktionen zwischen der Nachfrage nach grüner elektrischer Energie und dem Angebot an dezentraler, stochastischer Energie erfasst. Sie umfasst die Sektoren „Smart-Grid-Angebot“ und „Smart-Market-Angebot“. B10 beeinflusst direkt die Zielgrösse „Anteil dezentrale Produktion“.

R1 – Kostenfalle verschiebbare Lasten:

Pfad R1: Strompreis Endkunde → Anteil verschiebbare Lasten → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde

Ein hoher Strompreis fördert den Ausbau und den Anteil verschiebbarer Lasten, da man bei diesen von geringeren Strompreisen (z. B. in der Nacht) profitieren kann. Die Neuanschaffungen und die Kosten für die benötigten aktiven Steuerungselemente verursachen Kosten, die auf das Verteilnetz angerechnet werden. Steigen die Kosten für das Verteilnetz, erhöht sich der Strompreis. Die Kernmechanik ist selbstverstärkend; ein hoher Strompreis fördert den Anteil verschiebbarer Lasten, dieser erhöht die Kosten für das Verteilnetz, die ihrerseits den Strompreis erhöhen. Abgeschwächt wird dieser Kosteneffekt durch die Kernmechanik B8, da durch den höheren Anteil verschiebbarer Lasten die benötigte Verteilnetzkapazität abnimmt.

R1 ist eine selbstverstärkende Kernmechanik, die eher kurzfristige Interaktionen zwischen dem Anteil verschiebbarer Lasten und dem Strompreis erfasst. Sie umfasst die Sektoren „Smart-Grid-Nachfrage“ und „Smart-Market-Nachfrage“. R1 beeinflusst indirekt die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

R2 – Umverteilung der Netzkosten:

Pfad R2: Strompreis Endkunde → Anteil Selbstversorger → Kosten Verteilnetz → Strompreis Endkunde

Ein hoher Strompreis führt dazu, dass Endkunden vermehrt in die Selbstversorgung gehen und sich so der Anteil der Selbstversorger im Vergleich zu den Versorgern ohne eigene dezentrale stochastische Energiequellen erhöht. Die kleiner werdende Gruppe der Kunden ohne eigene Versorgung muss dann einen immer grösser werdenden Teil der Verteilnetzkosten tragen, da die höheren Kosten für das Verteilnetz den Strompreis erhöhen. Es kommt zu einem selbstverstärkenden Regelkreis, da die höheren Strompreise dazu führen, dass weitere Kunden in die Eigenversorgung gehen.

R2 ist eine selbstverstärkende Kernmechanik, die mittel- bis langfristige Effekte eines hohen Strompreises auf den Anteil der Selbstversorger berücksichtigt. Sie umfasst die Sektoren „Smart-Market-Nachfrage“ und „Smart-Grid-Nachfrage“. R2 beeinflusst indirekt die Zielgrösse „Anteil dezentrale Produktion“.

3.3 Modellgrenzen

Die zur Gestaltung des kSMM notwendigen Systemgrenzen wurden während des Erstellungsprozesses expliziert. Modellgrenzen definieren, welche Variable im Modell selbst bestimmt werden (endogene Variable), welche von aussen beeinflusst werden (exogene Variable) und welche nicht im Modell enthalten sind (Tabelle 3-2).

Modell-sektor	Endogene Variablen	Exogene Variablen	im aktuellen Modell ausgeschlossen
Smart Grid	• Verteilnetz-kapazität • el. Leistung von Lasten • el. Leistung von Energiequellen • Verschiebung von Lasten	• Zubau aktiver Steuerungs-elemente, Quellen und Lasten • Leistung von Energie-speichern	• passive Steuerungs-elemente • Übertragungs-netzebene • keine Unterscheidung zwischen zentralen und dezentralen Lasten • Stromrichtung • E-Fahrzeuge als Speicher • regionale Differenzierung • Bilanzgruppen • Gleichzeitigkeitsfaktor[10]
Smart Market	• Preis für Energie Endkunde • Grosshandelspreis • Gesamtnachfrage durch Lasten • Angebot el. Energie • CO_2-Emissionen im System • tatsächliche übertragene Energie mittels Verteilnetz	• Ausfall stochastischer Energiequellen	• kurzfristige Last-verschiebungen • Stromanbieterwechsel • Regelenergie • Regelpooling • regionale Differenzierung • Differenzierung zwischen Haushalten und Unternehmen • Systemdienst-leistungen • Produktionskosten • CO_2-Emissionen der Energiequellen

Tabelle 3-2: Modellgrenzen des kSMM

10 Bei allen elektrischen Leistungen ist der Gleichzeitigkeitsfaktor zu berücksichtigen, d. h., die Peakleistungen der einzelnen Verbraucher und Quellen werden nicht zusammengezählt, sondern es werden erfahrungsbasierte Annahmen verwendet, um die Gleichzeitigkeit der Einschaltung von Lasten und Quellen zu erfassen.

4 Interventionsmöglichkeiten

Eine Interventionsmöglichkeit bezeichnet die generelle Möglichkeit von Systemakteuren, den Wert einer Variablen zu verändern bzw. eine Entscheidungsregel neu zu definieren oder eine bestehende Entscheidungsregel zu verändern. Interventionsmöglichkeiten sind nicht gleichzusetzen mit Handlungsempfehlungen. Letztere sind durch Systemakteure unterstützte Interventionsmöglichkeiten und werden in Kapitel 5 dargestellt.

Jede Interventionsmöglichkeit besteht aus einer Grundlogik, die den Ansatz der Intervention erklärt. Das umfasst die Rahmenbedingungen und Grundlagen der Intervention. Die Wirkung beschreibt dann die Auswirkungen der Interventionsmöglichkeit im kSMM. Dazu gehört der Einfluss auf die Kernmechaniken und die Zielgrössen.

Interventionsmöglichkeiten können entweder die Form einer **Parameterintervention** (Veränderung des Werts einer Variablen) oder einer **Strukturintervention** (Veränderung eines bestehenden kausalen Zusammenhangs oder Neuerstellung eines kausalen Zusammenhangs) annehmen.

Ein Beispiel für eine Parameterintervention: Die Förderung erneuerbarer Energien ist eine Parameterintervention. Sie hat einen konkreten Wert, in Form einer Vergütung. Wenn der Förderbeitrag erhöht wird, erhöht sich die durch finanzielle Instrumente geförderte Motivation, in erneuerbare Energien zu investieren. Wenn der Förderbeitrag reduziert wird, nimmt auch die Motivation in erneuerbare Energien zu investieren entsprechend ab.

Ein Beispiel für eine Strukturintervention: Die kausale Verbindung zwischen aktiven Steuerungselementen für Lasten und dem Anteil verschiebbarer Lasten ist eine Strukturintervention. Es besteht eine direkte und nun neue kausale Verbindung zwischen aktiven Steuerungselementen für Lasten und der Anzahl verschiebbarer Lasten im Elektrizitätssystem.

Abbildung 4-1 zeigt mittels dem kSMM generierte Interventionsmöglichkeiten in einer Übersicht, welche ebenfalls die vier Sektoren darstellt. Es gibt Interventionen in den Sektoren „Smart-Grid-Angebot“, „Smart-Grid-Nachfrage“, „Smart-Market-Angebot“ und „Smart-Market-Nachfrage“. Die Liste ist nicht abschliessend, weitere Interventionen sind zukünftig vorstellbar. Die Abkürzungen der Interventionsmöglichkeiten zeigen an, welchem Sektor die Interventionen primär zuzuordnen sind. Zum Beispiel: SG-N1 ist eine Intervention, die auf die Nachfrage im Smart Grid wirkt. In den Abbildungen 4-2 ff. sind die Sektoren grau eingefärbt, in denen die Interventionen vorgenommen wurden.

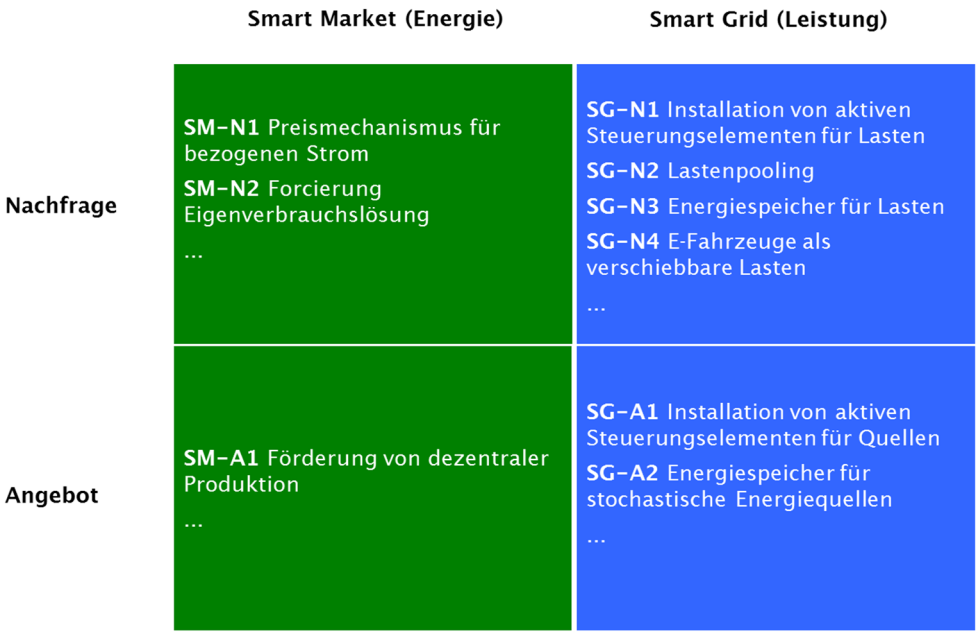


Abbildung 4-1: Übersicht zu den Interventionsmöglichkeiten

4.1 Interventionsmöglichkeit im Sektor „Smart-Grid-Nachfrage“

Interventionsmöglichkeit SG-N1: Installation von aktiven Steuerungselementen für Lasten

Beschreibung: Aktive Steuerungselemente für Lasten ermöglichen potenziell verschiebbaren Lasten ein Upgrade zu verschiebbaren Lasten. Sie ermöglichen die Lastverschiebung, verursachen aber gleichzeitig Kosten durch die Installation, Inbetriebnahme und Wartung.

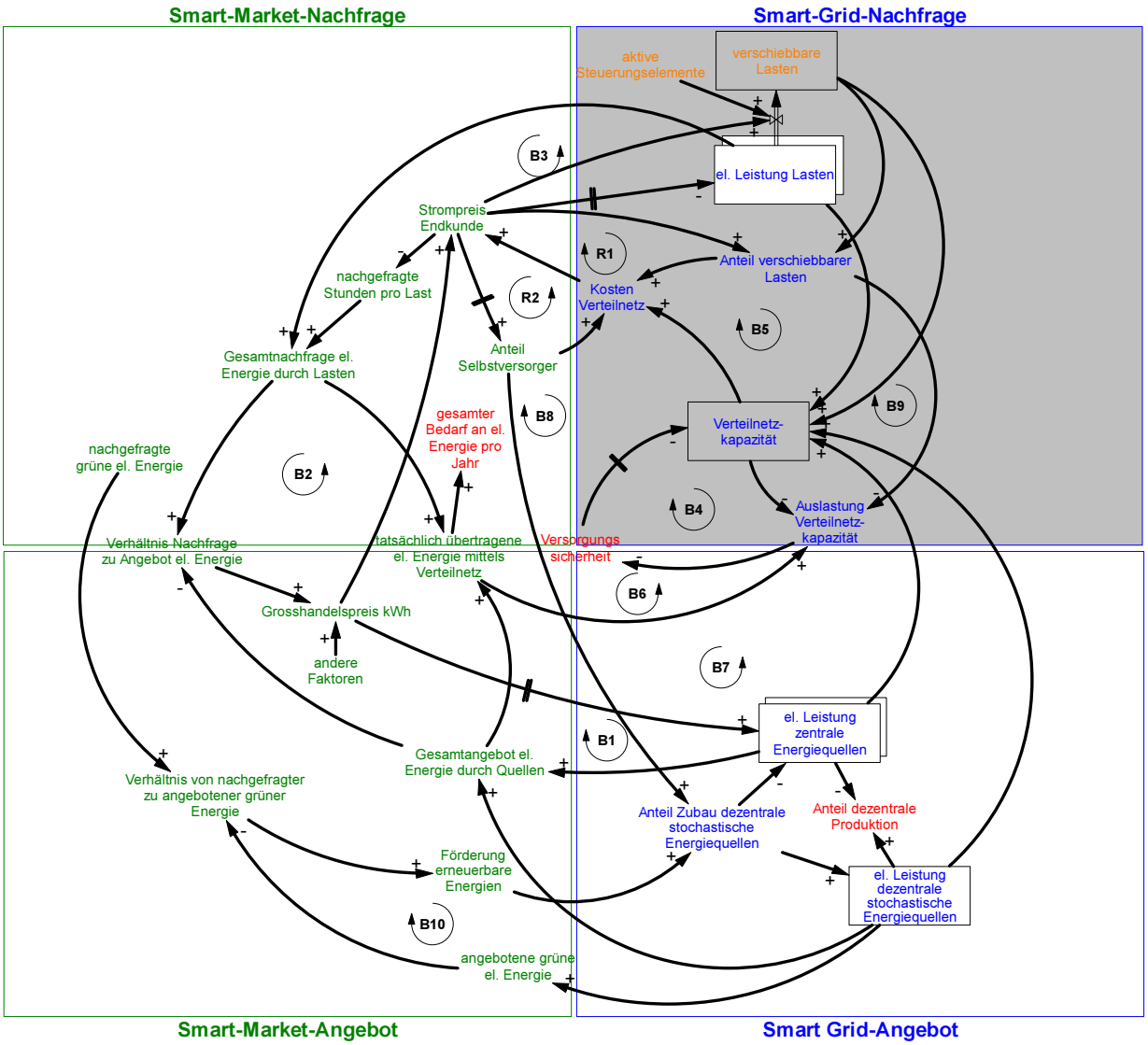


Abbildung 4-2: Intervention SG-N1[11]

Wirkung: Der aktuell eher geringe Anteil verschiebbarer Lasten kann durch den Ausbau aktiver Steuerungselemente erhöht werden. Der Vorteil der Steuerungselemente ist, dass potenziell verschiebbare Lasten dann tatsächlich zeitlich verschoben werden können. Erst der flächendeckende Einsatz aktiver Steuerungselemente ermöglicht die Verschiebung der Nachfrage um einige Stunden, reduziert dadurch die benötigte Spitzenleistung des Verteilnetzes und erhöht damit die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“ (B9). Bereits eine regional begrenzte Installationsstrategie kann mittels des Strompreises zu einer weiteren Verbreitung

[11] Variablen-Legende: blau = Smart Grid, grün = Smart Market; rot = Zielgrössen (Kapitel 2); orange = Intervention (Kapitel 4). Diese Legende gilt ebenfalls für die folgenden Abbildungen und wird somit nicht mehr dargestellt. Grau eingefärbte Sektoren zeigen, wo im System die Intervention erfolgt.

von verschiebbaren Lasten führen (R1). Die Verteilnetzkosten nehmen aufgrund der Inbetriebnahme- und Wartungskosten zwar kurzfristig zu, können jedoch aufgrund geringer benötigter Investitionen ins Verteilnetz (B9) auch relativ betrachtet reduziert werden.

Interventionsmöglichkeit SG-N2: Lastenpooling

Beschreibung: Die Nachfrage nach elektrischer Energie kann beeinflusst werden. Eine Möglichkeit ist es, finanzielle Anreize zu schaffen, z. B. günstigere Strompreise für ein Lastenpooling. Ein Pooling von verschiebbaren Lasten kann von den EVU oder sonstigen Akteuren im Elektrizitätsmarkt eingesetzt werden, um Marktsituationen zu nutzen bzw. Impulse in den Markt einzubringen.

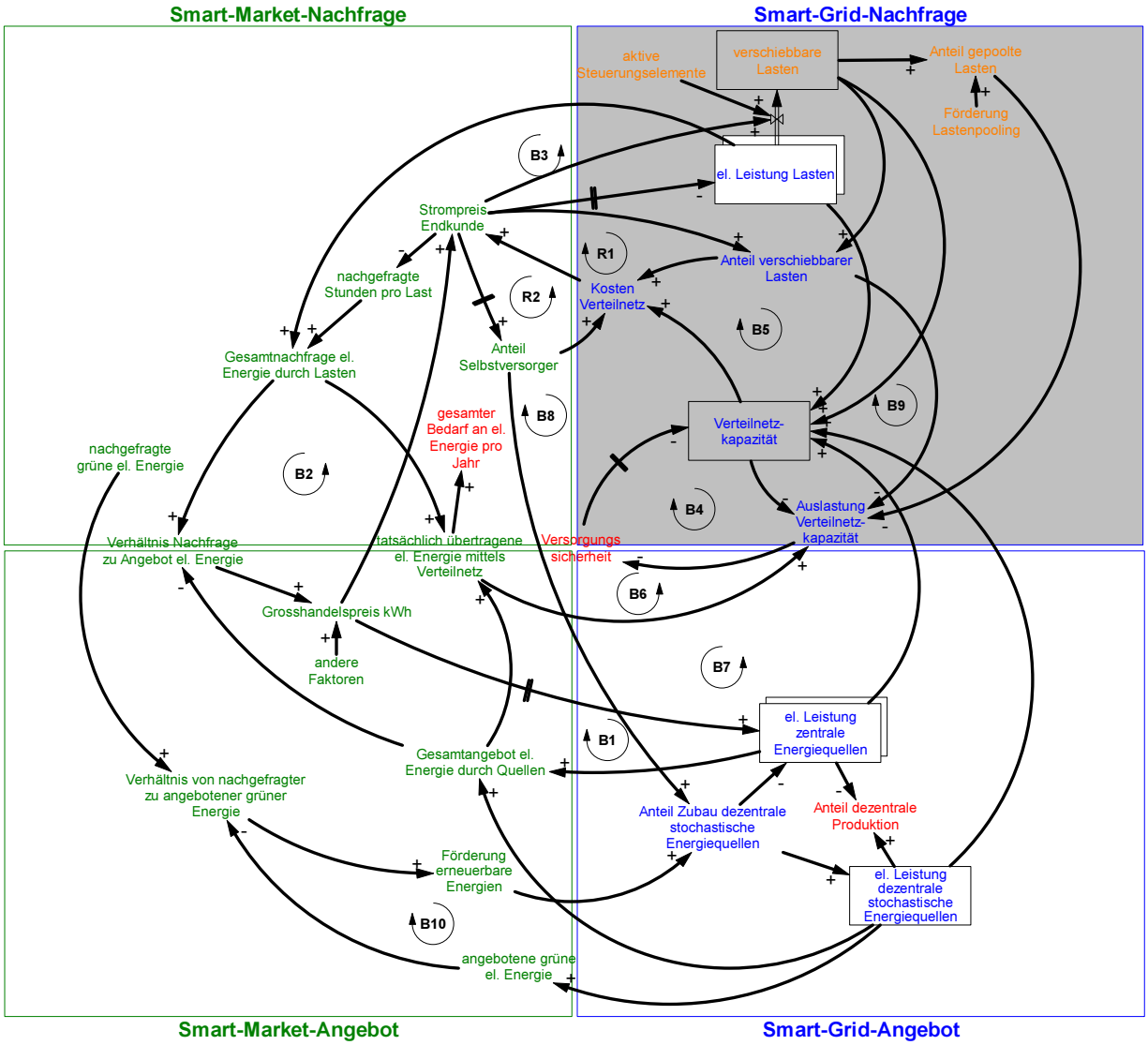


Abbildung 4-3: Intervention SG-N2

Wirkung: Das Pooling von verschiebbaren Lasten kann bei netzoptimierter Steuerung zu einer weiteren Entlastung des Verteilnetzsystems und einer Erhöhung der Versorgungssicherheit beitragen. Um verschiebbare Lasten zu bündeln, werden Anreize und die entsprechenden Rahmenbedingungen (z. B. Zusatzdienstleistungen oder Reduktion des Strompreises für teilnehmende Endkunden) benötigt. Verschiebbare Lasten können bereits durch die Verbreitung aktiver Steuerungselemente (SG-N1) den Bedarf von Verteilnetzkapazität bei Lastspitzen reduzieren (B4). Durch Lastenpooling ist es möglich, eine grössere Anzahl an Lasten zentral durch EVU oder andere Akteure koordiniert zu steuern. Das führt zu einer höchst möglichen Ausnutzung der Lastenflexibilität. Durch eine auf das örtliche Verteilnetz optimierte Bündelung von Lasten kann die Auslastung des Verteilnetzes reduziert werden und damit die Zielgrösse Versorgungssicherheit erhöht werden. Die Kausalität zwischen „Anteil gepoolte Lasten“ und „Auslastung Verteilnetzkapazität“ kann je nach Implementierung des Poolings auf zwei Arten ausfallen. Die erste Möglichkeit ist, dass ein höherer Anteil gepoolter Lasten zu einer geringeren Auslastung der Verteilnetzkapazität führt; dies ist eine kausale Beziehung von (-). Die zweite Möglichkeit ist, dass ein höherer Anteil gepoolter Lasten zu einer höheren Auslastung der Verteilnetzkapazität führt; dies ist eine kausale Beziehung von (+). Da es beide Wirkungsrichtungen gibt, muss dies bei der Implementierung beachtet werden.

Interventionsmöglichkeit SG-N3: Energiespeicher für Lasten

Beschreibung: Nicht verschiebbare Lasten können nicht verschoben werden. Eine Nachfrage nach elektrischer Energie durch nicht verschiebbare Lasten muss sofort und kontinuierlich bedient werden. Mit Hilfe der Installation von lokalen Energiespeichern lässt sich eine nicht verschiebbare Last flexibilisieren. Kurzfristig lassen sich so Speicher nutzen, um den Energiebedarf für eine nichtverschiebbare Last zu liefern. Dadurch wird eine nichtverschiebbare Last zu einer verschiebbaren Last.

Wirkung: Energiespeicher können kurzfristig eine Last mit elektrischer Energie versorgen, da sie geladen werden, wenn die nicht verschiebbare Last elektrische Energie nachfragt. Ist ein Speicher geladen und das Energieangebot kleiner als die Energienachfrage, können die Speicher für eine relativ kurze Zeit die Last mit elektrischer Energie versorgen. Ziel der Energiespeicher für Lasten ist nicht die Rückspeisung der elektrischen Energie in das Verteilnetz, sondern eine Entlastung des Stromnetzes und dadurch eine Erhöhung der Zielgrösse Versorgungssicherheit. Dies geschieht über eine Reduktion der tatsächlich übertragenen elektrischen Energie mittels Verteilnetz. Dadurch kann zunächst die Auslastung der Verteilnetzkapazität reduziert werden, die dann zu einer höheren Versorgungssicherheit und zu einer Reduktion der neu benötigten Verteilnetzkapazität führen (B4).

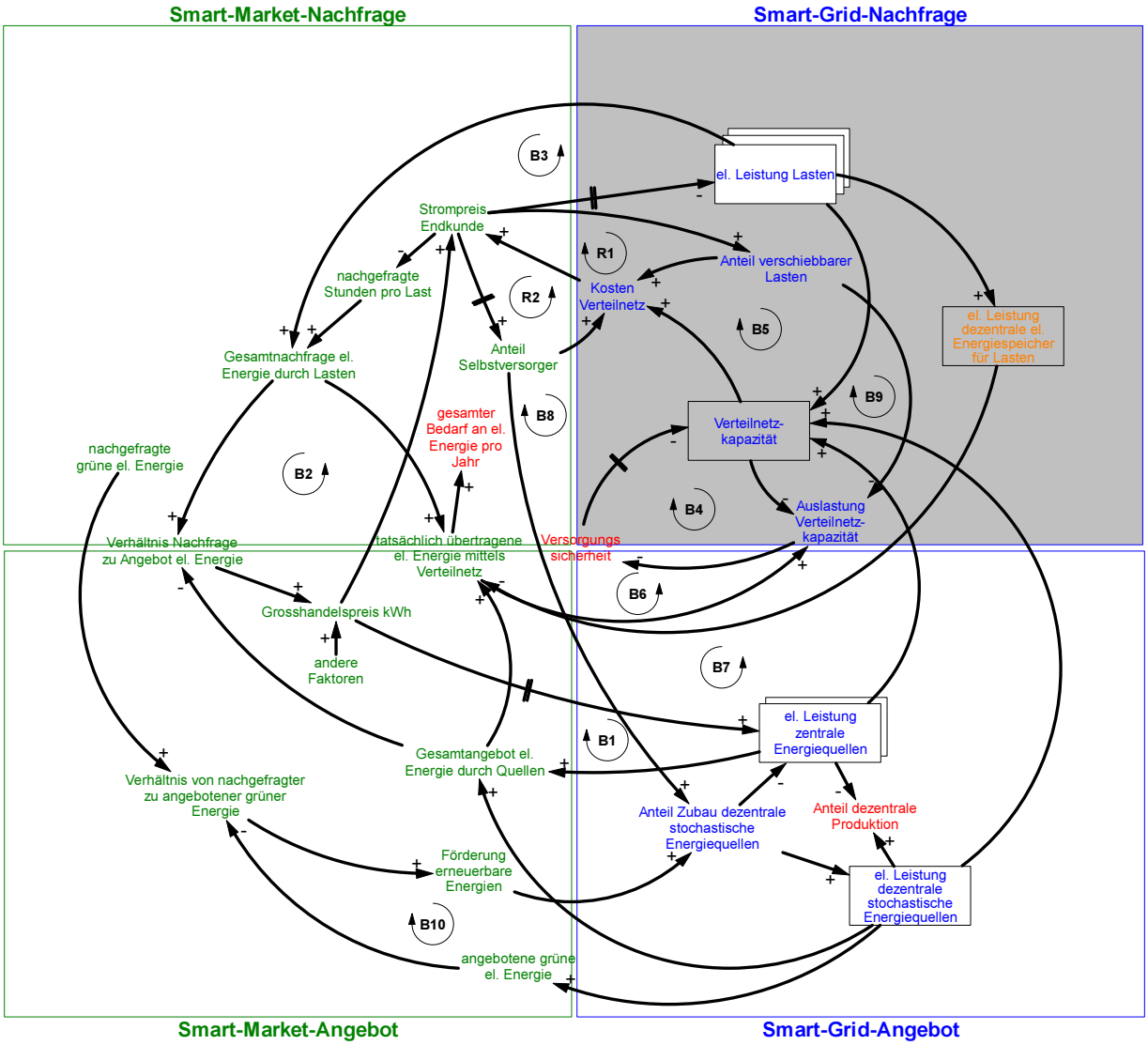


Abbildung 4-4: Intervention SG-N3

Interventionsmöglichkeit SG-N4: E-Fahrzeuge als verschiebbare Lasten

Beschreibung: Die Dichte an E-Fahrzeugen in der Schweiz wird auch in der Zukunft zunehmen. Dafür sprechen die verbesserten Reichweiten und die zunehmende Anzahl von Modellen in der Serienproduktion. Es stellt sich die Frage, als welche Art von Lasten die E-Fahrzeuge ins Elektrizitätssystem eingehen.

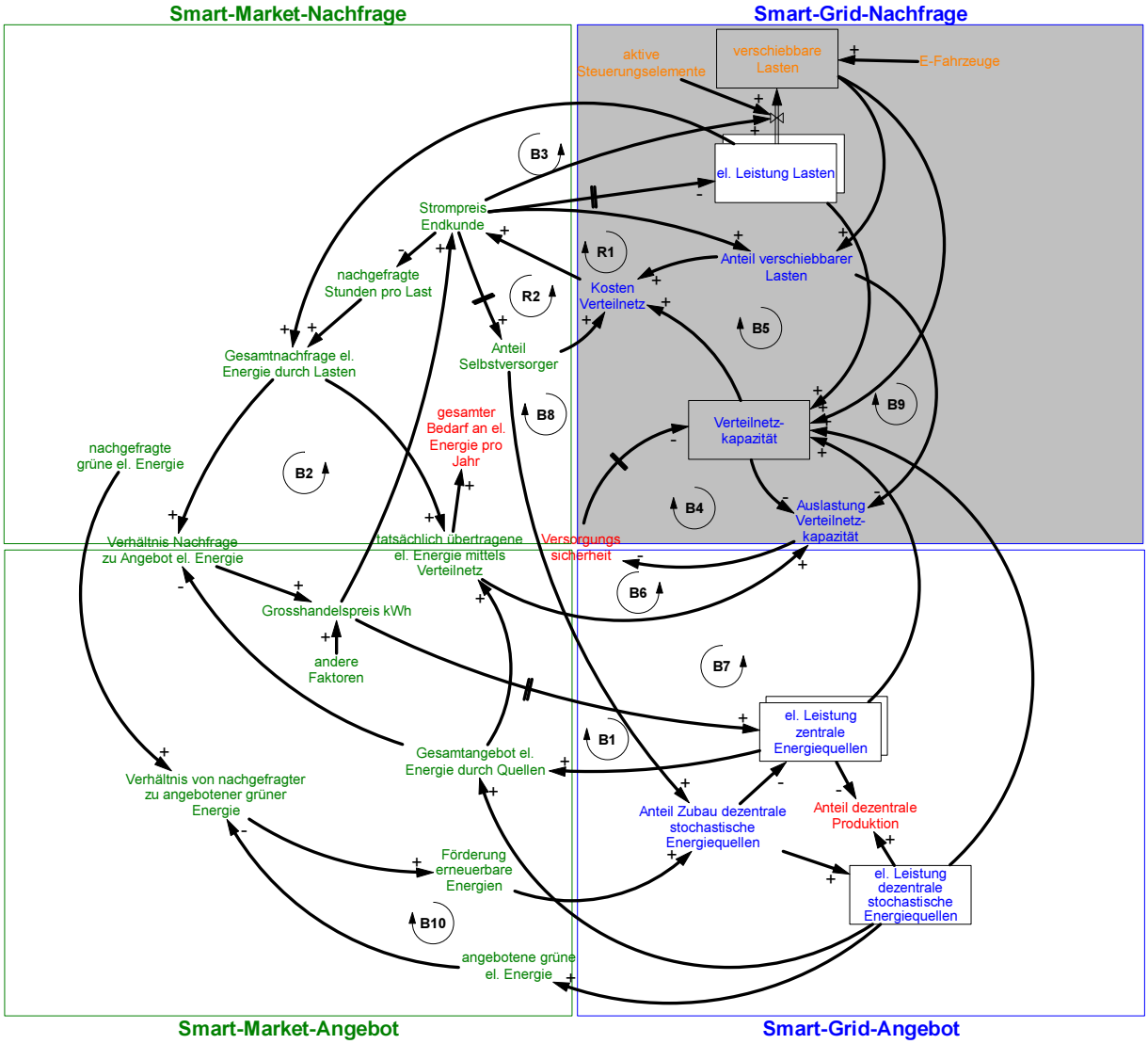


Abbildung 4-5: Intervention SG-N4

Wirkung: E-Fahrzeuge können als potenziell verschiebbare Lasten oder tatsächlich verschiebbare Lasten ein Teil des Elektrizitätssystems werden. Sie erhöhen die Nachfrage nach Leistung. Als tatsächlich verschiebbare Lasten kann ihre Nachfrage durch Akteure zielgerichtet gesteuert werden. In Zeiten hoher Nachfrage nach elektrischer Energie können der Markt und das Verteilnetz so entlastet werden. Wenn das Angebot an elektrischer Energie niedriger ist als die Nachfrage wird ein Signal gesendet, dass zur Ladung angeschlossene E-Fahrzeuge gezielt vom Netz entkoppelt. Dies geschieht technisch über Steuerungselemente in der Anschlussinfrastruktur. Die Auslastung der Verteilnetzkapazität wird reduziert und somit entlastet, die Zielgrösse Versorgungssicherheit erhöht (B4). Bleiben E-Fahrzeuge dagegen auf der Stufe der potenziell verschiebbaren Lasten, können sie nicht gesteuert werden. Die entlastende Wirkung bei der Nachfrage nach elektrischer Energie kann nicht realisiert werden.

Die Auslastung der Verteilnetzkapazität steigt dann an, die Versorgungssicherheit kann beeinflusst werden (B4).

4.2 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Grid-Angebot“

Interventionsmöglichkeit SG-A1: Installation von aktiven Steuerungselementen für dezentrale, stochastische Quellen

Beschreibung: Stochastische, dezentrale Energiequellen erzeugen elektrische Energie, die entweder dezentral genutzt werden kann oder ins Verteilnetz eingespeist wird. Aktive Steuerungselemente für Energiequellen ermöglichen die Steuerung der stochastisch, dezentralen Energiequellen im System. Diese können ab- und zugeschaltet werden, wenn es notwendig ist, Überlasten zu vermeiden.

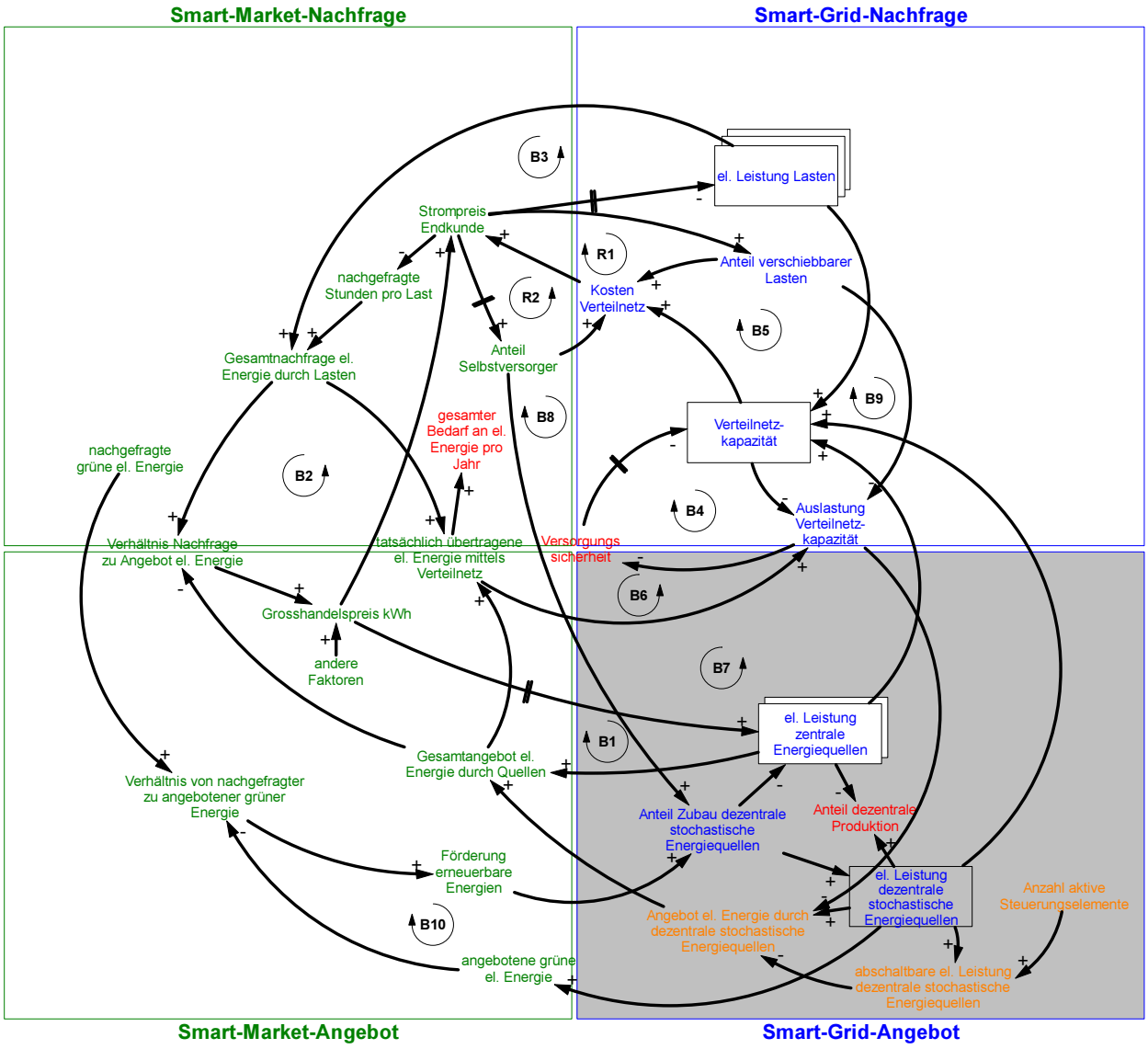


Abbildung 4-6: Intervention SG-A1

Wirkung: Durch die Installation von aktiven Steuerungselementen für Energiequellen reduziert sich der Anteil an Energie aus stochastisch, dezentralen Energiequellen, da diese im Überlastfall abgeregelt werden (Abb. 4-6). Diese Intervention wirkt kurzfristig, dadurch geht der Anteil zur Verfügung stehender dezentraler Energie im Fall von hoher Verteilnetzauslastung zurück. Gleichzeitig wird das Verteilnetz zur Spitzenzeit weniger ausgelastet und damit weiterhin eine hohe Versorgungssicherheit sichergestellt (B4).

Interventionsmöglichkeit SG-A2: Energiespeicher für stochastische Energiequellen

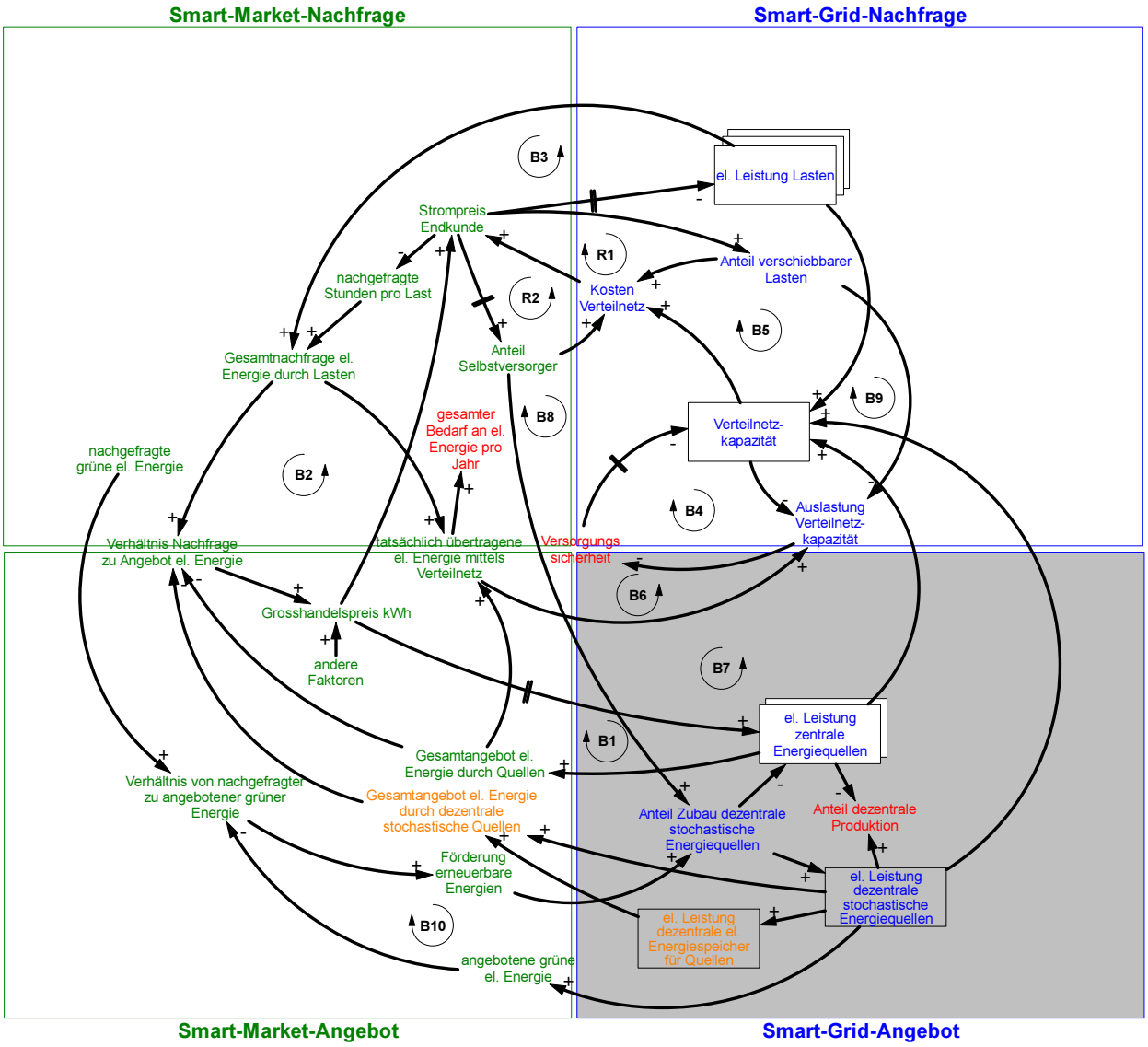


Abbildung 4-7: Intervention SG-A2

Beschreibung: Die Verfügbarkeit von stochastischen Energiequellen zur Bedarfsdeckung ist von vielen Faktoren abhängig, unter anderem dem Wetter. Durch Speicher können Erzeugungsspitzen genutzt und die Speicher geladen werden. In Zeiten geringerer Verfügbarkeit von erzeugter Energie kann die gespeicherte Energie dem Verteilnetz dann zugeführt werden.

Wirkung: Energiespeicher für stochastische Energiequellen ermöglichen es, stochastische Energiequellen beeinflussbar zu machen. Sie werden von Umweltbedingungen (z. B. Wetter) unabhängiger. Gleichzeitig erhöht sich der Eigenversorgungsgrad durch elektrische Energie, da die Energie aus stochastischen, dezentralen Quellen aufgrund der nun geringeren Abhängigkeit von Umweltbedingungen auch in Zeiten genutzt werden, in denen die Energie nicht direkt erzeugt wird. Das Verteilnetz kann zudem zusätzlich entlastet werden, wenn die elektrische Energie aus den Energiespeichern nicht ins Verteilnetz eingespeist wird (in Abbildung 4-7 symbolisiert durch den fehlenden Pfeil zwischen elektrischer Leistung dezentraler elektrischer Energiespeicher für Quellen und Verteilnetzkapazität), sondern direkt dort verbraucht wird, wo sie erzeugt wird. Gleichzeitig wird die tatsächlich übertragene elektrische Energie mittels Verteilnetz reduziert. Dies reduziert die Auslastung der Verteilnetzkapazität und erhöht die Zielgrösse Versorgungssicherheit (B4).

4.3 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Market-Nachfrage“

Interventionsmöglichkeit SM-N1: Preismechanismus für bezogenen Strom

Beschreibung: Ein Ziel der Energiestrategie 2050 ist die Reduzierung des durchschnittlichen Energieverbrauchs pro Person. Eine Möglichkeit, auf den Energieverbrauch Einfluss zu nehmen, ist der Energiepreis für Endkunden. Möglich wäre z. B. eine progressive Preisgestaltung für elektrische Energie, die sich in ihrer Höhe nach dem Gesamtbedarf an elektrischer Energie richtet. Andere Formen sind denkbar.

Wirkung: Ein zusätzlicher Preismechanismus (B11) würde dafür sorgen, dass Endkunden ihren Energieverbrauch optimieren, indem sie z. B. alte nichtverschiebbare Lasten durch neue, energieeffizientere und verschiebbare Lasten ersetzen (R1), was insgesamt zu einer Entlastung der Verteilnetze führen kann (B9). Dadurch erhöht sich insgesamt die Versorgungssicherheit. Ein höherer Strompreis würde zudem die Nachfrage reduzieren (B2), wodurch die Zielgrösse gesamter Bedarf an elektrischer Energie reduziert und auch weniger in zentrale Energiequellen investiert wird (B1). Dies erhöht die Zielgrösse „Anteil dezentrale Produktion“.

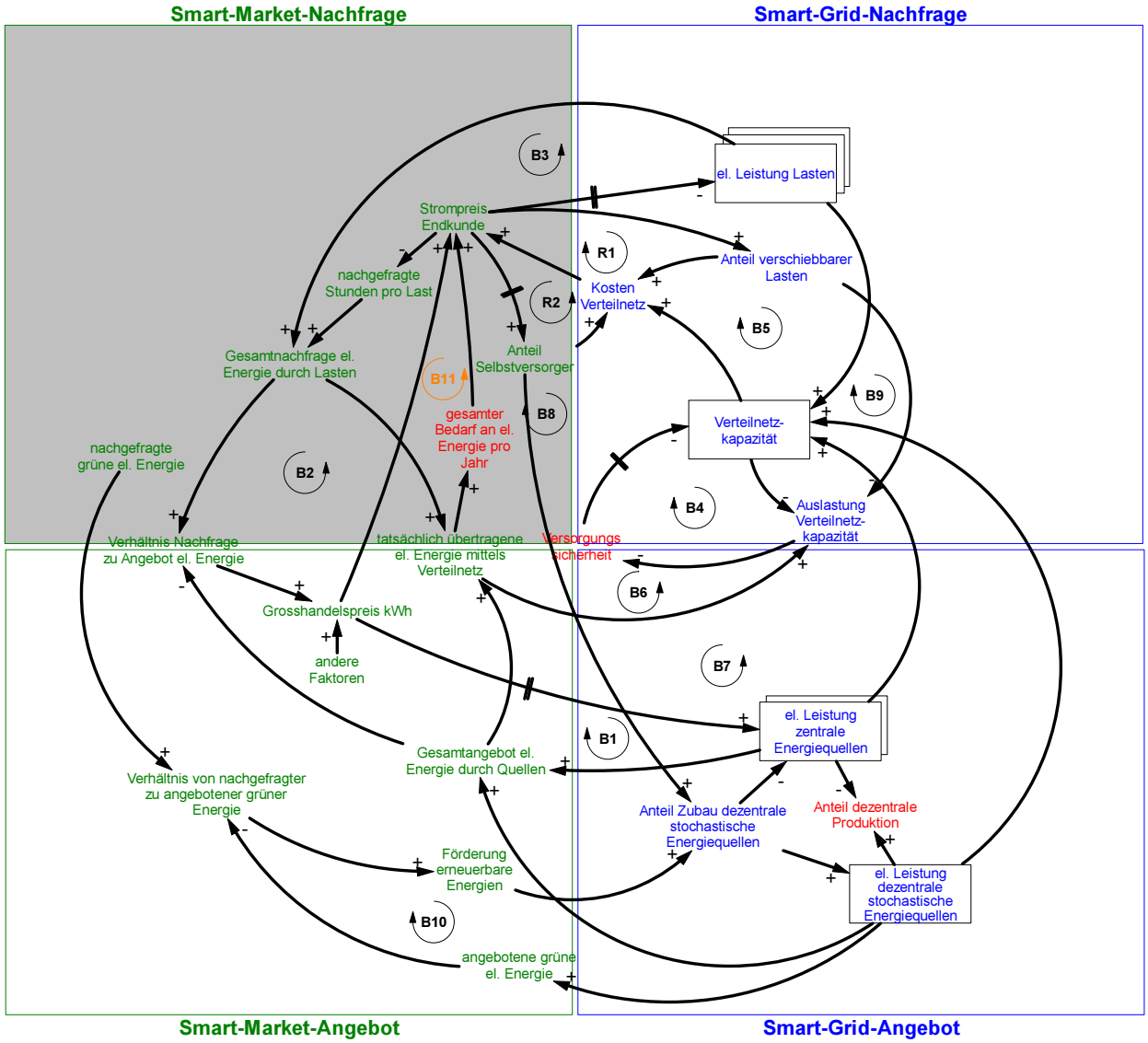


Abbildung 4-8: Intervention SM-N1

Interventionsmöglichkeit SM-N2: Forcierung Eigenverbrauchslösung

Beschreibung: Entkoppelt man den Strompreis für den Bezug von elektrischer Energie aus dezentralen stochastischen Energiequellen vom normalen Strompreis für Endkunden, lassen sich Energie-Eigenverbrauchslösungen forcieren. Das bedeutet, dass Kunden den Strom, den sie dezentral erzeugen, für den eigenen Verbrauch nutzen und so in diesem Szenario nicht mehr auf das Verteilnetz angewiesen sind.

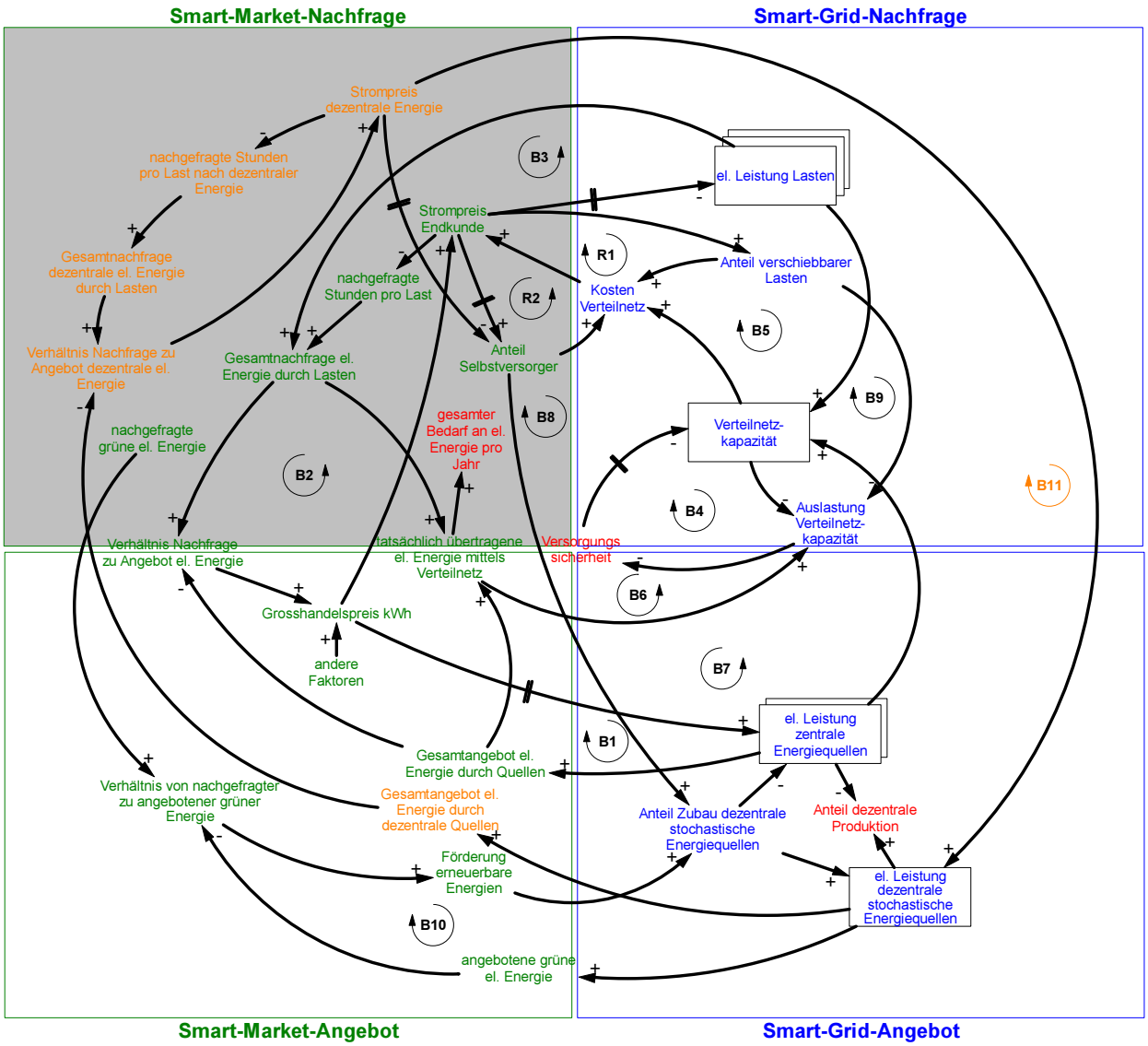


Abbildung 4-9: Intervention SM-N2

Wirkung: Ein günstigerer Preis für dezentrale Energie erhöht den Bedarf an dezentraler elektrischer Energie im Vergleich zu elektrischer Energie aus zentralen Energiequellen. So kann zusätzlich der Ausbau dezentraler Energiequellen gefördert werden (B11), wodurch sich die Zielgrösse „Anteil der dezentralen Produktion“ erhöht. Insgesamt senkt ein starker Ausbau der dezentralen, stochastischen Energiequellen die über die Verteilnetze zu übertragende elektrische Energie im System. Die Annahme ist, dass die Eigenverbrauchslösungen so ausgestaltet sind, dass keine dezentral stochastische elektrische Energie in das Verteilnetz zurückgespeist wird. Abbildung 4-9 zeigt dies durch den fehlenden Pfeil zwischen elektrischer Leistung dezentraler stochastischer Energiequellen und Verteilnetzkapazität. Das senkt die Investitionen in neue Verteilnetzkapazität (B4) und senkt dadurch die Verteilnetzkosten. Zusätzlich kann ein günstigerer Preis für dezentrale elektrsiche Energiekunden dazu bewegen, in Selbstversorgung zu investieren.

4.4 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart-Market-Angebot“

Interventionsmöglichkeit SM-A1: Förderung von dezentraler Produktion

Beschreibung: Das Angebot an elektrischer Energie kann durch dezentrale Erzeugungsanlagen erhöht werden. Dazu eignen sich Eigenverbrauchslösungen, Förderbeträge, Lenkungsmechanismen und Einmalvergütungen oder auch die Vereinfachung von Bewilligungsverfahren.

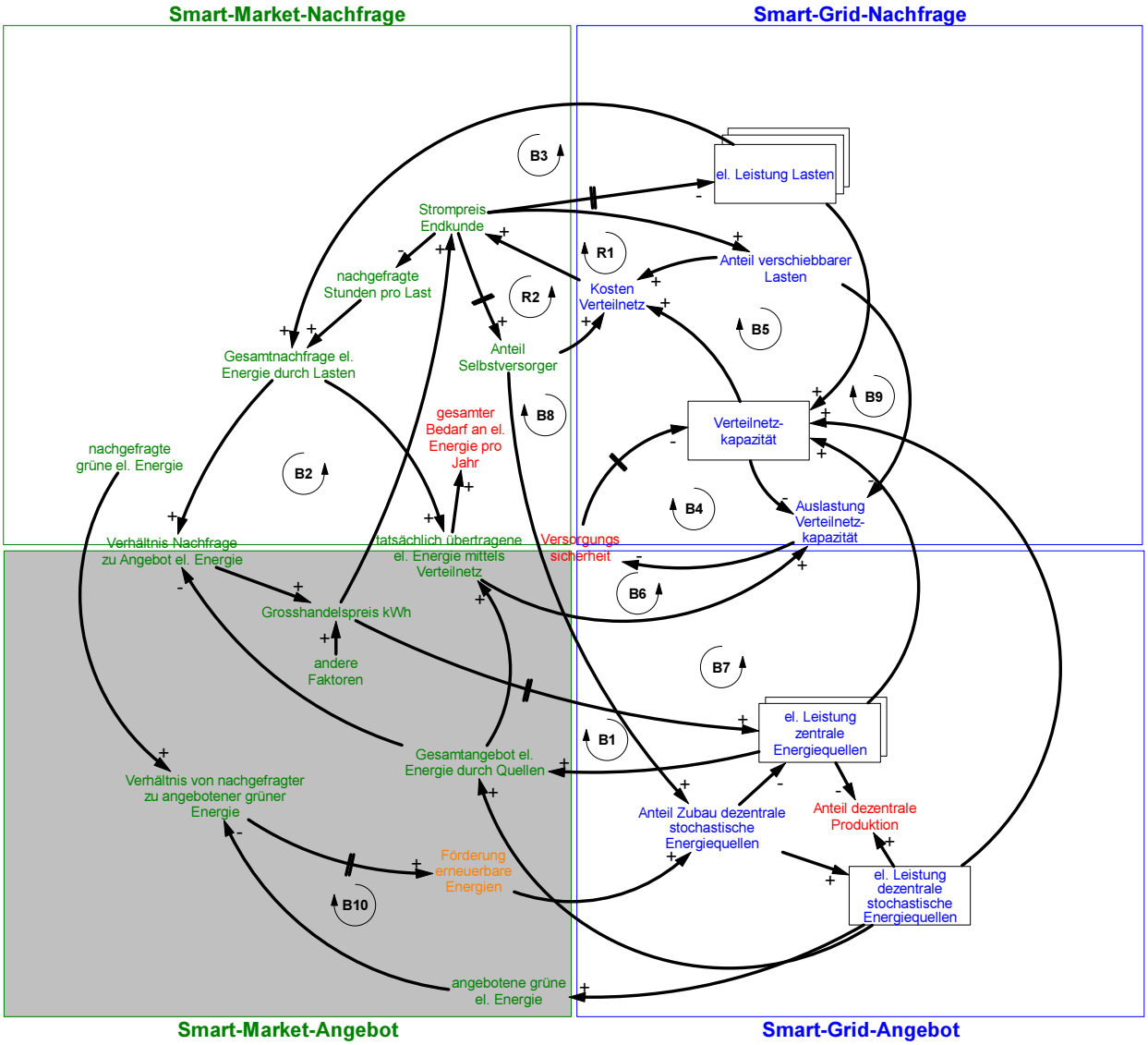


Abbildung 4-10: Intervention SM-A1

Wirkung: Die Förderung erneuerbarer Energien bewirkt einen verstärkten Zubau der elektrischen Leistung dezentraler stochastischer Energiequellen. Das Verhalten der wichtigen Zielgrösse „dezentrale Produktion“ kann somit erreicht werden. Gleichzeitig erhöht sich das Angebot an elektrischer Energie aus dezentralen stochastischen Energiequellen (B9). Der Abgleich von Angebot und Nachfrage hat eine Verzögerung. Wenn Angebot und Nachfrage nach grüner elektrischer Energie gleich sind, kann der Förderungsbeitrag wieder reduziert werden. Es ist zu beachten, dass dieser Abgleich nicht sofort vollzogen wird, sondern es hier zu Verzögerungen kommt.

5 Fazit und Ausblick

5.1 Fazit

Kapitel 4 beschreibt einige Interventionsmöglichkeiten. Diese basieren auf den im Abschnitt 3.2 identifizierten Kernmechaniken. Einige der aufgeführten Interventionsmöglichkeiten sind wichtig und bereits bekannt:

- Einsatz von Speicher zur Flexibilisierung von Quellen und Lasten
- Steuerung von Produktion und Lasten
- Lastenpooling
- Eigenverbrauchslösung

Für diese Interventionsmöglichkeiten sollen konkrete Handlungsempfehlungen ausgearbeitet werden. Im Falle der Eigenverbrauchslösung wurde dies vom VSE bereits initiiert. Die anderen drei Interventionsmöglichkeiten sollen durch die Arbeitsgruppe detailliert werden.

Die Untersuchung der Interventionsmöglichkeiten im Hinblick auf konkrete Handlungsempfehlungen führte zu einer weiteren übergeordneten Erkenntnis: Die aktuelle Kopplung zwischen Markt und Netz ist asymmetrisch. **Insbesondere die Rückkopplung vom Netz zum Markt ist schwach ausgeprägt.** Diese Einsicht wurde durch das kSMM möglich (vgl. Abbildung5-1).

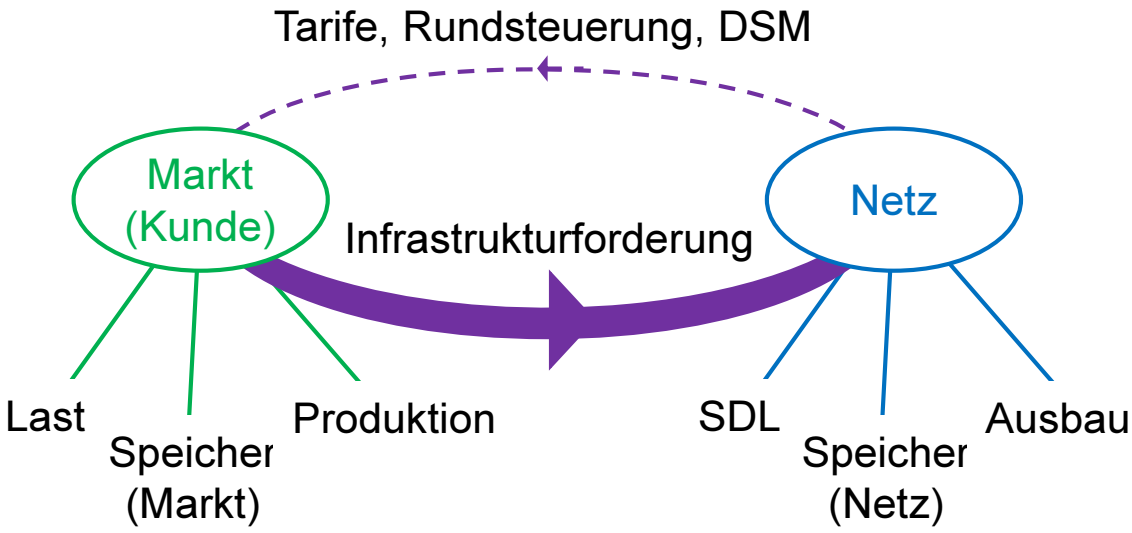


Abbildung 5-1: Illustration der asymmetrischen Kopplung zwischen Markt und Netz

Die Kopplung zwischen Elektrizitätsmarkt und Elektrizitätsnetz ist wichtig für die Stabilität im Elektrizitätsnetz, für den Ausgleich zwischen Netzinfrastruktur und deren Nutzung durch den Markt. Daraus leiten wir eine weitere Handlungsempfehlung ab. Es braucht smarte Lösungen, um die Rückkopplung vom Netz zum Markt zu verstärken. Beispiele dafür sind:

- marktbasierte Plangrössen für die langfristige Netzentwicklung
- Entsozialisierung der Netznutzungsengelte (z. B. abhängig vom Transportweg)
- dynamische, kapazitätsbasierte Netztarife inkl. zugehörigem Markt

Die hier aufgezeigten Resultate zeigen, dass eine systemdynamische Analyse sowohl relevante gesellschaftlich-wirtschaftliche als auch technische Faktoren betrachtet und somit ein integriertes Wirkungsverständnis erzeugt. Dadurch werden die Schwächen eines „technokratischen" Ansatzes reduziert.

5.2 Ausblick

Das Ziel des aktuellen Projekts war es, ein Verständnis für wichtige Zusammenhänge zwischen Smart Grid und Smart Market aufzuzeigen und Interventionsmöglichkeiten abzuleiten, die helfen, einen effizienten Smart Market im Schweizer Elektrizitätsmarkt zu ermöglichen. Dafür wurde ein qualitatives Kausalmodell, das kSMM, erstellt. Sowohl Interventionsmöglichkeiten und Handlungsempfehlungen bestehen vor dem Hintergrund und den Beschränkungen dieses kSMM. Insofern ist die Erarbeitung der kausalen Zusammenhänge im betrachteten „Schweizer Elektrizitätsmarkt“ ein erster Schritt in der Analyse des hochkomplexen Systems. Eine Erkenntnis dieses Projekts ist, dass die Verbindung von der Smart-Market-Seite zur Smart-Grid-Seite durch viele Kernmechaniken

relativ stark ausgeprägt ist. Die Rückkopplung von der Seite Smart Grid zum Smart Market ist relativ betrachtet dazu sehr schwach ausgeprägt. Anhand der Detailarbeit zur Erstellung des kSMM wurde diese Lücke identifiziert.

Wir empfehlen als nächste Massnahmen in der Arbeitsgruppe zu analysieren, wie diese Rückkopplung verstärkt werden kann. Um dies zu erreichen, geht es darum, marktbasierte Mechanismen zu eruieren, welche die Rückkopplung verbessern können. Der Nutzen einer verbesserten Interaktion zwischen der Netzebene und der Marktebene ist eine schnelle Anpassung der Netzebene an die Gegebenheiten der Marktebene und vice versa.

In einem ersten Schritt sind alle bereits bekannten sowie neuen Möglichkeiten zu erheben, diese Kopplung zu erreichen. Diese Möglichkeiten sind dann anhand von noch zu definierenden Kriterien zu priorisieren sowie auf deren Implementierbarkeit in der kurzen und/oder langen Frist zu prüfen. Ein Beispiel für eine solche Möglichkeit der stärkeren Kopplung von Netz und Markt wäre die Schaffung von dynamischen, kapazitätsbasierten Netztarifen und die Schaffung eines entsprechenden Marktes. Manche dieser eruierten Möglichkeiten könnten durch prototypische Simulationen dargestellt und daraus ihre Wirkung abgeleitet werden. Gleichzeitig empfehlen wir das kausale Smart-Market-Modell, um ausgewählte Möglichkeiten zu erweitern.

Zudem empfehlen wir, das bestehende kSMM zu einem quantitativen kSMM-Simulationsmodell auszuarbeiten, um das Verständnis für die Auswirkungen der bekannten Interventionsmöglichkeiten und der neuen Rückkopplungsmöglichkeiten zu vertiefen, diese quantitativ zu validieren und sie dadurch zu konkretisieren. Denn nur durch quantitative Aussagen sind robuste Empfehlungen mit einer argumentativen Tiefe möglich. Ein quantitatives Simulationsmodell ist für die Weiterentwicklung des Smart Markets Schweiz höchst zuträglich. Für diese Ausarbeitung sind die folgenden Aktionen notwendig:

1. Quantifizierung der Zielgrössen
2. Sukzessive Quantifizierung des kSMM in mehreren Entwicklungsstufen
3. Validierung der verschiedenen Entwicklungsstufen des quantitativen kSMM durch Experten sowie Verhaltensvalidierung anhand logischer und numerischer Tests (Expertenbefragung)
4. Review des Modells durch einen Expertenausschuss

Weitere Inhalte, welche in diesem Schritt in das kSMM aufgenommen werden sollten, sind Massnahmen, die speziell auf die Verbesserung der Energieeffizienz wirken.

VI Referenzen

[1] M. Ventosa, A. Baillo, A. Ramos, M. Rivier, Electricity market modeling trends, Energy Policy, 33 (2005), S. 897–913.

[2] M. Hasani, S.H. Hosseini, Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms, Energy, 36 (2011), S. 277–293.

[3] P. Ochoa, A. van Ackere, Policy changes and the dynamics of capacity expansion in the Swiss electricity market, Energy Policy, 37 (2009), S. 1983–1998.

[4] M. Filippini, Short- and long-run time-of-use price elasticities in Swiss residential electricity demand, Energy Policy, 39 (2011), S. 5811–5817.

[5] Y. K. Yang, Understanding household switching behavior in the retail electricity market, Energy Policy, 69 (2014), S. 406–414.

[6] J. Balaguer, Cross-border integration in the European electricity market. Evidence from the pricing behavior of Norwegian and Swiss exporters, Energy Policy, 39 (2011), S. 4703–4712.

[7] M. J. van Blijswijk, L. J. de Vries, Evaluating congestion management in the Dutch electricity transmission grid, Energy Policy, 51 (2012), S. 916–926.

[8] J. C. Richstein, E. J. L. Chappin, L. J. de Vries, Cross-border electricity market effects due to price caps in an emission trading system: An agent-based approach, Energy Policy, 71 (2014), S. 139–158.

[9] K. Schaber, F. Steinke, T. Hamacher, Transmission grid extensions for the integration of variable renewable energies in Europe: Who benefits where?, Energy Policy, 43 (2012), S. 123–135.

[10] S. Bigerna, C. A. Bollino, Electricity Demand in Wholesale Italian Market, Energ J, 35 (2014), S. 25–46.

[11] E. Lindström, F. Regland, Modeling extreme dependence between European electricity markets, Energy Economics, 34 (2012), S. 899–904.

[12] G. Castagneto-Gissey, M. Chavez, F. D. Fallani, Dynamic Granger-causal networks of electricity spot prices: A novel approach to market integration, Energy Economics, 44 (2014), S. 422–432.

[13] S. N. Tashpulatov, Estimating the volatility of electricity prices: The case of the England and Wales wholesale electricity market, Energy Policy, 60 (2013), S. 81–90.

[14] A. Ford, System Dynamics and the Electric Power Industry, System Dynamics

Review, 13 (1997), S. 57-85.

[15] A. Ford, Boom and bust in power plant construction: lessons from the California electricity crisis, Journal of Industry, Competition and Trade, 2 (2002), S. 59-74.

[16] A. Ford, Simulation Scenarios for Rapid Reduction in Carbon Dioxide Emissions in the Western Electricity System, Energy Policy, 36 (2008), S. 443-455.

[17] A. Ford, K. Vogstad, H. Flynn, Simulating price patterns for tradable green certificates to promote electricity generation from wind, Energy Policy, 35 (2007), S. 91-111.

[18] C. Ochoa, I. Dyner, C. J. Franco, Simulating power integration in Latin America to assess challenges, opportunities, and threats, Energy Policy, 61 (2013), S. 267-273.

[19] G. Yucel, C. van Daalen, A simulation-based analysis of transition pathways for the Dutch electricity system, Energy Policy, 42 (2012), S. 557-568.

[20] Z. Li-sha, L. Chen, Y. Shun-kun, System Dynamics Simulation Research on Project Management Model for China's Smart Grid, East China Electric Power, 40 (2012), S. 31-40.

[21] S. N. Groesser, Projekte scheitern wegen dynamischer Komplexität: Qualitative Feedbackmodellierung zur Komplexitätsbewältigung, ProjektMANAGEMENT aktuell, 22 (2011), S. 15-25.

[22] J. M. Lyneis, D. N. Ford, System Dynamics Applied to Project Management: A Survey, Assessment and Directions for Future Research, System Dynamics Review, 23 (2007), S. 157-189.

[23] V. S. E. VSE, Marktmodell für die elektrische Energie – Schweiz, in: VSE, 2009.

[24] S. N. Groesser, Mental Models of Dynamic Systems, in: N. M. Seel (Ed.) Encyclopedia of the Sciences of Learning, Springer Science+Business Media, Heidelberg et al., 2012.

[25] G. Müller-Stewens, C. Lechner, Strategisches Management: Wie strategische Initiativen zum Wandel führen - der St. Galler General Management Navigator, Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2010.

[26] S. N. Groesser, Stichwort: System Dynamics, in: Gabler Wirtschaftslexikon, Gabler, Heidelberg, 2012.

[27] J. Rosenhead, Introduction: old and new paradigms of analysis, in: R. J., J.

Mingers (Eds.), Rational Analysis for a Problematic World: Problem structuring methods for complexity, uncertainty and conflict, John Wiley & Sons, Inc., London, 2002, S. 1-20.

[28] A. Tinker, A. Lowe, One-Dimensional Management Science: The making of a technocratic consciousness, Interfaces, 14 (1984), S. 40-49.

[29] V. S. G. S. VSGS, Weissbuch Smart Grid, in: Verein Smart Grid Schweiz, VSGS, 2013.