

Abschlussbericht

Arbeitsgruppe „Smart Market“
vom 31. Dezember 2014

Auftraggeber

Maurus Bachmann, Verein Smart Grid Schweiz

Bearbeitung

Stefan Grösser, Projektleiter

Markus Schwenke, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Strategy and Simulation Lab (S-Lab), 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 über die kausalen Verbindungen im heutigen und zukünftigen Schweizer Elektrizitätssystem aus einer übergeordneten Perspektive. 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 und berücksichtigt das integrative Zusammenwirken eines Smart Markets mit den Herausforderungen einer regulierten Verteilnetzinfrastuktur. 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 eines 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 auf, wie wichtige Einflussgrössen (Variablen) auf Bestandesgrössen und Zielgrössen wirken. Neben ausgleichenden oder zielsuchenden Regelkreisen (balancing loops) bestehen auch selbstverstärkende Effekte Regelkreise (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 asymmetrisch 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 Kopplungsmechanismen 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 zum 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 CO₂-Emissionen, Energiewende, Marktöffnung. Die konkreten Trends für den Schweizer Elektrizitätsmarkt sind dabei

die dezentrale Produktion el. Energie, das Demand Side Management, Energieeffizienz im System sowie der steigende Kostendruck. Die Trends wurden in Variablen und Zielgrössen übersetzt und fliessen so in das kSMM. 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 auf. 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 die wichtigsten Interventionsmöglichkeiten. Es sind dies Einsatz von Speichern, Steuerung von Produktion und Lasten, 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 aufgezeigt. Das Kapitel schliesst mit einem Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

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 zu 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“ | 51 |
| 4.4 Interventionsmöglichkeiten im Sektor „Smart Market – Angebot“ | 53 |
| 5. Fazit und Ausblick..... | 55 |
| 5.1 Fazit | 55 |
| 5.2 Ausblick..... | 56 |
| VI. Referenzen..... | 58 |

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: Selbst-verstärkender Regelkreis | 28 |
| Abbildung 3-3: Selbstverstärkender und ausgleichender Regelkreis | 29 |
| Abbildung 3-4: Hintereinander abgebildete Bestandesgrößen | 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 | 49 |
| Abbildung 4-7: Intervention SG-A2..... | 50 |
| Abbildung 4-8: Intervention SM-N1 | 51 |
| Abbildung 4-9: Intervention SM-N2 | 52 |
| Abbildung 4-10: Intervention SM-A1 | 54 |
| Abbildung 5-1: Illustration der asym. 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..... | 32 |
| Tabelle 3-2: Modellgrenzen des kSMM | 40 |

V. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|---|
| A | Angebot |
| BFH | Berner Fachhochschule |
| BHWK | Blockheizkraftwerk |
| DSM | Demand Side Management |
| el. | elektrisch |
| EVU | Elektrizitätsversorgungsunternehmen |
| ff. | fortfolgende |
| GuD | Gas- und Dampfkombikraftwerk |
| HKN | Herkunftsnachweis |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnologie |
| kSMM | kausales Smart Market Modell |
| N | Nachfrage |
| PV | Photovoltaik |
| SD | Systemdynamik |
| SG | Smart Grid |
| SM | Smart Market |
| VNB | Verteilnetzbetreiber |
| 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 weit über Elektrizitätsnetze hinausreichende Lösungsansätze verstanden. Die Lösungsansätze in der Schweiz verfolgen das Ziel, die Energiestrategie 2050 des Schweizer Bundesrates mittels verstärktem Einsatz von erneuerbaren, dezentralen Energien und der dadurch notwendigen Lösung von Integrationsproblemen umzusetzen. Die Integrationsprobleme sind vielfältig. Dazu gehört zum Beispiel die starke Abhängigkeit der Erzeugung von el. Energie durch Photovoltaikanlagen vom Wetter 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 meist 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 Kapitel 1.6. definiert.

stellung von Systemmodelle mittels denen 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 soziotechnischen System „Schweizer Elektrizitätsmarkt“ geben. Es beinhaltet sowohl die Verteilnetz- („Smart Grid“) als auch die Marktebene („Smart Market“). Der Zeithorizont des Modells erstreckt sich bis ins Jahr 2035. Das Modell soll insbesondere aufzeigen, 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 Beziehung zum europäischen Elektrizitätsnetz bzw. -markt. Kapitel 3.3 zeigt weitere Details zur gewählten Modellgrenze.

1.3 Stand der Forschung zu 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 generell² 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], Marktdesign in liberalisierten Elektrizitätsmärkten [6] und 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, zum Beispiel zu den USA [14-17], Latein-Amerika [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 „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 miteinander 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 Bundesrates 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 meistens 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 Übertragungsebene 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 wie auch 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. Wir nutzten ein vierstufiges Forschungsdesign (Abbildung 1-1):

1. Erfassung wesentlicher Trends im Elektrizitätsmarkt
2. Erstellung von relevanten Zielgrössen
3. Erstellung kausales Smart Market Modell (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 Umfeldanalyse [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 durch mehrere Workshops durch die Mitarbeit der Arbeitsgruppe erstellt. Für die Umsetzung des Modells verwenden wir den System Dynamics Ansatz. System Dynamics (abgekürzt: SD; dt., Systemdynamik) ist eine von Jay W. Forrester an der Sloan School of Management des Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA, entwickelte Methodik zur integrierten Analyse

komplexer und dynamischer, sozio-technischer Systeme [26]. Mit SD können die Auswirkungen von Entscheidungen auf die Systemstruktur und das Systemverhalten wie zum Beispiel den Unternehmenserfolg oder die Versorgungssicherheit im System simuliert und entsprechend 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.

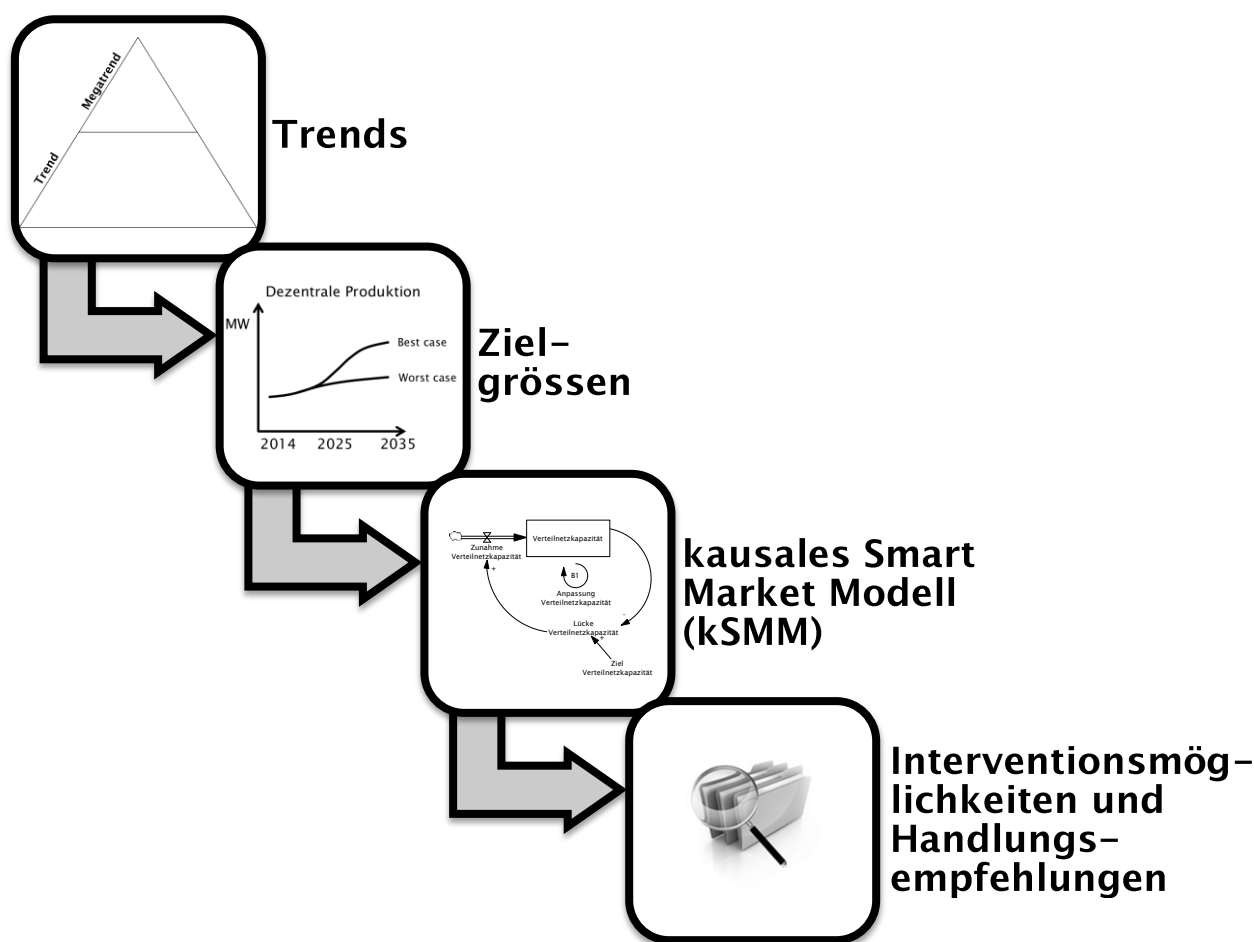


Abbildung 1-1: Forschungsdesign der Studie

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“) auf wesentliche Sachverhalte. 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 Kapitel 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 Frage- bzw. Aufgabenstellung zu beantworten. Durch 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.

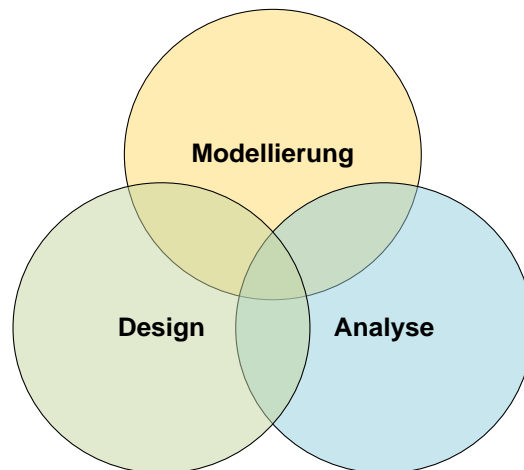


Abbildung 1-2: Modi bei der Arbeit mit Modellen

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 **kausale 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 aus dem „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 el. Energie bzw. das Angebot an el. 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. BHKWs, Speicherkraftwerke, GuD), weitgehend unabhängig von Umweltbedingungen sind und somit sehr flexibel zur Verfügung stehen.

Dezentrale Energiequellen:

- El. 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.

El. Energie:

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

El. Energie ohne Herkunftsnachweis:

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

Grüne el. Energie:

- Grüne el. Energie (auch grüner Strom) ist el. 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 ihren Eigenschaften bzw. 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 el. Energie bis 2020, Reduktion CO₂-Emissionen, aber auch die Erhaltung der bestehenden guten Versorgungssicherheit und einer wirtschaftlichen und gesellschaftlich fairen Energieversorgung.
- Ein Smart Market schafft die Fähigkeit, benötigte Energie und/oder Leistung wirtschaftlich bereit zu stellen; 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, Kosten für Energie und weitere Abgaben.

Verschiebbare Lasten:

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

Zentrale Energiequellen:

- Die zentrale Energieerzeugung erfolgt in Grosskraftwerken, z. B. 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 vorgenommen. Wir verwendeten die PESTEL-Analyse. Sie ist ein Analyserahmen der externen Umfeldanalyse 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 hin 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 Unterkapiteln werden die erhobenen Trends priorisiert und eine Auswahl davon konkretisiert.

| PESTEL Dimension | Trends (alphabetisch geordnet) |
|---------------------------|---|
| Political (politisch) | Ausstieg AKWs EU Politik Geopolitische Unsicherheiten Konzessionsleistungen Reduktion fossiler Energieverbraucher Streben nach mehr Autonomie Energiekosten, Energieeffizienz Subventionen |
| Economic (wirtschaftlich) | Angebot SDL Asset Effizienz/ -auslastung CO2-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 Produktion Optimierung Strommarktpreis, Spot Preis wirtschaftliche Marktkopplung |

| PESTEL Dimension | Trends (alphabetisch geordnet) |
|-------------------------------|--|
| Social (sozial) | Eigenverbrauch Neue energieinteressierte Zielgruppen Neue Energie-Verbrauchsgewohnheiten 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 CO2-Emissionen Ressourcenverbrauch |
| Legal (rechtlich) | CO2-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 CO₂-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.

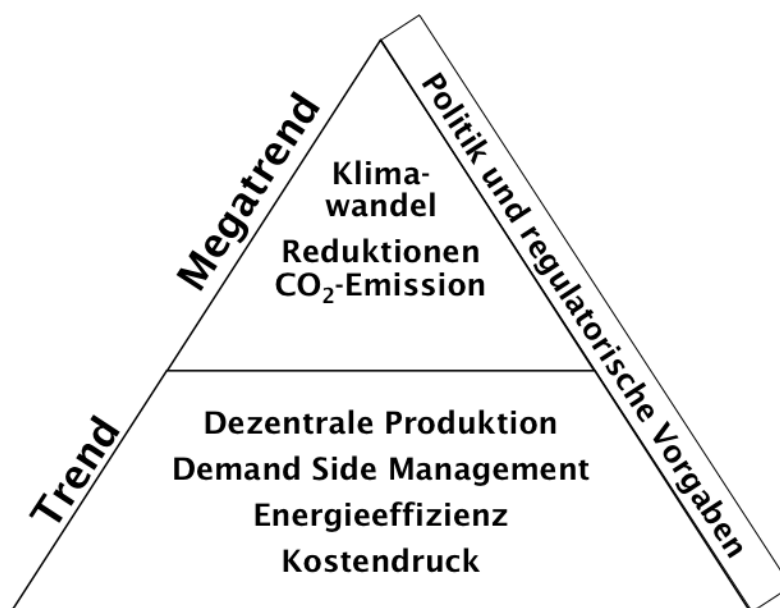


Abbildung 2-1: Megatrends und Trends

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 (Kapitel 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. | <ul style="list-style-type: none"> • Anteil dezentrale Produktion • Versorgungssicherheit | <ul style="list-style-type: none"> • el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen • Anteil Selbstversorger • Förderung erneuerbare 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. | <ul style="list-style-type: none"> • Energiekosten Schweiz • Lastenflexibilität • Versorgungssicherheit | <ul style="list-style-type: none"> • el. Leistung tatsächlich verschiebbare 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 ^s |
|----------------------------|--|--|--|
| 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. | <ul style="list-style-type: none"> • durchschnittlicher Auslastungsgrad der Energiequellen • gesamt el. Leistung der Energiequellen und Lasten im System • gesamter Bedarf an el. Energie pro Jahr | <ul style="list-style-type: none"> • 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. | <ul style="list-style-type: none"> • Energiekosten Schweiz | <ul style="list-style-type: none"> • 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 |
|---|--|
| <p>Dezentrale Produktion</p>  | <p>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.</p> <p><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.</p> |
| <p>Gesamter Bedarf an el. Energie pro Jahr</p>  | <p>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.</p> <p><u>Begründung des Verlaufs:</u> Aufgrund der Effizienzmassnahmen der Energiestrategie 2050 erwarten wir einen stabileren bez. leicht sinkenden Bedarf an el. Energie insgesamt und pro Kopf (Best case).</p> |

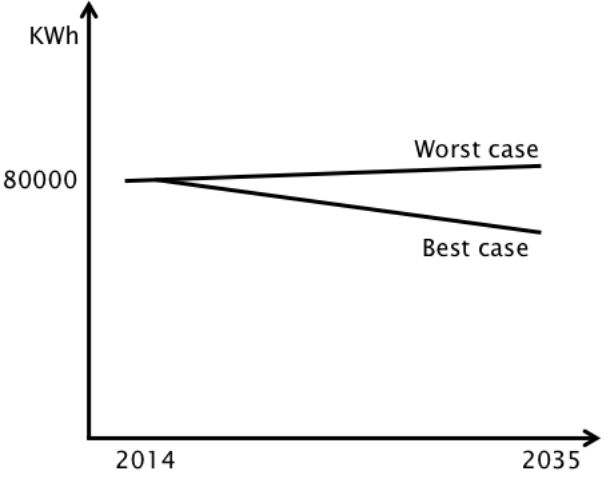
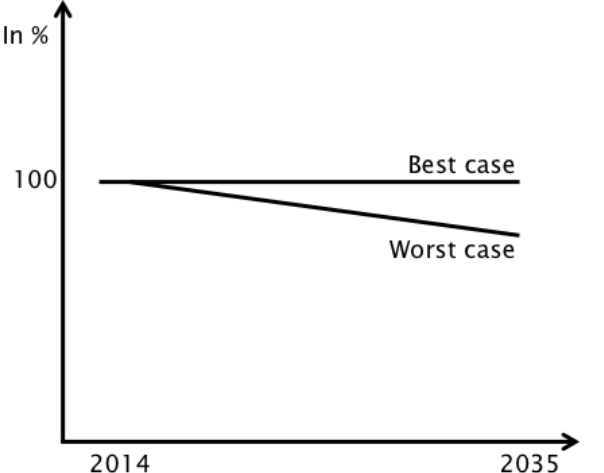
| Zielgrösse | Beschreibung |
|---|--|
| <p>Gesamter Bedarf an el. Energie pro Kopf pro Jahr</p>  | |
| <p>Versorgungssicherheit</p>  | <p>Versorgungssicherheit bezeichnet die Zuverlässigkeit der el. Energieversorgung in der Schweiz. Als ein möglicher Indikator wird SAIDI (System Average Interruption Duration Index) verwendet (IEEE Standard 1366-1998). SAIDI wird in Minuten gemessen.</p> $\text{SAIDI} = \frac{\text{Summe aller Versorgungsunterbrechungen [min]}}{\text{Gesamtzahl aller Verbraucher}}$ <p>Unter Berücksichtigung der Gesamtjahreszeit lässt sich die Versorgungssicherheit auch in Prozent darstellen.</p> <p>Ausgeschlossen sind im Rahmen dieser Arbeit weitere Indikatoren wie z.B. die internationale Vernetzung.</p> <p><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.</p> |

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 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 Modell nötig.

⁷ Gesamtenergiestatistik 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.

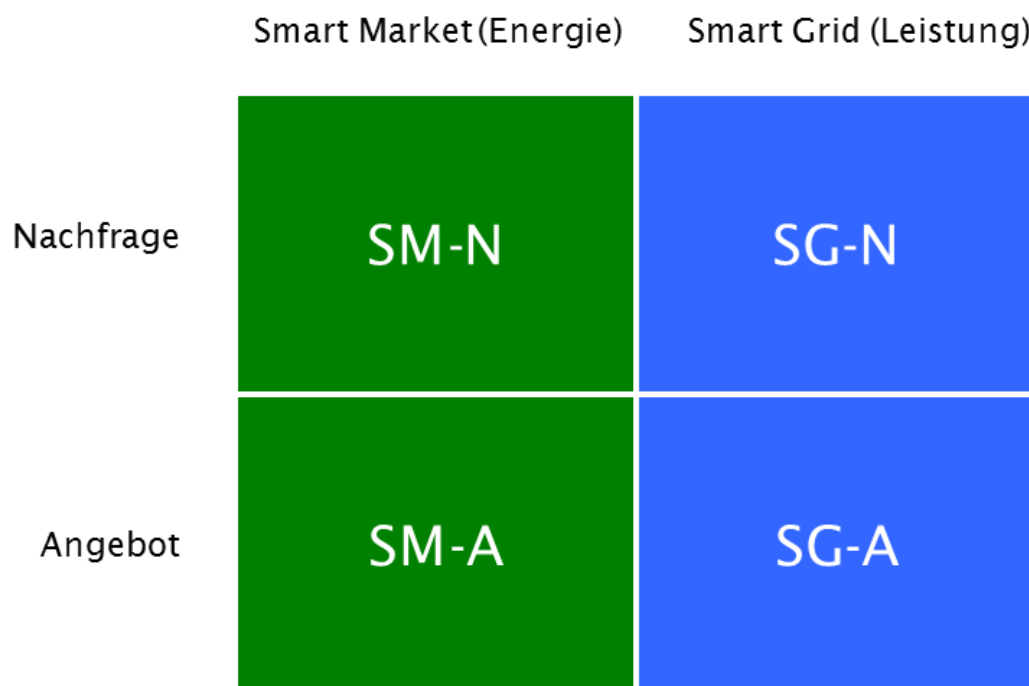


Abbildung 3-1: Vier-Felder Matrix zu Smart Market und Smart Grid

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 Angebot an el. Energie befindet sich im Sektor „Smart Market – Angebot“, der Bedarf

an el. 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 CO₂-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 el. Energie mittels Verteilnetz bestimmt. Die Kernmechaniken des kSMM werden im nächsten Kapitel erklärt.

3.2 Kernmechaniken des kausalen Smart Market Modells

Das kSMM beinhaltet wesentliche Variablen und Zielgrössen aus den vier zuvor benannten Sektoren, welches 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 Geburtenrate 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.

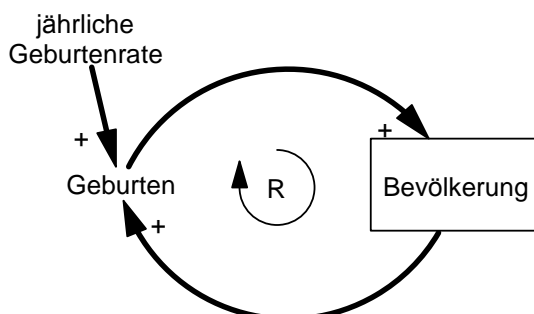


Abbildung 3-2: Selbst-verstärkender Regelkreis

- (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 selbstverstärkenden Regelkreis entgegen.

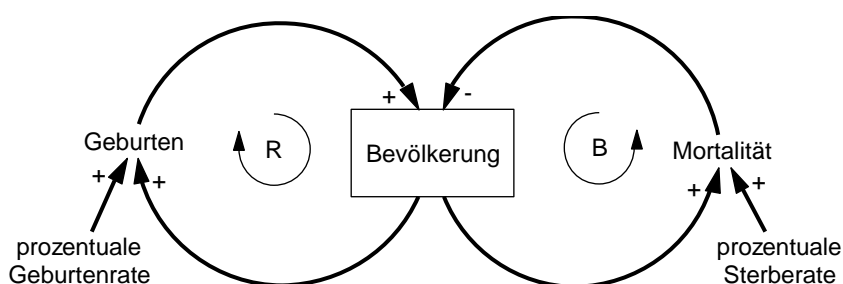


Abbildung 3-3: Selbstverstärkender und ausgleichender Regelkreis

Beide Beschreibungen treffen nur auf isolierte, eigenständige Regelkreise zu. Ein System, das 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.

Bestandesgrösse

Eine Bestandesgrösse 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 Bestandesgrößen. In der systemdynamischen Visualisierung werden Bestandesgrößen ausschließlich als Rechtecke dargestellt. Mehrere Bestandesgrößen derselben Art werden hintereinander abgebildet (siehe Abbildung 3-4). Zu *el. Leistung Lasten* gehören die Bestandesgrößen *el. Leistung nicht verschiebbare Lasten*, *el. Leistung potenziell verschiebbare Lasten* und *el. Leistung verschiebbare Lasten*. Eine Bestandesgrösse wird auch als Stock, Level, Akkumulator oder Zustandsgrösse bezeichnet.



Abbildung 3-4: Hintereinander abgebildete Bestandesgrößen

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 von den 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.

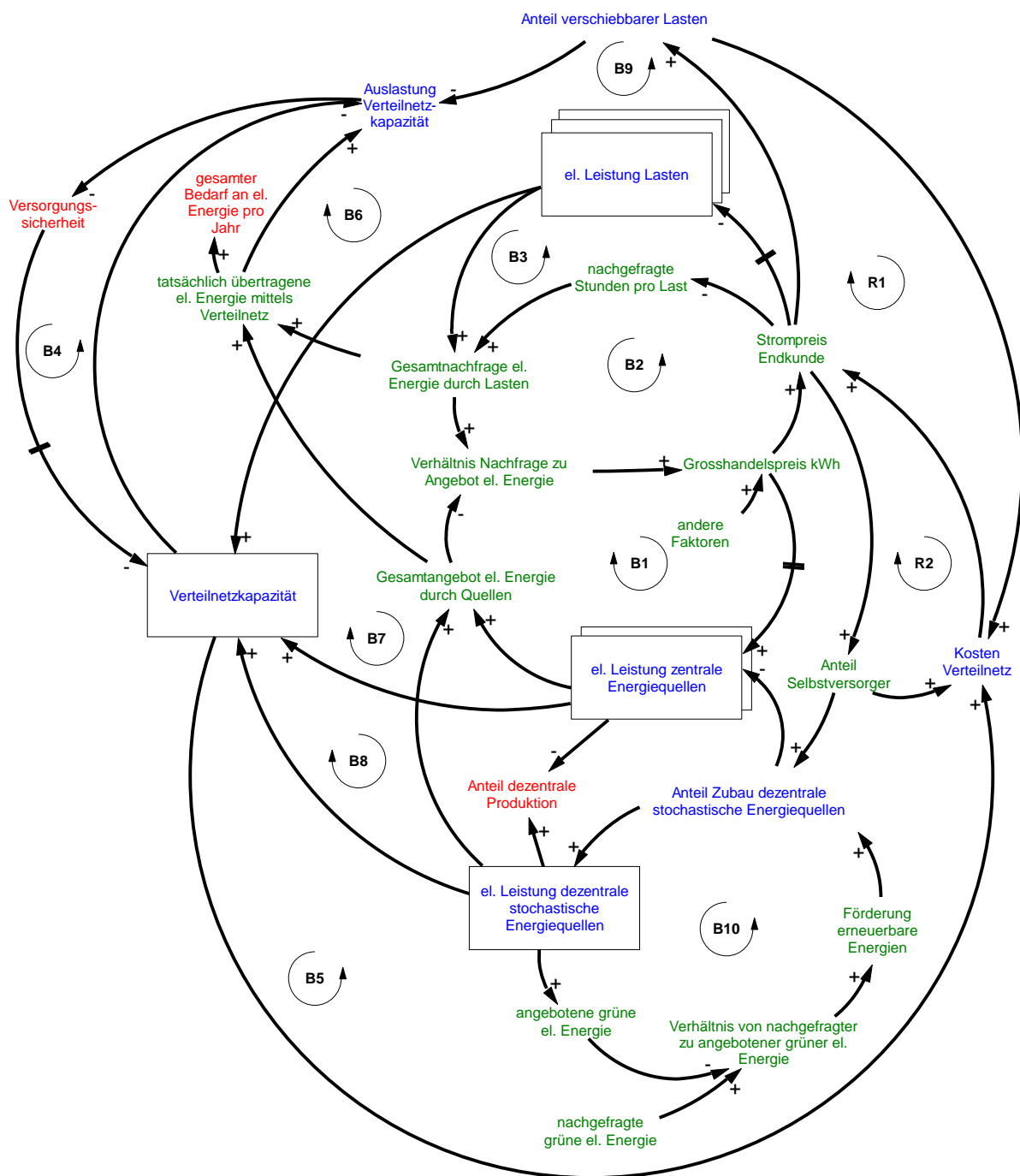


Abbildung 3-6: Kernmechaniken des kSMM (ohne Vier-Felder Matrix Struktur)⁸

Neben den Variablen aus den Bereichen Smart Grid (blau) und Smart Market (grün) enthält Abbildung 3-6 die drei wichtigen Zielgrößen (rot) „Versorgungssicherheit“, „Anteil dezentrale Produktion“ und den „gesamten Energiebedarf el. Energie“. Die Zielgrößen Anteil der dezentralen Produktion und gesamter Ener-

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

giebedarf 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 Kernmechaniken⁹

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

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 el. 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 el. Energie pro Jahr“ und „Anteil dezentrale Produktion“.

B2 – Beeinflussung des Grosshandelspreises durch die Nachfrage nach el. Energie:

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

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 el. Energie durch Lasten. Die Gesamtnachfrage geht dann als ein Teil in das Verhältnis Nachfrage zu Angebot nach el. Energie, 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 el. 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 kWh

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

gereduzierung (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 el. Energie, der Strompreis sinkt und Lasten werden wieder in das 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 el. Energie pro Jahr“ und „Anteil dezentrale Produktion“.

B4 – Ausbau 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 von 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 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 el. 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 Verteilnetzkapazität 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 el. 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 el. Energie. Nimmt diese el. Energie zu, erhöht sich die Auslastung des Verteilnetzes. Dadurch wird ein Ausbau der Verteilnetzkapazität gefördert, der sowohl Kosten als auch den Strompreis erhöht. Ein hoher Strompreis verringert die Nachfrage, die tatsächlich übertragene el. Energie nimmt ab.

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

B7 – Ausbau Verteilnetze durch übertragene zentrale el. Energie:

Pfad B7: 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

Neben den nachfragenden el. 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 el. Energie nimmt ab. Der Grosshandelspreis sinkt es wird weniger in neue zentrale Energiequellen investiert.

B7 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die eher mittel- bis langfristige Interaktionen zwischen zentralen Energiequellen und Verteilnetzkapazität erfasst. Sie

verbindet alle vier Sektoren. B7 wirkt indirekt auf die Zielgrösse „Versorgungssicherheit“.

B8 – Ausbau Verteilnetze durch übertragene dezentrale el. 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 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 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 im 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 aufzunehmen 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 dezentrale stochastische Energiequellen durch grüne el. 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 el. Energieproduktion in der Schweiz zu erhöhen, wird von einer nachfragegesteuerten Lösung ausgegangen. Das bedeutet, dass bei zunehmender Liberalisierung grüne el. Energie vermehrt nachgefragt wird 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 el. Energie höher als das Angebot, wird durch einen Förderbeitrag der Zubau von dezentral, stochastischen Energiequellen gefördert. Diese dezentral, stochastischen Quellen müssen wieder ins Verteilnetz integriert werden und erhöhen somit die benötigte Verteilnetzkapazität.

B10 ist eine ausgleichende Kernmechanik, die mittelfristige Interaktionen zwischen der Nachfrage nach grüner el. 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 somit 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).

| Mo- dell- sektor | Endogene Variablen | Exogene Variablen | im aktuellen Modell ausgeschlossen |
|-------------------------|---|---|--|
| Smart Grid | <ul style="list-style-type: none"> • Verteilnetzkapazität • el. Leistung von Lasten • el. Leistung von Energiequellen • Verschiebung von Lasten | <ul style="list-style-type: none"> • Zubau aktive Steuerungselemente Quellen und Lasten • Leistung von Energiespeichern | <ul style="list-style-type: none"> • Passive Steuerungselemente • Übertragungsebene • Keine Unterscheidung zentrale und dezentrale Lasten • Stromrichtung • E-Fahrzeuge als Speicher • Regionale Differenzierung • Bilanzgruppen • Gleichzeitigkeitsfaktor¹⁰ |
| Smart Market | <ul style="list-style-type: none"> • Preis für Energie Endkunde • Grosshandelspreis • Gesamtnachfrage durch Lasten • Angebot el. Energie • CO₂-Emissionen im System • tatsächliche übertragene Energie mittels Verteilnetz | <ul style="list-style-type: none"> • Ausfall stochastischer Energiequellen | <ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristige Lastverschiebungen • Stromanbieterwechsel • Regelenergie • Regelpooling • Regionale Differenzierung • Differenzierung zwischen Haushalten und Unternehmen • Systemdienstleistungen • Produktionskosten • CO₂-Emissionen der Energiequellen |

Tabelle 3-2: Modellgrenzen des kSMM

¹⁰ Bei allen el. 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 von aktive Steuerungselemente für Lasten auf den Anteil verschiebbare 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. werden die Sektoren grau eingefärbt in welchen die Interventionen vorgenommen wurden.

| | Smart Market (Energie) | Smart Grid (Leistung) |
|-----------|--|--|
| Nachfrage | <p>SM-N1 Preismechanismus für bezogenen Strom</p> <p>SM-N2 Forcierung Eigenverbrauchslösung</p> <p>...</p> | <p>SG-N1 Installation von aktiven Steuerungselementen für Lasten</p> <p>SG-N2 Lastenpooling</p> <p>SG-N3 Energiespeicher für Lasten</p> <p>SG-N4 E-Fahrzeuge als verschiebbare Lasten</p> <p>...</p> |
| Angebot | <p>SM-A1 Förderung von dezentraler Produktion</p> <p>...</p> | <p>SG-A1 Installation von aktiven Steuerungselementen für Quellen</p> <p>SG-A2 Energiespeicher für stochastische Energiequellen</p> <p>...</p> |

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.

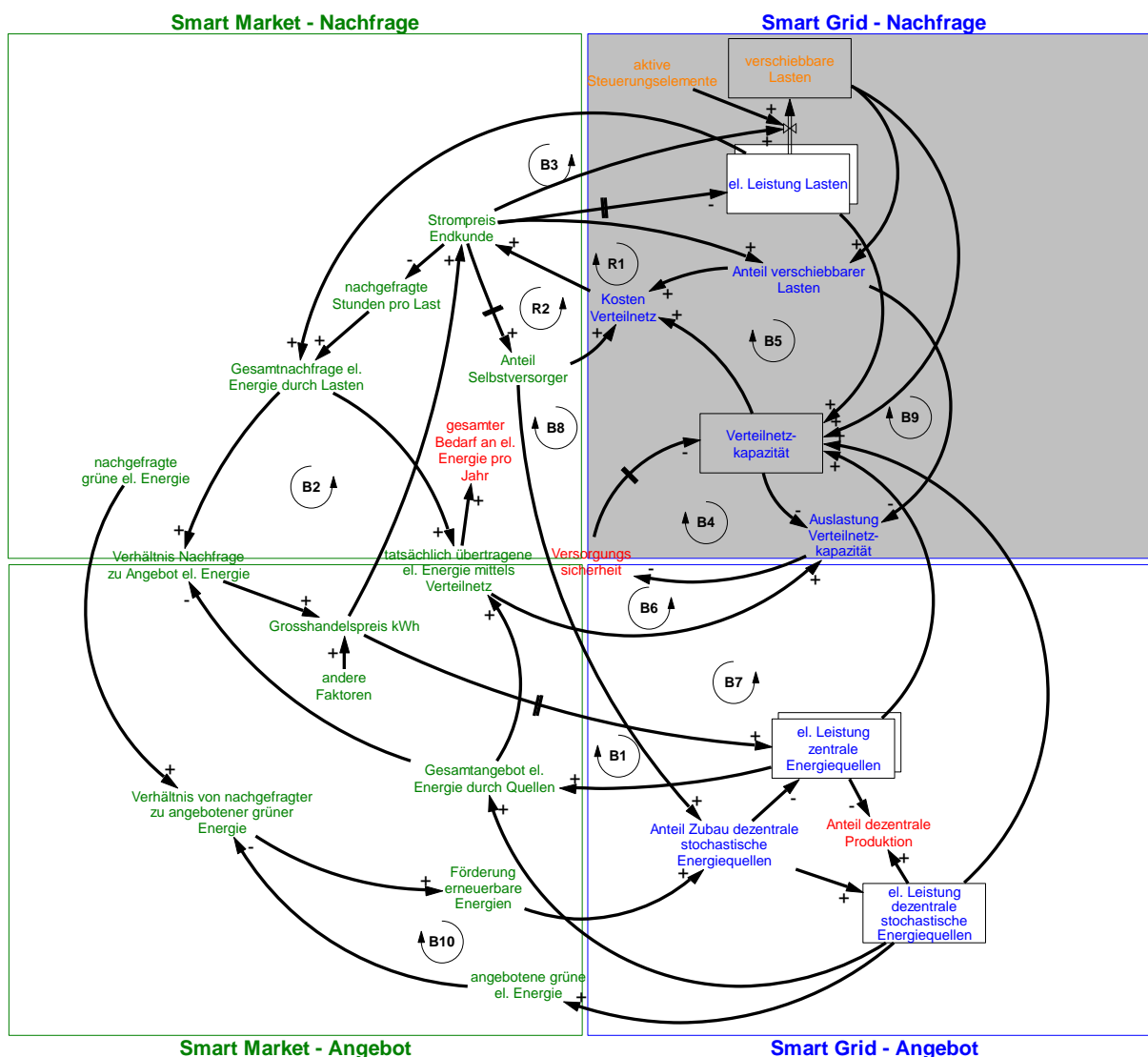


Abbildung 4-2: Intervention SG-N1¹¹

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 von verschiebbaren Lasten führen (R1). Die Verteilnetzkosten nehmen aufgrund der Inbetriebnahme- und Wartungskosten zwar kurzfristig zu, können jedoch

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.

aufgrund geringer benötigter Investitionen ins Verteilnetz (B9) auch relativ betrachtet reduziert werden.

Interventionsmöglichkeit SG-N2: Lastenpooling

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

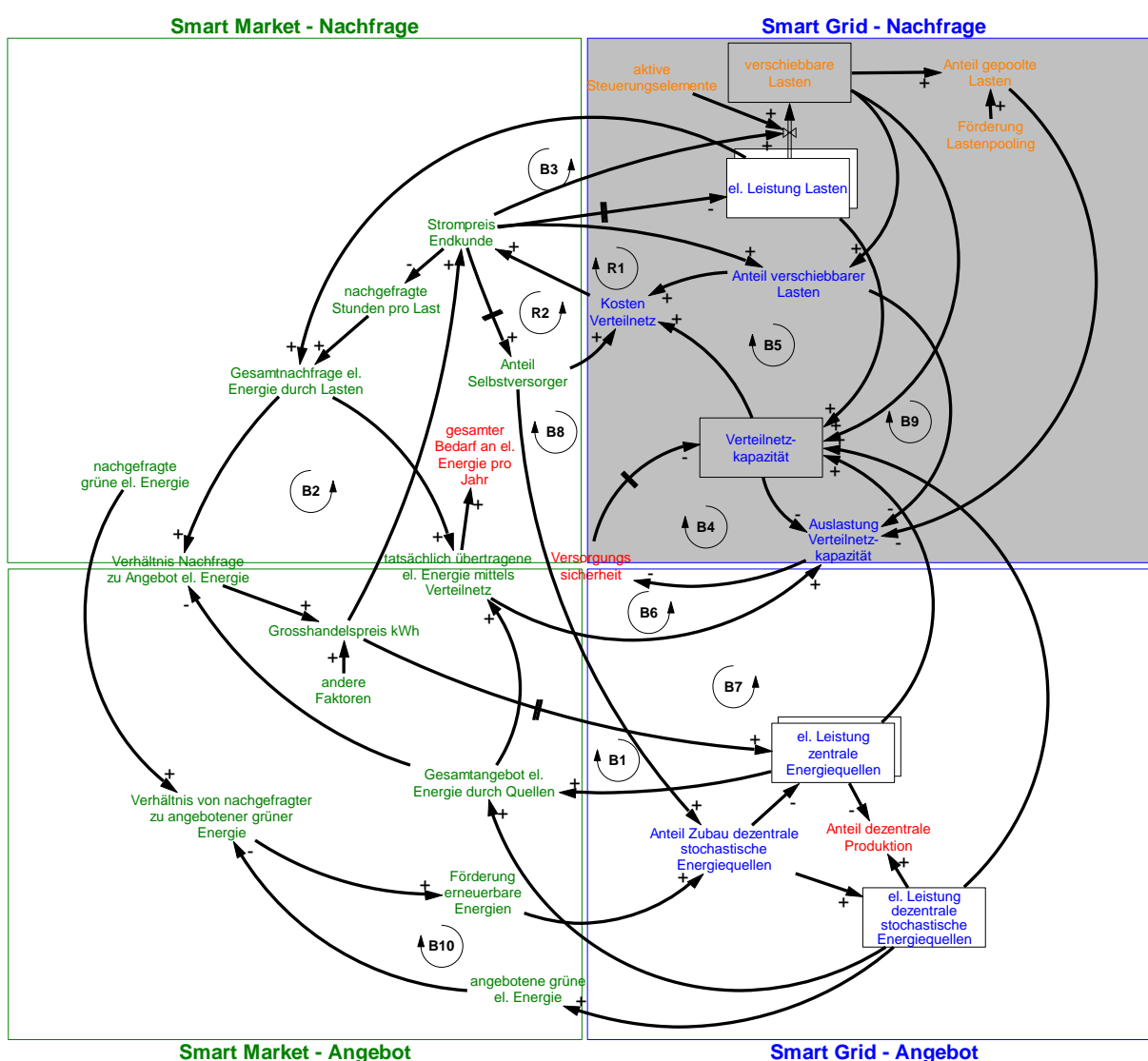


Abbildung 4-3: Intervention SG-N2

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 EVUs oder andere Akteure koordiniert zu steuern. Das führt zu einer höchst möglichen Ausnutzung der Lastenflexibilität. 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 el. Energie durch nicht verschiebbare Lasten muss sofort und kontinuierlich bedient werden. Durch die 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 el. Energie versorgen, da sie geladen werden, wenn die nicht verschiebbare Last el. Energie nachfragt. Ist ein Speicher geladen, und das Energieangebot kleiner als die Energienachfrage, können die Speicher für eine relativ kurze Zeit die Last mit el. Energie versorgen. Ziel der Energiespeicher für Lasten ist keine Rückspeisung der el. Energie in das Verteilnetz, sondern eine Entlastung des Stromnetzes und dadurch eine Erhöhung der Zielgrösse Versorgungssicherheit. Dies geschieht über eine Reduktion der tatsächlich übertragenen el. Energie mittels Verteilnetz. Dadurch kann zunächst die Auslastung der Verteilnetzkapazität reduziert werden, die dann zu einer höheren Versorgungssicherheit und eine Reduktion der neu benötigten Verteilnetzkapazität führen (B4).

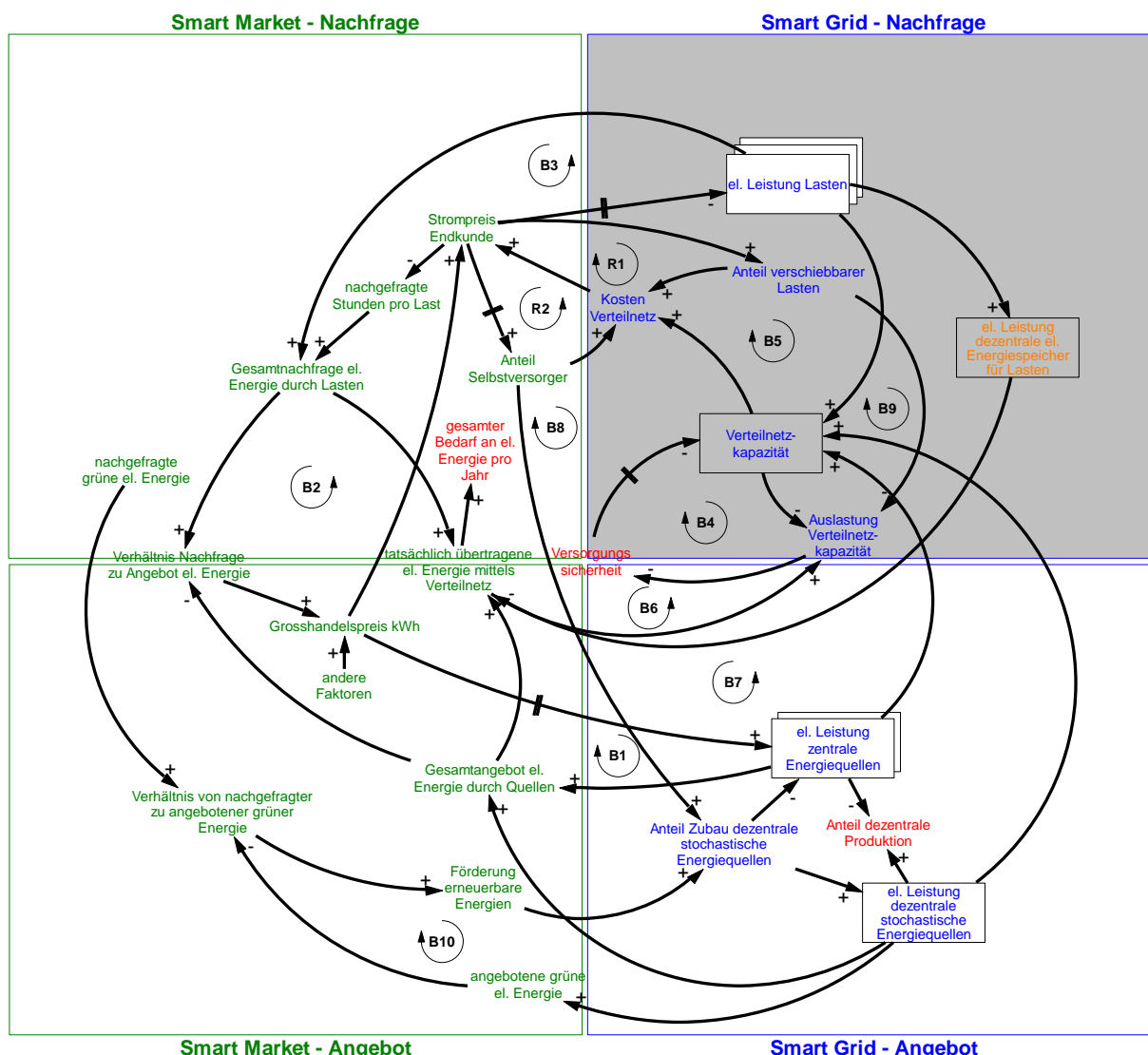


Abbildung 4-4: Intervention SG-N3

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 gehen.

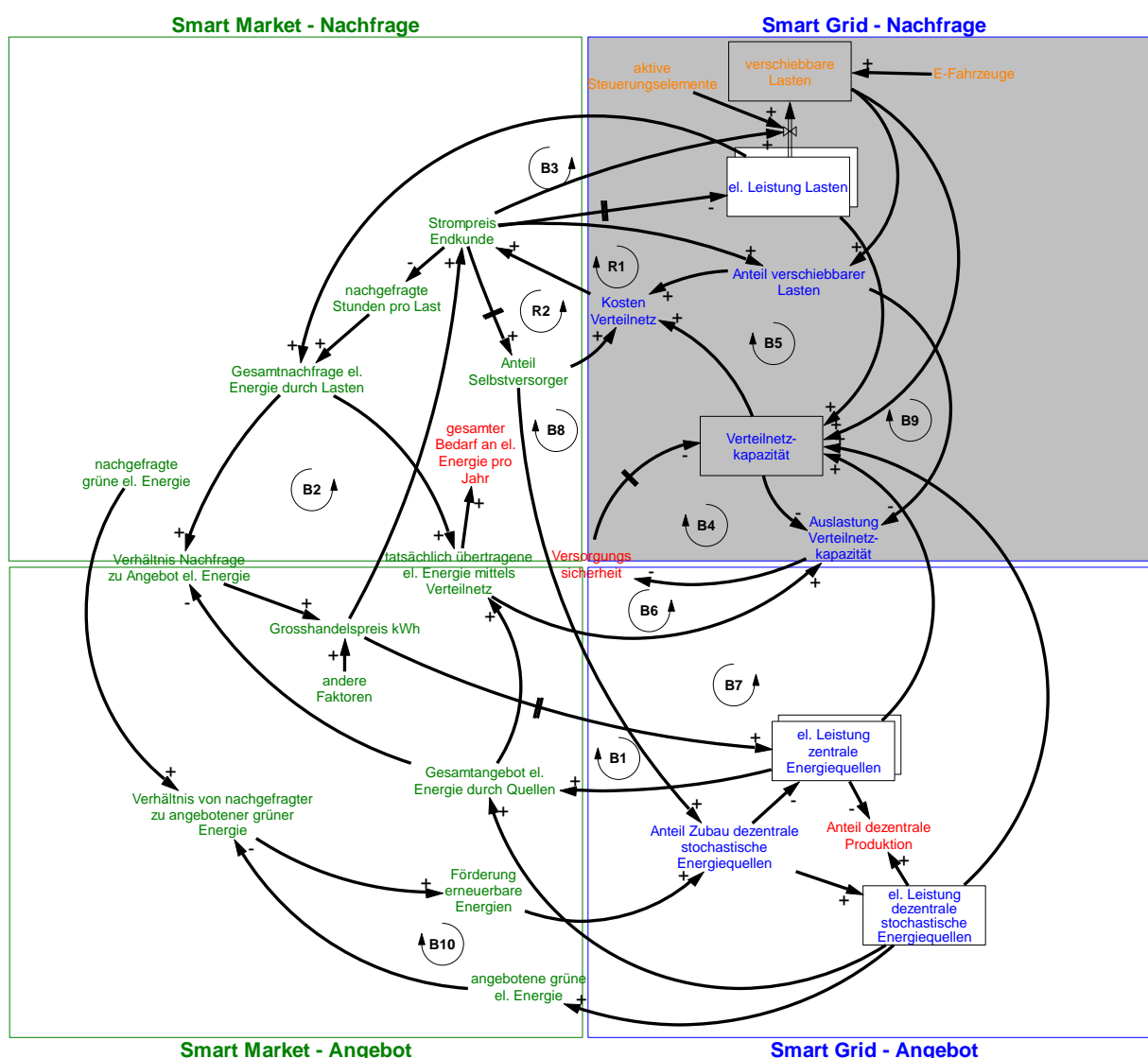


Abbildung 4-5: Intervention SG-N4

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 el. Energie können der Markt und das Verteilnetz so entlastet werden. Wenn das Angebot an el. 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 el. 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 el. 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.

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 zu Spitzenzeit weniger ausgelastet und die damit eine weiterhin hohe Versorgungssicherheit sichergestellt (B4).

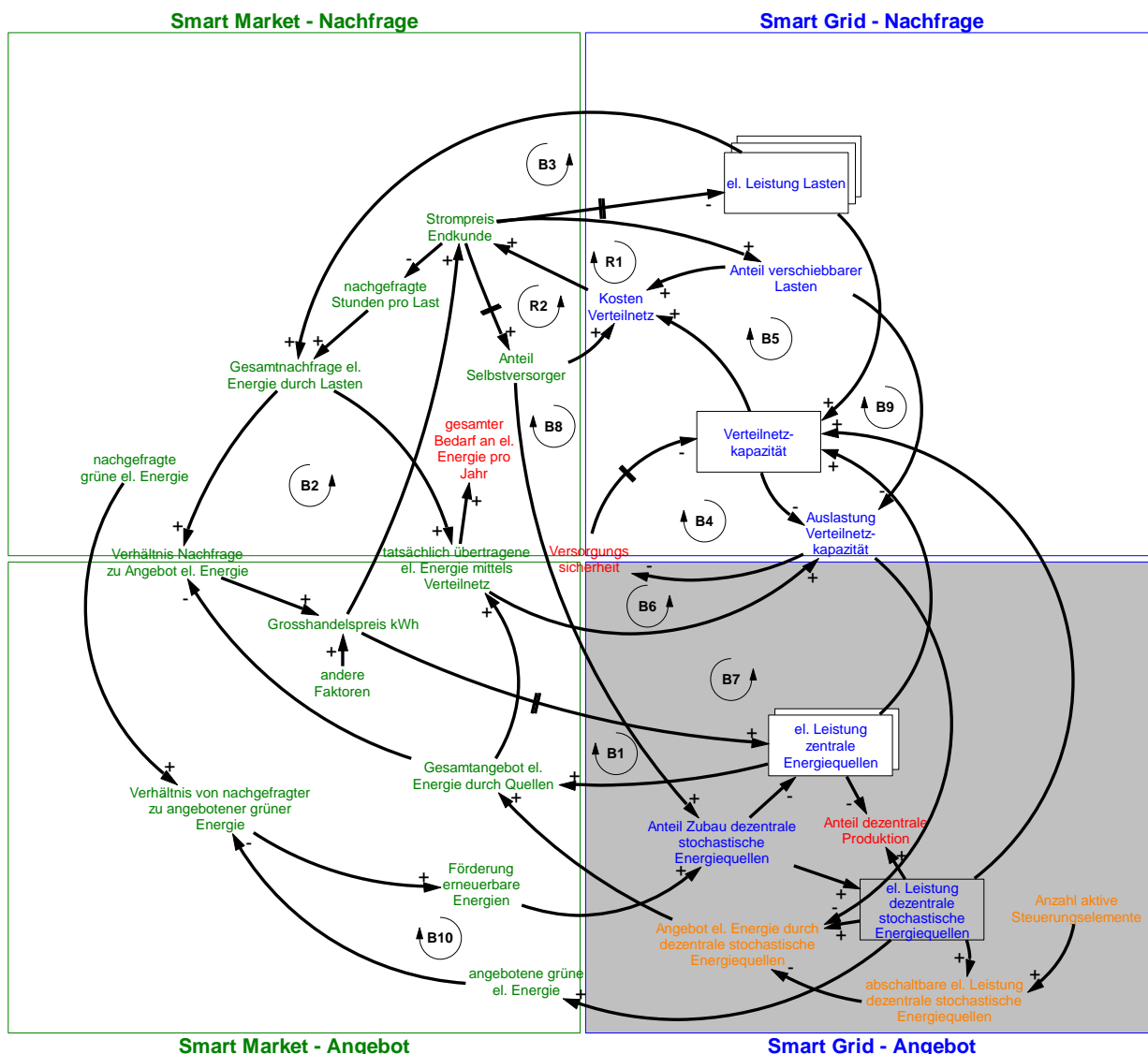


Abbildung 4-6: Intervention SG-A1

Interventionsmöglichkeit SG-A2: Energiespeicher für stochastische Energiequellen

Beschreibung: Die Verfügbarkeit von stochastischen Energiequellen zur Bedarfsdeckung ist abhängig von vielen Faktoren, u.a. 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.

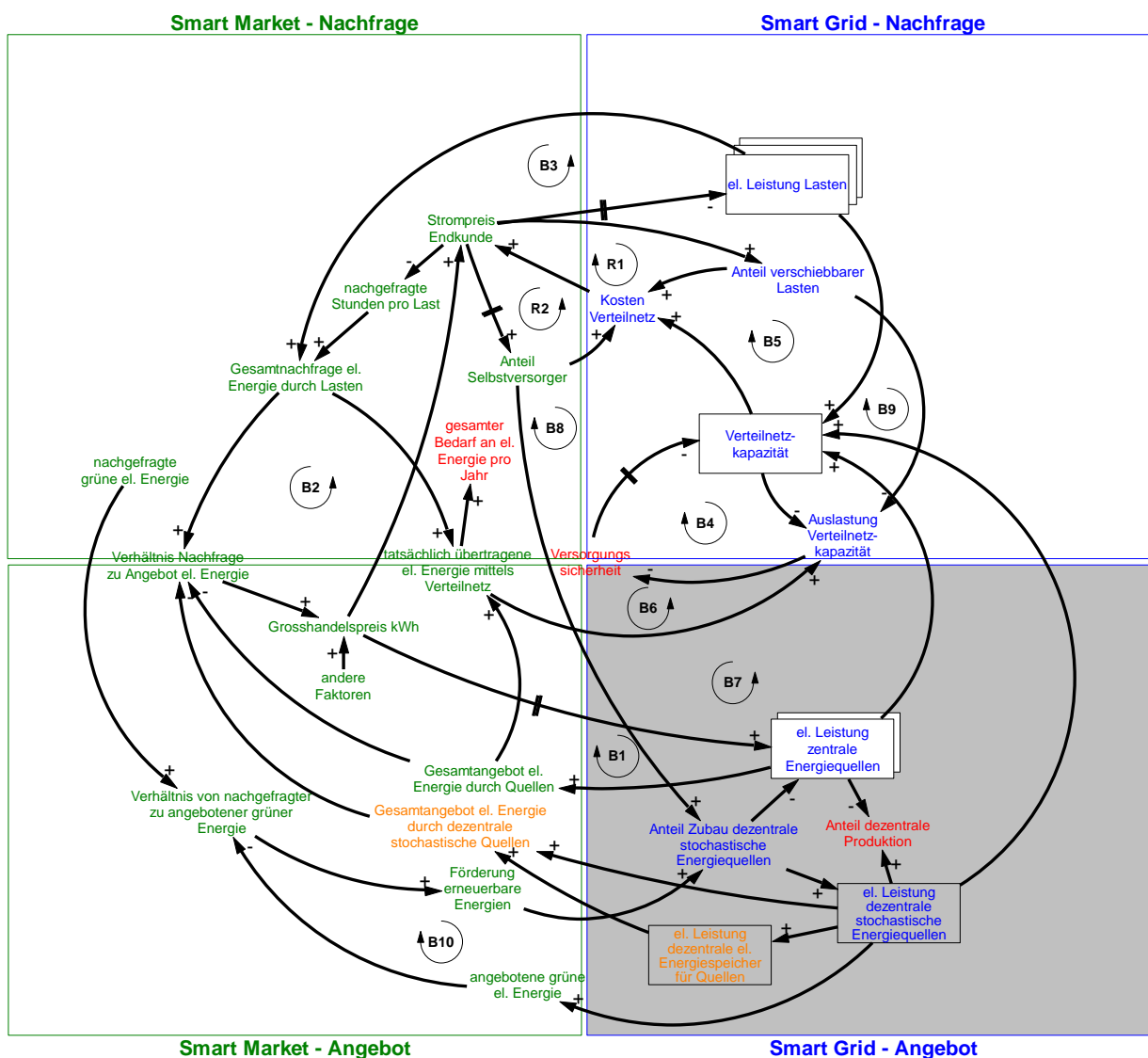


Abbildung 4-7: Intervention SG-A2

Wirkung: Energiespeicher für stochastische Energiequellen ermöglichen eine Beeinflussbarmachung stochastischer Energiequellen. Sie werden von Umweltbedingungen (z. B. Wetter) unabhängiger. Gleichzeitig erhöht sich der Eigenversorgungsgrad durch el. Energie, da die Energie aus stochastisch, 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 el. Energie aus den Energiespeichern nicht ins Verteilnetz eingespeist wird (in Abbildung 4-7 symbolisiert durch den fehlenden Pfeil zwischen el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen und Verteilnetzkapazität), sondern direkt dort verbraucht wird, wo sie erzeugt wird. Gleichzeitig wird die tatsächlich übertragene el. 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 über den Energiepreis für Endkunden. Möglich wäre eine beispielsweise progressive Preisgestaltung für el. Energie, die sich in ihrer Höhe nach dem Gesamtbedarf an el. Energie richtet. Andere Formen sind denkbar.

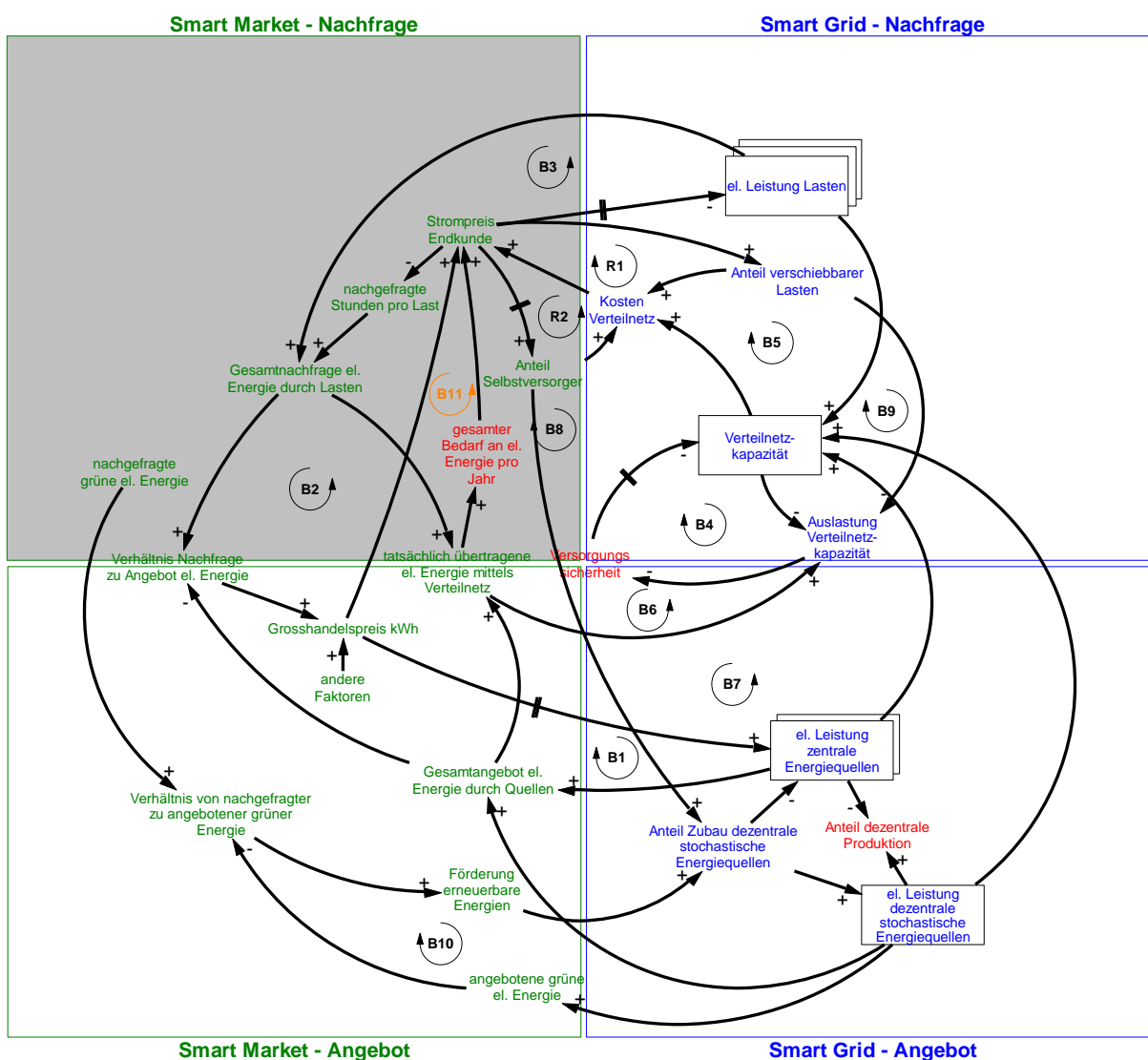


Abbildung 4-8: Intervention SM-N1

Beschreibung: Entkoppelt man den Strompreis für den Bezug von el. 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 somit nicht mehr so stark auf das Verteilnetz angewiesen sind.

Wirkung: Ein günstigerer Preis für dezentrale Energie erhöht den Bedarf an dezentraler el. Energie im Vergleich zu el. Energie aus zentralen Energiequellen. Dadurch 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 el. Energie im System. Dies ist in Abbildung 4-9 symbolisiert durch den fehlenden Pfeil zwischen el. Leistung dezentrale stochastische Energiequellen und Verteilnetzkapazität. Das senkt die Investitionen in neue Verteilnetzkapazität (B4) und senkt dadurch die Verteilnetzkosten. Zusätzlich kann ein günstigerer Preis für dezentrale el. Energie Kunden 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 el. Energie kann durch dezentrale Erzeugungsanlagen erhöht werden. Dazu eignen sich Eigenverbrauchslösungen, Förderbeträge, Lenkungsmechanismen und Einmalvergütungen oder auch die Vereinfachung von Bewilligungsverfahren.

Wirkung: Die Förderung erneuerbarer Energien bewirkt einen verstärkten Zubau der el. Leistung dezentraler stochastischer Energiequellen. Das Verhalten der wichtigen Zielgrösse „dezentrale Produktion“ kann somit erreicht werden. Gleichzeitig erhöht sich das Angebot an el. Energie aus dezentralen stochastischen Energiequellen (B9). Der Abgleich von Angebot und Nachfrage hat eine Verzögerung. Wenn Angebot und Nachfrage nach grüner el. 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.

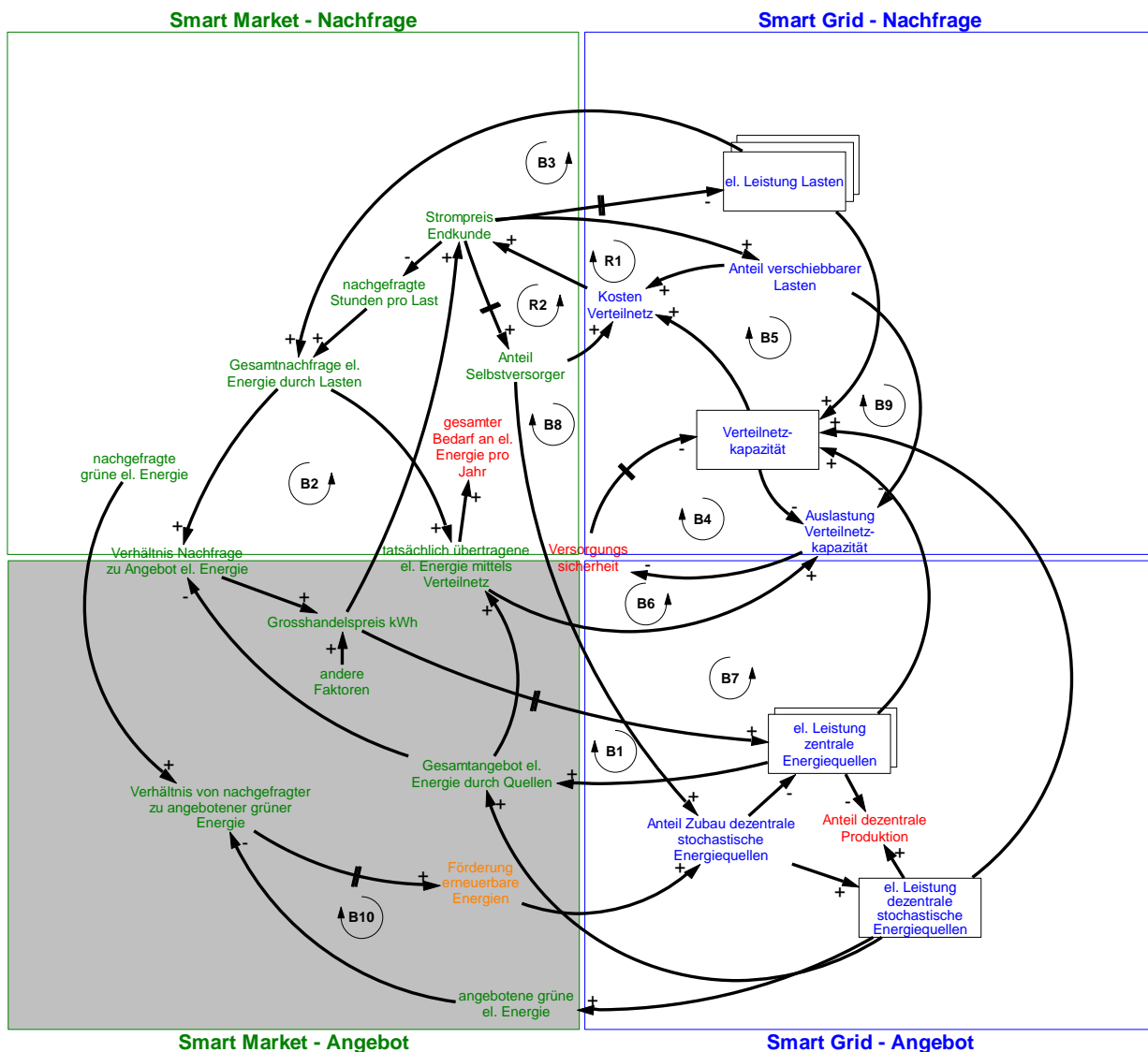


Abbildung 4-10: Intervention SM-A1

5. Fazit und Ausblick

5.1 Fazit

Kapitel 4 beschreibt einige Interventionsmöglichkeiten. Diese basieren auf den im Kapitel 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.

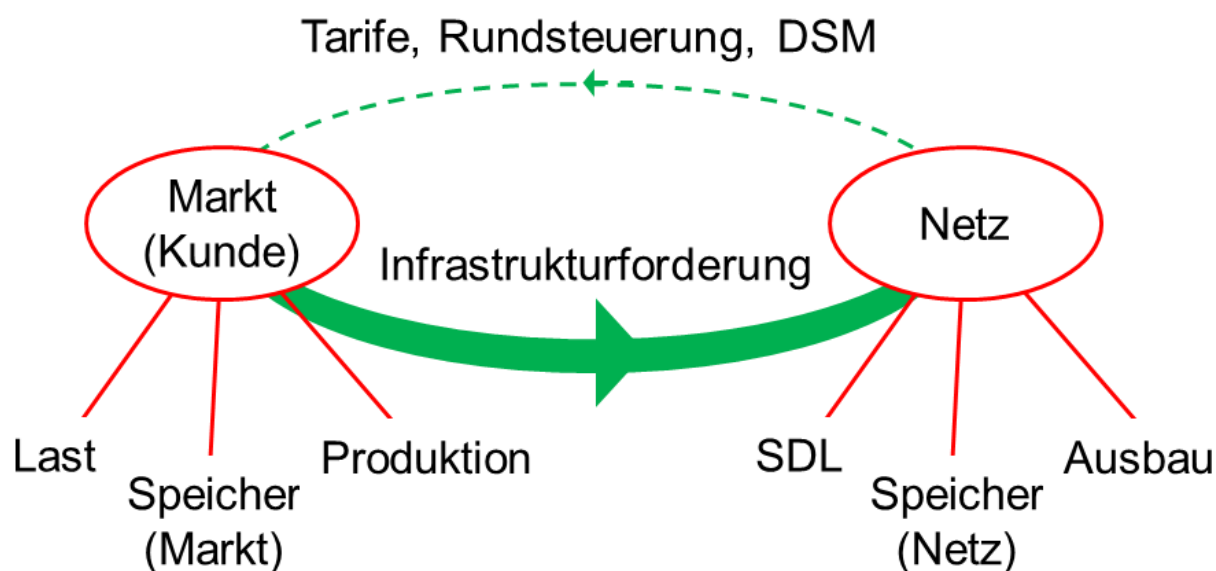


Abbildung 5-1: Illustration der asym. Kopplung zwischen Markt und Netz

Die Kopplung zwischen Elektrizitätsmarkt und Elektrizitätsnetz ist wichtig für die Stabilität im Elektrizitätsnetz, 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 sind:

- Marktbasierte Plangrößen für die langfristige Netzentwicklung
- Entsozialisierung der Netznutzungsentgelte (z. B. abh. 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 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 Seite Smart Grid durch viele Kernmechaniken relativ stark ausgeprägt ist. Die Rückkopplung von der Seite Smart Grid zum Smart Market ist relativ 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 der Netzebene mit 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 somit 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 über 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) 897-913.
- [2] M. Hasani, S.H. Hosseini, Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms, *Energy*, 36 (2011) 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) 1983-1998.
- [4] M. Filippini, Short- and long-run time-of-use price elasticities in Swiss residential electricity demand, *Energy Policy*, 39 (2011) 5811-5817.
- [5] Y.K. Yang, Understanding household switching behavior in the retail electricity market, *Energy Policy*, 69 (2014) 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) 4703-4712.
- [7] M.J. van Blijswijk, L.J. de Vries, Evaluating congestion management in the Dutch electricity transmission grid, *Energy Policy*, 51 (2012) 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) 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) 123-135.
- [10] S. Bigerna, C.A. Bollino, Electricity Demand in Wholesale Italian Market, *Energy J*, 35 (2014) 25-46.
- [11] E. Lindström, F. Regland, Modeling extreme dependence between European electricity markets, *Energy Economics*, 34 (2012) 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) 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) 81-90.
- [14] A. Ford, System Dynamics and the Electric Power Industry, *System Dynamics Review*, 13 (1997) 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) 59-74.
- [16] A. Ford, Simulation Scenarios for Rapid Reduction in Carbon Dioxide Emissions in the Western Electricity System, *Energy Policy*, 36 (2008) 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) 91-111.
- [18] C. Ochoa, I. Dyer, C.J. Franco, Simulating power integration in Latin America to assess challenges, opportunities, and threats, *Energy Policy*, 61 (2013) 267-273.

- [19] G. Yucel, C. van Daalen, A simulation-based analysis of transition pathways for the Dutch electricity system, *Energy Policy*, 42 (2012) 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) 31-40.
- [21] S.N. Groesser, Projekte scheitern wegen dynamischer Komplexität: Qualitative Feedbackmodellierung zur Komplexitätsbewältigung, *ProjektMANAGEMENT aktuell*, 22 (2011) 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) 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, pp. 1-20.
- [28] A. Tinker, A. Lowe, One-Dimensional Management Science: The making of a technocratic consciousness, *Interfaces*, 14 (1984) 40-49.
- [29] V.S.G.S. VSGS, Weissbuch Smart Grid, in, *Verein Smart Grid Schweiz VSGS*, 2013.