

Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien

Schlussbericht

von

Bert Droste-Franke, Gabriele Fohr, Markus Voge, Tanja Nietgen, Davy van Doren, Mathias Weidle

IQIB – Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung, Bad Neuenahr-Ahrweiler

Marlene O’Sullivan, Marc Deissenroth, Felix Nitsch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart

Kevin Jacqué
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen), Aachen

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03ET4032A, 03ET4032B und 03ET4032C gefördert. Laufzeit vom 01.09.2016 bis 28.02.2020.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1 Einführung	7
1.1 Hintergrund und Ziele	7
1.2 Vorarbeiten zum Projekt InnoSEn.....	9
1.3 Methodisches Vorgehen und Kapitelstruktur.....	11
2 Lithium-Batterien als Technologieschwerpunkt des Projekts.....	13
2.1 Herausforderungen und Schlüsseltechnologien.....	13
2.1.1 Einleitung.....	13
2.1.2 Zeitliche Schwankungen der Erzeugung	13
2.1.3 Räumliche Verteilung elektrischer Energie	14
2.1.4 Technologien als Schlüssel zur Umsetzung	14
2.2 Relevanz von Technologien nach typischen Energiesystemanalysen	15
2.2.1 Einleitung.....	15
2.2.2 Stromsektor.....	15
2.2.3 Wärme- und Verkehrssektor	24
2.2.4 Fazit	28
2.3 Weitere Systemaufgaben.....	29
2.3.1 Systemaufgaben und Zeitskalen	29
2.3.2 Charakterisierung und Klassifizierung von Speichertechnologien.....	31
3 Struktur technischer Innovation als sozialer Prozess.....	36
3.1 Einleitung	36
3.2 Innovation	36
3.3 Die Heuristik Technologischer Innovationssysteme als Grundlage.....	37
3.3.1 Technologische Innovationssysteme	37
3.3.2 Funktionen technologischer Innovationssysteme.....	38
4 Das technologische Innovationssystem Lithium-Batterien.....	42
4.1 Untersuchungsgegenstand, Akteure und Funktionen.....	42
4.1.1 Auswahl des Untersuchungsgegenstands Lithium-Batterien	42
4.1.2 Untersuchungsgegenstand Lithium-Batterien	48
4.1.3 Netzwerke zum Wissensaustausch im Innovationssystem Lithium-Batterien	50
4.2 Innovationshemmnisse und Fragen an die Modelle	57
4.2.1 Hemmnisse und systemische Probleme in Technologischen Innovationssystemen.....	58
4.2.2 Vorgehen im Projekt	59
4.2.3 Innovationshemmnisse und mögliche Maßnahmen im Bereich Lithium- Batterien	59
4.2.4 Fragen an die Modelle.....	61

5	Wissensdynamiken und Innovationsentstehung – das Modell SKIN-Energy.....	63
5.1	Das Basis-SKIN-Modell	63
5.1.1	Wissen im Basis-SKIN-Modell.....	63
5.1.2	Der Produktraum im Basis-SKIN.....	64
5.1.3	Aus Wissen entstehen Produkte	64
5.1.4	Wertschöpfungskette, Preise und Märkte	65
5.2	Wissen, Expertise und Qualität.....	66
5.2.1	Verschiedene Dimensionen von Wissen	66
5.2.2	Generierung und Austausch für Innovationsprozesse relevanten Wissens	68
5.2.3	Modellierung des Wissensraums und des Wissensaustausches	70
5.2.4	Wissen, Expertise und Qualität	70
5.3	Forschungsprozesse	72
5.4	Start-ups.....	74
5.5	Mütter, Töchter und Konglomerate	76
5.6	Produktraum und Wertschöpfungskette.....	80
5.7	Produktcharakterisierung und Marktrepräsentation	88
5.7.1	Verbindung zwischen Wissen und Batterieparametern	89
5.7.2	Die verschiedenen Absatzmärkte	91
5.7.3	Wie die Märkte bedient werden	93
6	Erlösmöglichkeiten mit stationären Speichern – das Modell AMIRIS.....	94
6.1	Einleitung	94
6.2	Methoden	96
6.2.1	Zeitreihenanalyse.....	96
6.2.2	Agentenbasiertes Strommarktmodell AMIRIS	100
6.2.3	Optimierung von Gebotsstrategien	107
6.2.4	Kopplung der Modelle AMIRIS und SKIN	109
6.3	Szenario.....	110
6.4	Ergebnisse	111
6.4.1	Simulation der Preise	111
6.4.2	Simulation der Erlöspotentiale.....	118
6.5	Diskussion der Ergebnisse.....	120
6.6	Schlussfolgerungen	122
7	Kalibrierung zum Innovationssystem Lithium-Batterien	123
7.1	Charakterisierung nationaler Akteure	123
7.1.1	Identifizierung von Akteuren, Datenquellen.....	123
7.1.2	Die Patentanalyse.....	124
7.1.3	Auszüge aus der Akteurstabelle	129
7.1.4	Eigenschaften und Typisierung der Akteure	133
7.1.5	Kalibrierung des Modells mit den Daten der Akteure	137

7.2 Schnittstelle zu AMIRIS	142
7.3 Technische Daten zur Produktcharakterisierung.....	145
7.4 Ansiedlung einer Li-Ionen Zellproduktion - Erkenntnisse aus der Analyse der globalen Wind- und Photovoltaikindustrie	151
8 Definition und Durchführung der Experimente & Diskussion der Ergebnisse.....	162
8.1 Einleitung	162
8.2 Experiment 1 - Heimische Zellhersteller	166
8.2.1 Beschreibung.....	166
8.2.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	166
8.3 Experiment 2 - Forschungsförderung	169
8.3.1 Beschreibung.....	169
8.3.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	169
8.4 Experiment 3 - Minimale Fabrikgröße Elektromobilität	172
8.4.1 Beschreibung.....	172
8.4.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	172
8.5 Experiment 4 - Partnersuche	174
8.5.1 Beschreibung.....	174
8.5.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	175
8.6 Experiment 5 - Unternehmensstrategie	177
8.6.1 Beschreibung.....	177
8.6.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	178
8.7 Experiment 6 – Finanzielle Förderung	181
8.7.1 Beschreibung.....	181
8.7.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen.....	182
9 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	187

Autorenuordnung:

Kap 1: Bert Droste-Franke

Kap 2.1: Bert Droste-Franke

Kap 2.2: Kevin Jacqué

Kap 2.3: Bert Droste-Franke, Mathias Weidle

Kap 3.1 bis 3.2: Bert Droste-Franke

Kap 3.3: Gabriele Fohr, Bert Droste-Franke

Kap 4.1: Bert Droste-Franke, Gabriele Fohr, Mathias Weidle

Kap 4.2: Bert Droste-Franke, Gabriele Fohr, Tanja Nietgen, Mathias Weidle

Kap 5.1: Markus Voge, Bert Droste-Franke

Kap 5.2 bis 5.3: Bert Droste-Franke

Kap 5.4: Davy van Doren, Tanja Nietgen, Markus Voge, Bert Droste-Franke

Kap 5.5 bis 5.7: Markus Voge, Bert Droste-Franke, Davy van Doren

Kap 6: Marc Deissenroth, Felix Nitsch

Kap 7.1: Markus Voge, Davy van Doren, Gabriele Fohr, Bert Droste-Franke

Kap 7.2: Markus Voge, Marc Deissenroth, Felix Nitsch, Bert Droste-Franke

Kap 7.3: Markus Voge, Kevin Jacqué, Bert Droste-Franke

Kap 7.4: Marlene O'Sullivan

Kap 8: Markus Voge, Davy van Doren, Bert Droste-Franke

1 Einführung

1.1 Hintergrund und Ziele

Mit der Umstrukturierung des Energiesystems im Rahmen der Energiewende sind viele Herausforderungen verbunden. Schließlich muss ein bereits funktionierendes System so umgebaut werden, dass es auch während des Umbaus noch funktioniert und die dann genutzten Elemente auch möglichst im neuen Energiesystem noch Verwendung finden. Die Herausforderungen sind aber nicht nur technischer, sondern auch vielfach organisatorischer Natur. Es gilt im Umbau des Energiesystems sowohl das technische System als auch seine Passung zur zukünftigen Gesellschaft und auch die Auswirkungen aller Elemente auf die Umwelt zu berücksichtigen.

Das Feld der Energieversorgung als geeignete Bereitstellung gewünschter Nutzenergie weist einige Besonderheiten auf, die bei seiner Gestaltung berücksichtigt werden müssen, um etwa über die Setzung von Rahmenbedingungen effektive Gestaltungsmechanismen zu etablieren. Dazu gehört, dass die Verfügbarkeit passender Energieformen ein Grundbedürfnis aktueller Industriegesellschaften darstellt, dass Energie große Bedeutung in Bezug auf Geld und Macht besitzt, dass mit ihr große Auswirkungen auf die natürlichen Prozesse in der Umwelt einhergehen, dass durch aktuelle Entwicklungen, wie die zunehmende Digitalisierung, immer tiefere gesellschaftliche Verknüpfungen entstehen und dass aus den historischen Entwicklungen eine teilweise monopolistische Struktur entstanden ist, die schwer handhabbar und u.a. aufgrund natürlicher Monopole nur schwer auflösbar und ist.

Zur rationalen Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung müssen gleichzeitig drei Wissenskomponenten erarbeitet und kombiniert werden: Wissen über wünschenswerte und gewünschte Ziele (Orientierungswissen), Wissen über Wirkungszusammenhänge (Systemwissen) und Wissen über Handlungsmöglichkeiten und wie diese durchgeführt werden können (Handlungswissen) (vgl. Droste-Franke 2018). In allen drei Komponenten wird sowohl wissenschaftliches Wissen als auch praktisches Wissen inklusive lokalen empirischen Wissens benötigt um ausreichend verlässliche Aussagen treffen zu können. Vor dem Hintergrund, dass zusätzlich berücksichtigt werden muss wie die Zukunft der Gesellschaft in all ihren Facetten voraussichtlich aussehen wird bzw. aussehen könnte, zeigt dies die immensen Herausforderungen auf, die angegangen werden müssen, um die Energiewende zu gestalten. Neben der Funktionalität der Technologien ist dabei die Einbettung der Entstehung und der Nutzung von Technologie in die Gesellschaft zu berücksichtigen. Damit spielen Verhalten und Strukturen der Gesellschaft eine herausragende Rolle, um benötigte Prozesse zukunftsweisend umzusetzen. In diesem Zusammenhang wird auch von soziotechnischen Systemen bzw. Problemen gesprochen (vgl. Büscher et al. 2018, Droste-Franke 2020).

Zusätzlich muss für zukunftsgerichtete Betrachtungen aber auch eine weitere wichtige Wissenskomponente betrachtet werden, die gewissermaßen quer zu den drei oben diskutierten liegt: Wissen über die Zukunft bzw. über aus heutigem Wissen heraus denkbare zukünftige Entwicklungen in allen relevanten Bereichen (vgl. Grunwald 2016). Dabei unterscheiden sich die jeweils relevanten Arten der Unsicherheiten grundlegend zwischen den verschiedenen Gebieten naturwissenschaftlicher Prognosen bzw. Entwicklungsszenarien,

erwartbarer technischer Möglichkeiten und des Wissens um erprobte und etablierbare technische Zusammenhänge sowie der Entwicklung gesellschaftlicher Wünsche und Strukturen bzw. Verhalten. Im Feld der Naturwissenschaften kann man sich grundsätzlich auf wissenschaftlich anerkannte Naturgesetze berufen, hat aber ggf. das Problem fehlender Information bei gleichzeitig nichtlinearen bis hin zu selbstverstärkenden Prozessen. In der Technik weiß man um die Zusammenhänge bzw. technischen Systeme, die mit vorhandener Technik bei gegebenen Rahmenbedingungen realisierbar sind und hat u.a. im Rückgriff auf Naturgesetze in einzelnen Bereichen Vorstellungen darüber was in Zukunft zusätzlich noch möglich sein kann. In den gesellschaftlichen Bereichen inklusive der gesellschaftlich vorangetriebenen Entwicklung von Technik bestehen nicht nur Unsicherheiten bzgl. äußerer Ereignisse, die Einfluss auf die Gesellschaft haben, sondern auch darüber wie Gesellschaft darauf reagieren wird. Hinzu kommt, dass die Gestaltung der Entwicklungen ja gerade Gegenstand der Analysen ist, so dass ihre Ergebnisse, wenn sie in Entscheidungen berücksichtigt werden, selbst die zukünftigen Entwicklungen beeinflussen. Um Aussagen über die Zukunft treffen zu können kann nur Wissen von heute verwendet werden, mit dem sich möglichst robuste Aussagen über die Prozesse der Zukunft treffen lassen. Das gilt gleichzeitig wieder in allen drei Wissensbereichen, in den Bereichen der Ziele, der Wirkungszusammenhänge und der Handlungsoptionen. Empirische Analysen können vor diesem Hintergrund die Grundlage für die Beschreibung von Zusammenhängen liefern, in denen man sich weitgehend sicher ist, dass sie sich in Zukunft nicht verändern werden. Auf diese Art werden Naturgesetze erforscht. Das trifft aber auch auf grundlegende und unter verschiedenen Rahmenbedingungen stabile Verhaltensmuster von Individuen in der Gesellschaft zu. Mit der Ökonomie hat sich z.B. eine sehr erfolgreiche Betrachtungsweise von individuellem Nutzen und Kosten etabliert, die zwar in Teilen immer wieder überdacht, aber in den meisten Fällen nicht grundsätzlich in Frage gestellt wird. Nutzen und Kosten sowie Geld als Mittel um eine funktionierende Ökonomie aufzubauen spielen neben technischen Funktionalitäten und naturgesetzlichen Zusammenhängen eine wesentliche Rolle aktueller Analysen.

Um weitere gesellschaftliche Aspekte abbilden zu können, ist in der Beschreibung von Prozessen die Basierung individueller und gesellschaftlicher Entscheidungen auf multiplen Kriterien zu berücksichtigen und Entstehen und Austausch von Wissen über den betrachteten Sachverhalt als notwendige Voraussetzung rationaler Entscheidungen und als notwendige Voraussetzung technologischer Entwicklungen zu analysieren. Als Grundlage für ihre Analyse können empirische Beobachtungen herangezogen werden, die sich über Einzelfälle hinaus mit der Untersuchung potentiell unveränderbaren Verhaltens beschäftigen.

Im Bereich der Innovationsentstehung sind bereits Heuristiken erarbeitet worden, die differenzierte Zusammenhänge zwischen beteiligten Elementen aufzeigen. Mit ihnen sind unter anderem Akteurstypen identifizierbar, denen Rollen in Prozessen und Funktionen in Bezug auf die Technologieentwicklung zugeordnet werden können. Des Weiteren sind Verhaltensweisen und Möglichkeiten von Akteuren im Bereich der Wissensentstehung und des Wissensaustausches bekannt, die genutzt werden können. Die agentenbasierte Modellierung (ABM) setzt genau an diesem Punkt an. Statt Gesamtzusammenhänge von

Sachverhalten auf Makroebene angeben und dafür zunächst ergründen zu müssen, wird das Verhalten von Akteuren in (Mikro-)Prozessen modelliert, woraus dann makroskopische Phänomene rekonstruiert werden. Dabei sind praktisch nicht oder nur unter sehr weitgehenden Annahmen Einflüsse abbildbar, bei denen Einzelentscheidungen direkte Auswirkungen auf makroskopische Prozesse haben und deren wissens- und meinungsseitige Grundlagen im Modell nicht berücksichtigt sind.

Analysen der "Energiesysteme" haben sich in den letzten 50 Jahren vor allem aus ökonomischen, technischen und naturwissenschaftlich Aspekten heraus entwickelt. Modellbasierte Energiesystemanalysen beschäftigen sich auch noch heute vorwiegend mit diesen Aspekten. Vielfach wurden dabei bereits ökonomische Analysen zunehmend differenzierter gestaltet und z.B. um die Berücksichtigung von Nutzerverhalten ergänzt. Auch für die detaillierte und nutzerbasierte Betrachtung von Investitionsverhalten und der Anwendung von Technologien sind bereits mehrfach Modelle entwickelt und angewandt worden. Auch für den Bereich der Innovationsentstehung bestehen bereits Ansätze. Diese wurden jedoch noch nicht für die Anwendung im Energiebereich angepasst.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Projekts InnoSEn ein Instrumentarium zu erarbeiten, mit dem soziale Mechanismen und gesellschaftliche Rahmenbedingungen für Innovationen von Schlüsseltechnologien der Energiewende untersucht und Empfehlungen für Maßnahmen zu ihrer Verbesserung erarbeitet werden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Wissensgenerierung und Wissensaustausch in Innovationsnetzwerken.

Im Projekt wurde am Beispiel einer ausgewählten Schlüsseltechnologie ein Analyseinstrumentarium, bestehend aus entsprechenden Methoden und Modellen, entwickelt, mit dem Hemmnisse und Verbesserungsmaßnahmen für die Entstehung technisch-innovativer Lösungen erarbeitet werden können.

1.2 Vorarbeiten zum Projekt InnoSEn

Eine ganze Reihe von Analysen ist zur Untersuchung von Innovationsprozessen im theoretischen wie im empirischen Bereich durchgeführt worden. Einen vertieften Einblick in einige Arbeiten geben unter anderem Ahrweiler (2010) und Hanusch und Pyka (2007). Neben allgemeinen Analysen der Rolle von Wissen und Kooperation für Innovationen wurden verschiedene Innovationsbereiche im Hinblick auf ihre Eigenschaften untersucht.

Historisch haben sich verschiedene Ansätze entwickelt, um Innovationsprozesse zu analysieren (Ahrweiler und Pyka 2015). In der neuen ökonomischen und soziologischen Innovationsforschung wird dabei kollektiven Prozessen eine wichtige Rolle zugesprochen. Für ganz wesentlich wird in diesem Zusammenhang die positive Auswirkung von Spill-Over-Effekten durch Weitergabe von Wissen auf das Zustandekommen von Innovationen angesehen. Technologisches Wissen, das für die Produktion notwendig ist, ist aber nicht automatisch verfügbar, da es sich um komplizierte Zusammenhänge und Prozesse handelt, die teilweise noch nicht kodifiziert und somit nicht allgemein verfügbar gemacht wurden (implizites Wissen). Zudem muss das Unternehmen das Wissen verstehen und für sich verwertbar machen können. Die Berücksichtigung dieser Aspekte erfordert es, Kooperationen von Unternehmen und anderen Akteuren, die Wissen beitragen können differenziert zu

betrachten und dabei Unterschiede in diversen Eigenschaften einzelner Unternehmen zu berücksichtigen.

Mit der rein empirischen Analyse der relevanten Prozesse kann nur der aktuelle Stand von Prozessen dokumentiert, aber in den meisten Fällen keine Aussagen über die Zukunft getroffen werden, die aber für die Untersuchung von möglichen Maßnahmen notwendig sind (s.o.). Eine tatsächliche oder im Labormaßstab Einführung von Maßnahmen in Form von Experimenten dagegen weist ebenfalls Probleme auf (Gilbert 2008): Die Isolation einzelner soziale Systeme ist nur sehr schwer möglich und ggf. ethisch problematisch. In den Sozialwissenschaften werden daher vor allem Computermodelle verwendet, mit denen „virtuelle Experimente“ durchgeführt werden können.

Anwendung finden in den Sozialwissenschaften im Wesentlichen Mikrosimulationen, Systemdynamik-Modelle und agentenbasierte Ansätze (s. auch Gilbert 2008). Mit Mikrosimulationen können auf Basis vorhandener Daten zukünftige Situationen konstruiert werden, indem Annahmen über die zeitliche Entwicklung getroffen werden. Die Berechnungen erfolgen allerdings üblicherweise für wenige, aggregierte Größen. Differenzierte Betrachtungen erfordern wesentlich mehr Annahmen für die Veränderungen über die Zeit und werden schnell sehr umfangreich. Zudem können Interaktionen zwischen Akteuren nicht berücksichtigt werden. Systemdynamik-Modelle rechnen mit aggregierten Agenten. Eine Berücksichtigung vieler verschiedener Agenten ist prinzipiell möglich, wird aber schnell sehr unhandlich. Solche Modelle sind gut für die Analyse von Entwicklungen, die über die Betrachtung aggregierter Größen zugänglich sind. Mit Hilfe agentenbasierter Simulation können individuelle Ausgestaltungen von Agenten modelltechnisch gut umgesetzt werden und für die Durchführung entsprechender virtueller Experimente genutzt werden. ABMs dieser Art fungieren unter dem Label „Sozialsimulation“. Die internationale Scientific Community ist mittlerweile groß und seit Jahren etabliert – siehe zum Beispiel die European Social Simulation Association ESSA¹ als Wissenschaftsgesellschaft des Feldes und das Journal of Artificial Societies and Social Simulation JASSS² als eine der maßgeblichen Fachzeitschriften.

Die Vorteile, Techniken der Sozialsimulation in der Innovationsforschung zu nutzen, sind bereits durch zahlreiche agentenbasierte Modelle belegt (vgl. Ahrweiler 2010: 233-315). Diese Modelle bilden die Interaktion von Wissen und Akteuren, von Outputs und Organisationen, von Netzwerkformation und -evolution ab. Sie simulieren die Wechselbeziehungen zwischen existierenden Innovationspolitiken und -förderstrategien, zukünftige Innovationspolitikenszenarios und alternative Technologiepfade zur Erhöhung des Innovationspotentials. Um zum Beispiel die strukturelle Dynamik in wissensintensiven Industrien zu verstehen und zu beschreiben, wäre eine dauerhafte Beobachtung der Vernetzungsprozesse nötig. Für einige der wichtigen Prozesse (die Generierung und Diffusion von Wissen) sind aber Beobachtungen schwierig bis unmöglich. Eine agentenbasierte Simulation produziert kontinuierliche und dynamische Daten im Rahmen der innovationsökonomisch und wirtschaftssoziologisch entwickelten Annahmen unter

¹ <http://www.essa.eu.org>

² <http://JASSS.soc.surrey.ac.uk>

Berücksichtigung der empirisch beobachteten Zusammenhänge und bietet so Beobachtungs- und Experimentierbedingungen, die im empirischen Feld nicht gegeben sind. Einen Überblick und eine kritische Diskussion existierender Simulationsmodelle zum Thema Innovation stellen Watts und Gilbert (2014) bereit.

Mit der Durchführung sozialer Netzwerkanalysen von Innovationsnetzwerken und agentenbasierter Modellierungen (ABM) im Projekt InnoSEn wird an die beschriebenen vielfach verwendeten und anerkannten Verfahren der Techniksoziologie angeknüpft.

1.3 Methodisches Vorgehen und Kapitelstruktur

Für die Untersuchung von Dynamiken in Innovationsprozessen, die durch Wissen und Kooperation geprägt sind, wird auf das SKIN-Modell zurückgegriffen (s. z.B. Ahrweiler und Pyka 2015, Ahrweiler et al. 2015a/b, Gilbert et. al. 2007). Es wurde bereits vielfach im Kontext der Innovationsforschung in Unternehmensnetzwerken angewendet. Es ist ein quantitatives Verfahren, das unterschiedliche Wissensarten, Ressourcen (Wissen, finanzielles Kapital) und Verarbeitungskapazitäten von Akteuren in einem sozialen Innovationsnetzwerk modelliert und daraus Szenarien zu unterschiedlichen Rahmenbedingungen berechnen kann. Unter Berücksichtigung von „Was-wäre-wenn“-Fragen können so auf der Grundlage empirischer Daten Einschätzungen über Netzwerkeffekte verschiedener Verhaltensweisen von Unternehmen und externer Einflussnahmen erstellt werden. Anwendungen des Modells erfolgten unter anderem im Rahmen der Projekte:

- SEIN, Simulating self-organising Innovation Networks, EU-Projekt
- NEMO, Network Models, Governance and R&D collaboration networks, EU-Projekt
- SMART 2010/0025, Using Network Analysis to monitor and track Effects resulting from Changes in Policy Intervention and Instruments, EU-Projekt
- IPSE, Innovation Policy Simulation for the Smart Economy, Irische Regierung
- GREAT, Governance of Responsible Innovation, EU-Projekt
- ManETEI, Managing Emerging Technologies for Economic Impact, EU-Projekt

Weitere Anwendungen sind unter anderem Gilbert et al. (2014) zu entnehmen. Auf die Projektergebnisse konnte durch die freie Verfügbarkeit der Source-Codes für wissenschaftliche Zwecke im InnoSEn-Projekt aufgebaut werden.

Für die Umsetzung des Projekts InnoSEn wurden verschiedene Elemente zusammengenommen. Im ersten Schritt wurden vorhandene Systemanalysen herangezogen, um Schlüsseltechnologien zu identifizieren und den Untersuchungsbereich des Projekts festzulegen (Kapitel 2). Um relevante Fragen behandeln zu können, wurde neben Literaturrecherchen ein Co-Design-Ansatz verfolgt, in dem in drei Workshops mit praktischen Experten zunächst Hemmnisse im Bereich des Innovationssystems analysiert wurden, woraus dann Fragen an die Modellierungen erarbeitet und im zweiten Workshop zusammen mit den ersten Modellen und Zwischenergebnissen diskutiert wurden (Kapitel 4). In einem letzten Workshop wurden die Endergebnisse vorgestellt und diskutiert. Als wesentliche strukturierende Grundlage dafür wurde die Theorie Technologischer Innovationssysteme herangezogen (Kapitel 3). Die Modellierungsarbeiten unterteilen sich in Arbeiten zur

Weiterentwicklung, Kalibrierung und Anwendung des SKIN-Modells (Kapitel 5) und des AMIRIS Modells (Kapitel 6), das zur Berechnung der Erlöspotentiale stationärer Speicher herangezogen wurde. Die Kalibrierung des SKIN Modells durch das IQIB (Kapitel 7) wurde dabei durch Beiträge durch das AMIRIS-Modell, technische Daten zur Produktcharakterisierung und durch umfangreichere, empirisch basierte Analysen der möglichen Ansiedlung einer Lithium-Ionen-Zellproduktion in Deutschland unterstützt. In Kapitel 8 werden die Definition und Ergebnisse der Modellexperimente diskutiert bevor in Kapitel 9 die Ergebnisse zusammengefasst werden, Schlussfolgerungen gezogen werden und ein Ausblick gegeben wird.

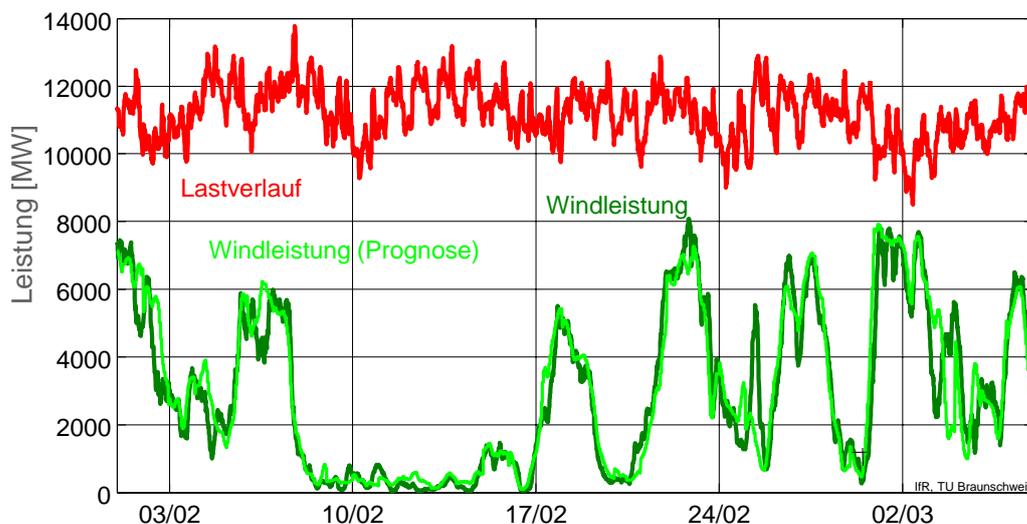
2 Lithium-Batterien als Technologieschwerpunkt des Projekts

2.1 Herausforderungen und Schlüsseltechnologien

2.1.1 Einleitung

Das Wirtschaften in den Industrienationen erfordert es, Energie in ausreichender Menge an möglichst beliebigen Orten zur Verfügung stellen zu können. Daher ist eine gute Energieversorgung zentral und grundlegend für moderne Gesellschaften. Gleichzeitig führen die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen und die befürchteten umweltseitigen Veränderungen, vor allem die globalen Veränderungen durch den anthropogenen Treibhauseffekt, zu einer starken Umstrukturierung des aktuellen Energiesystems. Nach der derzeitigen Entwicklung und den verschiedenen Zielen für zukünftige Energiesysteme wird voraussichtlich der Anteil der Nutzung erneuerbarer Energien stark ansteigen, mit einem großen Anteil der direkten Nutzung von Wind und Solareinstrahlung. Besonders im Stromsektor führen die Veränderungen zu großen Herausforderungen, da die fehlende Flexibilität, vor allem von Windkraft und Photovoltaik-Anlagen, durch zusätzliche andere Flexibilität im System ausgeglichen werden muss. Solche Ausgleichstechnologien stellen daher Schlüssel für die Umsetzung der Energiewende dar.

2.1.2 Zeitliche Schwankungen der Erzeugung



Source: IfR / TU Braunschweig

Abbildung 1: Lastverlauf und Windleistung im Vattenfall Hochspannungsnetz (1.2.-6.3.2008) (Quelle: IfR/TU Braunschweig, Bünger et al. 2009:13)

Eine wesentliche Aufgabe von Schlüsseltechnologien zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage im Stromsektor besteht im zeitlichen Ausgleich. Dabei sind langfristige Lücken und kurzfristige Schwankungen zu unterscheiden. Eine beispielhafte Situation des bereitgestellten Stroms durch Windkraftanlagen im Februar 2008 im elektrischen Netz von Vattenfall zeigt, dass bereits in der Vergangenheit Situationen entstanden sind, in denen ein Ausgleich von Lücken über mehrere Tage notwendig ist. (s. Abbildung 1). In Zukunft ist zu erwarten, dass die Lücken noch wesentlich größer werden.

Neben solch langer Lücken müssen auch kurzfristige Schwankungen ausgeglichen werden. Abbildung 1 zeigt, dass auch bei der Windkraft starke Schwankungen auftreten, deren Ausgleich kurzfristig hohe Leistungen erfordern.

2.1.3 Räumliche Verteilung elektrischer Energie

Neben der zeitlichen Bereitstellung von Energie über zusätzliche technische Optionen, hat die Menge und die räumliche Verteilung von Erzeugungsanlagen Einfluss auf die Stärke der Gradienten und Tiefe der Lücken. Im Fall einer Wetterfront mit Starkwind kann mit einer relativ gleichmäßigen Verteilung von Anlagen erreicht werden, dass die Erzeugungsleistung nur gering schwankt (Pape et al. 2013). Trotz optimaler Verteilung von Solar- und Windkraftanlagen über Europa wird jedoch voraussichtlich ein Bedarf an zusätzlicher Ausgleichsenergie bestehen bleiben (Heide et al. 2010). Für die räumliche Verteilung der Elektrizität ist ein ausreichend dimensioniertes elektrisches Netz notwendig. Ohne entsprechende Kapazitäten in Übertragungsnetzen kann die erzeugte Energiemenge nicht zu den Verbrauchern transportiert werden. Kritisch sind hier die räumlich hohen Distanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch und geringe Übertragungskapazitäten zwischen verschiedenen Regionen in Europa. ENTSO-E (2014, 59ff) identifiziert besondere Probleme mit den Verbindungen der baltischen Staaten mit anderen EU-Ländern, von Großbritannien und Irland mit dem europäischen Festland, von Italien mit den nördlichen Nachbarn und der spanischen Halbinsel mit dem Rest von Europa. In gewissem Maße können Flexibilitäten vor Ort, z.B. durch Speicher, Netzdefizite ausgleichen (vgl. Steinke et al. 2012).

2.1.4 Technologien als Schlüssel zur Umsetzung

Die Bereitstellung ausreichender Flexibilität erfordert es, geeignete Technologien im System vorzuhalten, die bei Bedarf eingesetzt werden können. Diese können entweder Energie zur Verfügung stellen und so Lücken in der Versorgung ausgleichen. Umgekehrt können aber auch Technologien eingesetzt werden, die Strom verbrauchen, um Stromüberschüsse zu nutzen und im entsprechenden Maße weniger erzeugende Anlagen abschalten zu müssen. Technologien, mit denen sowohl Energie für eine spätere Nutzung gespeichert werden als auch wieder gezielt bereitgestellt werden kann, werden Energiespeicher genannt. Die Speicherung kann in mechanischer, elektrischer und chemischer Energieform geschehen (Droste-Franke et al. 2012, 83 ff). Jede Technologie hat spezielle technische Eigenschaften, die sie für bestimmte Aufgaben geeigneter oder weniger geeignet macht. So haben z.B. Schwungradspeicher einen hohen Verlust über die Zeit, können aber sehr schnell viel Leistung bereitstellen. Sie werden daher als Leistungsspeicher mit Speicherung über kurze Zeiträume eingesetzt. Gase wie Wasserstoff und Methan können lange Zeit fast verlustfrei gelagert werden. Daher ist die Speicherung in Gasen auch über längere Zeiträume sinnvoll. Um die Einsatzfähigkeit und damit die Systemrelevanz von Technologien einschätzen zu können wurden im Projekt Energiesystemanalysen durchgeführt und weitere Aufgaben, die durch die Systemanalysen nicht, oder nicht ausreichend abgedeckt werden können im Hinblick auf ihre Systemrelevanz sowie entsprechend einsetzbare Technologien analysiert.

Als Anforderungen an entsprechende Schlüsseltechnologien kann festgestellt werden:

- Systemtechnisch
 - Es sollten wesentliche Schlüsselaufgaben mit den Technologien erfüllt werden können, d.h. mit ihrem Einsatz können systemrelevante Aufgaben erfüllt werden.
 - Die eingesetzten Technologien sollen die Aufgaben kohlenstoffarm erfüllen.
 - Es werden Aufgaben betrachtet, die erst in Zukunft relevant werden, da erst dann solche Aufgaben deutlich werden bzw. anfallen (vgl. Droste-Franke 2015b). Dazu sollten Szenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien untersucht werden.
- Eine ökonomische Relevanz der Technologien sollte absehbar sein. Das heißt, die Technologien sollten bei derzeitig zu hohen Kosten ein entsprechendes Kostensenkungspotential aufweisen. Zusätzlich sollte ein Erlöspotential bestehen, d.h. ein Nutzen sollte absehbar sein, der vergütet werden könnte.
- Es sind keine zu starken nicht-technischen Hemmnisse für den Einsatz der Technologien zu erwarten.

Um vor dem Hintergrund der Anforderungen an die zu betrachtenden Schlüsseltechnologien die Einsatzfähigkeit und damit die Systemrelevanz von Technologien einschätzen zu können, wurden im Projekt Energiesystemanalysen durchgeführt und weitere Aufgaben, die durch die Gesamtsystemanalysen nicht, oder unzureichend abgedeckt werden können, im Hinblick auf ihre Systemrelevanz sowie entsprechend einsetzbare Technologien analysiert. Dabei spielen sowohl technische als auch ökonomische Aspekte eine Rolle. Die betrachteten Aufgaben ergeben sich vor allem bei hohem Anteil erneuerbarer Energien.

2.2 Relevanz von Technologien nach typischen Energiesystemanalysen

2.2.1 Einleitung

Zur Identifikation der Schlüsseltechnologien im zukünftigen Energiesektor bedarf es der Analyse der möglichen Entwicklungspfade und der Systemaufgaben des Energiesystems. Der Einsatz der Technologien ergibt sich in diesem Zusammenhang aus der notwendigen Befriedigung der Nachfrage und der Erfüllung der Systemaufgaben des Energiesystems. Die Vielzahl an potentiellen Technologien und ihrer Charakteristiken machen einen Vergleich sowie die Identifikation der optimalen volkswirtschaftlich und energietechnisch am besten geeigneten Technologien für ein von schwankenden erneuerbaren Energien geprägtes System der Zukunft notwendig. Dieser Vergleich und die anschließende Identifikation der systemrelevanten Schlüsseltechnologien für Deutschland bis zum Jahre 2050 erfolgt im folgenden Kapitel mit Hilfe von Energiesystemanalysen in stündlicher Auflösung. Systemaufgaben mit Zeitskalen unter einer Stunde werden im nächsten Kapitel separat betrachtet.

2.2.2 Stromsektor

Zur Ermittlung der potentiellen Entwicklungsmöglichkeiten und der Systemaufgaben des zukünftigen Energiesystems in Deutschland müssen die grundlegenden Einflussfaktoren eines solchen Systems analysiert werden. Eine im Rahmen dieses Berichtes durchgeführte Literaturrecherche zur Thematik der zukünftigen Energiesysteme ergab, dass die

Zusammensetzung eines Energiesystems in erster Linie von folgenden Einflussfaktoren abhängt (Elsner et al. 2015):

- Elektrischer Endenergieverbrauch: Der Primärnutzen des Einsatzes der Erzeugungstechnologien besteht aus der Deckung der Stromnachfrage der Verbraucher. Jedes spezifische elektrische Endenergieverbrauchsszenario Deutschlands besitzt demnach einen individuellen optimalen Kraftwerkspark. Die Entwicklung des elektrischen Endenergieverbrauchs für Deutschland bis 2050 wurde abgeschätzt und soll im weiteren Verlauf exogen vorgegeben werden.
- Energieerzeugung aus Wind und Sonne: Die durch politische Programme geförderte Erzeugung aus erneuerbaren Energien besitzt einen starken Einfluss auf den Markt und auf den Einsatz anderer Energietechnologien. Aus diesem Grund wurden verschiedene Annahmen für die Höhe der Erzeugung aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen getroffen, indem sie für die betrachteten Szenarien für Deutschland bis 2050 exogen als politisches Ziel vorgegeben wurden.
- CO₂-Preis: Der Emissionsrechtehandel, getrieben durch die politischen Energie- und Klimaziele für 2050 (European Commission 2017), und die damit einhergehenden variablen Kosten des CO₂-Preises besitzen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes konventioneller Kraftwerke. Vor dem Hintergrund, dass die CO₂-Preiszeitreihen stochastisch geprägt sind und deren weiterer Verlauf nur schwer vorhersehbar ist, wurde die Entwicklung des Mittelwertes des CO₂-Preises bis 2050 aus externen Quellen abgeleitet und ebenfalls exogen vorgegeben (Kunz 2016).

Die Rahmenbedingungen des Energiesystems und die damit einhergehende Kraftwerkseinsatzplanung in 2050 ergeben sich entsprechend aus der Auslegung der exogenen Variablen „Elektrischer Endenergieverbrauch“, „Energieerzeugung aus Wind und Sonne“ und „CO₂-Preis“. Diese Auslegung der exogenen Variablen wurde über eine Literaturrecherche hergeleitet. Zu diesem Zweck wurde ein Vergleich an frei verfügbaren Metaanalysen durchgeführt und der potentielle Verlauf der exogenen Variablen bis 2050 über einen Pool an potentiellen Szenarien wiedergegeben. Das Ergebnis ist ein hoch verzweigter Szenariobaum für jede exogene Variable.

Um die hohe Komplexität des Szenariobaums und die Anzahl der Entwicklungsmöglichkeiten auf ein Minimum zu reduzieren, wurde im Anschluss ein Szenarioreduktionsverfahren angewandt. Dieses Verfahren fusioniert Schritt für Schritt die sich am nächsten liegenden Szenarien zu einem neuen Szenario zusammen. Das resultierende Szenario bekommt in diesem Zusammenhang als Auslegung den Mittelwert seiner Vorgänger. Eine Ausnahme gibt es: Ist einer der zu fusionierenden Vorgänger das negative oder positive Extremszenario der ursprünglich ermittelten Metaanalyse, so übernimmt das neue Szenario dessen Auslegung. Auf diese Weise soll die Bandbreite des Definitionsbereichs der betrachteten Variablen beibehalten werden. Das Szenarioreduktionsverfahren endet, wenn nur noch drei Szenarien übrigbleiben. Die finalen Szenarien werden als optimistische (+), moderate (o) und pessimistische (-) Repräsentativszenarien bezeichnet.

Die Anwendung des beschriebenen Szenarioreduktionsverfahrens auf die Ergebnisse der Metaanalyse ergaben somit jeweils ein optimistisches, ein moderates und ein pessimistisches Repräsentativszenario für die elektrische Last, die Erzeugung aus Windenergie- und

Photovoltaikanlagen und den CO₂-Preis in Deutschland für 2050. Die Ergebnisse dieser Repräsentativszenarien sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Ergebnisse für das optimistische, moderate und pessimistische Repräsentativszenario für die exogenen Variablen „Elektrischer Endenergieverbrauch“, „Energieerzeugung aus Wind und Sonne“ und „CO₂-Preis“ (Kunz 2013, Kirchner et al. 2016, Buttler et al. 2015)

Szenario	Erzeugung aus Wind und PV (TWh)	Last (TWh)	CO₂-Preis (Euro/Tonne CO₂)
Optimistisch (+)	750	900	110
Moderat (o)	473	625	83
Pessimistisch (-)	275	425	49

Die Abschätzung der Gewichtung jedes Repräsentativszenarios ergibt sich aus der relativen Anzahl an Szenarien die das Repräsentativszenario umfasst. Die Gewichtungen der Repräsentativszenarien sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Gewichtung des optimistischen, moderaten und pessimistischen Repräsentativszenarios für die exogenen Variablen „Elektrischer Endenergieverbrauch“, „Energieerzeugung aus Wind und Sonne“ und „CO₂-Preis“

Szenario	Erzeugung aus Wind und PV [%]	Last [%]	CO₂-Preis [%]
Optimistisch (+)	27	9	20
Moderat (o)	40	28	30
Pessimistisch (-)	33	63	50
Summe	100	100	100

Aus den resultierenden Auslegungen der Repräsentativszenarien der exogenen Variablen lassen sich per Kombination 27 potentielle Rahmenbedingungen für das deutsche Energiesystem in 2050 herleiten. Auch in diesem Zusammenhang ist eine Gewichtung, die die Häufigkeit der Wahl der Annahmen angibt, möglich. Sie kann auch als „Eintrittswahrscheinlichkeit“ von Annahmen unter den betrachteten Szenarien gesehen werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit jeder spezifischen Zusammensetzung an Rahmenbedingungen in den betrachteten Szenarien ergibt sich aus der Multiplikation der Gewichtungen der exogenen Variablen, aus denen sie zusammengesetzt wurde. Das Ergebnis der Zuordnung der einzelnen Eintrittswahrscheinlichkeiten kann Abbildung 2 entnommen werden.

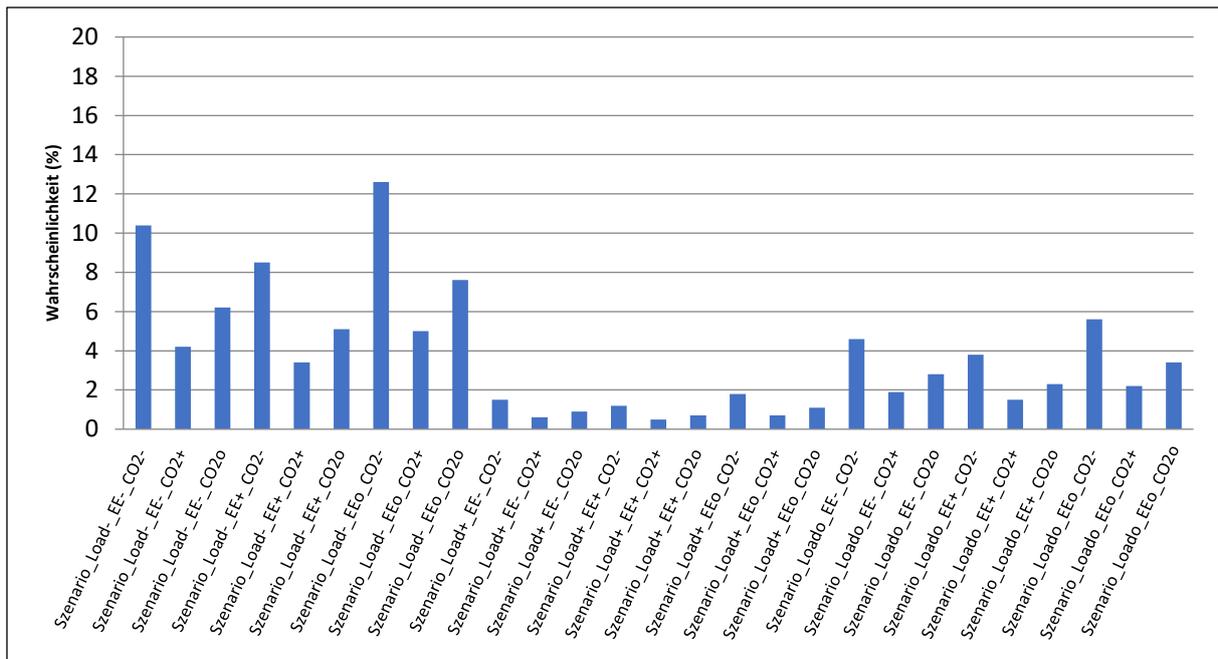


Abbildung 2: Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Rahmenbedingungs-
zusammensetzungen (Kunz 2013, Kirchner et al. 2016, Buttler et al. 2015)

Für jedes der 27 angegebenen Zusammensetzungen an exogenen Variablen wurde im Folgenden der optimale Kraftwerkspark ermittelt. Die Auswahl der Erzeugungstechnologien soll in diesem Zusammenhang nach dem Prinzip der Merit-Order erfolgen. Das finale Ergebnis der Analyse ermöglicht eine Klassifizierung der potentiellen Schlüsseltechnologien für Deutschland im Jahre 2050.

Die Erzeugungs- und Speichertechnologien, die in diesem Zusammenhang zur Verfügung stehen und somit als potentielle Schlüsseltechnologien in Frage kommen, sind in folgender Auflistung angegeben:

- Druckluftspeicher (adiabat)
- Druckluftspeicher (diabat)
- Gasturbine (Bio)
- Gasturbine (Erdgas)
- Geothermie
- Kohlekraftwerk
- Kohlekraftwerk mit CCS3
- Lithium-Ionen (mobil)⁴
- Lithium-Ionen (stationär)
- Power-to-Gas (CH4)
- Power-to-Gas (H2)
- Pumpspeicherkraftwerk

³ Carbon dioxide capture and storage

⁴ Für die Technologie „Lithium-Ionen (mobil)“ wurde ein Second-Use-Ansatz gewählt, d.h. für die Beschaffung der Batterie selbst fallen keine Investitionskosten an. Die Kosten für die notwendige häusliche Ladeinfrastruktur eines jeden Fahrzeugs sowie die reduzierte Lebensdauer der Batterie wurden jedoch berücksichtigt.

- Wasserkraftwerk

Aufgrund der hohen Komplexität des Energiesystems und der damit einhergehenden hohen Anzahl an Erzeugungstechnologien bedarf es zur Ermittlung des optimalen Kraftwerksparks nach dem Merit-Order-Prinzip den Einsatz eines Simulationstools, das die Komplexität und das Verhalten des realen Energiesystems bestmöglich wiedergeben kann. Das Simulationstool was zu diesem Zweck in dem vorliegenden Bericht eingesetzt wurde, ist das Programm „ESYS“ (Elsner et al. 2015).

Die Methodik des Simulationstools „ESYS“ ist in Abbildung 3 angegeben und kann wie folgt beschrieben werden:

“Mittels einer Berechnungsroutine erfolgt solange eine Zuordnung von Flexibilitätstechnologien zur Deckung der Residuallast, bis die Residuallast zu jedem Zeitpunkt des Jahres vollständig abgedeckt ist und eine ausgeglichene Bilanz von Erzeugung und Verbrauch gewährleistet ist. Dabei wird die positive Residuallast in Bänder von 1 GW zerlegt und jedem dieser Bänder eine Technologie zur Deckung des darin auftretenden Bedarfs zugeordnet. Dies können Erzeugungs-, aber auch Speichertechnologien oder flexible Lasten sein. Speicher können ihre Energie aus der negativen Residuallast beziehen oder zur Minimierung der Speicherkapazität und damit der Speicherkosten in begrenztem Umfang auch aus positiven Bändern nachgeladen werden. Die Stromerzeugungstechnologien werden charakterisiert durch den Umwandlungswirkungsgrad Brennstoff zu Strom, spezifische CO₂-Emissionen, Investitionskosten in Verbindung mit einer Anlagenlebensdauer sowie Betriebs- und Wartungskosten (inklusive Startkosten). Jeder Anlagentyp kann zudem im Modell mit einer Potenzialgrenze für die installierbare Leistung sowie für die eingesetzte Primärenergie hinterlegt werden. Speicher werden unter anderem charakterisiert durch Lade- und Entladewirkungsgrad und die speicherbare Energiemenge“ (ebd.).

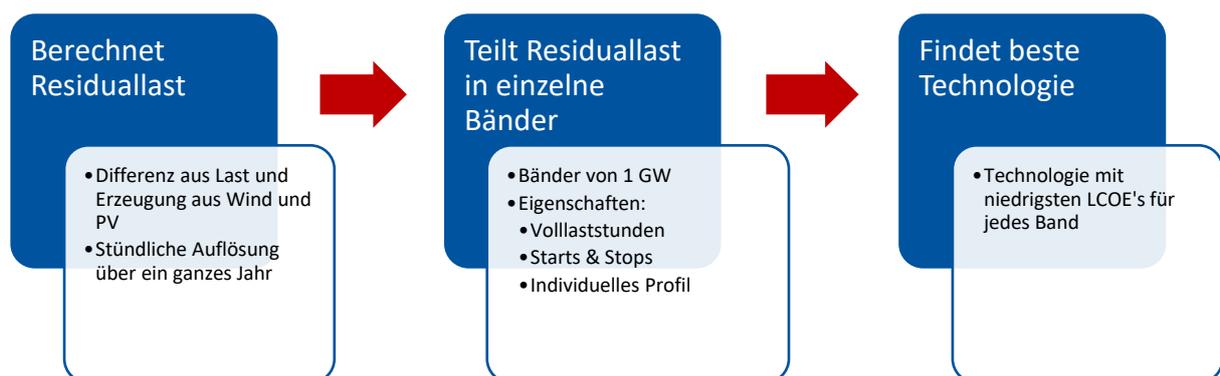


Abbildung 3: Methodik des Simulationstools „ESYS“ (Elsner et al. 2015)

Die angenommenen Werte für die Kosten- und Technologieparameter der Erzeugungs- und Speichertechnologien für 2050 beruhen auf den Ergebnissen der Studie „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“ von Acatech (Elsner et al. 2015) sowie vereinzelt Studien zur Thematik der zukünftigen Energiesystemsimulation (Kunz 2013, Kirchner et al. 2016, Buttler et al. 2015, Janßen et al. 2015, Memmler et al. 2014, Görner et al. 2014). Vor dem Hintergrund, dass jede Technologie durch sein technisches Potential

beschränkt ist, wurde in diesem Bericht das verfügbare Potential der einzelnen Technologien mit Hilfe unterschiedlicher Studien abgeschätzt und in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Verfügbare Potentiale für die unterschiedlichen Erzeugungs- und Speichertechnologien (Görner et al. 2014, Viebahn et al. 2012, Knebel et al. 2014, Hartmann et al. 2012, Wenzel und Kunz 2015, Noack et al. 2015)

Technologie	Potential
Gasturbine (Biogas)	57 GW
Druckluftspeicher (adiabat)	27.3 TWh
Druckluftspeicher (diabat)	27.3 TWh
Gasturbine (Erdgas)	unbeschränkt
Kohlekraftwerk	unbeschränkt
Geothermie	6.4 GW
Kohlekraftwerk mit CCS	41 GW
Lithium-Ionen (mobil)*	135 GW / 0.03 TWh
Lithium-Ionen (stationär)	unbeschränkt
Power-to-Gas (CH4)	380 TWh
Power-to-Gas (H2)	1766 TWh
Pumpspeicher	85.5 GWh
Wasserkraftwerk	5.6 GW

Folgende Annahmen des Simulationstools „ESYS“ müssen dabei berücksichtigt werden (Elsner et al. 2015):

- Die Modellrechnungen sind auf Deutschland begrenzt, mögliche Flexibilitätsbereitstellung durch Nachbarländer wird nicht betrachtet.
- Die Auslegung des Technologieparks an Flexibilitätsoptionen erfolgt auf Basis volkswirtschaftlicher Erwägungen als Minimierung der annuitätischen Gesamtkosten des Stromsystems auf Vollkostenbasis (Investitionen, jährliche Fixkosten und variable Kosten).
- Die Betrachtung ist ferner stichjahrbezogen und geht (modelltechnisch) davon aus, dass ein komplettes Stromsystem im Jahr 2050 neu aufgebaut wird („Grüne Wiese“-Ansatz).
- Der Lastgang basiert auf dem heutigen Lastgang, linear skaliert mit dem Stromverbrauch des Szenarios.
- Demand-Side-Management wird nicht abgebildet.
- Im Rahmen der CO₂-Emissionen werden nur direkte Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe angerechnet. Vorkettenemissionen für Förderung und Transport von Brennstoffen und die Errichtung der Anlagen sowie andere Treibhausgase werden nicht berücksichtigt.

Für jede ermittelte Zusammensetzung an exogenen Variablen und somit für einen gegebenen elektrischen Endenergieverbrauch, eine gegebene regenerative Erzeugung aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen und einen festgelegten CO₂-Preis wurde mit Hilfe eines umfangreichen Merit-Order-Verfahrens in „ESYS“ die optimale Zusammensetzung an Technologien für 2050 ermittelt. Die Ergebnisse der Simulationen für alle 27 Rahmenbedingungszusammensetzungen sind den Abbildungen 4 und 5 zu entnehmen. Die maximale zeitliche Auflösung des Modells beträgt eine Stunde.

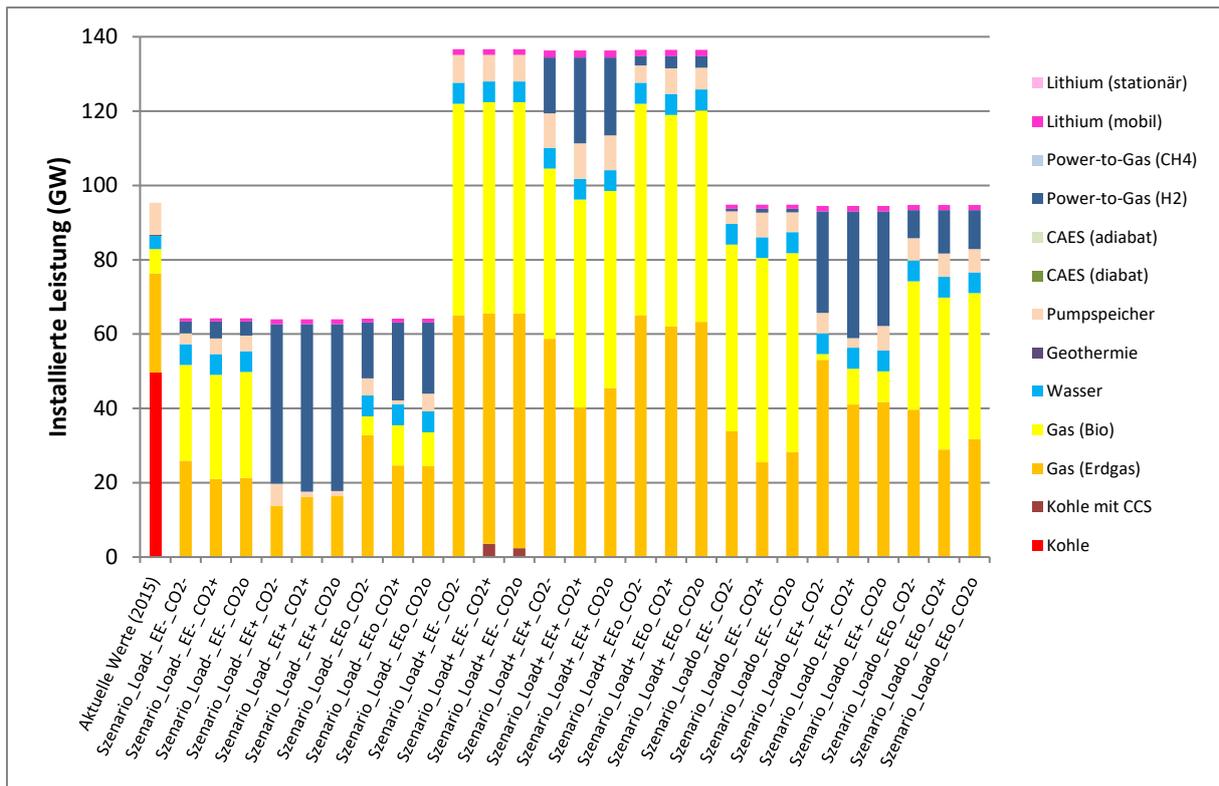


Abbildung 4: Optimaler Kraftwerkspark für die unterschiedlichen Rahmenbedingungs-
zusammensetzungen ohne Erzeugung aus Wind und Sonne

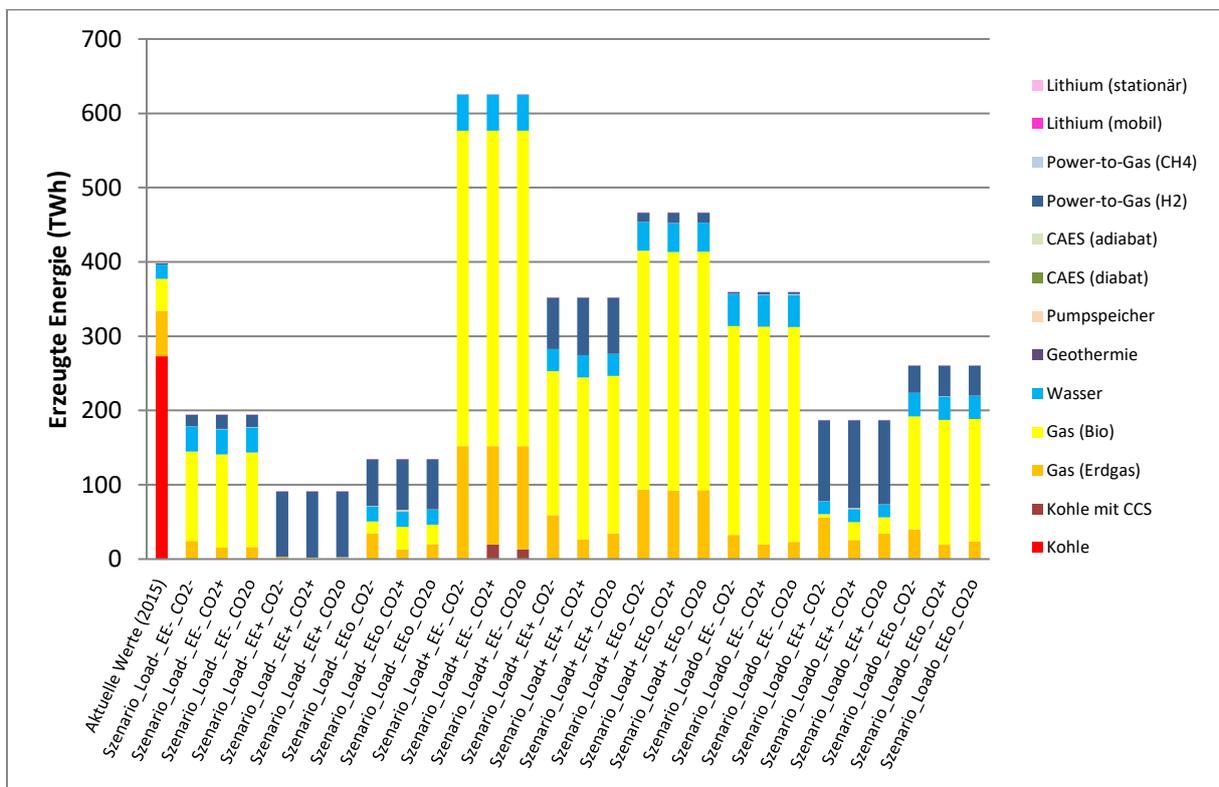


Abbildung 5: Energieerzeugung des optimalen Kraftwerksparks für die unterschiedlichen
Rahmenbedingungs-
zusammensetzungen ohne Erzeugung aus Wind und Sonne

Gewichtet man die Ergebnisse der installierten Leistung aus Abbildung 4 mit den ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten aus Abbildung 2 so ergibt sich der in Abbildung 6 dargestellte, erwartete mittlere Zubau der einzelnen endogenen Erzeugungstechnologien.

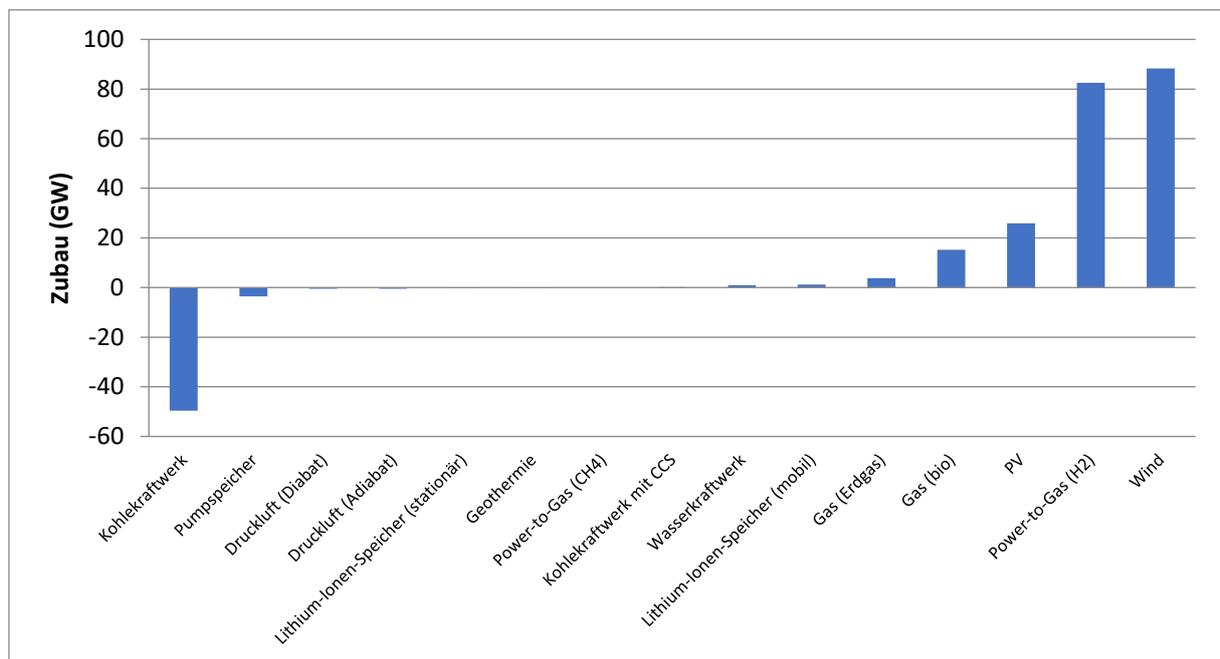


Abbildung 6: Erwarteter mittlerer Zubau an installierter Leistung der unterschiedlichen Erzeugungs- und Speichertechnologien bis 2050 für Deutschland (ENTSO-E 2017)

Analysiert man die Ergebnisse für den Zubau an installierter Leistung, so ist erkennbar, dass bezogen auf die installierte Leistung neben den exogen vorgegebenen Windenergie- und Photovoltaikanlagen vor allem die Gaskraftwerke und die damit in Verbindung stehenden Langzeitspeicher einen Zubau erfahren werden. Durch den hohen Ausbau an erneuerbaren Energien wird die Volatilität der Erzeugungskurve in Zukunft ansteigen. Folglich wird es vermehrt zu Überschüssen und Defiziten der Residuallast mit hohen Leistungsgradienten kommen. Der Überschuss kann über die Langzeitspeicher herausgenommen und zur Lastdeckung der Folgeperioden eingesetzt werden. Werden die unterschiedlichen Potentiale und Kosten der Langzeitspeichertechnologien berücksichtigt, so zeigt der Langzeitspeicher „Power-to-Gas (H₂)“ die geringsten Gestehungskosten im Simulationstool „ESYS“ auf und wird aus diesem Grund im Modell mit durchschnittlich 82 GW ausgebaut.

Reicht die Energie der Langzeitspeicher nicht aus, so bedarf es einer flexiblen Erzeugungstechnologie wie dem Gaskraftwerk, welches zu Spitzenlastzeiten eingesetzt werden kann. Durch den tendenziellen Anstieg der CO₂-Emissionspreise wird das Gaskraftwerk, welches mit Biogas gefeuert wird und demnach geringe CO₂-Emissionen ausstößt, einen höheren Ausbau als das reine Erdgaskraftwerk erfahren. Insgesamt ergibt sich aus den Simulationsergebnissen ein mittlerer Ausbau der Gaskraftwerke um zirka 20 GW.

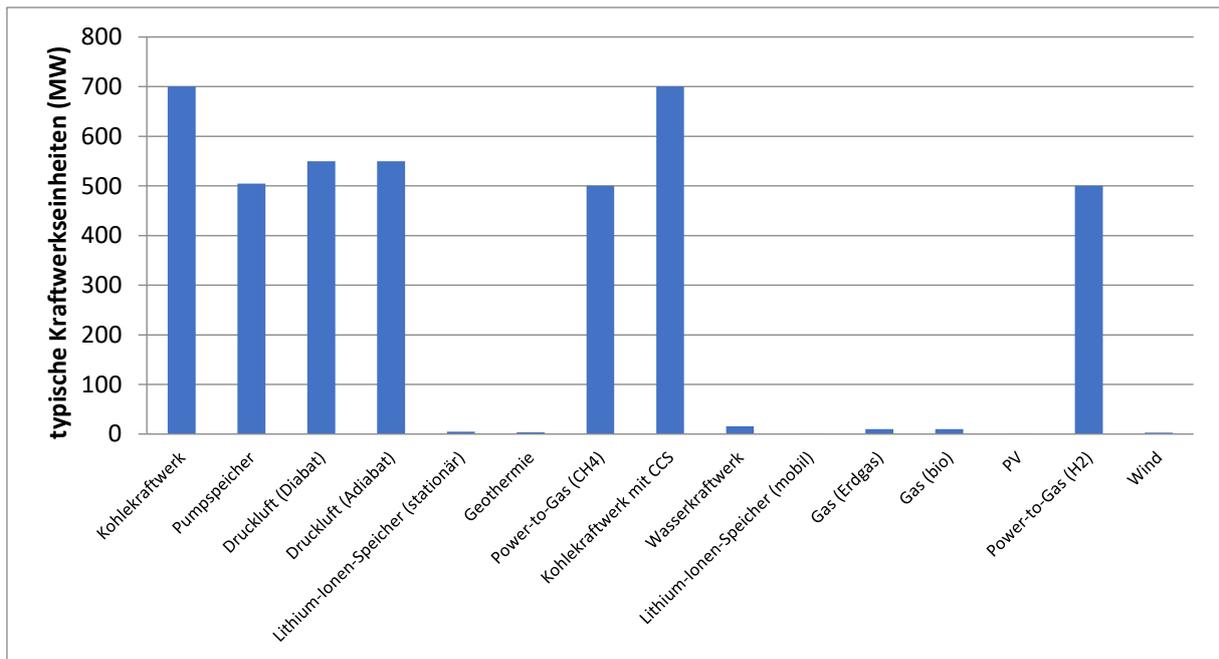


Abbildung 7: Nennleistung der typischen Anlagegröße für die unterschiedlichen Erzeugungs- und Speichertechnologien (Elsner et al. 2015, Görner et al. 2014, Badedda et al. 2016, Sauer et al. 2010, Droste-Franke 2015a)

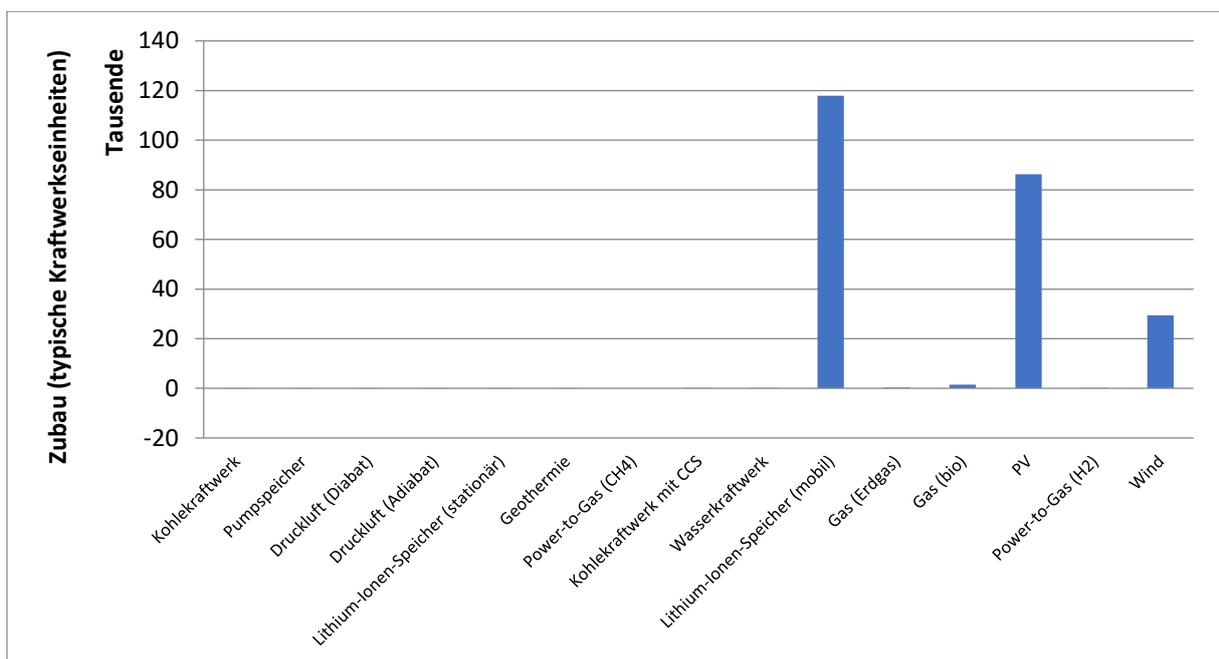


Abbildung 8: Erwarteter mittlerer Zubau an Anlageneinheiten der unterschiedlichen Erzeugungs- und Speichertechnologien bis 2050 für Deutschland (Elsner et al. 2015, Görner et al. 2014, ENTSO-E 2017, Badedda et al. 2016, Sauer et al. 2010, Droste-Franke 2015a)

Die Ergebnisse für den Zubau an installierter Leistung aus dem Simulationstool „ESYS“ lassen somit als Reaktion auf den Ausbau der erneuerbaren Energien auf einen Anstieg der Langzeitspeicher „Power-to-Gas (H₂)“ sowie der ergänzenden Spitzenlastkraftwerke „Gaskraftwerk (Bio/Erdgas)“ schließen. Die Speichertechnologie „Power-to-Gas (H₂)“ und die

Erzeugungstechnologie „Gaskraftwerk (Bio/Erdgas)“ können folglich als Schlüsseltechnologien des zukünftigen Energiesystems Deutschlands angesehen werden.

Um die installierte Leistung ebenfalls ins Verhältnis zur Leistung ihrer typischen Kraftwerkseinheit zu setzen, wurden die Ergebnisse des erwarteten Zubaus durch die aus der Literaturrecherche berechneten und in Abbildung 7 dargestellten Kennzahlen für die mittlere Nennleistung einer typischen Kraftwerkseinheit geteilt. Die Ergebnisse dieser Division sind Abbildung 8 zu entnehmen.

Analysiert man neben der installierten Leistung die Ergebnisse für den Zubau an Kraftwerkseinheiten, so ist erkennbar, dass bezogen auf die typischen Speicher- bzw. Kraftwerkseinheiten für die Lithium-Ionen-Speicher ebenfalls einen enormen Zuwachs erwarten wird. Dieser Zuwachs kann dadurch begründet werden, dass die Langzeitspeicher „Power-to-Gas (H₂)“ und Gaskraftwerke ausschließlich die steigenden Fluktuationen der erneuerbaren Energien in den unteren Leistungsbändern der Residuallast profitabel auffangen können. Nur bei ausreichend hohen Volllaststunden, bedingt durch ihre Mindestgröße, können die Speichertechnologie „Power-to-Gas (H₂)“ und die Erzeugungstechnologie „Gaskraftwerke“ ihre Fixkosten decken und somit rentabel agieren. Folglich bedarf es zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit einer weiteren Technologie, die die kurzfristigen Fluktuationen der erneuerbaren Energien zu Spitzenlastzeiten ausgleicht. Die Lithium-Ionen-Speicher aus den Elektrofahrzeugen besitzen durch ihre Größe und den Einsatz als „Second-Use-Battery“ hohe Flexibilität und relativ geringe Investitionskosten. Folglich besitzt der Lithium-Ionen-Speicher auch bei geringen Volllaststunden relativ geringe Gestehungskosten und ist somit prädestiniert für den Ausgleich kurzfristigen Fluktuationen der Residuallast. Dieser Tatbestand begründet den Anstieg der Einheiten der Speichertechnologie „Lithium-Ionen-Speicher (mobil)“ in den Simulationsergebnissen von „ESYS“ und führt die Technologie „Lithium-Ionen-Speicher (mobil)“ als weitere Schlüsseltechnologie des Energiesystems für Deutschlands im Jahre 2050 an.

2.2.3 Wärme- und Verkehrssektor

Im zukünftigen Energiesystem Deutschlands spielen nicht nur die Technologien zur reinen Stromerzeugung eine entscheidende Rolle. Der Anstieg der erneuerbaren Energien führt zu einer Intensivierung der Sektorkopplung zwischen dem Strom-, Wärme- und Verkehrssektor. Zur Identifikation aller relevanten Schlüsseltechnologien des Energiesystems Deutschlands im Jahre 2050 bedarf es folglich einer Analyse der Kopplung von Wärme und Strom sowie der Kopplung von Verkehr und Strom.

Wärmesektor

Zur Analyse des Einflusses der Sektorkopplung von Wärme und Strom auf die Auswahl der optimalen Schlüsseltechnologien im Energiesystem des Jahres 2050 wurde die Entwicklung des Stromverbrauchs für Wärmeanwendungen untersucht. Die Ergebnisse der Metaanalyse zur Entwicklung des Stromverbrauchs für Wärmeanwendungen sind Abbildung 9 zu entnehmen.

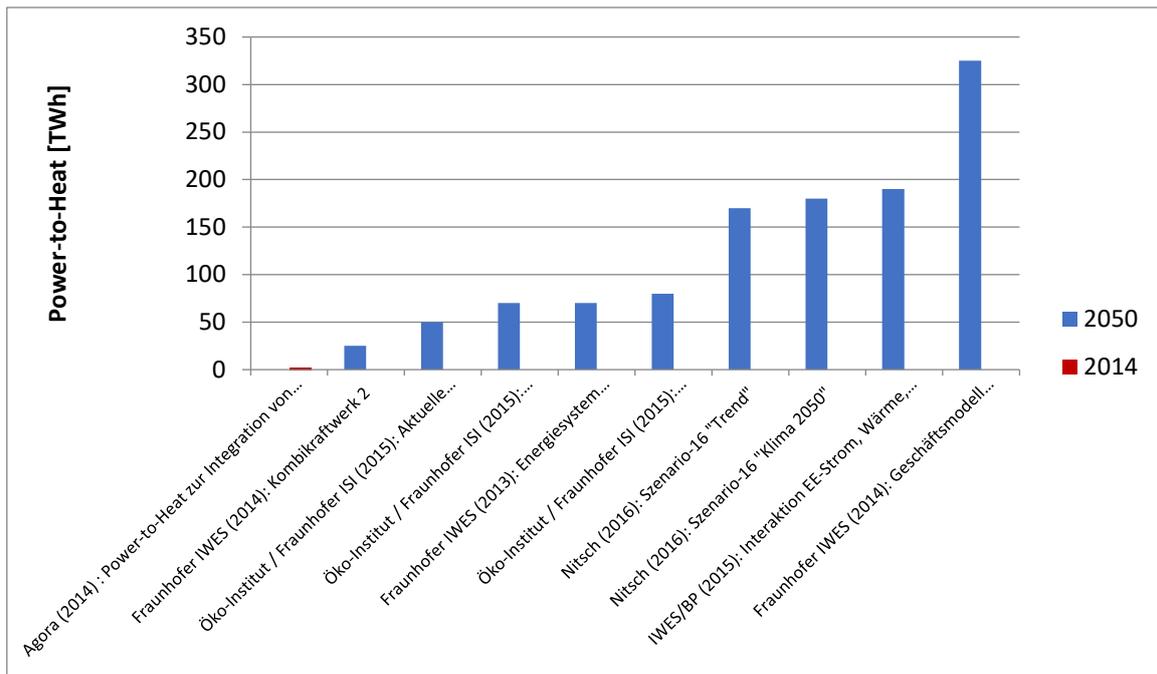


Abbildung 9: Ergebnis der Metaanalyse für die Entwicklung des Stromverbrauchs für Wärmeanwendungen in Deutschland bis 2050 (Kirchner et al. 2016, Sandrock et al. 2015)

Ausgehend vom Stromverbrauch in 2014 kann den Ergebnissen der Metaanalyse entnommen werden, dass bis 2050 durch den potentiellen Ausbau der erneuerbaren Energien der Einsatz von Strom im Wärmesektor attraktiver wird. Hintergrund ist, dass in einem von fluktuierenden erneuerbaren Energien geprägten Energiesystem der Überschuss an Strom ökonomisch vermehrt in Wärme gespeichert werden kann.

Um den Strom in Wärme umzuwandeln, wird sich in diesem Bericht auf den Einsatz zweier potentieller Heiztechnologien beschränkt: die Wärmepumpe und der Elektrodenkessel. Der Vergleich der Gestehungskosten unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklung der Kostenparameter bis 2050 und in Abhängigkeit der Volllaststunden in Abbildung 10 zeigt, dass sich die Gestehungskostenkurven der Wärmepumpe und des Elektrodenkessels bei zirka 1300 Volllaststunden schneiden (Elsner et al. 2015, Görner et al. 2014, Lund et al. 2010, Sandrock et al. 2015, Gerhardt et al. 2014). Folglich zeigt die Wärmepumpe ab einer Volllaststundenanzahl von 1300 h geringere Gestehungskosten als der Elektrodenkessel auf und ist somit profitabler. Die weitere Untersuchung des spezifischen Wärmebedarfs und der Volllaststunden unterschiedlicher Wohngebäudevarianten zeigt, dass ausgehend vom heutigen Stand der Gebäudeenergieeffizienz die Volllaststunden eines Heizsystems mindestens 1500 h im Jahr betragen (Härdtlein et al. 2016). Die Anwendung dieser Mindestgröße an Volllaststunden auf die Gestehungskostenkurve der Wärmepumpe und des Elektrodenkessels lässt darauf schließen, dass die Wärmepumpe unabhängig von der Wohngebäudevariante stets geringere Gestehungskosten als der Elektrodenkessel vorweist und somit die wirtschaftlichere Heiztechnologie darstellt. Die Wärmepumpe kann somit als weitere relevante Schlüsseltechnologie des Energiesystems für Deutschland in 2050 angesehen werden.

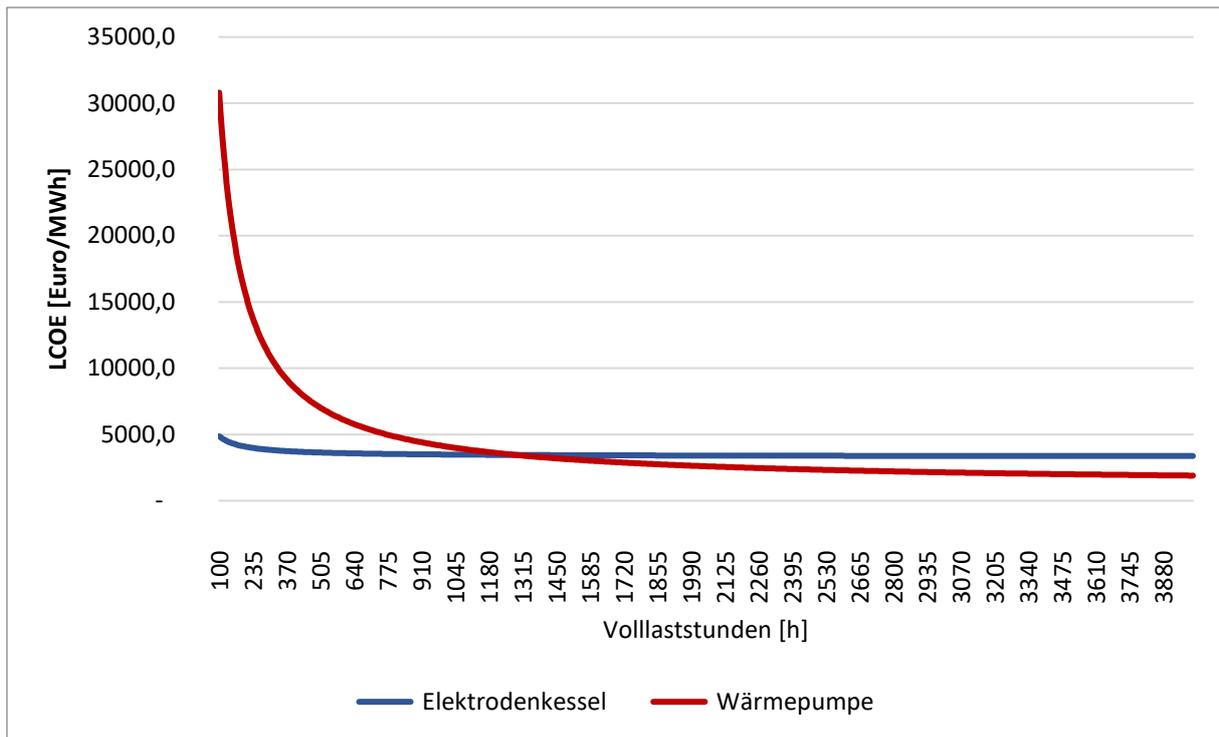


Abbildung 10: Vergleich der Gesteungskosten des Elektrodenkessels und der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Volllaststunden (Elsner et al. 2015, Görner et al. 2014, Lund et al. 2010, Sandrock et al. 2015, Gerhardt et al. 2014). CO2-Emissionen sind in den Gesteungskosten nicht berücksichtigt

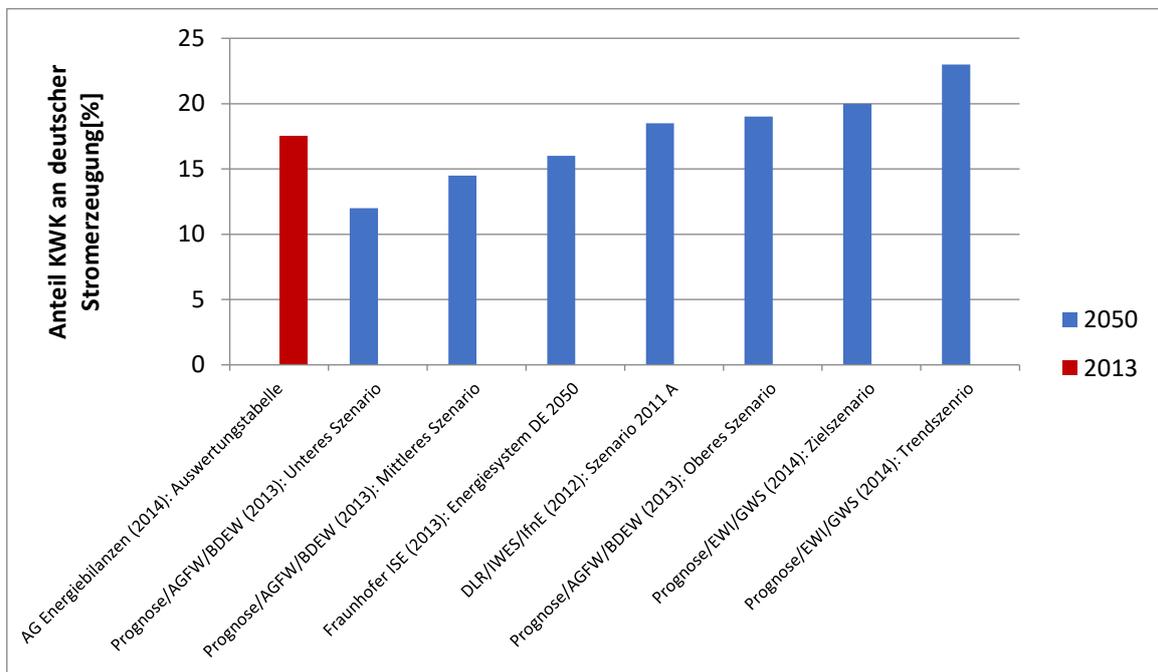


Abbildung 11: Ergebnis der Metaanalyse für die Entwicklung des Anteils der KWK an der deutschen Stromerzeugung bis 2050 (Kirchner et al. 2016, ENTSO-E 2017, Lund et al. 2010, Sandrock et al. 2015, Gerhardt et al. 2014)

Neben den Wärmespeichern spielt die Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls eine entscheidende Rolle in der Kopplung des Strom- und Wärmesektors. Zu diesem Zweck wurde ebenfalls die Entwicklung des Anteils der KWK an der deutschen Stromerzeugung untersucht.

Die Ergebnisse der Metaanalyse zur Entwicklung des Anteils der KWK an der deutschen Stromerzeugung sind Abbildung 11 zu entnehmen.

Die Ergebnisse der Metaanalyse zur Entwicklung des Anteils der KWK an der deutschen Stromerzeugung zeigen, dass die der Anteil an KWK bis 2050 in Deutschland nur in vereinzelt Fällen den politischen Zielwert von 25% erreichen wird. Die Ursache für die Stagnation des Anteils an KWK bis 2050 liegt in ihrer beschränkten Flexibilität. Der Anstieg erneuerbarer Energien geht mit einer höheren Fluktuation der Residuallast einher und setzt somit eine höhere Flexibilität der Versorgungstechnologien voraus. Der Erzeugungstechnologien mit Kraft-Wärme-Kopplung besitzen ausgehend von ihrem aktuellen Leistungsgradienten keinen entscheidenden Einfluss auf das Energiesystem der Zukunft und können demnach nicht als Schlüsseltechnologie bezeichnet werden (Lund et al. 2010, Sandrock et al. 2015, Gerhardt et al. 2014).

Verkehrssektor

Neben dem Wärmesektor besitzt der Verkehrssektor einen großen Einfluss auf die Energiebilanz eines Landes (Kunz 2013). Zur Analyse des Einflusses der Sektorkopplung von Verkehr und Strom auf die Auswahl der optimalen Schlüsseltechnologien im Energiesystem des Jahres 2050 wurde die Entwicklung des Stromverbrauchs im Verkehrssektor untersucht. Die Ergebnisse der Metaanalyse zur Entwicklung des Stromverbrauchs im Verkehrssektor sind Abbildung 12 zu entnehmen.

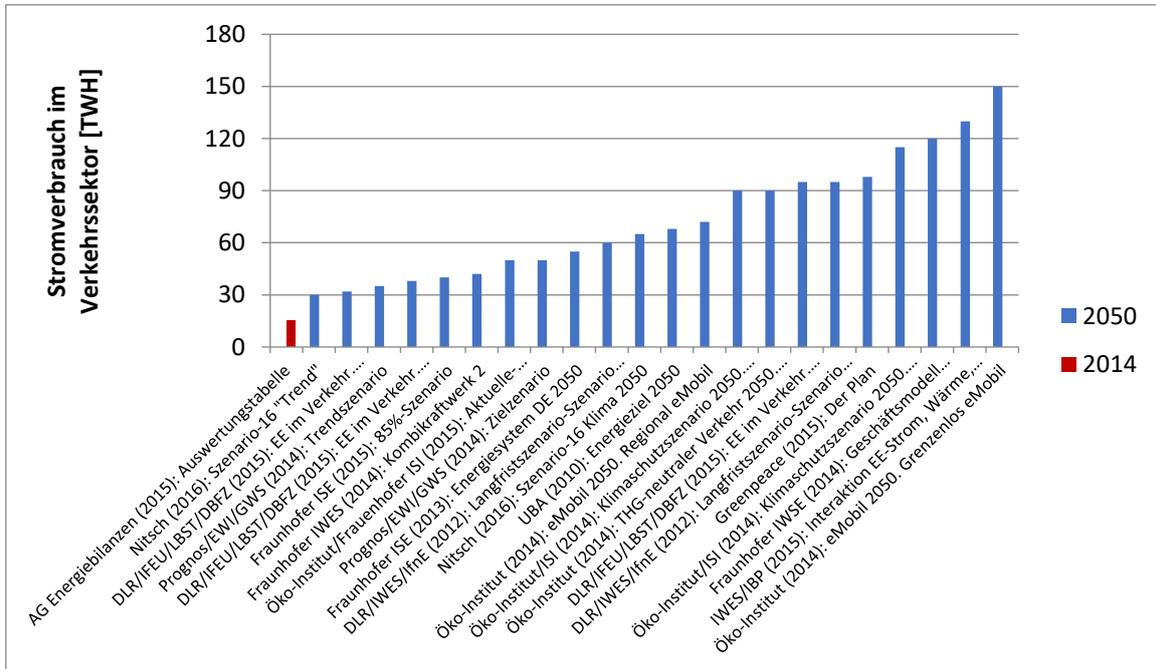


Abbildung 12: Ergebnis der Metaanalyse für die Entwicklung des Stromverbrauchs im Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 (Kirchner et al. 2016, Buttler et al. 2015)

Die Ergebnisse der Metaanalyse zeigen, dass in Zukunft durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und die politischen Energie- und Klimaziele für 2050 mit einem erhöhten Stromverbrauch im Verkehrssektor zu rechnen ist (European Commission 2017). Zu

beachten bleibt, dass der tatsächliche Stromverbrauch des Verkehrssektors von der angestrebten Elektrofahrzeug-Quote abhängt und in der Metaanalyse zwischen 20% und 100% variiert.

Die Einbindung eines elektrischen Antriebs in einem Kraftwagen setzt den Einsatz einer Batterie voraus. Die Batterie garantiert in diesem Zusammenhang die Verfügbarkeit der Energie zum Antrieb des Motors und auf diese Weise die vom Kunden geforderte Mobilitätsfreiheit. Welche Batterie im Elektroauto eingesetzt wird, hängt von einer Vielzahl an Parametern, wie z.B.: Energie- und Leistungsdichte, Kosten, Sicherheit, Lebensdauerzyklen und Effizienz ab. Um eine optimale Auswahl zu treffen, bedarf es folglich eines Vergleichs der Parameter der unterschiedlichen Batterietypen. Dieser Vergleich ist in Tabelle 4 abgebildet.

Aufgrund der hohen Anforderung der Verkehrsmobilität an Energiedichte, Sicherheit und Lebensdauer der Batterie setzen die Automobilhersteller aktuell fast ausschließlich auf Lithium-Ionen-Batterien (Kirchner et al. 2016, Bedrich 2010). Solange keine neue Speichertechnologie mit besseren Eigenschaften und geringeren Kosten auf den Markt kommt, kann davon ausgegangen werden, dass die Technologie Lithium-Ionen-Speicher den Verkehrssektor dominieren wird und somit als weitere Schlüsseltechnologie für das Energiesystem Deutschlands im Jahre 2050 definiert werden kann.

Tabelle 4: Technologiesteckbrief diverser Batteriespeichersysteme (Elsner et al. 2015, Görner et al. 2014, Badeda et al. 2016, Sauer et al. 2010, Droste-Franke 2015a, Bedrich 2010)

Technologie	Energie- dichte [Wh/kg]	Leistungs- dichte [W/kg]	Kosten [€/kWh]	Sicher- heit	Lebens- dauer [Zyklen]	Effizienz [%]
Blei-Säure- Batterie	25-50	75-300	50-300	+	200-1500	70-85
Lithium-Ionen- Batterie	70-410	150-315	200-1800	0	300-3000	90-95
Redox-Flow- Batterie	60-80	0.75-1.5	100-1000	0	10000	70-85
Natrium- Schwefel- Batterie	103	100	200-900	-	4500	89
Metall- Metalloxid- Batterie	1000	1 000	>150	-	>200	70-80
Wasserstoff	580- 33000	1 000	6	0	/	22

2.2.4 Fazit

Schlussfolgernd konnte festgestellt werden, dass das Energiesystem Deutschlands in 2050, welches durch den Ausbau erneuerbarer Energien geprägt ist, einen Zubau an Gaskraftwerken sowie Kurzzeit- und Langzeitspeichern benötigt, um die ansteigenden Schwankungen der Residuallast der Zukunft ausgleichen und somit die Versorgungssicherheit volkswirtschaftlich

am effizientesten garantieren zu können. Des Weiteren konnte auf Grundlage der durchgeführten Recherche die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Bedarf an Strom im Wärme- und Verkehrssektor durch politische und wirtschaftliche Regularien ansteigen wird. Dieser Anstieg in der Stromnachfrage im Wärme- und Verkehrssektor favorisiert den Einsatz von Lithium-Ionen-Speichern und Wärmespeichern, die sich durch ein hohes Innovationspotential und hohe energietechnische Flexibilität auszeichnen. Folglich kann gemäß den Ergebnissen des „ESYS“-Tools aus energietechnischer und volkswirtschaftlicher Sicht bei vorausgesetztem Ausbau der erneuerbaren Energien die Speichertechnologie „Lithium-Ionen-Speicher“, „Wärmespeicher“ und Langzeitspeicher „Power-to-Gas (H₂)“ sowie die Erzeugungstechnologie „Gaskraftwerke“ als Schlüsseltechnologien des Energiesystems in 2050 definiert werden.

2.3 Weitere Systemaufgaben

2.3.1 Systemaufgaben und Zeitskalen

Für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage lässt sich eine ganze Reihe von Systemaufgaben identifizieren. Die wesentlichen haben Perrin et al. (2015) auf Basis von DERri (2014) und Akhil et al. (2013) zusammengestellt. Diese sind im Folgenden dargestellt (basierend auf Perrin et al. 2015, 115ff). Die *typischen Zeitskalen* sind in Klammern angegeben:

- Zeitverschiebung („Electric energy time shift“) (*Stunden*): Zeitliche Verschiebung elektrischer Energie im Netz aufgrund von Preisarbitrage durch Nutzung der Preisdifferenzen bei An- und Verkauf von elektrischer Energie zu verschiedenen Zeiten
- Spitzenkappung („Peak-shaving“) (*Stunden*): Reduzierung der Nachfrage durch Bereitstellung von Energie in Zeiten hoher Nachfrage
- Frequenzunterstützung („Frequency support“) (*Sekunden*): kontinuierliche Regulierung durch Energiebereitstellung und -nutzung mit dem Ziel die erlaubten Grenzen der Frequenzabweichungen des Wechselstroms im Netz einzuhalten
- Regelenergie („Control power/regulation“) (*Sekunden bis Minuten*): Regelung bzw. Ausgleich momentaner Abweichungen von Angebot und Nachfrage
- Leistungsregulierung bei unregelmäßigen Energiequellen („power regulation with intermittent sources“) (*Sekunden bis Minuten*): Regulierung des Leistungsaustauschs mit übergeordneten Netzwerkebenen
- Rotierende und stehende Reserve („spinning reserves, standing reserves“) (*Minuten bis Stunden*): Bereitstellung von Reserve mit vorhandenen laufenden oder stehenden Anlagen, sehr kurzfristig bis längerfristig
- Kurzfristige Spannungsunterstützung („Voltage support – short timescale“) (*Sekunden bis Minuten*): Blindleistungsunterstützung auf Netzebene zu Haltung der Spannungshöhe in den erlaubten Grenzen
- Lastnachbildung („Load following“) (*Minuten bis Stunden*): Bereitstellung von Energie bzw. Speicherung mit dem Ziel das Angebot an die Lastkurve anzunähern.
- Schwarzstart („Black start“) (*Sekunden bis Minuten*): Schwarzstartkapazität bereithalten um die Elektrizitätsversorgung, z.B. nach einem technischen Ausfall, anzufahren.
- Glättung des Elektrizitätsangebots einer Anlage („Smoothing for integration of non-predictable sources“) (*Minuten bis Stunden*): Ausgleich des Stromangebots um eine möglichst gleichmäßige Abgabe zu erreichen.

- Investitionsaufschub („Investment Deferral“) (*Stunden*): Netzfremdliche Einspeisung um die Netzinfrastruktur optimal zu nutzen und Investitionen in dem Bereich so lange wie möglich hinauszuschieben
- Langfristige Spannungsunterstützung („Voltage support – long timescale“) (*Minuten bis Stunden*): Spannungsbereitstellung um die Netzspannung in den erlaubten Bereichen zu halten
- Qualitäts- und Stabilitätsmanagement („Power quality and stability“) (*Sekunden*): Gewährleistung einer verlässlichen und qualitativ hochwertigen Versorgung mit wenigen Schwankungen in der bereitgestellten Energie und Leistung für Kunden
- Verlässlichkeit der Versorgung („Power reliability“) (*Sekunden bis Minuten*): Vermeidung von Ausfällen der Elektrizitätsversorgung

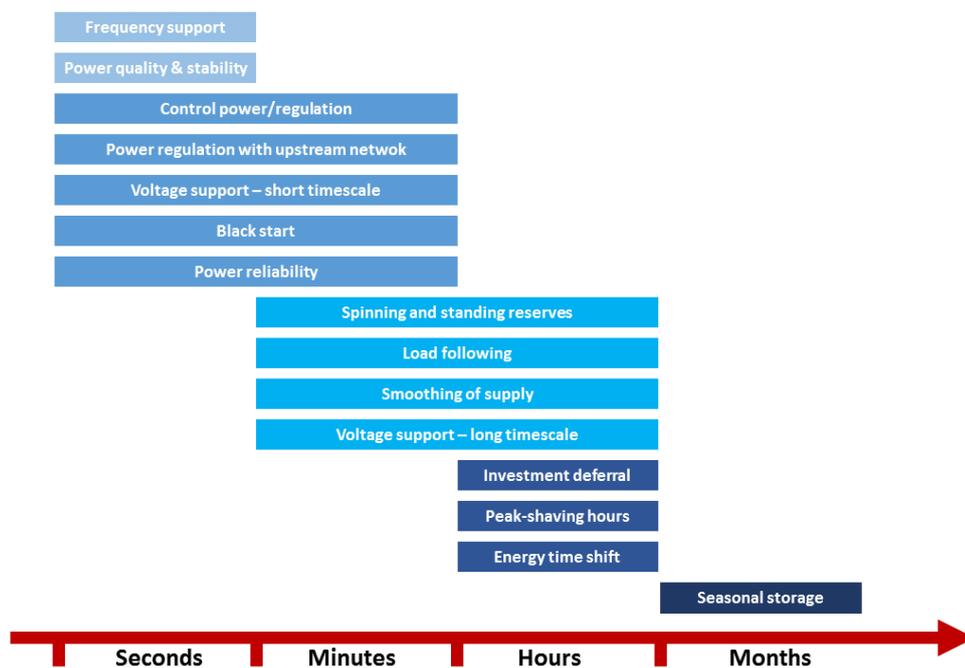


Abbildung 13: Systemaufgaben und die zugehörige Zeitskala

In Abbildung 13 sind die Systemaufgaben und ihre Zeitskala dargestellt. Allgemein können Systemaufgaben vor allem hinsichtlich Netzdienlichkeit und Systemdienlichkeit unterschieden werden (Sterner et al. 2015). Mit netzdienlich werden hier Aufgaben beschrieben, die stabilisierend und betriebserhalten bzw. –fördernd wirken. Als systemdienlich werden Aufgaben bezeichnet, deren Ziel eine Flexibilisierung des Energiesystems und die Minimierung von Schwankungen ist. Systemdienliche Aufgaben werden i.d.R. auf Verteilnetzebene oder übergeordneter Ebene bewältigt.

Neben den Systemaufgaben können Ausgleichstechnologien im Stromsektor auch sogenannte Systemdienstleistungen bereitstellen. Hierzu zählen in einem Energiesystem mit gesteigertem EE-Anteil (>80%) die Frequenzhaltung (Momentanreserve und Regelleistungsbereitstellung), Spannungshaltung (Blindleistung und Kurzschlussleistung), Versorgungswiederaufbau und Betriebsführung (Rehtanz et al. 2014).

2.3.2 Charakterisierung und Klassifizierung von Speichertechnologien

Für die verschiedenen Einsatzgebiete und die Erbringung von Systemaufgaben lassen sich unterschiedliche Anforderungen und Charakteristika an Technologien zum Energieausgleich ableiten. Folgend sind in Tabelle 5 die wichtigsten nach Perrin et al. (2015), Sterner und Stadler (2014) und Bengler et al. (2013) dargestellt und kategorisiert.

Tabelle 5: Wichtige Parameter und Kenngrößen zur Klassifizierung von Energiespeichern

Kategorie	Anforderung / Charakteristika / Kenngröße
Physikalisch	Elektrisch Elektrochemisch/chemisch Mechanisch Thermisch
Energetisch	Leistung <ul style="list-style-type: none"> - Leistungsdichte - Leistungsgradient - Positive und negative Regelleistung Energie <ul style="list-style-type: none"> - Speicherkapazität - Energiedichte
Technisch	Wirkungsgrad Selbstentladungsrate Temperaturabhängigkeit Lebensdauer <ul style="list-style-type: none"> - Zyklisch - Kalendarisch
Zeitlich	Kurzzeit Langzeit Ansprechzeit <ul style="list-style-type: none"> - Aktivierungszeit - Dynamik - Ein- und Ausspeicherdauer
Räumlich	Zentral Dezentral Ortsfest Mobil
Ökonomisch	Märkte Kapitalkosten Betriebskosten

Jede Technologie zum Energieausgleich erfüllt eine oder mehrere dieser Anforderungen in höherem Maße, als eine alternative Technologie. Die jeweils geeignetste muss nach den individuellen Anforderungen und Gegebenheiten ausgewählt werden. Zumeist wird dies über

die Berechnung und den Vergleich der Kosten verschiedener Ausgleichsoptionen bewerkstelligt. Die Option mit den geringsten Gesamtkosten wird dann als geeignetste herangezogen.

Das Simulationsmodell „ESYS“ berechnet das Energiesystem mit größtem volkswirtschaftlichem Nutzen. Hierzu werden die LCOE (Levelized Cost of Electricity) des Gesamtsystems kalkuliert, wobei das System mit den geringsten LCOE als das optimale betrachtet wird. Die maximale Auflösung des Modells liegt bei einer Stunde. Möglichkeiten des Einsatzes für kurzfristige Ausgleichs mit Zeitskalen unterhalb einer Stunde werden somit nicht berücksichtigt. Dieses ist die übliche Herangehensweise in Energiesystemanalysen (vgl. Droste-Franke 2015b). Eine deutlich höhere zeitliche Auflösung ist bei den Modellen meist mit einem deutlich höheren Daten- und Zeitaufwand für die Berechnungen verbunden.

Geeignete Technologieoptionen für den kurzfristigen Energieausgleich können neben der Berechnung der minimalen Kosten auch über eine Bewertung der Anforderungen ermittelt werden. Als kurzfristige Ausgleichs können alle Systemaufgaben mit einer Zeitskala bis zu mehreren Minuten benannt werden:

- Frequenzunterstützung („Frequency support“) (*Sekunden*): kontinuierliche Regulierung durch Energiebereitstellung und -nutzung mit dem Ziel die erlaubten Grenzen der Frequenzabweichungen des Wechselstroms im Netz einzuhalten
- Regelenergie („Control power/regulation“) (*Sekunden bis Minuten*): Regelung bzw. Ausgleich momentaner Abweichungen von Angebot und Nachfrage
- Leistungsregulierung bei unregelmäßigen Energiequellen („power regulation with intermittent sources“) (*Sekunden bis Minuten*): Regulierung des Leistungsaustauschs mit übergeordneten Netzwerkebenen
- Kurzfristige Spannungsunterstützung („Voltage support – short timescale“) (*Sekunden bis Minuten*): Blindleistungsunterstützung auf Netzebene zu Haltung der Spannungshöhe in den erlaubten Grenzen
- Schwarzstart („Black start“) (*Sekunden bis Minuten*): Schwarzstartkapazität bereithalten um die Elektrizitätsversorgung, z.B. nach einem technischen Ausfall, anzufahren.
- Qualitäts- und Stabilitätsmanagement („Power quality and stability“) (*Sekunden*): Gewährleistung einer verlässlichen und qualitativ hochwertigen Versorgung mit wenigen Schwankungen in der bereitgestellten Energie und Leistung für Kunden
- Verlässlichkeit der Versorgung („Power reliability“) (*Sekunden bis Minuten*): Vermeidung von Ausfällen der Elektrizitätsversorgung

Die wichtigsten Anforderungen, um die oben genannten kurzfristigen Systemaufgaben zu bewerkstelligen, sind:

- Kurze Ansprechzeit
- Hohe zyklische Lebensdauer
- Hohe Leistung

In Tabelle 6 sind die technischen und ökonomischen Eigenschaften verschiedener Speichertechnologien dargestellt. Auf ihrer Basis lässt sich eine Beurteilung der Eignung einzelner Speichertechnologien bezüglich ausgewählter Systemaufgaben durchführen. Hierzu werden die Anforderungen der Systemaufgaben mit den technischen Eigenschaften der individuellen Speichertechnologien verglichen. Für Systemaufgaben welche eine hohe

Leistung und einen hohen Leistungsgradienten voraussetzen, sind demzufolge u.a. Lithium-Batterien, Brennstoffzellen oder Pumpspeicher geeignet. Dies lässt sich aus den Leistungsparametern in Tabelle 6 ablesen. Für Systemaufgaben die eine hohe Energiedichte bei gleichzeitig niedrigem Gewicht voraussetzen sind u.a. Lithium-Batterien und Brennstoffzellen in Kombination mit Wasserstoff gut geeignet. Sind für eine Systemaufgabe, mehrere Leistungsparameter der Speichertechnologie relevant, so ist eine Gewichtung der geforderten Parameter erforderlich. So kann es z.B. notwendig sein die Relevanz der Ansprechzeit gegenüber der zyklischen Lebensdauer zu priorisieren, während beide Parameter entscheidenden Einfluss für die Erfüllung einer geforderten Systemaufgabe haben. In diesem Fall wäre z.B. eine Redox-Flow-Batterie gegenüber einem Druckluftspeicher zu favorisieren, obwohl von beiden Technologien eine ähnliche zyklische Lebensdauer zu erwarten ist.

Für die Bewältigung von kurzfristigen Systemaufgaben ergibt sich daraus, dass aus technischer Perspektive folgende Speichertechnologien geeignet sind:

- Lithium-Batterien
- Brennstoffzellen kombiniert mit Wasserstoff/Methan
- Pumpspeicher
- Druckluftspeicher

Sterner und Stadler (2013) geben einen Überblick über mögliche Funktionen und Anwendungen sowie den Nutzen von Speichertechnologien im Stromsektor. Demnach sind folgende Speichertechnologien für kurzfristige Systemaufgaben dienlich:

- Elektrochemische-Energiespeicher (Batterien)
- Chemische Energiespeicher (Power-to-Gas-Strom, Entladetechnik Gaskraftwerk)
- Pumpspeicher
- Druckluftspeicher

Jede der betrachteten Speichertechnologien weist individuelle Vor- sowie Nachteile für die Bewältigung kurzfristiger Systemaufgaben auf.

Chemische Energiespeicher sind nach Sterner und Stadler (2013) aufgrund ihrer verhältnismäßig langen Ansprechzeit nur bedingt als Momentanreserve geeignet. Gut geeignet sind Gase jedoch zur Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelleistung. Primärregelleistung kann durch Gaskraftwerke in Kombination mit einem regenerativ erzeugten Gas bereitgestellt werden.

Tabelle 6: Überblick über Mittelwerte der wichtigsten technischen und ökonomischen Parameter verschiedener Speichertechnologien (Quellen: Sterner und Stadler (2013), Bengler et al. (2013))

Technologie	Typischer Leistungsbe- reich	Typische Speicherka- pazität <i>MWh</i>	Typischer Leistungsgradient <i>MW/sec</i>	Energiedichte		Wirkungsg- rad %	Selbstentladun- g %/Tag	Ansprec- hzeit	Lebensdauer		CAPEX		OPEX fix €/kWh
				Gravi- metrisch <i>Wh/kg</i>	Volumetri- sch <i>kWh/m³</i>				Zyklisch <i>Zyklen</i>	Kalendarisc- h <i>a</i>	€/kWh	€/kW	
Kondensatoren	<100 kW		Abhängig von Anbindung über Leistungselektronik	0,1-10	10	90-95	0,004-0,013	<100 ms	500000- 1000000	10-20	5150- 12000	125- 300	k.A.
Spulen	<10 MW	<20MJ (=0,005MWh)		1	10	92	10-12	<100 ms	>1000000	30	13570- 75670	300- 915	k.A.
Lithium-Batterien	<50 MW	20-30 MWh		110- 190	190-375	90-97	0,008-0,041	<100 ms	400-1900	15	170-600	170- 600	0,13- 0,76
Redox-Flow-Batterien	2 MW	12 MWh		15-50	20-60	71-83	0	<100 ms	5755-8593	15	250-865	710- 1790	k.A.
Brennstoffzellen	10 – 100 MW		Ca. 10% der max. Leistung pro sek.			43-53		<30 s aus dem Standby, 10 min aus dem OFF- Betrieb		20-30		2305	47
PtG - Wasserstoff (Kompr. 200 bar, Speicherung)				33300	612	54-72	k.A.					k.A.	k.A.
PtG - Methan (Kompr. 200 bar, Speicherung)		Speicherung im Erdgasnetz möglich				49-64							
Pumpspeicher	100 - 1000 MW	400 - 9000 MWh	< 30 MW/sec	0,3-1,4	0,35-1,1	70-82	0,05	<1 min bis wenige min	12800- 33000	40-100	40-180	550- 2040	0,08
Druckluftspeicher (diabat)	bis 290 MW	580 MWh			02. Jul	40-55	0-10	wenige Minuten	8620-17100	40	40-80	340- 1145	0,01- 0,26

Pumpspeicher und Druckluftspeicher werden für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung als nicht geeignet bewertet. Beide Technologien bieten jedoch aufgrund ihrer guten Ein- und Ausspeichereigenschaften sowie üblicherweise großer Speicherkapazitäten universelle Einsatzmöglichkeiten, in nahezu allen anderen Bereichen der Systemaufgaben.

Für elektrochemische Energiespeicher wird Forschungsbedarf prognostiziert, um auch im Bereich der unterbrechungsfreien Stromversorgung problemlos eingesetzt werden zu können. Eine hohe Selbstentladungsrate schränkt die Eignung von Batterien als Langzeitreserve ein. Durch eine gute Skalierbarkeit der Leistung sowie der Kapazität lassen sich Batterien in fast allen übrigen Bereichen wirtschaftlich sinnvoll einsetzen.

Benger et al. (2013) nennen als geeignete Kurzzeitspeichersysteme:

- Schwungmassenspeicher
- Supraleitende Magnetische Energiespeicher
- Doppelschichtkondensatoren
- Elektrochemische Speicher
- Batterien
- Flussbatterien
- Pumpspeicherwerke
- Druckluftspeicher

Zur Charakterisierung der Speichersysteme werden folgende technischen Eigenschaften herangezogen, die sich aus den zentralen Anforderungen an Kurzzeitspeichersystem ergeben:

- Ansprechzeit (Aktivierungszeit, Dynamik),
- typischer realisierter Leistungsbereich
- typischer realisierter Leistungsgradient
- typische realisierte (geplante) Speicherkapazität

Lott et al. (2014) ziehen zur Charakterisierung von Speichertechnologien folgende Parameter heran:

- Ausspeicherdauer
- Ansprechzeit
- Leistungsbereich

Basierend auf den genannten Parametern werden folgende Speichertechnologien zur Bereitstellung von kurzfristigen Systemaufgaben als geeignet genannt:

- Kondensatoren
- Spulen
- Schwungräder
- Batterien

3 Struktur technischer Innovation als sozialer Prozess

3.1 Einleitung

In diesem Teil des Berichts soll ein erster Einblick in die theoretischen Hintergründe der Innovationsanalysen gegeben werden. Ausgehend von der Definition von Innovation und eines technologischen Innovationssystems, werden basierend auf der Theorie technologischer Innovationssysteme erste Akteure grob identifiziert und vor diesem Hintergrund Kriterien zur Auswahl der Schlüsseltechnologie aus Sicht der zu entwickelnden Instrumente für Innovationsanalysen im Projekt aufgestellt.

3.2 Innovation

Innovation kann aus verschiedenen Perspektiven sehr unterschiedlich betrachtet werden. Eine griffige Definition für *Innovation* lässt sich nach Ahrweiler (2010, S.1) aus Fagerberg et al. (2006) und Schumpeter (1912) ableiten als

*Erschaffung von neuen, technisch machbaren, kommerziell realisierbaren
Produkten, Prozessen und organisatorischen Strukturen.*

Der Prozess der Innovation enthält viele Elemente und wird oftmals z.B. als Resultat verschiedener aufeinanderfolgender Prozesse oder Schritte angesehen. Allerdings sind Innovationsprozesse deutlich komplizierter, so dass solchen linearen Modellen nur sehr vereinfachte Vorstellungen zugrunde liegen können und die Natur der Prozesse nicht richtig wiedergegeben werden kann (Kline und Rosenberg 1986). Innovationsprozesse sind komplex, unsicher, ungeordnet und abhängig von Veränderungen verschiedenster Art (ebd.). Innovation muss außerdem als Änderungen in einem System angesehen werden, das nicht nur aus Hardware, sondern auch aus Marktumgebung, Produktionsmittel und -wissen sowie dem sozialen Kontext der innovierenden Organisation besteht. Nach Fagerberg (2006) ist Innovation Resultat der Zusammenarbeit zwischen vielen Akteuren, wie Individuen, Firmen, Organisationen und Netzwerken.

Die aus Innovationsprozessen resultierenden neuen Produkte, Prozesse und organisatorischen Strukturen werden oftmals ebenfalls als „Innovationen“ bezeichnet. Diese führen, wenn Sie sich durchsetzen zu einem Verdrängungsprozess der entsprechend herkömmlichen Produkte, Prozesse und Strukturen. Dieser Prozess wird auch als „schöpferische Zerstörung“ bekannt und von Schumpeter für die Beschreibung des Ablaufs von Innovationsprozessen verwendet. Nach ihm ist sie essentiell für das Funktionieren der Wirtschaft. So sieht er auch den Konjunkturzyklus als Ergebnis von Prozessen der „Revolution“ und „Absorption der Ergebnisse der Revolution“, die zwar „unstete Stöße“ darstellen, in der Summe aber einen ununterbrochenen Prozess bilden (Schumpeter 1993, S. 137f).

3.3 Die Heuristik Technologischer Innovationssysteme als Grundlage

3.3.1 Technologische Innovationssysteme

Technologie und Technik werden heute weitgehend synonym gebraucht (Janich 2004b). Technik als Begriff enthält mehrere Aspekte. Hier gehen wir aus von Technik als „Produkte ingenieurmäßiger Konstruktion und handwerklicher Herstellung von Artefakten durch zweckrationales Handeln“ (Janich 2004a, S. 215). Vor diesem Hintergrund können technologische Systeme beschrieben werden als Kombination verschiedener Technologien mit Hilfe der Ingenieurskunst um gewünschte Korrelationen von Sachverhalten zu realisieren. Grundlage dazu bildet ingenieurwissenschaftliches Wissen für die Gestaltung von Technologien und ihrer Kombination in Systemen.

Zur Realisierung und Durchsetzung von Technologien als Produkten und entsprechenden Systemen im Sinne einer Innovation ist die Zusammenarbeit der verschiedenen, oben genannten, Akteure notwendig. Aus der Konstellation der Akteure ergibt sich ein soziales System das im Folgenden als „Innovationssystem“ bezeichnet werden soll. Als technische bzw. technologische Innovationssysteme ergeben sich daraus die Innovationssysteme, die speziell auf die Produktion von Technik bzw. Technologien abzielen.

Tabelle 7: TIS strukturelle Elemente/ Bausteine. Aus: Wiczorek und Hekkert (2012), 77

Strukturelemente	Unterkategorien
Akteure	Zivilgesellschaft Unternehmen: Start-ups, KMUs, Großunternehmen, Multinationale Unternehmen/ Konzerne Wissenseinrichtungen: Universitäten/ Forschungseinrichtungen, Schulen Regierung/ Verwaltung NGOs Weitere Organisationen: Banken, Intermediäre, Wissensbroker, Consultants
Institutionen	Hart: Regeln/ Gesetze Weich: Routinen, etablierte Praktiken/ Branchenüblichkeiten, Normen, Standards, Erwartungen
Interaktionen	Netzwerke Individuelle Kontakte
Infrastruktur(en)	Finanzielle, personelle oder physische Infrastrukturen bzw. technologische Faktoren

Nach Carlsson und Stanciewicz (1991) wird entsprechend ein technologisches (Innovations-)System als ein Netzwerk von Agenten beschrieben, das in einem spezifischen Wirtschaftszweig und in einer besonderen institutionellen Infrastruktur miteinander interagiert, und an der Entstehung, Diffusion und Verwendung einer Technologie beteiligt ist:

“A technological [innovation] system may be defined as a network of agents interacting in a specific economic/industrial area under a particular institutional infrastructure or a set of infrastructures and involved in the generation, diffusion, and utilization of technology. Technological systems are defined in terms of knowledge/competence flows rather than flows of ordinary goods and services. They consist of dynamic knowledge and competence networks“ (Carlsson und Stankiewicz 1991, S.111).

Technologische Innovationssysteme (TIS) haben sich als Rahmenwerk insbesondere für die Analyse der Entwicklung „sauberer“ Technologien (Clean-tech), und entsprechender Politikempfehlungen etabliert (Bergek et al. 2008, Jacobsson und Johnson 2000). Der Ansatz dient dazu, TIS zu beschreiben und zu bewerten, um daraus Aussagen über mögliche hindernde oder förderliche Faktoren zu treffen zu können. Nach Markard und Truffer (2008) kann ein TIS wie folgt definiert werden: “A technological innovation system is a set of networks of actors and institutions that jointly interact in a specific technological field and contribute to the generation, diffusion and utilization of variants of a new technology and/or a new product” (Markard und Truffer 2008, 611). Aus dieser Definition ergeben sich folgende strukturelle Elemente Akteure, Institutionen, Interaktionen und Infrastrukturen (s. Tabelle 7).

3.3.2 Funktionen technologischer Innovationssysteme

Darüber hinaus werden in der Literatur TIS-Funktionen definiert. Diese zu unterscheiden, dient dem Verständnis der dynamischen Prozesse, die technologischem Wandel zugrunde liegen (Hekkert et al. 2007). Die Fortentwicklung einer Technologie ergibt sich demnach aus dem Zusammenspiel verschiedener Funktionen in unterschiedlichen Phasen der Reife einer Technologie.

Für das auf Wissen und mikro- und mesoökonomische Innovationen fokussierende SKIN-Modell sind insbesondere die Funktionen 1 bis 4 relevant, die unternehmerische Aktivitäten sowie die Wissensentstehung und -diffusion adressieren:

Funktion 1: Unternehmerisches Experimentieren und Produktion/ unternehmerische Aktivitäten

Die TIS-Funktionen 1-3 bilden den Kern/ Nukleus der Innovationsaktivität (Bergek et al. 2008; Hekkert et al. 2007). Die unternehmerischen Aktivitäten sind dabei der Ausgangspunkt/Ort/Rahmen, in dem neues Wissen auf Basis des alten entsteht. Dies kann zum einen eine neue Abteilung/ Sparte eines eingesehnen Unternehmens sein, das die Möglichkeit oder Notwendigkeit sieht, sich ein neues Geschäftsfeld zu erschließen, oder ein gänzlich neues Unternehmen, ein Start-up oder Spin-off, das in den Markt eintritt. Das Experimentieren unter marktlichen Bedingungen dient dabei der ökonomischen Testung des neu kombinierten, oder einer neuen Anwendung zugeführten Wissens in Form eines Produktes.

Das Set an Akteuren, bestehend aus Unternehmen, Universitäten/ Forschungseinrichtungen und Intermediären bildet die Mikroebene unserer agentenbasierten Modelle. Zur Bestimmung der Zusammensetzung des TIS wird eine Akteursanalyse erstellt, die die Anzahl und Typen an Akteuren mit ihren spezifischen Eigenschaften erhebt (Tabelle Strukturelemente). Die individuellen Eigenschaften der Akteure wie Wirtschaftszweizugehörigkeit, Unternehmensgröße und Forschungsintensität sowie weitere, ergänzende Informationen können anhand von Unternehmensstatistiken und -datenbanken gewonnen werden.

Das Unternehmen, die Universität/ Forschungseinrichtung oder ein anderer Akteur ist mit einer bestimmten technologischen Basis ausgestattet und unternimmt einen kontinuierlichen Such- und Auswahlprozess, um den wirtschaftlichen und marktlichen Anforderungen gerecht zu werden. Dabei hat sie einen gewissen Suchraum, der auch im Modell abgebildet wird.

Funktion 2: Wissensentstehung

Im Unternehmen bzw. im Haushalt entsteht Wissen, das in neue Produkte oder Prozesse überführt werden kann.

Unterscheidbar sind verschiedene Wissenstypen (wissenschaftliches, technologisches, produktions-, prozess- oder anwendungsbezogenes, marktliches, logistisches Wissen etc.) und -quellen (F&E, neue Anwendungen, Produktion, Imitation) (Bergek et al. 2008), die Grundlage für das unternehmerische Experimentieren (F1) und später auch den Wissensaustausch, sind. Aufbauend auf der Akteursstruktur, gewonnen in F1, wird diese Funktion traditionell anhand von Patent- und Publikationsstatistiken, sowie der Anzahl und Größe von F&E-Projekten empirisch gemessen. Die globale Wissensbasis des TIS differenziert sich in den verschiedenen lokalen Wissensbasen aus. Das einzelne Unternehmen bzw. der einzelne Akteur baut dabei auf seine bestehende Wissensbasis auf und erweitert diese experimentell (F1). Dies geschieht allerdings in einem begrenzten/ bedingten Rahmen:

„(..) the search process of industrial firms to improve their technology is not likely to be one technology where they survey the whole stock of knowledge before making their technical choices. Given its highly differentiated nature, firms will instead seek to improve and to diversify their technology by searching in zones that enable them to use and to build on their existing technological base (..)“ (Dosi 1988, S. 1130) bzw.

“(..) firms, which are aware of a new technology, may pursue risk assessments that are biased in favour of their prevailing technology. This may, for instance, be due to a lack of appropriate ways of analysing the costs and benefits of a new technology.“ (Jacobsson und Johnson 2000).

In der Praxis von Bedeutung sind Roadmaps und allgemein geteilte Entwicklungsvorstellungen/-erwartungen. F4 des TIS, Anleitung zur Suche, als auch die Beratungs-, Vermittlungs- und Verbandsaktivitäten aus F7, können hierbei unterstützen.

In diesem Rahmen entsteht zum einen eine Vielfalt an Wissen; diese Vielfalt wird zum anderen, über die Zeit hinweg durch Auswahl wieder reduziert (Carlsson und Stankiewicz 1991). Der Auswahlprozess erfolgt im Modell über das unternehmerische Experimentieren auf dem Markt (F1). In der Realität werden dem aber immer individuelle und verhältnisbezogene/

kollektive Entscheidungen im Unternehmen vorausgehen, die hier (noch) nicht modelliert werden können.

Im Modell werden sowohl einzelne Unternehmen/Akteure, als auch Zusammenschlüsse von Unternehmen modelliert, die neues Wissen generieren und untereinander austauschen.

Funktion 3: Wissensdiffusion

Zwischen den Akteuren wird Wissen ausgetauscht und dabei gegebenenfalls modifiziert oder einer neuen Anwendung zugeführt.

Die empirischen Belege für diese Funktion sind üblicherweise relationale Daten. Diese stammen aus denselben Quellen, die auch zur Messung von F2 herangezogen werden mit dem Unterschied, dass hier weniger der individuelle Akteur (F1) oder das generierte Wissen (F2), als das Verhältnis bzw. die Interaktion/ das Netzwerk betrachtet wird. Diese stellen den Schwerpunkt der Modellierung in SKIN dar. Zur Kalibrierung, und im späteren Verlauf zur Validierung des Modells, können darüber hinaus spezifische Netzwerkmaße herangezogen werden.

Die sektorale Zusammensetzung des TIS und die Anordnung der verschiedenen Sektoren entlang der Wertschöpfungskette ist dabei insofern von Bedeutung, als dass sie nachvollziehbar macht, inwiefern wertschöpfungsbezogene Aspekte den Austausch von Informationen zwischen den Akteuren hemmen (vorstellbar sind z.B. fehlende Formate, Konkurrenz) oder fördern (geeignete Formate vorhanden, Kooperation).

Funktion 4: Anleitung zur Suche

TIS-Funktion 4 hat eine Brückenfunktion zu den Funktionen 5-7: die unternehmerischen Aktivitäten im Bereich der technologischen Innovationen bestimmen einerseits individuelle und kollektive mikroökonomische Suchrichtungen, die sich z.B. im Gewicht von Patenten und Publikationen ablesen lassen; andererseits werden diese Suchrichtung(en) auch auf makroökonomischer Ebene rezipiert, gesellschaftlich beeinflusst und politisch gesteuert. In dieser Funktion sind Förderprogramme ebenso anzusiedeln, wie mögliche Fragen an das Modell.

In Tabelle 8 sind die TIS-Funktionen 1-7 beschrieben. Die aufgeführten Indikatoren sind der Literatur entnommen, die entsprechenden Datentypen und Quellen wurden in Rahmen der Bearbeitung des Projekts zusammengetragen.

Tabelle 8: TIS-Funktionen und empirische Belege. Quelle: Eigene Darstellung nach Hekkert et al. (2007); Suurs (2009); Wieczorek et al. (2013)

TIS-Funktion	Beschreibung	Indikator(en)/ Event-/ Ereignistyp(en)	Daten/ Datentyp(en), Quelle(n)
1. Unternehmerisches Experimentieren	Aktivitäten, die auf Wertschöpfung ausgerichtet sind, wie Forschung, Anwendung, Testung und Kommerzialisierung von Wissen	Akteurstyp(en) und Anzahl/ Größenverhältnisse, Anzahl Unternehmen, Anzahl Entrepreneure, neue Sparten etablierter Anbieter, Spezialisierung entlang der Wertschöpfungskette	Unternehmens-, Branchenstatistik(en)
2. Entstehung von Wissen	Lernen und schöpferische Anwendung von Wissen zur Entstehung neuen Wissens	Anzahl Patente, Publikationen, F&E-Projekte, Forschungsintensität(en); Lernkurven	Patent- und F&E-Statistiken (EPO PATSTAT, Förderkatalog, Wissenschaftsstatistik)
3. Diffusion von Wissen	Austausch und Modifikation von Wissen	Netzwerkgröße und -dichte, gemeinsame F&E-Projekte, gemeinsam gehaltene Patente, Zitationen, Workshops, Messen, Konferenzen	Patent- und F&E-Statistiken, Mitglieder Branchenverbände, Teilnehmer Konferenzen und Workshops
4. Suchrichtung	Ereignisse, Prozesse und spezifische Erwartungen, die die Entwicklungsrichtung von Wissen bestimmen können	Anzahl und Gewicht wissenschaftlicher und journalistischer Publikationen, Politikziele, Regierungs- oder Förderprogramme	H-Index von Publikationen, Patenten
5. Marktformierung	Nischenmarkt in frühen Phasen, und wachsender Markt mit Markteintrittserleichterung in späteren Phasen	Anzahl Nischenmärkte, Marktregulierungen, Standards	
6. Ressourcenmobilisierung	Verfügbarkeit finanzieller, personeller und physischer Ressourcen	Anzahl Ausbildungs- und Studiengänge/-plätze, Subventionen/ Fördermittel, Infrastruktur-/Rohstoffverfügbarkeit	Arbeitsmarktstatistik(en), F&E-Statistik (Personal), Innovationspanel, Fördersummen (projektbezogen und institutionell); Labore, Testfertigungsstraßen
7. Legitimität	Unterstützung der neuen Technologie, Reduzierung von Unsicherheit	Entstehung und Wachstum von Verbänden, Lobbyaktivitäten	Branchenverbände, Positionspapiere, gemeinsame Roadmaps, Regierungsprogramme, Gesetze

4 Das technologische Innovationssystem Lithium-Batterien

4.1 Untersuchungsgegenstand, Akteure und Funktionen

4.1.1 Auswahl des Untersuchungsgegenstands Lithium-Batterien

Abgrenzung des Sets an Akteuren

Technologische Innovationssysteme (TIS) sind zunächst nicht räumlich begrenzt. Im Rahmen dieses Projektes sollen aber institutionelle Bedingungen und Infrastrukturen modelliert werden, die einerseits mit empirischen Methoden und überschaubarem Aufwand erhoben, und andererseits durch Politikoptionen erreichbar sind. Daher sollen insbesondere deutsche Unternehmen und Organisationen betrachtet werden, bei denen Innovationstätigkeit stattfindet, oder die diese unterstützen.

Die Gesamtheit der Akteure, die als Basis für die Analysen dient, wird somit durch folgende Faktoren bestimmt:

- durch den Fokus auf eine Technologie, in unserem Falle spezielle Stromspeicher (technischer Fokus) (s.u.),
- durch die Rahmensetzung auf Deutschland (räumlicher Fokus),
- durch die Anwendung im Bereich der stationären Energiespeicher (in Abgrenzung etwa zu der Anwendung im Fahrzeugbereich).

Wichtige Zuliefer- und Abnehmerbeziehungen werden hingegen auch dann mitberücksichtigt, wenn internationale Unternehmen notwendige Materialien oder Produkte anbieten, oder relevante Erlöspotentiale für eine Speichertechnologie in anderen Bereichen, wie beispielsweise im Fahrzeugbereich liegen. Daher ist der Rahmen sinnvollerweise nicht vollkommen trennscharf zu setzen. Modelltechnisch wird aber voraussichtlich die Setzung von einzelnen Parametern zur Abbildung der Umwelt der Akteure unterschieden von der Modellierung der Akteure, die nur für die Kernbereiche erfolgt.

Für die Umsetzung ist eine Kombination aus den beiden agentenbasierten Modellen SKIN und AMIRIS vorgesehen. Während in SKIN die Innovationstätigkeit simuliert werden wird, wird AMIRIS zur Analyse der Erlöspotentiale von Energieversorgern bei der Verwendung bestimmter innovativer Produkte eingesetzt werden. Um das Set an relevanten Akteuren weiter einzugrenzen werden im Folgenden wesentliche, in der Modellierung des Innovationssystems abgebildete, Prozesse dargestellt.

Analog den technischen Innovationssystemen werden drei Arten von Ressourcen bei der Modellierung unterschieden: materielle Ressourcen, Wissensressourcen und finanzielle Ressourcen.

Materielle Ressourcen werden als Inputs für die innovierenden Unternehmen genutzt, um mit ihnen Zwischenprodukte herzustellen, die dann ggf. mit weiteren Zwischenprodukten und Ressourcen von weiteren Unternehmern zu Endprodukten umgesetzt werden. Diese können dann von Energieversorgern genutzt werden, um mit ihnen Erlöse zu erwirtschaften.

Notwendig für den Kauf der Inputs ist finanzielles Kapital des Unternehmens. Dieses besteht zunächst aus einem Anfangsvermögen und erhöht sich durch Einnahmen aus dem Verkauf der Produkte und vermindert sich durch den Kauf von Inputs, Kosten von Forschungstätigkeit und Kooperation sowie allgemeine Steuern. Wenn eine Firma nicht

genügend Umsatz macht, geht sie bankrott. Andere Märkte, als der über den der Verkauf an Energieversorger abgewickelt wird, werden voraussichtlich nur vereinfacht abgebildet werden.

Um überhaupt innovativ tätig sein zu können, das heißt neue Produkte herstellen und vertreiben zu können, ist Wissen notwendig. Jedes Unternehmen besitzt im Modell bereits Wissen, das durch Forschung und Entwicklung bzw. Wissensaustausch mit anderen Agenten wie anderen Unternehmen oder Forschungsinstitutionen ausgebaut werden kann. Aus dem vorhandenen Wissen werden Produkte erstellt, die dann auf dem Markt verkauft werden sollen. Abhängig von der Anzahl verkaufter Produkte wird der Preis nach oben bzw. unten angepasst. Mit der Zahl der erfolgreichen Produktionszyklen wächst die Erfahrung. Während durch inkrementelle Forschung das vorhandene Wissen variiert bzw. erweitert wird, werden durch radikale Forschung neue Wissensfelder erschlossen.

Kriterien an die Auswahl der Schlüsseltechnologien aus Sicht der Innovationsanalyse

Die Auswahl der zu analysierenden Schlüsseltechnologien dient in erster Linie dem Zweck ein gutes Beispiel für die Analyse von Schlüsseltechnologien darzustellen, an dem die Methoden und Instrumente ausgearbeitet werden können. Daraus ergeben sich einige weitere Anforderungen an die Auswahl der Schlüsseltechnologien:

- *Die Technologie sollte innovativ sein.* Das heißt, dass Innovationstätigkeit in relevantem Maße zu beobachten und noch Potential für weitere Innovationen absehbar sein sollte. Ansonsten macht eine Annahme der Verbesserung der technologischen Eigenschaften mit Hilfe zukünftiger Innovation in dem Bereich keinen Sinn.
- *Die Technologie bzw. die erwartbaren Innovationen sollten absehbar anwendbar und möglichst bereits jetzt im Energiesystem einsetzbar sein.* Da die Modellierung auf heutigen Verhältnissen und vor allem heutigen Rahmenbedingungen beruht – denn nur dafür kann das Modell validiert werden und bei der Menge der relevanten Rahmenbedingungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass sie in fernerer Zukunft noch genauso bestehen – sollte in der Modellierung von einem Einsatz heute oder in naher Zukunft ausgegangen werden können. Die Analysen können dann Auskunft über die Maßnahmen bereitstellen, mit denen die Innovationstätigkeit, von heute ausgehend, zukünftig erhöht werden kann.
- *Wesentliche Erlösmöglichkeiten sollten bereits klar erkennbar sein.* Die Modellierung der Erlösmöglichkeiten von Technologien zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage erfordert es, Erlöse spezifisch für verschiedene Anwendungen und Märkte zu modellieren. Wenn Erlösmöglichkeiten und Geschäftsmodelle noch nicht klar definiert werden können, ist die Unsicherheit in den Ergebnissen deutlich größer. Die Technologie sollte schon vorhanden sein, sonst können auf ihr aufbauend keine Innovationen im Rahmen unternehmerischer Tätigkeit entstehen.
- *Es sollten ausreichend Daten für die Analysen der Erfüllung der Systemaufgaben mit der untersuchten Technologie verfügbar sein.* Das betrifft vor allem die Kerndaten wie Patente und Daten zu Forschungsprojekten in dem Bereich. Die Art der Modellierung als Typen von Agenten erfordert es, dass Typen definiert und ihre Eigenschaften umrissen werden können. Das ist nur möglich, wenn die Datenbasis ausreichend gegeben ist. Unter anderem müssen dazu möglichst alle (auch zukünftigen) typischen Akteure bereits bekannt und ihre Innovationstätigkeiten mit empirischen Daten untersuchbar sein. Ebenfalls ist eine größere Anzahl von Studien zu den betrachteten Technologien positiv zu bewerten. Einen Vorteil stellt es zudem dar, wenn ähnliche

Technologien bereits entwickelt wurden. Denn dann könnten empirische Daten zu diesen Entwicklungen zumindest in Teilen für die Kalibrierung oder Validierung des Modells für die betrachteten Technologien herangezogen werden. Es ist außerdem von Vorteil wenn mit einer Technologie die gesamte Systemaufgabe erfüllt werden kann. Die Notwendigkeit der Nutzung mehrerer Technologien zur Erfüllung der Aufgabe erfordert einen höheren Aufwand für das Projekt in der Innovationsanalyse, da dazu unter anderem Innovationsverhalten in mehreren, unter Umständen komplett unterschiedlichen Industriezeigen, untersucht werden müssen.

- *Innovationen der Technologie sollten möglichst wissensintensiv und neben praktischem auch wissenschaftliches Wissen erfordern.* Den Kern der Analysen von Innovationsnetzwerken stellt das Generieren und der Austausch von Wissen dar. Daher sollte Wissen eine wesentliche Rolle für Innovationen in dem betrachteten Bereich spielen. Vor allem wenn sowohl praktisches als auch wissenschaftliches Wissen eine wesentliche Rolle im Innovationsprozess spielt, ist das Modell möglichst breit parametrisierbar. Ein Modell, das am Beispiel einer solchen Technologie entwickelt wurde lässt sich einfacher auf Technologien übertragen, in denen einzelne Komponenten keine oder eine geringere Rolle spielen, ist also in der Zukunft voraussichtlich flexibler übertragbar.
- *Hersteller und andere Akteure sollten möglichst bereits vorhanden und Informationen über sie zu bekommen sein.* Nur wenn das Verhalten der Hersteller und der anderen für die Umsetzung der Technologie relevanten Akteure bereits mit empirischen Daten beschreibbar ist, können die Parameter des Modells ausreichend belastbar mit Werten belegt werden.
- *Die Technologie sollte möglichst in Energieunternehmen verschiedener Größe einsetzbar sein.* Eine Vielfalt auf Seiten der relevanten Energieunternehmen ist vorteilhaft für eine möglichst hohe Flexibilität des resultierenden Modells für die spätere Übertragung auf andere Technologien.
- *Eine breite Anwendbarkeit der Technologie ist von Vorteil.* Eine Breite Anwendbarkeit und damit breite Modellierung verschiedenster Anwendungsfälle führt ebenfalls zu einer höheren Flexibilität des Modells in der Übertragbarkeit für andere Technologiegebiete. Zudem führt die Flexibilität der Einsetzbarkeit für verschiedene Märkte voraussichtlich dazu, dass die Technologie trotz Änderungen der Rahmenbedingungen noch einsetzbar und damit relevant ist und dadurch zum einen das Investitionsrisiko von Energieunternehmen geringer ist und das Modell mit den erarbeiteten Daten auch in Zukunft für den Anwendungsfall verwendbar oder mit geringerem Aufwand anpassbar ist.
- *Deutsche Aktivitäten sollten relevant sein.* Das Ziel des Projekts ist es, vor allem deutsche Innovationstätigkeit im internationalen Rahmen zu untersuchen. Daher sollten deutsche Aktivitäten bei der Entwicklung der Technologie eine Rolle spielen.

Interessante Gebiete technischer Innovation von Schlüsseltechnologien im Energiebereich

Aus der Betrachtung der Energiesystemanalysen mit Hilfe des ESYS-Tools der RWTH Aachen ergaben sich die folgenden Technologien als Schlüsselkomponenten des Energiesystems (vgl. Kapitel 2):

- Kurzzeitspeicher: Lithium-Ionen-Speicher, Wärmespeicher
- Langzeitspeicher: Power-to-Gas (H₂)
- Erzeugungstechnologien: „Gaskraftwerke“

Da die Auflösung der Systemmodelle nur maximal eine Stunde betragen, wurden zusätzlich kurzfristige Systemaufgaben betrachtet. Aus ihrer Analyse ergaben sich als interessante Schlüsseltechnologien:

- Elektrochemische-Energiespeicher (Batterien)

- Chemische Energiespeicher (Power-to-Gas)
- Pumpwasserspeicher
- Druckluftspeicher
- Spulen, Kondensatoren, Schwungräder

Zusammengefasst ergibt sich aus den Analysen die Option der chemischen Energiespeicher (Power-to-Gas), der Einsatz von Gaskraftwerken, der Einsatz von Wärmespeichern und der Einsatz von Batterien sowie Pump- und Druckluftspeicher und Spulen, Kondensatoren sowie Schwungräder.

Aus diesen Technologien gilt es eine Technologie auszusuchen anhand derer voraussichtlich die Methoden und Modelle gut zu entwickeln sind. Wesentlich dafür ist vor allem die Datengrundlage. Weitere Anforderungen sind oben diskutiert worden. Für die verschiedenen Technologien ergibt sich aus den Anforderungen:

Spulen, Kondensatoren und Schwungräder sind vor allem im sehr kurzfristigen Bereich anzuwenden. Sie stellen Speicherspeicher für reine kurzfristige Leistungsbereitstellung dar, die bereits seit Jahren eingesetzt werden. Innovationen in dem Bereich würden das Energiesystem sicher verbessern. Sie stellen jedoch kein zentrales Element der Energieversorgung dar. Eine Übertragbarkeit der Modelle auf andere Fälle bei dieser Spezialanwendung wäre nur eingeschränkt möglich.

Pumpwasserspeicher stellen eine ausgereifte Technologie dar, die bereits seit Jahrzehnten in der Energieversorgung eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Energiedichte wird das derzeit bestehende Potential nicht sehr viel weiter ausbaubar sein. Wesentliche Entwicklungsschritte sind bei der Technologie daher nicht zu erwarten. Aufgrund der fehlenden Innovativität ist diese Technologie im Rahmen des Projekts weniger interessant.

Druckluftspeicher sind eine weitere Variante mechanischer Speicher. Die diabate Variante ist bereits seit Jahrzehnten, allerdings weltweit nur in zwei Systemen, in Benutzung. Die Variante der adiabaten Speicher befindet sich noch in der Entwicklung. Es ist sehr fraglich ob und, wenn ja, wann die Technologie einen wesentlichen Durchbruch erfahren wird. Daher ist auch die Untersuchung dieser Technologie im Projekt weniger interessant.

Gaskraftwerke stellen bereits heute eine ganz wesentliche Schlüsseltechnologie des Energiesystems dar. In der herkömmlichen Nutzung sind sie allerdings schon sehr weit entwickelt. Gaskraftwerke benötigen zudem einen Brennstoff, von dem im Wesentlichen ihre Klimabilanz abhängt. Die Frage des Brennstoffs und der konkrete Einsatz der Gaskraftwerke in Zukunft ist wegen verschiedener Optionen wie Erdgas, Biogas, Methan aus Power-to-Gas und Wasserstoff nur sehr schwer absehbar und stark abhängig von den sonstigen Technologien im System. Daher ist die Technologie weniger als Schlüsseltechnologie für das Projekt interessant.

Da zunehmend mehr Strom auch für Wärmebereitstellung genutzt wird, werden Wärmespeicher voraussichtlich eine wichtige Rolle im zukünftigen Energiesystem spielen (s.o.). Auch über sie können Flexibilitäten im Strombereich bereitgestellt werden. Allerdings ist Ihre Funktionalität in Bezug auf den Strom abhängig von weiteren Technologien, wie dem Einsatz der Umwandlungstechnologien, aber auch dem Grad der Dämmung von Gebäuden und die erforschten Wärmeenergiespeicher sind sehr heterogen. Eine einheitliche Analyse der

Innovationstätigkeit mit den verwendeten Modellen wäre voraussichtlich schwierig. Daher bietet sich diese Technologie nicht für das Projekt an.

Die Option von Power-to-Gas wurde als Schlüsseltechnologie sowohl im Bereich der Systemanalysen als auch bei den Systemaufgaben identifiziert. Sie beinhaltet die Verwendung verschiedener Technologien. Neben der Umwandlung von Strom in Gas sind Speicherung und Rückverstromung oder Nutzung in anderen Sektoren für die Umsetzung zu betrachten. Eine sehr interessante Technologie in dem Zusammenhang stellt die Wasserelektrolyse dar, mit der aus Strom Wasserstoff generiert werden kann. Hier sind noch weitere Entwicklungen zu erwarten, so dass der Prozess deutlich effizienter gestaltet werden könnte. Zudem ist die Entwicklung von Elektrolyseuren recht gut greifbar, da es im Wesentlichen um Weiterentwicklungen der Elektrochemie sowie der Steuerung und Systemintegration geht. Der Wasserelektrolyseur ist daher eine interessante Technologie für das Projekt.

Batterien allgemein, bzw. genauer: Akkumulatoren, sind Technologien, die sowohl in den Szenarien der Systemanalysen als auch bei der Betrachtung von Systemaufgaben als relevante Schlüsseltechnologien identifiziert wurden. Besonders Lithium-Ionen und weitere Lithium-Varianten bzw. weitere neue Entwicklungen von Batterien versprechen eine deutliche Verbesserung für die Nutzung der Technologien. Auch die Entwicklungen der neuen Varianten finden im Wesentlichen in demselben Industriebereich, der Elektrochemie, statt. Dazu sind Innovationen in verschiedenen Gebieten notwendig. Ihre Anwendung ist bereits gut absehbar, da Batterietechnologien schon lange verwendet werden. Auch als stationäre Varianten sind sie in Betrieb und werden vor allem für die Bereitstellung von Systemaufgaben eingesetzt. Bei der Analyse von Innovationstätigkeit kann ggf. auf in der Vergangenheit beobachtete Dynamiken zu anderen Batterievarianten zurückgegriffen werden. Ähnlich wie beim Elektrolyseur geht es um Weiterentwicklungen der Elektrochemie sowie der Steuerung und Systemintegration. Die Batterie-Technologie ist daher für das Projekt interessant.

Mit einem ersten Blick auf die Anforderungen des Projekts ergeben sich besonders mit Wasserelektrolyseuren und Lithium-Ionen-Batterien bzw. neuen Batterie-Varianten interessante Technologien, die im Projekt analysiert werden könnten. Sie beide bieten die Möglichkeit Innovationen in der Elektrochemie zu analysieren, die mehrere Schlüsseltechnologien hervorbringt. Neben Elektrolyseuren und Lithium-Batterien sind das weitere Batterietypen und Brennstoffzellen.

Tabelle 9 zeigt den Vergleich der Lithium-Batterie mit dem Wasser-Elektrolyseur mit Bezug zu den einzelnen Anforderungen. Es ist zu erkennen, dass beide Optionen eine interessante Analyse ergeben könnten. Wesentliche Innovationen für beide Technologien befinden sich dabei im Bereich der Elektrochemie.

Tabelle 9: Vergleich von Lithium-Batterie und Wasserelektrolyseur bezüglich der praktischen Anforderungen aus dem Projekt

Technologien	<i>Li-Batterie</i>	<i>Wasserelektrolyseur</i>
Innovativ / Neuheit?	Li-Ionen: weniger innovativ, andere Li-Varianten: ja	Ja, bzgl. Zusatzfunktionalitäten, Flexibilität muss erhöht werden
Anwendbarkeit absehbar?	Werden bereits angewendet, Li-Ionen: TRL: 6-9 (BVES 2017)	H2-Speicherung in Pilotanlagen: TRL: 6-7 (BVES 2017)
Technologie heute relevant?	Ja, vor allem in anderen Bereichen (Verkehr, PV, Consumer...) + im stationärer Energiebereich, auch in Szenarien 2025/2030	In Pilotanlagen, in größerem Maße voraussichtlich ab 2030/40
Erlösmöglichkeiten?	Als Einfach abschätzbar wegen klar definierter Anwendung, allerdings sind parallele Anwendungen in anderen Sektoren zu berücksichtigen	Absehbar, allerdings vielfältig und daher nicht klar welche technischen Optionen/Kombinationen in Zukunft realisiert werden
Datenverfügbarkeit?:	viele Unternehmen/Hersteller/Projekte für die vorhandenen Technologien	wenige Unternehmen/Hersteller, vor allem Demoprojekte
- Patente	Lithium-Batterien: ca. 23000 Patentfamilien davon in Deutschland: ca. 2000 Patentfamilien	Wasser-Elektrolyseure: ca. 2300 Patentfamilien davon in Deutschland: ca. 300 Patentfamilien
- Vergleichsentwicklung	Bei anderen Batterietechnologien	Eventuell bei Brennstoffzellen
- Forschungsförderung	Teils eigene Forschungsprogramme	Einzelne Anteile von Forschungsprogrammen
- Vorhandene Studien (als Referenzen)	Viele Studien, auch zu Innovationen in dem Bereich	Weniger Studien explizit zu Innovationen bei Elektrolyseuren, meist Wasserstoffherzeugung / Speicherung und Methanisierung etc.
Wissensintensiv?	Ja	Ja
Hersteller/Akteure absehbar?	Ja, auch in naher Zukunft	Ja, aber unterschiedlich, je nach Szenario – erst ab ca. 2030 relevant
Einsetzbar in Unternehmen verschiedener Größe?	Ja	Ja, in Zukunft, je nach Szenario, Kleinanlagen erst in fernerer Zukunft wirtschaftlich
Breite Anwendbarkeit?	Ja, einige Einsatzbereiche denkbar	Nur bei sehr hohen Anteilen EE, abhängig vom Szenario
Relevanz deutscher Aktivitäten?	Vor allem in der Systemintegration, aber auch vereinzelt Zellen. Keine führende Rolle (Roadmaps ISI) – Verbesserung der Situation: Analyseoption	Hoch

Der Vorteil der Betrachtung von Batterien ergibt sich vor allem in der Datenverfügbarkeit. Im Bereich von Patentdaten als zentral relevanter Daten enthalten die verfügbaren Datenbanken etwa 23000 Patente, so dass selbst bei einer Unterteilung in einzelne Jahre und

Länder noch eine ausreichende Anzahl von Patenten für die Festlegung von Akteurstypen vorhanden sind. Auch in Deutschland ist eine relevante Zahl von Patenten zu finden. Zudem sind viele Studien zu Lithium-Batterien und weiteren relevanten Batterievarianten veröffentlicht auf dem für das Projekt aufgebaut werden kann. Bereits heute werden Batterien kommerziell von Energieversorgern eingesetzt. Auch eine Anwendung in näherer Zukunft ist daher gut absehbar. Entsprechende Akteure existieren bereits, deren Entwicklungen als Grundlage für die Analysen dienen kann. Allerdings findet ein Großteil der Entwicklung von Batterien außerhalb Deutschlands statt.

Bei Wasserelektrolyseuren findet sehr viel Aktivität in Deutschland statt. Allerdings ist die Datenverfügbarkeit im Bereich der Patente, Projekte und Studien zum Thema sehr viel geringer als bei Lithium-Batterien. Außerdem ist die konkrete Umsetzung der Technologie und die konkreten beteiligten Akteure noch nicht bekannt. Bisher sind nur Pilotprojekte vorhanden.

Wesentlich für die praktische Umsetzbarkeit im Projekt ist die Datenverfügbarkeit. Daher wird der Schwerpunkt auf innovative Batterien, ausgehend von Lithium-Ionen-Batterien, gelegt. Sie dienen als Einstieg in die Analyse von Innovationen bei elektrochemischen Energiespeichern. Mit der Anwendung auf andere elektrochemische Technologien, wie Elektrolyseuren und Brennstoffzellen, sind bereits weitere Anwendungen der entwickelten Methoden und Modelle naheliegend.

Fazit zur Auswahl des Untersuchungsgegenstands

Es ergeben sich aus den verschiedenen Anforderungen aus den Energiesystemanalysen und der Betrachtung der weiteren Systemaufgaben ein ganzes Bündel von Technologien, die als Schlüsseltechnologien in zukünftigen Energiesystemen relevant werden können. Vor dem Hintergrund der Anforderungen im Projekt stehen elektrochemische Speicher hervor. Der Schwerpunkt auf Lithium-Ionen und andere Lithium-Varianten und sowie ggf. weitere, neue Entwicklungen verspricht ein guter Einstieg in die Analyse von Innovationsprozessen elektrochemischer Technologien zu sein.

Vor allem auf Basis des Ansatzes zu technischen Innovationssystemen sind auch Akteure bereits im Ansatz identifizierbar, müssen jedoch für die konkreten Technologien noch näher analysiert werden. In den nächsten Schritten werden daher relevante Akteure, vor allem im Bereich der innovierenden Unternehmen, und ihre Innovationstätigkeit auf Hemmnisse hin analysiert werden. Diese Arbeiten werden dann eine wesentliche Basis für die Gestaltung der Analysen darstellen.

4.1.2 Untersuchungsgegenstand Lithium-Batterien

Abgrenzung des Innovationssystems

Für die Modellentwicklung galt es zunächst, das TIS Lithium-Batterien zu definieren und abzugrenzen. Der Fokus lag auf Deutschland, und zu Beginn, auf stationären Anwendungen; naturgemäß umspannt ein TIS aber nationale und sektorale Grenzen (s. Abbildung 14). Dies ist insbesondere bei Stromspeichern als einer Querschnittstechnologie gültig, und bringt die Notwendigkeit einer branchenspezifisch bzw. sektoral differenzierten Betrachtung mit sich

(Stephan et al. 2017). Die Anwendung von Lithiumbatterien nicht nur im portablen, sondern auch mobilen und stationären Bereichen der Energieversorgung zeigt die Breite in der Verwendung, und damit die Komplexität des zu untersuchenden TIS.



Abbildung 14: Typische Abdeckungen sektoraler, nationaler und technologischer Innovationssysteme (NIS, SIS, TIS)

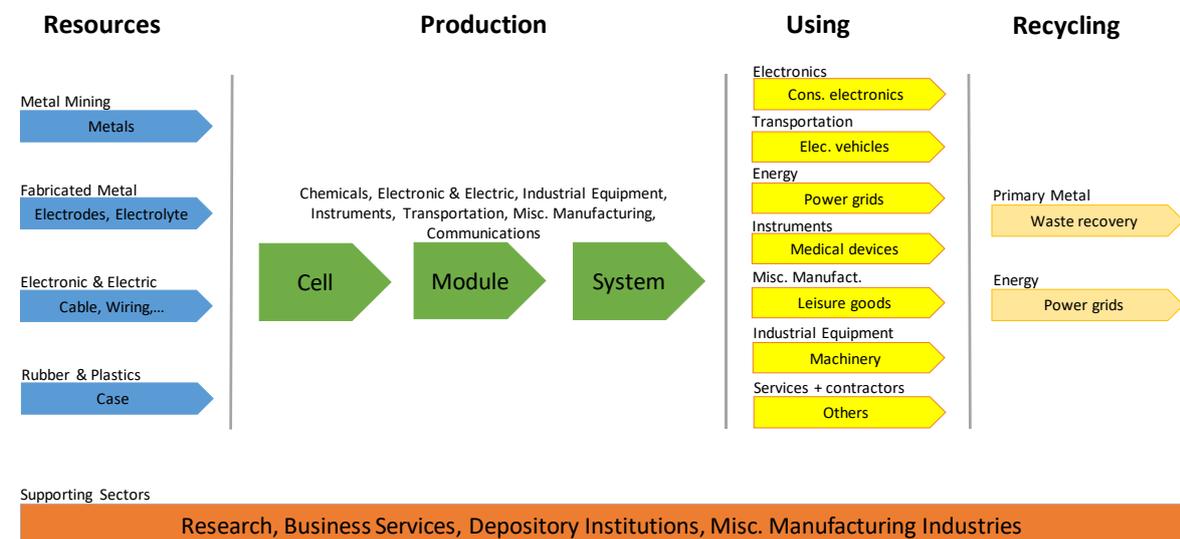


Abbildung 15: Wertschöpfungskette bei Lithium-Batterien. Eigene Darstellung basierend auf: Stephan et al (2017); Porter (2010)

Akteure

Die Akteure des TIS Lithium-Batterien werden als Agenten im SKIN-Modell abgebildet. Dabei sind nicht alle Akteure, die in der Theorie aufgeführt werden (s.a. Tabelle 7: TIS strukturelle Elemente/ Bausteine), für das Modell relevant: direkt abgebildet werden im Wesentlichen Unternehmen, Wissenseinrichtungen und weitere Organisationen wie Intermediäre und

Wissensbroker. Zivilgesellschaft, Regierung/ Verwaltung und NGOs finden nur indirekt Berücksichtigung in den Rahmenbedingungen des Modells, nicht aber als eigener Akteur.

Zur Erhebung der relevanten Akteure wurde zu Beginn des Projektes eine Akteursanalyse durchgeführt. Diese bildet die Grundlage für TIS-Funktion 1: Unternehmerisches Experimentieren (s.a. Tabelle 8: TIS-Funktionen und empirische Belege).

Dies diente dazu, einen Überblick über die Akteurs- und insbesondere die Unternehmenslandschaft zu erhalten.

Die Unternehmenslandschaft Lithium-Batterien in Deutschland wurde auf Basis mehrerer Datensätze eingegrenzt. Neben den Unternehmens- bzw. Branchenstatistiken standen für die Wissensgenerierung, (internationale) Patent- sowie deutsche F&E- und Innovationsstatistiken zur Verfügung. Für den Wissensaustausch konnten (gemeinsam gehaltene) Patente, sowie F&E-Projekte herangezogen werden. Auf die Auswertung von Publikationen wurde verzichtet unter der Annahme, dass in dem untersuchten TIS Patente relevanter sind als Publikationen.

4.1.3 Netzwerke zum Wissensaustausch im Innovationssystem Lithium-Batterien

Die Daten, die der Akteurstabelle zu Grunde liegen, wurden auch verwendet, um daraus Netzwerke bzw. Graphen zu generieren und so mehr über die Struktur der Akteurslandschaft und insbesondere die Verbindungen der Akteure untereinander zu erfahren. Eine Netzwerkvisualisierung besteht üblicherweise aus Knoten (dargestellt durch Kreise) und Kanten (dargestellt durch Linien), die jeweils eine gewisse Bedeutung haben. Die Knoten stellen in diesem Fall die Akteure der Akteurstabelle dar, also Unternehmen und Forschungsinstitute oder andere Organisationen, die im Bereich Lithium-Batterien in Deutschland, ergänzend auch international, innovierend und forschend tätig sind. Kanten werden zwischen den Akteuren gezeichnet, wenn sie eine Beziehung zueinander haben, etwa durch gemeinsam durchgeführte Forschung.

Zwei Kategorien von Daten kamen für die Netzwerkerstellung in Frage: Daten zu Forschungsprojekten im Bereich Lithium-Ionen-Batterien und Daten zur Zusammenarbeit an Lithium-Batterie-Patenten aus der Patentdatenbank PATSTAT des Europäischen Patentamts (EPO). In beiden Fällen werden Akteure aus der Akteurstabelle als Knoten dargestellt.

Beim Projektdaten-Netzwerk kommt eine Verbindung zwischen zwei Knoten dann zustande, wenn die beiden Akteure an mindestens einem Projekt gemeinsam beteiligt waren (Verbundprojekte im Gegensatz zu Einzelprojekten). Es wird dann angenommen, dass innerhalb des Forschungsprojekts zwischen den Projektpartnern ein gewisser Wissensaustausch, mindestens zum Gegenstand und zur Durchführung des Forschungsprojekts, stattgefunden hat, z. B. im Rahmen der Erstellung von Berichten und gemeinsamen Veröffentlichungen. Es ist auch möglich, dass die Akteure über die Projektthematik hinaus Wissen oder Erfahrungen ausgetauscht haben oder dass zwischen ihnen Kontakte entstanden sind, die über die Dauer des Projekts hinaus Bestand haben. Über die genaue Intensität des Wissensaustauschs können die vorhandenen Daten aber nur wenig aussagen und es kann auch vorkommen, dass in einem Forschungsprojekt die Rollen klar verteilt sind, jeder Partner nur seinen Teil beiträgt und untereinander nur wenig Austausch stattfindet. Außerdem beinhaltet die Batterieforum-Datenbank ausschließlich von

öffentlicher Hand geförderte Forschungsprojekte, über die Informationen wie die Dauer des Projekts, die Teilnehmer und die Fördersummen öffentlich zugänglich sind. Zu rein privaten Forschungsk Kooperationen zwischen Unternehmen gibt es keine einheitliche Informationsquelle und daher können diese hier auch nicht berücksichtigt werden. Firmen verhalten sich unterschiedlich in der Kommunikation von Kooperationstätigkeiten, so dass hier auch auf öffentlichen Daten keine konsistente Datenbasis geschaffen werden konnte. Auch ist es nicht möglich, bspw. den Ausstellerlisten von Messen zu entnehmen, in welchem Ausmaß sich bestimmte Teilnehmer auf der Messe ausgetauscht haben. Tiefergehende Informationen können hier nur über aufwendige quantitative oder qualitative Befragungen einzelner Akteure gewonnen werden.

Für die Kooperation in Forschungsprojekten wurde auf zwei Datenbanken zurückgegriffen: die Datenbank des „Batterieforschums Deutschland“ des KLiB (*Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien*) mit von der deutschen Bundesregierung geförderten Projekten und die Datenbank CORDIS mit von der EU geförderten Projekten. Die Akteure in diesen EU-weiten internationalen Netzwerken wurden bis auf eine Handvoll deutsche Akteure nicht in die Akteurstabelle aufgenommen und die internationalen Netzwerke werden hier nur ergänzend gezeigt. Das Projektdaten-Netzwerk aus den Batterieforschumsdaten enthält aber (fast) nur deutsche Akteure, die komplett in die Akteurstabelle eingeflossen sind.

Beim Patentdaten-Netzwerk kommt eine Verbindung zwischen zwei Knoten zustande, wenn die beiden Akteure mindestens ein Patent gemeinsam angemeldet haben. Es wird dann davon ausgegangen, dass die Akteure auch gemeinsam geforscht und dabei untereinander Wissen ausgetauscht haben. Über die Intensität des Austausches kann keine Aussage getroffen werden. Wieder gilt: Inwiefern Unternehmen gemeinsam forschen und dann kein Patent anmelden, bleibt im Dunkeln. Die Sicht auf die Patentdaten ist das Einzige, das verfügbar ist, und vermutlich nur ein Ausschnitt des tatsächlich stattfindenden Wissensaustauschs.

Das Patentdaten-Netzwerk, ähnlich wie das EU-weite Forschungsprojektnetzwerk von CORDIS, ist nicht auf Deutschland beschränkt, so dass nur wenige der Knoten sich in der Akteurstabelle für die Kalibrierung wiederfinden. Im Zuge der Datenexploration, und hier sowohl zur Einordnung der deutschen Akteure in einen internationalen Kontext als auch der Einschätzung der Rolle internationaler Akteure, v.a. der Zellhersteller, im deutschen Innovationssystem war es dennoch von Bedeutung. Da diese interessanten internationalen Akteursstrukturen aber auch ein Ergebnis des Projekts waren, sollen sie hier im Schlussbericht auch dokumentiert werden.

Patente International

Auf Basis der statistischen Datenbank EPO PATSTAT wurde der Wissensaustausch zwischen Organisationen im Rahmen internationaler Patente zu Lithiumbatterien ausgewertet. Abbildung 16 und Abbildung 17 der entsprechenden Netzwerke zeigen Organisationen in Kooperation mit mindestens einem bzw. zwei externen Partnern. Dabei kooperieren lediglich 29,98% der Organisationen überhaupt; 12,41% haben zwei oder mehr Partner. Die Knotengröße entspricht der (aufsummierten) Anzahl der Partner (Degree-Zentralität), die Farbe kennzeichnet die nationale Herkunft. Deutsche Patentierer sind mit einem Anteil von 3,3% am internationalen Patentgeschehen vertreten, und arbeiten vor allem mit französischen Kollegen zusammen. Die Länder mit einem Anteil von mindestens 2% insgesamt: grün: US (12,66%), hellblau: JP (12,26%), schwarz: CN (9,2%), orange: KR (5,66%), rot: DE (3,3%), dunkelgrün: FR (2,4%); pink: nicht zuordenbar (43,13%).

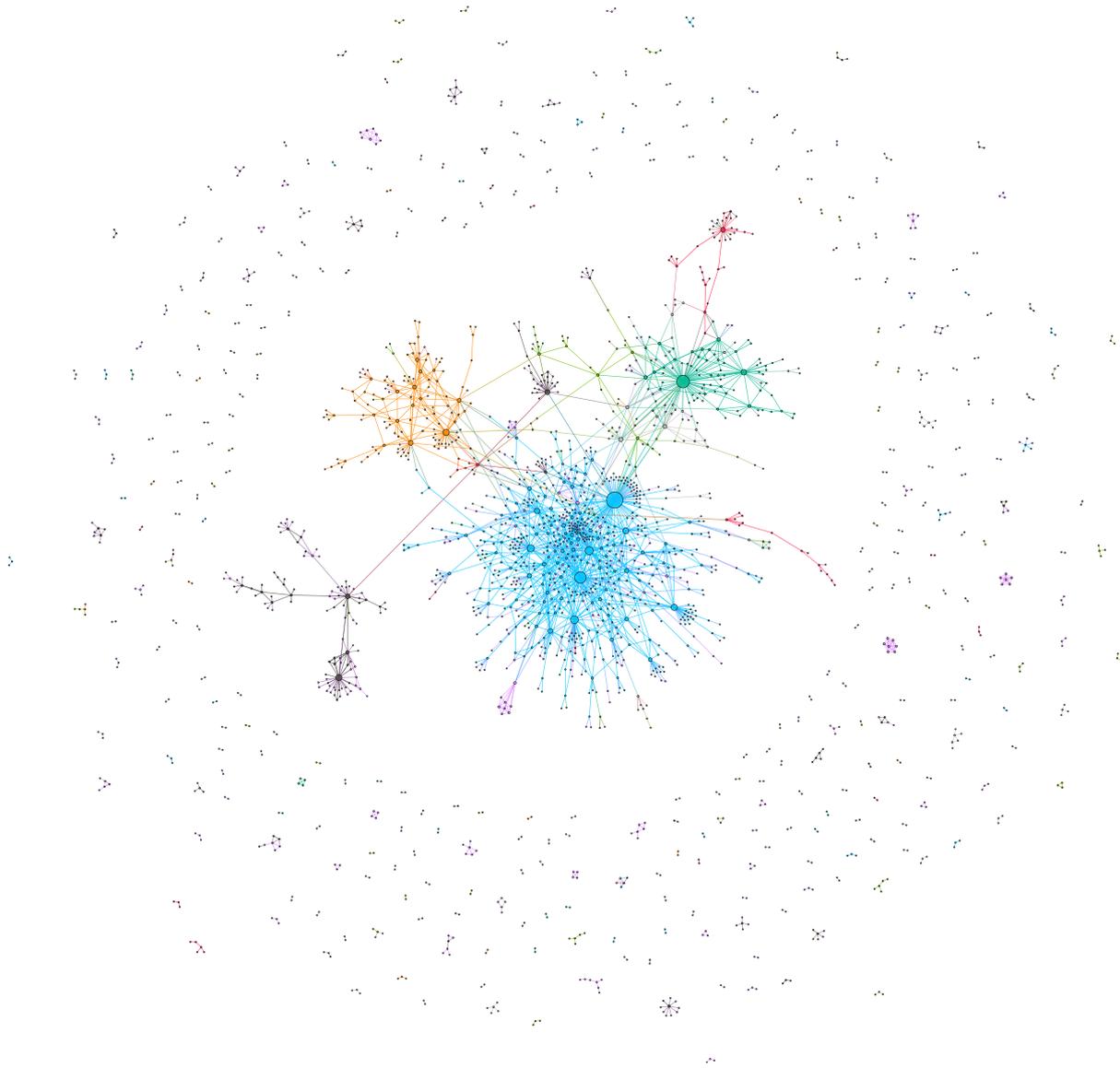


Abbildung 16: Internationales Patentnetzwerk Lithiumpatente. Dargestellt sind Organisationen, die ihr Patent oder ihre Patente zusammen mit mindestens einem Partner angemeldet haben. Datenquelle: EPO PATSTAT

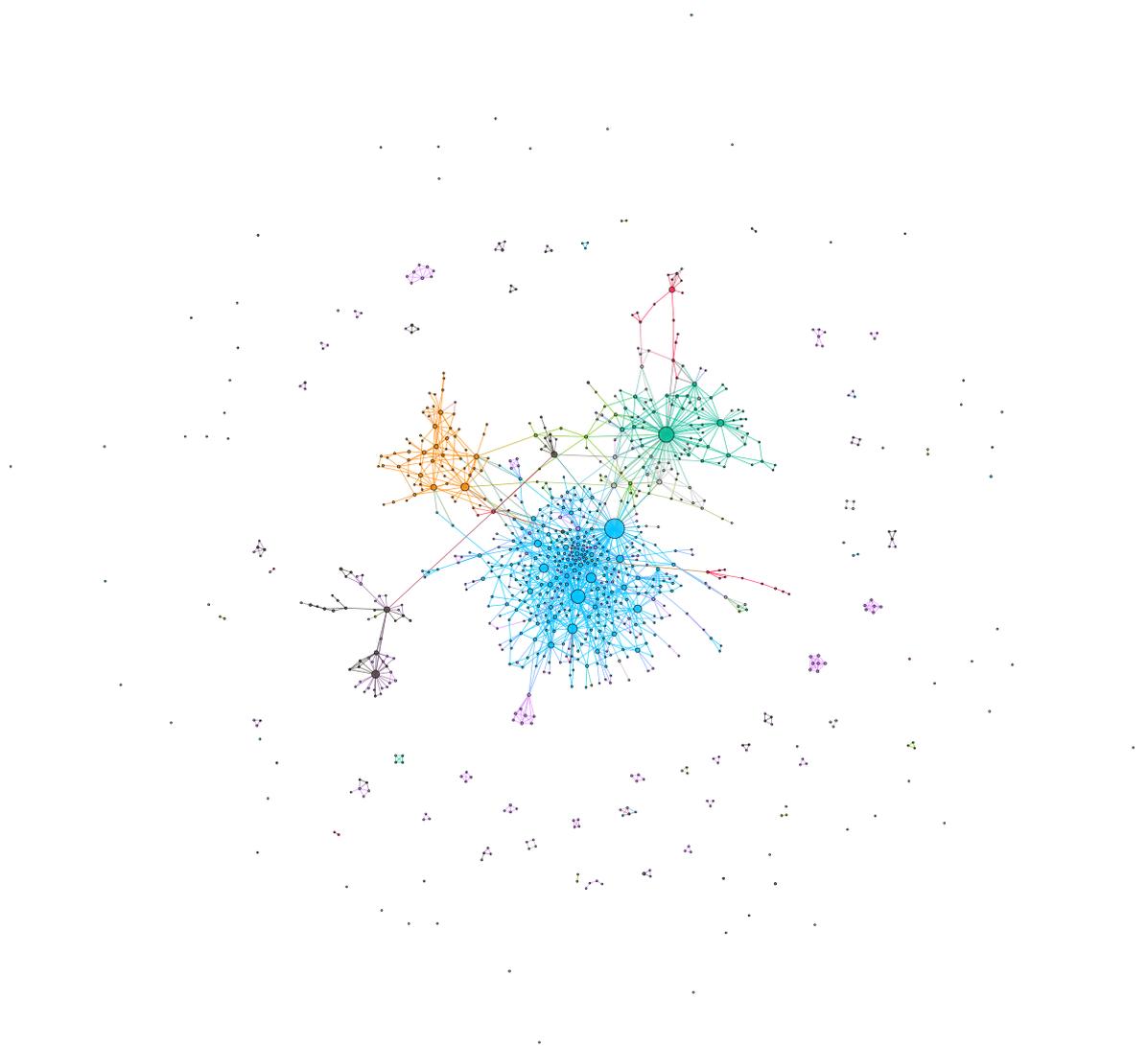


Abbildung 17: Internationales Patentnetzwerk Lithiumpatente. Dargestellt sind Organisationen mit zwei und mehr Partnern. Datenquelle: EPO PATSTAT

Projekte EU

Auf europäischer Ebene wurden Datensätze zu EU-geförderten Forschungsprojekten des 7. Forschungsrahmenprogramms (EU FP7) der statistischen Datenbank EU CORDIS herangezogen. Über alle thematischen Bereiche hinweg wurde im Titel des Forschungsprojekts nach dem Wortstamm „Batter*“ gesucht. 50 Projekte wurden gefunden. Insgesamt sind mit 119 eine hohe Anzahl privatwirtschaftlicher Unternehmen (PRC) beteiligt; darüber hinaus 54 Hochschulen (HES) und 40 Forschungseinrichtungen (REC). Abbildung 18 und Abbildung 22 zeigen die entsprechenden Netzwerkbilder. Die Knotengröße entspricht der EU-Fördersumme, die eine Organisation erhält (aufsummiert); die Knotenfarbe der nationalen Herkunft. Die drei Länder mit den meisten Organisationen sind eingefärbt: Deutschland (rot, 18,22%), Frankreich (dunkelblau, 13,56%), Italien (hellblau, 10,17%). In Abbildung 18 wurde die Kantenfarbe aus der Knotenfarbe gemischt.

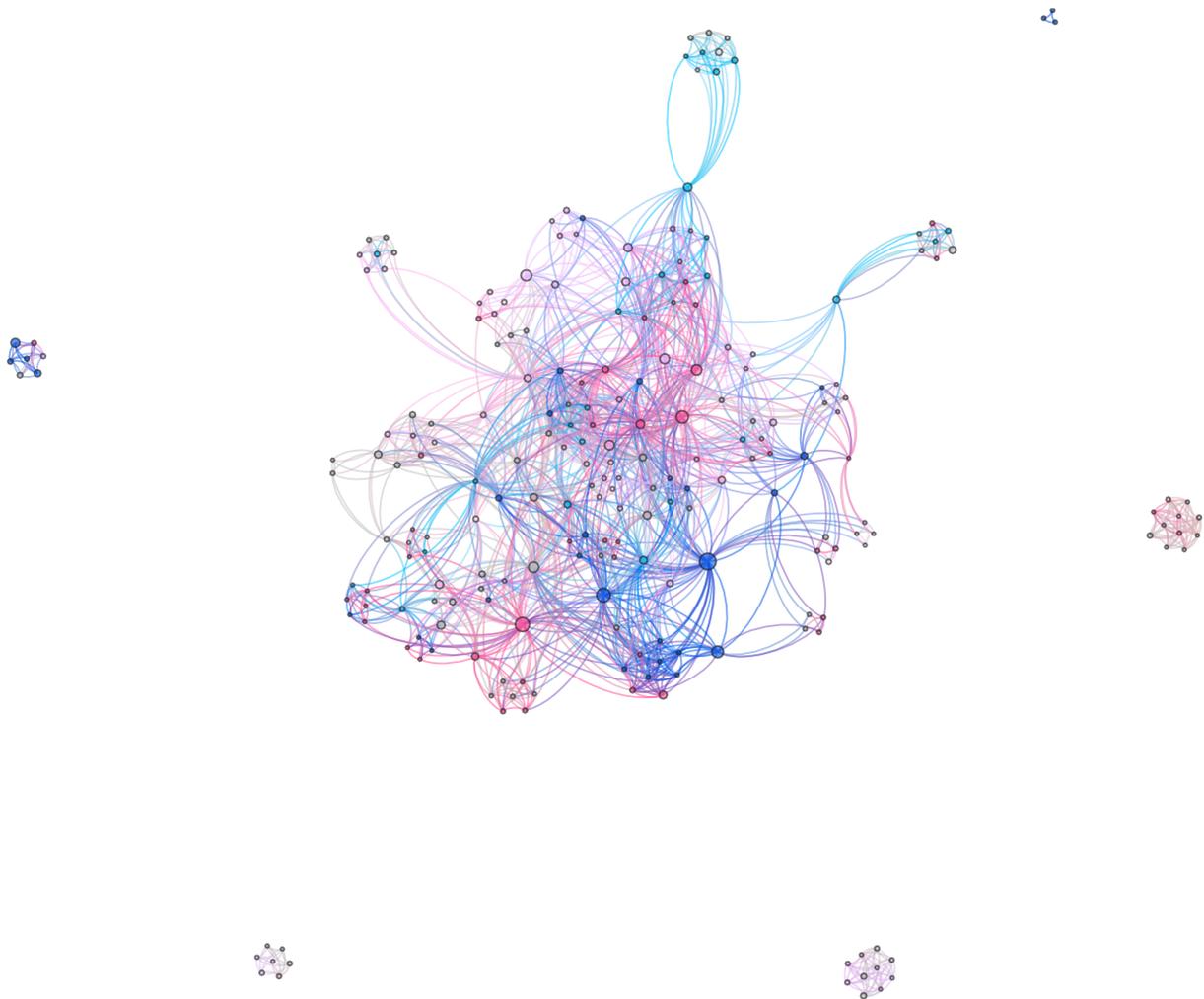


Abbildung 18: Netzwerk von Organisationen, die gemeinsam an EU FP7-geförderten Batterieforschungsprojekten arbeiten. Datenquelle: EU CORDIS

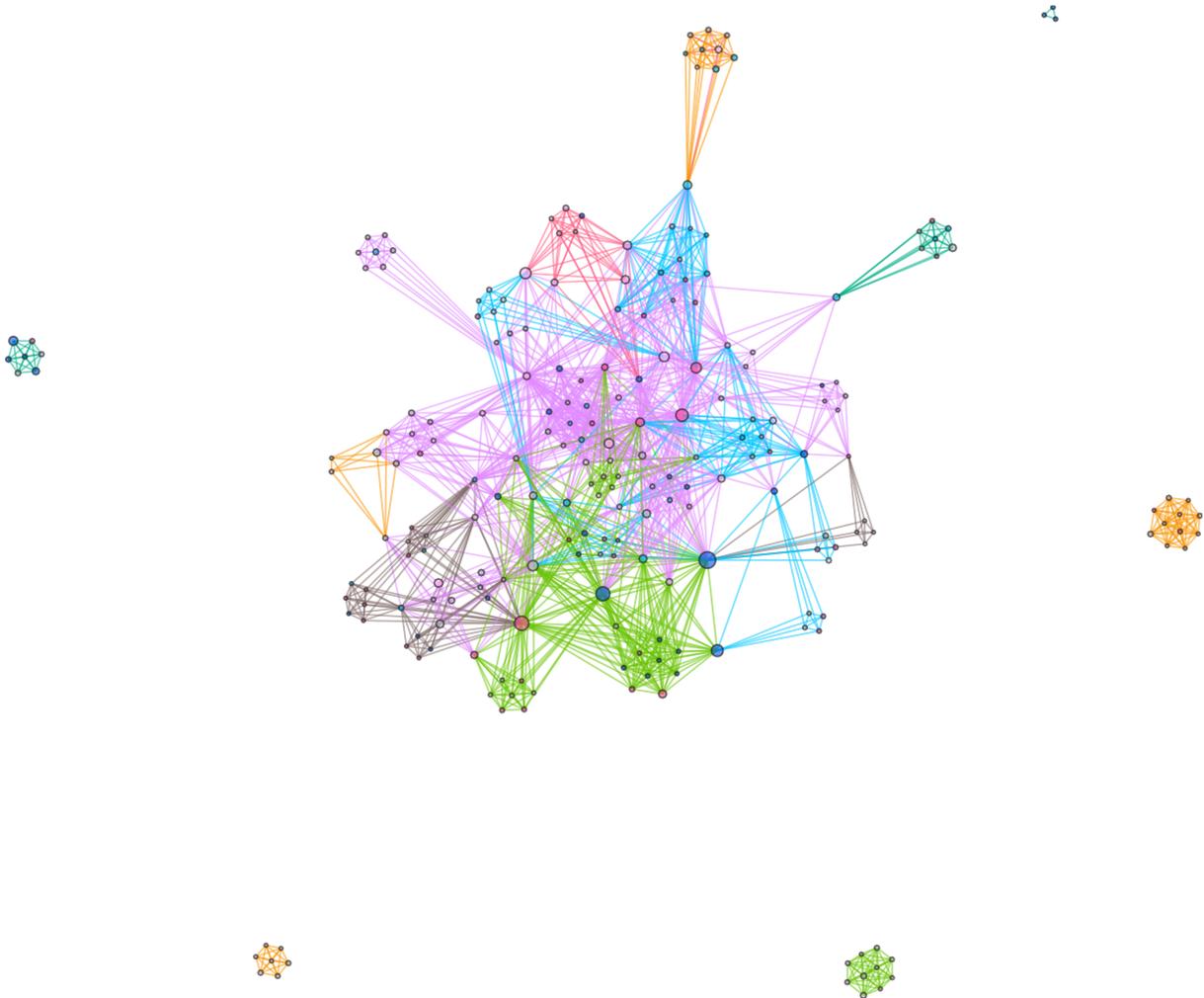


Abbildung 19: Netzwerk von Organisationen, die gemeinsam an EU FP7-geförderten Batterieforschungsprojekten arbeiten. Datenquelle: EU CORDIS

In Abbildung 19 entspricht die Kantenfarbe dem Themenfeld, in dessen Rahmen das Forschungsprojekt gefördert wurde. Interessant ist hier, wie die Förderbereiche inhaltlich miteinander zusammenhängen: der am stärksten vertretene, und zentrale Bereich „Werkstoffe und neue Produktionstechnologien“ (pink) ist eng verbunden mit „Energie“ (blau) – aber auch mit „Transport“ sowie den übrigen Bereichen. „Werkstoffe und Produktion“ könnten also eine Art Vorläufer bzw. Grundlage für folgende Innovationen sein.

Mehr als jede fünfte Organisation wird mit einem Batterieforschungsprojekt zum Thema Transport gefördert. Dies kann uns Aufschluss geben über Innovationstreiber, sowie über die Suchrichtung (TIS-Funktion 4), die seitens der EU verfolgt wird.

Die Themenbereiche im Einzelnen:

- NMP (Nanowissenschaften, Nanotechnologien, Werkstoffe und neue Produktionstechnologien): pink, 42,18%)
- Transport (Verkehr einschließlich Luftfahrt, grün, 21,54%)
- Energie (blau, 14,55%)
- SME (Forschung zugunsten KMU) (orange, 7,95%)
- ICT (Informations- und Kommunikationstechnologien): (braun, 7,12%)
- Environment (Umwelt einschließlich Klimaänderung): (rot, 3,33%)

- JTI (Gemeinsame Technologieinitiativen): (dunkelgrün, ebenfalls 3,33%)

Projekte DE

Für die Untersuchung deutscher Forschungsprojekte zu Batterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, wurde auf die Batterieforum Deutschland Projektdatenbank zurückgegriffen. Die Auswertungen auf Basis dieser Datenbank sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 visualisiert. Zu sehen sind jeweils Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen (grün), Industrie (rosa), Dienstleister (orange) und Sonstiges (blau). In Abbildung 20 entspricht die Knotengröße der Fördersumme, die eine Organisation insgesamt erhält. Gut erkennbar sind hier die wesentlichen Fördernehmer, allen voran das Batterieforschungszentrum MEET (das wesentlich zu Materialien forscht – hier wird die auf EU-Ebene beobachtete Forschungsstruktur bestätigt). In Abbildung 21 entspricht die Knotengröße einem Netzwerkmaß, das zur Identifikation von Wissensbrokern herangezogen wird (Betweenness-Zentralität). Auch dominieren Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen mit den höchsten Werten.

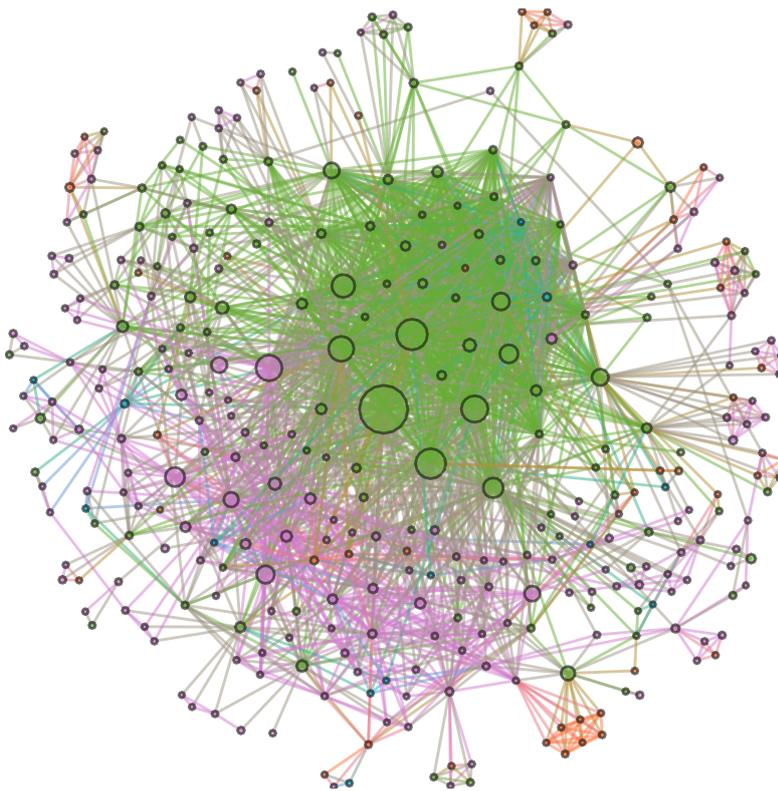


Abbildung 20: Netzwerk bundesgeförderter Batterieforschungsprojekte. Die Knotengröße entspricht der Fördersumme, die eine Organisation insgesamt erhält. Datenquelle: Batterieforum Deutschland Projektdatenbank

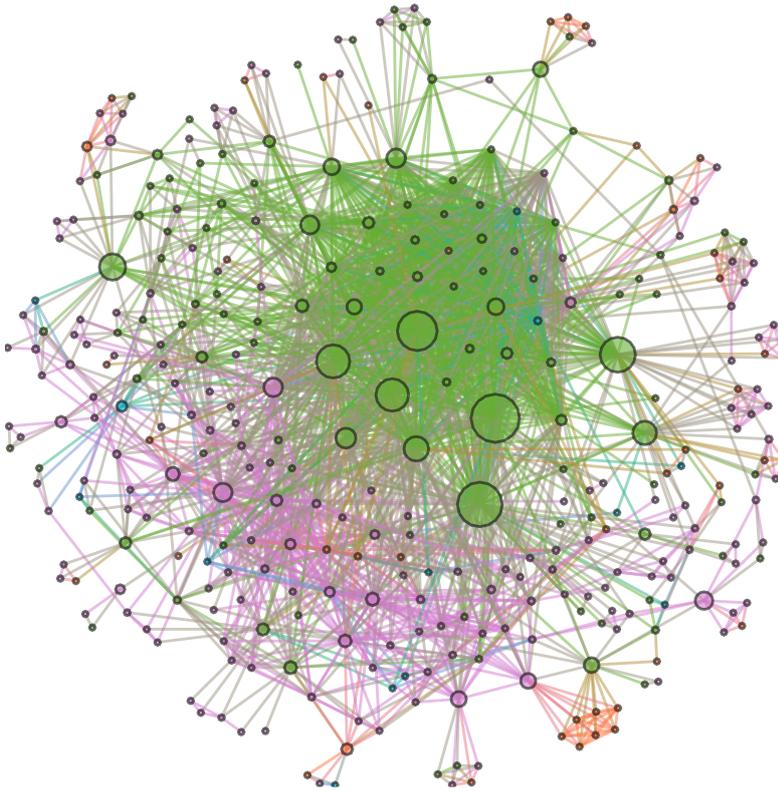


Abbildung 21: Netzwerk bundesgeförderter Batterieforschungsprojekte. Die Knotengröße entspricht einem Netzwerkmaß, das zur Identifikation von Wissensbrokern herangezogen wird (Betweenness-Zentralität). Datenquelle: Batterieforum Deutschland Projektdatenbank

4.2 Innovationshemmnisse und Fragen an die Modelle

Im Rahmen des Projekts wurde empirisch basiert, neben den TIS-Elementen und Funktionen auch erhoben, welche Hemmnisse in der Wissensgenerierung und dem Wissensaustausch tatsächlich bestehen.

Dabei wurde der Ansatz der Technologischen Innovationssysteme konsistent weiterverwendet und auf das zu untersuchende TIS übertragen. Die in der Empirie vorgefundenen, quantitativen Werte (insbesondere zu Akteuren und Interaktionen) allein lassen noch keine Aussagen über hemmende und fördernde Faktoren zu. Dies war erst durch die Bewertung von Experten möglich.

Die TIS-Funktionen werden anhand von Indikatoren gemessen und können anhand von diagnostischen Fragen grob eingeschätzt werden. Auf Basis der Funktionen, Indikatoren und Fragen kann eine Charakterisierung/ Beschreibung des Innovationssystems vorgenommen werden. Die Evaluierung/ Bewertung der vorgefundenen Werte erfolgt dann in einem nächsten Schritt durch Experten (Expertengruppe).

Im Rahmen von Experteninterviews, konnten die für deutsche Firmen bzw. das deutsche Innovationssystem relevanten Hemmnisse identifiziert werden.

Die im Rahmen des Projektes erhobenen Hemmnisse sind im Wesentlichen:

- Fehlende großvolumige Zellfertigung
- Fehlende Abstimmung auf Länderebene, bzw. auf europäischer Ebene

- Kooperationen zwischen Wissenschafts- und Wirtschaftsunternehmen häufig problematisch aufgrund verwertungsrechtlicher Probleme und „kultureller“ Unterschiede (z.B. fehlende Zielgerichtetheit)
- Fehlende Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette
- Unsicherheit über Marktentwicklung oder Ressourcenverfügbarkeit

4.2.1 Hemmnisse und systemische Probleme in Technologischen Innovationssystemen

Das Zusammenspiel der Akteure eines TIS vor dem Hintergrund bestehender, spezifischer Rahmenbedingungen ist im Rahmen vergleichbarer Untersuchungen technologischer Innovationssysteme untersucht worden. Basierend auf einer Literatur- und Studienanalyse, haben Hekkert und Negro (2011) Problemstellungen technologischer Innovationssysteme („systemic problems“) in fünf Kategorien eingeordnet. Diese lauten:

- Market structure problems
- Infrastructure problems (physical and knowledge)
- Institutional problems (hard and soft)
- Interaction problems (too strong and too weak)
- Capability problems.

Diese allgemein zusammengefassten systemischen Herausforderungen bzw. Hemmnisse werden bei Negro et al. (2012) für den Bereich der erneuerbaren Energien näher definiert und mit empirischen Unterkategorien versehen.

Mithilfe der Unterkategorien können nun die im Rahmen des Projektes erhobenen Hemmnisse eingeordnet werden. Dies geschah im Projekt durch die Befragung von Experten, und diskursiv in einer Expertengruppe. Die Beschreibung und Einordnung der Hemmnisse bildete dabei die Grundlage für die Auswahl möglicher Maßnahmen und Instrumente. Die Aussage in einem Experteninterview, „fehlende Rückspiegelung von Problemen aus der Praxis in die Forschung“ oder „Probleme aus der Praxis haben häufig in der Erkenntniswelt der Forschungsinstitute keine Relevanz“ könnten beispielsweise in den Bereich „Too weak interactions“ eingeordnet werden (vergleichbar zu „Lack of knowledge diffusion between actors“).

Aus identifizierten Hemmnissen können fördernde Maßnahmen abgeleitet werden (Grubler et al. 2012, Johnson und Jacobsson 2001, 13), die die Überwindung der Hemmnisse und die Funktionalität des Innovationssystems fördern könnten. Eine konkrete Frage an das Modell könnte demnach lauten, ob eine bestimmte Maßnahme denn auch die gewünschte Wirkung erzielt, oder sich andere Wirkungen ergeben. Für das oben angenommene Hemmnis „Too weak interactions“ bzw. „Lack of knowledge diffusion between actors“ (das spezifisch für unser TIS anhand weiterer Belege ausführlicher zu beschreiben wäre) käme dementsprechend „Cooperative research programmes ...“ als Maßnahme in Frage. Die konkrete Ausgestaltung der Modelle kann dann wiederum mit Experten diskutiert werden, wie es auch im Projekt geschah.

4.2.2 Vorgehen im Projekt

Im Projekt wurde für die Ermittlung möglichst vieler Informationen und Daten zur Fokussierung der Analysen und für die Kalibrierung ein Mixed Methods-Ansatz verfolgt. Zur Identifizierung relevanter Hemmnisse wurden zunächst Hemmnisse grob im Rahmen von Literaturrecherche und Experteninterviews erhoben und dann intensiv in einem Expertenworkshop diskutiert. Des Weiteren wurden verschiedene Datenquellen genutzt, um Akteure zu identifizieren und zu charakterisieren. Neben Patentstatistiken, Daten zur Kooperation in Forschungsprojekten und Daten zu Konferenzen im Feld, wurden statistische Daten und Daten zu Unternehmen herangezogen.

4.2.3 Innovationshemmnisse und mögliche Maßnahmen im Bereich Lithium-Batterien

Im ersten Workshop, Anfang 2018, wurden Hemmnisse im Innovationssystem und mögliche Gegenmaßnahmen untersucht, indem entlang der sieben Funktionen Technologischer Innovationssysteme die bereits bis dahin erarbeiteten Hemmnisse und möglichen Gegenmaßnahmen diskutiert und ergänzt wurden. Es ergaben sich dabei folgende Hemmnisse und mögliche Maßnahmen:

F1: Unternehmerische Aktivitäten:

Hemmnisse:

- Betrieb von Speichern je nach Anwendung nicht wirtschaftlich
- Großserienfertigung großskaliger Zellen in D fehlt als wesentliches Element der Wertschöpfungskette
- Ohne staatliche Unterstützung nicht wettbewerbsfähig
- Risiko beim Investment zu hoch

Mögliche Maßnahmen:

- Planungssicherheit schaffen (rechtlich-regulatorisch, ...)
- Potential bewusst machen

F2: Generierung von Wissen

Hemmnisse:

- Fehlende Rückkopplung von Problemen aus der Praxis in die Forschung
- IP-rechtliche Probleme
- Transfer von Wissen von der Forschung in die Industrie
- Know-How in der Errichtung von Anlagen zur Herstellung vorhanden; Erfahrung im Betrieb, in der Produktion fehlt

Mögliche Maßnahmen:

- Angepasste Projektstrukturen
- Bis in die Anwendung hinein fördern (Beispiel: Modellfabrik zur Zellfertigung)

F3: Austausch von Wissen

Hemmnisse:

- Kooperationen in der Wertschöpfungskette problematisch
- Unterschiedliche Geschäftsmodelle der Unternehmen in der Wertschöpfungskette (Beispiel: Chemie und Automobilhersteller)
- Fehlende Rückkopplung von Problemen aus der Praxis in die Forschung
- Forschungsergebnisse nur mit gewissem Aufwand einsehbar
- IP-rechtliche Probleme in der Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie

Mögliche Maßnahmen:

- KMU bei der Suche nach Partnern unterstützen
- Open Innovation Ansätze schaffen
- Netzbildung unterstützen (und effizient gestalten) – gemischte Zusammensetzung beachten
- Intermediäre einführen (auch Netzwerk-Netzwerk-Verknüpfung, nationale und europäische)

F4: Anleitung zur Suche

Hemmnisse:

- Unklarheit über die künftige Behandlung von Speichern im Hinblick auf die Belastung mit Steuern, Abgaben und Umlagen
- Langfristige Planungshorizonte nötig
- Mangelnde Abstimmung zwischen EU, Bund und Ländern
- Interessengeleitete Fehlinformationen
- Unklare und zu optimistische Informationen über Neuentwicklungen

Mögliche Maßnahmen:

- Abstimmung mit Europäischen Zielen
- Für Klarheit sorgen
- Transparenz und Lesbarkeit von Informationen fördern

F5: Marktbildung

Hemmnisse:

- Ungünstige und unübersichtliche wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen und Regularien
- Markteintrittsbarrieren zu hoch und ungleich
- Für einige Systemdienstleistungen gibt es noch gar keinen Markt
- Preis zu hoch

Mögliche Maßnahmen:

- Langfristige Lösung: Regulatorischer Rahmen: Marktliche Anreize für systemdienliche Leistungen setzen
- Marktbasierte Erlösbestandteile einführen
- Kurzfristige Lösung: Speicherstrom und Demonstrationsprojekte sollten von Umlagen befreit werden und weitere Fördermaßnahmen

- Umweltauflagen für Fahrzeuge in Innenstädten (damit Förderung der Elektromobilität + Standortvorteile für Zellfertigung in D)

F6: Mobilisierung von Ressourcen

Hemmnisse:

- Finanzierung der Startups schwierig
- Geringe Risikobereitschaft bei Kapitalgebern und etablierten Unternehmen
- Hohe Investitionsvolumen
- Fachkräftemangel (Ingenieure Prozessentwicklung, Laboranten)
- Importabhängigkeit: Rohstoffverfügbarkeit aus politischen Gründen kritisch/ Versorgungssicherheit

Mögliche Maßnahmen:

- Zellabnehmer beteiligen sich an der Finanzierung (Crowdfunding)
- Foundary-Modell
- Ausbildungsangebot verbessern
- Langfristige Verfügbarkeit der Vorprodukte und der veredelten Produkte gewährleisten
- Recycling und Second Use verringern Abhängigkeit und leisten Beitrag zur Wertschöpfung (und zur Verringerung des Carbon Footprint)

F7: Schaffung von Legitimität

Hemmnisse:

- Fehlende Standardisierung
- Einheitliche Schnittstellen fehlen, Herstellerangaben sind mangels Standardtests wenig vergleichbar
- Regelwerke zur Einbindung von Energiespeichern in die Stromnetze zu erweitern

Mögliche Maßnahmen:

- Standards einführen
- Höhere Sicherheitsstandards
- Regelwerke zur Einbindung von Energiespeichern der Elektromobilität in die Stromnetze fehlen
- Herausstellung des Beitrags zur Kohlenstoffreduktion und zur Energiewende
- Möglichkeit zur Partizipation an der Energiewende (Bonussystem, wie z.B. Privilegien für Elektrofahrzeuge)

4.2.4 Fragen an die Modelle

Aus den Hemmnissen und möglichen Maßnahmen wurde die folgende Auflistung konkreter relevanter Fragen an die Modelle erarbeitet, die im zweiten Expertenworkshop noch einmal diskutiert wurde:

1. Wie müsste eine Zellproduktion in Europa gestaltet sein, damit die Innovationsdynamik davon profitiert? – Erfahrungen in der Produktion gewinnen und effektiv teilen.
2. Wie lässt sich die Zusammenarbeit entlang und orthogonal zur Wertschöpfungskette (u.a. Rückkopplungen) am besten gestalten und welche Effekte wären damit verbunden?

Wie sind die Auswirkungen auf die Innovationstätigkeit durch...

3. ...eine stärkere Unterstützung der Speichernutzung?
4. ...Produktförderung?
5. ...Forschungsförderung?
6. ...die Verbesserung von IP-Recht (weniger Probleme in Projektteilnahmen, mehr Offenheit in Kooperation/Open Innovation)?
7. ...bessere Kooperation verschiedenartiger Akteure wie Chemie- und Autoindustrie?
8. ...die Einführung von Wissensbrokern / Netzwerkverknüpfungen zur Gewährleistung transparenter realistischer Informationen / Beratung?
9. ...geringere Importabhängigkeit (Ressourcen/Vorprodukte/veredelte Produkte)?
10. ...verlässliche Standards?
11. ...positive Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität?

Aus diesen Fragen ergeben sich in vielen Bereichen ganz neue Anforderungen an die Modelle. Sie wurden analysiert, um notwendige grundlegende Erweiterungen der Modelle zu identifizieren. Diese ergaben sich zu:

- Der Produktraum muss verändert werden. Die Wertschöpfungskette muss repräsentiert sein und der Produktraum gerichtet sein, so dass Vorprodukte klar von Produkten weiter hinten in der Wertschöpfungskette unterschieden werden können. Verschiedene Bereiche sollten unterscheidbar sein.
- Der Wissensraum muss passend interpretiert und umdefiniert werden. Entfernungen von Wissen zueinander sollte messbar sein, um unterschiedliche Qualitäten des Austausches abhängig vom Vorwissen abbilden zu können. Zudem sind praktisches und wissenschaftliches Wissen zu unterscheiden, da sie unterschiedlich entstehen und ausgetauscht werden.
- Asiatische Zellhersteller müssen explizit abgebildet sein, mit der Option, dass sie aktiv oder weniger aktiv am Innovationsgeschehen in Deutschland teilnehmen.
- Beiträge von Wissen aus der Forschung sollten implementiert werden, um Einflüsse verschiedener Forschungsförderung abschätzen zu können.
- Kooperationsformate sollten erweitert und die vorhanden überprüft werden.
- Firmen sollten sich verlinken können und mehr als ein Produkt herstellen können.
- Weitere Trigger für die Entstehung verschiedener Typen von Start-ups sollten eingeführt werden. Start-ups sollten auch als Spin-offs, aber auch mit zufälligem Wissen entstehen.
- Weitere Trigger für Forschung in Firmen sollten eingeführt werden. Auch bei hohen Gewinnen sollte geforscht werden.
- Die Erlöspotentiale, die mit Technologien verschiedener Eigenschaften im stationären Einsatz erreicht werden können, sollten abgeschätzt und für die Modellierungen eingesetzt werden.
- Die bereits bestehende Abbildung der Qualität von Produkten und ihre Bedeutung sollten überarbeitet werden, um so die Modellierung von Parameterverbesserungen zu ermöglichen. Auch die Abbildung in Kenes sollte überdacht und ggf. geändert werden.
- Für die Simulation ist auch der Einsatz von Batterien in anderen Märkten als der stationären Energieversorgung abzubilden, um die Gesamtnachfrage nach Batterien abschätzen zu können.

5 Wissensdynamiken und Innovationsentstehung – das Modell SKIN-Energy

5.1 Das Basis-SKIN-Modell

Das Basis-SKIN-Modell (siehe Gilbert et al., 2010; Pyka et al., 2007) ist eine Abstraktion eines Netzwerks von Firmen, umgesetzt in der ABM-orientierten Programmiersprache NetLogo (Wilensky, 1999). Jede Firma ist ein unabhängiger Agent in dem Modell und verfügt über ein bestimmtes individuelles Wissen. Die Firmen nutzen einen Teil ihres Wissens, um ein Produkt zu erzeugen, das sie entweder an andere Unternehmen oder auf einem Endprodukt-Markt außerhalb des Modells zu verkaufen versuchen. Das Netzwerk entwickelt sich durch die Aktivitäten der Firmen: durch den Kauf und Verkauf von Ressourcen und Produkten und durch den Austausch von Wissen während kollaborativer Produktionsprozesse.

5.1.1 Wissen im Basis-SKIN-Modell

Das Wissen von Akteuren wird als eine Menge von Wissensvektoren dargestellt. Aufgrund des evolutionären Mechanismus im Modell werden diese "Wissensgenen" (*knowledge genes*, kurz *kenes*) genannt, die jeweils aus drei Komponenten bestehen: Wissensfeld (*capability*) C , Fähigkeit (*ability*) A und *expertise* E . Ein Wissensschatz eines Agenten im Modell mit n Wissensvektoren könnte zum Beispiel so aussehen:

$$\mathbf{k} \equiv \left[\begin{pmatrix} C_1 \\ A_1 \\ E_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} C_2 \\ A_2 \\ E_2 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} C_n \\ A_n \\ E_n \end{pmatrix} \right].$$

Die *capability* (eine Ganzzahl zwischen 1 und 1000) kann interpretiert werden als die allgemeine Richtung des Wissens, etwa eine bestimmte Disziplin, z. B. anorganische Chemie oder Molekularbiologie. Die *ability* (eine Gleitkommazahl zwischen 0 und 10) steht für eine spezialisierte Methode oder einen Bereich innerhalb der Disziplin, z. B. Röntgenspektroskopie oder DNA-Sequenzierung. Im Zusammenhang mit der der Produktion des Unternehmens, kann es mit einem bestimmten Herstellungsverfahren zusammenhängen, z. B. der Elektrodenbeschichtung oder der Vakuumtrocknung bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen. Die *expertise* (eine Ganzzahl zwischen 1 und 10) ist ein Maß dafür, wie qualifiziert das Unternehmen ist, diese Methode auszuführen. Sie wird im Laufe der Simulation erhöht, wenn das *kene* für die Produktion verwendet wird und Teil der Innovationshypothese ist (siehe unten). Ansonsten nimmt sie ab. Während der Zusammenarbeit bei der Produktion von Gütern wird Wissen ausgetauscht.

Jedes Unternehmen kann immer nur ein Produkt auf einmal herstellen, wobei mindestens ein, höchstens vier andere Produkte als Input verwendet werden. Es tut dies, indem es eine Teilmenge seines Wissens auswählt, die als *Innovationshypothese (IH)* bezeichnet wird. Zum Beispiel könnte eine Firma mit sechs Kenes eine IH mit der Länge $m = 3$ haben, etwa:

$$IH \equiv [1,4,6],$$

sodass also das erste, vierte und sechste Kene des Wissens der Firma Teil der Innovationshypothese sind.

5.1.2 Der Produktraum im Basis-SKIN

Der sog. Produktraum charakterisiert Produkte über IDs. Die Produkt-IDs reichen von 0 bis 99. Der Bereich von 0 bis 9 ist für Rohstoffe reserviert. Es handelt sich um reine Inputs, die von außen in das Modell gelangen. Diese Produkte werden nicht von modelleigenen Firmen hergestellt, aber von ihnen für die Produktion benötigt. Im Bereich von 10 bis 89 liegen die Zwischenprodukte: Produkte, die sowohl als Input als auch als Output dienen. Sie werden von Modellfirmen hergestellt und andere Modellfirmen nutzen sie als Inputprodukte. Im Bereich von 90 bis 99 liegen die Endprodukte, die reine Outputs sind und von Firmen produziert, aber nicht von anderen Firmen benötigt werden. Sie werden auf einem modellexternen Markt verkauft. Der Produktraum ist nicht weiter differenziert und jedes der Zwischenprodukte kann als Input eines anderen verwendet werden (s.u.).

5.1.3 Aus Wissen entstehen Produkte

Die Produktion eines Produkts erfolgt im Modell, indem die Kenes k (mit Capabilities C und Abilities A) und die IH über folgende Formel auf die Produkt-ID p in $[0, \dots, 99]$ abgebildet werden:

$$p(b, t) = b + \text{floor} \left(\left(\sum_{i=1}^m C_{IH_i} \times A_{IH_i} \right) \text{mod}(t - b) \right).$$

Die Funktion $p(b, t)$ bildet das Wissen auf den Produkt-ID-Bereich zwischen b ("bottom") und $t - 1$ ("top") ab. Es dient dazu, sowohl die Produkt-ID des Output-Produkts wie auch die der Input-Produkte zu bestimmen: Mit $p(10,100)$ erhält man die Output-ID, die zwischen 10 und 99 liegt, mit $p(0,90)$ und zufällig ausgewählten Submengen der IH werden die IDs der Inputs bestimmt, die zwischen 0 und 89 liegen. Jedes Output-Produkt $p_o \in [10, \dots, 99]$ kann jedes Input-Produkt $p_i \in [0, \dots, 89]$ benötigen. Firmen können auch Produkte verarbeiten, deren ID größer ist als ihre Output-ID, solange es sich nicht um ein Endprodukt handelt. Die Existenz von Rohstoffen (mit kleinsten IDs) und Endprodukten (mit größten IDs) stellt eine rudimentäre Abbildung einer Wertschöpfungskette dar. Es sind jedoch nur die drei Bereiche Ressourcen, Zwischenprodukte und Endprodukte unterschieden. Für die Anforderungen hier sollte bei der Modellierung der Wertschöpfungskette die Produkt-ID in der Produktionskette stetig oder zumindest überwiegend zunehmen. Dazu ist die Einführung weiterer Zwischenstufen notwendig. Auch Zwischenstufen zwischen Rohstoffen und Endprodukten werden benötigt, die ebenfalls im Basis-SKIN nicht differenziert sind.

Es gibt einen zufälligen, jedoch deterministischen Zusammenhang zwischen Wissen und Produkt: Dasselbe eingesetzte Wissen (d.h. dieselbe IH) resultiert über die obige Formel

immer in demselben Produkt p . Doch schon eine kleine Änderung in einer der Capabilities oder Abilities kann ein komplett anderes Produkt ergeben. Und auf Grund der Natur der Modulo-Funktion, die zwischen 0 und $(t - b)$ "rotiert", kann unterschiedliches Wissen auch zu demselben oder einem sehr ähnlichen Produkt führen. Dies ist ein wichtiger Aspekt des evolutionären Modells, der in der Umsetzung zu SKIN-Energy erhalten wird (s. Kapitel 5.7).

5.1.4 Wertschöpfungskette, Preise und Märkte

Im Basis-SKIN kann eine Firma nur produzieren, wenn: (1) ihre Input-Produkte verfügbar sind, (2) ihr Output-Produkt verkauft werden kann und (3) ihre Inputs weniger kosten als der Preis, zu dem der Output verkauft wird. Andernfalls versucht die Firma mit anderen Firmen Wissen auszutauschen und/oder selbst zu forschen und zu ihr Wissen zu verändern. Jede Firma kann also nur entweder produzieren oder kollaborieren/forschen und dadurch neues Wissen für die Produktion erlangen. Firmen im Basis-SKIN innovieren folglich nur wenn es notwendig ist, d.h. wenn sie ihr aktuelles Produkt nicht absetzen können.

Um eine Wertschöpfungskette zu etablieren muss jede Firma prüfen, ob ihre Lieferanten und Kunden profitabel sind, da sie ansonsten weder Outputs verkaufen noch Inputs kaufen. Der Wertschöpfungsalgorithmus von SKIN ist eine Iteration, die mit allen Firmen beginnt, deren Inputs erhältlich sind. Firmen, deren Output nicht absetzbar ist oder deren Inputs mehr kosten als ihr Output, werden der Reihe nach entfernt. Die Iteration wird abgebrochen, sobald keine Änderung mehr eintritt. Es bleiben nur Firmen übrig, deren Inputs verfügbar sind, deren Produkt sich verkaufen lässt und die durch die Produktion und den Verkauf Profit machen können. Während der Iteration merkt sich jede Firma ihre billigsten Lieferanten. Die Firma wird dadurch zum Kunden dieser Lieferanten, und auch die Lieferanten merken sich die Firma als Kunden.

Im Basis-SKIN ist die Größe der Nachfrage, die die Firmen bedienen müssen, unbekannt. Jede Firma kauft nur ein einzelnes Input-Produkt von jedem Lieferanten, egal wie viele Kunden sie hat und wie oft sie aus den Inputs ein Output-Produkt herstellt und verkauft. Die einzig mögliche Abschätzung der Nachfrage ist die Anzahl der Kunden, doch die tatsächliche Nachfrage kann ein Vielfaches davon sein, wenn jeder Kunde seinerseits mehrere Kunden hat und so weiter.

Preise werden im Basis-SKIN folgendermaßen festgelegt: Rohstoffe ($p < 10$) werden zu einem Festpreis von 1 Preiseinheit verkauft, Endprodukte ($p \geq 90$) zu einem Festpreis von 10.000 Preiseinheiten. Zwischenprodukte haben einen zufälligen Preis, der zwischen 1 und 1.000 Preiseinheiten liegt. Kosten entstehen allein durch die Preise der Input-Produkte. Weitere produktionsbedingte Kosten durch Löhne, Energieverbrauch etc. werden nicht berücksichtigt, jedoch kann eine fixe Summe als Abschreibung festgelegt werden. Während es bei Zwischenprodukten sowohl zu mangelndem Angebot (es wird von keiner Firma hergestellt) als auch mangelnder Nachfrage (es wird von keiner Firma benötigt) kommen kann, gilt dies nicht für Rohstoffe und Endprodukte. Es herrscht ein unbegrenztes Angebot von Rohstoffen sowie eine unbegrenzte Nachfrage nach Endprodukten in Basis-SKIN.

5.2 Wissen, Expertise und Qualität

Die Entstehung und der Austausch von Wissen als zentrale Elemente eines Technologischen Innovationsystems (s. 3.3.2) sind gleichzeitig auch zentrale Elemente des Basis-SKIN-Modells. Für die hier umgesetzte Variante des Modells stellte sich daher die Frage wie das im Modell abgebildete Wissen interpretiert werden soll und welche Auswirkungen dies auf die Umsetzung des Prozesses des Wissensaustausches, auf die gewonnene und übertragene Expertise und ggf. auch auf die produzierten Güter haben sollte. Entsprechend wurden zunächst verschiedene Charakterisierungen bzw. Dimensionen von Wissen analysiert, Studien zur Beschreibung von Wissensaustausch untersucht und aus diesen Grundlagen Änderungen in der Wissensabbildung in SKIN implementiert.

Kline und Rosenberg (1986) unterscheiden verschiedene Arten von Wissen, die für Innovationsprozesse im Bereich der Produktentwicklung wesentlich sind: Universitätswissen, Wissen aus der Grundlagenforschung, Systemwissen, Prozesswissen und „geleiteter Empirismus“. Um diese genauer im Hinblick auf ihre Generierung und ihren Austausch in Verbindung mit Innovationsprozessen spezifizieren zu können, werden hier verschiedene Perspektiven auf Wissen herangezogen aus denen sich ganz unterschiedliche Charakteristika ergeben, die in den modellierten Prozessen berücksichtigt werden sollten. Aus ihnen werden schließlich Möglichkeiten zur Abbildung im Modell erarbeitet.

5.2.1 Verschiedene Dimensionen von Wissen

Eine sehr grundlegende Perspektive auf Wissensarten erhält man, wenn man die Herstellung eines Produktes als strategische Handlung betrachtet (vgl. auch Grunwald 2004). Um ein Produkt herzustellen muss man zunächst wissen wofür das Produkt genutzt werden soll (Orientierungswissen). Dieses Wissen ergibt sich aus normativen Prämissen, die als Anforderungen für das Produkt von außen herangetragen werden. Des Weiteren ist Systemwissen notwendig, um ein Produkt so erstellen zu können, dass mit ihm die gewünschten Funktionalitäten realisiert werden. Zudem ist Systemwissen wichtig, um die Maschinen und Prozesse zu gestalten, mit denen das Produkt (kostengünstig) hergestellt werden kann. Als dritte Komponente wird Handlungswissen benötigt. Dieses beinhaltet neben dem Wissen welche Handlung vollführt werden muss, um bestimmte Prozesse anzustoßen auch das Wissen darüber wie die Handlungen durchgeführt werden müssen, um die Produkte herzustellen. Besonders deutlich wird die Wichtigkeit dieses Wissens in handwerklichen Prozessen. Der praktische effektive Umgang mit verschiedenen Materialien muss nicht nur theoretisch ergründet sein, sondern vor allem praktisch eingeübt werden um die Handlung zielgerichtet durchführen zu können. Nach Janich (2001) geht es darum Handlungsschemata zu identifizieren und zu erlernen, um die entsprechenden Handlungen erfolgreich bzw. mit dem gewünschten Resultat durchführen zu können.

Die Beschreibung von Handlungswissen führt zu einer weiteren wichtigen Unterscheidung von Wissensarten: Kodifizierbares und nicht-kodifizierbares Wissen (codifiable and tacit knowledge (vgl. Foray 2007, Polanyi 1966)). Nicht-kodifizierbares Wissen wird dabei verstanden als Wissen, das nicht außerhalb der Handlung einer Person ausgedrückt werden kann (Foray 2007, 236). Wesentliche Beispiele sind bestimmte Bewegungen, die nur durch

Übung und Korrektur in direktem Austausch zwischen Lehrer und Schüler erlernt werden können. Eine Wissensübertragung erfordert damit einen sehr viel intensiveren Austausch als kodifizierbares Wissen. Für die Abbildung des Wissensaustausches ist neben dieser Kategorisierung aber auch noch zu unterscheiden ob kodifizierbares Wissen tatsächlich kodifiziert wurde. Die entsprechende Unterscheidung zwischen kodifiziertem und nicht kodifiziertem Wissen ist zusätzlich für die Praxis wichtig. Gründe dafür, dass explizierbares Wissen nach wie vor nur in impliziter Form vorliegt, können fehlende Zeit für die Kodifizierung oder strategische Entscheidungen sein (Foray 2007, Alexander 2012).

Die oben bereits angeklungene Unterscheidung von Theorie und praktischem Wissen dazu wie man zu handeln hat, führt auf die Unterscheidung nach dem Praxisgrad des Wissens. Je näher das Wissen an der Praxis ist, desto weniger ist dieses Wissen auf ähnliche Sachverhalte übertragbar bzw. desto weniger ist es allgemein anwendbar. Vor diesem Hintergrund können verschiedene Stufen von Expertise auf Basis verallgemeinerbaren wissenschaftlichen Wissens und praktischen Wissens unterschieden werden. Wissenschaftliches Wissen ist Wissen, dass mit dem Ziel des Erkenntnisgewinns oder in angewandter Forschung entstanden ist und an Universitäten gelehrt wird. Nach Droste-Franke et al. (2015) wenden wissenschaftliche Experten wissenschaftliches Wissen auf konkrete Fälle bzw. Probleme an, um für sie Lösungen zu erarbeiten. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich daraus generalisiertes wissenschaftliches Wissen so auf die spezifische Fragestellung anzupassen, dass es für die konkreten anwendungsorientierten Kontexte genutzt werden kann. Professionelle Expertise ist demgegenüber Expertise, die ggf. auch wissenschaftliches Wissen enthält, aber anwendungsorientiert ist und einen spezifischen anwendungsorientierten Teil enthält. Beispiele für Berufen, in denen dieses Wissen wichtig ist, sind Rechtsanwälte, Richter, Verwaltungsangestellte und Ärzte. Ihnen gemeinsam ist es, dass sie sich mit einzelnen Fällen beschäftigen für deren Bearbeitung generalisiertes Wissen und Regeln im konkreten Kontext erst anwendbar gemacht werden müssen. Für Juristen z.B. spielen dabei in der Praxis neben Gesetzestexten auch Urteile, also die Auslegung der Gesetze für einzelne Sachverhalte, eine wesentliche Rolle. Technische Expertise ist das Wissen einen festen Satz an Regeln für ähnliche Fälle richtig anzuwenden. Erfahrungsbasierte lokale Expertise stellt eine weitere Variante dar. Sie besitzt tieferes empirisches Wissen in einem bestimmten Anwendungsbereich. Es ist meist nur gültig für den spezifischen Anwendungsfall, in dem es gewonnen wurde, und kann nur schwer auf andere Kontexte übertragen werden, ist aber oftmals der Schlüssel zur Erarbeitung anwendbarer Lösungen. Eine besondere Schwierigkeit mit ihm ist, dass es nicht zertifizierbar ist.

Eine ganz wesentliche Dimension zeigt sich, wenn man den Prozess der Kodifizierung von Wissen genauer betrachtet. Eine Kodifizierung von Wissen erfolgt immer in einem Beschreibungssystem bzw. einer Sprache, die durch eine bestimmte Perspektive geprägt ist. In der Wissenschaft wird die Perspektive durch die gewählten theoretischen Ansätze, Theorien oder die beschreibende wissenschaftliche Disziplin festgelegt. Die Unterscheidung verschiedener Perspektiven eröffnet die Möglichkeit (Beschreibungs-)Systeme und ihre Umwelt scharf voneinander zu trennen (Droste-Franke 2015c). Disziplinäre Perspektiven werden sowohl in der wissenschaftlichen als auch in der professionellen und technischen

Expertise eingenommen. Darüber hinaus zeigt eine Charakterisierung von Disziplinen im Hinblick auf den Grad ihrer Formalisierungen und damit der Möglichkeit Vorhersagemodelle zu entwickeln, das Potential für die Anwendbarkeit der entsprechenden wissenschaftlichen Expertise für Innovationsprozesse (Kline und Rosenberg 1987).

5.2.2 Generierung und Austausch für Innovationsprozesse relevanten Wissens

Die Wege über die man in einer Firma verschiedenes Wissen, das für Innovationsprozesse relevant ist, bekommen kann, sind für die verschiedenen relevanten Wissenskomponenten sehr unterschiedlich (vgl. Kline und Rosenberg 1987):

Universitäts- bzw. Hochschulwissen kann sehr einfach über die Rekrutierung von Kandidaten mit Abschlüssen in entsprechenden Fächern erfolgen. Dabei unterscheidet sich das Wissen in verschiedenen Disziplinen in ihrem Formalisierungsgrad. Je formalisierter das Wissen ist, desto eher sind systemische Zusammenhänge bekannt und desto eher ist es für die Voraussagen bzw. entsprechende Modellierung einsetzbar. Diese wiederum sind für jeden, der in der entsprechenden Disziplin geschult ist, direkt anwendbar (Kline und Rosenberg 1987, 295f.). Geeignetes Wissen zur Entwicklung bzw. Herstellung eines bestimmten Produktes kann einfach durch Analyse der einzelnen Komponenten bzw. (potentiellen) Prozesse zur Herstellung identifiziert werden. Universitätswissen ist weitgehend kodifiziert und das jeweilige Können der Abgänger ist gut aus den entsprechenden Zeugnissen ablesbar.

Wissen aus der Grundlagenlagenforschung kann nur mit Forschern gewonnen werden, die geeignet sind, diese Forschung durchzuführen. Wissen zur Durchführung von Grundlagenforschung beinhaltet tiefes Wissen in einem kleinen Bereich der Forschung in einer Disziplin und Wissen über und Erfahrungen mit den benötigten wissenschaftlichen Methoden. Solches Wissen kann durch Rekrutierung entsprechend spezialisierter Universitätsabgänger für ein Unternehmen gewonnen werden. Je näher das Wissen an dem gewünschten Wissen ist, desto wertvoller ist es für den Betrieb. Abgänger derselben oder einer konkurrierenden Firma im Feld sind von besonderem Interesse. Neues Grundlagenwissen kann entweder über Kooperationen mit Universitäten und Fachhochschulen oder über die Forschung geeigneter eigener Angestellter erarbeitet werden. Diese Art der Forschung ist vor allem für frühe Entwicklungsstadien von Produkten, Design und Erfindungen, wichtig. In dem Bereich einsetzbare Kandidaten sind ebenfalls zertifiziert.

Besonders in der Entwicklungsphase eines Produkts ist Systemforschung gefragt. Diese Art der Forschung ist meistens interdisziplinär und zielt darauf ab systemische Zusammenhänge zwischen Komponenten zu verstehen und vorherzusagen, um die Systemeigenschaften eines Produkts im Hinblick auf Funktionen und Stabilität zu analysieren. Vorhersagefähige Theorien und Modelle sind Voraussetzungen dazu. Auch hier sind spezifisches Wissen und Erfahrungen in den relevanten Systemzusammenhängen von Vorteil. Diese können im Unternehmen, unter anderem in Kooperation mit Forschungsinstitutionen, erarbeitet werden. Abgänger sind auch in diesem Bereich zertifiziert.

Prozessforschung konzentriert sich darauf Produktionsprozesse effizient zu gestalten. Solche Prozessoptimierungen sind vor allem für die Herstellung von Endprodukten wichtig.

Entsprechendes Wissen kann in enger Kooperation mit Instituten der angewandten Forschung gewonnen werden. Es erfordert in erheblichem Maße lokales erfahrungsbasiertes Wissen und eine Menge nicht kodifizierbaren bzw. nicht kodifizierten Wissens. Neben wissenschaftlicher ist auch professionelle und technische Expertise wichtig. Typische Kandidaten sind ebenfalls zertifiziert, aber je wichtiger spezifische Kenntnisse sind, desto schwerer wird es die besten Kandidaten zu erkennen.

In Bereichen, für die kein vorhersagefähiges Wissen verfügbar ist, können Fortschritte mit „wissensgeleitetem Probieren“ („*guided empirism*“) erreicht werden (ibid. 296). Die besten Ausgangspunkte für die Prozesse der Bearbeitung, der Zusammenstellung, des Testens, des Lernens und der stetigen Verbesserung des Produkts sind Praktiken, die bereits zur Herstellung von Vorgängerprodukten verwendet wurden. Oft ist wissenschaftliches Wissen in diesem Bereich komplett irrelevant. Stattdessen wird hier in hohem Maße lokales erfahrungsbasiertes Wissen benötigt. Dieses ist oftmals nicht zertifiziert.

Die Diskussion der verschiedenen Typen von Wissen, die für die Entwicklung und Produktion innovativer Produkte benötigt werden, zeigt, dass dieses oftmals nicht durch Einstellung entsprechender Hochschulabgänger gewonnen werden kann. Vielmehr wird in verschiedenen Stadien der Produktion erfahrungsbasiertes Wissen benötigt, welches kaum zertifiziert wird. Dieses kann hingegen über enge Kooperationen mit anderen Praktikern erworben werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die grundlegende fachliche Expertise im Unternehmen entwickelt wird („*absorptive capacities*“ bzw. „*receiver competence*“) (Alexander 2012, Adams et al. 2006, Pyka 2007, Cohen and Levinthal 1989, Eliasson 1990). Quellen für innovationsrelevantes Wissen sind nach Bommer und Jalajas (2004):

- Unternehmensintern: Arbeitskollegen, interne Forschung und Entwicklung, Marketing, das erfahrene Management, Herstellungsprozesse oder Produktion;
- Unternehmensextern: Akquisition neuen Equipments, Beratung, Kooperation mit anderen Firmen, Nutzer/Kunden, Wettbewerber, Literatur / Internet, professionelle Zeitschriften, Konferenzbesuche, direkte Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten.

Auf Basis von Literatur und eigener empirischer Forschung hat Alexander (2012) verschiedenen Arten des Wissensaustausches im Hinblick auf den Austausch nicht-kodifizierbaren Wissens hin untersucht. Als wesentliche Formate stehen vor allem gemeinsame Arbeiten in Projekten heraus, auch gemeinsame Veröffentlichungen können relevant sein. Bei Konferenzen und Netzwerken hängt es von der Intensität des Wissensaustausches ab. Weitere wesentliche Kooperationen und Kodifizierungsarbeiten erfolgen zudem im Bereich von Patentierungen.

Wenn man alle diskutierten Elemente zusammennimmt, erhält man ein sehr gutes Bild von den verschiedenen, für Innovationsprozesse relevanten, Wissenstypen und Optionen zu ihrem Austausch. Diese werden für die Modellierung zusammengeführt und im Modell umgesetzt.

5.2.3 Modellierung des Wissensraums und des Wissensaustausches

Das Wissen in SKIN ist in Vektoren dargestellt, sogenannten Kenes. Die Komponenten sind Wissensfeld, Fähigkeit und Expertise (vgl. 5.1.1). Diese Struktur wird im SKIN-Energy Modell im Wesentlichen übernommen. Allerdings wird die Bedeutung der Expertise stärker herausgearbeitet. Expertise bedeutet im Modell die Expertise in dem Wissensfeld mit der bestimmten Fähigkeit, also praktischen Wissens. Eine höhere Expertise führt, wie auch im Basis-SKIN dazu, dass qualitativ bessere Produkte hergestellt werden können. Erfahrung in der Produktion aber auch Verwendung der Fähigkeit in öffentlich geförderten Forschungsprojekten führt zu einer Erhöhung der Expertise. Grundlage für diesen Ausbau ist die Einführung einer neuen Variable, die die Menge des erworbenen Wissens zu einer spezifischen Fähigkeit enthält.

Zur Produktion verwendet werden können Fähigkeiten aus allen Wissensfeldern des Wissensraums (*capability*: 0-1000). Der Wissensraum wird so interpretiert, dass der Abstand von Wissensfeldern im Wissensraum auch dem inhaltlichen Abstand voneinander entsprechen. Dies ermöglicht es zu unterscheiden wie weit ein Wissensfeld von einem anderen entfernt ist und somit welche „*absorptive capacity*“ oder „*receiver competences*“ bei einem Akteur zur Aufnahme von Wissen aus einem bestimmten Wissensfeld besteht. Für das Modell wird standardmäßig angenommen, dass die Menge des übertragbaren Wissens bis zu einem Abstand von 50 *capabilities* linear auf null abfällt.

Des Weiteren wird wissenschaftliches Wissen oder Expertise von praktischer Expertise unterschieden. Ähnlich dem Ansatz in anderen SKIN-Versionen, etwa dem EIS-SKIN (EIS-SKIN 2020), wird den Firmen spezifisches Wissen zugeordnet. Dieses Wissen zeichnet sich dadurch aus, dass es nur Firmen besitzen können und es nur durch Austausch mit Firmen erworben werden kann. Auf diese Weise werden die hohe Relevanz und Spezialisierung erfahrungsbasierten Wissens für die Produktion von Gütern nach Kline und Rosenberg (1987) abgebildet (s. 5.2.2). Um trotzdem auch den Abstand des Wissens zweier Akteure voneinander messen zu können, wird das praktische Wissen im Wissensraum verteilt. Im Falle der Standardeinstellung von 20% praktischem und 80% wissenschaftlichen Wissen stellt z.B. jede fünfte *capability* praktisches Wissen dar.

Die Menge von Wissen in einer Fähigkeit kann durch Austausch „direkt anwendbaren Wissens“ mit anderen Akteuren erhöht werden. Erst durch die Menge über Erfahrungsgewinn bzw. Austausch aufgenommenen Wissens erhöht sich dann die Expertise eines Akteurs zu der Fähigkeit. Ein Austausch findet im Modell, wie im Basismodell, vor allem bei gemeinsamer Produktion oder bei der inhaltlichen Zusammenarbeit in Projekten statt. Diese entsprechen Austauschformaten, in denen gute Möglichkeiten für ausreichend intensiven Austausch von Wissen bestehen, um auch nichtkodifiziertes Wissen erwerben zu können (s.o.).

5.2.4 Wissen, Expertise und Qualität

Der hier gewählte Ansatz für die Darstellung der Expertise unterscheidet sich wesentlich von der Umsetzung im Basis-SKIN. Im Basis-SKIN-Modell ergibt sich die Expertise der Akteure aus der Erfahrung in der Produktion. Mit jedem Zeitschritt, in dem das Wissen für die Herstellung eines Produkts verwendet wird, erhöht sich dort die Expertise linear um eins. Bereits nach

zehn Zeitschritten Produktion, also nach ca. 10 Monaten, ist dann die maximale Expertise erreicht und kann auch nicht mehr zusätzlich ansteigen. Im Basismodell spielt zudem die Expertise nur dann für die Produktwahl des Konsumenten eine Rolle, wenn der Preis exakt gleich ist.

In der Umsetzung hier steigt die Expertise im Gegensatz zur Umsetzung im Basis-SKIN nicht linear mit dem Erfahrungsgewinn. Da bei zunehmendem Wissensstand bzw. hoher Expertise Wissen, das man über das Gebiet noch nicht besitzt, immer gezielter gesucht werden muss, erfolgt die Umsetzung so, dass der Zuwachs der Expertise durch zusätzliches Wissen mit zunehmendem Wissensstand des Akteurs immer geringer ist. Trotzdem soll die Expertise kontinuierlich wachsen können. Bei wenig Wissen eines Akteurs in einem Bereich, der zu Beginn nur Grundwissen besitzt, wird die Expertise durch zusätzlich gewonnenes Wissen aus dem Bereich wesentlich erhöht, da praktisch alle Informationen neu sind und entsprechend die Expertise erhöhen.

Des Weiteren ist für die Umsetzung zu beachten, dass das Wissen insgesamt nicht beschränkt ist. Das heißt auch die insgesamt vorhandene Wissensbasis wächst mit der Zeit. Damit sollte auch die Expertise kontinuierlich zunehmen können. Eine empirische Ableitung einer Formel ist aufgrund der Unsicherheit neuen Wissens hier nicht möglich. Um trotzdem eine diesen Verhältnissen besser angepasste Umsetzung und keine zu starke Steigung der Expertise zu gewährleisten, wird von einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zwischen Expertisenzuwachs und bereits vorhandenem Wissen ausgegangen. Daraus ergibt sich als Integral über das gesamte Wissen eine logarithmische Abhängigkeit der Expertise E vom bereits vorhandenen Wissensstand (W):

$$E = \ln W$$

Damit steigt die Expertise kontinuierlich, mit kontinuierlich abnehmender Steigung. Für die Qualität ergibt sich mit der folgenden Formel, angelehnt an das Basis-SKIN-Modell, dann eine asymptotische Annäherung an die „ability“:

$$Q = \text{ability} * (1 - e^{-E}) = \text{ability} * (1 - \frac{1}{W})$$

Die „ability“ bestimmt damit die maximal erreichbare Qualität. Diese Umsetzung kann so interpretiert werden, dass mit einer bestimmten Fähigkeit oder Technik nur eine bestimmte maximale Qualität erreicht werden kann. Diese kann aber auch nur dann annähernd erreicht werden, wenn man diese meisterhaft beherrscht bzw. umsetzt, wobei auf jedem Stand der vorhandenen Expertise immer noch eine Verbesserung möglich ist.

Die Qualität wird im Modell dazu genutzt, technische Parameter der Produkte zu bestimmen. Je höher der Wert der „ability“ ist, desto höher kann die Qualität des Produktes und damit die Leistung in Bezug auf den konkreten Parameter sein.

Die gewählte Umsetzung hat einen weiteren Vorteil. In Wissensaustauschprozessen wie Projektzusammenarbeit und gemeinsame Produktion von Gütern, wird im Modell tatsächlich

Wissen in Form von unbewerteten Daten bzw. Information ausgetauscht. Wie hoch der Wert des Wissens in Form von Expertisenzuwachs ist, ergibt sich erst aus der bereits vorhandenen Expertise des Akteurs in dem Feld, der neues Wissen erhält. Im Austausch mit einem Akteur führt dasselbe Wissen bei geringer Expertise zu mehr Qualitätszuwachs eines Produktes als bei bereits hoher Expertise. Ist keine Expertise in dem Wissensfeld vorhanden, kann hingegen zudem nur Wissen, dann aber auch entsprechend weniger, aufgenommen werden, wenn man eine benachbarte Expertise („*absorptive capacity*“) besitzt (s. 5.2.3).

5.3 Forschungsprozesse

Forschungsprozesse sind im Basis-SKIN nicht vorhanden. In Hochtechnologiebereichen wie der der meisten Energietechnologien ist die öffentliche Forschung jedoch auch höchst relevant für die Wissensentstehung und den Wissensaustausch. Um im Modell die Forschungstätigkeit von Forschungsinstitutionen und Firmen in öffentlich geförderten Projekten und damit der Einflussmöglichkeiten von Forschungsförderung, abzubilden, wird auf eine Umsetzung im EIS-SKIN zurückgegriffen, die in etwas vereinfachter Form im Modell implementiert wurde (EIS-SKIN 2020).

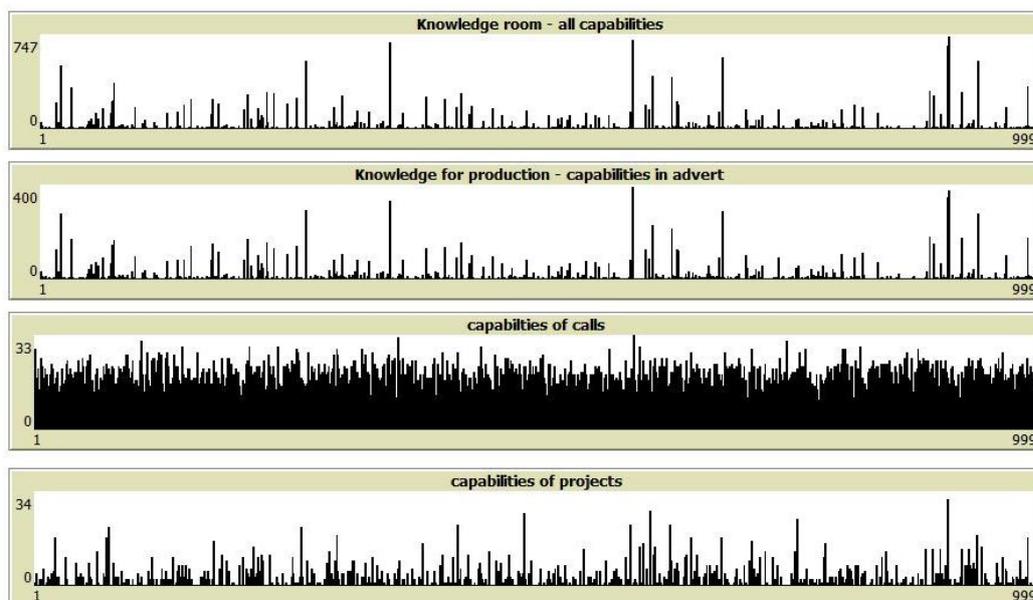


Abbildung 22: Wissensverteilungen (“*capability*“) bei unbeschränkter Aufnahmefähigkeit von Wissen

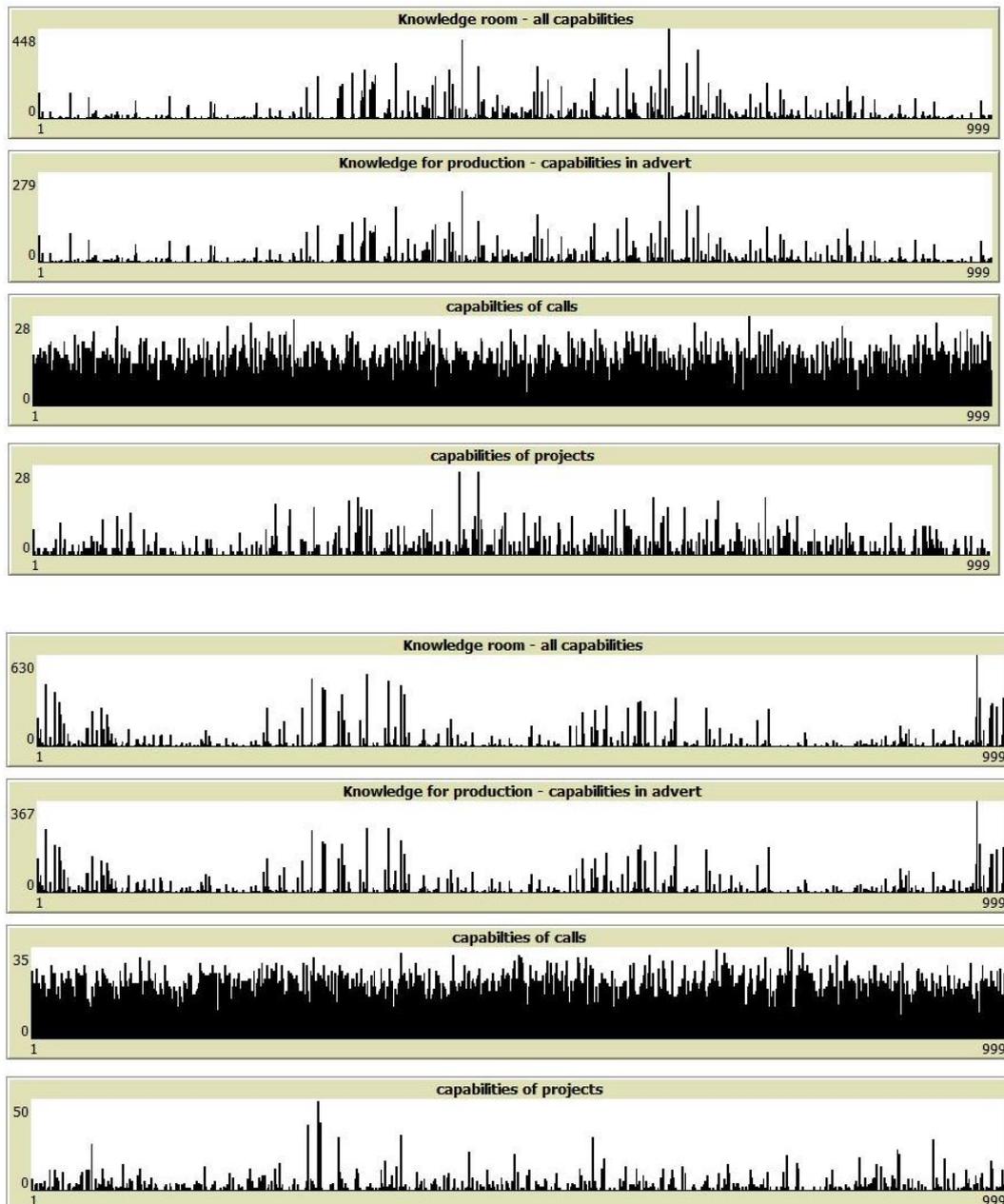


Abbildung 23: Wissensverteilungen ("capability") bei beschränkter Aufnahmefähigkeit von Wissen

Die ablaufenden Prozesse starten bei der Ausschreibung von Projekten durch den Förderer. Auf diese Ausschreibungen können sich Konsortien bewerben, die sich aus der Kooperation von Instituten und Firmen ergeben. Diese reichen Anträge ein. Nur Anträge, deren Wissenskomponenten gut genug mit dem jeweiligen Call übereinstimmen sind erfolgreich. Ist ein Antrag erfolgreich, startet das Projekt. Wissensaustausch erfolgt durch die gemeinsame Bearbeitung von Berichten bzw. Veröffentlichungen, die in dem Projekt entstehen, unter den daran beteiligten Partnern. Jedes Projekt hat eine feste Laufzeit. Nach dieser ist das Projekt und die Zusammenarbeit beendet. In den Projekten findet inkrementelle Forschung statt. In Calls für entsprechende Förderprogramme wird nur wissenschaftliches Wissen berücksichtigt. Auf diese Weise kann in öffentlich geförderten Forschungsprojekten

nur wissenschaftliches Wissen weiterentwickelt werden. Für Modellrechnungen können die Häufigkeit der Calls und die verschiedenen zeitlichen Komponenten variiert werden.

In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind Ergebnisse aus Beispielläufen zu sehen, in denen das Zusammenspiel zwischen Forschung und Produktion erkennbar ist. Jeweils dargestellt sind in Form von „*capabilities*“ das gesamte Wissen der Akteure (Diagramm oben), das Wissen, das in Produkten eingesetzt wird (zweites Diagramm von oben), das Wissen, das für die Calls relevant ist (drittes Diagramm von oben) und das Wissen, das in den Projekten eingesetzt wird (Diagramm unten). Einige Spitzen sind in allen Wissensräumen zu erkennen. Dieses Wissen wird sowohl in der Produktion als auch in Forschungsprojekten verwendet. Wenn man berücksichtigt, dass das die Aufnahmefähigkeit von Wissen mit dem Abstand des eigenen Wissens abnimmt („*absorptive capacity*“), bilden sich stärkere Häufungen aus, die wie wellenförmige Strukturen wirken (Abbildung 23).

5.4 Start-ups

In Start-up-Ökosystemen ist eine wachsende Aktivität zu verzeichnen. Start-ups gewinnen im untersuchten Sektor zunehmend an Bedeutung für die deutsche Wirtschaft (Kollmann et al. 2019). Gerade in der aktuellen Phase der konjunkturellen Abkühlung zeichnen sich Start-ups im Vergleich zu etablierten Unternehmen dadurch aus, dass sie durchweg positiv in die Zukunft blicken (ibid.). Da sie zusätzlich Aspekte der Nachhaltigkeit stärker in der Wirtschaft verankern können, stellen Start-ups einen großen elementaren Wirtschaftsfaktor dar (ibid.). Ein zentrales Motiv für die Unternehmensgründung ist der Wunsch, eigene (überzeugende) Geschäftsideen erfolgreich verwirklichen zu können⁵.

Die Herkunft der Geschäftsideen von Start-ups ist unterschiedlich. Neben komplett neuen Geschäftsideen können Ideen auch aus Entwicklungen einer bestehenden Firma oder Forschungseinrichtung entstehen. Diese können dann zu Ausgründungen oder sogenannten „Spin-offs“ führen. Für das Entstehen solcher Spin-offs als Ausgründungen aus Unternehmen bzw. Universitäten, können neben dem reinen Interesse, eine Idee voranzubringen, zusätzlich unter anderem die folgenden Motive bestehen:

- Die Möglichkeit, Erkenntnisse (die außerhalb des eigenen Kerngeschäftes liegen) zu vermarkten, anstatt diese brachliegen zu lassen.
- Die aktive Vermarktung kapitalintensiver Forschung (Professionalisierung der Technologieverwertung).
- Die Steigerung der Motivation der Mitarbeiter, von der dann auch die Innovation im Kerngeschäft des Mutterunternehmens profitieren kann.
- Der „Start-up“-Charakter, etwa in Form von gesteigerter Agilität; oder das Ziel, die innovative Idee außerhalb des Zielsystems der Mutterunternehmung zur Reife zu führen und zu kommerzialisieren.
- Die Ausgliederung weniger profitabler Sparten oder Unternehmensbereiche, die nicht (mehr) zum Kerngeschäft zählen.

⁵ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/726906/umfrage/motive-fuer-die-gruendung-eines-start-up-unternehmens-in-deutschland/>

Spin-offs werden hier definiert als eine Ausgründung im Einverständnis mit ihrer Ursprungsorganisation. Eine Ausgründung gegen den Willen einer Ursprungsorganisation wird in der Literatur manchmal als „Split-off“ bezeichnet. Für die Umsetzung von Start-ups in SKIN-Energy sind Split-offs nicht gesondert berücksichtigt worden, da es für das Modell keinen Unterschied macht, ob die Start-up-Gründung einvernehmlich geschah oder nicht.

Basis-SKIN

Für das SKIN-Energy-Modell war ein Ziel, diese Gründungsdynamik darstellen zu können. Im Basis-SKIN-Modell wurden Start-ups als Kopie einer erfolgreichen Firma dargestellt. Dabei werden neue Firmen von erfolgreichen Sektoren inspiriert. Im Basis-SKIN entsteht entsprechend eine neue Firma, sobald eine beliebige Firma einen substantiellen Gewinn macht. Das Wissen der neuen Firma ist dann eine Kopie der Innovationshypothese der bestehenden erfolgreichen Firma, dem Teil des Wissens, der für andere sichtbar ist. In diesen Wissensbereichen erhält das entstehende Start-up weniger Expertise im Vergleich zu der bestehenden erfolgreichen Firma. Zusätzlich ist die Anzahl der *kene-triplets* eines Start-ups begrenzt durch sein Kapital. Das initiale Kapital reicht möglicherweise nicht aus, um die Innovationshypothese der erfolgreichen Firma komplett übernehmen zu können.

SKIN-Energy

Im SKIN-Energy-Modell wird die Start-up-Dynamik des Basis-Modells durch ein neues Modul ersetzt, das auf einem Konzept nach Schilperoord (2016) basiert. Dieses wurde in Teilen bereits für das EIS-SKIN-Modell umgesetzt (EIS-SKIN 2020). Dem Konzept folgend wurden dem Modell zwei neue Agententypen hinzugefügt: *entrepreneurs* und *start-ups*. Dadurch wird der Prozess, in dem neue kleine innovative Firmen gegründet werden, im Vergleich zum Basis-SKIN-Modell expliziter und differenzierter abgebildet.

Ein wichtiges Element dabei ist die sogenannte *advert distance*, ein Indikator, der es ermöglicht, die kognitive Distanz zwischen einem Start-up und bereits bestehenden Agenten im System zu bewerten. Das *advert* bezeichnet die in der Innovationshypothese vorhandenen *capabilities*, die *advert distance* zwischen zwei Firmen ist definiert als die Anzahl *capabilities*, die jeweils nur im *advert* einer Firma vorhanden sind. Hat beispielsweise Firma A das *advert* [121, 398, 669] und Firma B [398, 562, 620, 669, 829], dann sind die *capabilities* [398, 669] in beiden *adverts* vorhanden, die übrigen 4, nämlich [121, 562, 620, 829], aber nur in je einem *advert*. Die *advert distance* beträgt dann also 4. Interessant ist weniger die *advert distance* zu beliebigen Firmen, die immer auch sehr groß werden kann, besonders im Vergleich zu Firmen mit vielen *kene-triplets*. Relevant ist v.a. die *minimale advert distance*, also die kleinste im Vergleich von Firma i mit allen Firmen $j \in [1, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N]$ auftretende *advert distance*:

$$d_{a,min}(i) = \min(\text{advert distance}_{i,j})$$

Es geht also darum, die Wissensdistanz zur ähnlichsten schon vorhandenen Firma zu ermitteln. Wenn sehr ähnliches Wissen bereits im System existiert, ist der Ansatz des Start-ups nicht neu. Die *minimale advert distance* $d_{a,min}$ zeigt also an, wie groß der Unterschied des

neuen Wissens des Start-ups zu dem Wissen ist, das bereits im System existiert. Start-ups mit großem Abstand zu vorhandenem Wissen werden als „*high-potential*“-Firmen eingestuft. Standardmäßig gilt eine Firma ab $d_{a,min} = 5$ als *high-potential*, was aus dem EIS-SKIN übernommen wurde (s. a. Schilperoord, 2016), aber mit einem Regler angepasst werden kann.

Im SKIN-Energy-Modell wird zwischen drei Typen von Start-ups unterschieden:

- Typ 1: Ein Start-up basierend auf eigenem neuen Wissen (d.h. ein neu erzeugter Satz von *kene-triplets*)
- Typ 2: Ein Start-up basierend auf ungenutztem Wissen (d.h. *kene-triplets*) einer existierenden Firma
- Typ 3: Ein Start-up basierend auf ungenutztem Wissen (d.h. *kene-triplets*) einer existierenden Forschungseinrichtung

Start-ups können durch einen *entrepreneur* initiiert werden. Ein *entrepreneur* als neuer Agententyp stellt ein Individuum mit einer innovativen Geschäftsidee dar. Das Bestreben des Individuums ist es, die Geschäftsidee in eine neue Firma zu überführen. Entrepreneur haben in SKIN-Energy nur begrenzt Zeit, um Ihre Geschäftsideen in einer neuen Firma umzusetzen. Neue Entrepreneur können im System immer entstehen. Das Tempo, in dem sie entstehen, kann sowohl statisch als auch dynamisch (abhängig von Anzahl bestehender Agenten im modellierten System) reguliert werden.

Zusätzlich können im Modell Start-ups auch durch Firmenkonglomerate bzw. Mutter-Firmen initiiert werden (vgl. Kapitel 5.5). Ein Firmenkonglomerat ist eine neue Art von Firma, die aus einer Mutterfirma und mehreren Tochterfirmen besteht. Mutterfirmen haben die Möglichkeit, ohne ihr aktuell lukratives Produktionswissen aufzugeben, Wissen als neue Tochterfirma in die eigene Organisation zu integrieren und so Forschung & Entwicklung zu betreiben. Dies geschieht durch die Entstehung eines Typ-1-Start-ups (d.h. eine Tochterfirma basierend auf beliebigem neuem Wissen) oder eines Typ-2-Start-ups (d.h. eine Tochterfirma basierend auf dem bisher ungenutzten Teil-Wissen einer bestehenden Tochterfirma des Konglomerats).

Während der Initialisierung eines Start-ups wird im Modell der Abstand seiner Innovationshypothese zu denen der anderen Agenten bewertet (s. o.). Aus der Distanz wird der Grad der Einzigartigkeit eines Start-ups bestimmt, nach der sich die (finanzielle) Unterstützung bemisst. Sobald Start-ups initiiert sind, verhalten sie sich wie Standard-Firmen.

5.5 Mütter, Töchter und Konglomerate

Im Basis-SKIN stellt jede Firma nur ein einziges Produkt her. Natürlich gibt es in der realen Wirtschaft Unternehmen verschiedenster Größe und auch große Konzerne, die thematisch sehr breit aufgestellt sind und eine breite Produktpalette anbieten. Auch die Lithium-Ionen-Batterie-Branche bildet hier keine Ausnahme. Mit der Siemens AG und der Robert Bosch GmbH sind bspw. auch sehr große und diverse Konzerne unter den Akteuren (siehe Kapitel 7.1.1). Auch Großkonzerne aus der Automobilbranche (z. B. die Volkswagen AG) forschen häufig an vielen Technologien gleichzeitig. Daher macht es Sinn, dem auch in der Simulation Rechnung zu tragen. Deswegen wurde eine Möglichkeit gesucht, wie man die Diversität von

Firmen im Modell abbilden kann, ohne zu sehr in Mechanismen von SKIN einzugreifen, die darauf basieren, dass jede Firma nur ein Produkt herstellt.

Als Resultat wurden sog. *Firmenkonglomerate* im Modell eingeführt: Mehrere Einzelfirmen, die alle weiterhin autonom wie Firmen im Basis-SKIN agieren, können zu einem Verbund, einem Konglomerat, zusammengefasst werden. Abbildung 24 zeigt eine schematische Darstellung davon. Ein Konglomerat besteht aus einem Agenten des neuen Typs „Mutterfirma“ und beliebig vielen „Tochterfirmen“, die den Firmen im Basis-SKIN entsprechen. Jede Tochterfirma bildet sozusagen eine Abteilung innerhalb des Konzerns ab, die sich nur mit einem Thema beschäftigt und sich auf ein Produkt konzentriert. Mehrere solche Abteilungen können parallel existieren. Daneben gibt es weiterhin Einzelfirmen, die genau wie im Basis-SKIN keinem Konglomerat angehören. Zwischen den Tochterfirmen und ihrer Mutterfirma besteht eine Verbindung, technisch gesehen ein „Link“ in NetLogo. Über diesen Link kann die Mutter ihre Töchter und die Tochter ihre Mutter erreichen. Außerdem zeigt eine Variable bei jeder Firma an, ob es sich um eine Tochterfirma, die Teil eines Konglomerats ist, handelt oder nicht.

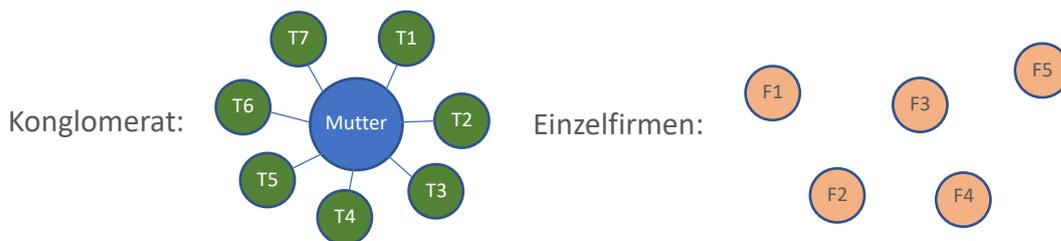


Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Firmenkonglomerats mit 7 Tochterfirmen T1 bis T7 zur Abbildung einer Konzernstruktur sowie parallel existierender 5 Einzelfirmen F1 bis F5

Eine wesentliche Rolle der Mutterfirma besteht darin, ihre Töchter zu finanzieren. Standardmäßig zahlt die Konzernmutter sämtliche Kosten, die den einzelnen Töchtern entstehen. Zum einen sind das Abgaben, die Firmen zu entrichten haben: wenn sie mit anderen Firmen kollaborieren, wenn sie Forschung betreiben, sowie die durchgängig zu zahlenden Abschreibungen („*depreciation*“). Zum anderen werden auch die Produktionskosten und die Kosten für die Gründung von Joint Ventures (im SKIN-Jargon irreführenderweise als „*networks*“ bezeichnet) von der Mutter übernommen. Die drei Posten Abgaben, Produktionskosten und Network-Gründung können aber auch einzeln deaktiviert werden. Um trotzdem die Performance der Firmen nachverfolgen zu können, werden die von der Mutter bezahlten Kosten vom Kapital der Töchter abgezogen. Im Gegenzug für die Finanzierung durch die Mutter zahlen die Tochterfirmen einen einstellbaren Anteil ihrer Einnahmen an die Mutterfirma. Standardmäßig ist dies 100%. Die Mutter verantwortet dann also sämtliche Finanzen ihrer Töchter. Da Konglomerate durch ihre Diversität, große Kapitalmengen und die Möglichkeit neue Firmen zu kaufen oder zu gründen (s. u.) erhebliche Vorteile gegenüber Einzelfirmen haben, wurde auch eine spezielle Abschreibung eingeführt, die nur Mutterfirmen zu zahlen haben, und zwar in Proportion zur Anzahl ihrer Töchter. Dies soll die Transaktionskosten abbilden bzw. den Verwaltungsaufwand darstellen, der beim

Betrieb eines großen komplexen Konzerns entsteht. Zusätzlich kann eingestellt werden, dass Firmen bei Misserfolg nicht unmittelbar, sondern erst nach einer Verzögerung anfangen, ihr Wissen zu verändern. Damit soll ein angenommenes Verharrungspotenzial insbesondere großer etablierter Unternehmen bei ihren angestammten Produkten abgebildet werden.

Zusätzlich gibt es in Konglomeraten einen Rettungsmechanismus, der in Kraft tritt, wenn eine Tochterfirma bankrott ist ($\text{Kapital} \leq 0$). Eine Einzelfirma würde sofort sterben, Tochterfirmen aber haben mehrere „Leben“ (Anzahl kann eingestellt werden). Das heißt, geht das Kapital unter null, schießt die Mutterfirma Geld nach und die Firma kann weiterarbeiten. Dies tut die Mutter aber nicht für alle Töchter, sondern nur für erfolgversprechende innovative Firmen, d. h. solche, deren Wissen weit vom Wissen anderer Firmen entfernt ist und die entsprechend als eine „*high-potential*“-Firma eingeordnet werden (s. Kapitel 5.4). Erst nach mehreren Rettungen stirbt die Tochterfirma. Darüber soll abgebildet werden, dass einzelne Abteilungen in großen Konzernen durchaus über einen längeren Zeitraum Verluste machen können, wenn sie durch andere erfolgreiche Abteilungen oder Rücklagen finanziert werden. So gibt es gerade für sehr umfangreiche, langwierige und kostspielige Forschung und Entwicklung in großen Konzernen oft einen größeren finanziellen Spielraum⁶. Beispielsweise geht aus den vom Stifterverband erhobenen Daten zu den Forschungs- & Entwicklungsausgaben deutscher Unternehmen (Stifterverband 2017) hervor, dass Unternehmen mit unter 2000 Beschäftigten in der Regel unterdurchschnittlich viel von ihrem Umsatz in Forschung & Entwicklung investieren, während Unternehmen mit 2000 und mehr Beschäftigten einen deutlich höheren Anteil ihres Umsatzes dafür aufwenden.⁷

Konglomerate können sich im Laufe der Zeit weiterentwickeln. Einerseits gibt es eine einstellbare Wahrscheinlichkeit, mit der erfolgreiche Einzelfirmen, sobald sie eine bestimmte Kapitalgrenze überschreiten, ein neues Konglomerat gründen und sich dann diversifizieren können. Andererseits kann es passieren, dass in einem Konglomerat nur eine einzige Tochterfirma überlebt. In diesem Fall löst sich das Konglomerat mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf und geht in eine Einzelfirma über.

Während die eigentliche Arbeit in Konglomeraten von den Tochterfirmen ausgeführt wird, die Wissen bereithalten, verändern und daraus Produkte entwickeln sowie Käufe und Verkäufe tätigen, verfügt die Mutterfirma über kein Wissen und tritt auch auf keinem Markt in Erscheinung. Die wesentliche Tätigkeit einer Mutterfirma besteht in der Gründung sowie dem Erwerb weiterer Tochterfirmen. Entsprechende Ausgründungen („Spin-offs“ und „Split-offs“) werden durch das Start-up-Modul (Kapitel 5.4) mit abgebildet. Eine Gründung einer

⁶ Das ging aus Expertendiskussionen in den Projektworkshops hervor und wird zusätzlich gestützt durch Daten des Stifterverbands (Stifterverband 2017): Aus Tabelle 3.2.4 zu den WZ-Klassen 26 und 27, also der elektrotechnischen Industrie, geht hervor, dass der Anteil F&E-Aufwendungen am Umsatz bei Firmen mit 2000 oder mehr Beschäftigten mit 7% bis 7,9% deutlich höher liegt als die 5,3% bis 5,9% bei Betrieben mit 100 bis 1999 Beschäftigten.

⁷ Laut Tabelle 3.2.4 in Stifterverband (2017): In den Wirtschaftszweig-Klassen 26 und 27 (WZ 2008), der Herstellung von EDV-, elektrischen, elektronischen und optischen Geräten, wozu auch Batterien zählen, liegt der Anteil der F&E-Aufwendungen am Umsatz bei Betrieben mit 100 bis 2000 Beschäftigten nur bei 5,3 – 5,9 %, bei den größeren Betrieben bei 7,0 – 7,9 %. Allerdings liegt dieser Anteil bei Betrieben mit unter 100 Beschäftigten mit 5,9 – 8,6 % auch recht hoch, da diese je Beschäftigten aber weniger Umsatz machen, sind die Aufwendungen je Beschäftigten eher unterdurchschnittlich.

neuen Tochterfirma/Abteilung, die im Konglomerat verbleibt, kann als Forschungs- und Entwicklungstätigkeit des Konzerns interpretiert werden.

Tochterfirmen, wie alle Firmen im Basis-SKIN, forschen nur, wenn es notwendig ist, weil sie erfolglos sind. Es handelt sich also bei dieser Art von Forschung eher um eine notwendige Anpassung an einen sich verändernden Markt oder auch eine Optimierung eines vorhandenen Produkts. Dieser Forschungsmechanismus aus Basis-SKIN wurde nicht angetastet. Bei Konglomeraten kommt jedoch ein neuer Forschungsmodus hinzu, der nicht aus der Not heraus entsteht, einen längeren Zeithorizont haben kann und den man als nicht zwingend notwendiges „Ausprobieren neuer Ideen“ oder eine Art „Investition in die Zukunft“ verstehen kann. Da eine Firma in SKIN keine Forschung tätigen kann, ohne ihr erfolgreich eingesetztes Wissen zu vergessen, liegt es nahe, für diese andere Art von Forschung jeweils eine neue Firma, oder Abteilung des Konzerns, zu gründen, in dem diese Forschung stattfinden kann. Hierzu wurde derselbe Mechanismus wie bei Start-ups vom Typ 1 und 2 verwendet (siehe Kapitel 5.4). Analog zu den Start-ups kann das Konglomerat es entweder mit zufällig generiertem neuem Wissen probieren (Typ 1) oder bisher ungenutztes Wissen einer ihrer Abteilungen verwenden (Typ 2). Die Mutterfirma eines Konglomerats legt pro Simulationsschritt (wird als ca. ein Monat interpretiert) einen bestimmten einstellbaren Prozentsatz ihres aktuellen Kapitals für Forschung & Entwicklung (F&E) beiseite (standardmäßig 1,8 % p.a.). Die beiden Arten von F&E sind mit ebenfalls einstellbaren Kosten verbunden (standardmäßig 5 Mio. € für komplett neues Wissen bei Typ 1, also die Einstellung neuer Beschäftigter und 2 Mio. € für die Verwendung ungenutzten Wissens bei Typ 2). Diese Werte wurden ad hoc gewählt. Die Argumentation dahinter ist: Typ 1 ist wesentlich teurer, da die Einstellung neuer Expertinnen und Experten Gehaltskosten nach sich zieht, während Typ 2 in erster Linie Sachkosten nach sich zieht. Außerdem erschien die Größenordnung der Kosten in etwa sinnvoll und zu guter Letzt führten sie zu plausiblen Wachstumsraten der Konglomerate in der Simulation. In jedem Schritt wird entweder Typ-1- oder Typ-2-F&E zufällig ausgewählt. Reicht das zurückgelegte Geld im F&E-Topf aus, wird diese Art der Forschung durchgeführt, d.h. eine neue Abteilung gegründet.

Eine weitere Tätigkeit von Konglomeraten ist der Erwerb (engl. *acquisition*) anderer Firmen. Nur wenn ein Konglomerat ein bestimmtes konfigurierbares Kapital überschreitet, beginnt es mit Akquisitionen. Über einen Schalter kann man einstellen, ob Konglomerate eher Firmen erwerben sollen, die ihren Töchtern ähneln (angestrebte Homogenität), oder eher solche, die sich möglichst von den Töchtern unterscheiden (angestrebte Diversität): Die minimale sog. *advert distance* (siehe Kapitel 5.4) zwischen der zu erwerbenden Firma und den Töchtern muss entweder unter (Ähnlichkeit des Wissens) oder über (Unähnlichkeit des Wissens) einem Schwellwert liegen, damit die Firma in Erwägung gezogen wird. Diese zwei Strategien sind angelehnt an die „*partnership strategy*“ im Basis-SKIN, wo ebenfalls zwischen „*conservative*“ (Firma sucht sich ähnliche Partner) und „*progressive*“ (Firma sucht sich unähnliche Partner) gewählt werden kann. Allerdings wird im Basis-SKIN nicht die aus dem EIS-SKIN übernommene *advert distance* benutzt, sondern nur die Schnittmenge der *adverts* (also der für die Produktion eingesetzten *capabilities*) verglichen. Es gibt bei der Akquisition

eine einstellbare Schwelle für den Erlös, den die Firma zuletzt erwirtschaftet hat, damit nur aktuell erfolgreiche Firmen erworben werden.

Pro Simulationsschritt wird für jedes Konglomerat eine Firma per Zufall als Akquisitionskandidatin ausgewählt. Es kann sich sowohl um eine Einzel- als auch eine Tochterfirma eines anderen Konglomerats handeln. Kommt es nicht zur Akquisition, kann die Firma noch eine zufällige Lieferantenfirma und eine zufällige Kundenfirma zu erwerben versuchen (über Schalter ein- und ausschaltbar). Die Entscheidung, ob die Firma übernommen wird, hängt, neben den o. g. harten Kriterien *advert distance* und Erlös vom Preis der Akquisition ab. Die Akquisitionswahrscheinlichkeit wird auf $1 - p_a/c$ (p_a : Akquisitionspreis, c : Kapital der akquirierenden Firma) gesetzt, also je günstiger, umso wahrscheinlicher. Die Berechnung des Akquisitionspreises p_a berücksichtigt sowohl das aktuelle Kapital der zu erwerbenden Firma als auch ihr mögliches Entwicklungspotenzial (gemessen über die minimale *advert distance* $d_{a,\min}$ zwischen der Firma und allen anderen Firmen): Das Kapital wird mit einem fixen Faktor multipliziert (standardmäßig 10) und zusätzlich mit $(1 + d_{a,\min} \times f_d)$, wobei f_d ein konfigurierbarer Faktor ist, der die Preisdynamik durch die Advertistanz festlegt (Standardwert ist 0,9).

Über einen Schalter können Akquisitionen ganz ausgeschaltet werden. F&E wird deaktiviert, indem man die Konglomerate 0% ihres Kapitals dafür verwenden lässt.

5.6 Produktraum und Wertschöpfungskette

In der Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien können mehrere Stufen unterschieden werden: (Stephan et al., 2017; Rahimzei et al., 2015)

1. Produktion von *Komponenten*, die später gebraucht werden. Diese können allgemein und breit einsetzbar sein, Beispiele sind Drähte, Gehäuse, Elektronik und Kühlaggregate, oder sehr spezifisch für die Produktion von Batterien wie Kathode, Anode, Elektrolyt oder Separatorschicht.
2. Produktion von Batteriezellen. Manche Komponenten werden zu modularen *Zellen* zusammengesetzt, die verschiedene Formfaktoren haben können, bspw. zylindrisch, prismatisch oder sog. Pouchzellen. Die Zelle ist der relevanteste Teil einer Batterie und dort findet die elektrochemische Energiespeicherung statt.
3. Produktion von *Batterien* oder Batteriesystemen. Zellen und andere Komponenten werden zu einem kompletten Batteriesystem zusammengesetzt. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, wird u. a. Elektronik benötigt, die Lade- und Entladevorgänge überwacht und steuert, sowie ein Kühl-/Heizsystem, das dafür sorgt, dass die Zellen einen geeigneten Temperaturbereich nicht verlassen.

Diese Wertschöpfungsstufen werden entsprechend im Modell abgebildet. Die Unterscheidung zwischen Komponenten-, Zell- und Batterieherstellern ist teilweise dadurch motiviert, dass derzeit keine nennenswerten Zellhersteller in Deutschland/Europa existieren (Eckl-Dorna, 2019; Preisinger and Bryan, 2018) und untersucht werden sollte, welchen Einfluss die Einführung einer heimischen Zellproduktion hätte. Es gibt jedoch bereits deutsche Hersteller für spezielle Mikrozellen, die z. B. in Hörgeräten zum Einsatz kommen (Quelle: Diskussionen mit Experten, z. B. in den Workshops des Projekts), was auch im Modell berücksichtigt wurde.

Um die Wertschöpfungskette korrekt abzubilden, wird der Produktraum von SKIN in verschiedene Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 25). Jede Stufe der Wertschöpfungskette hat ihren eigenen Produkt-ID-Bereich. Zusätzlich zu den schon im Basis-SKIN vorhandenen *Rohstoffen*⁸ und *Endprodukten* wird zwischen *Komponenten* (allgemeine und spezielle zusammengefasst), *Mikrozellen* und *Zellen* unterschieden. *Endprodukte* werden entweder als *Batterien* oder *Batteriesysteme* interpretiert, die direkt in einem anderen Produkt einsetzbar sind (z.B. Mobiltelefon/Werkzeug/Elektrofahrzeug) oder als stationärer Stromspeicher dienen können. Es gibt eine zusätzliche Unterteilung innerhalb der Endproduktstufe nach dem angestrebten Absatzmarkt (siehe Kapitel 5.7.2), allerdings ohne Zuweisung von Produkt-ID-Bereichen. Ökonomische Aktivität, die vor der Produktion von in Zellen/Batterien verbauten Komponenten stattgefunden hat, wird als modellextern angesehen. D. h. im Modell gibt es keine Firmen, die Metallerze gewinnen, schmelzen, verarbeiten und so weiter. All diese und weitere Prozesse sind in den *Rohstoffen*, die in das Modell eingeführt werden, bereits enthalten. Wo genau die Grenze zwischen Rohstoffen und Komponenten gezogen wird, hängt davon ab, wie das Modell kalibriert wird, d. h. welche Unternehmen Teil des Modells werden und welche nicht.

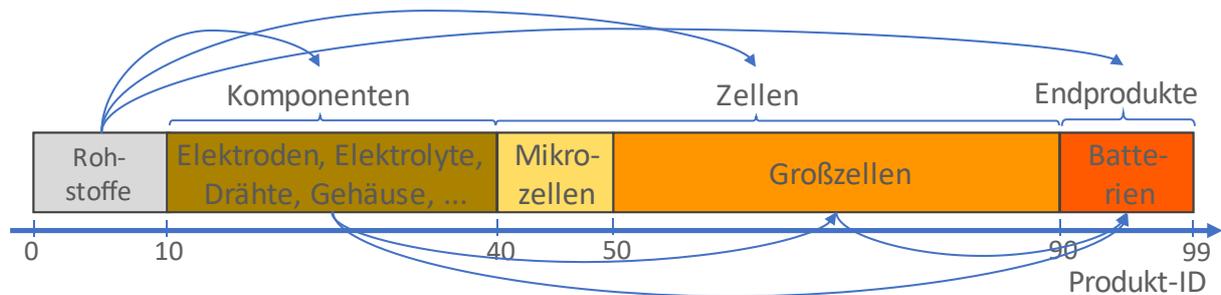


Abbildung 25: Die Unterteilung des Produktraums entlang der Produkt-ID-Achse im SKIN-Energy-Modell

Jede Einzelfirma oder Tochterfirma arbeitet nur auf einer Wertschöpfungsstufe, da sie nur ein Produkt herstellt. Die Anzahl Firmen in den Stufen relativ zueinander ergibt sich aus den jeweiligen Kalibrationsdaten (siehe Kapitel 7.1.5). Gegenüber Basis-SKIN wurde der Mechanismus, der Wissen auf eine Produkt-ID abbildet (vgl. Kapitel 5.1.3), überarbeitet. Im Basis-SKIN kann eine Firma ihr Wissen durch inkrementelle Forschung leicht verändern. Durch die Funktion $p(b, t)$ kann sich daraus eine sehr große Änderung in der Produkt-ID ergeben. Das würde dazu führen, dass innerhalb weniger Simulationsschritte (die in SKIN-Energy als einzelne Monate interpretiert werden) eine Firma von der Komponentenherstellung zur Zell- oder Batterieherstellung wechseln könnte. Da dies unrealistisch erscheint, wird Wissen immer nur innerhalb der Wertschöpfungsstufe auf die Produkt-ID abgebildet, indem $p(b_s, t_s)$ mit den stufenspezifischen Grenzen b_s und t_s benutzt wird, z. B. $b_s = 10$, $t_s = 40$ für die Komponentenherstellung (siehe Abbildung 25). Die Entscheidung über die Wertschöpfungsstufe wird vom Wissen entkoppelt und die Stufe kann nur verlassen werden, wenn radikale Forschung stattfindet, die mit einer großen Änderung des Wissens verbunden

⁸ Mit *Rohstoffen* sind hier nicht ausschließlich reine Rohstoffe wie Metallerze gemeint, sondern sie umfassen alle Produktionsmaterialien, die nicht von Firmen innerhalb des Modells produziert werden, sondern von außen in das Modell eingeführt werden müssen, s.u.

ist und selten auftritt. Dadurch wird es auch einfacher, Populationen auf den Wertschöpfungsstufen zu kalibrieren, insbesondere wenn die Populationseigenschaften von anderen Eigenschaften wie der Firmengröße (Kapital oder Anzahl Mitarbeitende) abhängen.

Eine weitere wichtige Abweichung von Basis-SKIN ist die *Vorzugsrichtung* des Produktraums (durch Pfeile in Abbildung 46 angedeutet). Das bedeutet, Firmen kaufen Inputprodukte bevorzugt aus dem vorgelagerten Produktraum, d. h. den Wertschöpfungsstufen mit Produkt-IDs, die kleiner sind als die der eigenen Stufe. Zum Beispiel kauft ein Zellhersteller Rohstoffe und Komponenten als Inputs, aber keine anderen Zellen oder Batterien. Ein Batteriehersteller kauft Rohstoffe, Komponenten und Zellen, aber keine Batterien. Die Vorzugsrichtung des Produktraums unterbindet Handelsbeziehungen, die in der Realität so keinen Sinn ergeben (außer in Ausnahmefällen wie Recycling). Rohstoffe sollten von den meisten Firmen gekauft werden, während Zellen von nur wenigen Firmen benötigt werden, nämlich nur den Batterieherstellern. Ausnahmen sind möglich, um unkonventionelle Geschäftsmodelle (eben z. B. Recycling von Batterien/Zellen) zu ermöglichen. Ihre Häufigkeit kann eingestellt werden.

Da mit dem SKIN-Energy-Modell der Unterschied zwischen dem Vorhandensein und der Abwesenheit heimischer (bzw. modellinterner), d. h. deutscher, Zellhersteller untersucht werden sollte, wurde ein Mechanismus eingeführt, mit dem man die *Stufe der Zellhersteller sperren* kann. Die modellinternen heimischen Firmen können den Zellherstellungsbereich dann nicht besetzen. Um die Lücke zu schließen, wurde ein neuer Agententyp „Fremdfirma“ eingeführt, die stellvertretend für die ausländische Konkurrenz, überwiegend aus Asien, steht. Diese Fremdfirmen nehmen an der heimischen Kooperation zwischen Firmen nicht teil. Ihr Wissen ist statisch, d. h. sie forschen und innovieren nicht, und ihr Kapital ist unbegrenzt, sie können also nicht bankrottgehen. Sie dienen nur als Zelllieferanten, damit die Wertschöpfungskette geschlossen ist, und können fast als modellextern betrachtet werden. Das ist natürlich eine starke Vereinfachung der Realität, ermöglichte aber die Konstruktion eines „deutschen“ Modells ohne Inkonsistenzen und nähert sich der realen Situation etwas an, da auch von großen Konzernen wie Samsung oder LG aufgrund ihrer Größe und heterogenen Portfolios kein Bankrott bzw. ein schneller Rückzug von den Märkten durch Misserfolge im Batteriegeschäft zu erwarten ist.

Über einen Modellparameter kann der Anteil kollaborierender und innovierender heimischer Zellproduzenten zwischen 0% und 100% variiert werden, um ihren Einfluss auf das Innovationssystem zu untersuchen. Die Firmen können gezwungen werden, mindestens ein Inputprodukt von der Wertschöpfungsstufe direkt unter ihrer eigenen zu benutzen, um zu verhindern, dass die gesperrte Zellproduktionsstufe umgangen wird, indem Batteriehersteller nur Rohstoffe und Komponenten kaufen und daraus die Zelle selber konstruieren.

Abbildung 26 illustriert die Konsequenzen eines gerichteten Produktraums. Zu sehen ist das Histogramm der Differenz zwischen Output-Produkt-ID und Input-Produkt-ID für alle Firmen. Mehrere Inputprodukte derselben Firma verursachen mehrere Einträge im Histogramm (die gesamte Firmenpopulation beträgt etwa 800). Im Falle eines vollständig gerichteten Produktraums (unterste Zeile von Abbildung 26) gibt es keine negativen Differenzen: alle Inputs stammen von einer Wertschöpfungsstufe mit niedrigerer ID. Durch

Ausnahmen in 30% der Fälle (mittlere Zeile von Abbildung 26) wird auch die negative Seite der Verteilung bevölkert. In einem Produktraum ohne bevorzugte Richtung wie im Basis-SKIN (oberste Zeile von Abbildung 26) ist die Differenzverteilung breit gefächert und symmetrisch um 10 (die Mitte zwischen der größtmöglichen Differenz $99 - 0 = 99$ und der kleinstmöglichen Differenz $10 - 89 = -79$).

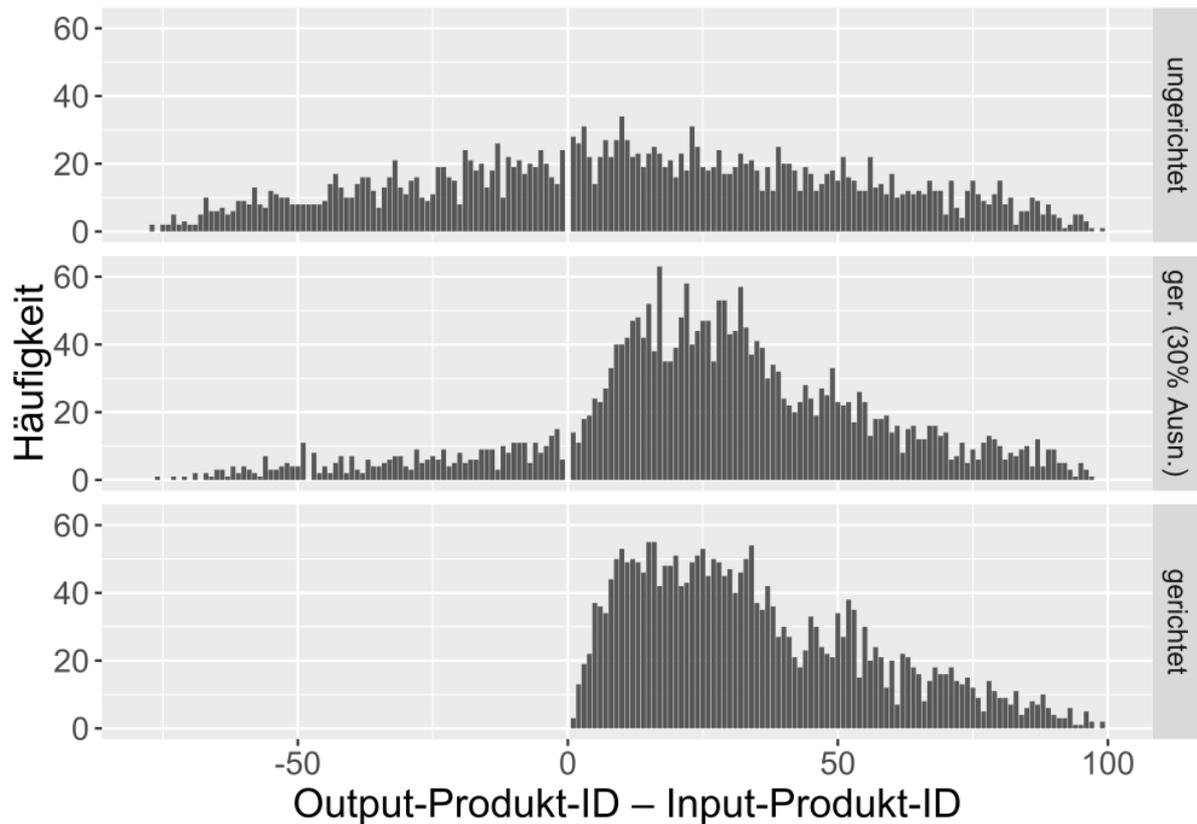


Abbildung 26: Histogramm der Differenz zwischen Output- und Input-Produkt-IDs

Um die Wertschöpfungskette detaillierter darzustellen und die Nachfrage für jede Firma abzubilden, wurde die Iteration des Basis-SKIN durch einen komplexeren rekursiven Algorithmus ersetzt (vgl. Kapitel 5.1.4 zur Umsetzung im Basis-SKIN). Er besteht aus einer Schleife über alle Firmen. Bei jedem Schleifendurchlauf führt die Firma folgende Schritte durch (visualisiert im Flussdiagramm in Abbildung 27):

1. Die Firma sucht Lieferanten für alle Input-Produkte (jeweils günstigster Anbieter)
2. Ehemalige Lieferanten, die nun nicht mehr die Firma beliefern, werden **informiert, dass die Firma nicht mehr Kundin ist**: Dadurch **sinkt die Nachfrage** beim ehemaligen Lieferanten, bei allen Lieferanten des Lieferanten, bei allen Lieferanten der Lieferanten des Lieferanten und so weiter. Verliert ein Lieferant dadurch seinen letzten Kunden, werden seine Lieferanten ebenfalls **informiert, dass er nicht mehr Kunde ist** (siehe oben in diesem Schritt).
3. Falls nicht für jedes Input-Produkt ein Lieferant gefunden wurde, **informiert die Firma ihre ehemaligen Lieferanten und Kunden**, dass sie nicht produzieren kann: Die Lieferanten werden **informiert, dass die Firma nicht mehr Kundin ist** (siehe Schritt 2). Die Kunden müssen den

Algorithmus **erneut bei Schritt 1 beginnen**, weil sie einen Lieferanten verloren haben und nach einem Ersatz suchen müssen.

4. Wurden genug Lieferanten gefunden, prüft die Firma, ob der Absatzpreis ihres Produkts die Kosten übersteigt, d.h. ob sie Gewinn machen kann. Falls nein, **informiert sie ihre ehemaligen Lieferanten und Kunden**, dass sie nicht produzieren kann (siehe Schritt 3).
5. Ist die Gewinnspanne positiv, prüft die Firma, ob sie Kunden hat. Falls nein, werden die Lieferanten **informiert, dass die Firma nicht mehr Kundin ist** (siehe Schritt 2). Falls ja, werden ihre Lieferanten **informiert, dass die Firma eine neue Kundin ist**. Dadurch **steigt die Nachfrage** beim Lieferanten, bei allen Lieferanten des Lieferanten, bei allen Lieferanten der Lieferanten des Lieferanten und so weiter. Gewinnt ein Lieferant dadurch seinen ersten Kunden, werden seine Lieferanten ebenfalls **informiert, dass der Lieferant ein neuer Kunde ist** (siehe oben in diesem Schritt).

Im beschriebenen Algorithmus tauchen manche Anweisungen mehrfach auf, z. B. in Schritt 2 die Meldung über die Aufhebung der Kundschaft (entspricht den roten Kästen in Abbildung 27). Da der Algorithmus rekursiv ist und die Kontrolle von Firma zu Firma springen kann, kommt es oft zu einer Propagation entlang der gesamten Wertschöpfungskette, entweder nach oben (in Richtung Lieferanten) oder nach unten (in Richtung Kunden). Man beachte auch die Symmetrie zwischen Schritt 2 und 5, die gewissermaßen gegenteilig sind (beim einen sinkt, beim andern steigt die Nachfrage).

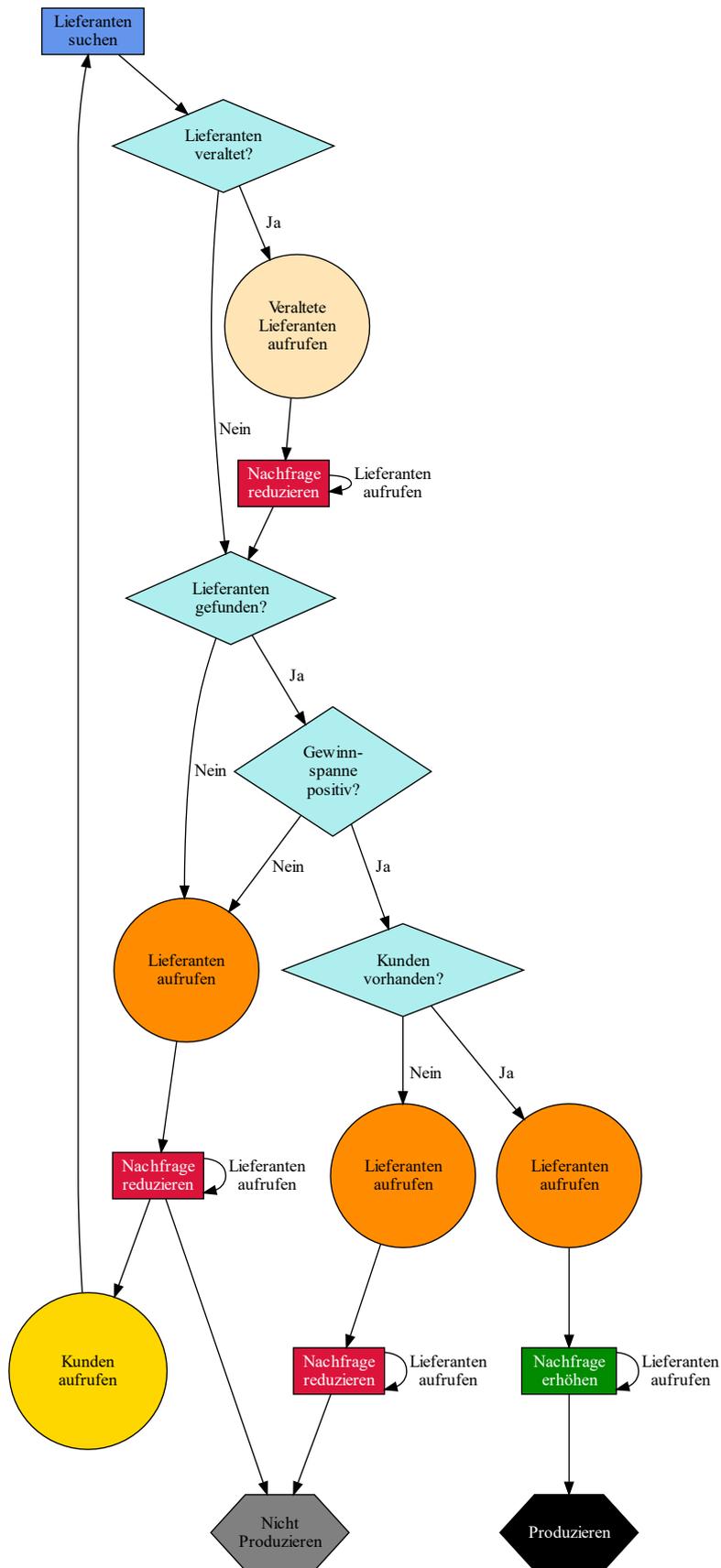


Abbildung 27: Flussdiagramm des Wertschöpfungsketten-Algorithmus, der von jeder Firma des Modells ausgeführt wird

Zentral für den rekursiven Algorithmus ist der Selbstaufwurf für eine andere Firma in Schritt 3. Eine Firma kann mit einem bestimmten Satz Lieferanten anfangen und dann mit ganz anderen Lieferanten von vorn beginnen, nachdem die ersten Lieferanten festgestellt haben, dass sie nicht produzieren können. Auch kann jede Firma plötzlich Kunden hinzugewinnen oder verlieren, was die vorgelagerte Wertschöpfungskette beeinflusst. Es kann sein, dass jede Firma den Algorithmus mehrfach durchläuft, bis sich die Wertschöpfungskette schließlich stabilisiert.

Der Algorithmus ist nicht besonders effizient. Da jede Firma den Algorithmus potenziell mehrfach durchläuft, erhöht sich die Laufzeit dramatisch bei einer großen Anzahl von Firmen. Als Entschädigung erhält man aber eine konsistente Wertschöpfungskette, in der die Nachfrage und die Beziehungen zwischen Lieferanten und Kunden komplett abgebildet werden. Auch die Finanzen der Firmen sind dank der rekursiven Propagation von Nachfrageänderungen genauer erfasst als im Basis-SKIN: Wenn eine Firma mehr verdient, weil sie mehr verkauft, muss sie auch mehr Inputs einkaufen und hat höhere Kosten (vgl. Finanzen im Basis-SKIN in Kapitel 5.1.4).

Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen exemplarische simulierte Wertschöpfungsketten als Netzwerkvisualisierung. Jede Firma wird als Knoten (Kreis) dargestellt, die belieferten Firmen werden durch gerichtete Kanten (Pfeile) repräsentiert. Das Farbschema stellt Komponentenhersteller in brauner, Mikrozellhersteller in gelber, Großzellhersteller in orangener und Batteriehersteller (Endprodukthersteller) in roter Farbe dar. Die Größe jedes Knotens entspricht der Nachfrage, die die Firma bedient bzw. der Produktionskapazität.

Die ungerichtete Wertschöpfungskette in Abbildung 28, die der Implementierung der Wertschöpfungskette im Basis-SKIN entspricht, sieht qualitativ anders aus als die Neuimplementierung einer gerichteten Wertschöpfungskette in Abbildung 29. Das Netzwerk der gerichteten Wertschöpfungskette weist mehr Verbindungen auf, während im ungerichteten Fall eine Tendenz zu längeren Abhängigkeitsketten beobachtet werden kann. Solche Ketten mit vielen Stationen innerhalb derselben Wertschöpfungsstufe (z. B. von Großzell- zu Großzellhersteller) sind im gerichteten Produktraum gar nicht erlaubt. In Abbildung 30 ist der in SKIN-Energy ebenfalls mögliche Mischfall zu sehen: ein an sich gerichteter Produktraum (Inputprodukte kommen von einer niedrigeren Wertschöpfungsstufe), bei dem jedoch im Mittel 30% der Inputprodukte nicht aus der bevorzugten Richtung kommen (d. h. von derselben Wertschöpfungsstufe oder einer darüber liegenden). Empirisch betrachtet erscheinen viele Verbindungen im ungerichteten Produktraum, zumindest wenn es im großen Maße stattfindet, als sinnlos, etwa die Belieferung eines Zellproduzenten durch einen anderen Zellproduzenten oder die Belieferung eines Komponentenherstellers durch einen Zellhersteller. Aus diesem Grund und um der Forschungsfrage nach dem Einfluss von Kooperation entlang und senkrecht zur Wertschöpfungskette begegnen zu können, musste eine Wertschöpfungskette mit bevorzugter Richtung wie in Abbildung 29 oder Abbildung 30 implementiert werden.

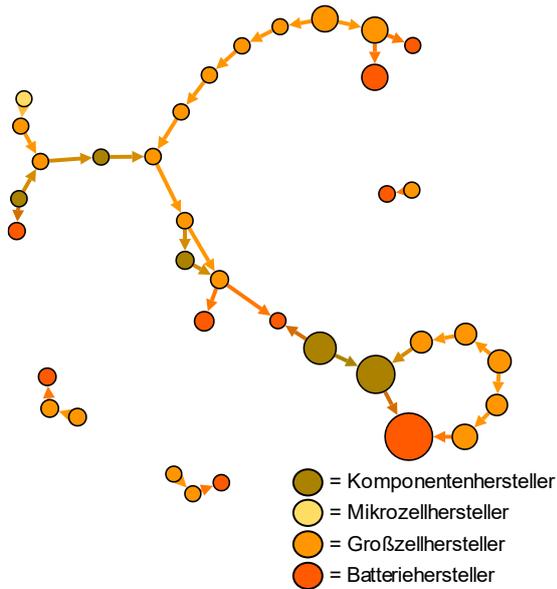


Abbildung 28: Graphische Darstellung einer Wertschöpfungskette im ungerichteten Produktraum. Dies entspricht der Wertschöpfungskette im Basis-SKIN

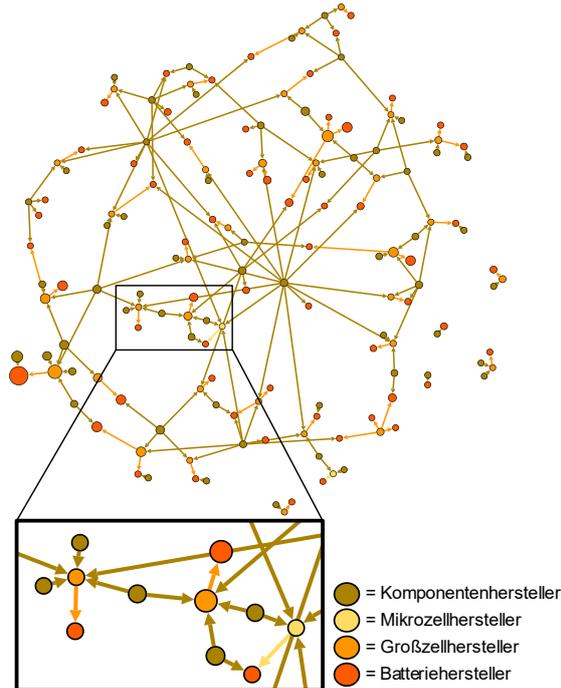


Abbildung 29: Graphische Darstellung einer Wertschöpfungskette im gerichteten Produktraum in SKIN-Energy. Ein Teilbereich wird unten vergrößert gezeigt

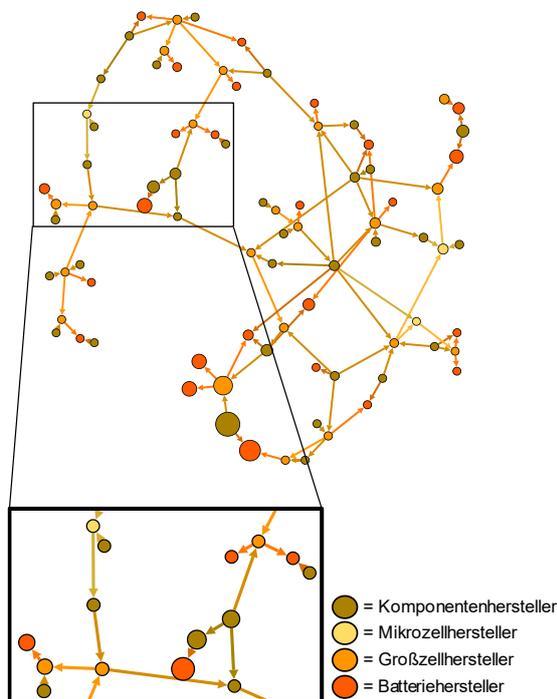


Abbildung 30: Graphische Darstellung einer Wertschöpfungskette im teilweise gerichteten Produktraum (30% Ausnahmen von der bevorzugten Richtung)

Um eine realistische Beschreibung der Finanzen der Firmen zu ermöglichen, werden die Preise kalibriert. Im Basis-SKIN kosten Rohstoffe 1 Preiseinheit, Zwischenprodukte zwischen 1 und 1.000 Preiseinheiten, Endprodukte 10.000 Preiseinheiten. Dies bedeutet, bei üblicher

Beschränkung auf vier Inputprodukte, dass Endproduzenten sehr hohe Gewinne einfahren, da sie 10.000 verdienen und nur 4.000 oder weniger an Kosten haben. Für Zwischenproduzenten ist der Profit jedoch per Zufall positiv oder negativ, da sie höchstens 1.000 für ihr Produkt verlangen können aber im Extremfall bis zu 4.000 für ihre Inputs zahlen müssen. Dieser Unterschied zwischen Zwischen- und Endproduzenten erscheint unrealistisch und widerspricht der Datenlage bei Lithium-Ionen-Batterien.

Die verbesserte Preiskalibration in SKIN-Energy beginnt mit einer als realistisch angenommenen Preisverteilung für die Endprodukte. Der Endproduktpreis wird als technischer Parameter ähnlich wie Energiedichte oder Kalenderlebensdauer angesehen (siehe Kapitel 5.7.1 und 7.3). Werte für den Energiepreis und den Leistungspreis werden durch die Hashfunktion $h(s)$ (siehe Kapitel 5.7.1) vom Wissen der Firma abgeleitet, mit der Energie- bzw. Leistungsdichte der Batterie und ihrer Masse multipliziert und ergeben in Summe den Endproduktpreis einer Batterie/eines Batteriesystems. In der Literatur gefundene Kostenaufschlüsselungen für die Wertschöpfungsstufen der Lithium-Ionen-Batterie-Industrie (Quellen: IRENA (2017), S. 69; Qnovo (2016); Pillot (2017), S. 32; Sakti et al. (2015), S. 10; Roland Berger (2012), S. 22f.; Lowe et al. (2010), S. 42) geben Aufschluss darüber, welcher Anteil des Preises einer Komponente, Zelle oder Batterie üblicherweise auf die Inputprodukte entfällt. Etwa 50% - 70% des Gesamtpreises wird für den Einkauf verbauter Produkte verwendet. Andere Kosten belaufen sich auf ca. 30% - 40% des Preises. Eine Gewinnspanne von ca. 5% - 10% ist typisch. Mit diesen Informationen werden die Preise der Zwischenprodukte kalibriert, indem die Kosten der Inputs durch den Kostenanteil (also 50% - 70%) geteilt werden. Aus der Kombination aller Kostenaufschlüsselungen kann die Abschätzung hergeleitet werden, dass je nach Annahmen zwischen 6% und 30% (dieser Wert kann im Modell eingestellt werden) des Endproduktpreises auf Rohstoffe entfallen.

Damit wird der Rohstoffpreis vom Endproduktpreis ausgehend kalibriert. Das passiert auf dynamische Weise, indem der jeweils aktuell durchschnittliche Endproduktpreis durch die durchschnittliche Anzahl Rohstoffe, die pro Endprodukt verwendet werden, geteilt wird und mit dem Kalibrationsfaktor zwischen 6% und 30% multipliziert wird. Dadurch wird das Preissystem geschlossen: Das Firmenwissen bestimmt den Endproduktpreis, durch den der Rohstoffpreis festgelegt wird, woraus sich die Preise der Zwischenprodukte ergeben. Weil überall Zufallsverteilungen verwendet werden, schwankt die Gewinnspanne einer Firma um den kalibrierten Mittelwert und kann auch negativ sein (die Herstellungskosten übersteigen den Preis). In diesem Fall produziert die Firma wie im Basis-SKIN nicht, sondern betreibt Forschung und ändert ihre Innovationshypothese, um eine profitable Wissenskonfiguration zu finden.

5.7 Produktcharakterisierung und Marktrepräsentation

Im Basis-SKIN kann jedes Endprodukt garantiert zu einem Preis von 10.000 Einheiten verkauft werden. In SKIN-Energy wurde dieses simple Vorgehen durch einen Merit-Order-Markt ersetzt, auf dem jeweils das Produkt mit dem niedrigsten *Effektivpreis* als erstes verkauft wird. Die Details dazu werden in diesem Kapitel erläutert. Diese neue Marktrepräsentation bezieht sich nur auf Endprodukte. Für Zwischenprodukte wurden die Basis-SKIN-Mechanismen

unangetastet gelassen: Firmen kaufen die Inputprodukte mit den Produkt-IDs, die sie brauchen. Welche IDs benötigt werden, ergibt sich aus dem Wissen über die $p(b, t)$ -Funktion (siehe Kapitel 5.1.3). Firmen kaufen immer das Produkt der jeweiligen ID mit dem niedrigsten Preis, sodass dies grob einem Merit-Order-Markt entspricht.

5.7.1 Verbindung zwischen Wissen und Batterieparametern

Um den technischen Innovationsprozess und die Vermarktung von Lithium-Ionen-Batterien adäquat zu beschreiben, werden mehrere technische Parameter der Batterien modelliert, die für den Betrieb elektrochemischer Speicher von zentraler Bedeutung sind:

1. Gravimetrische Energiedichte (in Wh/kg): Wie viel Energie kann pro kg Batteriemasse gespeichert werden?
2. Gravimetrische Leistungsdichte (in W/kg): Wie viel Leistung kann pro kg Batteriemasse erreicht werden?
3. Kalendarische Lebensdauer (in Jahren): Wie lange bleibt die Batterie einsatzfähig, unabhängig vom Nutzungsprofil?
4. Zyklenlebensdauer (in Anzahl Vollzyklusäquivalente, engl. *full-cycle equivalent* FCE): Wie viele Vollzyklen (von vollem Ladezustand über restentleert bis hin zu wieder voll aufgeladen) kann die Batterie liefern?
5. Effizienz, engl. *roundtrip efficiency* RTE (in %): Wie viel der Energie, die die Batterie beim Laden aufgenommen hat, kann im Laufe eines Vollzyklus beim Entladen zurückgewonnen werden? (Je höher die RTE, umso kleiner die Energieverluste.)
6. Energie- und Leistungspreis (in €/Wh und €/W): Energiekapazität und Leistung sind zwei voneinander unabhängige Preistreiber. Beide Komponenten müssen addiert werden, um den Gesamtpreis zu erhalten.
7. Masse der Batterieeinheit (in kg): Die gravimetrischen Dichten können mit der Masse multipliziert werden, um tatsächliche Werte für eine Batterieeinheit zu erhalten.

Für jeden dieser technischen Parameter haben die Projektpartner vom ISEA der RWTH Aachen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung oder zumindest einen plausiblen Bereich angegeben, und zwar in die Zukunft gedacht, etwa ins Jahr 2030. Details zu den Daten sind in Kapitel 7.3 zu finden.

Die Herausforderung bei der SKIN-Modellierung bestand darin, das Wissen oder genauer die Innovationshypothese einer Firma mit den Parameterverteilungen zu verknüpfen. Bei einem evolutionären Modell wie SKIN sollte identisches Wissen immer zu denselben Produkteigenschaften führen, so wie identisches Erbgut dieselben Eigenschaften eines Organismus hervorruft. Dadurch kann nützliches Wissen einen Wettbewerbsvorteil erzeugen und wird sich schließlich im Innovationssystem durchsetzen.

Man kann sich die Modellierung der technischen Parameter wie eine Verallgemeinerung der Produkt-ID vorstellen: Anstatt das Wissen der Firma auf eine einzige Zahl abzubilden, wird das Wissen auf mehrere Zufallsvariablen abgebildet. Die Zufallsvariablen könnten komplett unkorreliert sein, beliebige unterschiedliche Wertebereiche abdecken und verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen gehorchen. Die Funktion $p(b, t)$ aus Kapitel 5.1.3, deren zentraler Teil die Modulo-Funktion angewandt auf die Summe der *capabilities* und *abilities* ist,

kann diesen Anforderungen nur mit Schwierigkeit genügen. Durch die Modulo-Operation ist es nicht einfach, mehrere unabhängige Zufallszahlen von demselben Satz Input-Daten abzuleiten. Wenn man die Input-Daten, d. h. die Kenes bzw. die Summe der *capability-ability*-Produkte, modifiziert, z. B. eine bestimmte Zahl addiert oder multipliziert, ergeben sich zwangsläufig Korrelationen zwischen den Zufallszahlen, die gar nicht erwünscht sind. Modifiziert man die Input-Daten mit einer zufälligen Zahl, verschwinden zwar die Korrelationen, die Abbildung des Wissens auf die Parameter ist dann aber nicht mehr deterministisch.

In ihrer Funktionalität im Modell entspricht die Funktion $p(b, t)$ aus Kapitel 5.1.3 mit ihrer Modulo-Funktion einer sehr simplen Implementierung einer *Hashfunktion*, welche in der Informatik häufig zum Einsatz kommt (siehe z. B. Cormen et al., 2001; Kellis et al., 2011; Weisstein, 2020). Eine Hashfunktion ist eine Abbildung von Daten beliebiger Größe auf einen Wert fester Größe. Neben anderen Eigenschaften wie die rechnerische Performanz sollte eine Hashfunktion *uniform* sein, d. h. Zufallszahlen zurückgeben, die gleich verteilt sind, und *deterministisch*, d. h. bei gleichen Input-Daten immer dieselbe Zufallszahl zurückgeben (Kellis et al., 2011).

Um mehrere Parameter modellieren zu können wird die beschriebene Funktionalität in SKIN-Energy durch eine geeignete „echte“ Hashfunktion gewährleistet, die $p(b, t)$ ersetzt. Da es keine NetLogo-eigene Implementierung einer Hashfunktion gibt und die in NetLogo vorhandenen Operatoren nicht ausreichen, um eine gute Hashfunktion selbst zu implementieren (z. B. gibt es kein „bitweises Und/Oder“, außerdem dürfte die Performanz von NetLogo äußerst schlecht sein), wurde auf eine vorhandene Implementierung in der Programmiersprache Scala zurückgegriffen. NetLogo ist selbst in Scala und Java geschrieben, daher ist die Anbindung von Scala- oder Java-Code an NetLogo recht einfach. Die Entscheidung fiel auf Austin Applebys MurmurHash3-Algorithmus, von dem eine Implementierung dankenswerterweise bereits in Scala integriert ist (EPFL, 2016; Appleby, 2011, 2016). Um diese Scala-Funktion wurde ein Wrapper geschrieben, der die Funktion von NetLogo aus zugänglich macht. Der entsprechende Code wurde unter <https://bitbucket.org/iqib/netlogo-hashing> veröffentlicht.

MurmurHash3 kann eine beliebige Zahl Eingangswerte auf eine gleich verteilte Ganzzahl zwischen -2147483648 und 2147483647 abbilden. Daher ist es einfach, die Kene-Summe mit einer zweiten Zahl zu kombinieren, um statistisch vollständig unabhängige Zufallszahlen zu erhalten, die aber bei Verwendung derselben Zahl und derselben Kenes immer identisch sind. Diese zweite Zahl, mit der man die Kene-Summe kombiniert, nennen wir einen „Salt-Wert“, ein Begriff, der aus der Kryptographie stammt, dort aber eine etwas andere Bedeutung hat.⁹ Verwendet man unterschiedliche Salts $s \in N$ und die MurmurHash3-Funktion $mh_3(r_1, r_2, \dots)$ mit einer beliebigen Anzahl Eingangszahlen $r_i \in R$, so kann man ganz einfach zufällige Hashwerte $h(s)$ berechnen, die gleich verteilt zwischen 0 und 1 sind:

⁹ Siehe [https://de.wikipedia.org/wiki/Salt_\(Kryptologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Salt_(Kryptologie))

$$h(s) \equiv \frac{mh_3(s, \sum_{i=1}^m C_{IH_i} \times A_{IH_i}) + 2147483648}{2147483648 + 2147483647}.$$

Dabei ist das zweite Argument von mh_3 dieselbe Summe über die Kenes der Innovationshypothese wie in $p(b, t)$ aus Kapitel 5.1.3. Wird dieselbe Innovationshypothese verwendet, ergibt sich immer derselbe Hashwert $h(s)$ und dank Verwendung der Summe ist die Reihenfolge der Kenes in der Innovationshypothese unerheblich. Wird aber nur eine der Capabilities C oder Abilities A verändert, kommt ein ganz anderer Hashwert $h(s)$ heraus. Auch führen verschiedene Saltwerte zu ganz anderen Ergebnissen, sodass z. B. $h(1)$ für die Ableitung der Energiedichte der Batterie benutzt werden kann, $h(2)$ für die Leistungsdichte, $h(3)$ für die Kalenderlebensdauer und so fort. Wertet man die Umkehrfunktion der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung des Parameters an der Stelle $h(s)$ aus, erhält man einen Wert der gewünschten Zufallsvariable. So ist es sehr einfach, die gleichverteilten Zufallszahlen $h(s)$ in jede beliebige Wahrscheinlichkeitsverteilung umzuwandeln, z. B. auch eine Normalverteilung.

Durch diesen Ansatz kann man sehr flexibel eine beliebige Anzahl Parameter aus der Innovationshypothese generieren. Wird das Wissen von einer anderen Firma kopiert, werden alle Parameter exakt reproduziert. Dadurch kann sich vorteilhaftes Wissen erfolgreich ausbreiten. Ein weiterer Aspekt ist, dass kleine Änderungen im Wissen manchmal zu sehr großen Veränderungen eines Produkts führen können. Dieser Umstand trägt der Anschauung Rechnung, dass Innovation schwer vorherzusagen ist und es sich oft um einen mehr oder weniger zufälligen Prozess handelt (wie Mutationen im Falle der biologischen Evolution).

5.7.2 Die verschiedenen Absatzmärkte

Im SKIN-Energy-Modell des InnoSEn-Projekts werden vier Endproduktmärkte betrachtet: Batterien für portable Geräte (z. B. Mobiltelefone, Tablets, Laptops), Batterien für Werkzeuge (etwa Bohrmaschinen, Rasenmäher, Laubbläser etc.), Batterien für die Elektromobilität (batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), E-Bikes, E-Scooter etc., aber ohne Hybridfahrzeuge) und Batteriesysteme für die stationäre Energiespeicherung. Zusätzlich, da bei der Zellherstellung zwischen normalen Großzellen (etwa von der weit verbreiteten Bauart 18650: zylindrisch, Durchmesser 18 mm, 65 mm hoch) und Mikrozellen (umgangssprachlich „Knopfzellen“) unterschieden wird, wurde noch ein Markt für Mikrogeräte hinzugefügt (u. a. Hörgeräte, Herzschrittmacher und andere medizinische Geräte, kabellose In-Ear-Kopfhörer), in die ausschließlich Mikrozellen verbaut werden. Zwischen dem Mikrogerätemarkt und den übrigen Märkten herrscht eine Trennung: Mikrozellen werden exklusiv in Mikrogeräten und die übrigen Zellen exklusiv in den übrigen Geräten verwendet.

Endprodukthersteller entscheiden sich für einen Markt, indem sie sich nach einem abgeschätzten *Ragone-Plot* (Christen and Carlen, 2000) richten, der mit den Partnern des ISEA an der RWTH Aachen entwickelt wurde und auf Daten von ca. 2016 – 2017 beruht, siehe Abbildung 31 und Kapitel 7.3. Ein Ragone-Plot ist ein Diagramm, in dem die Leistungsdichte gegen die Energiedichte von Energiespeichern aufgetragen wird. Jede einzelne Batterie liegt mit ihren Werten für Leistungs- und Energiedichte in einem Punkt des Ragone-Plots. Für eine

bestimmte Batteriekategorie kann eine Fläche im Ragone-Plot definiert werden, innerhalb der Batterien dieser Kategorie normalerweise zu finden sind. Für jeden der oben genannten Märkte (portabel, Werkzeuge, BEV, stationär) wurde eine Fläche im Ragone-Plot definiert, siehe Abbildung 31. Über die Hashfunktionsmethode, die in Kapitel 5.7.1 beschrieben wurde, bestimmen die Firmen zufällige Werte für Energie- und Leistungsdichte aus ihrem Wissen. Der Bereich des Ragone-Plots, in den ihre Leistungs- und Energiedichte gehören, bestimmt den angestrebten Absatzmarkt. Manche Bereiche im Ragone-Plot überlappen. In diesem Fall bestimmt ein weiterer Hashwert über die zufällige Entscheidung für einen der Märkte. Die Firma muss sich früh für einen Markt entscheiden, selbst wenn Energie- und Leistungsdichte mit mehreren Märkten kompatibel sind, weil die übrigen Parameter wie Lebensdauer i. A. vom Zielmarkt abhängen und die Firma sozusagen die Batterie speziell für den Markt designen muss. Nur bei den Märkten BEV und Stationär, die auch im Ragone-Plot überlappen, sind alle Parameter miteinander kompatibel und eine Firma kann im Grunde beide Märkte gleichzeitig bedienen. Trifft das auf eine Firma zu, wird erst einer der beiden Märkte zufällig ausgewählt. Ist die Firma dort nicht erfolgreich, versucht sie es weiter auf dem jeweils anderen Markt. Ein Sonderfall: Für den Markt der Mikrogeräte wird der Ragone-Plot nicht verwendet, denn verbaut eine Firma eine Mikrozelle, legt sie sich automatisch auf den Mikrogerätemarkt fest. Über einen Schalter im Modell kann die Mischung mit anderen (großen) Zellen vermieden werden.

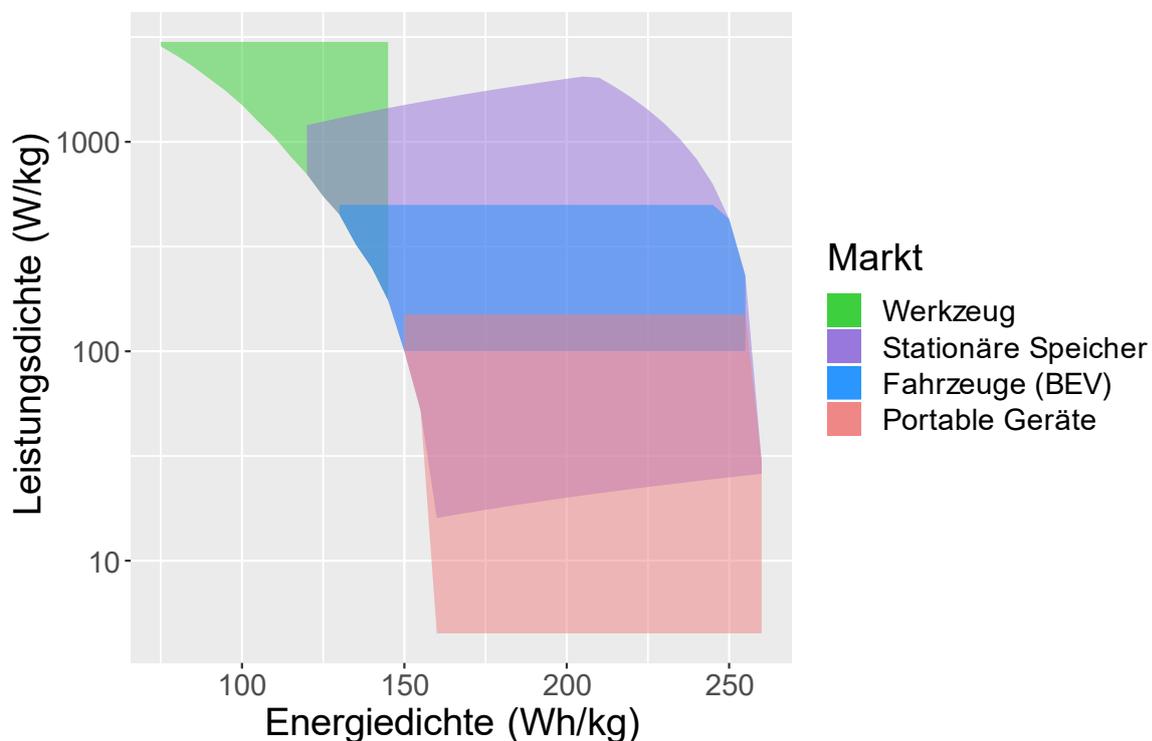


Abbildung 31: Der Ragone-Plot (abgeleitet von Produktdatenblättern aus den Jahren 2016 – 2017) der in SKIN-Energy simulierten Lithium-Ionen-Batterien, mit Flächen für die unterschiedlichen Märkte

5.7.3 Wie die Märkte bedient werden

Im Basis-SKIN gibt es eine unbegrenzte Nachfrage nach Endprodukten, sodass jede Firma, die ein Endprodukt herstellt, es auch absetzen kann. Um die Nachfrage zu begrenzen und die Firmen zu Wettbewerb anzuspornen, werden die Märkte nach dem Merit-Order-Prinzip bedient: Die Firmen werden in aufsteigender Reihenfolge nach ihrem Effektivpreis sortiert. Die Firmen mit den niedrigsten Preisen können ihre Produktionskapazität zuerst absetzen, gefolgt von Firmen mit teureren Produkten, bis die gesamte Marktnachfrage gedeckt ist. Der Effektivpreis p_{eff} , nach dem die Firmen geordnet werden, ist der Preis p pro Energiekapazität E pro erwartetes Lebensjahr l der Batterie:

$$p_{\text{eff}} \equiv \frac{p \text{ [€]}}{E \text{ [kWh]} \cdot l \text{ [yr]}}, \quad l \equiv \min(l_{\text{cal}}, l_{\text{cyc}}/n_{\text{cyc}}).$$

Dabei ist l entweder definiert als die kalendarische Lebensdauer l_{cal} oder die Zyklenlebensdauer l_{cyc} geteilt durch die Anzahl n_{cyc} Vollzyklen pro Jahr, je nachdem, welches von beiden kleiner ist. Für n_{cyc} wurden bestimmte Annahmen für jeden Markt getroffen.

Über p_{eff} verkauft sich nicht einfach die billigste Batterie am besten, sondern Kapazität und Lebensdauer spielen auch eine Rolle bei der Kaufentscheidung. Trotzdem bleibt die Entscheidung der Konsumenten hier streng rational. In der Realität kann es aber ganz viele weitere teils auch subjektive Kriterien, die bei der Kaufentscheidung eine Rolle spielen, die man aber unmöglich alle im Modell abbilden kann. Eine etwas realistischere Marktbeschreibung erhält man, wenn der Merit-Order-Markt etwas unscharf gemacht wird (engl. *fuzzy*). Das bedeutet, dass eine harte Grenze vermieden wird, bei der jedes Produkt unterhalb verkauft und jeder oberhalb nicht verkauft wird. Stattdessen nimmt die Verkaufswahrscheinlichkeit linear innerhalb eines konfigurierbaren Bereichs um die harte Preisgrenze herum ab. Wie viel von der Produktionskapazität der Firma verkauft werden kann, entscheidet sich in jedem Simulationsschritt neu über einen Zufallsprozess mit der Verkaufswahrscheinlichkeit.

Die Produktionskapazität mit Einheit GWh/Jahr ist eine neu eingeführte Eigenschaft der Firmen, die zu Beginn der Simulation mit Hilfe der Kapitalverteilung der Firmen kalibriert wird. Die anfängliche Produktionskapazität ist also proportional zum verfügbaren Kapital der Firma, damit kleine Firmen eher kleine Kapazität und nur die größten Firmen sehr große Kapazitäten aufweisen. Wie groß die größte Produktionskapazität zu Beginn sein soll (also die der Firma mit dem meisten Kapital), kann pro Markt eingestellt werden und die anderen Kapazitäten stellen sich relativ dazu ein. Im Verlauf der Simulation können Firmen entweder ihre Kapazität erhöhen oder erniedrigen, um auf die Nachfrage zu reagieren, sollte diese oberhalb oder unterhalb der Produktionskapazität liegen. Die Rate der Kapazitätsanpassung kann ebenfalls konfiguriert werden und beträgt standardmäßig 5% pro Simulationsschritt (ca. ein Monat), also eine Zunahme von 80% oder eine Abnahme von 46% pro Jahr. Ebenso lässt sich die Nachfrage nach Batteriekapazität in GWh/Jahr für jeden Markt einzeln festlegen.

6 Erlösmöglichkeiten mit stationären Speichern – das Modell AMIRIS

6.1 Einleitung

Dieser Abschnitt beschreibt die Arbeiten des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Analyse der Erlösmöglichkeiten stationärer Speicher. Die Untersuchungen wurden primär mit dem agentenbasierten Strommarktmodell AMIRIS, welches im Rahmen des Projektes in seinem Funktionsumfang erweitert wurde, durchgeführt.

Steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien bei voraussichtlich steigendem Elektrizitätsverbrauch stellen das Stromsystem vor große Herausforderungen. Im Vorhaben InnoSEn war es das Ziel Schlüsseltechnologien, die einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten, zu identifizieren (siehe AP 1.3). Als Schlüsseltechnologien gelten innovative Technologien, die durch ihren Einsatz weitreichende gesellschaftliche und wirtschaftliche Felder begünstigen können. In Arbeitspaket 1.3 wurden erste Analysen zu Umsetzungsszenarien sowie eine Identifikation von Akteuren in Arbeiten an der RWTH Aachen durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden in Abschnitt 0 detailliert dargestellt. Aus diesen Berechnungen haben sich Batterien als mögliche Schlüsseltechnologie abgezeichnet. Speicher werden üblicherweise genutzt, um Strom zu günstigen Preisen zu kaufen und einzuspeichern und in Zeiten von höheren Preisen wieder am Markt zu veräußern. Diese Strategie wird auch als Arbitrage bezeichnet und ist als Betriebsstrategie auf der Strombörse einsetzbar. Durch ihre beinahe unmittelbare Leistungsbereitstellung sowie Leistungsaufnahme sind Batterien jedoch auch besonders geeignet, um kurzfristige Schwankungen im Stromnetz zu begleichen.

Stromnetze müssen stets eine Normalfrequenz (in Deutschland 50 Hertz) halten, um ihren Betrieb sicherzustellen. Bereits geringe Abweichungen in der Stromerzeugung oder der Stromnachfrage können dieses System aus dem Gleichgewicht bringen. Gründe dafür können beispielsweise unerwartete Nachfrageänderungen von Verbrauchern, abweichende Leistung in den Erneuerbaren Energien durch schwer vorhersehbare Wetterverhältnisse oder die ungeplante Abschaltung eines Kraftwerks sein. In Deutschland wurde, wie auch in vielen anderen Ländern, ein Regelmarkt zur Sicherstellung der Netzfrequenz eingerichtet, welcher auf Abruf zusätzliche Leistung in das System speisen kann („positive Regelleistung“) oder Überschüsse aufnehmen bzw. Leistung abregeln kann („negative Regelleistung“). Die deutschen Regelmärkte sind in drei verschiedene Teilmärkte unterteilt, wie auch in Abbildung 32 dargestellt. Der Primärregelmarkt (PRL), auch Frequency Containment Reserve (FCR) genannt, wird vollautomatisiert abgerufen und bringt bereits nach 30 Sekunden seine volle Leistung. Wenn die Frequenzabweichung trotz Aktivierung des PRL nach wie vor besteht, wird auf den Sekundärregelmarkt (SRL), auch Automatic Frequency Restoration Reserve (AFRR) genannt, zurückgegriffen. Dieser kann nach spätestens fünf Minuten seine volle Leistung aktivieren und bis zu einer Stunde mit seiner Leistung korrigierend eingreifen. Für den Fall, dass die Abweichung trotz PRL und SRL noch nicht behoben sein sollte, wird die Minutenreserve (MRL), auch Manual Frequency Restoration Reserve (MFRR), aktiviert. Der dritte und letzte Markt ist nach spätestens 15 Minuten in vollem Umfang verfügbar und soll

als letzte Reserve vor dem Bilanzkreisverantwortlichen dafür sorgen, die Netzfrequenz wieder auf 50 Hertz einzustellen.

Akteure, die sich bereiterklären an den Regelleistungsmärkten teilzunehmen und entsprechende Kapazitäten dafür freizuhalten, werden mit einem Leistungspreis für die Leistungsvorhaltung entschädigt. Wenn ihre Kraftwerke später auch tatsächlich abgerufen werden, entsteht im Fall der SRL und der MRL zusätzlich eine Vergütung über die Höhe des Arbeitspreises. Die Vergütung der PRL, welche geprägt ist von häufigen und sehr kurzfristigen Abrufen, erfolgt hingegen ausschließlich über den Leistungspreis.

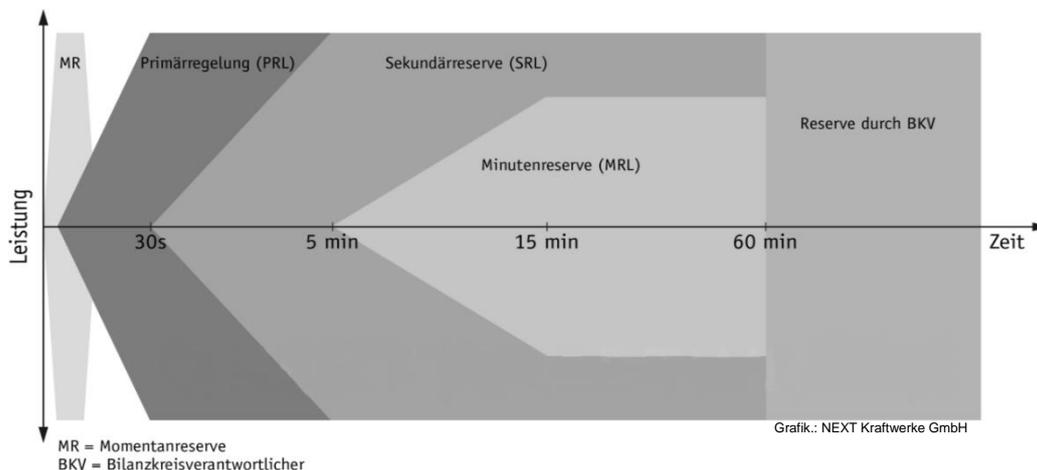


Abbildung 32: Darstellung der unterschiedlichen Regelmärkte zur Sicherstellung der Netzfrequenz in Deutschland und ihre zeitliche Ausprägung

Die Regelmärkte zur Frequenzstabilisierung stehen in Deutschland zunehmend im Fokus von Diskussionen zu geplanten Anpassungen. Gründe dafür sind die Änderung des zugrundeliegenden Kraftwerksparks, Liberalisierung des Stromhandels sowie die in der Vergangenheit durchgeführten und bereits angekündigten Marktdesignanpassungen (Ehrhart et al. 2016). Der Großteil der nachgefragten Regelenergiekapazitäten wird aktuell durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt (Hasche et al. 2016). Dies könnte in zukünftigen Energiesystemen mit geringem Anteil an konventioneller Kraftwerksleistung zu einer Herausforderung werden. Die im InnoSEn Projekt identifizierte Schlüsseltechnologie Batteriespeicher könnte daher eine wichtige Rolle in dieser Transformation einnehmen, da diese aufgrund ihrer schnellen Leistungsbereitstellung eine attraktive Technologie für die Aufrechterhaltung der Netzfrequenz und einer Teilnahme an den PRL und SRL-Märkten ist (Denholm et al. 2010). Zurzeit sind jedoch kaum bedeutende Batteriekraftwerke für die Bereitstellung von Regelenergie am Netz (Hasche et al. 2016), sodass die Bewertung im Vorhaben InnoSEn wertvolle Einschätzungen über das ökonomische Potential liefern kann.

Wie bereits zuvor beschrieben, ist der Abruf von PRL sehr kurzfristig und nicht vorhersehbar. Ohne ein entsprechendes Netzmodell und eine sehr hoch aufgelöste zeitliche und räumliche Darstellung lässt sich der Einsatz bzw. der Bedarf an PRL daher kaum fundamental modellieren. Daher wurde von einer Untersuchung des PRL in diesem Vorhaben Abstand genommen, siehe auch die Diskussion in Abschnitt 6.5.

Der Handel auf den jeweiligen Strommärkten setzt sich aus dem Zusammenspiel der Akteure zusammen, die wiederum durch ihre Portfolios geprägt sind. Die Akteurseigenschaften von Betreibern dieser Schlüsseltechnologie (siehe AP 3.1) wurden in Workshops mit externen Teilnehmern aus der Industrie diskutiert. Die daraus gewonnenen Informationen ermöglichten die Abbildung der Akteure im SKIN-Modell. Die Ergebnisse sowie die Kopplung der beiden Simulationsmodelle SKIN und AMIRIS werden im Abschnitt 7 beschrieben und diskutiert. Der mögliche Einsatz auf dem SRL-Markt ist für Batteriespeicher, vor allem auch in Kombination mit einem Einsatz am Day-Ahead-Markt, ein potentiell attraktives Geschäftsfeld. Um den Einsatz auf diesen beiden Märkten auch quantifizieren zu können, wurde ein Modellaufbau aus dem Simulationsmodell AMIRIS (siehe Abschnitt 6.2.2) und einem Optimierungsmodell (siehe Abschnitt 6.2.3) zusammengestellt (AP 3.2). Zunächst wurde versucht den zukünftigen Bedarf an Energie am SRL-Markt einzuschätzen, indem eine mögliche Korrelation der abgerufenen Menge und der Preise mit Daten zur Last, Wetter oder Einspeisung von Erneuerbaren Energieträgern untersucht wurden. Diese Zeitserienanalyse ist in Abschnitt 6.2.1 detailliert beschrieben. Die Ergebnisse ließen jedoch keinen Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen erkennen. Deswegen wurde der SRL-Markt fundamental modelliert. Als Grundlage dienten dazu die Kosten der Akteure um am SRL-Markt teilzunehmen. Diese wurden nach der Theorie der Opportunitätskosten formuliert. Die verbleibende Unsicherheit über die Menge an nachgefragter Energie am SRL-Markt wurde in Sensitivitätsanalysen adressiert. Für das Jahr 2030 wurde ein Szenario, welches einen möglichen Transformationspfad des Energiesystems zu hohen Anteilen von Erneuerbaren zeigt, verwendet. Die dem Szenario zugrundeliegenden Annahmen sind in Abschnitt 6.3 näher beschrieben. Das Jahr 2030 wurde als zukünftiges Zieljahr gewählt, um die Rolle der Batterien als identifizierte Schlüsseltechnologie und ihr Beitrag zur Transformation des Energiesystems für die Zukunft untersuchen zu können.

6.2 Methoden

6.2.1 Zeitserienanalyse

Der Regelleistungsbedarf und -einsatz wird von den Netzbetreibern zur Sicherstellung eines reibungslosen Netzbetriebs bestimmt. Der Einsatz der Regelenergie gleicht dabei vom Fahrplan abweichende Über- oder Unterspeisungen in das Netz aus. Diese Abweichungen können unter anderem bedingt sein durch fehlerhaft vorhergesagte Erzeugung aus erneuerbaren Energien, auftretenden Kraftwerksausfällen oder zum Beispiel einer veränderten Nachfrage in einem bestimmten Netzbereich. Um die Abhängigkeiten verschiedener Systemparameter für weitere Analysen quantifizieren zu können, werden Zeitserienanalysen von Zeitreihen dieser Parameter durchgeführt. Mögliche Korrelationen und Wirkrichtungen sollen dabei helfen die Daten zu selektieren, die zur Beschreibung des SRL-Marktes in einem Simulationsmodell essentiell sind.

Zunächst wird der Day-Ahead Spotmarkt Strompreis der Jahre 2015-2018 mit den Preisen für den SRL-Markt verglichen und auf Korrelationen überprüft. Da der SRL-Markt wöchentliche Preise (vgl. Abbildung 33) und der Spotmarkt stündliche Preise aufweist, werden die Daten im ersten Schritt aufbereitet und dadurch vergleichbar gemacht.

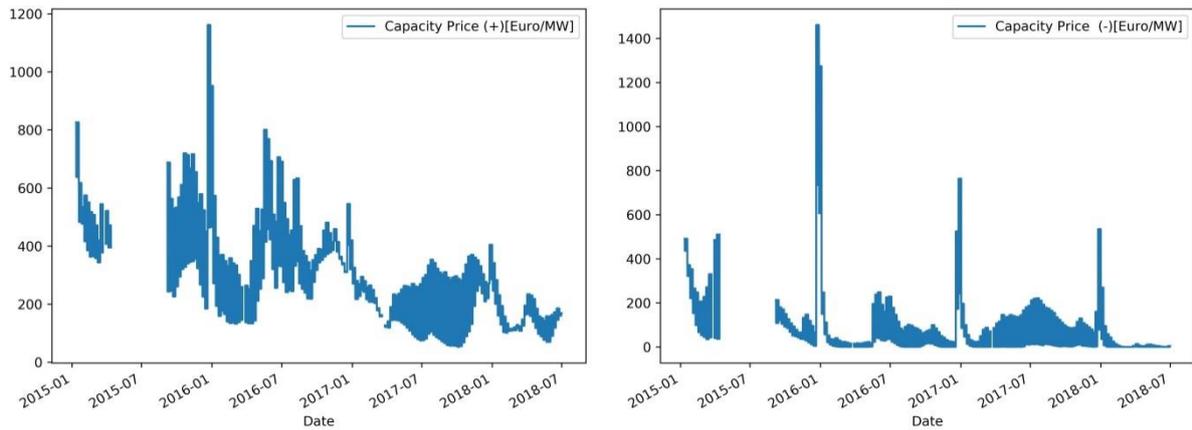


Abbildung 33: Verlauf der positiven und negativen SRL-Markt Leistungspreise in EUR/MW für die Jahre 2015 bis Mitte 2018. Für einen Zeitraum im Sommer 2015 sind keine Daten vorhanden

Dazu werden durchschnittliche Wochenpreise der Spotmarkt Daten berechnet und für den Vergleich herangezogen.

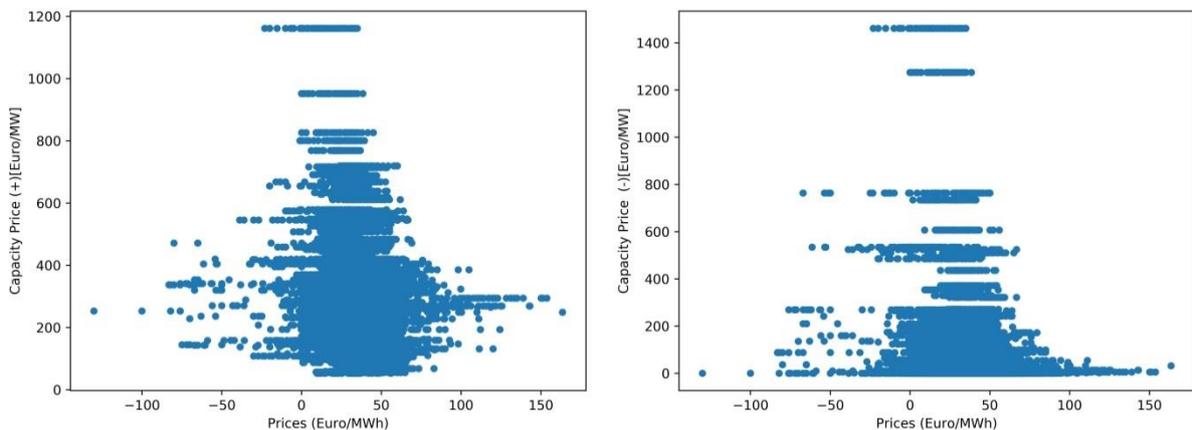


Abbildung 34: Vergleich der Day-Ahead Börsenpreise gegen die positiven (links) und negativen (rechts) Leistungspreise am SRL-Markt im Zeitraum 2015-2018

Wie Abbildung 34 zeigt, ist keine Korrelation zwischen den Börsenpreisen am Day-Ahead-Markt und den Leistungspreisen am SRL-Markt zu finden.

Eine weitere untersuchte Hypothese ist die Korrelation zwischen der Nachfrage, der Einspeisung durch variable, erneuerbare Energien und den Leistungspreisen am SRL-Markt. Für diese Analyse werden die gesamte wöchentliche Nachfrage, die summierte wöchentliche Winderzeugung sowie die summierte wöchentliche Residuallast mit den Leistungspreisen des SRL-Marktes verglichen. Abbildung 35 zeigt die Punktwolken der entsprechenden Vergleiche, welche wiederum jedoch keine Korrelation der untersuchten Parameter erkennen lassen.

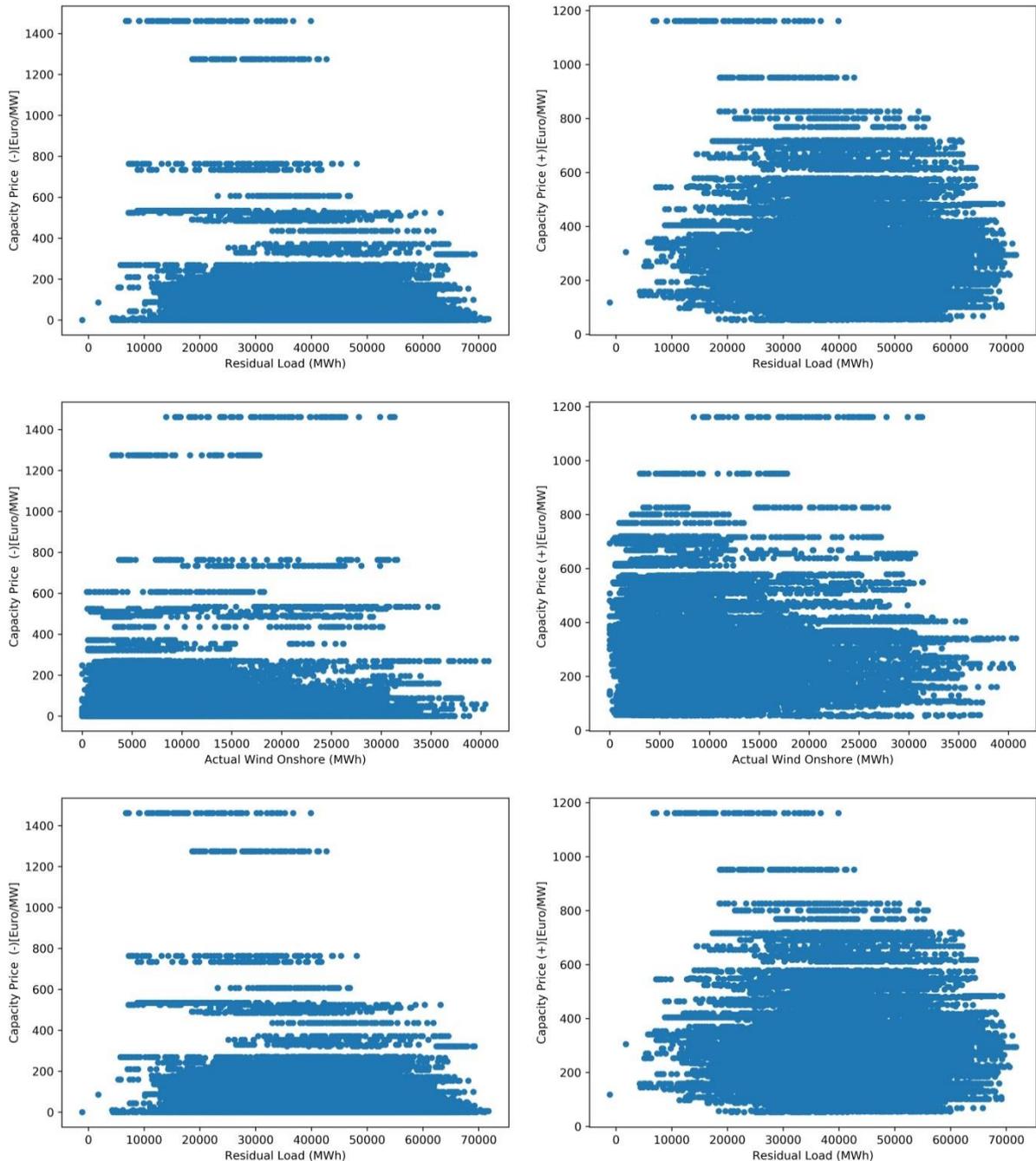


Abbildung 35: Vergleich der negativen und positiven Leistungspreise am SRL-Markt mit zur Gesamtnachfrage (Oben), der Einspeisung der Onshore Windanlagen (Mitte), der Residuallast (Unten)

Diese ersten Vergleiche, die auf keinerlei Abhängigkeiten der negativen bzw. positiven Leistungspreise von den untersuchten Parametern hindeuten, werden in einem zweiten Schritt detaillierter wiederholt. Auf dem SRL-Markt galt im Untersuchungszeitraum eine Unterteilung in Niedertarif- (NT) und Hochtarifzeiten (HT). NT waren definiert als Nachtstunden zwischen 20 und 6 Uhr sowie den gesamten Tag an Wochenenden und Feiertagen. HT beschreiben analog dazu die Zeiten an Werktagen zwischen 6 Uhr und 20 Uhr. Die Vergleichsdaten werden hierbei auf die NT und HT aufgeteilt und miteinander verglichen. Es wird angenommen, dass Zeiten höherer Nachfragelast mit Zeiten höherer Leistungspreise einhergehen, da Opportunitätskosten zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt von denen am

Day-Ahead-Markt abhängig sind. Auch mit diesen Analysen lassen sich keine signifikanten Korrelationen ermitteln und die vorhin aufgestellte Hypothese muss als falsch eingestuft werden. Die dazugehörigen Abbildungen sind im Anhang zu finden (Abbildung 98 und Abbildung 99).

Eine weitere, aus der Literatur entnommene Annahme wird überprüft: Die Anbieter der Regelernergie orientieren sich bei der Gebotsabgabe an den vorangegangenen Preisen. Für die Zeitserienanalyse wurde ein AutoRegressive-Moving Average (ARIMA) Modell entwickelt. Die Stationarität der Zeitreihe ist mit einem Dicky Fueller Test geprüft worden ($p < 0.001$). Das Modell besteht aus einem Auto-Regressive Koeffizienten und 5 Mean-Average Koeffizienten. Abbildung 36 zeigt ein Ergebnis der Zeitreihenanalyse. Dargestellt ist die Analyse der Zeitserie des Leistungspreises für positive Regelernergie in den Niedertarifzeiten. Die Preise können mit dem Modell gut dargestellt werden, in Tabelle 10 sind die Ergebnisse des Fits an die Preiszeitreihe aufgelistet. Der Mean-Average Anteil des Modells beschreibt vor allem über die ersten drei Parameter die Zeitreihe, die Parameter 4 und 5 sind vernachlässigbar, da ihre Werte aufgrund der Fehler verträglich mit Null sind. Mit dem gleichen Modell wird die Vorhersagequalität in Abhängigkeit der Vorhersagedauer untersucht.

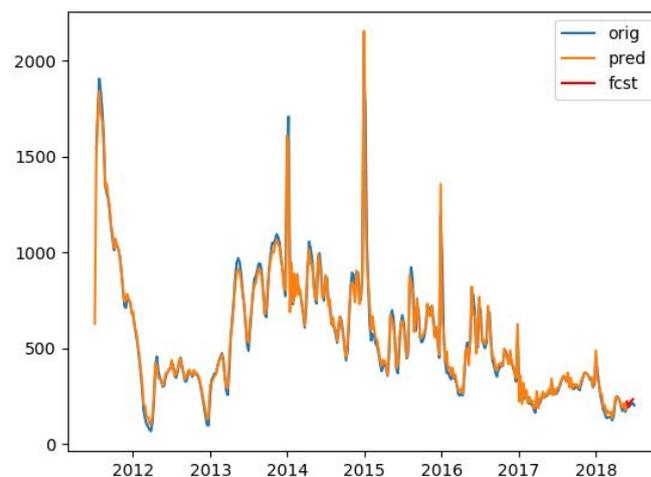


Abbildung 36: Beispiel der Zeitserienanalyse anhand der Zeitserie des positiven Regelleistungspreises in den Niedertarifzeiten („orig“). Diese Inputzeitreihe ist überlagert mit dem Ergebnis des ARIMA Modells („pred“). Am Ende der Zeitreihe sind die letzten 4 Werte über einen Forecast berechnet worden („fcst“)

Die Vorhersagedauern betragen dabei eine bis zehn Wochen. Es werden zehn Fits mit einer jeweils um eine Woche längeren Vorhersage durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang in Abbildung 100 zu finden. Für den Vorhersagezeitraum von einer Woche sind naturgemäß die geringsten Abweichungen zu erwarten.

Tabelle 10: Ergebnisse des Fits an die Leistungspreise für positive Regelleistung in den Niedertarifzeiten. Die Parameter MA.4 und MA.5 sind weniger aussagekräftig als die anderen Parameter, da ihr Fehler in der Größenordnung des Koeffizientenwertes ist

	Coeff	Std_err	Z	P > z
Const	632,840	175,330	3,610	0,000
AR.1	0,978	0,017	57,025	0,000
MA.1	0,210	0,060	3,740	0,000
MA.2	-0,315	0,059	-5,307	0,000
MA.3	-0,149	0,056	-2,682	0,008
MA.4	-0,089	0,058	-1,527	0,128
MA.5	0,037	0,056	0,649	0,517

Die Analyse der Zeitserien bestätigt die Annahme, dass die Leistungspreise einer Woche stark an den Preisen der vorangegangenen Woche orientiert sind. Die durchgeführten Korrelations- und Zeitreihenanalysen erlauben daher keine Abschätzung der Entwicklung der Leistungspreise für Szenariorechnungen in der Zukunft. Für die anderen untersuchten Korrelationen konnten wie zuvor beschrieben kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

Der nun im Projekt verfolgte Ansatz für eine Abschätzung der Preise ist eine fundamentalere Abbildung der Entstehung der Leistungspreise. In das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS, welches am DLR entwickelt wurde, wird für diesen Zweck der SRL-Markt integriert. Das detaillierte Vorgehen ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

6.2.2 Agentenbasiertes Strommarktmodell AMIRIS

Das am DLR entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell AMIRIS ermöglicht Analysen zur Marktintegration der erneuerbaren Energien (EE) sowie von Flexibilitätsoptionen. Die Anwendung ist sowohl auf der Mikroebene der Akteure als auch auf der Makroebene des Energiesystems möglich. Hierbei kann das Verhalten einzelner prototypisierter Akteursgruppen unter verschiedenen Rahmenbedingungen, wie z.B. des Markt- oder Förderdesigns, berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Gleichgewichts- und Optimierungsmodellen existiert keine übergeordnete, zentral vorgegebene Zielfunktion, die z. B. die Systemkosten minimiert. Im Zentrum von AMIRIS stehen stattdessen die im Modell als Agenten dargestellten Akteure der Stromwirtschaft mit ihren Zielvorstellungen und Handlungsoptionen. Eine kurze Beschreibung des Modells sowie die wichtigsten Input- und Outputparameter sind in Tabelle 11 gelistet.

Tabelle 11: Typische Modellcharakteristika von AMIRIS. (*ZD, TD, RD – zeitliche, technologische, räumliche Differenzierung).

Modellname	AMIRIS - Agentenmodell zur Integration Regenerativer in die Strommärkte			
Urheber (Institut)	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik			
Modelltyp	Agentenmodell (Simulation)			
Technischer Fokus	Strommarkt, Einsatz Erneuerbarer Energien unter regulatorischen Rahmenbedingungen auf Akteursebene			
Geografischer Fokus	Deutschland			
Räumliche Auflösung	national			
Zeitpunkte pro Jahr	8760			
Zeitliche Auflösung	1h			
Input-Parameter		ZD*	TD*	RD*
	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten (fix und variabel) für Anlagebetreiber und Direktvermarkter • Kraftwerkswirkungsgrade • Rahmenbedingungen • Brennstoffpreise und CO₂-Zertifikatspreise • Lastprofil • Installierte Stromerzeugungskapazitäten 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓
Output-Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatzprofile von Speichern unter unterschiedlichen Betriebsstrategien • Einsatzprofile von EE-Anlagen unter unterschiedlichen regulatorischen Rahmenbedingungen • Erlöse der Direktvermarkter 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓ 	<ul style="list-style-type: none">

Die Agenten können sich dabei durch unterschiedliche Eigenschaften auszeichnen (Axelrod, 1997; Schmidt, 2000; Urban, 2004; Brenner, 2006). Demnach gilt für Agenten in der Regel, dass sie:

- eine eigene interne Struktur und Repräsentation ihrer Umwelt besitzen,
- unterschiedliche Motivationen und Ziele verfolgen,
- lernen und daher über adaptive Strategien verfügen, um ihre Ziele zu erreichen,
- die Fähigkeit zum Planen aufweisen und
- mit anderen Agenten kommunizieren und kooperieren können.

Die relevanten Akteure (z.B. Direktvermarkter von EE-Anlagen, Speicherbetreiber) sind als Agenten prototypisiert abgebildet. Ihre mikroökonomisch ausgerichteten Entscheidungen basieren dabei sowohl auf der mit Unsicherheiten verknüpften Einschätzung der Börsenpreise und Leistungsprognosen wie auch auf der Berücksichtigung aktueller Förderinstrumente für erneuerbare Energien (variable und fixe Marktprämien oder Kapazitätsprämien). Aus den Geboten der Akteure resultieren Marktpreise, aus denen Refinanzierungsmöglichkeiten für

die Anlagenbetreiber oder Versorgungsengpässe über Knappheitspreise abgeleitet werden können. So kann mit AMIRIS z. B. der Einsatz von Speichertechnologien im Strommarkt aus der betriebswirtschaftlichen Sicht untersucht werden.

Abbildung 37 zeigt die Struktur des AMIRIS-Modells. Die EE-Anlagenbetreiberagenten können prototypisch nach verschiedenen Leistungsklassen mit unterschiedlich hohen Stromgestehungskosten und Eigentümerstrukturen ausdifferenziert werden und somit unterschiedliche Handlungsmotivationen und Renditeerwartungen aufweisen¹⁰. Ebenso können die Direktvermarktungsagenten EE-Direktvermarkter prototypisiert abbilden. Sie übernehmen für die vertraglich an sie gebundenen Anlagenbetreiber sämtliche Pflichten der Direktvermarktung, wie Leistungs- und Preisprognosen sowie die Fahrplanmeldung. Es sind verschiedene Förderinstrumente wie z. B. die gleitende oder fixe Markt- oder Kapazitätsprämie implementiert, die unterschiedliche Anreizwirkungen hinsichtlich des Einspeiseverhaltens der EE mit sich bringen.

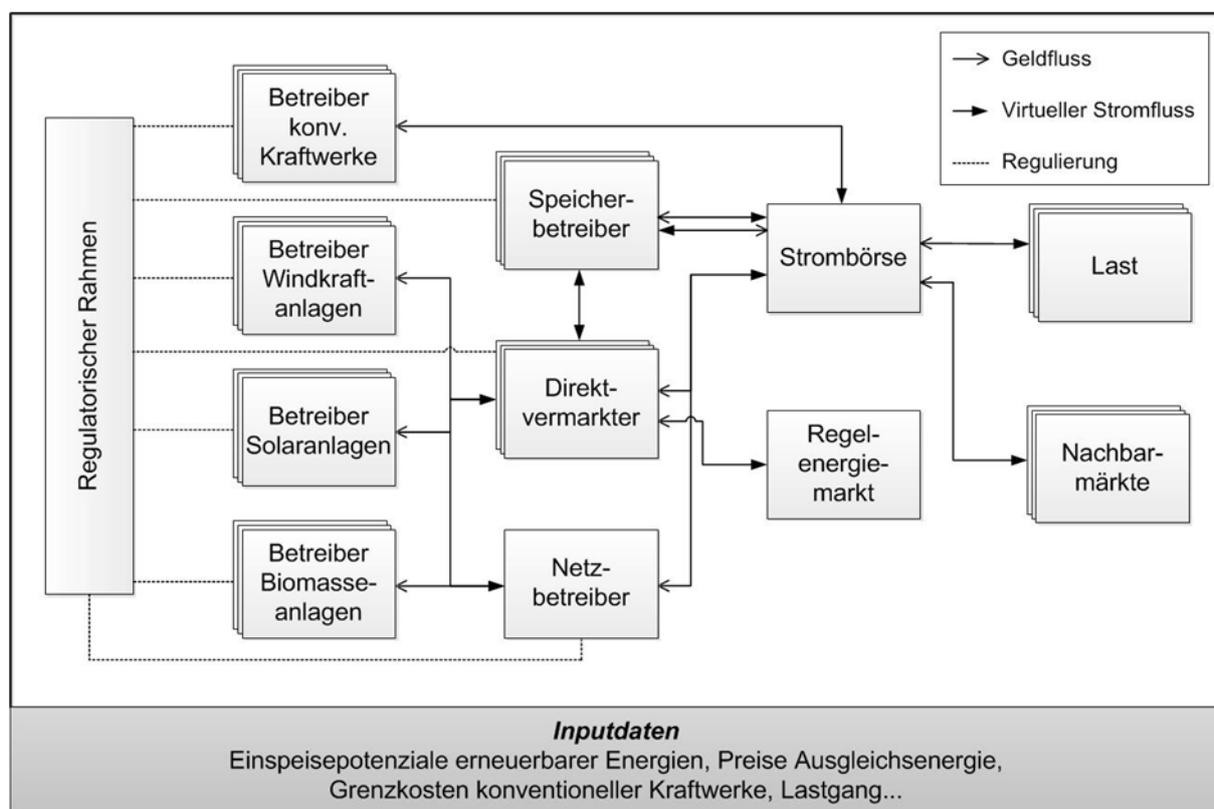


Abbildung 37: Schematische Darstellung des AMIRIS Modells

Physikalisch fließt der Strom im Modell über den Netzbetreiber zum Lieferanten, der die Nachfrage symbolisiert und als Senke des Systems dient. Die Nachfrageseite wird derzeit über

¹⁰ Die Identifizierung, Typbildung und Modellierung der einzelnen Anlagenbetreiber- und Direktvermarktungsagenten basiert dabei auf einer sozio-technischen Akteursanalyse mit Hilfe von Dokumentenanalysen, semi-strukturierter Experteninterviews und Akteursworkshops. Diese Akteursanalysen wurden z. T. in Vorprojekten zur Entwicklung des AMIRIS-Modells gemeinsam mit Technik- und Umweltsoziologen des „Zentrums für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung“ (ZIRIUS) der Universität Stuttgart durchgeführt.

ein gesamtdeutsches Lastprofil abgebildet. Wie in Tabelle 2 dargestellt, ist das AMIRIS Modell räumlich in einem Knoten aufgelöst und verfolgt daher den sogenannten „Kupferplatten“-Ansatz. Eine detaillierte Modell- und Methodenbeschreibung von AMIRIS ist in Deissenroth et al. (2017) zu finden.

AMIRIS verfügt über eine detaillierte, stündlich aufgelöste modellendogene Simulation des Day-Ahead-Spotmarktes in Form eines klassischen Merit-Order Modells, in dem die Grenzkosten der Kraftwerke über Rohstoffpreise, CO₂-Preise, technologiespezifische Wirkungsgrade und weitere variable Kosten bestimmt werden. Der Börsenstrompreis ergibt sich dabei aus der Einsatzreihenfolge der Kraftwerkstechnologien aufsteigend sortiert nach ihren Grenzkosten, wie in Abbildung 38 dargestellt.

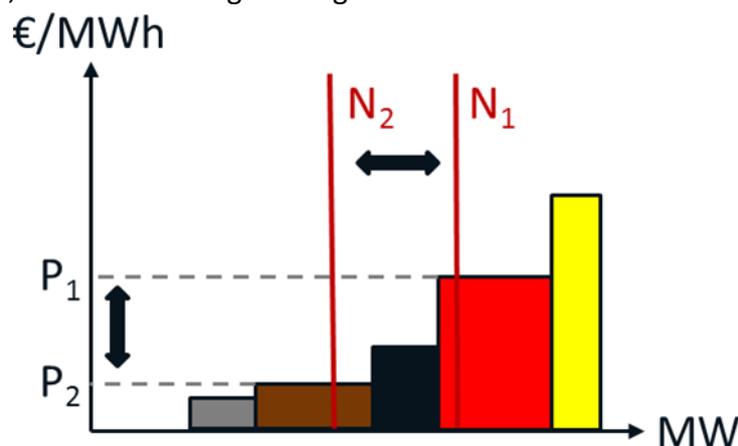


Abbildung 38: Stilisiertes Modell der Merit-Order

In AMIRIS werden von den konventionellen Kraftwerksagenten – bestehend aus Kernkraftwerken (KKW), Braun- und Steinkohle- (BKW bzw. SKW) sowie Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) und Gasturbinen (GT) – zu jeder Simulationsstunde die Grenzkosten der Produktion MC_{Prod} für die nächste Gebotslegung an der Börse berechnet

$$MC_{Prod}(i, j, h) = \frac{\frac{C_{Fuel}(h)}{H_{spez}} + P_{CO2}(h) * E_{spez}(i)}{\eta_j}} + C_{var} \quad (1)$$

mit:

i – Kraftwerkstyp

h – Stunde des Jahres

$C_{Fuel}(h)$ – Kosten des Brennstoffs in Stunde h

H_{spez} – spezifischer Heizwert des Energieträgers

$P_{CO2}(h)$ - CO₂-Preis in Stunde h

$E_{spez}(i)$ – spezifische CO₂-Emissionen des Kraftwerkstyps i

C_{var} – sonstige variable Betriebskosten

η_j – Wirkungsgrad des j -ten Erzeugungsblocks.

Die Brennstoff- und CO₂-Zertifikatskosten werden dabei exogen als Zeitreihe vorgegeben und in das Modell eingelesen.

Für die Wirkungsgrade ist zu beachten, dass die Erzeugungskapazitäten in AMIRIS in einzelne „Blöcke“ aufgeteilt werden, und jedem Erzeugungsblock ein anderer Wirkungsgrad zugeteilt wird. Die Zuteilung erfolgt als lineare Interpolation zwischen dem niedrigsten (η_{min}) und höchsten (η_{max}) Wirkungsgrad der jeweiligen Technologie. Im Rahmen des Projektes wurde die Erzeugungsblockgröße auf jeweils 200 MW definiert.

Zu den marginalen Produktionskosten MC_{Prod} kann noch ein Markup MU_j addiert werden, um das letztendliche Gebot G des Erzeugungsblocks j bei der Strombörse zu erhalten¹¹:

$$G = MC_{Prod} + MU_j \quad G = MC_{Prod} + MU_j \quad (2)$$

Für die Validierung des Merit-Order Modells können die Markups aus Kalibrierungsläufen für jede Kraftwerkstechnologie bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um Auf- oder Abschläge auf die Grenzkosten, um zusätzliche Kosten für An- und Abfahrt der Kraftwerke, Blockgebote an der Börse oder strategisches Bieterverhalten zu berücksichtigen. Zusammen mit den Grenzkosten bilden Mark-Ups die Gebote Ask^{12} der Kraftwerks-Agenten für den Spotmarkt und lassen sich als Preis-Mengen-Tupel für jeden Agenten i und jede Stunde h allgemein in folgender Form darstellen:

$$Ask_{i,h,MC}^{spot} = \{(p_{i,h,1}^{spot}, q_{i,h,1}^{spot}), \dots, (p_{i,h,n}^{spot}, q_{i,h,n}^{spot})\} \quad (3)$$

mit:

n – Anzahl der Stunden im Jahr (= 8760 h)

p – Preisgebot \triangleq Grenzkosten + evtl. Mark-Ups

q – Menge.

Die Direktvermarkter der EE-Anlagenbetreiber geben ebenfalls ihr Gebot entsprechend der Grenzkosten ihrer vermarkteten EE-Technologien ab. Die Grenzkosten für PV-Anlagen werden mit 0 €/MWh angesetzt. Für Wind On- und Offshore-Anlagen wird der variable Anteil an den Operations- und Maintenance-Kosten (O&M Kosten) zur Bestimmung der Grenzkosten aus Untersuchungen der DWG (2015), der IRENA (2018) und Röckmann et al. (2017) herangezogen. Sie belaufen sich im Mittel auf 18,6 €/MWh für Wind Onshore und 30,4 €/MWh für Offshore Wind.

¹¹ Die Berechnung der „gebotenen“ Grenzkosten entsprechen im Modell nicht zwangsläufig den reinen technologischen Grenzkosten der Kraftwerks-Agenten, da bei der letztendlichen „Gebotslegung“ durch die Kalibrierung des Modells noch Aufschläge („Mark-Ups“) oder Abschläge („Mark-downs“) auf die Grenzkosten addiert bzw. subtrahiert werden.

¹² Im Stromhandel werden die Gebote der Angebotsseite als ‚Ask‘, die der Nachfrageseite als ‚Bid‘ bezeichnet.

Anschließend wird die Menge dieser Preis-Mengen-Tupel vom Strombörsen-Agenten aufsteigend nach den Grenzkosten geordnet:

$$Ask_{i,h,MC}^{spot} = \{(p_{i,h,1}^{spot}, q_{i,h,1}^{spot}), \dots, (p_{i,h,n}^{spot}, q_{i,h,n}^{spot})\} \quad (4)$$

mit: V – Gesamtmenge der Preis-Mengen-Tupel

$v \in V$ – Index für die individuellen Grenzgebote.

Der uniforme Markträumungspreis $uMCP$ wird durch das letzte Gebot bestimmt, das notwendig ist, um die Last L der Nachfrage zu decken:

$$uMCP_h^* = \min \left(p_{h,v^*} \mid \sum_{v=1}^{v^*} q_{h,v} \leq L \right) \quad (5)$$

Die erneuerbaren Anlagenbetreiber berechnen darüber hinaus ihre Stromgestehungskosten basierend auf ihren erwarteten jährlichen Stromertrag, den erwarteten jährlichen Kosten und den Investitionsausgaben zum Zeitpunkt $T=0$:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + i_{WACC})^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{SE_t}{(1 + i_{WACC})^t}} \quad (6)$$

mit: I_0 – Investitionsausgaben zum Zeitpunkt $T=0$

C_t – jährliche Kosten zum Zeitpunkt t

SE_t – jährlicher Stromertrag zum Zeitpunkt t

n – wirtschaftliche Nutzungsdauer in Jahren

t – Jahr der Nutzungsperiode

i_{WACC} – Weighted Average Cost of Capital (WACC).

Auf Basis der LCOE Kalkulation wird vom Policy-Agenten der sog. Anzulegende Wert (AW) für jeden EE-Anlagenbetreiberagenten bestimmt. Der Anzulegende Wert gilt wiederum als Referenzwert für die Bestimmung der Höhe der variablen Marktprämie. In AMIRIS können die Anlagenbetreiber außerdem nach einer fixen Marktprämie oder einer Kapazitätsprämie vergütet werden.

Die Abbildung des SRL-Marktes und das Gebotsverhalten der Anlagenbetreiber ist im Rahmen des InnoSEn Projektes in AMIRIS hinzugefügt worden. Das fundamental modellierte Gebotsverhalten der Teilnehmer des SRL-Markts basiert dabei auf einem Vergleich der potentiellen Einnahmen auf dem Day-Ahead-Markt und denen auf dem SRL-Markt, Opportunitätskostentheorie. Die zugehörigen Opportunitätskosten werden für die vier Produkte des SRL-Marktes berechnet (positive und negative Leistungs- und Arbeitspreise). Die Berechnung der Opportunitätskosten der Leistungspreise bedarf zudem der Einschätzung, ob

die angebotene Leistung des Kraftwerks zu Preisen kleiner oder gleich des Day-Ahead Börsenpreises bereitgestellt werden kann (i.e. inframarginaler Zustand), oder aber zu höheren Preisen erzeugt werden muss (extramarginaler Zustand). Die so ermittelten Kosten entsprechen den gebotenen Leistungspreisen auf dem SR-Markt und werden wie folgt berechnet (Müsgens et al. 2014):

$$Bid_{power,pos} = \begin{cases} p_{forecast} - c, & c \leq p_{forecast} \\ (c - p_{forecast}) * \frac{Power_{min}}{Power_{pos}}, & c > p_{forecast} \end{cases} \quad (7)$$

$$Bid_{power,neg} = \begin{cases} 0, & c \leq p_{forecast} \\ (c - p_{forecast}) * \frac{(Power_{min} + Power_{neg})}{Power_{neg}}, & c > p_{forecast} \end{cases} \quad (8)$$

$$Bid_{energy,pos} = c \quad (9)$$

$$Bid_{energy,neg} = 0 \quad (10)$$

Dabei stehen $Bid_{power,pos}$, $Bid_{power,neg}$ für die positiven bzw. negativen Leistungspreise am SRL-Markt in EUR/MW, $Bid_{energy,pos}$, $Bid_{energy,neg}$ für die positiven bzw. negativen Arbeitspreise in EUR/MWh, $p_{forecast}$ für den vorhergesagten Preis am Day-Ahead-Markt in EUR/MWh, c für die Grenzkosten der Stromproduktion in EUR/MWh, $Power_{min}$ für die Mindestleistung eines Kraftwerks, $Power_{pos}$, $Power_{neg}$ für die angebotene Menge positiver bzw. negativer Leistung in MW.

Der Ablauf der Gebotslogik wurde, wie in Abbildung 39 dargestellt, implementiert. Zu Beginn werden die Prognosen der Bezuschlagung am DA-Markt evaluiert. Daraus ableitend eventuell fehlende Kapazitäten zur Erreichung der Must-run Kapazität zu minimalen Preisen festgelegt, um die Erreichung der Must-run Menge sicherzustellen. Auf dieser Basis der Gleichungen (7) bis (10) werden dann die SRL-Gebote formuliert. Es folgt die Markträumung am SRL-Markt, sowohl für die erforderliche positive als auch negative SRL-Leistung. Nachdem die Bezuschlagung am SRL-Markt feststeht, werden die DA-Markt Gebote entsprechend angepasst, wenn dies erforderlich ist und die finalen Gebote an den DA-Markt weitergeleitet. Dies stellt eine Vereinfachung gegenüber der Wirklichkeit dar, da in der Realität die Gebotslegung am SRL-Markt bislang auf wöchentlicher Basis und seit Veränderungen im Marktdesign im letzten Jahr täglich erfolgen muss. Diese Vereinfachung musste getroffen werden, um die Problemstellung im Modell AMIRIS lösbar zu halten.

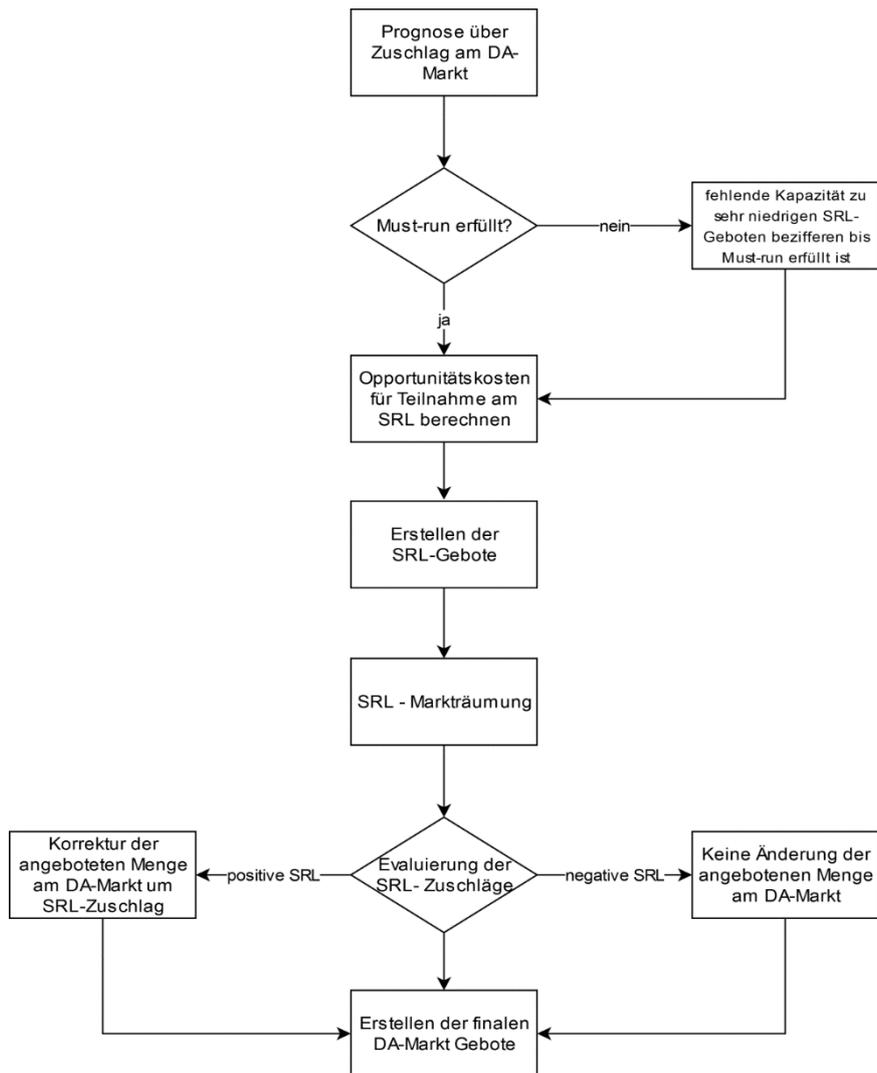


Abbildung 39: Logik der Gebotslegung am SRL-Markt

Das Ergebnis der Rechnungen mit AMIRIS sind Preiszeitreihen des Day-Ahead- und des SRL-Marktes in Abhängigkeit der verfügbaren Kapazität der entsprechenden Technologien sowie die korrespondierenden Einsatzprofile der Kraftwerke. Diese Ergebnisse werden im Optimierungsmodell, welches im nächsten Abschnitt beschrieben wird, eingesetzt, um die Erlöspotentiale der Speicherbetreiber zu ermitteln.

6.2.3 Optimierung von Gebotsstrategien

Die in AMIRIS generierten Preiszeitreihen gehen als Eingangsdaten in ein separates Optimierungsmodell ein, siehe Abbildung 40. Dieses Modell hat den Stromspeicher im Fokus und modelliert die optimale Betriebsstrategie eines Speichers auf dem Day-Ahead sowie dem SSRL-Markt unter perfekter Voraussicht. Technische Spezifikationen des Speichers, wie etwa die Lade- und Entladeeffizienzen, Rampenbeschränkungen und die Berücksichtigung des Ladezustandes gehen als Nebenbedingungen in das Modell ein. Der präsentierte Ansatz ist als idealisierte Modellierung zu beschreiben, da er die Unsicherheiten aufgrund von Konkurrenz

und Vorhersage nicht abbilden kann. In Abschnitt 6.5 werden diese Annahmen weiter diskutiert.

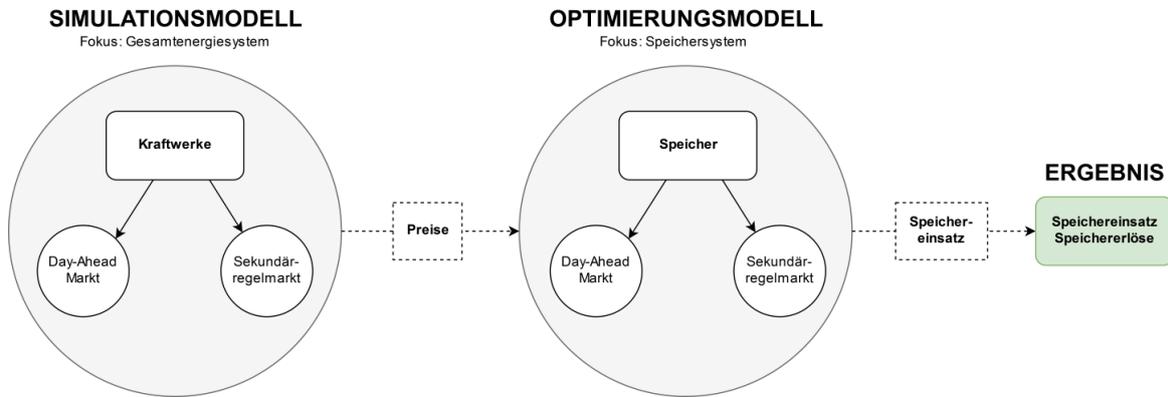


Abbildung 40: Kopplung des agentenbasierten Modells AMIRIS (links) und dem Optimierungsmodell zur Ermittlung der Speichererlöse (rechts)

Das Optimierungsmodell ist als Mixed-Integer-Programming (MIP) Modell in GAMS implementiert. Im Gegensatz zum Simulationsmodell AMIRIS, welches eine Systemperspektive verfolgt, liegt der Fokus in diesem Modell auf dem betriebswirtschaftlichen Einsatz eines einzelnen Batteriespeichers und die damit verbundenen Erlösmöglichkeiten. Der Speicher ist für den Handel auf dem Day-Ahead und als dem SRL-Markt präqualifiziert und versucht über den Beobachtungszeitraum von einem Jahr sein Betriebsergebnis unter perfekter Voraussicht zu maximieren. Die Funktion

$$Erlöse_{Gesamt} = \sum_{i=1}^{8760} Erlöse_{DA,i} + Erlöse_{SRL,i} \quad (11)$$

beschreibt die Maximierung der Gesamterlöse auf den beiden Märkten, welche der Speicherbetreiber versucht zu maximieren. Die Einnahmen aus dem Handel am Day-Ahead-Markt ergeben sich durch

$$Erlöse_{DA,i} = Preis_{DA,i} * (Energie_{DA-Verkauf,i} - Energie_{DA-Kauf,i}) \quad (12)$$

und werden in jeder Stunde berechnet. Analog dazu sind die Einnahmen am SRL-Markt durch

$$Erlöse_{SRL,i} = Erlöse_{SRL,Leistung,i} + Erlöse_{SRL,Arbeit,i} \quad (13)$$

bestimmt. Diese setzen sich aus den Einnahmen der Leistungsvorhaltung in positiver bzw. negativer Richtung

$$Erlöse_{SRL,Leistung,i} = \text{Leistungspreis}_{SRL,positiv,i} * \text{Leistung}_{SRL,positiv,i} + \text{Leistungspreis}_{SRL,negativ,i} * \text{Leistung}_{SRL,negativ,i} \quad (14)$$

sowie den Einnahmen aus der Arbeitserbringung beim Abruf von Regelenergie

$$Erlöse_{SRL,Arbeit,i} = \text{Arbeitspreis}_{SRL,positiv,i} * \text{Energie}_{SRL,positiv,i} + \text{Arbeitspreis}_{SRL,negativ,i} * \text{Energie}_{SRL,negativ,i} \quad (15)$$

zusammen.

Der modellierte Stromspeicher ist mit technischen Parametern ausgestattet, die ihn in seiner Leistungserbringung limitieren. Der Ladestand SoC darf zu keinem Zeitpunkt i den minimalen Ladestand SoC_{\min} unterschreiten bzw. den maximalen SoC_{\max} überschreiten. Demnach gilt

$$SoC_{\min} \leq SoC_i \leq SoC_{\max} \quad (16)$$

für den gesamten Zeitraum. Handlungen auf dem Day-Ahead-Markt bzw. dem SRL-Markt haben direkte Auswirkungen auf den Ladestand SoC_i . Die Formel

$$SoC_i = SoC_{i-1} - \text{Energie}_{DA-Verkauf,i} + \text{Energie}_{DA-Kauf,i} - \text{Energie}_{SRL,positiv,i} + \text{Energie}_{SRL,negativ,i} \quad (17)$$

zeigt die Aktualisierung des Ladestandes nach der Arbeitserbringung auf den jeweiligen Märkten. Zu Beginn der Simulation ist die Batterie immer halb geladen, um am Beginn der Simulation nicht ausschließlich in eine Richtung operieren zu können. Zusätzlich gilt eine Rampenbedingung

$$\forall \text{Energie}_i \leq \frac{SoC_{\max}}{CRate} \quad (18)$$

nach der alle Energieflüsse, also alle Käufe oder Verkäufe auf beiden Märkten, der maximalen Leistungsrate unterliegen. Die C-Rate gibt dabei den Lade- bzw. Entladestrom im Verhältnis zu seiner Kapazität an. Das bedeutet ein Speicher mit einer C-Rate von 1 ist in einer Stunde von leerem Zustand vollständig geladen bzw. kann 1 Stunde volle Leistung liefern, sofern dieser ursprünglich vollständig geladen war. Bei einer C-Rate von 10 wären dies folglich 10 Stunden für den Ladevorgang respektive 10 Stunden volle Leistungserbringung. Das bedeutet, je kleiner die CRate, desto höher die Leistung der Anlage. Batteriedegradation bzw. Selbstentladung wurde in diesem Modell nicht berücksichtigt. Eine binäre Nebenbedingung untersagt dem Speicher simultane Lade- und Entladevorgänge in einer Stunde i . Der Optimierungsalgorithmus versucht daher die beste Betriebsentscheidung in jeder Stunde zu finden, um das betriebswirtschaftliche Ergebnis im gesamten Versuchsjahr zu maximieren. Es gilt

$$\max \{ \text{Erlöse}_{\text{Gesamt}} | \text{Nebenbedingungen (16) – (18)} \} \quad (19)$$

wobei anfällige Steuern, Kosten für die Teilnahme an den beiden Märkten nicht Teil der Berechnung sind.

Zusätzlich liefert das Modell Ergebnisse zu den Vollladezyklen, welche die Auslastung der Batterie erkennen lassen, sowie die gehandelten Strommengen auf den beiden betrachteten Märkten. Die Beschreibung der Parametrisierung ist in Abschnitt 6.3 zu finden.

6.2.4 Kopplung der Modelle AMIRIS und SKIN

Um die Nachfrage aus der Nutzung von Batterien als stationärem Speicher bestimmen zu können werden die Ergebnisse AMIRIS im SKIN-Modell verwendet. Dazu werden Implementierung, Kalibrierung und Abstimmung der Modelle AMIRIS des DLR und SKIN aufeinander abgestimmt. Die Kalibrierung der Modelle basiert auf der gemeinsamen

Definition von Parametern der Schlüsseltechnologie, im vorliegenden Fall der Li-Ionen Batterien. Dabei wurde in Absprache im Projektkonsortium für die technischen Spezifikationen des Speichers die Round-trip-efficiency (RTE) in einem Bereich von 85% bis 90% variiert. Das E2P-Verhältnis, welches die Energie im Verhältnis zur Leistung beschreibt, wurde im Bereich 1 Stunde bis 10 Stunden angegeben. Dies entspricht dem Profil eines stationären Kurz- bis Mittelfristspeichers, welcher für den Einsatz auf den modellierten Märkten besonders geeignet sein soll.

Die Abstimmung der beiden Modelle erfolgt im Projekt über eine Softkopplung. Dabei wurden Ergebnisse aus dem Abschnitt 6.4 zu den Erlösen der Batteriebetreiber am Day-Ahead-Markt und am SRL-Markt aus dem Strommarktmodell AMIRIS an das Modell SKIN weitergegeben. Diese Größen sind im SKIN Modell als Eingangsparameter genutzt worden, um die volkswirtschaftlichen Potentiale der Hersteller zu simulieren. Die Kopplung der beiden Modelle verspricht die Berücksichtigung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, unter welchen sich die Schlüsseltechnologie am Markt durchsetzen muss.

6.3 Szenario

Die Berechnungen der RWTH Aachen für die Gesamtszenarien wurden für das Jahr 2050 durchgeführt. In diesem Zieljahr soll bereits eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems stattgefunden haben. Wie bereits im einführenden Abschnitt 6.1 dargestellt, können Batteriespeicher als Schlüsseltechnologien zum Gelingen der Energiewende beitragen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine aussichtsreiche Position mit verbundenen Erlösen auf den Strommärkten. Da potentielle Investitionen in diese Schlüsseltechnologien zeitnah erfolgen müssen, wurde die Bewertung der Erlöspotentiale für die nahe Zukunft 2030 berechnet. Die Modelle SKIN und AMIRIS werden daher eingesetzt, um die wirtschaftlichen Potentiale dieser Akteure zu beleuchten. In der Analyse werden die Erlöse der Batteriespeicherbetreiber daher unter den Annahmen des Energiewendeszenarios (EWS) aus Lutz et al. (2018) für das Jahr 2030 verwendet, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12: Installierte Leistungen für Kraftwerke und Speicher in Deutschland für das betrachtete Jahr 2030 aus Lutz et al. (2018)

	GW
Kernenergie	0
Braunkohle	9
Steinkohle	11
Erdgas	53
Sonstige Fossile	5
Speicher	8
Wind Onshore	58
Wind Offshore	15
Photovoltaic	73
Lauf- und Speicherwasser	6
Biomasse	6

Der Preis für eine Tonne emittiertes CO₂ in Höhe von 35 €/t CO₂ ist ebenfalls aus dem Szenario von Lutz et al. (2018) entnommen. Die Marktprämien für die Anlagen der erneuerbaren Energien sind nach dem aktuellen Rechtsrahmen als variabel angenommen. Demnach wird die Höhe der Prämie monatlich nach den Marktwerten der jeweiligen Technologie angepasst. Eine Übersicht über sämtliche Modelltechnische Annahmen, wie etwa Brennstoffpreise, spezifische Emissionen, Kraftwerksverfügbarkeiten und Speicherspezifikationen finden sich im Anhang für das Simulationsmodell AMIRIS in Tabelle 29 als auch für das Optimierungsmodell in Tabelle 30.

Wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, wird in AMIRIS kein Stromnetz modelliert. Somit sind Abregelungen von Erzeugungsanlagen nur wirtschaftlich und nicht durch das Netz bedingt. Häufigkeiten und Dauer von Maßnahmen zur Stabilisierung der Netzfrequenz werden deswegen nicht modellendogen simuliert, sondern sind exogene Vorgaben. Aufgrund der Unsicherheiten in der Entwicklung dieser Maßnahmen bis zum Jahr 2030 wurden Sensitivitätsanalysen zu kritischen Parametern durchgeführt. Dabei werden die Werte zu aktuellen Bedarfen an positiver und negativer Regelleistung und -energie um sowohl 17,5% reduziert als auch um denselben Betrag erhöht. Auf diese Weise soll sich der Einfluss der Nachfrage auf die Preise am Regelleistungsmarkt und schließlich auf die Erlöse von Batteriespeichern besser abschätzen lassen.

Der Anteil der Leistung eines Kraftwerkes oder einer EE-Erzeugungsanlage, der für die Teilnahme am Sekundärregelenergiemarkt bereitgestellt wird, ist in Tabelle 13 dargestellt. Aus der Studie Hasche et al. (2016) wurden die Zahlen zu den präqualifizierten Leistungen pro Technologie übernommen und in drei Szenarien „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ der Anteil dieser Leistungen abgeschätzt, der tatsächlich am Regelenergiemarkt teilnimmt. Die Werte für Wind/PV/Biomasse sind angelehnt an die Abschätzung von Spieker et al. (2016).

Tabelle 13: Anteil der bereitgestellten Leistungen zur Teilnahme am SRL-Markt in Bezug zu der gesamten installierten Leistung der Technologie, aufgeschlüsselt nach den Szenarien „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“

Technologie	Positive SRL [%]			Negative SRL [%]		
	Niedrig	Mittel	Hoch	Niedrig	Mittel	Hoch
Steinkohle	1.1%	2.1%	3.2%	1.1%	2.1%	3.2%
Braunkohle	0.5%	0.9%	1.4%	0.5%	0.9%	1.4%
Gas	3.4%	6.8%	10.2%	3.1%	6.1%	9.2%
Öl	3.9%	7.8%	11.7%	2.2%	4.3%	6.5%
Wind/PV/Biomasse	5%	5%	5%	5%	5%	5%

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Simulation der Preise

Die Ergebnisse des Simulationsmodells AMIRIS beschreiben das Zusammenspiel der Akteure am deutschen Strommarkt und setzen sich aus unterschiedlichen Modellausgabeparametern zusammen. Im Fokus stehen in den vorliegenden Untersuchungen die Börsenpreise am Day-

Ahead-Markt sowie die Preise am SRL-Markt. Zusätzlich kann auch bspw. die Höhe der Systemkosten aus dem Betrieb des Stromsystems entnommen werden oder die Einspeiseplanung der Kraftwerke abgelesen werden. Nachdem die Evaluierung der Erlöspotentiale für stationäre Speicher im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchung steht, fokussiert sich dieses Kapitel auf die Auswertung der Ergebnisse zu den simulierten Preisen.

6.4.1.1 Day-Ahead Preise

Zuerst werden die simulierten Preise am Day-Ahead-Markt beschrieben. Tabelle 14 listet die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Preise am Großhandelsmarkt, welche sich nicht signifikant in den jeweiligen Szenarien „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ unterscheiden. Die unterschiedlichen Angebotsmengen am SRL-Markt zeigen keine Rückkopplung auf die Day-Ahead Börsenpreise. Die SRL-Nachfrage wurde mit 1.700 MW unverändert zu gemittelten historischen Werten am SRL-Markt gehalten.

Tabelle 14: Day-Ahead Preise bei unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	63,05 €	63,08 €	63,04 €
Standardabweichung	19,40 €	19,41 €	19,40 €

Abbildung 41 zeigt die sortierten Day-Ahead Preise im Szenario „Mittel“ für das gesamte Jahr 2030. Es sind 560 Stunden zu erkennen, in denen die Erneuerbaren Energien die gesamte Last decken können und der Börsenpreis dadurch 0 € beträgt. In einzelnen Stunden des Jahres steigt der Day-Ahead Preis aufgrund großer Nachfrage und geringer Erzeugungsleistung der Erneuerbaren Energien auf über 100 € an.

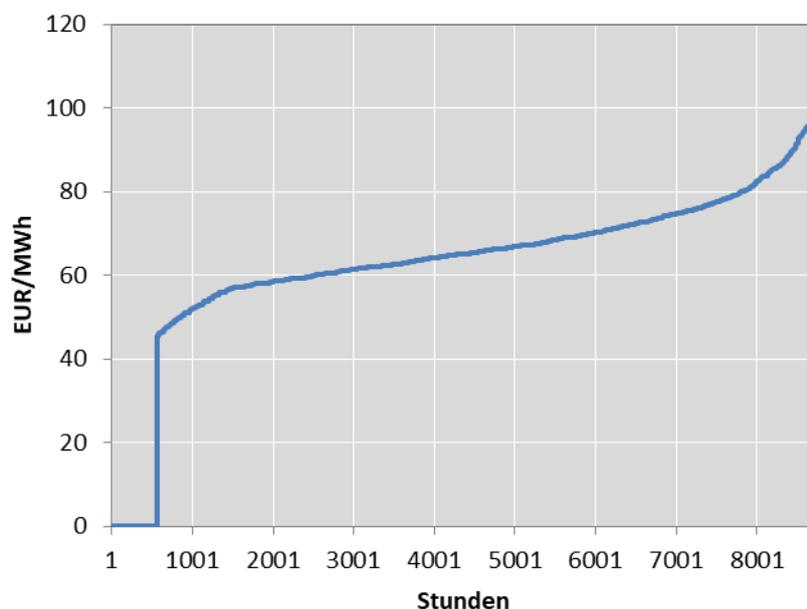


Abbildung 41: Sortierte Day-Ahead Preise im Szenario „Mittel“ (siehe Tabelle 14).

Die Preise am Day-Ahead-Markt setzen sich aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Technologien in der Merit Order, wie auch bereits in 6.2.2 beschrieben, zusammen. Abbildung 42 zeigt den Einsatz der verschiedenen Technologien über den gesamten Simulationszeitraum. Es ist dabei deutlich die Variabilität der Erneuerbaren, PV in Violett und Wind in Braun (Offshore) bzw. Rosa (Onshore), zu sehen. Ölkraftwerke sind zu keinem Zeitpunkt am Day-Ahead-Markt aktiv und werden nicht abgerufen. Spitzenlasten werden mit der Hilfe von schnell regelbaren Gaskraftwerken gedeckt.

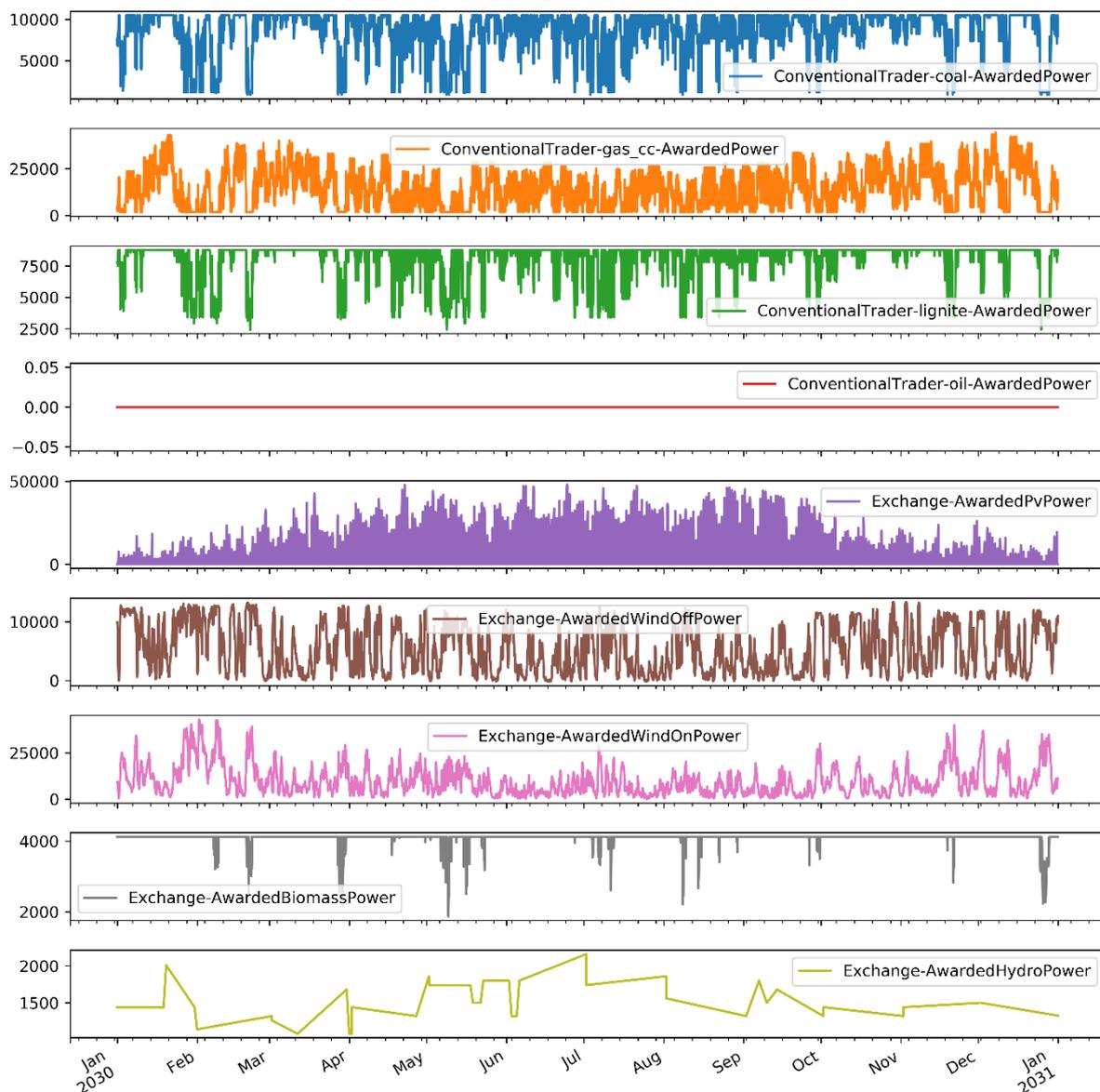


Abbildung 42: Erzeugung der unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien in MW für den gesamten Simulationszeitraum im Szenario „Mittel“ (siehe Tabelle 14).

Wenn der SRL-Markt ausschließlich von konventionellen Kraftwerken bedient werden soll, müssen diese mehrere Kapazitäten für die Regelleistungserbringung vorhalten und können diese nicht am Day-Ahead anbieten. Gleichzeitig vermarkten die Erneuerbaren mehr Kapazitäten am Day-Ahead-Markt. Diese Auswirkungen sind in Tabelle 15 festgehalten. Auch hier zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Szenarien „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“.

Im Vergleich zu den Ergebnissen in Tabelle 14 sind im Mittel jedoch etwas niedrigere Preise mit leicht höheren Standardabweichungen zu beobachten.

Tabelle 15: Day-Ahead Preise bei ausschließlicher Erbringung durch konventionelle Kraftwerke in den drei verschiedenen hohen Leistungsvorhaltungen.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	62,97 €	62,97 €	62,97 €
Standardabweichung	19,49 €	19,50 €	19,49 €

Erhöhte SRL-Nachfrage

Nachdem der zukünftige Bedarf an SRL exogen vorgegeben werden muss (siehe 6.2.2), wird in zusätzlichen Rechnungen die Nachfrage auf 2.000 MW erhöht und die daraus folgenden Auswirkungen auf den Day-Ahead Preis beschrieben. Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse, welche wie erwartet im Mittel etwas höher ausfallen als im Referenzfall in Tabelle 14. Auch hier zeigen sich jedoch zwischen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ keine nennenswerten Unterschiede.

Tabelle 16: Day-Ahead Preise bei unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung und **erhöhter** SRL-Nachfrage.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	63,10 €	63,13 €	63,08 €
Standardabweichung	19,39 €	19,42 €	19,39 €

Ausschließliche Deckung der erhöhten SRL-Nachfrage durch konventionelle Kraftwerke ändern die Preise wie in Tabelle 17 angegeben. Dabei ist erneut der niedrigere mittlere Preis bei leicht höherer Standardabweichung zu beobachten.

Tabelle 17: Day-Ahead Preise bei ausschließlicher Erbringung durch konventionelle Kraftwerke in den drei verschiedenen hohen Leistungsvorhaltungen und **erhöhter** SRL-Nachfrage.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	62,98 €	62,98 €	62,98 €
Standardabweichung	19,50 €	19,51 €	19,49 €

Verringerte SRL-Nachfrage

Für den Fall von sinkendem Bedarf für vorgehaltene SRL wird die Nachfrage auf 1.400 MW reduziert. Die Auswirkungen auf den Börsenpreis sind in Tabelle 18 beschrieben. Die simulierten Preise sind im Vergleich zu den Rechnungen mit mittlerer Nachfrage (Tabelle 14) und hoher Nachfrage (Tabelle 16) am geringsten. Dies ist durch die erhöhte Angebotsleistung am Day-Ahead-Markt in dieser Rechnung zu erklären, die absoluten Preisunterschiede sind jedoch äußerst gering.

Tabelle 18: Day-Ahead Preise bei unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung und **verringertes** SRL-Nachfrage.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	63,01 €	63,03 €	63,00 €
Standardabweichung	19,42 €	19,42 €	19,42 €

Beim Blick auf den Fall mit ausschließlicher Erbringung durch konventionelle Kraftwerke, siehe Tabelle 19, sind ebenfalls die niedrigsten Preise im Vergleich zu Tabelle 15 und Tabelle 17 zu finden. Auch hier sind die Preisunterschiede jedoch nur marginal.

Tabelle 19: Day-Ahead Preise bei ausschließlicher Erbringung durch konventionelle Kraftwerke in den drei verschiedenen hohen Leistungsvorhaltungen und **verringertes** SRL-Nachfrage.

Leistungsvorhaltung	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittelwert	62,95 €	62,96 €	62,95 €
Standardabweichung	19,49 €	19,49 €	19,49 €

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die simulierten Day-Ahead Preise weder stark auf die Änderung der Nachfragemenge am SRL-Markt noch auf die Änderung der Angebotsmenge am SRL-Markt reagieren. Minimale Unterschiede sind durch leichte Verschiebungen von Kraftwerkskapazitäten zwischen den beiden Märkten zu identifizieren. Es ist jedoch kein signifikanter Umbruch auszumachen. Dies bestätigt die Annahme, dass der Day-Ahead-Markt von Änderungen am SRL-Markt hinsichtlich der Nachfrage oder des Angebots weitgehend unbeeinflusst ist.

6.4.1.2 SRL-Preise

Im nächsten Schritt werden die Preise am SRL-Markt näher beschrieben. Abbildung 43 zeigt die mengengewichteten monatlichen Durchschnittspreise für positive Leistungsvorhaltung am SRL-Markt. Es zeigt sich, wie bereits aus den Ergebnissen zu den Day-Ahead Preisen bekannt, ein geringer Unterschied zwischen den verschiedenen Szenarien „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ was die angebotene Menge an konventioneller Erzeugungsleistung am SRL-Markt betrifft.

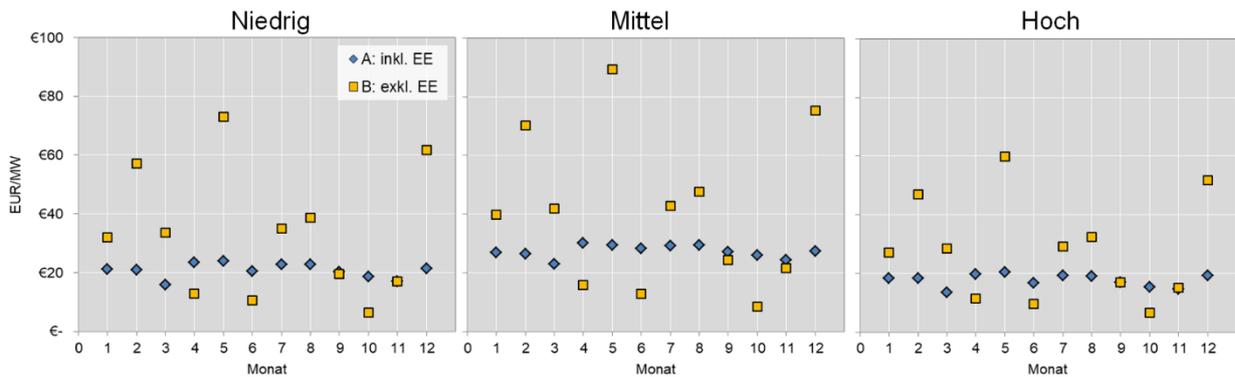


Abbildung 43: Durchschnittliche monatliche, mengengewichtete Leistungspreise für **positive** SRL-Leistung bei mittlerer Nachfrage und den drei Varianten mit unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung.

Einen deutlichen Unterschied hingegen macht die Teilnahme der Erneuerbaren Energien am SRL-Markt (Variante A in Abbildung 43). Der Einsatz zur Regelleistungserbringung dieser Technologien führt zu einem stark preisglättenden Effekt gegenüber der ausschließlichen Erfüllung durch konventionelle Kraftwerke. Dies kann erklärt werden durch die höheren Grenzkosten, die durch den Betrieb von fossilen Kraftwerken entstehen. Wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, werden die Opportunitätskosten zur Berechnung der Gebote herangezogen und führen dazu zu höheren Preisen.

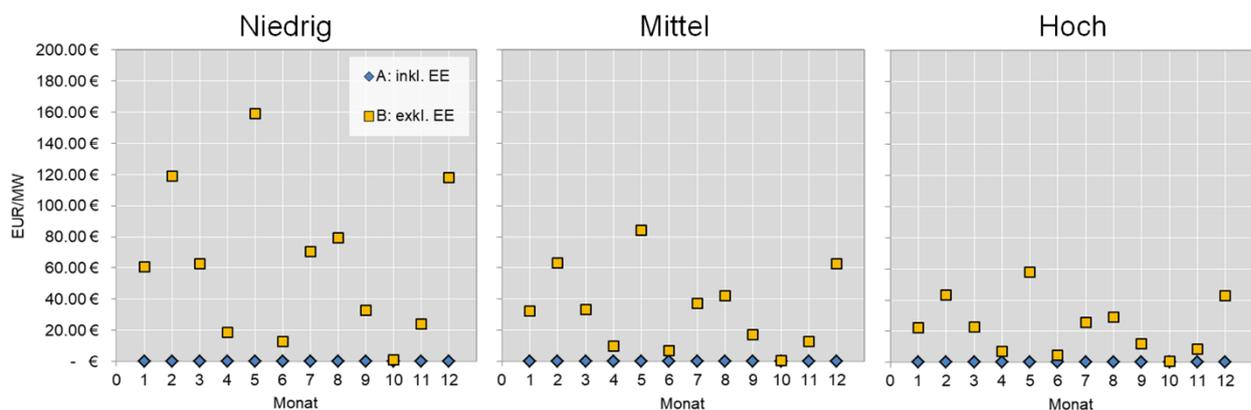


Abbildung 44: Durchschnittliche monatliche, mengengewichtete Leistungspreise für **negative** SRL-Leistung bei mittlerer Nachfrage und den drei Varianten mit unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung.

Die durchschnittlichen mengengewichteten Preise für die negative Leistungsvorhaltung, also die Bereitschaft Kraftwerke abzuregeln, sind in Abbildung 44 beschrieben. Hier ist der Unterschied zwischen der Teilnahme von EE am SRL-Markt (Variante A) und der ausschließlichen Erbringung von SRL durch konventionelle Kraftwerke (Variante B) deutlicher. Die Leistungspreise sind im ersteren Fall beinahe 0 Euro/MW wohingegen im letzten Fall die Leistungspreise bis zu 160 €/MW im Schnitt erreichen (Angebot „Niedrig“). Das bedeutet, dass in diesem Fall auf besonders teure Kraftwerke zurückgegriffen werden muss, um den Bedarf an SRL zu decken. Je höher das Angebot an gebotener konventioneller Leistung für den SRL-Markt („Niedrig“ vs. „Mittel“ vs. „Hoch“), desto geringer sind die Durchschnittspreise. Das Muster der Preise ist aufgrund der exogen vorgegebenen Nachfragemenge sowie einzelner

Erzeugungszeitreihen (siehe Abschnitt 6.2.2) ähnlich, einzig das Niveau ist deutlich unterschiedlich.

Erhöhte SRL-Nachfrage

Im Fall von erhöhter SRL-Nachfrage (2.000 MW) sind abweichende Ergebnisse zu erwarten. Abbildung 45 zeigt die monatlichen Durchschnittspreise für die positive Leistungsvorhaltung. Wie bereits schon bei den Day-Ahead-Preisen in 6.4.1.1 beobachtet, sind im Vergleich zur mittleren Nachfrage (Abbildung 43) hier grundsätzlich leicht höhere Preise zu erkennen.

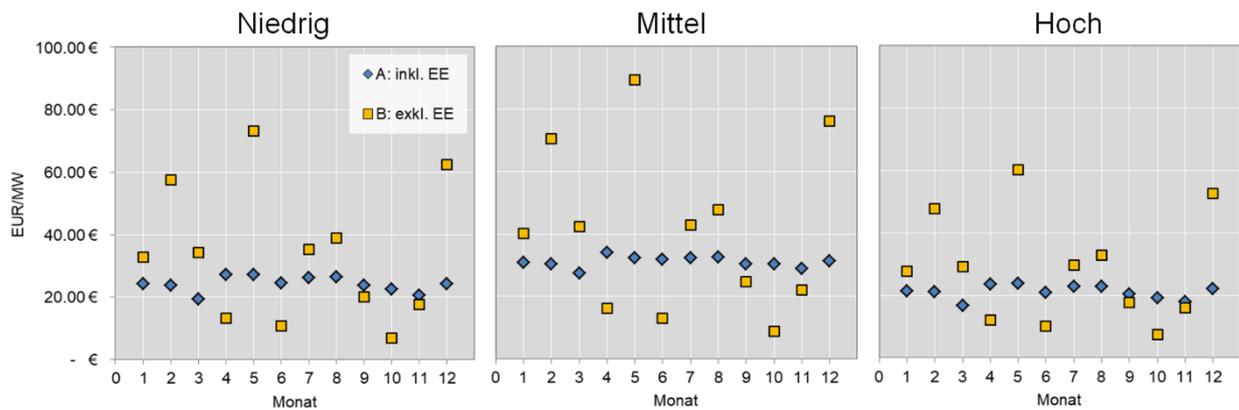


Abbildung 45: Durchschnittliche monatliche, mengengewichtete Leistungspreise für positive SRL-Leistung bei **erhöhter** Nachfrage und den drei Varianten mit unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung.

Bei Betrachtung der negativen Preise in Abbildung 46 sind ähnliche Ergebnisse zu sehen wie bereits in den Rechnungen zur mittleren Nachfrage (siehe Abbildung 44). Der Einfluss der höheren Nachfrage hat nur geringe Auswirkungen auf den mengengewichteten monatlichen Durchschnittspreis. Die angebotene Menge in den Variationen „Niedrig“ bis „Hoch“ wiederum hat einen deutlich preissenkenden Einfluss.

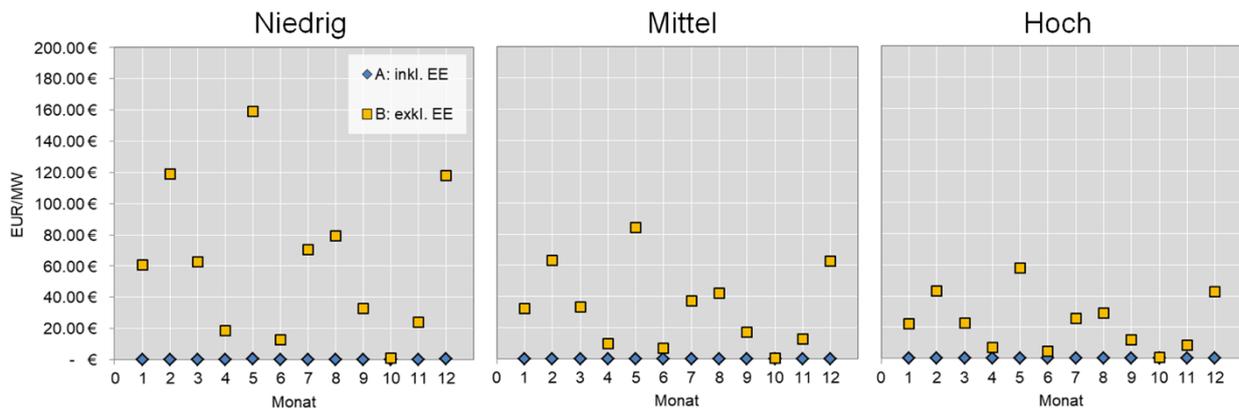


Abbildung 46: Durchschnittliche monatliche, mengengewichtete Leistungspreise für negative SRL-Leistung bei **erhöhter** Nachfrage und den drei Varianten mit unterschiedlich hoher Leistungsvorhaltung.

Verringerte SRL-Nachfrage

Die Ergebnisse zur verringerten SRL-Nachfrage weichen kaum von den hier bereits präsentierten ab und werden deswegen nicht näher beschrieben. Zusammenfassend ist anzuführen, dass in den Szenarien von erhöhter SRL-Nachfrage oder verringertem SRL-

Angebot die Häufigkeit von Stunden mit potentiell ungedeckter SRL-Last zunimmt. Dies würde jedoch in der Realität nicht zum Tragen kommen, da genug Kapazitäten für die Teilnahme am SRL-Markt präqualifiziert sind (Hasche et al. 2016). Es ist davon auszugehen, dass bei drohenden ungedeckten Stunden am SRL-Markt zusätzliche Kraftwerke einspringen würden. Wie bereits in Tabelle 13 angeführt, wurden nur ein Bruchteil der verfügbaren Kraftwerke für die aktive Teilnahme am SRL-Markt im Modell angesetzt. In weiterführenden Arbeiten könnten diese Rückkopplungen noch mehr im Detail untersucht werden, um diesen Effekt und die Wirkung auf die Preise besser zu verstehen. Für die folgenden Berechnungen zu den Batterieerlöspotentialen wurde von mittlerer SRL-Nachfrage und mittlerem SRL-Angebot ausgegangen.

6.4.2 Simulation der Erlöspotentiale

Die simulierten Preise im vorherigen Abschnitt stellen die Situation am Day-Ahead-Markt und am SRL-Markt dar. Der folgende Abschnitt wendet das in 6.2.3 vorgestellte Optimierungsmodell, welches einen Batteriespeicherbetreiber abbildet, mit den simulierten Preisdaten an. Zuvor wird eine Berechnung für ein historisches Referenzjahr 2016 berechnet. Die Erlöse des Speicherbetreibers in EUR/MWh_{inst} sind in Tabelle 20 beschrieben. Die technischen Parameter wurden hinsichtlich des E2P-Verhältnisses von 1 Stunde (sehr kurzfristige Leistungsbringung) bis 10 Stunden (mittelfristige Leistungsbringung) variiert. Die Erlöse steigen stark an mit sinkendem E2P-Verhältnis und sind mehr als fünfmal so groß, wenn Minimum und Maximum verglichen werden. Dieses Ergebnis wird erklärt durch die Möglichkeit des Speichers mit niedrigem E2P vorhandene Preisunterschiede rascher und somit profitabler auszunutzen zu können. Eine Variation der Gesamteffizienz zwischen 85% und 90% zeigt eine Erhöhung der Erlöse, welche jedoch nicht so stark ausfällt wie eine Änderung des E2P-Verhältnisses.

Tabelle 20: Erlöse des Batteriespeicherbetreibers in EUR/MWh_{inst.} im historischen Referenzszenario.

		Gesamteffizienz		
		85%	87,50%	90%
	1	26,591 €	27,076 €	27,578 €
	2	15,975 €	16,408 €	16,859 €
	3	11,889 €	12,278 €	12,684 €
E2P	4	9,635 €	9,985 €	10,352 €
	5	8,152 €	8,470 €	8,802 €
	7.5	5,917 €	6,167 €	6,427 €
	10	4,658 €	4,860 €	5,071 €

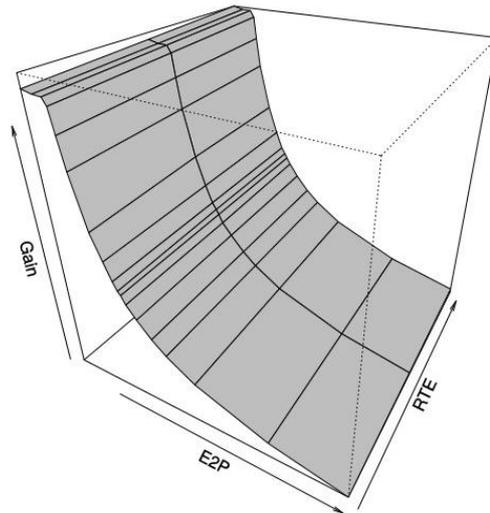


Abbildung 47: Visualisierung der Änderung der jährlichen Erlöse in EUR/MWh_{inst.} eines Speichers unter Veränderung der E2P-Rate und der Gesamteffizienz.

In Abbildung 47 ist der Zusammenhang der beiden Größen und der jährlichen Erlöse dargestellt. Der steigende Anstieg bei niedrigem E2P-Verhältnis ist deutlich zu erkennen.

Tabelle 21: Erlöse des Batteriespeicherbetreibers in EUR/MWh_{inst.} im Szenario bei mittlerer Nachfrage und mittlerem Angebot.

Gesamtladeeffizienz = 85%			
	A: inkl. EE	B: exkl. EE	
E2P	1	10,882 €	11,692 €
	2	8,370 €	8,815 €
	3	7,307 €	7,601 €
	4	6,620 €	6,823 €
	5	6,078 €	6,227 €
	7.5	4,970 €	5,047 €
	10	4,120 €	4,171 €

Im Szenario für 2030 bei mittlerer SRL-Nachfrage und mittlerer Leistungsvorhaltung durch konventionelle Kraftwerke (siehe Abbildung 41, Abbildung 43 und Abbildung 44) werden die Erlöse wie in Tabelle 21 erzielt. Die Gesamteffizienz wurde aufgrund der geringen Auswirkung auf 85% fixiert, während das E2P-Verhältnis wieder variiert wurde. Auch hier zeigt sich der Zuwachs an Erlösen, wenn der Speicher für kurzfristigere Leistungsbringung ausgelegt ist. Zusätzlich wird unterschieden zwischen der Variation A, bei welcher Erneuerbare Energien teilnehmen an der SRL-Erbringung, und Variation B, bei welcher ausschließlich konventionelle Kraftwerke die Frequenzhaltung erfüllen. Es zeigt sich, dass in letzterem Fall die Erlöse etwas

höher ausfallen. Dies ist auf die größeren Preisfluktuationen für diese Rechnung zurückzuführen, siehe auch Abbildung 43.

Im Vergleich mit den historischen Preisen werden die deutlich geringen Erlöse im zukünftigen Szenario ersichtlich. Abbildung 48 zeigt die Unterschiede in den jährlichen Erlösen. Je kleiner das E2P-Verhältnis desto größer werden auch die Differenzen. Diese sind auf die andere Gestaltung der Preiskurven zurückzuführen, welche ein leistungsfähiger Speicher noch besser ausnutzen kann. Leistungsfähigere Speicher sind jedoch auch üblicherweise deutlich teurer in der Installation.

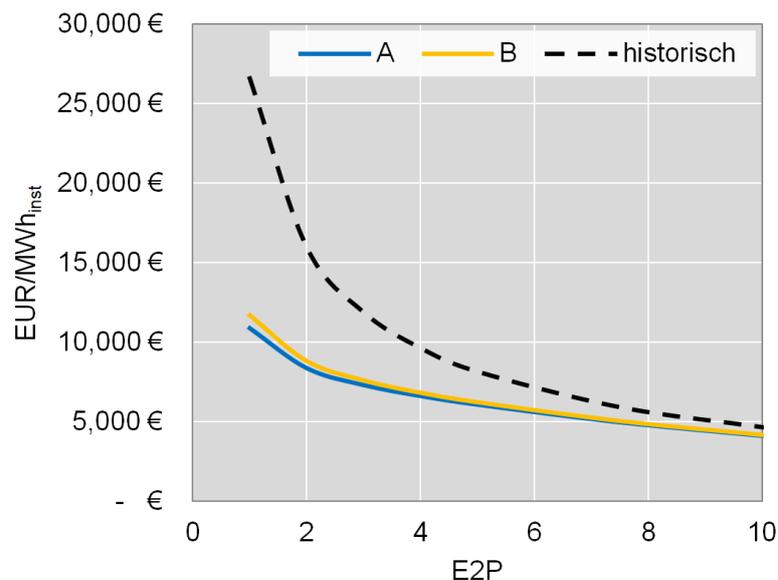


Abbildung 48: Jährliche Erlöse pro EUR/MWh_{inst.} eines Batteriespeichers im dargestellten Szenario sowie im Referenzszenario

Die Erlösmöglichkeiten zeigen ein herausforderndes Bild im beschriebenen zukünftigen Szenario. Die Ergebnisse der Berechnungen deuten im Vergleich zu historischen Referenzdaten nicht auf steigende Erlöse hin. Es bleiben aufgrund des Simulationsansatzes Unsicherheiten bezüglich der Ergebnisse offen. Diese werden im folgenden Abschnitt beleuchtet und diskutiert.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Die hier präsentierten Rechnungen sind teilweise mit Vereinfachungen und Annahmen durchgeführt worden. Folgende Punkte sollten bei der Interpretation der Ergebnisse und den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen bedacht werden:

Die vorgestellte Analyse berücksichtigt für die Erbringung von Flexibilität am SRL-Markt nicht alle Technologien, sondern verwendet nur jene in Tabelle 13 aufgelisteten Kraftwerkstypen. Beispielsweise werden Demand Side Management (DSM) bzw. abschaltbare Lasten von Großverbrauchern und der Industrie nicht modelliert. Ebenso fehlen Flexibilitäten durch Power-to-X (P2X) oder durch eine hohe Durchdringung von Elektrofahrzeugen. Diese Technologien erweitern die theoretisch verfügbare Kapazität zur Frequenzstabilisierung und könnten dadurch einen Einfluss auf die Leistungspreise haben. Je nach Kosten und

Durchdringungsrate der Teilnahme dieser Flexibilität kann der durchschnittliche Leistungspreis beeinflusst werden. Dies setzt jedoch entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen voraus, die den Marktzugang dieser innovativen Kraftwerke erst möglich machen.

Aufgrund des nachgelagerten Modellaufbaus hat die Leistungsbereitstellung des modellierten Batteriespeichers keinen Einfluss auf die Deckung der erforderlichen Menge zur Frequenzstabilisierung. Nachdem der Speicher jedoch keine systemrelevante Größe besitzt, wird keine signifikante Änderung der Leistungspreise erwartet. Es ist anzunehmen, dass die Kapazitätskosten des Speichers den aktuellen Börsenpreisen entsprechen, welche wiederum den Kosten der (fossilen) Erzeuger entsprechen. Daher wird der Einfluss des einzelnen betrachteten Batteriespeicherakteurs als gering auf die Änderung der Leistungspreise eingeschätzt.

Da der zukünftige Bedarf an Regelenergie nur sehr schwer abzuschätzen ist, wurden mehrere Variationen der nachgefragten vorgehaltenen Leistung für Regelenergie angenommen. Dabei wurde jedoch ausschließlich die Menge der Leistung, sowohl positiv als auch negativ, jedoch nicht die Abrufmengen der tatsächlich nachgefragten Energie geändert. Diese Mengen sind ebenso äußerst schwer zu prognostizieren, da diese fundamental kaum modellierbar sind. Daher wurden in dieser Untersuchung historische Abrufmengen für die Analyse herangezogen.

Der Batteriespeicher im vorgestellten Versuchsaufbau hat, wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, Zugang zum Day-Ahead-Markt und dem SRL-Markt. Batteriespeicher sind jedoch aufgrund ihrer sehr schnellen Reaktionszeit grundsätzlich auch geeignet für den Einsatz auf kurzfristigen Märkten wie dem Intraday- oder dem Primärregelmarkt (PRL) (Denholm et al. 2010). Diese sekundlichen und minütlichen Leistungsänderungen lassen sich derzeit jedoch nicht mit AMIRIS, welches wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben auf stündlicher Basis rechnet, abbilden. Eine Aggregation der Zeiteinheiten auf stündliche Werte ist wenig aussagekräftig und nicht zielführend. Zusätzlich müsste auf ein Übertragungsnetzmodell zurückgegriffen werden, um den Bedarf an Primärregelenergie fundamental modellieren zu können. Das Fehlen potentiell zusätzlicher Einnahmequellen wie etwa am PRL oder Intraday-Markt könnte die Situation zugunsten der Speicherbetreiber verbessern.

Die Optimierungsberechnung des Speichers erfolgt unter perfekter Voraussicht. Das bedeutet, dass der Algorithmus, welcher die Betriebsstrategie bestimmt, eine vollumfängliche Informationslage vorliegt, welche in diesem Maß in der Realität nicht gegeben ist. Daher kann der Speicher mit Marktpreisen kalkulieren, die später auch exakt so eintreten. Dieser Umstand ist in der Realität klarerweise nicht gegeben und die Ergebnisse aus den Erlösmöglichkeiten des Speicherbetreibers sind daher als obere Grenze zu verstehen und werden sehr wahrscheinlich unter den ausgewiesenen Werten liegen.

Zuletzt soll die Nichtbetrachtung eventuell vorhandener Konkurrenz unter den Flexibilitätsoptionen, welche zu Kannibalisierungseffekten führen kann, erwähnt werden. Eine Europäisierung der Strommärkte könnte ebenfalls zu mehr Konkurrenz und höherem Druck auf einzelne Akteure auf den Märkten führen und folgend die Erlösmöglichkeiten einzelner reduzieren.

6.6 Schlussfolgerungen

Systemdienstleistungen, wie beispielsweise die Erbringung von Sekundärregelleistung, sind neben dem Arbitrage-Handel am Day-Ahead-Markt ein mögliches Einsatzgebiet für Batteriespeicher. In der hier präsentierten Analyse wurden die Erlösmöglichkeiten eines Batteriespeicherbetreibers modelliert. Dazu wurde in einem agenten-basierten Strommarktmodell der deutsche Sekundärregelmarkt abgebildet. Dieser fundamentale Modellierungsansatz war notwendig, da aus historischen Daten keine belastbaren Korrelationen zu finden waren, was die Sekundärregelmärkte betrifft. Die Gebotslegung basiert auf der Theorie der Opportunitätskosten hinsichtlich der potentiellen Verdienstmöglichkeiten auf dem Day-Ahead-Markt. In einem Szenario für 2030 wurden die Preise in verschiedenen Subszenerarien bei unterschiedlichem Angebot und Nachfrage für Sekundärregelleistung berechnet. Die modellierten Preise wurden mit der Hilfe eines Optimierungsmodells hinsichtlich der wirtschaftlichen Erlöspotentiale eines einzelnen Batteriespeichers ausgewertet. Trotz vorteilhafter Modellierungsannahmen für den Batteriespeicherbetreiber (z.B. perfekte Voraussicht) zeigen die Ergebnisse grundsätzlich ein geringes Potential vor allem im Vergleich zu historischen Ergebnissen. Die Regelmärkte sind in jüngster Vergangenheit einigen strukturellen Änderungen (siehe Änderungen der Ausschreibungsdauer, Präqualifikationsanforderungen, Bezuschlagungsmechanismen, etc.) unterworfen. Es bleibt zu beobachten, wie die kommenden Anpassungen der Rahmenbedingungen die Teilnahme von Batteriespeichern an den Regelmärkten beeinflussen werden.

7 Kalibrierung zum Innovationssystem Lithium-Batterien

7.1 Charakterisierung nationaler Akteure

7.1.1 Identifizierung von Akteuren, Datenquellen

Das im Projekt weiterentwickelte SKIN-Modell soll die Akteure des nationalen Innovationssystems Lithium-Batterien abbilden. Um ein kalibriertes Modell zu erhalten, wurden Informationen über die abzubildenden Akteure benötigt. Daher ging der Kalibrierung eine detaillierte empirische Analyse der Akteurslandschaft voraus. Gemäß der im Vorhaben definierten Ziele wurde die Analyse auf in Deutschland ansässige bzw. tätige Akteure beschränkt. Zudem wurden nur juristische Personen, also Körperschaften, etwa im Handels- oder Vereinsregister eingetragene Gesellschaften oder Vereine, betrachtet. Eine Analyse von einzelnen Individuen war nicht notwendig, da das SKIN-Modell keine Individuen, sondern Firmen und Institute abbildet. Zentrales Element der Akteursanalyse bildete eine Tabelle, in der sämtliche im Bereich Lithium-Batterien forschend oder innovierend tätigen Akteure namentlich genannt sind und ihre Daten und Eigenschaften zusammengetragen wurden.

Die Akteure sind in der Regel entweder dem Bereich Wirtschaft oder dem Bereich Forschung zuzuordnen: es handelt sich also im ersten Fall i.d.R. um profitorientierte Unternehmen, im zweiten meist um auf öffentliche Drittmittel angewiesene Forschungseinrichtungen wie außeruniversitäre Forschungsinstitute – etwa aus der Fraunhofer-Gesellschaft oder der Helmholtz-Gemeinschaft – sowie Universitäten und Hochschulen.

Die Akteurstabelle wurde aus vielen unterschiedlichen Datenquellen gespeist, um entweder Akteure zu identifizieren oder Informationen über sie zu erlangen. Zu nennen sind v.a.:

- Mitgliederlisten von Verbänden: KLiB ([Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien](#)), BVES ([Bundesverband Energiespeicher](#))
- Patentdatenbank [PATSTAT](#) des Europäischen Patentamts (EPO)
- [Förderprojektdatenbank „Batterieforum Deutschland“](#) des KLiB (gespeist aus dem Förderkatalog des Bundes) mit von der deutschen Bundesregierung geförderten Projekten
- [Förderprojektdatenbank CORDIS](#) mit durch die Europäische Union geförderten Projekten
- Ausstellerlisten von Messen: IRES ([International Renewable Energy Storage Conference](#)), EES ([electrical energy storage](#))

Aus den Patent- und Projektdaten wurden die für das Projekt interessanten Daten über die einzelnen Akteure extrahiert und als Spalten in die Akteurstabelle aufgenommen, etwa die Anzahl angemeldeter Patente im Bereich Lithium-Batterien und insgesamt, die Anzahl durchgeführter Projekte, durchschnittliche Anzahl Projektpartner etc. Die übrigen Datenquellen dienten lediglich der Identifikation von Akteuren, um ein vollständigeres Bild des Innovationssystems zu erlangen und bspw. auch Akteure zu berücksichtigen, die keine Patente anmelden und nicht in öffentlich finanzierten Projekten mitwirken. Auch diese Akteure können Produkte entwickeln und somit ebenfalls innovativ sein.

Neben den bereits beschriebenen Daten wurde die Akteurstabelle mit Unternehmensdaten aus der umfangreichen Datenbank Orbis (<https://orbis.bvdinfo.com/>) vom Anbieter Bureau van Dijk angereichert, in der sich jeder Unternehmensakteur identifizieren ließ, was aufwändig von Hand überprüft wurde. Die Forschungsakteure sind nur zum Teil in Orbis enthalten und deren Daten sehr lückenhaft, allerdings auch weniger relevant. Bei den Daten von Orbis handelt es sich hauptsächlich um Finanzdaten der Unternehmen, wie z.B. Umsatz und Gewinn, aber auch Anzahl der Mitarbeiter, Tätigkeitsfelder und in manchen Fällen auch detailliertere Daten wie die Höhe der Ausgaben für Forschung & Entwicklung.

Die Akteurstabelle wurde mehrfach aufwändig manuell geprüft. Bspw. mussten manche Akteure entfernt oder verändert werden, etwa weil sie nicht (oder nicht mehr) im Bereich Lithium-Batterien tätig sind, weil sie nicht mehr existieren, sich umbenannt haben, keine in Deutschland ansässige Firma sind etc. Hierfür wurde u.a. ein manueller Abgleich jedes einzelnen Akteurs mit dem Handels- bzw. Vereinsregister vorgenommen. Ein besonders hartnäckiger Fall, der insbesondere bei Akteuren, die Patentdaten entnommen wurden, häufig auftrat, ist, dass es sich beim gelisteten Akteur nur um eine „Holding“ handelt: eine mehrere Tochterunternehmen verwaltende Konzernmutter oder auch eine Spezialfirma des Konzerns, deren Aufgabe nur die Verwaltung und Anmeldung von Patenten ist. In dem Fall ist die Holding gar nicht der tatsächlich forschende und produzierende Akteur und soll nicht ins SKIN-Modell eingehen. Über Firmendatenbanken wie NorthData (<https://www.northdata.de/>) oder Orbis (<https://orbis.bvdinfo.com/>) musste herausgefunden werden, für welches forschend tätige Unternehmen die Holding stellvertretend gehandelt haben könnte. Ansonsten würden die Daten der Holding, bspw. zur ausgeübten Tätigkeit, den Finanzwerten etc., die Akteurstabelle verfälschen.

7.1.2 Die Patentanalyse

Für die Patentanalyse wurde im Projekt auf Patentdaten aus der Datenbank [PATSTAT](#) des Europäischen Patentsamts (EPO) zurückgegriffen, die auf dem Stand Herbst 2016 erworben wurde. Die in Form von CSV-Dateien vorliegenden Daten wurden in eine am IQIB befindliche MySQL-Datenbank eingespeist, um sie durchsuchbar zu machen.

Bei der Patentdatenanalyse im Projekt InnoSEn waren zwei Patentsuchen notwendig: Zuerst eine Suche nach allen Patenten aus dem Bereich Lithium-Batterien, um die Akteure zu identifizieren und der Akteurstabelle hinzuzufügen. Dann eine Suche nach allen angemeldeten Patenten (ohne inhaltliche Filterung) aller in die Akteursliste aufgenommenen Akteure, auch wenn diese keine Treffer in der ersten Patentsuche waren.

Erste Patentsuche

Für die *erste Patentsuche* nach allen Patenten aus dem Bereich Lithium-Batterien wurde auf eine Suchstrategie von Frieske (2017) zurückgegriffen. Die Suchstrategie bestand aus der folgenden Logik:

Jahr der frühesten Patenteinreichung ≥ 1990 UND (
(Klassifizierungssymbol \in *Eindeutige Symbolliste*)

ODER

(Klassifizierungssymbol ∈ Uneindeutige Symbolliste UND Titel enthält "Lithium")
)

Es wurden also Patente ausgewählt, die ab 1990 eingereicht wurden (international, nicht aufs EPO beschränkt) und deren Klassifizierungssymbole mindestens einmal entweder in einer eindeutigen Liste (s. u.) enthalten sind oder mindestens einmal in einer uneindeutigen Liste (s. u.), wenn gleichzeitig der Titel des Patents den Begriff „Lithium“ enthält. Dabei wird auf die Klassifizierungssymbole CPC ([Cooperative Patent Classification](#)) und IPC ([International Patent Classification](#)) zurückgegriffen, die in PATSTAT enthalten sind und von Beamten der Patentbüros für jedes Patent festgelegt wurden, um Patente bestimmten Technologien, technischen Verfahren oder Themen zuzuordnen. Jedes Patent kann eine beliebige Anzahl CPC- und IPC-Symbole besitzen. Dabei ähneln sich CPC und IPC sehr; bei CPC handelt es sich im Wesentlichen um eine detailliertere Erweiterung der IPC, die vom EPO und dem USPTO (*United States Patent and Trademark Office*) gemeinsam entwickelt wurde. Die Original-Suchstrategie enthielt noch die Klassifizierungssymbole der [Derwent-DWPI-Systematik](#), auf die wir hier nicht zurückgreifen konnten und daher weglassen mussten. Da die Zahl der gefundenen Patente trotzdem in der Nähe der von Frieske (2017) berichteten liegt, gehen wir davon aus, dass unsere Patentsuche kaum darunter leidet.

Die eindeutige Symbolliste lautete:

- CPC beginnt mit ,H01M 10/052' („*Li-accumulators*“ in „*PROCESSES OR MEANS, e.g. BATTERIES, FOR THE DIRECT CONVERSION OF CHEMICAL INTO ELECTRICAL ENERGY*“)
- CPC = ,Y02E 60/122' („*Lithium-ion batteries*“ in „*REDUCTION OF GREENHOUSE GASES [GHG] EMISSION, RELATED TO ENERGY GENERATION, TRANSMISSION OR DISTRIBUTION*“)
- CPC = ,Y02T 10/7011' („*Lithium ion battery*“ in „*Road transport of goods or passengers*“)

Die uneindeutige Symbolliste lautete:

- CPC beginnt mit ,H01H' („*ELECTRIC SWITCHES; RELAYS; SELECTORS; EMERGENCY PROTECTIVE DEVICES*“)
- CPC beginnt mit ,H01L' („*SEMICONDUCTOR DEVICES; ELECTRIC SOLID STATE DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR*“)
- CPC beginnt mit ,H01M' („*PROCESSES OR MEANS, e.g. BATTERIES, FOR THE DIRECT CONVERSION OF CHEMICAL INTO ELECTRICAL ENERGY*“)
- CPC beginnt mit ,H02' („*GENERATION; CONVERSION OR DISTRIBUTION OF ELECTRIC POWER*“)
- CPC beginnt mit ,H04' („*ELECTRIC COMMUNICATION TECHNIQUE*“)
- CPC beginnt mit ,Y02E' („*REDUCTION OF GREENHOUSE GAS [GHG] EMISSIONS, RELATED TO ENERGY GENERATION, TRANSMISSION OR DISTRIBUTION*“)
- IPC beginnt mit ,B60K' („*Anordnung oder Einbau von Antriebseinheiten oder von Kraft- bzw. Drehmomentübertragungen in Fahrzeugen; ...*“)
- IPC beginnt mit ,B60L' („*Antrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen*“)
- IPC beginnt mit ,B60Q' („*Anordnung von Signal- oder Beleuchtungsvorrichtungen, deren Einbau oder Halterung oder deren Schaltkreise bei Fahrzeugen allgemein*“)

- IPC beginnt mit ‚B60R‘ („Fahrzeuge, Fahrzeugausstattung oder Fahrzeugteile, soweit nicht anderweitig vorgesehen“)
- IPC beginnt mit ‚F02N‘ („Anlassen von Brennkraftmaschinen“)
- IPC beginnt mit ‚F03‘ („Kraft- und Arbeitsmaschinen oder Kraftmaschinen für Flüssigkeiten; ...“)
- IPC beginnt mit ‚F24J‘ („Erzeugung oder Verwendung von Wärme, soweit nicht anderweitig vorgesehen“)
- IPC beginnt mit ‚G01R‘ („Messen elektrischer Größen; Messen magnetischer Größen“)
- IPC beginnt mit ‚G05F‘ („Systeme zum Regeln elektrischer oder magnetischer Veränderlicher“)
- IPC beginnt mit ‚G12B‘ („Konstruktive Einzelheiten von Instrumenten oder vergleichbare Einzelheiten anderer Geräte, soweit nicht anderweitig vorgesehen“)
- IPC beginnt mit ‚H01B‘ („Kabel; Leiter; Isolatoren; Auswahl der Werkstoffe hinsichtlich ihrer leitenden, isolierenden oder dielektrischen Eigenschaften“)
- IPC beginnt mit ‚H01R‘ („Elektrisch leitende Verbindungen; Bauliche Vereinigungen einer Vielzahl von gegenseitig isolierten elektrischen Verbindungselementen; Kupplungsvorrichtungen; Stromabnehmer“)
- IPC beginnt mit ‚H01T‘ („Funkenstrecken; Überspannungsableiter mit Funkenstrecken; Zündkerzen; Koronaentladungseinrichtungen; Erzeugen von Ionen, die in nichteingeschlossene Gase eingeleitet werden sollen“)
- IPC beginnt mit ‚H02G‘ („Verlegen oder Installieren elektrischer Kabel oder Leitungen, Verlegen oder Installieren kombinierter optischer und elektrischer Kabel oder Leitungen“)
- IPC beginnt mit ‚H02J‘ („Schaltungsanordnungen oder Systeme für die Abgabe oder Verteilung elektrischer Leistung; Systeme zum Speichern elektrischer Energie“)
- IPC beginnt mit ‚H02M‘ („Anlagen zur Umformung von Wechselstrom in Wechselstrom, von Wechselstrom in Gleichstrom oder umgekehrt, oder von Gleichstrom in Gleichstrom und zur Verwendung in Netzen oder ähnlichen Stromversorgungssystemen; ...“)
- IPC beginnt mit ‚H03F‘ („Verstärker“)
- IPC beginnt mit ‚H03G‘ („Verstärkungsregelung“)
- IPC beginnt mit ‚H05K‘ („Gedruckte Schaltungen; Gehäuse oder konstruktive Einzelheiten von elektrischen Geräten; Herstellung von Baugruppen aus elektrischen Elementen“)

Der SQL-Code zur Ausführung der Datenbankabfrage lautete:

```

SELECT
  tls201_appln.inpadoc_family_id, tls201_appln.docdb_family_id,
  tls201_appln.docdb_family_size, tls201_appln.appln_id,
  tls201_appln.appln_auth, tls201_appln.appln_nr_original,
  tls201_appln.earliest_filing_date, tls201_appln.appln_filing_date,
  tls201_appln.earliest_publn_date, tls201_appln.nb_applicants,
  tls201_appln.nb_inventors, tls202_appln_title.appln_title,
  tls209_appln_ipc.ipc_class_symbol, tls209_appln_ipc.ipc_position,
  tls224_appln_cpc.cpc_class_symbol, tls224_appln_cpc.cpc_position
FROM tls201_appln
JOIN tls202_appln_title USING (appln_id)
JOIN tls209_appln_ipc USING (appln_id)
JOIN tls224_appln_cpc USING (appln_id)
WHERE YEAR(earliest_filing_date) >= 1990 AND (

```

```

(
  cpc_class_symbol LIKE 'H01M 10/052%' OR
  cpc_class_symbol LIKE 'Y02E 60/122' OR
  cpc_class_symbol LIKE 'Y02T 10/7011'
)
OR
(
  (
    cpc_class_symbol LIKE 'H01H%' OR
    cpc_class_symbol LIKE 'H01L%' OR
    cpc_class_symbol LIKE 'H01M%' OR
    cpc_class_symbol LIKE 'H02%' OR
    cpc_class_symbol LIKE 'H04%' OR
    cpc_class_symbol LIKE 'Y02E%' OR

    ipc_class_symbol LIKE 'B60K%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'B60L%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'B60Q%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'B60R%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'F02N%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'F03%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'F24J%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'G01R%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'G05F%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'G12B%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H01B%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H01R%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H01T%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H02G%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H02J%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H02M%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H03F%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H03G%' OR
    ipc_class_symbol LIKE 'H05K%'
  )
  AND appln_title LIKE '%Lithium%'
)
)

```

Diese erste Patentsuche lieferte 120565 Patente aus 56313 Patentfamilien von ca. 7600 internationalen anmeldenden Organisationen. Die Beschränkung auf solche Patentanmelder mit dem Länderkürzel 'DE' ergab 2783 Patente aus 2652 Patentfamilien von ca. 245 mutmaßlich in Deutschland ansässigen Organisationen, die manuell bereinigt und dedupliziert wurden, sodass 212 Akteure aus PATSTAT in die Akteursliste eingeflossen sind.

Zweite Patentsuche

Anschließend mussten für die *zweite Patentsuche* alle 696 in der Akteursliste vorhandenen Namen von Organisationen (inklusive der 212 durch die erste Patentsuche gefundenen) mit den in PATSTAT vorhandenen Namen von Patentanmeldern abgeglichen werden. Dies geschah dadurch, dass für jeden Akteur ein geeigneter SQL-Suchstring inklusive Wildcards festgelegt wurde. Daraus ergab sich eine Liste von PATSTAT-Personen-IDs, über die Patentanmelder (in PATSTAT "Personen" genannt) identifiziert werden konnten. Eine einzelne Organisation kann durch sehr viele Personen-IDs in PATSTAT repräsentiert werden. Einerseits kann es verschiedene Schreibweisen desselben Namens geben, die jeweils eine neue Personen-ID erhält. Andererseits hat selbst die identische Schreibweise oft viele verschiedene Personen-IDs. Mit Hilfe der Liste der Personen-IDs konnten alle durch diese IDs angemeldeten Patente extrahiert und den Akteuren der Akteursliste zugeordnet werden.

Aus den Patentdaten gewonnene Variablen sind bspw. die Anzahl angemeldeter Patente im Lithium-Ionen-Bereich, die Anzahl aller angemeldeter Patente, sowie jeweils das Datum der ersten und letzten Einreichung und Veröffentlichung. Umfangreiche Informationen über die Bereiche der Forschungstätigkeit der Unternehmen und Institute liefern die den Patenten zugeordneten Klassifizierungen, wo zu IPC und CPC noch die [NACE2-Wirtschaftszweig-Systematik der EU](#) hinzukommt, die ebenfalls in PATSTAT enthalten ist. Für jeden Akteur wurden ermittelt: die Anzahl unterschiedlicher NACE-Klassen (bis zu 4 Ziffern), die 10 meistgenutzten NACE-Klassen, also etwa (Akteur: „Andreas Stihl AG & Co. KG“):

27.2 (66,7%), 27.9 (16,7%), 27.12 (8,33%) und 26.5 (8,33%),

die meistgenutzte NACE-Klasse (im Beispiel 27.2), die Anzahl unterschiedlicher NACE-Abteilungen (erste zwei Ziffern der NACE-Klasse), die zu 90% meistgenutzten NACE-Abteilungen, also etwa:

27 (91,7%) und 26 (8,33%)

und die meistgenutzte NACE-Abteilung (im Beispiel 27). Ähnlich bei IPC und CPC die Anzahl unterschiedlicher Symbole, die 10 meistgenutzten Symbole, etwa:

H01M 2/10 (16,7%), H01M 10/44 (16,7%), H02H 7/18 (16,7%), G01R 31/36 (8,33%), H01M 2/20 (8,33%), H01M 10/04 (8,33%), H01M 10/0525 (8,33%), H01M 10/48 (8,33%), H02J 3/00 (8,33%),

das meistgenutzte Symbol (hier H01M 2/10), die Anzahl unterschiedlicher IPC/CPC-Gruppen (alle Zeichen bis zum „/“, also die ersten 5 – 7 Zeichen des IPC- oder CPC-Symbols), die zu 90% meistgenutzten Gruppen, etwa:

H01M 10 (41.7%), H01M 2 (25%), H02H 7 (16.7%), G01R 31 (8.33%), H02J 3 (8.33%)

die meistgenutzte Gruppe (hier H01M 10), die Anzahl unterschiedlicher IPC/CPC-Klassen (erste drei Zeichen des IPC- oder CPC-Symbols), die zu 90% meistgenutzten Klassen, etwa:

H01 (66.7%), H02 (25%), G01 (8.33%)

und die meistgenutzte Klasse (hier H01). Alle diese Größen wurden sowohl für die Lithium-Patente als auch für alle Patente berechnet.

Mit den IPC-Informationen der Patente wurde die Position der Akteure in der Wertschöpfungskette abgeschätzt, gemäß Kapitel 5.6 erfolgte eine Zuordnung zu den Stufen „Komponente“, „Zelle“ und „Batterie(system)“. Ebenso wurde abgeschätzt, welchen Absatzmarkt die Firma im Falle der Batterieherstellung vermutlich beliefert: „Portable Geräte“, „Werkzeuge“, „Stationäre Speicher“ oder „Fahrzeuge“ (siehe Kapitel 5.7.2).

Es wurde eine sog. Konkordanz entwickelt, d. h. eine Übersetzung von IPC-Symbolen in die anderen Kategorien. Zum Beispiel wurden u. a. die IPC-Symbole „A01D 34/02“ („Mowers“) und „A01D 34/42“ („hand-held edge trimmers or shears for lawn“) als „Batterieherstellung/Werkzeuge“ und die IPC-Symbole „B60L 11/00“ („Electric propulsion with power supplied within the vehicle“) und „B60S 5/06“ („Supplying batteries to, or removing batteries from, vehicles“) als „Batterieherstellung/Fahrzeuge“ interpretiert, während bspw. „C01F 5/02“ („Compounds of magnesium“) und „D01F 9/127“ („Carbon filaments“) als Komponentenherstellung sowie „H01M 10/00“ („Secondary cells; Manufacture thereof“) und „H01M 14/00“ („Electrochemical current or voltage generators“) als Zellherstellung gedeutet wurden.

Da jeder Akteur Patente mit vielen verschiedenen IPC-Symbolen halten kann, ist es den Akteuren möglich, auf mehreren Wertschöpfungsstufen gleichzeitig aktiv zu sein und mehrere Absatzmärkte gleichzeitig zu beliefern. Dies ist kein Problem und wird in der Simulation in Form von Konglomeraten abgebildet (siehe Kapitel 5.5). Für Jeden Akteur wurden prozentuale Aufteilungen seiner Aktivität auf den Wertschöpfungsstufen und Märkten berechnet, z. B. („Audi AG“): 40,2% Komponenten, 31,3% Zellen, 28,6% Batterien, wobei 17,9% auf Fahrzeuge, 8% auf Portable Geräte und 2,7% auf Werkzeuge entfallen.

7.1.3 Auszüge aus der Akteurstabelle

Um einen Eindruck vom Wesen und Umfang der Akteurstabelle zu vermitteln, werden hier exemplarisch ein paar Auszüge vorgestellt.

Im linken Teil der Tabelle befinden sich Informationen, mit denen sich die Akteure identifizieren lassen und die von Hand eingetragen wurden (s. Tabelle 22). Allen voran der Akteursname, dessen kanonische Schreibweise jeweils, wenn möglich, dem Handelsregister entnommen wurde, sowie die Handels- oder Vereinsregisternummer. Die Spalte „origin“ gibt die Quelle(n) an, der dieser Akteur entnommen wurde (s. o.). Dabei bedeutet „All_lithium“ die erste automatisierte Patentsuche nach allen in PATSTAT vorhandenen Lithium-Batterie-Patenten, „EPO“ eine manuell durchgeführte frühere Patentsuche und „Gesamtheit Akteure“ sowie „JT“ beziehen sich auf weitere manuelle Recherchen, v. a. im Internet über

Suchmaschinen. In der Spalte „Typ“ wurde teilweise manuell die Eigenart des Akteurs kommentiert.

Tabelle 22: Händisch erstellte Identifikationsspalten am linken Rand der Akteurstabelle

ID	origin	Rechtsform	Typ	Akteursname	Registernummer
1	KLiB	GmbH		3M Deutschland GmbH	Amtsgericht Neuss HRB 1878
2	Batterieforum2019	GmbH		50Hertz Transmission GmbH	Amtsgericht Berlin (Charlottenburg) HRB 84446
3	EPO, All_lithium	GmbH		AaDC Airport and Dangerous goods (Amtsgericht Darmstadt HRB 90459vormals: Amtsgericht
4	Batterieforum	GmbH		ABT SPORTSLINE Gesellschaft mit be	Amtsgericht Kempten HRB 4448
5	JT	GmbH		Accumulatorenwerke Hoppecke Carl	Amtsgericht Arnberg HRB 3989
6	Batterieforum	GmbH		ACCUREC-Recycling Gesellschaft mb	Amtsgericht Duisburg HRB 15384
7	JT	GmbH		Accusysteme Transwatt GmbH	Amtsgericht Arnberg HRB 5847vormals: Amtsgericht Arn
8	Batterieforum	GmbH		Adam Opel GmbH	Amtsgericht Darmstadt HRB 96540
...
688	Batterieforum	AG		Wolfsburg AG	Amtsgericht Braunschweig HRB 100405
689	JT	GmbH		Wstech GmbH	Amtsgericht Flensburg HRB 10737 FL
690	Batterieforum	gGmbH		Wuppertal Institut für Klima, Umwel	Amtsgericht Wuppertal HRB 7619
691	JT	GmbH		Younicos GmbH	Amtsgericht Berlin (Charlottenburg) HRB 191798 B
692	Batterieforum	GmbH	außerunivers	Zentrum für Brennstoffzellen-Techni	Amtsgericht Duisburg HRB 9166
693	Gesamtheit Akteure_	AG		ZF Friedrichshafen AG	Amtsgericht Ulm HRB 630206
694	EES	GmbH & Co. KG		Zimpertec GmbH & Co. KG	Amtsgericht Stuttgart HRA 726968
695	JT		Stiftung bürg	ZSW Zentrum für Sonnenenergie und	Wasserstoffforschung Baden-Württemberg
696	JT	e. V.	Intermediäre	ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik	Amtsgericht Frankfurt am Main VR 4154

Rechts neben diesen ersten Spalten gibt es weitere manuell befüllte Spalten, z. B. zum Hauptsitz des Unternehmens, dem Jahresumsatz, der Zahl der Beschäftigten und der Akteurstätigkeit, die aber sehr lückenhaft gefüllt wurden und hier nicht gezeigt werden.

Daran anschließend befinden sich 99 Spalten mit Unternehmensdaten, die automatisiert aus der Datenbank Orbis von Bureau van Dijk abgerufen wurden, siehe Tabelle 23. Sie sind teilweise redundant oder für die Kalibrierung des SKIN-Modells nicht nützlich gewesen und sollen daher nicht in Gänze diskutiert werden.

Tabelle 23: Auszug der von BvD-Orbis automatisiert eingelesenen Unternehmensdaten

BvD: Unternehmensname	Straße, Hausnr.	Postleitzahl	Ort	Gründungsjahr	Mitarbeiter 2016	Umsatz tsd € 2016	Kapital € EUR 2016
3M DEUTSCHLAND GMBH	CARL-SCHURZ-STR. 1	41460	NEUSS	1951-04-20	6.179	2.326.819	154.921
50HERTZ TRANSMISSION GMBH	HEIDESTR. 2	10557	BERLIN	2001-10-10	933	9.556.600	200.000
AADC AIRPORT AND DANGEROUS	LANGER KORNWEG 34K	65451	KELSTERBACH	2004	n.v.	n.v.	n.v.
ABT SPORTSLINE GESELLSCHAFT	JOHANN-ABT-STR. 2	87437	KEMPTEN	1978-01-20	150	n.v.	150
ACCUMULATORENWERKE HOPPE	BONTKIRCHENER STR. 1	59929	BRILON	1927	1.861	424.148	2.500
ACCUREC-RECYCLING GESELLSCHAFT MBH		45472	MUELHEIM	1995-08-22	35	10.000	260
ACCUSYSTEME TRANSWATT GMB	COESTERWEG 41	59494	SOEST	1994-05-17	14	2.600	27
ADAM OPEL GMBH	BAHNHOFSPLATZ	65428	RUESSELSHEIM	1862	18.993	12.442.204	664.680
...
WOLFSBURG AG	MAJOR-HIRST-STR. 11	38442	WOLFSBURG	1999-03-29	150	19.698	10.100
WSTECH GMBH	ECKERNFOERDER LANDSTR.	24941	FLENSBURG	2014-10-07	20	n.v.	25
WUPPERTAL INSTITUT FUER KLI	DOEPPERSBERG 19	42103	WUPPERTAL	1989-12-21	227	15.313	26
YOUNICOS GMBH	AM STUDIO 16	12489	BERLIN	2005-09-15	83	n.v.	1.651
ZENTRUM FUER BRENNSTOFFZEL	CARL-BENZ-STR. 201	47057	DUISBURG	2001-08-22	100	n.v.	25
ZF FRIEDRICHSHAFEN AG	LOEWENTALER STR. 20	88046	FRIEDRICHSHAFEN	1915	37.865	11.554.000	500.000
ZIMPERTEC GMBH & CO KG	UNTERHEUTAL 10	72525	MUENSINGEN	2011-11-23	1	n.v.	n.v.
ZENTRUM FUER SONNENENERGIE	HESSBRUEHLSTR. 21C	70565	STUTTART		n.v.	n.v.	n.v.
ZVEI - ZENTRALVERBAND ELEKTI	LYONER STR. 9	60528	FRANKFURT	1949-02-21	160	n.v.	n.v.

Orbis enthält, neben Adress- und Handelsregisterdaten, Daten zur Tätigkeit und Position des Unternehmens auf dem Weltmarkt, v. a. Finanzdaten wie z. B. Umsatz und Kapital, aber auch Anzahl der Mitarbeitenden und Gründungsjahr. Diese Daten sind in die

Akteurstypisierung eingeflossen (siehe Kapitel 7.1.4). Als Basisjahr für die Daten wurde 2016 ausgewählt, da auch die Patentdaten auf dem Stand von 2016 sind.

An die Spalten von Orbis anschließend befinden sich 68 aus den Patentdaten automatisiert generierte Spalten, siehe Tabelle 24 für einen Auszug. Die Patentdaten wurden bereits in Kapitel 7.1.2 detailliert erläutert, weshalb hier darauf verzichtet wird. Die Spalten „component“ bis „battery“ und „Portable“ bis „Stationary“ enthalten die über eine Konkordanz aus IPC abgeleiteten Information zur Position auf der Wertschöpfungskette und zum Absatzmarkt (siehe Kapitel 7.1.2).

Tabelle 24: Auszug der aus den Patentdaten automatisch generierten Unternehmensdaten

Unternehmen	Li_n_patent:Li_n_uniq_ipc	Li_ipc_top_10	Li_ipc_top_1	component	cell	battery	Portable	Tool	BEV	Stationary
3M Deutschland GmbH										
50Hertz Transmission GmbH										
AaDC Airport and Danger	1	4 B65D 81/05: 1 (25%)B65D 81/05			0,25	0,25	0,5			0,5
ABT SPORTSLINE Gesellschaft mit beschränkter Haftung										
Accumulatorenwerke Hoppecke Carl Zoellner & Sohn Gm										
ACCUREC-Recycling Gesellschaft mbH										
Accusysteme Transwatt GmbH										
Adam Opel GmbH	1	1 H01M 10/6555: 1 (100%)H01M 10/6555				1				
...
Wolfsburg AG										
Wstech GmbH										
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH										
Yunicos GmbH										
Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH										
ZF Friedrichshafen AG	2	4 B60L 7/10: 1 (25%)B60L 7/10				0,25	0,75			0,75
Zimpertec GmbH & Co. KG										
ZSW Zentrum für Sonner	9	35 H01M 10/0525: 4 (8.3%)H01M 10/0525			0,66666667	0,333333				
ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindus										

Schließlich folgen am ganz rechten Rand der Akteurstabelle Daten zur Forschungsprojekttätigkeit der Akteure, die der Datenbank „Batterieforum Deutschland“ des KLiB entnommen wurden, siehe Tabelle 25 für einen Auszug. Die gewonnenen Daten, etwa durchschn. Fördersumme, durchschnittliche Anzahl Projekte, durchschnittliche Anzahl Partner etc. konnten verwendet werden, um das Forschungsprojektmodul von SKIN-Energy (siehe Kapitel 5.3) zu kalibrieren.

Tabelle 25: Auszug der aus den Projektdaten automatisch generierten Unternehmensdaten

Unternehmen	Zahl Projekte	Σ Projektmonate	Σ Fördersumme	Ø Fördersumme	Ø Paralle. Proj.	Σ Projektpartner	Ø Projektpartner	Anteil Ind.partner
3M Deutschland GmbH								
50Hertz Transmission Gm	1	36	109.548 €	109.548 €	1,00	2	2	0
AaDC Airport and Dangerous goods Consult GmbH								
ABT SPORTSLINE Gesellscl	1	36	252.014 €	252.014 €	1,00	5	5	0,4
Accumulatorenwerke Hoppecke Carl Zoellner & Sohn GmbH								
ACCUREC-Recycling Gesel	2	83	1.226.488 €	613.244 €	1,00	8	4	0,375
Accusysteme Transwatt GmbH								
Adam Opel GmbH	1	36	241.720 €	241.720 €	1,00	2	2	0,5
...
Wolfsburg AG	1	36	130.876 €	130.876 €	1,00	5	5	0,6
Wstech GmbH								
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH								
Yunicos GmbH	2	72	324.994 €	162.497 €	1,10	5	2,5	0,6
Zentrum für Brennstoffzel	3	108	1.854.772 €	618.257 €	1,40	17	5,7	0,529
ZF Friedrichshafen AG								
Zimpertec GmbH & Co. KG								
ZSW Zentrum für Sonnen	22	822	21.646.006 €	983.909 €	8,10	151	6,9	0,298
ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie								

Einen Eindruck über die größten, kapitalstärksten und insgesamt sowie im Bereich der Lithium-Batterien forschungsaktivsten Akteure der Akteurstabelle bieten Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51 und Abbildung 52, die jeweils die 10 Akteure der Tabelle mit den meisten Mitarbeitern, dem größten Kapital, den meisten Patenten insgesamt und den meisten Li-Patenten zeigen.

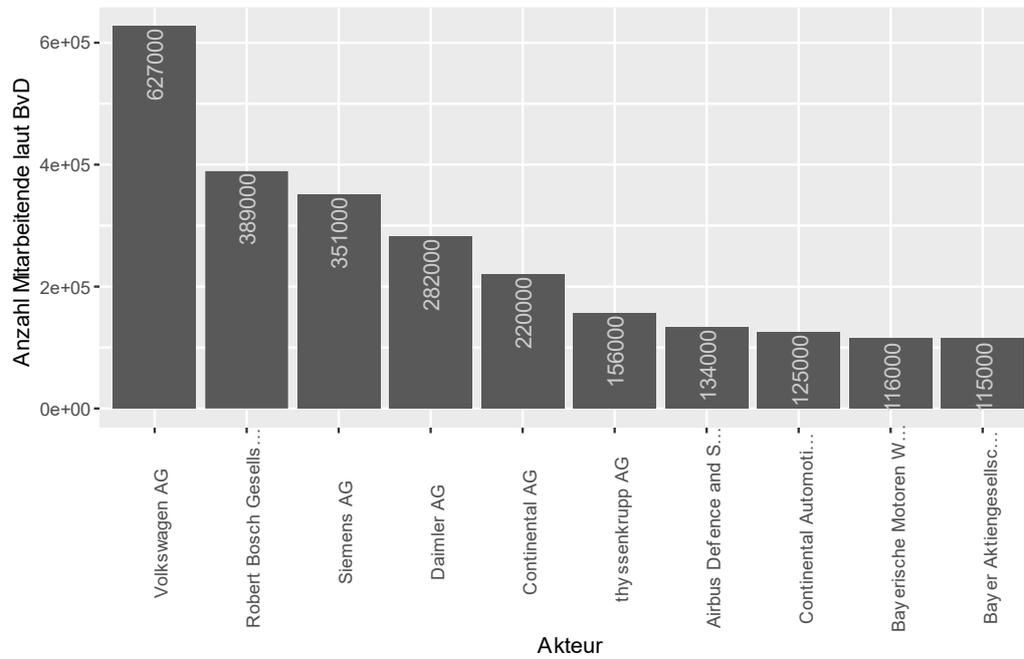


Abbildung 49: Die „Top 10“ der Akteure mit den meisten Mitarbeitern

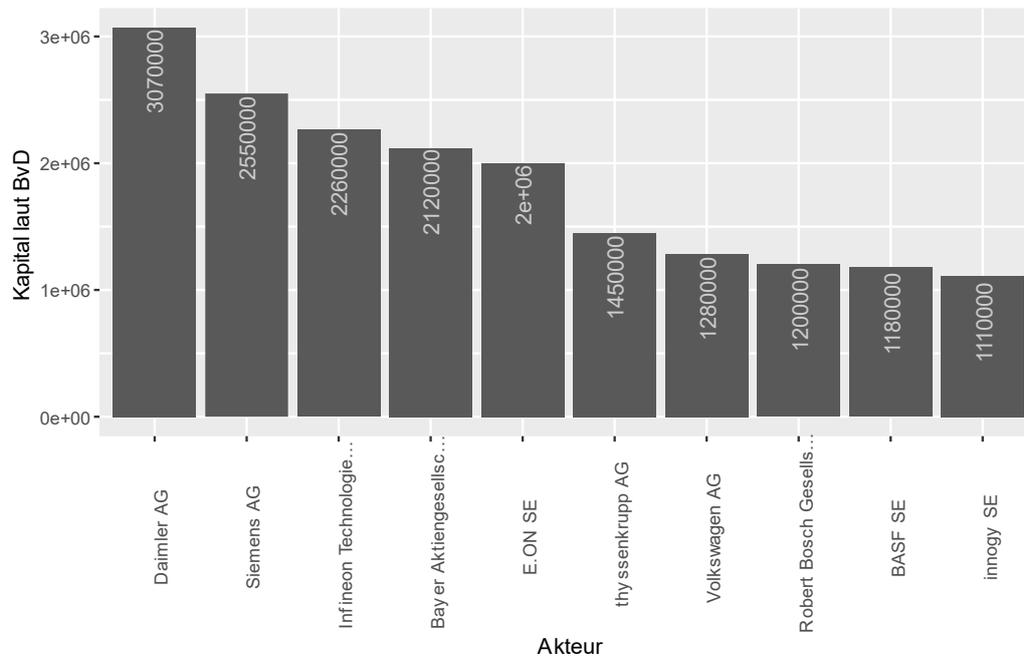


Abbildung 50: Die „Top 10“ der Akteure mit dem größten Kapital

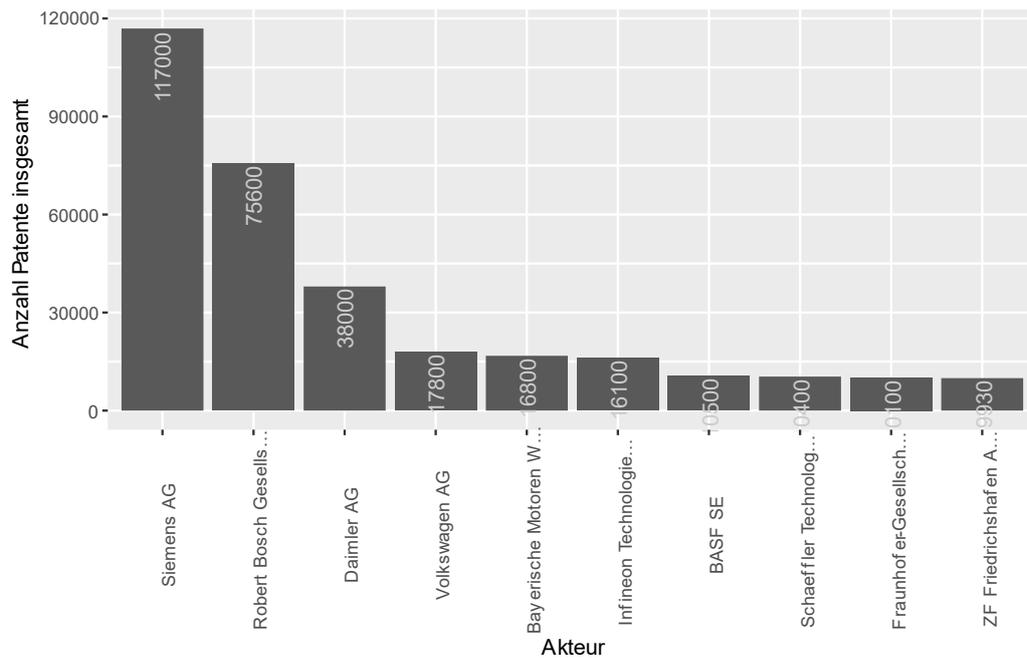


Abbildung 51: Die „Top 10“ der Akteure mit den meisten angemeldeten Patenten insgesamt

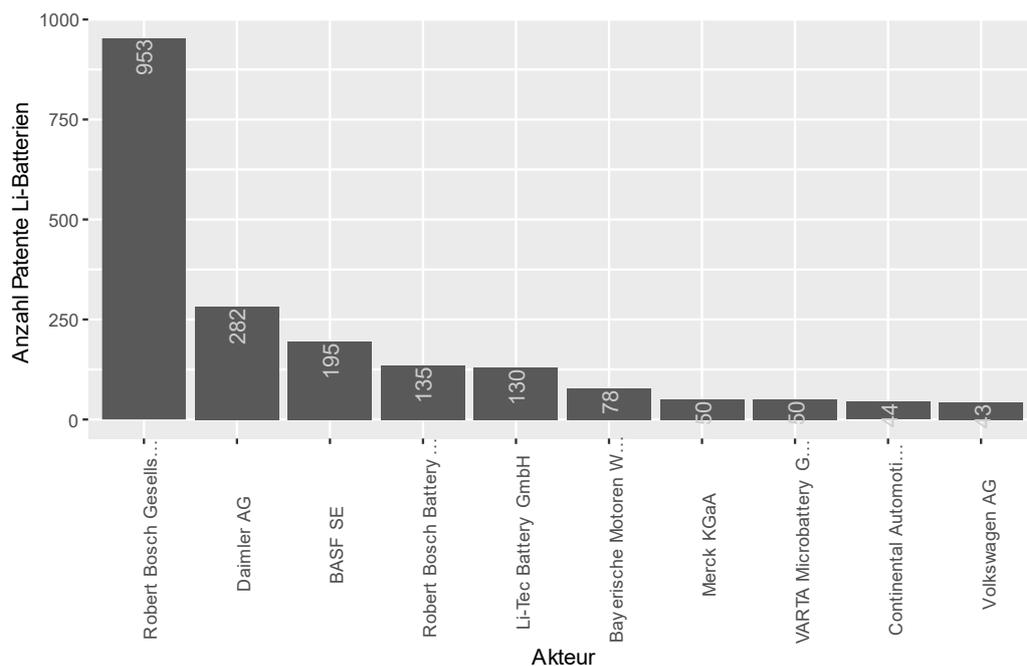


Abbildung 52: Die „Top 10“ der Akteure mit den meisten angemeldeten Patenten im Bereich Lithium-Batterien

7.1.4 Eigenschaften und Typisierung der Akteure

Bei der Untersuchung der Akteure und ihrer Eigenschaften wurde darauf geachtet, welche Gruppen oder Cluster von Akteuren identifiziert werden können, innerhalb derer sich die Akteure in ihren Eigenschaften unterscheiden, aber innerhalb der Gruppe relativ homogen sind. Die ursprüngliche im Expertenworkshop entstandene Idee, verschiedene Branchen zu unterscheiden, um deren durchaus unterschiedliches strategisches Verhalten abzubilden (z.

B. Chemie-, Automobil-, Elektroindustrie und Sonstige) wurde mangels Statistik verworfen. Der Akteursdatensatz umfasst rund 500 Firmen, deren augenscheinlichste Eigenschaft ihre unterschiedliche Größe ist. Unterscheidet man nun 3 Größenklassen (kleine/mittlere Firma, große Firma, Start-up) und 4 Branchen, hätte man bei Gleichverteilung pro Gruppe ca. 40 Firmen. Da manche Gruppen aber unterrepräsentiert sind, würde man mit nur noch 10 – 20 Firmen stark unter statistischen Artefakten leiden und hätte keine schönen Verteilungen mehr. Daher wurde entschieden, die Akteurstypen hauptsächlich auf Grund der Größe zu definieren, wodurch relativ gleich große und ausreichend besetzte Verteilungen entstehen. Außerdem macht dieser Ansatz auch die Zuordnung der Akteure zu den Typen und die Programmierung von SKIN in NetLogo einfacher. Außerdem ist die Unternehmensgröße in Form der Anzahl Mitarbeitender (stark mit anderen Indikatoren wie Umsatz, Kapital und Gewinn korreliert) gut abschätzbar, da diese Variable für fast alle Firmen bekannt ist. Nur bei 18 von 533 Firmen fehlt die Zahl der Mitarbeitenden, während bei 76 der Umsatz, bei 138 das Kapital, bei 303 der Gewinn unbekannt ist.

Die auf Grund der Datenlage festgelegten Akteurstypen sind in Tabelle 26 zu finden.

Tabelle 26: Festlegung der Akteurstypen für die Kalibrierung¹³

Akteurstyp	Typ 1: Institut	Typ 2: Start-up-Firma	Typ 3: kleine/mittlere Firma (KMU)	Typ 4: große Firma (Konzern)
Definition	Ist Institut	Ist Firma & Alter ≤ 10 & Mitarbeiterzahl < 600	Ist Firma & Alter > 10 & Mitarbeiterzahl < 600	Ist Firma & Mitarbeiterzahl ≥ 600
Anzahl Vertreter im Datensatz	163	125	242	147

Der Schnitt bei 600 Mitarbeitenden wurde gewählt, weil sich dadurch eine klare Trennung in den Daten ergab, etwa bei der Umsatz- und Kapitalverteilung. Der Schnitt beim Alter von 10 Jahren ist eine übliche Festlegung, die der Literatur zu Start-ups entnommen wurde. Die folgenden Histogramme verdeutlichen die Eigenschaften der verschiedenen Akteurstypen, indem sie jeweils die statistische Verteilung einiger Variablen darstellen. Dabei ist zu beachten, dass bei Grafiken mit logarithmischer x-Achse jeweils die Einträge bei $x = 0$ (auf einer logarithmischen Skala nicht direkt abbildbar) entfernt wurden, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen. In den Verteilungen wird eine deutliche Verschiedenartigkeit zwischen den vier definierten Akteurstypen sichtbar, die ihre Unterscheidung legitimiert.

¹³ Die Zahlen addieren sich nicht zu 696, der Anzahl Einträge in der Akteursliste, weil 19 Akteuren kein Typ zugeordnet werden konnte: bei 19 Firmen ist entweder das Alter oder die Anzahl Mitarbeitender unbekannt, davon bei 17 nur die Mitarbeitendenzahl, bei einer nur das Alter und bei einer weiteren beides.

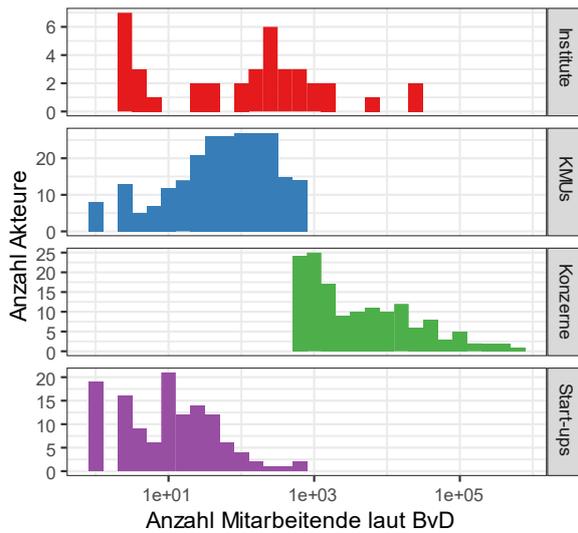


Abbildung 53: Die Mitarbeitendenzahl der im Datensatz vorhandenen Akteure, unterteilt nach den Akteurstypen. Der Schnitt bei 600 zwischen KMUs und Konzernen führt zu einer deutlichen Trennung

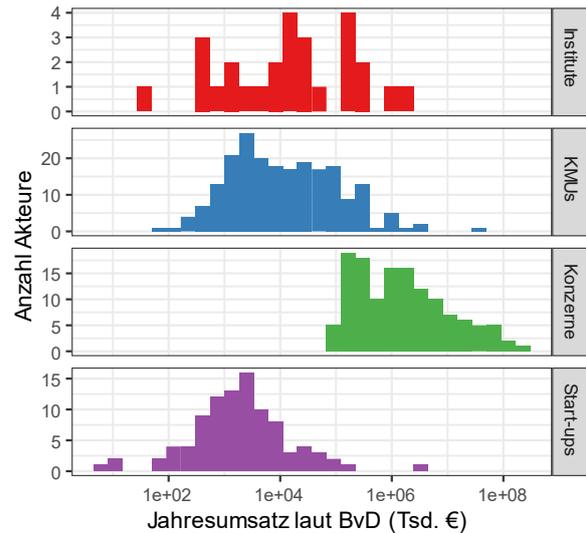


Abbildung 54: Der Jahresumsatz der Akteure, unterteilt nach den Akteurstypen. Beim Vergleich mit Abbildung 53 ist erkennbar, dass Umsatz und Mitarbeitendenzahl ähnlich verteilt und miteinander korreliert sind

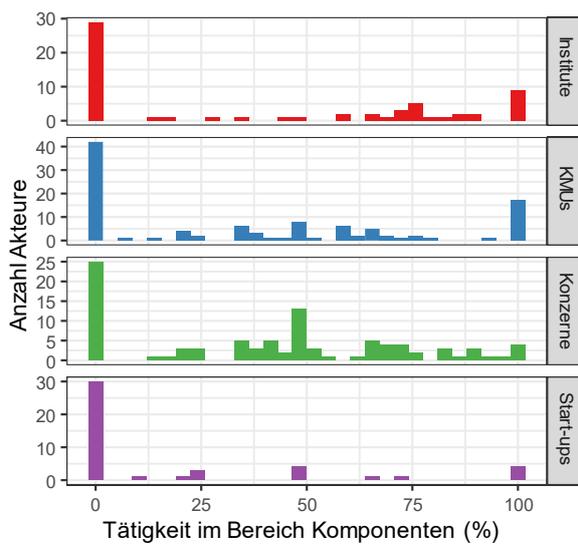


Abbildung 55: Die Tätigkeit der Akteure im WSK-Bereich „Komponenten“: KMUs sind offenbar am aktivsten (größter Anteil mit 100% Tätigkeit), aber auch manche Konzerne sind teilweise tätig. Start-ups sind eher nicht aktiv, Institute etwas

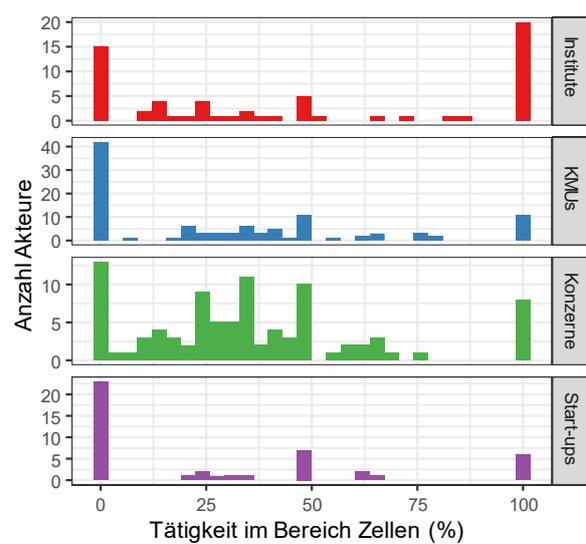


Abbildung 56: Die Tätigkeit der Akteure im WSK-Bereich „Zellen“: Hier sind v.a. Konzerne unterwegs, aber auch Institute und wenige Start-ups und KMUs

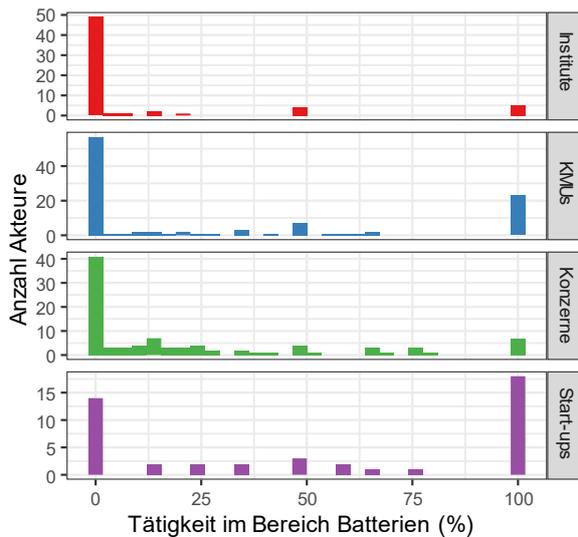


Abbildung 57: Die Tätigkeit der Akteure im WSK-Bereich „Batterien“: Hier sind die meisten Start-ups aktiv, meist zu 100%, aber auch viele KMUs gehen in der Li-Batterie-Branche allein dieser Tätigkeit nach. Konzerne sind unterrepräsentiert und Institute forschen hier kaum bis gar nicht

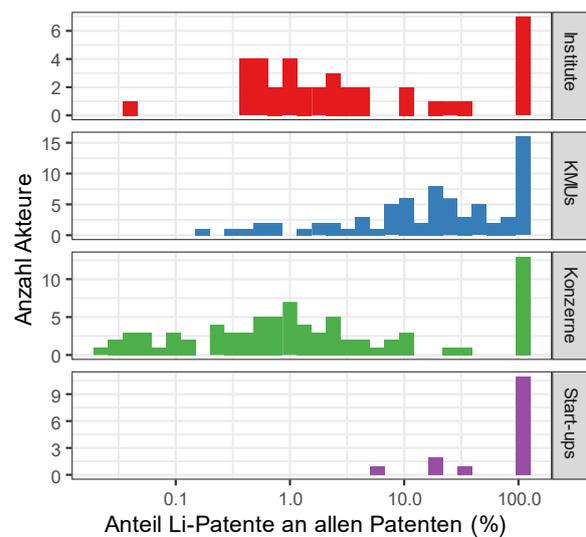


Abbildung 58: Der Anteil der Lithium-Patente an allen Patenten der Akteure. Bei Konzernen ist der Anteil im Durchschnitt gering, sie sind divers aufgestellt. KMUs sind schon stärker auf die eine Sparte fokussiert. Start-ups im Bereich Li-Batterien beschäftigen sich fast ausschließlich damit, während die Institute oft etwa so divers wie die Konzerne sind

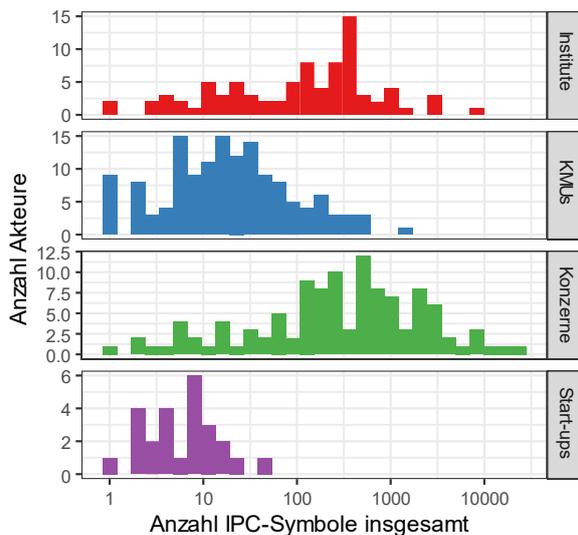


Abbildung 59: Die Anzahl unterschiedlicher IPC-Symbole eines Akteurs spiegelt die Diversität seines Wissens wider. Konzerne und Institute sind deutlich diverser als KMUs, die wiederum diverser als Start-ups sind

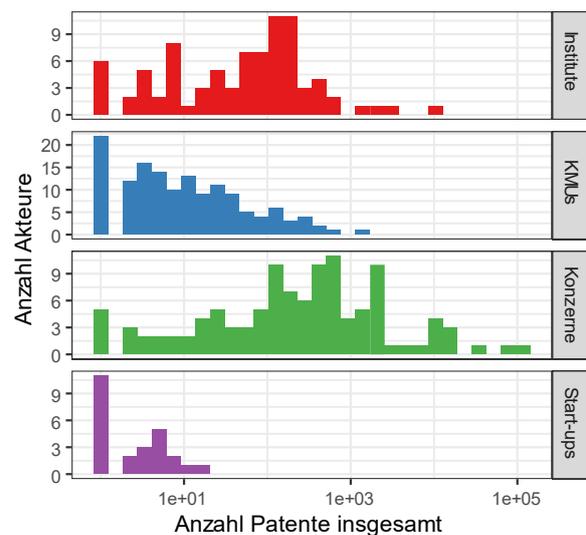


Abbildung 60: Auch die Anzahl gehaltener Patente, also die Größe der vorhandenen Wissensmenge, ist bei Konzernen und Instituten deutlich größer als bei KMUs oder Start-ups

7.1.5 Kalibrierung des Modells mit den Daten der Akteure

Die Daten zu den Akteuren wurden verwendet, um das SKIN-Modell geeignet zu kalibrieren. Es wurden jeweils prozentuale oder kumulative Verteilungen abgeleitet, die in SKIN-Energy eingelesen werden und dort die Generierung eines randomisierten Ensembles von Akteuren/Agenten bestimmen.

Eine solche kalibrierte Variable ist die Position entlang der Wertschöpfungskette (WSK). Auch für Akteure ohne Patentinformation wurde sie abgeschätzt. Dabei wurde eine Priorisierung vorgenommen:

1. Waren Patentdaten vorhanden, wurden deren IPC-Symbole verwendet, um über eine Konkordanz die Position in der WSK zu bestimmen (siehe Kapitel 7.1.2).
2. Fehlten Patentdaten, wurde auf von Hand recherchierte Informationen aus der Akteurstabelle und auf Informationen aus den Projektdaten des Batterieforums zurückgegriffen, wo in einigen Fällen Angaben zum Forschungsgegenstand vorhanden sind, z. B. „Zelle“, „Anwendung“ oder „Batteriepack/Batterie“.

Aus den oben dargestellten Tätigkeitsanteilen auf den verschiedenen Stufen der WSK wurde für jeden Akteur der Mittelwert berechnet. Anschließend wurden diese Mittelwerte kumuliert und normiert, sodass eine kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung entstand. Daraus ergaben sich die in Abbildung 61 dargestellten Häufigkeiten der WSK-Positionen für die vier Akteurstypen. Nach Einlesen verteilen sich die generierten SKIN-Firmen zufällig entsprechend dieser kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung auf die verschiedenen Wertschöpfungsstufen.

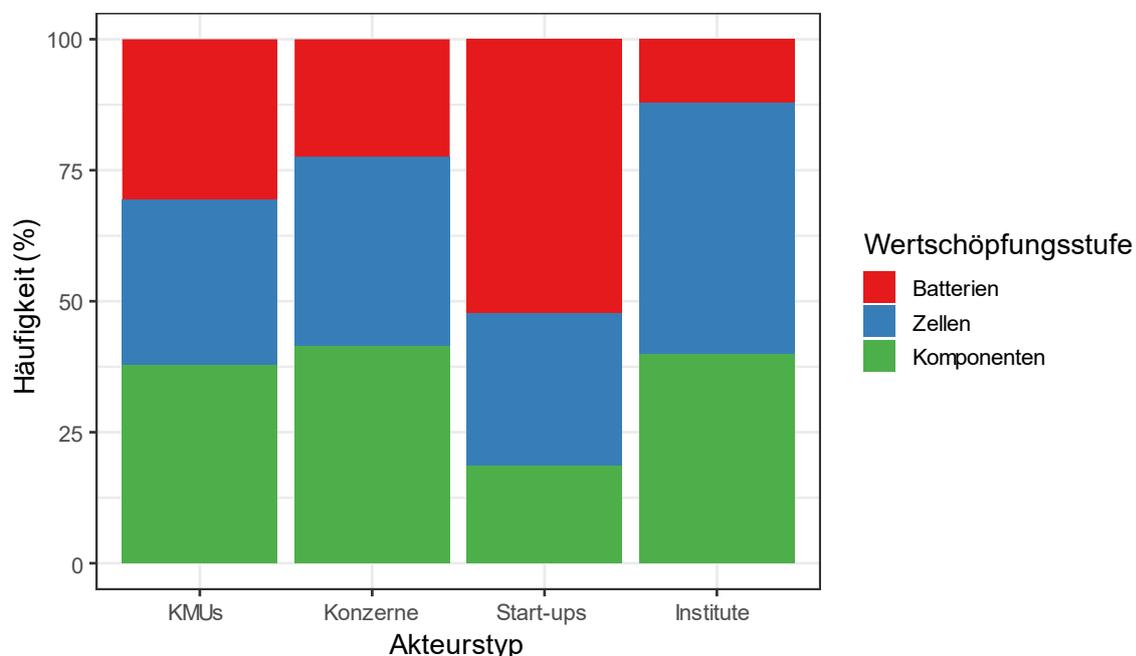


Abbildung 61: Die Häufigkeit der Aktivität der Akteure auf den verschiedenen WSK-Positionen

Die Marktausrichtung der batterieherstellenden Akteure wurde allein durch die IPC-Symbole der Patentdaten abgeschätzt (siehe Kapitel 7.1.2). Auch für sie ergaben sich analog zur WSK-Position aus der für jeden Akteurstyp gemittelten Marktorientierung Häufigkeiten,

die eine kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung ergeben. Abbildung 62 zeigt diese Häufigkeiten, die in SKIN verwendet wurden, um den Endprodukt-produzierenden Agenten je nach Akteurstyp etwas andere Wahrscheinlichkeiten für ihre Marktausrichtung mitzugeben. Man beachte, dass der Markt für stationäre Endgeräte stark unterrepräsentiert ist. Zu klein, um in der Grafik sichtbar zu sein, bedienen gemäß dieser allein auf Patentdaten beruhenden Kalibration lediglich rund 0,6% der Konzerne diesen Nischenmarkt. Die anderen Akteurstypen verzichten den Daten folgend ganz auf diesen Markt. Dieses Bild weist gegenüber der Realität vermutlich eine Verzerrung auf, denn es ist durchaus möglich, dass in bestimmten Bereichen wenig oder keine Patentierung stattfindet, z. B. in der Fertigung von maßgeschneiderten, aber aus Standardkomponenten zusammengesetzten Batteriesystemen. Ebenso ist denkbar, dass bestimmte Akteure, also etwa KMUs und Start-ups weniger häufig Patente einreichen als große Konzerne. Mit der Verwendung von Patentdaten zur Kalibration, müssen diese Ungenauigkeiten berücksichtigt werden. Mit der in Abbildung 62 dargestellten Kalibration gibt es zum Startzeitpunkt der Simulation also so gut wie keine primär auf stationäre Stromspeicher fokussierte Hersteller, was im Grunde auch das aktuelle Nischendasein dieser Produkte gegenüber Batterien für Elektrofahrzeuge abbildet. Tatsächlich gibt es aber einen Überlapp zwischen dem Markt der stationären Speicher und der Batteriefahrzeuge (BEV), siehe Kapitel 7.3, sodass bei Sättigung des BEV-Markts manche Hersteller dennoch stationäre Speicher absetzen. Außerdem ist es Neugründungen möglich, diese Lücke zu füllen.

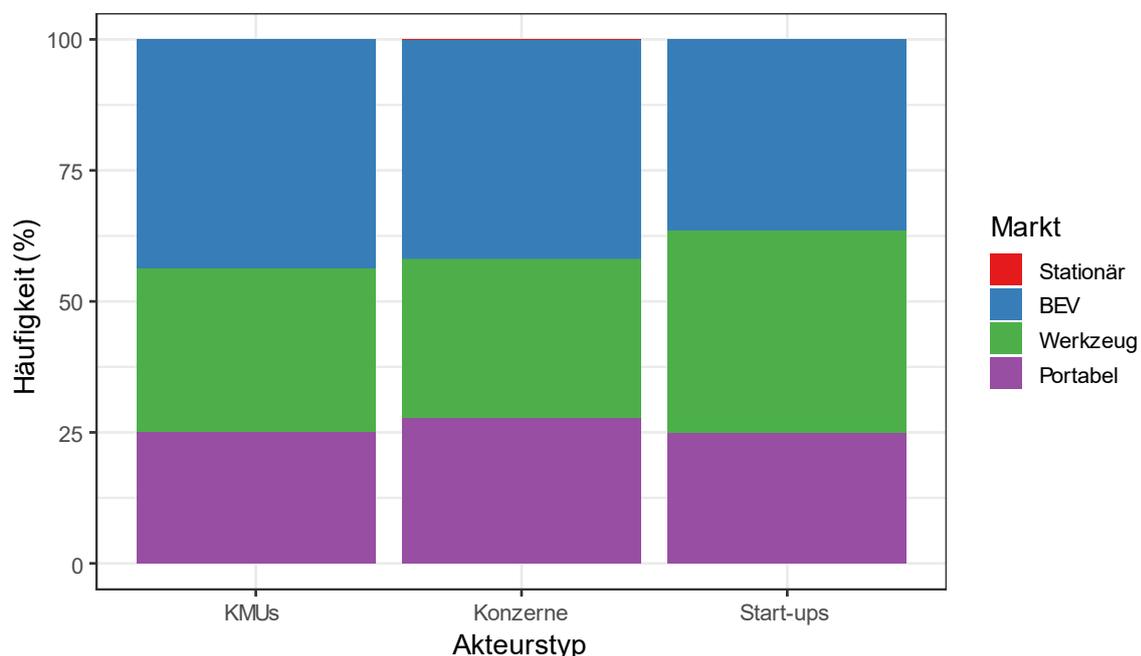


Abbildung 62: Die Häufigkeit der Ausrichtung der Akteure auf die verschiedenen Absatzmärkte

Eine weitere zu kalibrierende Größe ist die Verteilung der Akteurstypen untereinander, also wie viele der zufallsgenerierten Firmen zum Typ „KMU“ oder „Konzern“ gehören. Entsprechend Tabelle 26 sind 242 KMU-Firmen, 147 Konzern-Firmen und 163 Institute zu beobachten. Start-ups gibt es zu Beginn der Simulation keine. Sie werden erst nach und nach

im Verlauf der Simulation dynamisch gegründet und der Anteil der Start-ups an den Kalibrationsfirmen fließt in ihre Geburtenrate ein (siehe Kapitel 5.4).

Zwei Größen der Agenten werden mit Hilfe einer sog. Kernel-Density-Verteilung beschrieben. Das bedeutet, vereinfacht gesagt, eine Superposition von Normalverteilungen wurde so an die Daten der Akteurstabelle angepasst, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zustande kommt. So ist es möglich, eine glatte Verteilung auf der Grundlage von relativ wenigen Daten abzuschätzen. Es können Verteilungen beliebiger Form beschrieben werden, die auch asymmetrisch und nicht-normalverteilt sein können. Gegenüber der Bestimmung von lediglich Mittelwert und Standardabweichung (also Annahme eine Normalverteilung) hat das Vorgehen den Vorteil, dass deutlich realitätsgetreuere Verteilungen dabei herauskommen. Und im Gegensatz zur Verwendung des Histogramms selbst als empirisch beobachtete Verteilung tendiert die Methode zu einer Glättung und Interpolation. Es wird nicht die beobachtete Probe immer wieder exakt reproduziert und mehr statistische Variation ist vorhanden. Man muss jedoch trotzdem aufpassen, keine Artefakte abzubilden, die auf zufällige statistische Fluktuationen zurückgehen und nicht der tatsächlich zu Grunde liegenden Verteilung entsprechen.

Die zwei Größen, für die das Kernel-Density-Verfahren zum Einsatz kam, waren: das Kapital der Firmen und die Anzahl Tochterfirmen. Durch den Kernel-Density-Ansatz wird also nicht lediglich der Durchschnitt des Ensembles beschrieben, sondern auch die gesamte in diesen Variablen beobachtete Spannbreite abgebildet.

Die in den Daten der Akteurstabelle vorhandenen Angaben zum Unternehmenskapital dienten zur Kalibration des *Kapitals* der SKIN-Firmen. Abbildung 63 zeigt die mittels Kernel-Density abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Kapital, sowohl für kleine Firmen (KMUs) als auch für große Firmen (Konzerne). Handelt es sich bei der Firma um ein Konglomerat (siehe Kapitel 5.5), so wird das Kapital auf die Tochterfirmen (Unternehmensabteilungen) verteilt. Das so kalibrierte Kapital ist das Kapital zu Beginn der Modellläufe, mit dem die Firmen anfangen zu wirtschaften. Während der Simulation verdienen und/oder verlieren die Firmen Geld, ihr Kapital ändert sich dynamisch. Da das SKIN-Energy-Modell nur die Aktivitäten der Firmen modellieren soll, die mit Lithium-Batterien zusammenhängen, und dies für viele Firmen nur eine von zahlreichen Aktivitäten ist, wurde der Anteil der Patente im Bereich Lithium-Batterien an der Gesamtzahl der Patente benutzt, um den Teil des Gesamtkapitals grob abzuschätzen, der in den Bereich Lithium-Batterien innerhalb der jeweiligen Firma fließt. In Abbildung 65 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser „Patent-Relation“, also Lithium-Patente versus alle Patente, dargestellt. Das aus der Verteilung in Abbildung 63 gewonnene zufällige Kapital wurde mit dem jeweiligen Faktor aus Abbildung 65 multipliziert und ergab so jeweils das anfängliche Kapital der Firma.

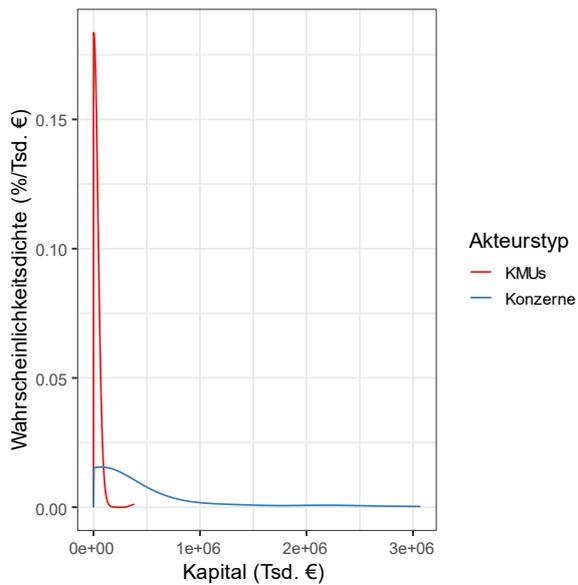


Abbildung 63: Kernel-Density-Estimation der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Firmenkapitals

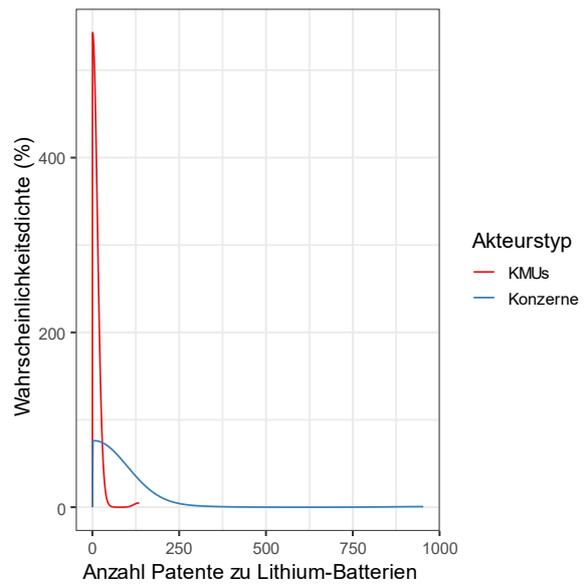


Abbildung 64: Kernel-Density-Estimation der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Patentanzahl im Bereich Lithium-Batterien

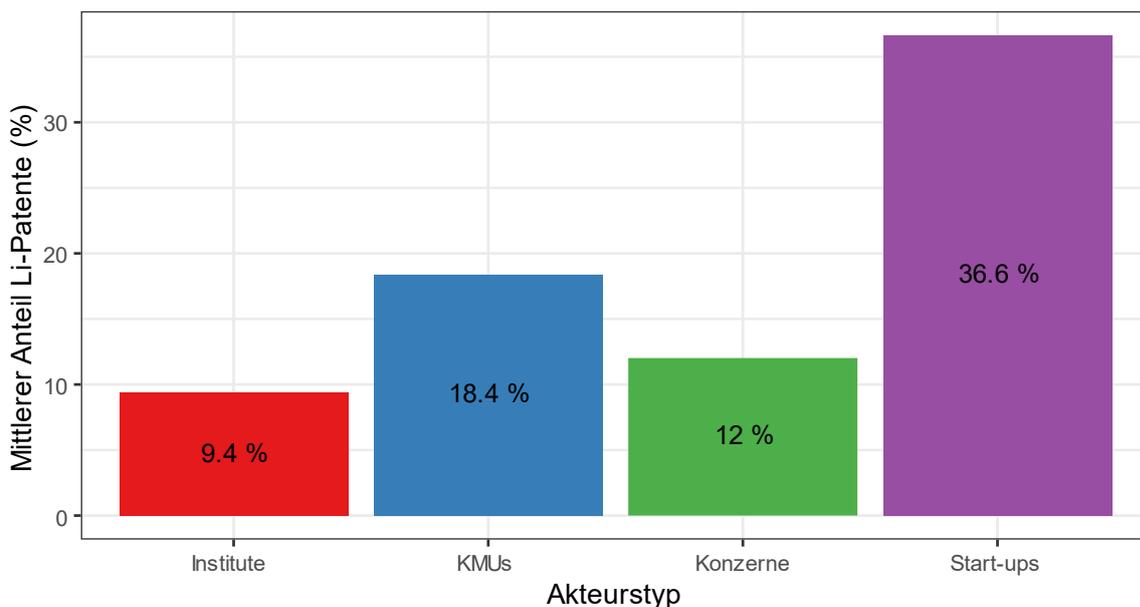


Abbildung 65: Der durchschnittliche Anteil der Patente zum Thema Lithium-Batterien an der Gesamtzahl der Patente der Akteure, nach Akteurstyp

Die Anzahl der Tochterfirmen pro Firma/Konglomerat wurde mit Hilfe der Patentdaten abgeschätzt. Jede (Tochter- oder Einzel-)Firma in SKIN steht für eine bestimmte Menge Wissen, das für die Herstellung eines spezifischen Produkts benötigt wird. Deshalb wurde die Zahl der Töchter über die Anzahl vorhandener Patente, bzw. Patentfamilien, abgeschätzt, unter der Annahme, dass in erster Näherung jede neue Patentfamilie ein neues Produkt beschreibt, was auch den Grund hinter der Zusammenfassung von Patenten zu Patentfamilien durch die Patentämter darstellt. Die Anzahl der Patentfamilien gibt also Auskunft über die

Diversität des Wissens eines Konzerns und ist ein grobes Maß für die Anzahl unterschiedlicher Produkte, die hergestellt werden. Da das SKIN-Energy-Modell nur den Teil der Firmen abbilden soll, der sich mit Lithium-Batterien beschäftigt, wurde nur die Zahl der Patente im Bereich Li-Batterien herangezogen und nicht die Gesamtzahl der Patente. Es wird für jede simulierte Firma entsprechend der Verteilung in Abbildung 64 ein zufälliger Wert für die Zahl der Li-Patente bestimmt. Um in die Anzahl der Tochterfirmen umzurechnen, wird die Zahl der Patente durch ein „Patent-zu-Töchter-Verhältnis“ (*patent-to-daughter-ratio*) geteilt, das in der Simulation eingestellt werden kann. Standardmäßig liegt das Verhältnis bei 20, d. h. pro 20 Patente entsteht in der Simulation dann eine weitere Tochterfirma. Diese Skalierung musste vorgenommen werden, um die Simulation beherrschbar zu halten. Die Laufzeit steigt nichtlinear mit der Zahl der simulierten (Tochter-/Einzel-)Firmen. Bei vielen Konglomeraten mit mehreren hundert oder sogar tausend Töchtern wäre die Laufzeit zu lang. Für zumutbare Laufzeiten sollte die Gesamtzahl der Firmen nicht weit über tausend liegen. Auch hier ist zu beachten, dass natürlich viele Unternehmen keine oder nur wenige Patentanmeldungen durchführen und die Daten deshalb einer gewissen Verzerrung unterliegen. Das gewählte Vorgehen stellte jedoch die bestmögliche Näherung dar.

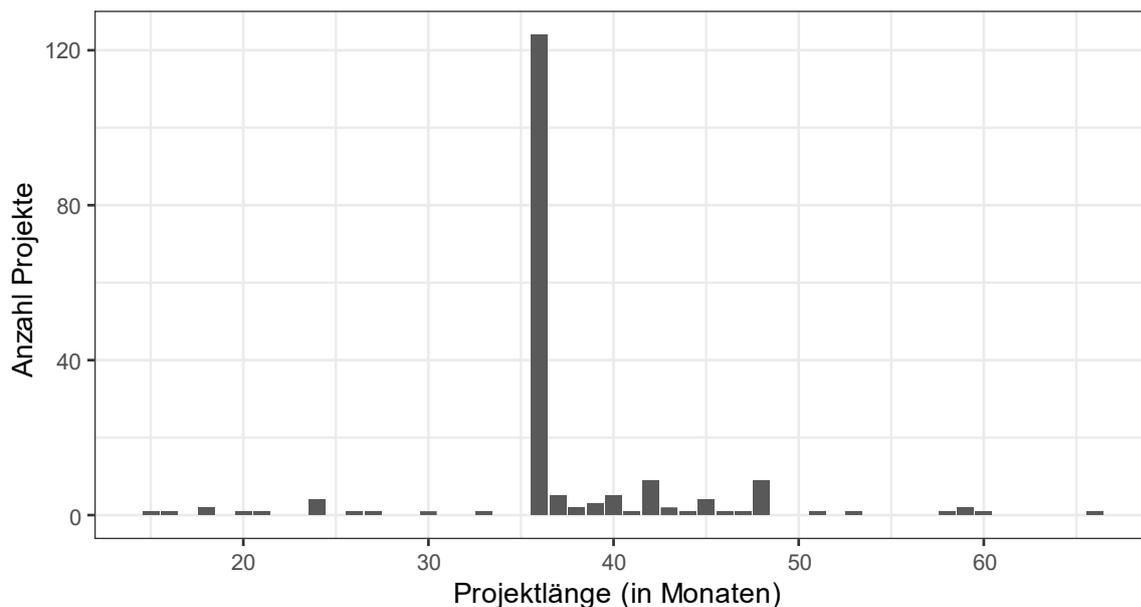


Abbildung 66: Histogramm der Dauer von Forschungsprojekten mit Beteiligung von Akteuren aus der Akteurstabelle

Zur Kalibrierung der Forschungsprojektlänge (vgl. Kapitel 5.3) wurde ebenfalls auf die Daten der Akteurstabelle zurückgegriffen. Daten über die Forschungstätigkeit, wie die Dauer durchgeführter Projektlängen, stammen aus der Datenbank „Batterieforum Deutschland“ des KLiB. Für die korrekte Modellierung der Projektdauer wird in der Simulation einfach für jedes neue Forschungsprojekt eine der Dauern der Projekte, an denen Akteure aus der Akteurstabelle beteiligt waren, zufällig ausgewählt. Die Verteilung der Projektdauern, wobei 36 Monate mit Abstand am häufigsten vorkommt, ist in Abbildung 66 zu sehen.

7.2 Schnittstelle zu AMIRIS

Das agentenbasierte Modell AMIRIS des DLR-TT (siehe Kapitel 6) simuliert den Strommarkt und die Akteure auf dem Strommarkt, insbesondere Energieversorger. Durch das AMIRIS-Modell werden Systemdienstleistungen (engl. *ancillary services*) wie z. B. die Arbitrage, die zum Verschieben von Last von Zeiten hoher in Zeiten niedriger Netzauslastung führt, und die damit erzielbaren Erlösmöglichkeiten berechnet. Auf dieser Basis wird ermittelt, welche Erlöse ein Energieversorger mit dem Zwischenspeichern von Strom in einem stationären Speicher, also etwa einer Lithium-Ionen-Batterie, erwarten kann (s. Kapitel 6).

Diese am Strommarkt durch den Betrieb eines stationären Speichers voraussichtlich erzielbaren Erlöse werden vom Energieversorgern bei der Investition in den Speicher berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass in einen Speicher investiert wird, wenn sich dieser voraussichtlich innerhalb seiner Lebensdauer amortisieren wird (s.u.).

Die von AMIRIS prognostizierten Speichererlöse hängen stark vom Energie-Leistungsverhältnis (*energy-to-power ratio*, kurz *E2P*) des Speichers ab und deutlich schwächer von seiner Effizienz (*Round-Trip-Efficiency*, kurz *RTE*). Je kleiner das E2P, d. h. je höher die mögliche Leistung im Verhältnis zur Energiekapazität, umso höher sind die möglichen Erlöse, da eine hohe Leistung dazu führt, dass der Speicher schneller auf Preisschwankungen am Strommarkt reagieren und damit profitabler arbeiten kann. Außerdem gilt: Je höher die Effizienz (RTE), desto geringer sind die Energieverluste beim Speichern und desto größer ist die Menge der rückgespeisten Energie und damit die Erlöse. Die hypothetischen Erlöse sind in Abbildung 67 als eine zweidimensionale Fläche dargestellt. Es handelt sich um die unter gewissen optimistischen Annahmen maximal möglichen Erlöse, die unter schlechteren Bedingungen auch wesentlich niedriger ausfallen könnten, siehe Kapitel 6. Die Erlöse sind die Summe der Erlöse auf dem Sekundärregelmarkt (SRL) und dem Day-Ahead-Markt (DAH) (s. Kapitel 6.1). Da es schon mit den höheren von AMIRIS für das Jahr 2016 berechneten „historischen“ Erlösen (siehe Tabelle 20 aus Kapitel 6.4.2) schwierig war, die Speicher selbst mit den für das Jahr 2030 angenommenen gesunkenen Preisen (siehe Kapitel 7.3) auf dem Markt abzusetzen, wurden für die Berechnungen im SKIN-Energy-Modell die höheren historischen Erlöse beibehalten und nicht die von AMIRIS prognostizierten deutlich geringeren Erlöspotentiale für das Jahr 2030 verwendet.

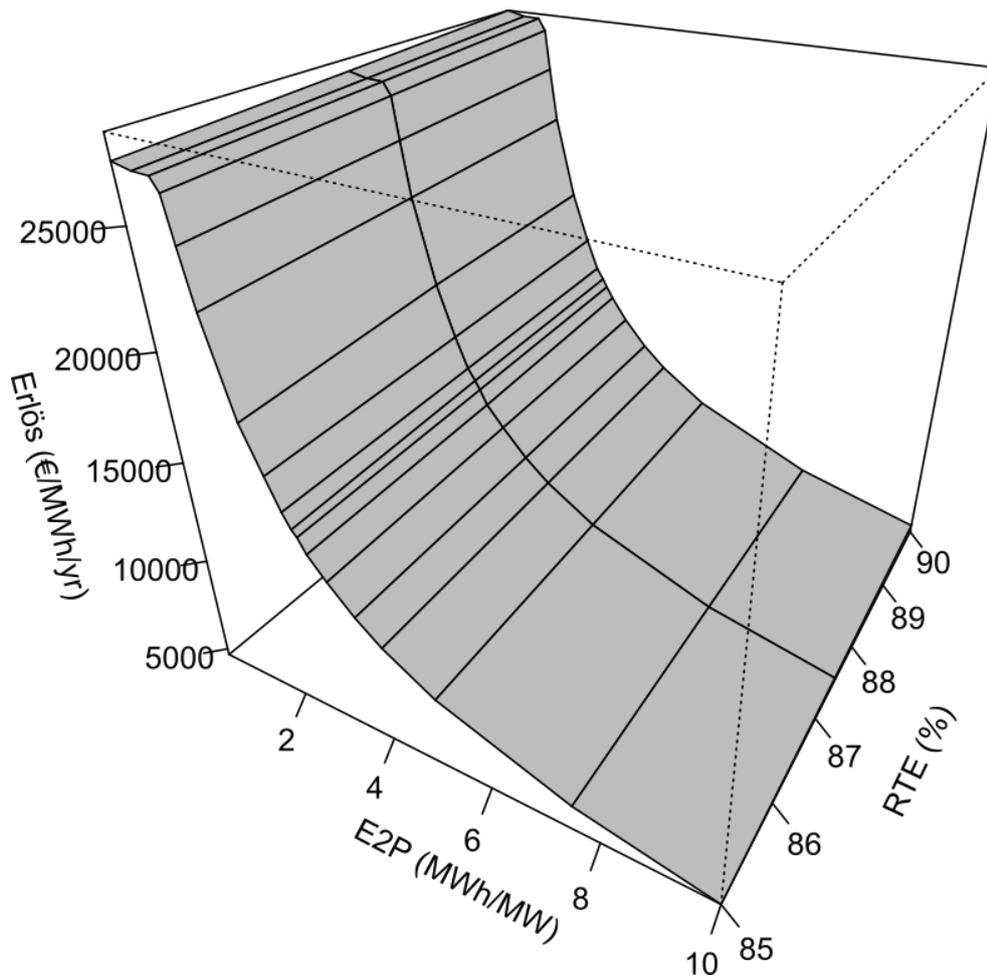


Abbildung 67: Darstellung der Erlöskurve von AMIRIS als Fläche im dreidimensionalen Raum

Die in Abbildung 67 dargestellten Erlöse wurden durch AMIRIS an bestimmten Stützstellen berechnet, die über die zweidimensionale, entlang der E2P-Achse und der RTE-Achse ausgedehnte Fläche verteilt sind. Die Stützstellen liegen an allen Kreuzungspunkten der E2P-Werte (0,1; 0,5; 0,85; 1; 1,1; 1,25; 1,65; 2; 2,25; 2,4; 2,5; 2,65; 3; 3,5; 4; 5; 7,5; 10) MWh/MW und der RTE-Werte (85%; 87,5%; 90%). Sie wurden so gewählt, dass dort die Dichte der Punkte besonders hoch ist, wo sich die Erlöskurve schnell ändert. Da entlang der RTE-Achse kaum Änderungen zu sehen sind und die RTE-Werte einen viel kleineren Bereich abdecken als die E2P-Werte, wurden auf der E2P-Achse deutlich mehr Stützstellen verwendet.

Wie in Kapitel 5.7.3 beschrieben, gibt es in SKIN-Energy einen Merit-Order-Markt, auf dem der Anbieter mit dem niedrigsten Effektivpreis p_{eff} (Preis pro Energiekapazität und Lebensdauer) zuerst den Abschlag erhält. Für stationäre Speicher gilt zwecks Kopplung an das AMIRIS-Modell die zusätzliche Bedingung, dass die potentiellen Erlöse $g(E2P, RTE)$ des Speichers seinen Effektivpreis p_{eff} übersteigen müssen, damit der Speicher für den Käufer Gewinn abwirft und abgesetzt werden kann, also:

$$p_{\text{eff}} = \frac{p \text{ [€]}}{E \text{ [kWh]} \cdot l \text{ [yr]}} < g(E2P, RTE) \text{ [€/kWh/yr]}$$

Dabei werden die in die SKIN-Energy-Simulation eingelesenen, an den Stützstellen errechneten Erlöse verwendet und bilinear interpoliert, um den Erlös für das jeweilige E2P und RTE möglichst genau abzuschätzen.

Leider ergibt sich hier der Trend, dass der Erlös g dann besonders hoch ist, wenn auch der Preis p hoch ist: g ist nämlich dann hoch, wenn das E2P besonders niedrig ist, also die Leistung P bei konstanter Energiekapazität E besonders hoch ist. Der Preis p wird aber stark durch den Leistungspreis getrieben und ist bei hoher Leistung P auch besonders hoch. Diese Effekte fallen zu Ungunsten der Speicherhersteller aus, weshalb sie es schwer haben, sich am Markt zu behaupten. Auf den anderen Absatzmärkten für portable Geräte, Werkzeuge, Elektrofahrzeuge und Mikrogeräte, die keine solche Beschränkungen haben, fällt es den Herstellern in der Simulation sehr viel leichter, ihre Produkte zu verkaufen.

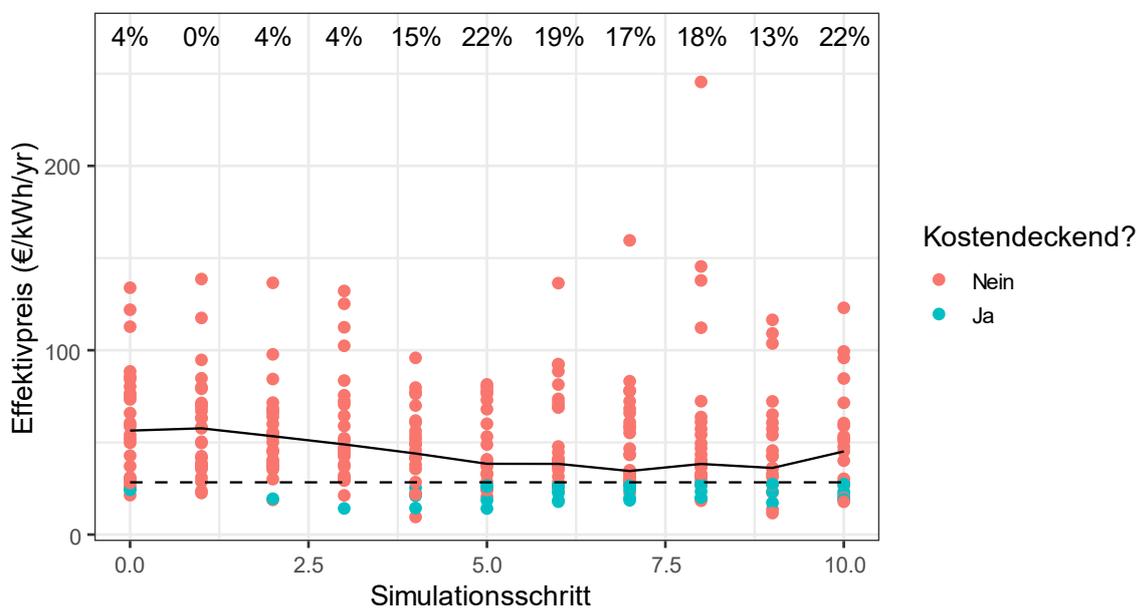


Abbildung 68: Exemplarische Simulationsdaten der Effektivpreise stationärer Batteriesysteme in SKIN-Energy

Diese Situation wird in Abbildung 68 visualisiert. Darin ist der von einem Hersteller verlangte Effektivpreis je als ein Punkt für 10 Simulationsschritte dargestellt, die durchgezogene Linie zeigt den Median, d. h. 50% des Ensembles liegt jeweils darüber und darunter. Die gestrichelte Linie ist der maximal mögliche Erlös von ca. 28,3 €/kWh/yr bei optimalen Werten für E2P und RTE. Nur ein Teil der Anbieter unterhalb dieser Linie hat überhaupt eine Chance, seine Produkte zu verkaufen. Welche Hersteller ihr Produkt theoretisch kostendeckend anbieten können, d. h. zu einem Preis, der unterhalb der angenommenen Erlöse liegt, ist durch grünlige Färbung der Punkte dargestellt, die übrigen Hersteller sind rötlich gefärbt. Die Zahlen am oberen Rand geben an, wie viel Prozent der simulierten Hersteller eine theoretische Chance haben, am Markt zu verkaufen: in der Regel weniger als ein Viertel. Nur ein Teil von ihnen kann tatsächlich produzieren und verkaufen, da sie ihre benötigten Input-Produkte beziehen müssen und auch selbst kostendeckend arbeiten müssen, was für sie umso

schwieriger ist, weil sie ihr Produkt ja günstig anbieten müssen und vergleichsweise geringe Einnahmen haben.

Dazu sollte aber angemerkt werden, dass diese strommarktorientierte techno-ökonomische Betrachtung viele Anwendungsfälle außer Acht lässt, die aktuell (und evtl. auch in Zukunft) den Markt für stationäre Batteriesysteme dominieren. Wenn man der obigen Argumentation folgt, dass selbst zu günstigeren Preisen als heute (Preise für 2030 angenommen) angebotene Speichersysteme mit den noch relativ guten Erlösen von 2016 kaum wirtschaftlich betrieben werden können, dann sollte es gar keine Hersteller für stationäre Speichersysteme geben. Es gibt zurzeit auch kaum Betreiber von stationären Batteriespeichern, die ihre Systeme zur Bereitstellung von Regelenergie nutzen (Hasche et al. 2016). Trotzdem werden stationäre Speicher angeboten und auch verkauft, vom kleinen System für Haushalte bis hin zu industriellen Großanlagen. Wie auch aus den Gesprächen der Expertenworkshops hervorging, spielen die von AMIRIS berechneten Erlöse für Dienstleistungen bei der Kaufentscheidung derzeit (noch) keine Rolle. Bei Heimanwendern z.B. geht es nicht um den Verkauf des Stroms an der Börse, sondern um die Maximierung ihres Eigenverbrauchs. Des Weiteren können zusätzliche Nutzen wie das „Gefühl“ der Autarkie oder tatsächlicher Autarkie bei Stromausfällen und den aktiven Beitrag zur Energiewende bzw. die Entlastung der Netze eine Rolle spielen, ohne dass diese Leistung explizit vergütet werden muss. Bei Großanlagen stehen verschiedene Kaufmotivationen im Vordergrund, etwa industrielle Tätigkeit an netzfernen Standorten oder erhöhte Anforderungen an die Qualität des Stroms, die das Netz nicht durchgängig liefern kann. Durch die Annahme der optimistischen Werte für die Erlöse der Systemdienstleistungen in den SKIN-Simulationen, werden diese Nutzen ein Stück weit mitberücksichtigt.

Die von AMIRIS prognostizierten im Vergleich zu 2016 deutlich niedrigeren Erlöse für 2030 deuten darauf hin, dass Batteriespeicher auch in Zukunft keine große Rolle bei der Regelleistung und anderen Systemdienstleistungen spielen werden, wenn wie vom Forschungsprojekt angenommen die Preise für Lithium-Ionen-Batterien nicht stark genug sinken, um die gesunkenen Erlöse auszugleichen. Wie schon in Kapitel 6 beschrieben, könnte dies ein Problem werden, wenn in Zukunft bei einem erhöhten Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung die konventionellen Regelenergieanbieter (i.d.R. fossile Kraftwerke) gar nicht mehr vorhanden sind oder nicht mehr ausreichen. Ein Ergebnis dieses Forschungsprojekts könnte also der Hinweis darauf sein, dass es hier weiterer Forschung bedarf, um die Speicher schneller noch günstiger zu machen. Oder aber, da dies ohne einen unvorhersehbaren revolutionären Durchbruch in der Forschung nicht in Aussicht ist, eine weitere Anpassung des Strommarktdesigns nötig werden könnte, um Anreize für Batteriekraftwerke zur Bereitstellung von Regelenergie zu setzen.

7.3 Technische Daten zur Produktcharakterisierung

Teil der Entwicklung des SKIN-Energy-Modells war es, die technischen Parameter der Endprodukte, also Lithium-Ionen-Batterien, in geeigneter Form abzubilden, um so einerseits eine Verknüpfung zwischen dem in SKIN modellierten Wissen und technischer Innovation herzustellen. Andererseits wurde die technische Charakterisierung der Produkte für die

Kopplung ans AMIRIS-Modell gebraucht (siehe Kapitel 7.2), das für stationäre Speicher Aussagen über die Wirtschaftlichkeit bzw. Marktfähigkeit treffen kann, indem es die am Strommarkt durch Systemdienstleistungen erwirtschafteten Erlöse berechnet. Die Höhe des Erlöses hängt aber von den technischen Eigenschaften des Batteriespeichers ab, insbesondere von der Energie- und Leistungskapazität sowie der Effizienz.

Die zu Grunde liegende Idee bei der Produktcharakterisierung war, dass bestimmtes Wissen zu Verbesserungen eines Produkts führen kann. Wissen, das zu erfolgreicherer Produkten führt, setzt sich im evolutionären SKIN-Modell durch. Schon im Basis-SKIN gibt es immer „unnützes“ Wissen (jedenfalls für den Moment), das z. B. dazu führt, dass Input-Produkte gebraucht werden, die momentan am Markt nicht verfügbar sind, oder dass ein Produkt hergestellt wird, das momentan niemand braucht. „Nutzbares“ Wissen dagegen greift auf eine funktionierende Lieferkette zurück und generiert ausreichenden Profit, damit die Firma überleben kann. Jedoch haben die Produkte im Basis-SKIN keine Eigenschaften außer ihrer ID. Dies wurde nun in SKIN-Energy geändert und die Produkteigenschaften oder technischen Parameter wurden, angelehnt an die Bestimmung der Produkt-ID im Basis-SKIN, aus dem Wissen zufällig, aber deterministisch abgeleitet, siehe Kapitel 5.7.

Da es innerhalb des Feldes der Lithium-Ionen-Batterien eine Vielfalt von Zellchemien gibt – wie z. B. LCO (Lithium-Cobalt-Oxid), LMO (Lithium-Mangan-Oxid), NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid), NCA (Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid) oder LFP (Lithium-Eisen-Phosphat)¹⁴ – und diese Zellchemien durchaus beachtliche Unterschiede in den technischen Eigenschaften der Zellen nach sich ziehen (siehe z. B. Tabelle 4 in Rahimzei et al. 2015), wurde zunächst angenommen, dass diese Zellchemie-Typen zwingend in der Simulation unterschieden werden müssten. Um statistische Verteilungen für die Parameter der verschiedenen Zellchemie-Typen zu erhalten, wurde in einem aufwendigen Prozess an Hand von im Netz gefundenen Datenbanken, Tabellen und Datenblättern eine umfangreiche Tabelle mit bis zu 26 technischen Parametern von 185 auf dem Markt erhältlichen Lithium-Ionen-Zellen von 27 Herstellern zusammengestellt. Eine Schwierigkeit bestand darin, dass Hersteller häufig nicht kommunizieren, welche Zellchemie ihrer Zelle zu Grunde liegt. Nur bei 115 der 185 Zell-Modelle war die Zellchemie durch Quellen bekannt, bei 57 weiteren wurde durch bestimmte ungesicherte Hinweise oder die Parameter selbst eine Zellchemie angenommen, sodass immerhin 172 der 185 Zellen jeweils einer Zellchemie-Gruppe zugeordnet werden konnten. Daraus ergaben sich empirische statistische Verteilungen für wichtige technische Parameter wie Energiedichte oder Lebensdauer. Diese Verteilungen sollten mittels Kernel-Density-Estimation verallgemeinert werden und weiterhin durch Annahmen von Experten in die Zukunft (z. B. ins Jahr 2030) extrapoliert werden, um die zukünftige technologische Innovation abzubilden. Diese synthetisierten, aber empirisch basierten statistischen Verteilungen sollten dann in SKIN benutzt werden, um das Wissen der Firmen entsprechend zufällig auf die technischen Parameter abzubilden.

¹⁴ In der Regel bezieht sich die Bezeichnung der Zellchemie auf das verwendete Material der Kathode, d.h. der positiven Elektrode der Zelle.

Es stellte sich jedoch heraus, dass dieser Ansatz zu komplex wurde, außerdem stark fehlerbehaftet und auch in Bezug auf die Ausrichtung und den Detailgrad der Simulation nicht sinnvoll war. Die Programmierung von SKIN-Energy wäre deutlich komplexer geworden, wenn entlang der Wertschöpfungskette die Zellchemien und technischen Parameter hätten „vererbt“ werden müssen. Wenn z. B. eine Zelle vom Typ „LCO“ bestimmte Eigenschaften mitbringt, die sich dann auch im Batteriesystem, in dem die LCO-Zelle verbaut wird, niederschlagen. Außerdem war unklar, ob verschiedene Zellchemien sinnvoll gemischt werden könnten und welche Konsequenzen das für die technischen Parameter des Endprodukts Batterie gehabt hätte. Noch komplizierter wäre wohl die Abbildung der Zellchemien auf die Märkte gewesen: Sind z. B. vorrangig NMC-Zellen für Elektromobilität geeignet? Nutzen portable Geräte ausschließlich LCO-Zellen? Oder gibt es auf allen Gebieten eine große Vielfalt der Zellchemien? Darüber fehlte es an verlässlichen Daten.

Ein einfacherer Ansatz, der von den Projektpartnern am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen gemeinsam mit IQIB entwickelt wurde, stellt nicht die Zelle, ihre Chemie und ihre Eigenschaften in den Vordergrund, sondern denkt vom Endprodukt Batterie/Batteriesystem und von der Anwendungsseite her. Für die Anwendung ist es letztendlich nicht ausschlaggebend, welche Zellchemie verbaut wurde, und da es auch innerhalb der Zellchemie-Familien viele Möglichkeiten gibt, technische Parameter einzustellen (Quelle: Persönliche Gespräche mit den Projektpartnern vom ISEA, RWTH Aachen), ist die Zellchemie kein hinreichender Indikator für die Eigenschaften des Endprodukts Batterie. Aus diesem Grund macht es in diesem Fall Sinn, die Zellchemie wegzubstrahieren und die Technologie Lithium-Ionen-Batterie mit der gesamten Spannbreite ihrer technischen Parameter in ihrer Gesamtheit zu modellieren.

Ausgangspunkt der Beschreibung der technischen Parameter war der sogenannte *Ragone-Plot* (Christen und Carlen 2000), ein Diagramm der Leistungsdichte von Energiespeichern gegen ihre Energiedichte, siehe auch Kapitel 5.7.2. Der im Projekt verwendete Ragone-Plot ist in Abbildung 69 nochmals dargestellt. Jede einzelne Batterie oder Zelle entspricht einem Punkt im Ragone-Plot. Eine Batterie-Technologie in ihrer Gesamtheit bevölkert im Ragone-Plot ein bestimmtes Band, bzw. eine bestimmte Fläche, innerhalb der Vertreter dieser Technologie zu finden sind. Durch die Fläche im Ragone-Plot wird also das gesamte Spektrum der zentralen technischen Parameter Energiedichte und Leistungsdichte beschrieben, und zwar in Abhängigkeit voneinander: Bei einer bestimmten Energiedichte (auf der x-Achse aufgetragen) liegt die Leistungsdichte in einem bestimmten Wertebereich (entlang der y-Achse), der für jede Energiedichte anders sein kann, ebenso andersherum bei konstanter Leistungsdichte. Es wird also eine vorhandene Korrelation von Energie- und Leistungsdichte berücksichtigt.

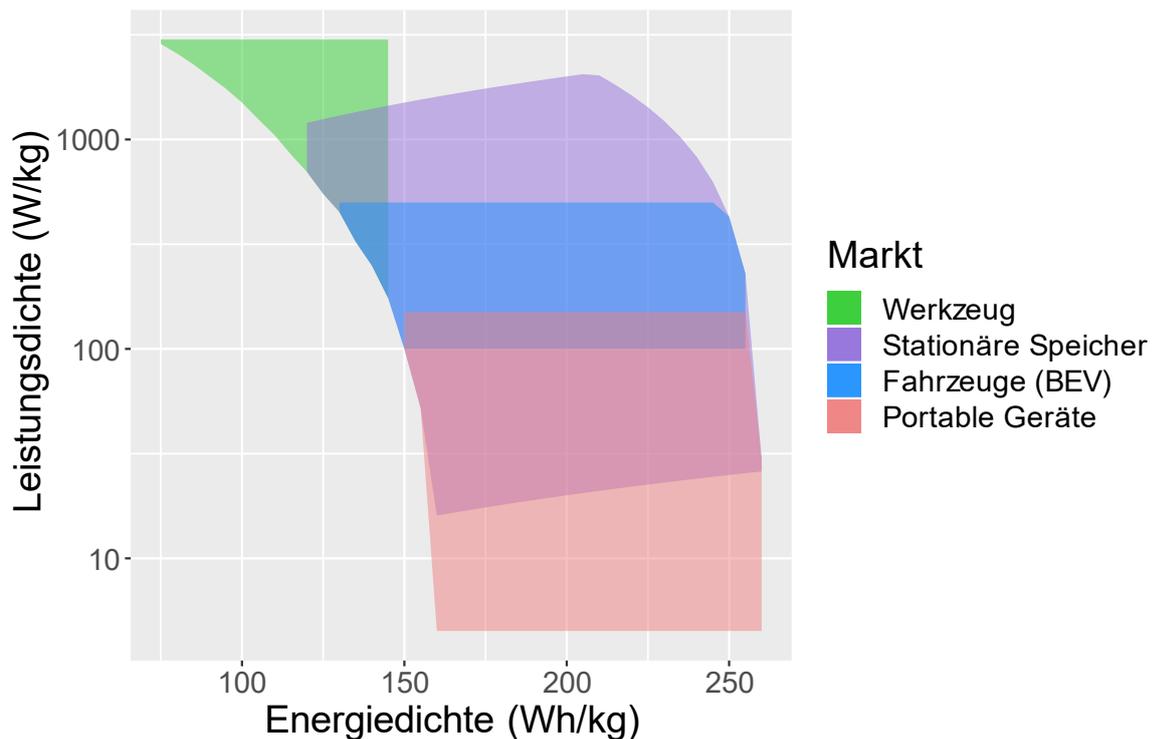


Abbildung 69: Der Ragone-Plot (abgeleitet von Produktdatenblättern aus den Jahren 2016 – 2017) der in SKIN-Energy simulierten Lithium-Ionen-Batterien, mit Flächen für die unterschiedlichen Märkte. Dies ist eine Kopie von Abbildung 31

Der besondere Nutzen des Ragone-Plots besteht darin, dass im Gegensatz zur Unterscheidung der Zellchemie nun eine Zuordnung zu den Absatzmärkten der Batterien (Beschreibung der Märkte in Kapitel 5.7.2) erfolgen kann. Jeder Absatzmarkt benötigt je nach Anwendungszweck andere Energie- und Leistungsdichten. Teilbereiche der gesamten Lithium-Ionen-Fläche können den Anwendungszwecken zugeordnet werden. So benötigen Werkzeuge keine hohen Energiedichten (das Gerät wird meist nur für einige Minuten am Stück verwendet), aber sehr hohe Leistungsdichten, um die gewünschte Aufgabe, z. B. das Bohren eines Lochs in hartem Material, zu erfüllen. Stationäre Speicher decken einen sehr großen Bereich ab, sowohl was Energie-, als auch was Leistungsdichte betrifft. Rein batterieelektrische Fahrzeuge (Hybridfahrzeuge ausgenommen) brauchen für die Reichweite eher hohe Energiedichten und mittlere Leistungsdichten. Sie erreichen trotzdem hohe Leistung, weil die Batterie mehr Volumen einnehmen kann als bei Werkzeugen. Portable Geräte wie Mobiltelefone, Tablets oder Laptops brauchen keine hohe Leistung (sie verbrauchen nur wenige Dutzend Watt oder weniger), aber v. a. hohe Energiedichten, da die Geräte kompakt sein, aber trotzdem mindestens 24 Stunden im Dauerbetrieb ohne Nachladen auskommen sollen.

Der entwickelte Ragone-Plot beruht auf Datenblättern aus den Jahren 2016 – 2017 und wurde dem IQIB von den Partnern des ISEA (RWTH Aachen) zur Benutzung in SKIN-Energy zur Verfügung gestellt. Er bildete die Basis der Beschreibung der technischen Parameter. Über den Ragone-Plot werden in der Simulation zunächst Energie- und Leistungsdichte einer simulierten Batterie zufällig festgelegt. Es wird also ein beliebiger Punkt auf der Fläche des Ragone-Plots

zufällig, aber durch das eingesetzte Wissen vorherbestimmt, ausgewählt (siehe auch Kapitel 5.7.1 und 5.7.2). Anhand der Teilflächen im Ragone-Plot wird der angestrebte Absatzmarkt bestimmt, bei Überlappung mehrerer Teilflächen erfolgt eine Zufallsentscheidung. Die statistischen Verteilungen der übrigen technischen Parameter der simulierten Batterie sind für jeden Absatzmarkt einzeln definiert, deshalb muss der Produzent sich erst für einen Markt entscheiden, dann können die Parameter zufällig aus dem Wissen heraus bestimmt werden. Diese Entscheidung hängt auch vom eingesetzten Wissen ab. Korrelationen der technischen Parameter über alle Zellchemien hinweg sind, abgesehen von Energie- und Leistungsdichte, eher schwach ausgeprägt und es können keine verlässlichen Aussagen darüber getroffen werden.¹⁵ Daher wurden die auf Energie- und Leistungsdichte folgenden Parameter unabhängig voneinander behandelt. Diese weiteren technischen Parameter (Beschreibungen in Kapitel 5.7.1) waren:

- Kalendarische Lebensdauer (CL)
- Zyklenlebensdauer (FCE)
- Effizienz (RTE)
- Energiepreis (EP)
- Leistungspreis (PP)
- Batteriemasse (M)

Für jeden der Parameter wurde von den Partnern des ISEA ein plausibler Wertebereich, ca. für das Jahr 2030 und basierend auf Daten von 2016 – 2017, festgelegt. Diese Abschätzungen beruhten u. a. auf der Mitarbeit an der Studie „Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030“ der International Renewable Energy Agency (IRENA) (vgl. Tabelle in Annex 1 in IRENA, 2017), weichen aber teilweise davon ab bzw. wurden aktualisiert. Den technischen Parametern kann über alle Zellchemien hinweg keine statistische Verteilung zugeordnet werden. Die Verteilung hängt von der spezifischen Zellchemie sowie dem Anwendungsbereich ab und muss daher in diesem Zusammenhang für eine umfassendere Kategorie der "Lithium-Ionen-Batterie" über die Annahme einer Gleichverteilung vereinfacht abgebildet werden. In Abbildung 70 und Tabelle 27 sind die gleichverteilten Bereiche der sechs technischen Parameter für die verschiedenen Märkte dargestellt.

Auch der Preis des produzierten Endgeräts, mit dem der Hersteller es auf den Markt bringt, wird wie ein technischer Parameter behandelt. Für Endprodukthersteller ist der Preis also über die Modellierung der technischen Parameter kalibriert (siehe auch Kapitel 5.6, Ende). Der tatsächliche Preis p des Produkts ergibt sich aus der Addition des Energiepreises EP und des Leistungspreises PP : $p \text{ [€]} = EP \text{ [€/Wh]} \times E \text{ [Wh]} + PP \text{ [€/W]} \times P \text{ [W]}$, jeweils multipliziert mit der Energiekapazität E und der maximalen Leistung P der Batterie.

Zusätzlich zu den vier Absatzmärkten für Lithium-Ionen-Batterien mit „großen“ Zellen, also etwa von der Bauart 18650 (zylindrisch, Durchmesser 18 mm, 65 mm hoch), musste ein weiterer Markt für den Absatz von Mikrozellen in „Mikrogeräten“ eingeführt werden, siehe

¹⁵ Dies zeigte sich zum einen in der Auswertung der Daten zu 185 Zellen, die am IQIB durchgeführt wurde, und wurde zum anderen von der Expertenmeinung der Partner am ISEA in persönlicher Kommunikation bestätigt.

Kapitel 5.7.2. Da hierfür keine abgeschätzten Wertebereiche vorlagen, die Wertebereiche aber i.d.R. nur zwischen Portabel/Werkzeug und Stationär/BEV unterscheiden, wurde ad hoc angenommen, dass die Wertebereiche der Mikrogeräte denen von portablen Geräten/Werkzeugen entsprechen. Es wurde also jeweils derselbe Bereich wie bei den Portablen Geräten für die Mikrogeräte angenommen, mit Ausnahme der Masse, die zwischen 1 g und 10 g pro Zelle angenommen wurde. Da für Mikrogeräte nicht der Ragone-Plot benutzt wird, werden Energie- und Leistungsdichte ebenfalls gleichverteilt aus Bereichen bestimmt: die Energiedichte liegt zwischen 150 und 260 Wh/kg, was genau dem Bereich der portablen Geräte entspricht, die Leistungsdichte zwischen 4,5 und 26 W/kg, was etwa der Hälfte der Fläche der portablen Geräte im Ragone-Plot in Abbildung 69 entspricht. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass die Mikrogeräte verglichen mit portablen Geräten zwar eine ähnlich lange oder höhere Akkulaufzeit aufweisen sollen, aber noch weniger Leistung benötigt wird.

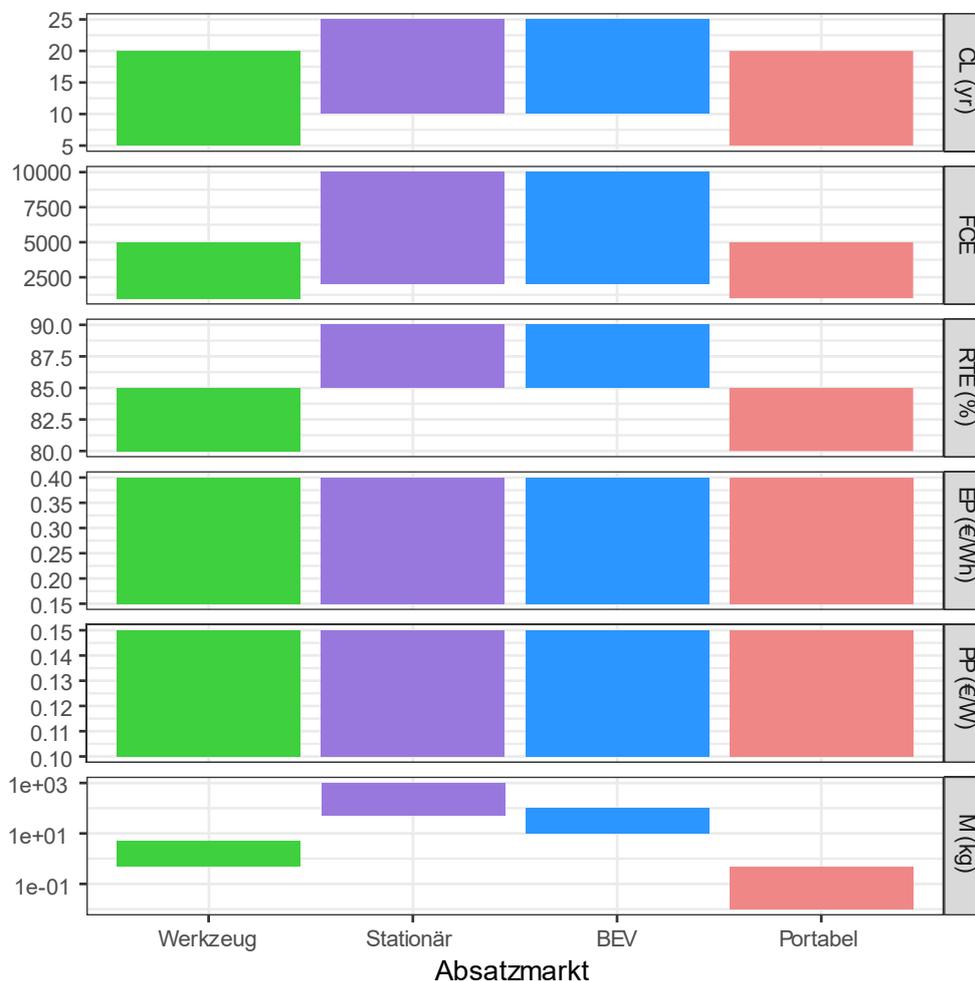


Abbildung 70: Die Wertebereiche der technischen Parameter für die verschiedenen Absatzmärkte als Grafik, für Bedeutung der Abkürzungen siehe Text

Tabelle 27: Die Wertebereiche der technischen Parameter für die verschiedenen Absatzmärkte als Tabelle, für Bedeutung der Abkürzungen siehe Text

	CL (yr)	FCE	RTE (%)	EP (€/Wh)	PP (€/W)	M (kg)
Werkzeug	5 – 20	1000 – 5000	80 – 85	0,15 – 0,40	0,1 – 0,15	0,5 – 5
Stationär	10 – 25	2000 – 10000	85 – 90	0,15 – 0,40	0,1 – 0,15	50 – 1000
BEV	10 – 25	2000 – 10000	85 – 90	0,15 – 0,40	0,1 – 0,15	10 – 100
Portabel	5 – 20	1000 – 5000	80 – 85	0,15 – 0,40	0,1 – 0,15	0,01 – 0,5

Da sich bei der Beschreibung der technischen Parameter der Fokus von der Zelle zum Endprodukt Batterie verschoben hat, werden die technischen Parameter auch erst bei den Endproduktherstellern festgelegt. Die Parameter ergeben sich also über den in Kapitel 5.7 beschriebenen Mechanismus aus dem Wissen der Endprodukthersteller. Eingangsprodukte, also auch Zellen, bringen im Modell keine technischen Eigenschaften mit. Die technischen Eigenschaften der Zellen, die diese wiederum bereits aus ihren chemischen Eingangsprodukten erhalten, werden nicht entlang der Wertschöpfungskette propagiert. Für diese Abstraktion und Vereinfachung der Realität wurde sich im Projekt bewusst entschieden. Die korrekte Beschreibung der technischen Parameter durch die gesamte Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zur Batterie wäre viel zu komplex und fehleranfällig gewesen und hätte auch zu sehr starren Strukturen geführt, die dem Grundprinzip von SKIN, dass alle Produkte zufällig kombiniert werden können und daraus entstehender möglicher zusätzlicher Innovationen, widersprächen.

7.4 Ansiedlung einer Li-Ionen Zellproduktion - Erkenntnisse aus der Analyse der globalen Wind- und Photovoltaikindustrie

Marktanalysen der Li-Ionen Batterieindustrie lassen erkennen, dass die Produktion eines wesentlichen Bestandteils der Wertschöpfungskette, die Li-Ionen Batteriezelle, in Deutschland und der EU kaum vorhanden ist. 2019 waren 97% der globalen Li-Ionen Zellproduktion in Asien verortet, 60% der Produktion entfielen auf China, 17% auf Japan und 15% auf Korea (siehe Pillot 2019, Lebedeva et al 2016). Gründe für diese Verteilung der Produktionskapazitäten liegen vermutlich vor allem in der Nachfrageentwicklung für Li-Ionen Batterien. Die Markteinführung der Lithium-Ionen-Batterie im Jahr 1991 war getrieben durch die Nachfrage im Bereich tragbarer elektronischer Geräte der Konsumgüterbranche (Laptops, Handys, etc.). Da diese Güter in weiten Teilen durch Unternehmen im asiatischen Raum gefertigt werden, sind auch die Unternehmen, die in diesem Segment der Batterieherstellung eine besonders hohe Relevanz haben, in Asien zu finden.

Seit etwa 2010 kann eine steigende Relevanz der Mobilitätsbranche in der Nachfrage nach Li-Ionen Batterien beobachtet werden.¹⁶ Diese Entwicklung hat zu einer völlig neuen Dynamik in diesem Markt geführt. Im Jahr 2018 betrug der Anteil des Mobilitätssektors an der globalen

¹⁶ Auch in der Vergangenheit sind Batterien in diesem Segment insbesondere als Starterbatterien eingesetzt worden. Hierfür sind jedoch typischer Weise Bleiakumulatoren im Einsatz.

Nachfrage nach Li-Ionen Batterien bereits 64%, wobei allein 44% auf den chinesischen Mobilitätssektor entfielen (Pillot 2019). Es ist davon auszugehen, dass sich dieses exponentielle Nachfragewachstum noch eine Weile fortsetzen wird und auch die Nachfrage aus Europa deutlich ansteigen wird. Die Frage, die sich nun in Europa stellt, ist, ob es möglich sein wird die Produktion von Li-Ionen Zellen in Europa nachhaltig anzusiedeln.

Um sich dieser Fragestellung zu nähern, wurde im Rahmen dieses Projektes eine Analyse der globalen Industrieentwicklung im Bereich der Wind- sowie der PV-Industrie durchgeführt. Ziel war es dabei Hinweise darauf zu finden, welche Faktoren für eine verspätete Industrieansiedlung (*industry catch up*) entscheidend waren.

Die Theorie der verspäteten Industrieansiedlung (*industry catch up*) in einem Land hat eine Vielzahl von Facetten, die generell auch bei der Entwicklung neuer Produkte relevant sind. Hier spielen zum einen die von Porter in seinem Diamant Modell beschriebenen Faktoren eine Rolle (Porter 1990), aber auch die Frage der nationalen Innovationssysteme (Freeman 1987, Lundvall 1992, Nelson 1993). Lee und Malerba 2017 beschreiben darüber hinaus drei Entwicklungen, die dazu beitragen können, dass es einem Land möglich wird zu einem späten Zeitpunkt in einer Industrieentwicklung eine erfolgreiche Ansiedlung von Unternehmen vorzunehmen. Diese sogenannten „*windows of opportunity*“ (Perez und Soete 1988) werden laut Lee und Malerba 2017 entweder durch die Einführung eines neuen Technologiezweiges, durch die Nachfrage eines neuen Marktsegments oder durch politische Interventionen in Form von verschiedenen Förderinstrumenten ermöglicht.

Die beiden in diesem Projekt untersuchten Sektoren (Wind und PV) sind auf Grund ihrer sehr unterschiedlichen Verläufe in Deutschland ausgewählt worden. Beide Industrien sind in einem sehr frühen technologischen Entwicklungsstadium in Deutschland entstanden, jedoch ist es einigen anderen Ländern gelungen zu einem späteren Zeitpunkt erfolgreich in die beiden Märkte einzusteigen. Der Unterschied, zwischen beiden Industriezweigen ist, dass deutsche Unternehmen in der Windindustrie weiterhin eine nennenswerte Rolle im globalen Markt innehaben, im Fall der Photovoltaik (PV) konnte Deutschland hingegen seine führende Rolle nicht verteidigen. Heute spielt die deutsche PV-Industrie im Bereich der Zell- und Modulproduktion global nur noch eine untergeordnete Rolle. Ziel der Analyse ist es daher die Unterschiede in den industriellen Entwicklungen zu verstehen und Erkenntnisse daraus für eine Ansiedlung der Li-Ionen Zellproduktion in Europa zu gewinnen.

Für die Analyse der Industriezweige wurde methodisch auf das Konzept der Industrielbenszyklen zurückgegriffen (Klepper 1997). Dieses Konzept beschreibt den Verlauf verschiedener Indikatoren in den verschiedenen Entwicklungsphasen einer Industrie (vgl. Abbildung 71). Im Wesentlichen umfasst dieses Konzept drei Phasen.

Die frühe Sondierungsphase einer Industrie, zeichnet sich durch ein geringes Marktvolumen, Unsicherheit bezüglich der vom Markt geforderten technologischen Spezifikation, einfaches Produktdesign und kaum Automatisierung im Produktionsprozess aus. In Erwartung zukünftiger Marktpotentiale treten Unternehmen mit unterschiedlichen technologischen Konzepten in den Markt ein, und die Volatilität der Marktanteile ist hoch.

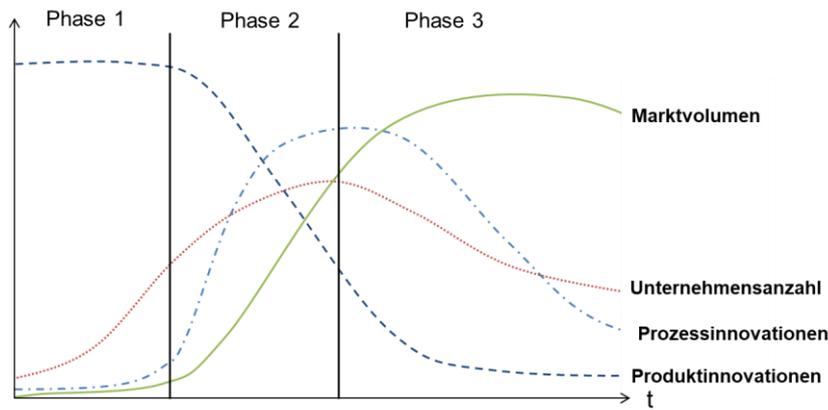


Abbildung 71: Entwicklung von Indikatoren in einem Industrielbenszyklus (ILC), basierend auf Klepper 1997.

Die zweite Phase wird als Wachstumsphase bezeichnet, in der sich das dominante Design einer Technologie herauskristallisiert. Infolgedessen nimmt die Zahl der Produktinnovationen ab, während Prozessinnovationen und damit einhergehend die Automatisierung der Produktion zunehmen (Abernathy und Utterback 1975). Die Zahl der Neueintritte in den Markt nimmt ab und es kommt zu Marktberichtigungen, da sich bestimmte technologische Stränge als unrentabel oder zumindest unterlegen erwiesen haben.

Die dritte Phase beschreibt die Reifephase einer Industrie. Das Marktwachstum verlangsamt sich, Innovationen sind weniger relevant und die Zahl der Unternehmen nimmt ab, während sich die Marktanteile stabilisieren. Die Konsolidierung der Unternehmen, die in dieser Phase zu beobachten ist, wird nicht nur durch die Unterlegenheit technologischer Lösungen, sondern durch den Drang zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz vorangetrieben. Ergebnisse verschiedener Branchenstudien deuten in dieser Phase auf First-Mover-Vorteile mit längeren Überlebensraten der frühen Marktteilnehmer hin (siehe auch Klepper 2002).

Eine vierte Phase, welche das Ausscheiden einer Industrie beschreibt, spielt in der Industrielbenszyklustheorie bislang keine wesentliche Rolle. Ein Grund dafür könnte sein, dass Branchen, die bisher mit Hilfe der ILC-Theorie untersucht wurden, dieses Stadium noch nicht erreicht hatten. Auch geschieht das Ausscheiden eines Industriezweiges vom Markt nicht so schnell wie das für ein Produkt der Fall ist. Sowohl Technologien als auch Industrien bestehen aus einer Reihe von Produkten. Ihre Entwicklung könnte daher als die Summe verschiedener Produktlebenszyklen beschrieben werden (Ford und Ryan 1981, Menhart et al. 2004). Daher werden Industrien typischer Weise erst dann in die Phase des Ausscheidens eintreten, wenn eine ganze Technologie für den Markt entbehrlich wird.

Die Indikatoren, welche im Rahmen der Betrachtung der Industrielbenszyklen analysiert werden, sind das Marktvolumen, die Anzahl der Unternehmen sowie die Anzahl an Innovationen in den Produkten und den Produktionsprozessen (vgl. Abbildung 71).

Bezüglich der Entwicklung der Innovationen in Produkten sowie Produktionsprozessen, kann auf zwei unterschiedliche Theorien zurückgegriffen werden. Das Konzept von Abernathy und Utterback (1975) beschreibt wie frühe Produktinnovationen nach der Identifikation des dominanten Designs immer mehr durch Prozessinnovation abgelöst werden (vgl. Abbildung

72). Dieser Zusammenhang konnte in einer Vielzahl von Produkten nachgewiesen werden. Mittlerweile besteht in der Wissenschaft Einigkeit darüber, dass diese Abfolge von Innovationen typisch für Massenprodukte ist. Grund für diese Einschränkung sind Arbeiten von Davies (1997), der ein weiteres Konzept zur Beschreibung von Innovationstätigkeiten entwickelt hat. Dieses Konzept legt nahe, dass Produktinnovationen ihre Bedeutung im Laufe des Produktlebenszyklus beibehalten können. Nach dieser Theorie ist ein komplexes Produkt durch eine Zusammensetzung von definierten Komponenten gekennzeichnet. Das Äquivalent des dominanten Designs eines Produktes ist erreicht, wenn sich die dominante Architektur eines solchen Produktes herausgebildet hat. Im Laufe des Produktlebenszyklus finden Produktinnovationen in verschiedenen Komponenten statt. Der Innovationschwerpunkt verschiebt sich daher im Laufe der Zeit zwischen den Komponenten, während die allgemeine Architektur des komplexen Produktes bestehen bleibt.

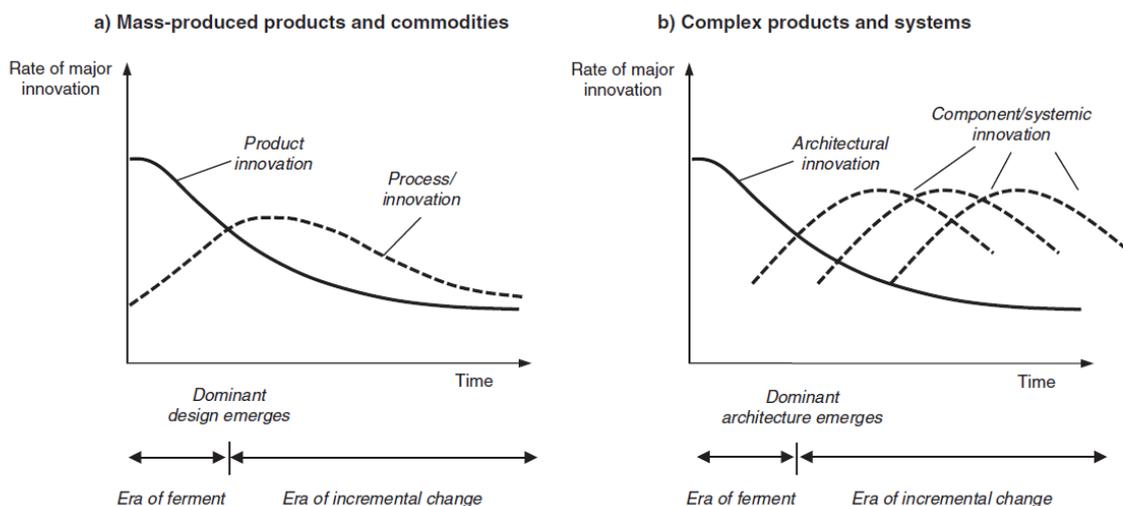


Abbildung 72: Zwei gegensätzliche Modelle von Innovation im Technologie-Lebenszyklus: a) Massenprodukte; b) komplexe Produkte und Systeme (Huenteler et al. (2016) based on Abernathy and Utterback (1988) und Davies (1997)).

Eine Patentanalyse von Huenteler et al. (2016) hat sich spezifisch der Fragestellung gewidmet welche Form von Innovationsmuster in der Wind- und PV-Industrie vorzufinden ist. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die PV-Industrie dem Lebenszyklusmuster von Massenprodukten folgte wohingegen die Windturbinentechnologie unter die Kategorie der komplexen Produkte fällt. Für den Fall der Li-Ionen Batterietechnologie kann davon ausgegangen werden, dass es sich auch hier eher um ein Massenprodukt handelt, bei dem Innovationen in den Produktionsprozessen einen wesentlichen Beitrag im Innovationsgeschehen leisten.

Bezüglich der Indikatoren Marktvolumen sowie Unternehmensanzahl wurden für die beiden Industriesparten Wind und Photovoltaik umfangreiche Daten zusammengetragen, um eine Analyse der Industrielbenszyklen zu ermöglichen. Für die Windindustrie wurde der Fokus auf Windenergieanlagenhersteller gelegt. Im Fall der Photovoltaik wurde die Entwicklung der PV-Zellhersteller in den Mittelpunkt der Untersuchung gestellt. Diese Wertschöpfungsstufe ist mit der der Li-Ionen Batteriezellproduktion vergleichbar.

Ein erster Aspekt, der bei der Festlegung der zu untersuchenden Wertschöpfungsstufe deutlich wurde ist, dass die Strukturen der Industrien sehr unterschiedlich sind. Während in der Windindustrie Unternehmen existieren, die eine Zusammenführung des finalen Produktes vollziehen, werden in der Photovoltaik-Industrie unterschiedliche Komponenten für den Vertrieb über den Groß- und Einzelhandel zur Verfügung gestellt. Die finale Zusammenführung der einzelnen Komponenten zu einer funktionsfähigen PV-Anlage erfolgt meist erst im Rahmen der Installation durch Handwerker. Einzelne PV-Modulhersteller haben im Laufe der Zeit jedoch ihre Geschäftsmodelle dahingehend verändert, dass sie neben der Produktion einzelner Komponenten auch in die Planung und Installation von PV-Freiflächenanlagen eingestiegen sind. Auf diesem Wege konnten sich diese Unternehmen einen relativ konstanten Absatz eines Teiles ihrer Produktion sichern.

Im Falle der Li-Ionen Batterieindustrie ist die Einordnung in eine der beiden Kategorien nicht eindeutig. Einerseits ist eine Batterie in den meisten Fällen als Energiespeichermedium nur eine Komponente in einem finalen Produkt. Andererseits gibt es eine Reihe von Unternehmen, die neben der Batterieproduktion auch tragbare elektronische Geräte herstellt, so wie beispielsweise Panasonic. In den meisten Fällen unterscheiden sich die Batteriehersteller und insbesondere die Batteriezellhersteller von den Herstellern der Konsumgüter, die Batterien nutzen. Eine andere Tendenz zeichnet sich hingegen im Mobilitätssektor ab. Ein Beispiel ist hier das chinesische Unternehmen BYD, welches als Batteriehersteller entstanden ist und sich zu einem bedeutenden Hersteller von Fahrzeugen entwickelt hat. Man könnte nun argumentieren, dass dies der Strategie der PV-Modulhersteller gleichzusetzen ist, die eine Expansion in die nächsthöhere Wertschöpfungsstufe vorgenommen haben, um ihren eigenen Absatz zu sichern. Neben BYD gibt es aber mittlerweile auch zahlreiche andere Beispiele wie Tesla, die gemeinsam mit Panasonic eigene Fertigungsstandorte eröffnen oder auch Kooperationen zwischen verschiedenen deutschen Automobilherstellern mit Batteriezellherstellern (TESLAMAG 2020, IWR 2019a, IWR 2019b, IWR 2020).

Die Analyse der Industrielbenszyklen der Wind und PV-Zellindustrie zeigen global sehr unterschiedliche Verläufe (siehe Abbildung 73). Während die Industrieentwicklung der Windturbinenhersteller weniger auf einer globalen Ebene erklärt werden kann, zeigt der Verlauf der PV-Zellherstellung eine Entwicklung, wie sie im Rahmen der Theorie der Industrielbenszyklen zu erwarten gewesen ist.

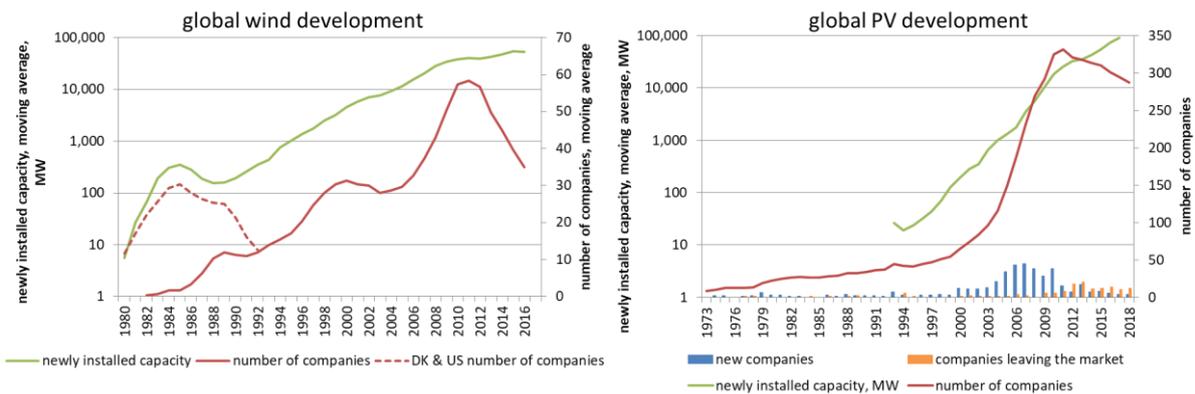


Abbildung 73: Überblick über den globalen Industrielbenszyklus der Wind- und PV-Zellindustrie (eigene Darstellung basierend auf Daten von Wind: GWEC 2018, EPI 2018, Danish Energy Agency 2017, The Wind Power 2018, Jaeger 2013, Berkeley LAB 2017; PV: IEA PVPS 2019; eigene Datenrecherche der PV Zellhersteller)

Eine genauere Untersuchung der Windindustrie hat ergeben, dass der typische Verlauf der Industrieentwicklung nicht auf der globalen Ebene zu identifizieren war, sondern vielmehr auf nationaler Ebene stattfand (vgl. O’Sullivan 2020). Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Schaffung von Wissen durch Innovationen eine starke globale Wirkung entfaltet. Wenn es aber um die Entwicklung einzelner Unternehmen geht, so spielen in diesem Technologiesegment nationale Marktentwicklungen für die Unternehmen eine größere Rolle als die globale Marktentwicklung. Stabile Entwicklungen der Windmärkte, wie in Deutschland, haben dazu geführt, dass die Industrieentwicklung den Verlauf gezeigt hat, den die Industrielbenszyklustheorie erwarten lässt. Andere, instabile nationale Marktentwicklungen, die insbesondere durch sich ständig ändernde politische Rahmenbedingungen geprägt waren, haben dazu geführt, dass die nationale Industrie frühzeitig einer massive Marktberäuberungen aufgesetzt war, die einem Ausscheiden der Industrie gleichkam. Als Resultat hat in den meisten Ländern nur ein Unternehmen überlebt, welches im Nachgang eine sehr hohe Marktmacht im weiteren Verlauf des nationalen Windenergieausbaus erlangte. Als Beispiele sind hier Vestas für Dänemark zu erwähnen und GE für die USA. Dies führte auch dazu, dass nach einer Wiederbelebung der nationalen Nachfrage nach Windenergieanlagen so gut wie keine neuen Unternehmen gegründet wurden und selbst diejenigen, die einen Markteintritt vornahmen sich nicht lange erfolgreich am Markt halten konnten. Insgesamt konnte beobachtet werden, dass die Marktkonzentrationen in allen Windenergiemärkten mit nationalen Windenergieanlagenherstellern sehr hoch waren. Dies deutet darauf hin, dass nationale Unternehmen in ihrem Heimatmarkt eine bessere Marktstellung haben als ihre internationalen Konkurrenten.

Betrachtet man die Gründung von Unternehmen im Windenergiebereich, so lassen sich eine ganze Reihe unterschiedlicher Erkenntnisse gewinnen. Nach der anfänglichen Einführung der Windenergie-technologie im Leitmarkt Dänemark um 1980 schien das Marktpotential des jeweiligen Landes und die Stabilität seiner Entwicklung ein sehr wichtiger Faktor für den Erfolg bei der Gründung nationaler Unternehmen gewesen zu sein. Die Bedeutung des Faktors Marktpotential scheint darüber hinaus im zeitlichen Verlauf immer mehr an Bedeutung

gewonnen zu haben, da Unternehmen anderer Länder sich immer mehr auf dem globalen Markt etablieren konnten. Der spanische Markt beispielsweise konnte Mitte der 90er Jahre genügend Potenzial für die Entwicklung seiner eigenen Industrie bieten, während zehn Jahre später ähnliche Marktentwicklungen in Ländern wie Italien, Frankreich, Großbritannien, Südafrika, Chile oder Mexiko nicht die gleiche Dynamik auslösten. Der chinesische Markt hingegen führte zu demselben Zeitpunkt dazu, dass sich eine heimische Industrie entwickeln konnte. Die schiere Größe des chinesischen Marktes machte es sogar möglich, dass Unternehmen, die im Grunde bislang nur in ihrem Heimatmarkt aktiv waren, in der Spitzengruppe der Global Player auftauchten. Der Aspekt der nationalen Marktgröße scheint daher ein Thema zu sein, das in der Frage der späten Industrieansiedlung (*industry catch-up*) eine besondere Rolle spielt.

Ein weiterer Faktor, der den Erfolg bei der Gründung neuer Unternehmen mitzubestimmen scheint, ist die Nähe zu Ländern, die in ihren Bemühungen der Industrieansiedlung bereits erfolgreich waren. Nach der erfolgreichen Gründung dänischer, deutscher und spanischer Unternehmen ist es keinem anderen europäischen Land gelungen, eigene Windfirmen zu gründen. Gleiches gilt für Kanada, das zwar über ein relativ großes Marktpotential verfügt, aber in unmittelbarer Nähe des bereits etablierten US-Windmarktes angesiedelt ist. Ein weiteres Beispiel ist Südkorea. Fünf große internationale Technologieunternehmen mit Sitz in Korea versuchten um 2010 in den Windturbinenmarkt einzusteigen, bisher ist es keinem von ihnen gelungen, da der chinesische Markt und seine etablierte Wertschöpfungskette die industrielle Entwicklung in dieser Region dominiert.

Die Analyse der Unternehmen, die sich im Bereich der Windenergie erfolgreich zu einem späten Zeitpunkt der globalen Technologieentwicklung etablieren konnten, zeigt, dass hierzu insbesondere ein Faktor beigetragen hat – der erfolgreiche Zugang zu hoch entwickeltem technologischem Wissen. Dieses wurde von den Unternehmen im Wesentlichen auf drei verschiedene Arten erworben – durch strategische Partnerschaften, durch Lizenzen für die Produktion oder durch die Übernahme von Unternehmen.

Die strategischen Partnerschaften wurden von Seiten der Unternehmen, welche das technologische Wissen zur Verfügung stellten, weitestgehend aus strategischen Überlegungen heraus geschlossen. Im Wesentlichen handelte es sich hierbei um mittelständische Unternehmen, die zu Beginn ihrer Außenhandelsstrategie die Partnerschaft mit einem Unternehmen aus einem anderen Land suchten, um den Markt dieses Landes über den reinen Export hinaus für sich zu erschließen und gleichzeitig die damit einhergehenden Risiken zu minimieren. Mitunter waren diese Entwicklungen auch durch lokale Wertschöpfungsanforderungen der jeweiligen Länder bedingt. Ein Beispiel ist an dieser Stelle die dänische Vestas, welche als technologischer Partner an der Gründung der spanischen Gamesa beteiligt war. Als erfolgreiche Turbinenhersteller begannen, ihre eigenen Produktionsstätten in anderen Ländern aufzubauen, verringerte sich ihr Bedarf an Kooperationen. Weniger erfolgreiche Unternehmen boten hingegen auch weiterhin die Möglichkeit für Kooperationen in anderen Ländern an. Auch Lizenzen für die Produktion von Anlagen wurden von solchen Unternehmen angeboten.

Darüber hinaus entwickelte sich ein neuer Zweig von Wissensträgern in den etablierten Windtechnologieländern- Ingenieurbüros, die oft starke Verbindungen zu Forschungseinrichtungen hatten. Diese Unternehmen entwickelten und konstruierten Windturbinen, um Lizenzen für die Produktion zu verkaufen. In den meisten Fällen wurden diese Lizenzen nicht von nationalen Windturbinenherstellern gekauft, da diese bereits über eigene Technologien verfügten. Auch versuchten keine neuen Windturbinenhersteller, in diese Märkte einzutreten, da die Nachzügler Schwierigkeiten hatten, sich in ihren Heimatmärkten zu etablieren, die von bereits etablierten nationalen Unternehmen beherrscht wurden. Daher wurden die Lizenzen hauptsächlich an Unternehmen in aufstrebenden neuen Märkten verkauft. Das bekannteste Unternehmen, welches auf diesem Wege sein Know-How gewonnen hat, ist der chinesische Turbinenbauer Goldwind.

Die Übernahme bereits etablierter Unternehmen wurde insbesondere von großen Technologiekonzernen wie GE (USA) oder Siemens (DE) gewählt. Hintergrund hierfür ist die Tatsache, dass die Einführung der Windenergie durch einen Top-down Ansatz nicht erfolgreich war. Zwar unterstützten Staaten wie die USA sowie Deutschland große Technologiekonzerne in den 1970/80er Jahren mit hohen Forschungsmitteln, um die Windenergietechnologie zu entwickeln. Die Ansprüche dieser Konzerne an die Größenklassen der Turbinen führten jedoch dazu, dass diese Ansätze keinen Erfolg hatten. Stattdessen wurde die Windenergietechnologie durch einen Bottom-up-Ansatz eingeführt, bei dem viele kleine Unternehmen mit kleinen Turbinenklassen erfolgreich waren. Die großen Technologiekonzerne traten erst wieder zu einem relativ späten Zeitpunkt in den Markt ein. Wobei dies insbesondere durch die Übernahme erfolgreicher kleiner und mittelständischer Unternehmen erfolgte. Meist geschah dies, als ihre Heimatmärkte eine relativ zuverlässige Marktentwicklung aufwiesen.

Neben der Etablierung eigener neuer Unternehmen kann es durchaus eine Strategie sein bereits etablierte Unternehmen anderer Länder dafür zu gewinnen neue Produktionsstätten und damit eine lokale Wertschöpfung in einem Land aufzubauen. Ebenso wie bei der Ansiedlung eigener Unternehmen spielt auch hier das Marktpotential eines Landes eine besondere Rolle, wobei eine relativ stabile Marktentwicklung auch hier besondere Vorteile bringt. Ein besonders prominentes Beispiel ist hier die Entwicklung der Industrieansiedlung in den USA im Rahmen der zweiten Entwicklungswelle der Windenergie um das Jahr 2006. Dabei hat die Entwicklung der Industrieansiedlung ausländischer Windenergieanlagenhersteller gezeigt, dass diese auch die treibenden Kräfte darin waren, dass sich ihre Vorlieferanten ebenfalls in den USA angesiedelt haben. Hintergrund sind hier Fragen der Versorgungssicherheit der Windanlagenhersteller mit entscheidenden Vorprodukten.

Die Analyse der Photovoltaik Industrie bringt einige weitere zusätzliche Erkenntnisse. Wie sich bereits im Bereich der Windindustrie herausgestellt hat, ist der Zugang zu technologischem Wissen ein Kernelement der späten Industrieansiedlung. Neben der Verfügbarkeit des technologischen Wissens ist auch die absorptive Fähigkeit dieses Wissens wichtig. Anders als in der Windindustrie, die besonderen Zugang der Wissensbasis der Bereiche Maschinenbau und Flugzeugbau erfordert, ist die Photovoltaik-Industrie im Bereich der Halbleitertechnologie und Elektrotechnik anzusiedeln. Länder mit besonderen

Kompetenzen in diesen Bereichen haben daher die besten Voraussetzungen, um das Wissen im Bereich der PV-Zellproduktion aufzunehmen und anzuwenden.

Eine Untersuchung von Hoppmann (2018) hat dabei ergeben, dass die Aneignung von technologischem Wissen im Bereich der Photovoltaik nicht nur durch Spill-Over Effekte zwischen verschiedenen PV-Modul- und -Zellherstellern erfolgte, sondern auch durch Investitionen in Produktionsanlagen. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei dem Segment der Photovoltaik-Module und Zellen um Massenprodukte, deren Industrie im besonderen Maße durch die Entwicklung von Produktionsprozessen getrieben wird. Da auch die deutsche PV-Industrie ähnlich wie die Windindustrie meist aus neugegründeten Unternehmen bestand, wurde die Entwicklung von Produktionsanlagen mithilfe von spezialisierten Unternehmen des deutschen Maschinenbaus durchgeführt. Das Wissen, welches bei der Entwicklung der Produktionsprozesse von den Modul- und Zellherstellern in die Produktionslinien floss, wurde auf diesem Wege an andere Kunden der Produktionsanlagenhersteller weitergegeben, wodurch die Absorption von Wissen im Bereich der PV-Modul und Zellproduktion deutlich beschleunigt und erleichtert wurde. Auf diesem Wege konnten Unternehmen anderer Länder auch ohne große eigene F&E Investitionen schnell an technologisches Wissen gelangen.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Dynamik in der technologischen Entwicklung der PV-Technology unglaublich hoch war. Zum einen gibt es eine Vielzahl verschiedener Zell- und Modultypen, die Möglichkeiten für den Markteintritt neuer Unternehmen geboten haben und auch weiterhin bieten. Dies wird auch in Abbildung 73 deutlich, wo trotz der seit Jahren zu beobachtenden Marktberreinigung weiterhin jährlich neue Anbieter entstehen. Zum anderen konnte seit 2000 beinahe jährlich ein Anstieg der Effizienz bei den PV-Zellen und -Modulen registriert werden (ISE 2020). Dieser Umstand führte dazu, dass Investitionen in Produktionsanlagen innerhalb von wenigen Jahren veraltet waren und gegen neuere Produktionslinien anderer Unternehmen konkurrieren mussten. Dieser Umstand in Kombination mit der starken Entwicklung des chinesischen Marktes führte dazu, dass es chinesischen Unternehmen möglich wurde durch ein sogenanntes *leap-frogging* (Perez und Soeto 1988, Lee und Malerba 2017) deutsche Unternehmen von ihrer führenden Rolle auf dem globalen PV-Markt zu verdrängen. *Leap-frogging* bezeichnet dabei das Überspringen früher technologischer Entwicklungen. Unternehmen, die zu einem späteren Zeitpunkt ohne große Wissenslücken in eine Technologie einsteigen haben den Vorteil, dass sie frei von gewissen Pfadabhängigkeiten wie veralteten Produktionsprozessen und Technologien sind und somit gegenüber den herkömmlichen Industrieunternehmen einen Vorteil genießen.

Ausgehend von der Analyse der Unternehmensentwicklung der Wind und PV Sparten konnten unterschiedliche Schlussfolgerungen zum Thema der späten Industrieansiedlung gezogen werden.

1. Der **Zugang zu technologischem Wissen** ist entscheidend für den Einstieg von Unternehmen in eine neue Technologie. Möglichkeiten hierzu werden gegeben durch:
 - a. Strategische Partnerschaften
 - b. Lizenzproduktionen
 - c. Unternehmensübernahmen

- d. Investitionen in Produktionsanlagen
2. **Technologische Neuerungen** ermöglichen den Einstieg neuer Unternehmen zu einem späteren Zeitpunkt der technologischen Entwicklung. Dies kann strategische Vorteile haben, da frühe Pfadabhängigkeiten vermieden werden.
 3. Die Erschließung **neuer Marktsegmente** oder Märkte ermöglichen den Einstieg neuer Unternehmen. Dies ist jedoch abhängig vom Umfang der zusätzlichen Absatzmöglichkeiten sowie von der Industrieentwicklung in diesem Segment in der gleichen Wirtschaftsregion. Darüber hinaus können Anforderungen nachgelagerter Wertschöpfungsstufen ebenfalls eine Rolle bei der Entscheidung der Produktionsansiedlung spielen.
 4. **Politische Rahmenbedingungen** sind in der Energiewende nicht nur entscheidend für die Marktentwicklung, sondern auch für die Entwicklung der Industrie. Die geographische Abgrenzung ist dabei nicht eindeutig. Für das Massenprodukt PV-Zelle scheint die globale Entwicklung eine entscheidendere Rolle gespielt zu haben, für das komplexe Produkt Windturbine das nationale Marktgeschehen.

Diese Erkenntnisse sollen nun auf die Li-Ionen Batterietechnologie angewandt werden, um die Möglichkeiten der Ansiedlung einer Li-Ionen Zellproduktion in Europa und insbesondere in Deutschland zu erörtern.

Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Marktentwicklung des Li-Ionen Batteriebedarfs dargestellt. Diese zeigt, dass durch die Anwendung von Li-Ionen Batterien im Mobilitätssektor in den vergangenen 10 Jahren ein Marktsegment erschlossen wurde, das in seinem Umfang deutlich größer ist als die bisherigen Anwendungen dieser Stromspeichertechnologie. Bislang ist dieses Marktsegment in Europa noch am Anfang seiner Erschließung. Erst durch die ambitionierten Zielsetzungen einer vollständigen Klimaneutralität der EU bis zum Jahr 2050 (EU 2019), wurden jedoch eine klare politische Ausrichtung vorgegeben, durch die die Nachfrage nach Li-Ionen Batterien im Europäischen Mobilitätssektor in den kommenden Jahren deutlich zunehmen dürfte. Darüber hinaus hat die EU ein umfangreiches Förderprogramm genehmigt, welches den Aufbau einer Li-Ionen Zellproduktion in Europa zum Ziel hat (IWR 2019c). Auf Grund dieser Entwicklung wird aktuell davon ausgegangen, dass die Ansiedlung von Li-Ionen Zellproduktionseinheiten in Europa entweder durch einheimische oder durch ausländische Hersteller absehbar ist.

Darüber hinaus erscheint es unwahrscheinlich, dass ein ähnliches Importgeschehen, wie es in den vergangenen Jahren im Bereich der PV-Modul und -Zellherstellung zu beobachten war auch im Bereich der Li-Ionen Zellen langfristig geben würde. Zum einen gibt es Transporteinschränkungen bei Li-Ionen Batterien auf Grund ihrer Einstufung als Gefahrgut, zum anderen haben die europäischen Automobilhersteller eine ganz andere Verhandlungsposition als deutsche PV-Modulhersteller. Eine Ausweitung der PV-Zellproduktion auf die nächst höhere Wertschöpfungsstufe des PV-Moduls ist auf Grund der technologischen Nähe nicht weiter schwierig gewesen. Eine Ausweitung auf die verschiedenen Wertschöpfungsebenen der Automobilproduktion erscheint hingegen als deutlich unwahrscheinlicher. Gleichzeitig ist es durchaus denkbar, dass auch der

Automobilindustrie durch diese neue technologische Entwicklung eine Neuordnung der Branche bevorsteht. Nichtsdestotrotz wird der europäische Mobilitätssektor aber weiterhin einer der wichtigsten Weltmärkte bleiben, wodurch eine Nachfrage nach Li-Ionen Zellen in Europa langfristig gesichert erscheint. Insgesamt kann also erwartet werden, dass die Entwicklung einer Li-Ionen Zellindustrie in der EU durch den Mobilitätssektor getrieben sein wird.

Wenn es um die Frage der Strategie bezüglich des Zugangs zu dem technologischen Wissen der Li-Ionen Zellproduktion geht, so haben verschiedene Entwicklungen gezeigt, dass der Weg der strategischen Partnerschaften in diesem Segment am vielversprechendsten erscheint. Versuche verschiedener Automobilbauer oder ihrer Zulieferer in Deutschland durch die Übernahme von kleinen und mittelständischen Li-Ionen Zellproduzenten eigene Kapazitäten in diesem Technologiebereich aufzubauen sind in den vergangenen Jahren hingegen nicht erfolgreich gewesen. Die bekanntesten Beispiele sind hier Daimler und Bosch.

Bezüglich der Frage wo in der EU eine Ansiedlung von Li-Ionen Zellproduktionskapazitäten zu erwarten ist, gibt eine Analyse von Duffner et al (2020) mögliche Hinweise. Hier wurden zwei wesentliche Indikatoren untersucht, die bei der Entscheidung einer Industrieansiedlung einer Li-Ionen Batteriezellproduktion besonders wichtig sind. Zum einen wird hier die Frage der Produktionskosten der 28 EU-Staaten analysiert, zum anderen die Wissensbasis anhand von Patenten und Publikationen. Das Ergebnis der Untersuchung hat gezeigt, dass es keine Staaten in der EU gibt, die sowohl einen Kostenvorteil als auch eine herausragende Wissensbasis haben. Daher wurde geschlossen, dass Unternehmen, die an einer substantiellen Weiterentwicklung ihrer Produkte und Produktionsprozesse in Europa interessiert sind, tendenziell eher eine gute Wissensbasis und damit Länder wie Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Österreich und Italien bevorzugen. Solche Unternehmen, die ihren Standort in Europa ausschließlich zur Produktion nutzen wollen und jegliche Weiterentwicklung und Wissensaufbau an anderen Standorten durchführen, wählen hingegen die Länder Europas, die einen Kostenvorteil versprechen.

Zur Bedienung der europäischen Nachfrage bieten sich theoretischer Weise alle Länder an, die freien Handelszugang zum europäischen Binnenmarkt haben. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass die Entscheidung bezüglich der Produktionsstätte auch stark mit den strategischen Partnern und deren Standorten zusammenhängen wird. Da der größte Anteil der Produktion von Li-Ionen Batteriezellen in die Mobilitätsbranche fließen wird und es hier zu technologischen Weiterentwicklungen kommen wird, um die Erfordernisse der Mobilitätsbranche spezifisch zu bedienen, kann davon ausgegangen werden, dass die Kooperationen mit den jeweiligen Automobilbauern entscheidend dazu beitragen wird die Standortentscheidung zu treffen. Erste Anzeichen dafür, dass diese Theorie zutrifft, zeichnen sich durch die Ankündigungen verschiedener Hersteller ab (IWR 2019b, IWR 2020, TESLAMAG 2020).

Unter Einbeziehung aller aktuell verfügbaren Informationen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Deutschland eine sehr gute Ausgangslage hat wesentliche Teile der Li-Ionen Batteriezellproduktion für Europa für sich zu gewinnen.

8 Definition und Durchführung der Experimente & Diskussion der Ergebnisse

8.1 Einleitung

Um das Modell einem ersten Praxistest zu unterziehen, wurden Experimente definiert, die sich an den abgeleiteten Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.2.4) orientieren. Insbesondere die zentrale erste Forschungsfrage zur Gestaltung einer europäischen Zellproduktion hat die Festlegung der Experimente beeinflusst. Insgesamt sind sechs Experimente definiert und durchgeführt worden:

1. Heimische Zellhersteller
2. Forschungsförderung
3. Minimale Fabrikgröße Elektromobilität
4. Partnersuche
5. Unternehmensstrategie
6. Finanzielle Förderung

Bei der Durchführung von fünf der sechs Experimente ist nur ein einzelner Modell-Parameter variiert worden, bei einem Experiment jedoch zwei. Die übrigen Parameter des Modells sind in den Experimenten jeweils mit Standard-Werten initiiert worden. Diese Standard-Werte sind in Tabelle 28 aufgelistet. Um die Validität und Zuverlässigkeit der Experiment-Ergebnisse zu erhöhen, wurde jedes Experiment 100-mal wiederholt. Außerdem wird jedes Experiment für 600 Simulationsschritte durchgeführt, wobei ein Schritt nach einigen Festlegungen etwa im Modul zur Forschungstätigkeit (Dauer der Calls und Projekte) und auch z. B. bei den Finanzen circa einem Monat entspricht, d. h. dies entspräche einem Zeitraum von 50 Jahren. Dies ist natürlich ein viel zu langer Zeitraum, um das Innovationssystem unter konstanten Bedingungen zu belassen, da sich sehr viele Umstände innerhalb von 50 Jahren sehr grundlegend verändern können. Der Simulationszeitraum wurde so lang gewählt, um zu untersuchen, ob die Algorithmen des Modells über viele Iterationen hinweg ein deutlich anderes Verhalten zeigen als zu Beginn der Simulation. Die Ergebnisse dürfen hinsichtlich der Zeitdimension, und auch sonst, nicht eins zu eins auf die Realität übertragen werden, da das Modell die Realität auch nicht eins zu eins abbildet.

In den nächsten Sektionen werden die sechs durchgeführten Experimente kurz beschrieben. Auch werden für jedes Experiment beispielhaft einige interessante Effekte der variierten Parameter auf das modellierte Innovationssystem aufgezeigt und Erläuterungen und mögliche Erklärungen für das beobachtete Modellverhalten gegeben. Diese Erklärungen könnten durch weitere Analysen mit dem Modell noch tiefer ergründet werden. Hierfür fehlte jedoch im Projekt die Zeit und es war auch nicht Ziel des Projekts eine detaillierte Studie für den Bereich Innovationssystem Lithium-Batterien durchzuführen, sondern mit den entwickelten Methoden auf Basis schon vorhandenem Wissen ein Modell zu erarbeiten, das auch zur Analyse von Innovationssystemen anderer innovativer Schlüsseltechnologien übertragbar ist.

Tabelle 28: Übersicht der Standard-Werte, mit denen die Parameter von SKIN-Energy für die Experimente initiiert wurden; die in den Experimenten variierten Parameter sind durch Fettdruck gekennzeichnet, die variierten Parameter sind hinter dem Standard-Wert in Klammern angegeben

Parametername	Parameterwert
Absorptive_capacity	true
accessible-market-fraction-emob	10 %
accessible-market-fraction-medium	70 %
accessible-market-fraction-micro	70 %
accessible-market-fraction-small	1 %
accessible-market-fraction-stat	30 %
acquire-input-firms?	true
acquire-output-firms?	true
acquire-similar-daughters?	true
acquisition-adv-dist-dynamic	0,90
acquisition-price-factor	10
acquisition-prob-depends-on-price?	true
Acquisitions?	true (true, false)
adapting-depreciation	true
Adj-expertise	true
Adj-price	true
Adjust-capital?	true
age-for-adv-dist-compare	10 Ticks bzw. Monate
Alternative-quality	true
apply-quality-to-costs	false
apply-quality-to-tech-params	true
attractiveness-threshold	0,30
big-cells-exclusive?	true
birth-ent_type_1-firms	0,03
birth-ent_type_2-firms	0,03
birth-ent_type_3-firms	0,03
birth-rate-entrepreneur_type_1	3 Firmen pro Tick
birth-rate-entrepreneur_type_2	3 Firmen pro Tick
birth-rate-entrepreneur_type_3	3 Firmen pro Tick
birth-rate-entrepreneur-DYN_type_1	0,21
birth-rate-entrepreneur-DYN_type_2	0,21
birth-rate-entrepreneur-DYN_type_3	0,21
bs-logging?	true
capacity-change-per-tick	5 %
capital-percent-used-for-rnd-per-year	1,8 (1,8, 0) %/a
capital-thresh-create-conglomerate	10000000 €
capital-to-trigger-firm-purchase	576923 €
Cap-range-calls	93
collaboration-tax	100000 €/a/Partner
Conglomerates	true
cost-of-rnd-type-1	5000000 €
cost-of-rnd-type-2	2000000 €
create-conglomerate-prob	1 %
Debug?	false

Debug-v?	false
demand-for-end-product	1
depreciation-percent-of-capital-per-year	5 %/a
depreciation-per-daughter	0 €/Tick/Tochter
destroy-conglomerate-prob	11 %
deterministic-inputs?	true
Directed-prod-space	true
domestic-firms-in-big-cells	0 (0, 50, 100) %
Do-research-on-ih	true
Empirical?	true
experiment-name	"Test1"
experiment-repetition	1
Export-settings	"none"
firms-number-of-lives	9
Follow-one-firm?	false
Forget-all-suppliers	false
Funding-calls	10 %
fuzzy-end	1,1
fuzzy-merit-order?	true
fuzzy-start	0,9
high-potential-level	5
Incr-research	true
incr-research-tax	100000 €/a
inherit-prod-cat-from-inst?	false
initial-capital	600000 €
initial-capital-start-up	600000 €
In-out-products-percent	10 %
inputs-from-above-percent	10 %
inputs-from-above-sigma	10 %
Interpolate?	true
keep-firms-in-prod-category	true
Knowledge_remains_at_institutes	true
limit-demand?	true
Limit-kenes	true
lock-these-inputs	""
make-ih-after-learn	false
max-advert-distance-daughters	10
max-age-entrepreneur	10 Ticks bzw. Monate
max-capacity-emob	14 GWh/a
max-capacity-medium	5 GWh/a
max-capacity-micro	1 GWh/a
max-capacity-small	1 GWh/a
max-capacity-stat	7 GWh/a
micro_cell_share	10 %
min-capacity-emob	0 (0, 4,4) GWh/a
min-one-input-directly-below?	true
min-reward-for-acquisition	600000 €/Tick
model-version	"InnosensSKIN"
mother-pays-inputs?	true

mother-pays-network-hq?	true
mother-pays-tax?	true
nCalls	1
nDaughters-mean_large	0,85
nDaughters-mean_small	0,11
nEntrepreneurs_type_1	3
nEntrepreneurs_type_2	3
nEntrepreneurs_type_3	3
Networking	true
nFirms_big	119
nFirms_small	233
nInputsMax	5
nInputsMin	2
nInstitutes	162
non-linear-expertise	true
nProducts	100
nTicks	600
only-one-cell?	false
Optimistic?	false
Partnering	true
partnership-strategy	"progressive"
patent-to-daughter-ratio	20
prevent-inifinite-loops	true
price-of-end-product	90185,06 €
Project-cap-min	14
Project-cap-ratio	1
radical-research-tax	50000 €/a
Rad-research	true
raw-cost	9 €
raw-cost-fraction	30 %
refresh-prices-every-tick?	false
rescue-dying-daughters?	false
research-delay	1 Tick bzw. Monat
Research-Projects	true
reward-high-potential	0 €
search-partners	"parallel" ("parallel", "orthogonal")
share-fraction	100 %
Skip-unneeded	true
small-prod-steps	true
Start-ups	true
static-birth-entrepreneur?	false
subsidies-per-batch-domestic	0 (0, 10, 20, 30) %
subsidies-per-batch-foreign	30 %
subsidized-categories-domestic	["battery"]
subsidized-categories-foreign	["cell-big"]
success-threshold	60000 €/Tick
Time-between-calls	12 (12, 6, 3) Ticks bzw. Monate
Total-funding-calls	500
Update-advert	true

Use-rare-capabilities	true
Use-recursion-to-find-suppliers	true
Warnings?	false

8.2 Experiment 1 - Heimische Zellhersteller

8.2.1 Beschreibung

Das Experiment „Heimische Zellhersteller“ hängt zusammen mit Frage 1 an das Modell (siehe Kapitel 4.2.4) zur Gestaltung einer europäischen Zellherstellung. Der Anteil inländischer Zellhersteller an der gesamten Zellproduktion wird variiert und es kann untersucht werden, welchen Einfluss diese Variation auf das Innovationssystem hat.

In diesem Experiment ist ein Parameter variiert worden (3 Werte):

1. *"domestic-firms-in-big-cells"*: 0% (Wert 1), 50% (Wert 2), 100% (Wert 3).

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1 (0): In diesem Szenario sind keine inländischen Zellhersteller (0%) im Innovationssystem vorhanden, sämtliche Zellhersteller sind ausländisch. Das Innovationssystem muss alle benötigten Zellen aus dem Ausland einführen. Dies entspricht in etwa der realen Ausgangssituation des Forschungsprojekts.
- Wert 2 (50): In diesem Szenario sind die Zellhersteller je zur Hälfte inländisch und ausländisch. Die inländischen und ausländischen Hersteller treten zueinander in Konkurrenz.
- Wert 3 (100): In diesem Szenario gibt es nur inländische Zellhersteller (100%) im Innovationssystem. Sie müssen die gesamte Produktion von Zellen zur Verfügung stellen und das Innovationssystem kann nicht auf Exporte aus dem Ausland zurückgreifen.

Ziel ist hier weniger die realistische Abbildung, sondern das Erkennen von Mustern im Verhalten des Innovationssystems. Die Extremfälle 0% und 100% werden vor dem Hintergrund simuliert, damit mögliche Unterschiede besonders deutlich hervortreten, sowie die gleichteilige Mischung von 50% zum Vergleich.

Hierbei ist die in Kapitel 5.6 beschriebene Modellierung der „ausländischen Zellhersteller“ zu beachten: Im Unterschied zu „inländischen“ Zellherstellern sind die „ausländischen“ statisch: sie verändern ihr Wissen nicht, tauschen kein Wissen mit anderen aus, forschen und innovieren nicht und bieten immer dieselben Produkte an. Sie haben unbegrenztes Kapital und können auch bei Misserfolg nicht bankrottgehen. Dies ist eine vereinfachende Beschreibung der Konkurrenz durch v. a. asiatische Großkonzerne, die über eine große Marktmacht und zum Teil staatliche Unterstützung verfügen und gegen die sich die inländische (europäische oder deutsche) Konkurrenz behaupten muss.

8.2.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Allgemein zeichnet sich das Modell durch eine anfängliche Einschwingphase aus, in der es zur Pleite vieler Firmen kommt, da sich Lieferketten erst etablieren müssen. Findet eine Firma nicht zügig Zulieferer und Kunden, geht ihr schnell das Kapital aus und sie geht bankrott. Diese Unsicherheit am Anfang zeigt sich v. a. bei Konzernmüttern, da sie die Verluste mehrerer Firmen zugleich tragen müssen, schlägt aber später in einen Vorteil um, wenn sie die Gewinne mehrerer Firmen zugleich erhalten.

Das Vorhandensein der ausländischen Zellhersteller, die „unsterblich“ und daher von der Einschwingphase ausgenommen sind, mildert die anfängliche Pleitewelle ab und scheint das Innovationsystem insgesamt zu stabilisieren. Dies äußert sich in durchgängig höherer Firmenpopulation in allen Bereichen der Wertschöpfungskette, nicht nur bei den Zellherstellern selbst, siehe Abbildung 74. Sowohl im Fall ausschließlich ausländischer Zellhersteller als auch bei zur Hälfte ausländischen Zellherstellern setzt relativ bald nach dem Einschwingen ein Wachstum der Population ein. Bei 100% heimischer Zellherstellung scheint die Population dagegen auf dem niedrigen Niveau nach der Pleitewelle zu verharren, zumindest innerhalb des Simulationszeitraums von 600 Schritten (entspricht ca. 600 Monaten). Dies deutet die Fragilität der Lieferketten an und zeigt, welche stabilisierende Wirkung auch die Unterstützung nur eines Teils der Branche haben kann. Die Spitze bei ungefähr Schritt 425 ist vermutlich ein unerwünschtes Artefakt des Modells und sollte nicht weiter beachtet werden.

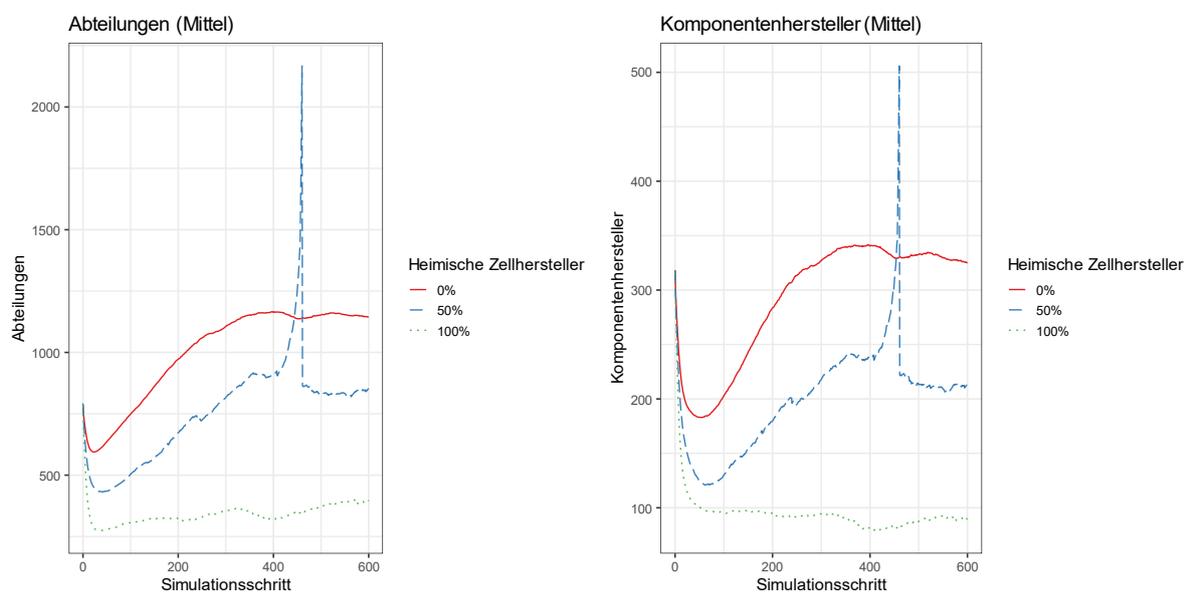


Abbildung 74: Entwicklung der Population von Abteilungen (links), definiert als Einzel- und Tochterfirmen, und Entwicklung der Population von Komponentenherstellern im Verlauf der Simulation bei Variation der heimischen Zellhersteller

Um die Innovativität des Systems zu messen, wurde eine Variable „Zahl der Innovationen“ eingeführt. Es handelt sich um die Anzahl unterschiedlicher im System aufgetretener Innovationshypothesen der Firmen (siehe Kapitel 5.1.1), die über ihren Hashwert (Kapitel 5.7.1) unterschieden werden. Jede Firma hat ihre individuelle Innovationshypothese (IH), daher gilt die Faustregel: Je mehr Firmen im System, umso mehr „Innovationen“ sind vorhanden. Die „Zahl der Innovationen“ wird erhöht, sobald eine neue IH auftritt – z. B. durch Forschung oder Gründung einer neuen Firma – aber nichts abgezogen, wenn eine Firma ihre IH aufgibt. Daher entspricht die Zahl der Innovationen in etwa der kumulativen Zahl der Firmen. Da aber Mutterfirmen kein Wissen und keine IH haben, spricht man anstatt von Firmen besser von „Abteilungen“, womit die Zusammenfassung von Einzel- und Tochterfirmen gemeint ist, also die Gesamtheit aller innovierenden Firmen. Eine weitere interessante

Variable ergibt sich, wenn nicht alle distinkten IHs gezählt werden, sondern nur solche, bei deren Verwendung die Firma ihr Produkt erfolgreich verkaufen konnte: dies ergibt analog zur „Zahl der Innovationen“ die „Zahl verkaufter Innovationen“ und damit erfolgreicher Innovationen.

Abbildung 75 zeigt die Zahl der Innovationen und die Zahl verkaufter Innovationen über den Verlauf der Simulation. Es leuchtet ein, dass bei 0% heimischen (also 100% ausländischen) Zellherstellern die Zahl der Innovationen am höchsten ist, weil die Population der Firmen bzw. Abteilungen auch am größten ist, siehe Abbildung 74. Interessant ist, dass es bei der Zahl verkaufter Innovationen zwischen 0% und 50% heimischen Zellherstellern keinen nennenswerten Unterschied gibt. Das System bei 100% heimisch ist jedoch mit Blick auf die verkauften Innovationen noch weiter abgeschlagen.

Da der Zusammenhang zwischen der Zahl der Innovationen und der Zahl der Abteilungen so stark ist, liegt es nahe, die Innovationszahl durch die kumulative Abteilungsanzahl zu teilen. Dies ergibt die Variable „Innovationen pro Abteilung“ bzw. „Verkaufte Innovationen pro Abteilung“ (siehe Abbildung 76). Die mittlere Innovationskraft einzelner Abteilungen ist demzufolge über den meisten Verlauf der Simulation bei 100% heimischer Zellproduktion leicht höher als in den anderen Fällen. Jedoch ist dies nur sehr schwach ausgeprägt und vermutlich nur durch statistische Schwankungen verursacht. Überraschend jedoch die Zahl verkaufter Innovationen pro Abteilung: Hier scheint die Mischung von 50% heimischen und 50% ausländischen Zellherstellern signifikant besser abzuschneiden als die anderen Fälle. Der Fall 100% heimischer Zellproduktion liegt jedoch auch hier weit unter den anderen: Es gibt zwar pro Abteilung gleich viele Innovationen wie in den anderen Fällen (Abbildung 76 links), doch lassen sich diese erheblich schlechter verkaufen (Abbildung 76 rechts), vermutlich weil auf Grund der instabileren Wertschöpfungskette Zulieferer und Kunden weniger verlässlich zur Verfügung stehen.

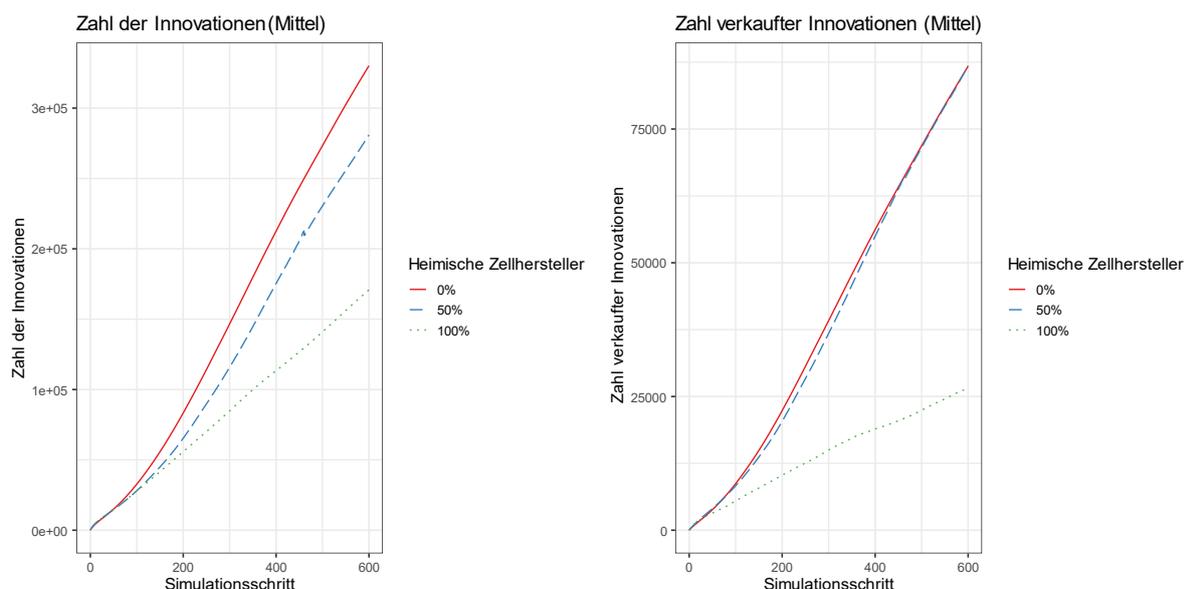


Abbildung 75: Zahl der Innovationen (links) und Zahl der erfolgreichen, also am Markt verkäuflichen Innovationen (rechts) bei Variation der heimischen Zellherstellung

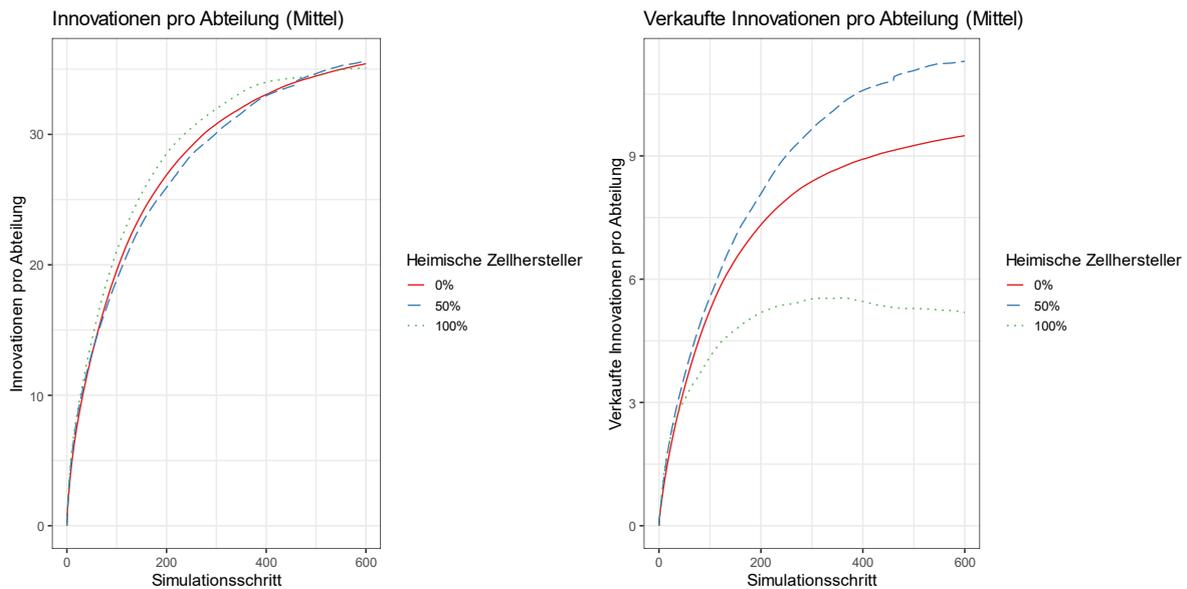


Abbildung 76: Innovationen (links) und am Markt verkäufliche Innovationen (rechts) im Verhältnis zur Anzahl Abteilungen (Einzelfirmen + Tochterfirmen) bei Variation der heimischen Zellproduktion

8.3 Experiment 2 - Forschungsförderung

8.3.1 Beschreibung

Dieses Experiment bezieht sich auf Frage 5 an das Modell zu den Auswirkungen der Forschungsförderung auf die Innovationsfähigkeit (siehe Kapitel 4.2.4). Die Intensität der Forschungsförderung wird dadurch variiert, dass der zeitliche Abstand zwischen Förderprogrammen (Calls) reduziert wird. Je kleiner dieser Abstand, umso mehr Forschungsprojekte werden im selben Zeitraum finanziert und durchgeführt und umso mehr Firmen und Institute erhalten die Möglichkeit zur Teilnahme an Forschungsprojekten.

In diesem Experiment ist ein Parameter variiert worden (3 Werte):

1. "Time-between-calls": 12 (Wert 1), 6 (Wert 2), 3 (Wert 3).

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1 (12): In diesem Szenario beträgt der Abstand zwischen den Calls 12 Simulationsschritte (Ticks), d. h. 12 Monate.
- Wert 2 (6): In diesem Szenario beträgt der Abstand zwischen den Calls 6 Ticks (Monate).
- Wert 3 (3): In diesem Szenario beträgt der Abstand zwischen den Calls 3 Ticks (Monate).

8.3.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Die Ergebnisse der Experimente weisen darauf hin, dass durch eine erhöhte Intensität der Forschungsförderung (kleinerer Abstand zwischen den Calls) etwas mehr Ressourcen im Innovationssystem vorhanden sind. Es entsteht zusätzliches Wissen und die finanzielle Förderung der Forschung verbessert die Finanzen der Akteure. Dadurch ist die Population der Abteilungen leicht erhöht. Dies zeigt sich in Abbildung 77, wo rechts die Geburtenrate von Tochterfirmen und links die kumulative Abteilungszahl, definiert als Anzahl seit Beginn der

Simulation geborener Abteilungen (also Einzel- plus Tochterfirmen), dargestellt sind. Die kumulative Zahl der Abteilungen (Abbildung 77 links) entspricht also dem Integral über die Geburtenrate (Abbildung 77 rechts). Die Unterschiede zwischen dem variierten Parameter Forschungsintensität sind jedoch sehr gering und es ist gut möglich, dass es sich nur um zufällige Fluktuationen handelt. Ein Grund, warum die Forschungsförderung nur wenig Einfluss auf den unternehmerischen Erfolg hat, könnte sein, dass die modellierte Forschungsförderung sowie die Struktur der Institute nicht daran orientiert sind welches Wissen in der Produktion benötigt wird. In den Ausschreibungen der Projekte wird breit gefördert, sozusagen nach dem „Gießkannenprinzip“.

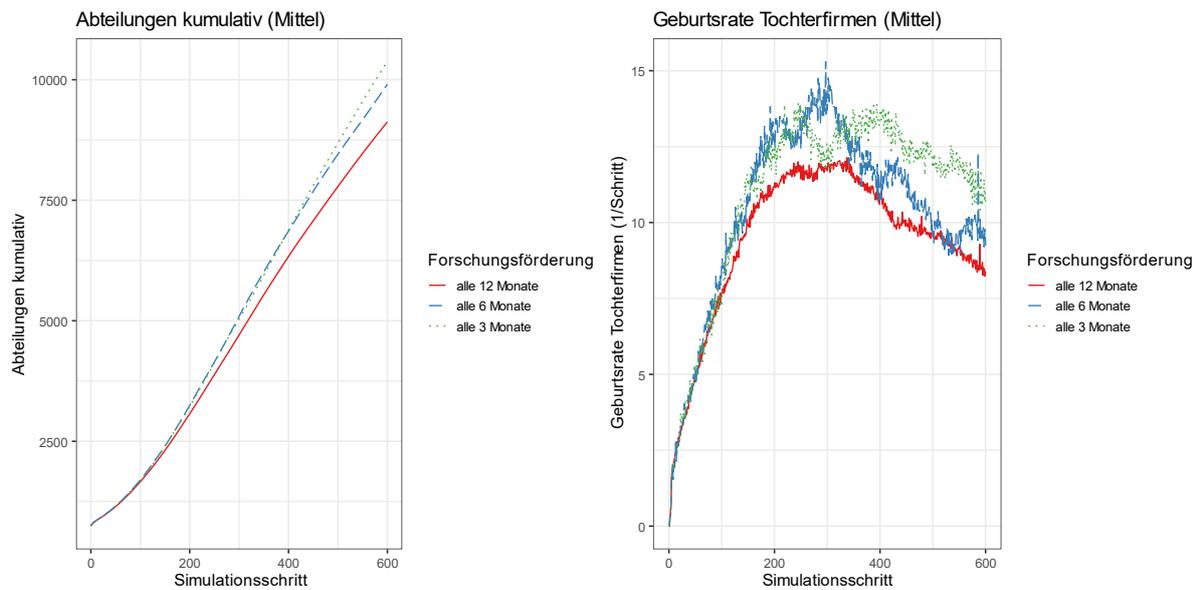


Abbildung 77: Kumulative Zahl der Abteilungen (Einzelunternehmen + Tochterfirmen) (links) und Geburtenrate der Tochterfirmen (rechts) beim Experiment „Forschungsförderung“

Auch die Zahl der Innovationen sowie die Zahl verkaufter Innovationen zeigen einen analogen Trend an (Abbildung 78): Bei mehr Forschungsförderung ist auf Grund der etwas größeren Population auch mehr Wissen und mehr Innovation vorhanden. Trotz der unspezifischen, nicht am Bedarf orientierten Forschung ist die zusätzliche Innovation durchaus am Markt absetzbar und auch die Zahl verkaufter Innovation ist bei gesteigerter Forschungsförderung leicht erhöht (Abbildung 78 rechts).

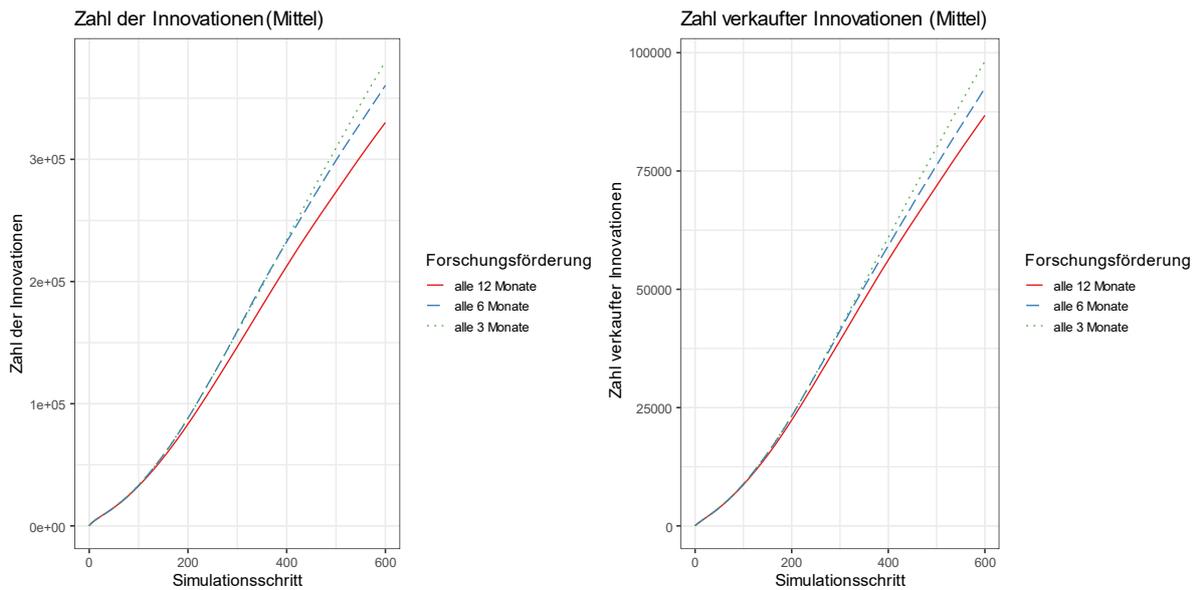


Abbildung 78: Zahl der Innovationen und Zahl am Markt verkaufter Innovationen im Experiment „Forschungsförderung“

Die Population der Start-up-Firmen folgt interessanterweise nicht dem allgemeinen Trend zu größerer Firmenpopulation (siehe Abbildung 79). Je größer die Intensität der Forschungsförderung, umso weniger Start-ups gibt es im Modell. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass durch eine stärkere Forschungsförderung, an der überwiegend etablierte Firmen teilnehmen, mehr Bereiche des Wissensraums bereits abgedeckt werden. Die „Lücken“ im Wissensraum sind kleiner und so ist es für Start-ups schwieriger, eine Lücke zu finden und zu besetzen. Jedoch ist der Effekt auch hier nur äußerst schwach ausgeprägt und dieses Ergebnis daher mit Vorsicht zu behandeln. Um die Größe der üblichen statistischen Schwankungsbreiten zu verdeutlichen, ist in Abbildung 79 rechts zusätzlich die Standardabweichung der Start-up-Population dargestellt.

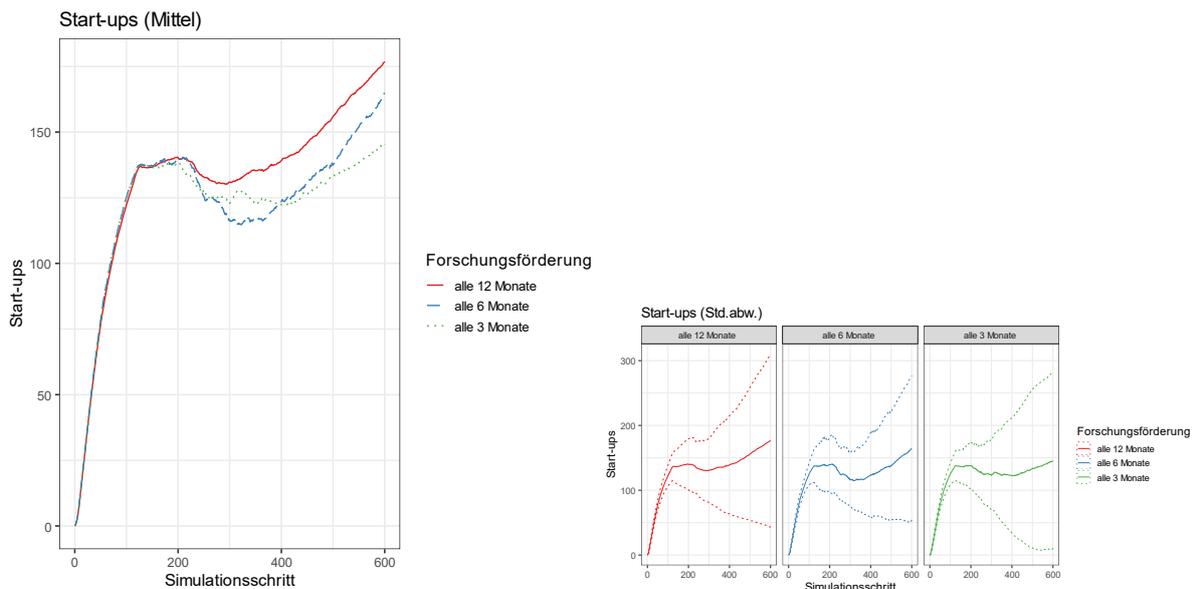


Abbildung 79: Verlauf der Start-up-Population im Mittelwert (links) und mit Darstellung der Standardabweichung (rechts) beim Experiment „Forschungsförderung“

8.4 Experiment 3 - Minimale Fabrikgröße Elektromobilität

8.4.1 Beschreibung

In diesem Experiment wurde die für den Markteintritt von Batterieherstellern mindestens nötige Fabrikgröße (gemessen in produzierte Batteriekapazität pro Jahr) variiert. Diese Mindest-Fabrikgröße gilt nur für den Markt der Elektromobilität, also für Hersteller, die Batterien für den BEV-Markt herstellen. Die Idee für dieses Experiment stammt aus Diskussionen im Expertenworkshop, bei denen angemerkt wurde, dass kleine Hersteller meist gar keine Möglichkeit haben, den Markt für in Elektrofahrzeugen verbaute Batterien zu beliefern. Die von Autoherstellern geforderten Chargen sind so groß, dass sie von kleinen Herstellern kaum realisiert werden können. Dahinter steckt unter anderem der Wunsch der Autohersteller nach gleichbleibender Qualität und Spezifikationen. Aus dem Expertenworkshop kam die Aussage, dass eine europäische Zell- bzw. Batterieproduktion mindestens ca. 4,4 GWh/a an Batteriekapazität produzieren müsste, um sich behaupten zu können. Dies entspricht auch der Größenordnung angekündigter Batteriefabrikprojekte, die auf Grund ihrer gelieferten Kapazität im Gigawattbereich auch „Gigafactories“ genannt werden (siehe etwa Eckl-Dorna 2019).

In diesem Experiment ist ein Parameter variiert worden (2 Werte):

1. *"min-capacity-emob"*: 0 GWh/a (Wert 1), 4,4 GWh/a (Wert 2).

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1 (0 GWh/a): In diesem Szenario gibt es für Hersteller von E-Mobilitäts-Batterien keine minimal benötigte Produktionskapazität (die minimal benötigte Produktionskapazität beträgt 0 GWh/a)
- Wert 2 (4,4 GWh/a): In diesem Szenario benötigen Hersteller von E-Mobilitäts-Batterien eine minimale Produktionskapazität von 4,4 GWh/a, um am Markt verkaufen zu können.

8.4.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Leider hat bei diesem Experiment hat ein Fehler im Code dazu geführt, dass die Minimalkapazität keinerlei Auswirkungen hat. Die Ergebnisse für die verschiedenen Parametereinstellungen sind nahezu gleich, siehe Abbildung 80 bis Abbildung 82. Das Experiment kann statt der ursprünglich geplanten Untersuchung jedoch zur Verifizierung des Set-ups für die Experimente verwendet werden.

Es ist zu sehen, dass trotz großer statistischer Schwankungen in den einzelnen Experimenten eine erstaunliche Übereinstimmung in den Mittelwerten erreicht wird. Die 100-fache Wiederholung jedes Experiments scheint also ausreichend zu sein. Dies legt nahe, dass selbst geringe Abweichungen, die in anderen Experimenten gesehen wurden (vgl. Kapitel 8.3), tatsächlich systematisch bedingt sind und nicht allein durch statistische Fluktuation erklärt werden können. Es handelt sich hierbei also um eine gute Verifizierung des Modells bzw. des experimentellen Setups, die die Ergebnisse bekräftigt.

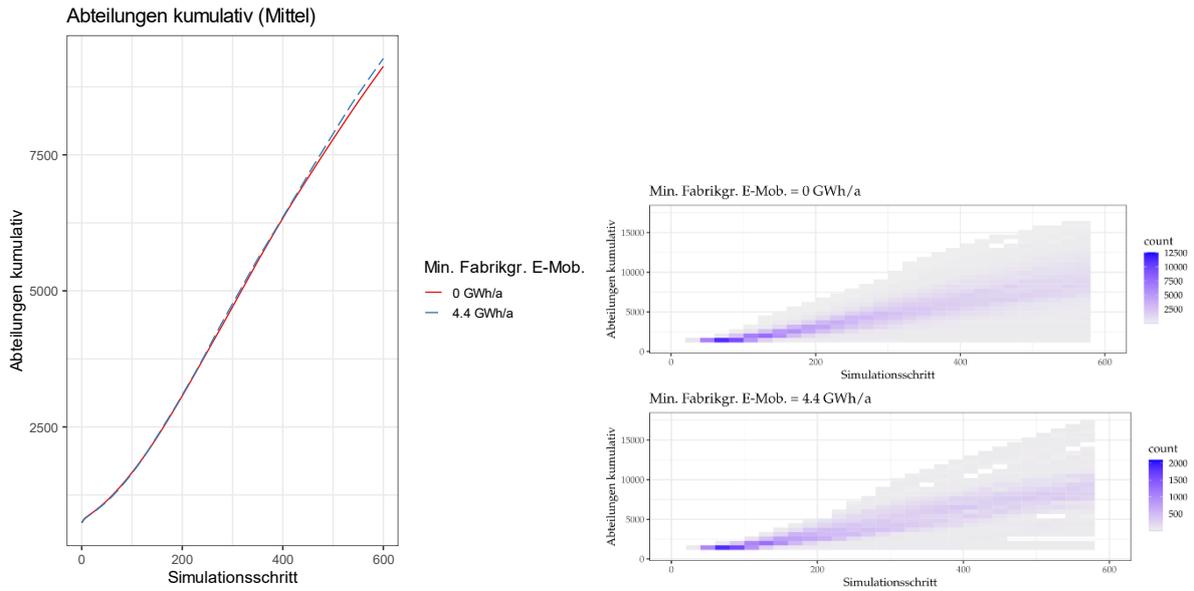


Abbildung 80: Mittelwert der kumulativen Zahl der Abteilungen (links) und "Heatmap" derselben Observable, in der die Farbe anzeigt, wie viele Kurven der Experiment-Wiederholungen den jeweiligen Punkt passieren (rechts)

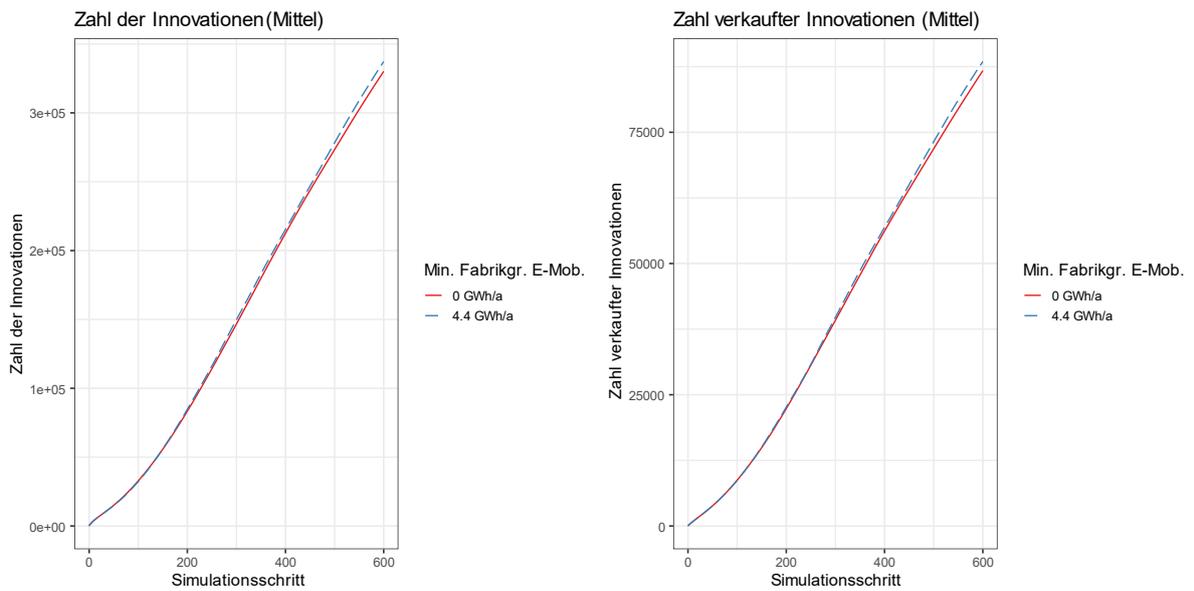


Abbildung 81: Zahl der Innovationen und Zahl am Markt verkaufter Innovationen im Experiment „Minimale Fabrikgröße Elektromobilität“

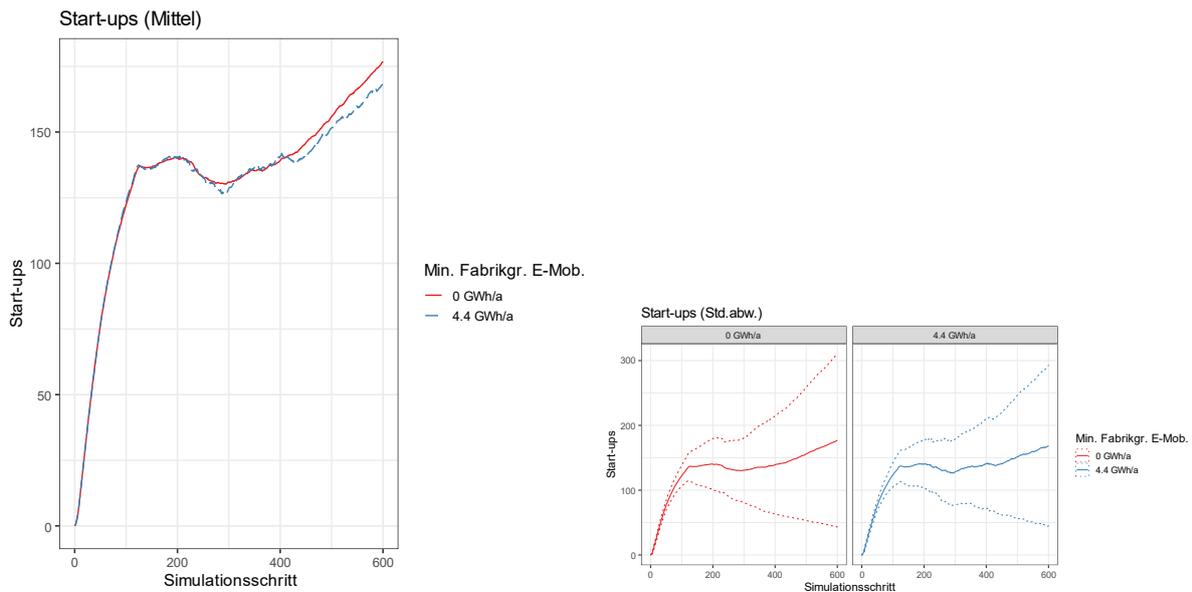


Abbildung 82: Verlauf der Start-up-Population im Mittelwert (links) und mit Darstellung der Standardabweichung (rechts) beim Experiment „Minimale Fabrikgröße Elektromobilität“

8.5 Experiment 4 - Partnersuche

8.5.1 Beschreibung

Dieses Experiment nimmt Bezug auf Frage 2 an das Modell: „Wie lässt sich die Zusammenarbeit entlang und orthogonal zur Wertschöpfungskette [...] am besten gestalten und welche Effekte wären damit verbunden?“ (siehe Kapitel 4.2.4).

Firmen in SKIN und SKIN-Energy suchen sich Kooperationspartner, mit denen sie Wissen austauschen. Üblicherweise werden diese Kooperationspartner bevorzugt unter den Lieferanten und Kunden der Firma gesucht, also sozusagen „entlang der Wertschöpfungskette“ oder „parallel zur Wertschöpfungskette“. Eine Firma kann bis zu fünf Kooperationspartner haben. Erst wenn weniger als fünf Lieferanten und Kunden vorhanden sind, werden weitere zufällige Firmen als potenzielle Partner in Betracht gezogen. Diese Suchstrategie wurde für dieses Experiment erweitert, sodass anstatt „parallel“ zur Wertschöpfungskette „orthogonal“ zur Wertschöpfungskette nach Partnern gesucht werden kann, also unter den Mitbewerbern, die auf derselben Wertschöpfungsstufe stehen und vergleichbare Produkte anbieten. So kann untersucht werden, welchen Effekt die Kooperation bzw. der Wissensaustausch entlang oder orthogonal zur Wertschöpfungskette jeweils hat, d. h. es können die Auswirkungen dieser beiden Partnersuchstrategien verglichen werden.

In diesem Experiment ist ein Parameter variiert worden (2 Werte):

1. "search-partners": „parallel“ (Wert 1), „orthogonal“ (Wert 2)

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1 („parallel“): In diesem Szenario findet Partnerschaft bevorzugt zwischen Agenten mit unterschiedlichen Positionen in der Wertschöpfungskette statt (d.h. zwischen Lieferanten und Kunden)

- Wert 2 („orthogonal“): In diesem Szenario findet Partnerschaft bevorzugt zwischen Agenten mit der gleichen Position in der Wertschöpfungskette statt (d. h. unter Konkurrenten)

8.5.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Die Ergebnisse sind durchaus überraschend. Es zeigt sich, dass die Partnersuche „parallel“ zur Wertschöpfungskette, also der Austausch mit Lieferanten und Kunden, tendenziell zu einer größeren Firmenpopulation und damit auch mehr Innovation führt als bei der Partnersuche „orthogonal“ zur Wertschöpfungskette, also unter Konkurrenten. Dabei sind die Populationen zunächst gleich, bis sie ab einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation voneinander entkoppeln (Abbildung 83). Danach verlaufen die Kurven nicht mehr identisch, sondern die Population ist jeweils im Falle der „parallelen“ Partnersuche größer. Bei Einzelfirmen geschieht das Entkoppeln relativ früh, bereits nach ca. 50 Simulationsschritten (Abbildung 83 links). Bei Tochterfirmen tritt die Entkopplung erst nach 250 – 300 Schritten auf, dafür aber umso deutlicher (Abbildung 83 rechts). Es scheint, dass das von anderen Bereichen der Wertschöpfungskette gewonnene Wissen wertvoller ist als das Wissen der Konkurrenten aus derselben Wertschöpfungsstufe.

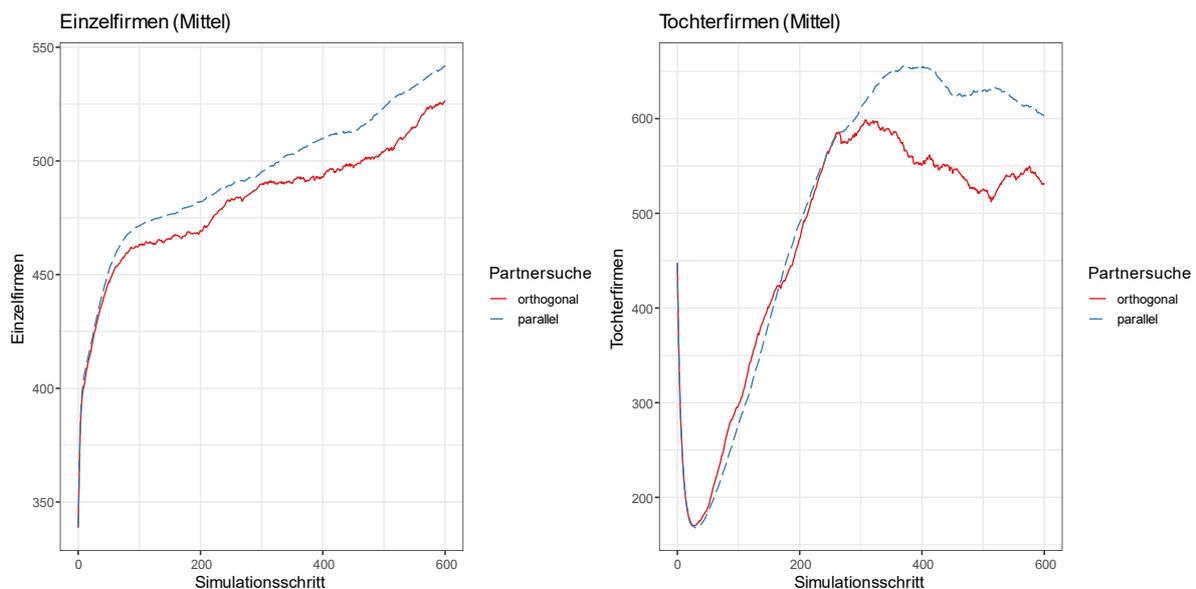


Abbildung 83: Population der Einzel- und Tochterfirmen beim Experiment „Partnersuche“

Analog zur größeren Anzahl Firmen zeigt sich auch eine größere Zahl an Innovationen (Abbildung 84). Nicht nur die absolute Zahl der Innovationen (Abbildung 84 links) liegt bei „paralleler“ Suche etwas höher, auch pro Abteilung, also pro Einzel- oder Tochterfirma, gibt es mehr Innovation (Abbildung 84 rechts). Doch obwohl nach spätestens 100 Simulationsschritten ein Überschuss an Einzelfirmen zu sehen ist, ist erst nach etwa 400 Schritten ein Überschuss an Innovationen sichtbar (bei Innovation pro Abteilung etwas früher). Dies deutet darauf hin, dass die Tochterfirmen, die erst ab ca. Schritt 300 vermehrt vorhanden sind, offenbar mehr Innovationen beitragen als die Einzelfirmen. Eine mögliche Erklärung liegt im Verhalten der Konglomerate: Sie können ungenutztes Wissen von

Tochterfirmen bei der Neugründung einer Tochterfirma einsetzen. So kann es sein, dass Konglomerate das durch den Austausch gewonnene Wissen öfter zu innovativem Wissen verbinden als Einzelfirmen, die ihr neues Wissen ungenutzt vergessen, wenn sie eine Zeit lang mit ihrem bisherigen Wissen erfolgreich sind.

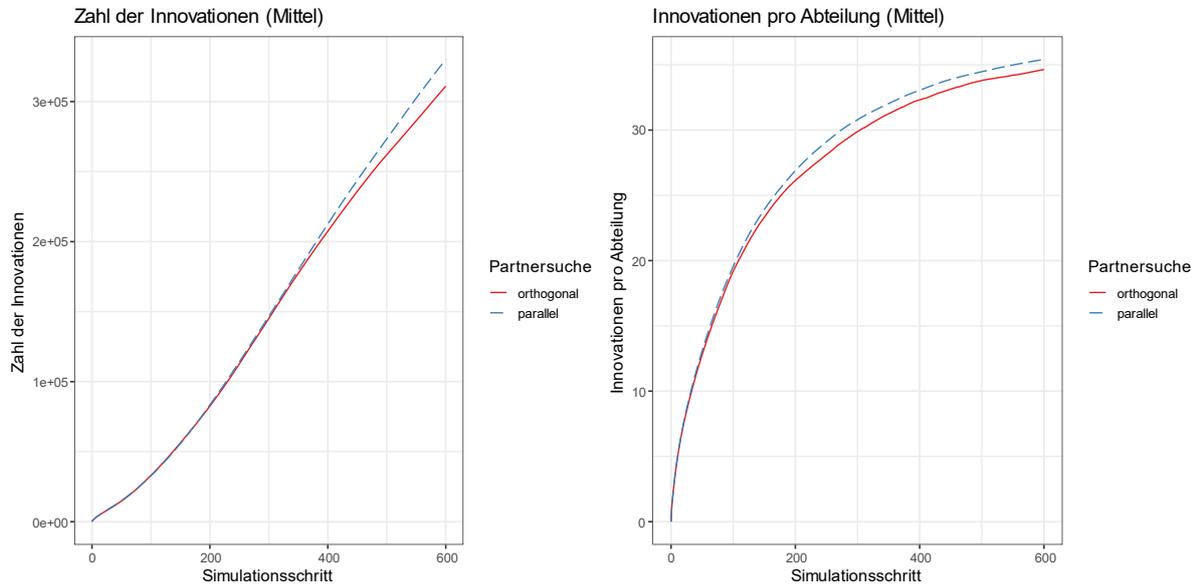


Abbildung 84: Zahl der Innovationen (links) und Zahl der Innovationen im Verhältnis zur Anzahl Abteilungen (Einzelfirmen + Tochterfirmen) (rechts) im Experiment „Partnersuche“

Ein weiteres überraschendes Ergebnis ist, dass sich bei als Start-ups neu entstehenden Zellherstellern der allgemeine Trend, dass bei „paralleler“ Partnersuche die Population steigt, umkehrt (Abbildung 85 oben rechts), während er sich in anderen Bereichen der Wertschöpfungskette, z. B. Komponentenherstellern, widerspiegelt (Abbildung 85 oben links). Dies könnte damit zusammenhängen, dass Zellhersteller ein Spezialfall sind und in der durchgeführten Simulation nur als Start-ups durch Imitation ausländischer Firmen entstehen konnten. Der „orthogonale“ Austausch des Wissens anderer Zellhersteller hat offenbar die Entstehung weiterer Zellhersteller-Start-ups begünstigt, obwohl die Gesamtzahl der Start-ups in etwa unverändert ist (Abbildung 85 unten).

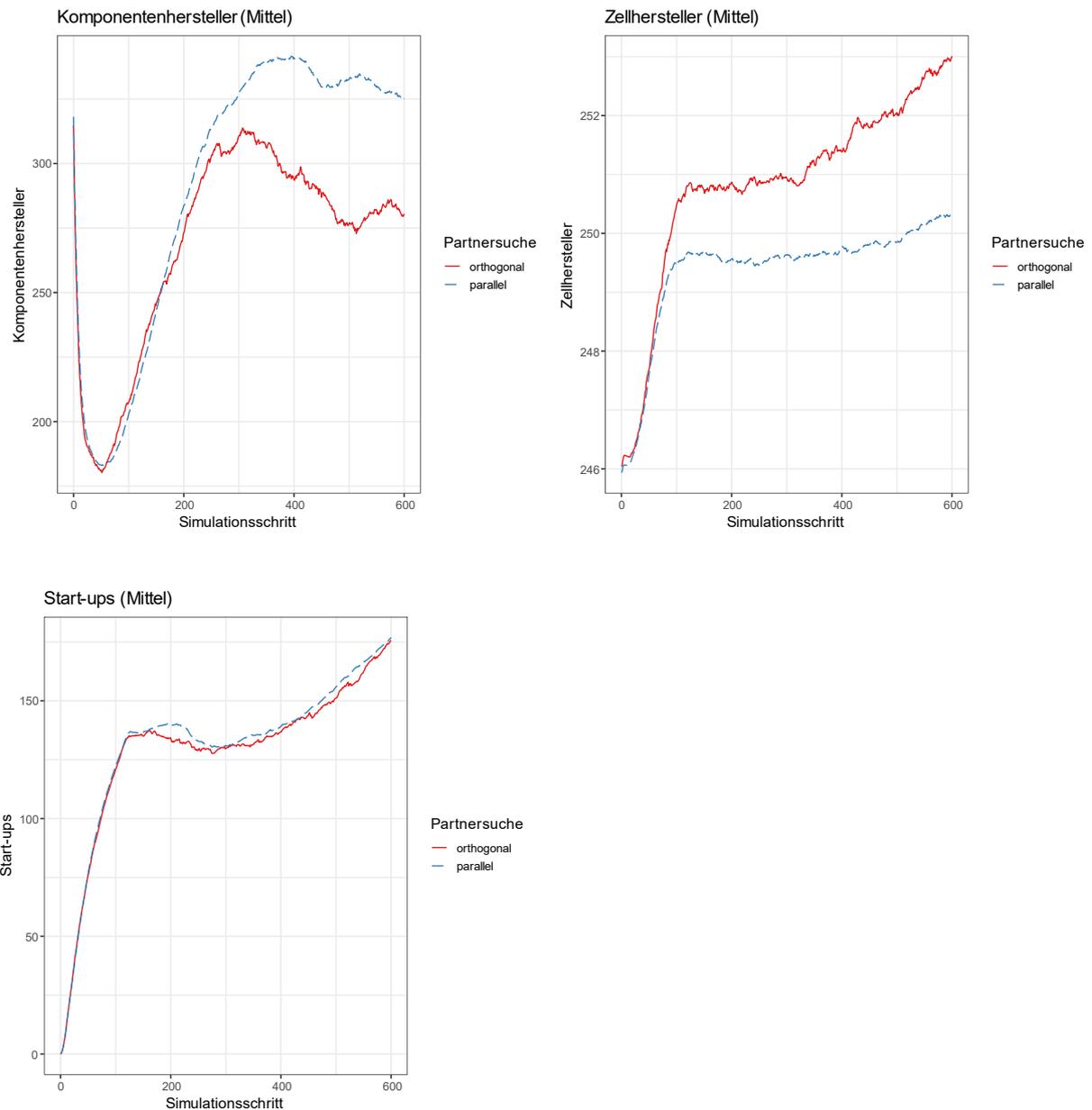


Abbildung 85: Die Anzahl Firmen, die Komponenten herstellen (oben links) und die Anzahl Firmen, die Zellen herstellen (oben rechts) sowie die Zahl der Start-ups (unten) im Experiment „Partnersuche“

8.6 Experiment 5 - Unternehmensstrategie

8.6.1 Beschreibung

Mit diesem Experiment sollte untersucht werden, ob und inwiefern sich eigene Innovationstätigkeit, also firmeninterne Forschung & Entwicklung (F&E), für Unternehmen auszahlt, bzw. ob und wie das Innovationssystem als Ganzes davon profitiert. Daher wurden verschiedene Fälle simuliert: alle Firmen betreiben nur F&E, alle Firmen betreiben nur Akquisitionen anderer Firmen, alle Firmen betreiben beides und alle Firmen machen keins von beidem. Dieses Experiment berührt mehrere der Fragen an das Modell (siehe Kapitel 4.2.4), insbesondere Frage 5 zur Forschungsförderung (hier firmeninterne private F&E), Frage 2 zur Kooperation entlang der Wertschöpfungskette (hier werden Akquisitionen bzw. Mergers von

Firmen als eine Form der engen Zusammenarbeit interpretiert) und Frage 1 zur generellen Ausgestaltung einer Zellproduktion.

In diesem Experiment sind 2 Parameter variiert worden (2 mal 2 Werte):

1. "*capital-percent-used-for-rnd-per-year*": 1,8 %/a (Wert 1a), 0 (Wert 2a)
2. "*Acquisitions?*": *true* (Wert 1b), *false* (Wert 2b)

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1a (1,8 %/a) & Wert 1b (*true*): In diesem Szenario wenden Firmen jährlich 1,8 % ihres Kapitals für Forschung & Entwicklung auf; Firmen können zusätzlich andere Firmen kaufen.
- Wert 2a (0 %/a) & Wert 1b (*true*): In diesem Szenario führen Firmen keine Forschung & Entwicklung aus (also 0 % ihres Kapitals wird dafür ausgegeben); Firmen können aber andere Firmen kaufen.
- Wert 1a (1,8 %/a) & Wert 2b (*false*): In diesem Szenario verwenden Firmen jährlich 1,8 % ihres Kapitals für Forschung & Entwicklung; Firmen können keine anderen Firmen kaufen.
- Wert 2a (0 %/a) & Wert 2b (*false*): In diesem Szenario betreiben Firmen keine Forschung & Entwicklung (sie geben 0% ihres Kapitals dafür aus); Firmen können auch keine anderen Firmen kaufen.

8.6.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Die hier variierten Aktivitäten Forschung & Entwicklung (F&E) und Akquisitionen werden nur durch Konglomerate (Konzerne) ausgeführt. Bei F&E investieren die Firmen Geld in die Gründung neuer Abteilungen, die im Modell durch zusätzliche Tochterfirmen abgebildet werden. Man kann sich dies insbesondere durch die Einstellung weiterer Fachexperten vorstellen, die neues Wissen mitbringen. Daher steigt bei F&E-Aktivität die Population der Tochterfirmen, am meisten bei ausschließlicher F&E. Bei Akquisitionen hingegen kaufen die Firmen bereits im Innovationssystem vorhandene Firmen bzw. Abteilungen auf und fügen sie ihrem Konglomerat hinzu. Daher tritt kein neues Wissen in das Innovationssystem ein und die Population vergrößert sich nicht. Dieser Sachverhalt zeigt sich deutlich in Abbildung 86 (links). Bei den Tochterfirmen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der F&E der Konglomerate und der Population. Es gibt jedoch auch einen indirekten Zusammenhang zwischen der Konglomerats-F&E und der Einzelfirmenpopulation (Abbildung 86, rechts). Einerseits sinkt die Zahl der Einzelfirmen, wenn sie durch Akquisition von Konglomeraten (Konzernen) aufgekauft werden, weshalb die Linie „Nur Akq“ ganz unten ist. Andererseits, und das ist etwas überraschend, scheint die von Konzernen ausgeführte F&E auch die Population der Einzelfirmen zu erhöhen. Entweder, weil die erhöhte Tochterpopulation auch zu erhöhten Ausgründungen (Spin-offs) führt, oder weil durch das zusätzliche Firmenwissen der Konzerne die Entstehung von Start-ups (unter Verwendung von ungenutztem Firmenwissen) begünstigt wird. Die in Abbildung 87 (links) gezeigte Start-up-Population zeigt eine Erhöhung durch F&E, allerdings erst nach etwa 400 Simulationsschritten. Die Zahl der Einzelfirmen ist bei F&E hingegen schon weit vor Schritt 400 deutlich erhöht. Vermutlich liegt dies daran, dass bei erhöhter Anzahl Tochterfirmen auch mehr Joint Ventures (im Basis-SKIN „Network“ genannt) gegründet werden. Eine genauere Analyse würde weitere Modellrechnungen erfordern.

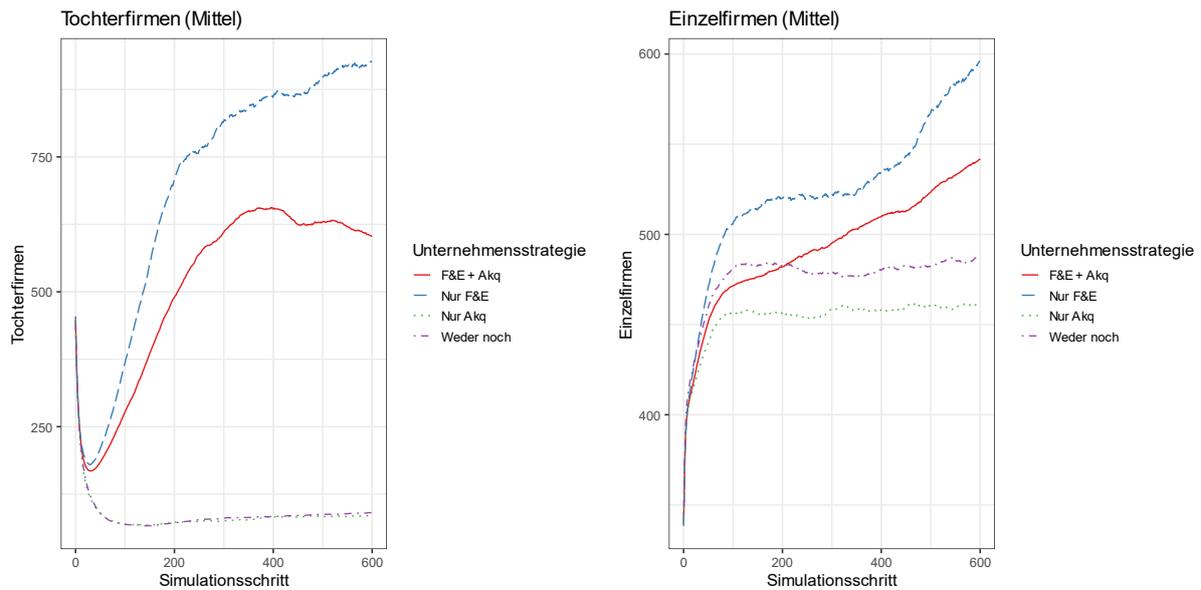


Abbildung 86: Verlauf der Population der Tochterfirmen (links) und der Einzelfirmen (rechts) im Experiment "Unternehmensstrategie"

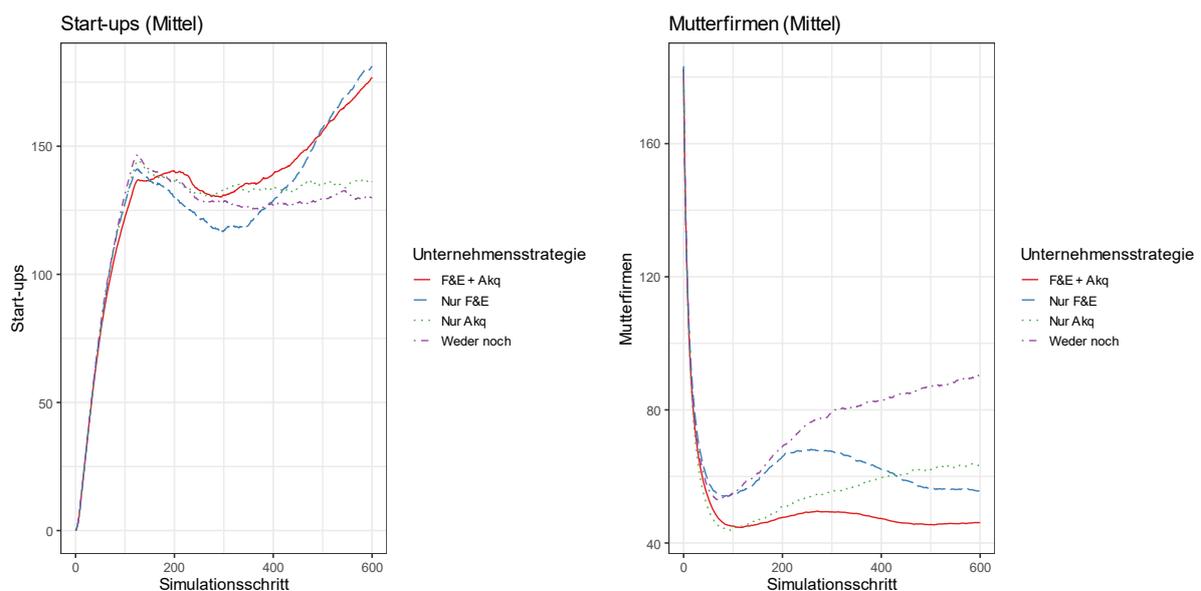


Abbildung 87: Verlauf der Population der Start-ups (links) und der Mutterfirmen (rechts) im Experiment "Unternehmensstrategie"

Die Zahl der Mutterfirmen (Abbildung 87 rechts) verhält sich beinahe umgekehrt zur Zahl der Tochterfirmen: Durch die F&E-Aktivität reduziert sich die Population der Mutterfirmen. Da die existierenden Konglomerate durch F&E größer werden, und auch durch die erhöhte Gründung von Start-ups und Spin-offs, ist im Innovationssystem weniger Platz für die Entstehung neuer Konglomerate. Mehr noch: Durch starke F&E-Aktivität nimmt die Anzahl der Mutterfirmen/Konglomerate nach einem Wachstum bis Simulationsschritt 200 wieder ab. Vermutlich haben sich manche Konzerne durch die F&E finanziell zu stark verausgabt. Einen ähnlichen Effekt hat die Akquisition: Sie führt zu mehr Konzentration, also weniger Konzerne, die dafür im Schnitt größer sind. Am stärksten ist die Konzentration, wenn sowohl F&E als auch

Akquisition stattfindet. Jedoch wird die Entstehung neuer Konzerne durch Akquisition nicht gehemmt, sodass die Population mit der Zeit ähnlich wächst wie ohne Akquisition.

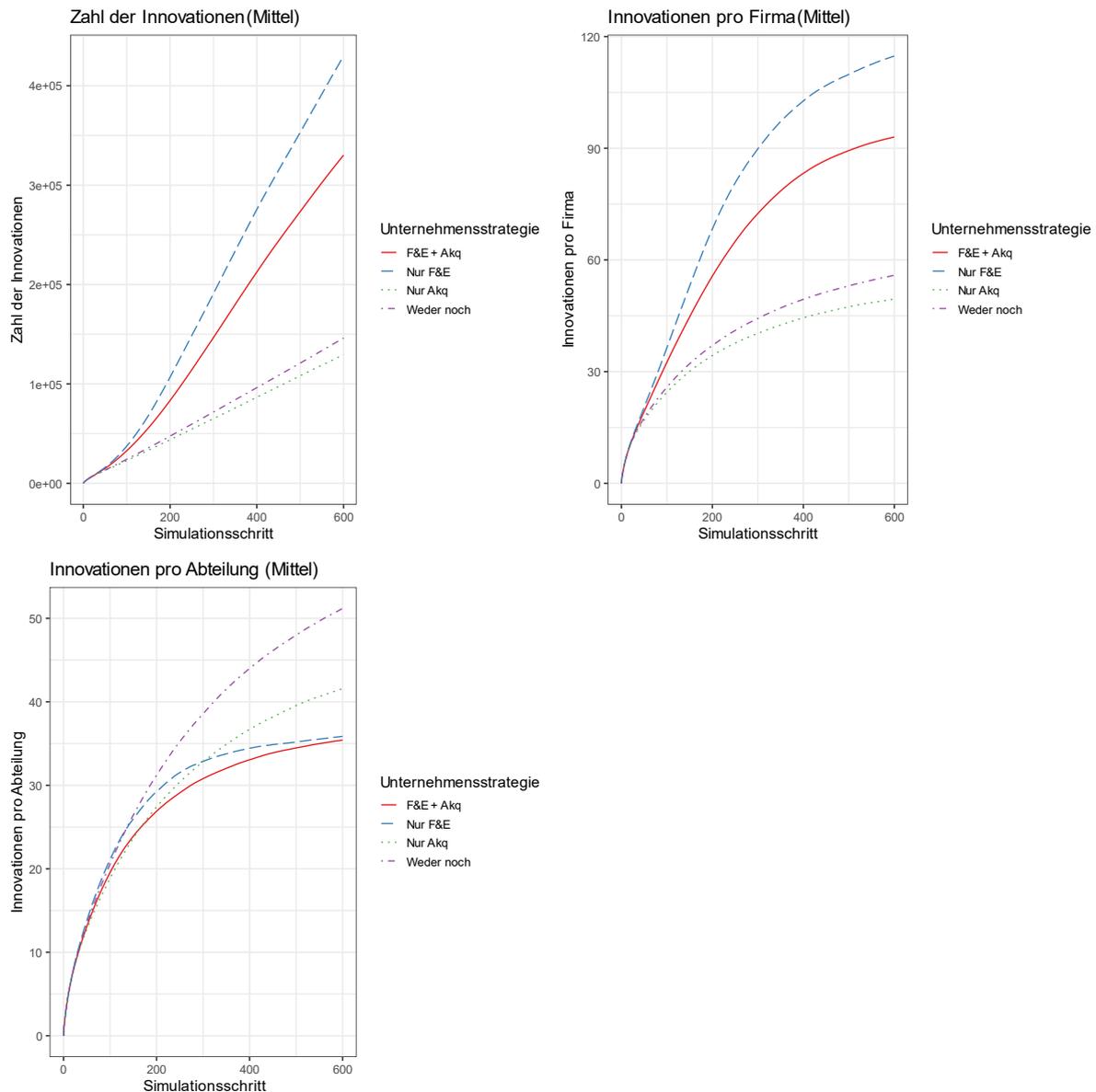


Abbildung 88: Zahl der Innovationen (oben links), Zahl der Innovationen im Verhältnis zur Anzahl Firmen (Einzelfirmen + Mutterfirmen) (oben rechts) und Zahl der Innovationen im Verhältnis zur Anzahl Abteilungen (Einzelfirmen + Tochterfirmen) (unten) im Experiment „Unternehmensstrategie“

Natürlich ist die Zahl der Innovationen im System größer, je mehr geforscht wird, da Neugründungen von Tochterfirmen neue Innovationen beitragen (Abbildung 88 oben links). Durch Akquisition vorhandener Firmen durch die Konglomerate reduziert sich aber die Innovation des Gesamtsystems, weil dadurch kein neues Wissen generiert wird. Auch die Innovation pro Firma (also pro entweder Einzelfirma oder Konzern) ist durch F&E deutlich größer und Akquisitionen, obwohl sie das Wissen des kaufenden Konglomerats erhöhen, verringern die durchschnittliche Innovation pro Firma (Abbildung 88 oben rechts). Anders bei der Innovation pro Abteilung, also pro Einzel- oder Tochterfirma (Abbildung 88 unten): Diese

ist sogar am größten, wenn die Firmen weder F&E noch Akquisition betreiben. Das liegt daran, dass bei F&E die meiste zusätzliche Innovation durch neu gegründete Abteilungen entsteht. Diese neuen Abteilungen sind überwiegend jung und hatten noch keine Gelegenheit, viele verschiedene Innovationen beizutragen, sodass die durchschnittliche Innovation pro Abteilung gering ist. Ohne die Gründung neuer Abteilungen sind die Abteilungen im Schnitt deutlich älter und haben auch schon durchschnittlich mehr Innovation erzeugt, trotzdem gibt es insgesamt viel weniger Innovation im System, weil es viel weniger Abteilungen gibt. Die niedrige Zahl Innovationen pro Abteilung ist also keineswegs ein schlechtes Zeichen für das Innovationssystem.

Interessant ist auch die Entwicklung des Gesamtkapitals der Firmen im Vergleich (Abbildung 89): Insgesamt ist relativ viel Kapital im System, wenn die Firmen weder freiwillig F&E betreiben noch andere Firmen kaufen. Durch die Akquisition von Fremdfirmen bzw. Abteilungen geht dem Innovationssystem immer Kapital verloren. Ganz auf F&E zu setzen, also Abteilungen selbst neu zu gründen, anstatt vorhandene zu übernehmen, ergibt jedoch einen noch größeren Kapitalstock. Obwohl die F&E Geld kostet, werden diese Kosten offenbar überkompensiert durch erhöhte Einnahmequellen der Firmen. Durch mehr F&E kann die Marktnachfrage in der Regel besser gedeckt werden, sodass mehr Geld in das System gelangt.

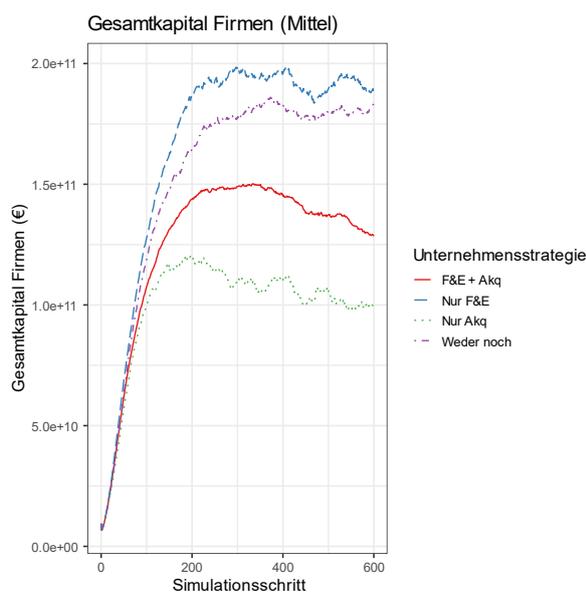


Abbildung 89: Gesamtkapital im Innovationssystem im Experiment „Unternehmensstrategie“

8.7 Experiment 6 – Finanzielle Förderung

8.7.1 Beschreibung

In diesem Experiment wird der Einfluss von Subventionszahlungen bzw. Marktanreizen, die an Batteriehersteller gezahlt werden, auf das Innovationssystem untersucht. Den Herstellern von Endprodukten, also Lithium-Ionen-Batterien bzw. Batteriesystemen, werden bis zu 30% ihrer Produktionskosten von staatlicher Seite erstattet. Dadurch ist es ihnen möglich, Produkte, die in der Herstellung eigentlich zu teuer sind, trotzdem gewinnbringend am Markt abzusetzen. Der Markteintritt neuer Produkte wird erleichtert. Dieses Experiment bezieht sich direkt auf

Frage 4 an das Modell (siehe Kapitel 4.2.4): „Wie sind die Auswirkungen auf die Innovationstätigkeit durch Produktförderung?“

In diesem Experiment ist ein Parameter variiert worden (4 Werte):

1. "*subsidies-per-batch-domestic*": 0 % (Wert 1), 10 % (Wert 2), 20 % (Wert 3), 30 % (Wert 4)

Die Werte haben die folgende Bedeutung:

- Wert 1 (0 %): In diesem Szenario zahlen inländische Batteriehersteller die vollen Produktionskosten (sie werden nicht subventioniert).
- Wert 2 (10 %): In diesem Szenario zahlen inländische Batteriehersteller 10 % weniger Produktionskosten.
- Wert 3 (20 %): In diesem Szenario zahlen inländische Batteriehersteller 20 % weniger Produktionskosten.
- Wert 4 (30 %): In diesem Szenario zahlen inländische Batteriehersteller 30 % weniger Produktionskosten.

8.7.2 Beispielhafte Auswahl von Experiment-Ergebnissen

Durch die finanzielle Förderung ist vor allem mehr Kapital im Innovationssystem vorhanden (siehe Abbildung 90 links). Dieses zusätzliche Kapital scheint in erster Linie die Gründung neuer Abteilungen (Tochterfirmen) von Konzernen zu befeuern, siehe Abbildung 90 rechts. Nachdem es auch bei den Einzelfirmen (Abbildung 91 rechts) durch finanzielle Förderung ein anfänglich erhöhtes Wachstum gibt, kommt dieses zum Erliegen, die Firmenzahl sinkt sogar und liegt ab ca. 100 Simulationsschritten unter der Population ohne finanzielle Förderung. Gegen Ende des Simulationsintervalls bei 600 Simulationsschritten fällt das Wachstum der Einzelfirmen mit finanzieller Förderung etwas größer aus als ohne (jedoch bei 20% Förderung mit größerer Unsicherheit), sodass es sein kann, dass nach noch mehr Schritten die geförderte Population wieder oben liegen würde. Mittelfristig scheinen aber vor allem Konzerne von der Förderung zu profitieren und Einzelfirmen (d.h. KMUs) sogar eher darunter zu leiden, was ein überraschendes Ergebnis ist, da die finanzielle Förderung an alle Firmen gleichermaßen vergeben wird. Bis ca. 300 – 400 Simulationsschritte ist die subventionierte Population der Konzerne (oder Mutterfirmen) größer als im Fall ohne Subventionen (Abbildung 91 links). Die anfängliche starke Selektion unter den Konzernen wird durch die Subventionen abgefedert. Jedoch schrumpft die Population danach weiter, während sie sich im Fall ohne Förderung stabilisiert, so dass es ab ca. 400 – 500 Schritten mit Förderung sogar weniger Konzerne gibt als ohne. Die finanzielle Förderung führt langfristig also zu weniger Diversität mit weniger Konzernen, die dafür im Mittel deutlich größer sind, nämlich bis zu mehr als doppelt so viele Tochterfirmen haben (Abbildung 92 links). Lediglich bei den Einzelfirmen könnte sich nach mehr als 600 Schritten durch Förderung eine größere Population einstellen. Insgesamt gibt es ohne finanzielle Förderung bis mindestens über 600 Simulationsschritte hinaus deutlich mehr Firmen, wenn man Einzelfirmen und Konglomerate zusammen betrachtet (Abbildung 92 rechts).

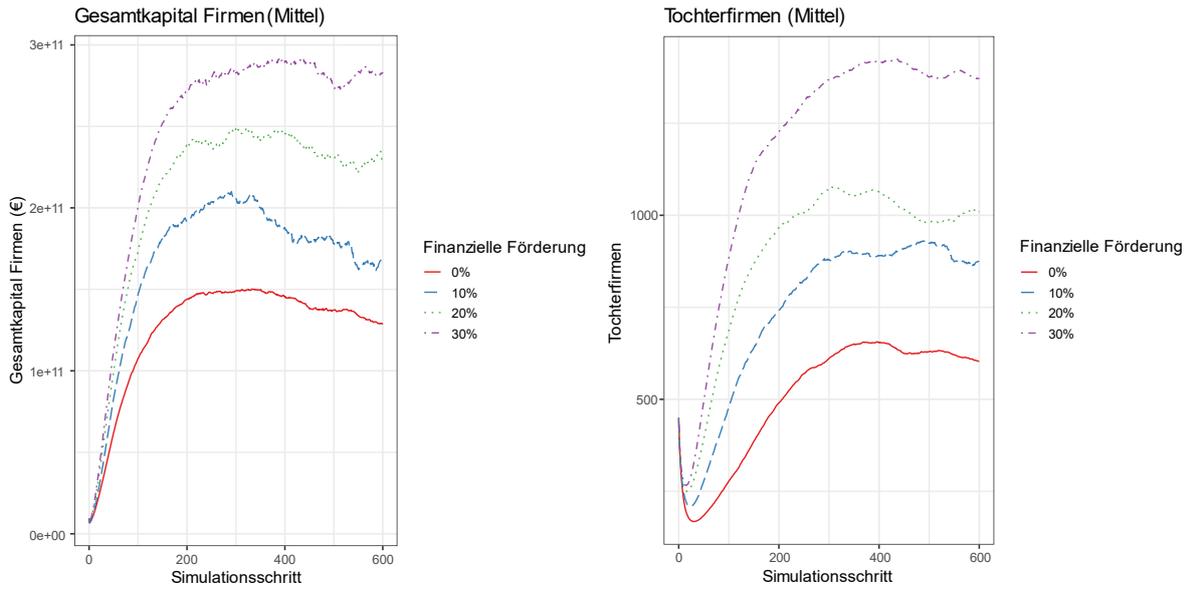


Abbildung 90: Verlauf des Gesamtkapitals sowie der Population von Tochterfirmen im Experiment „Finanzielle Förderung“

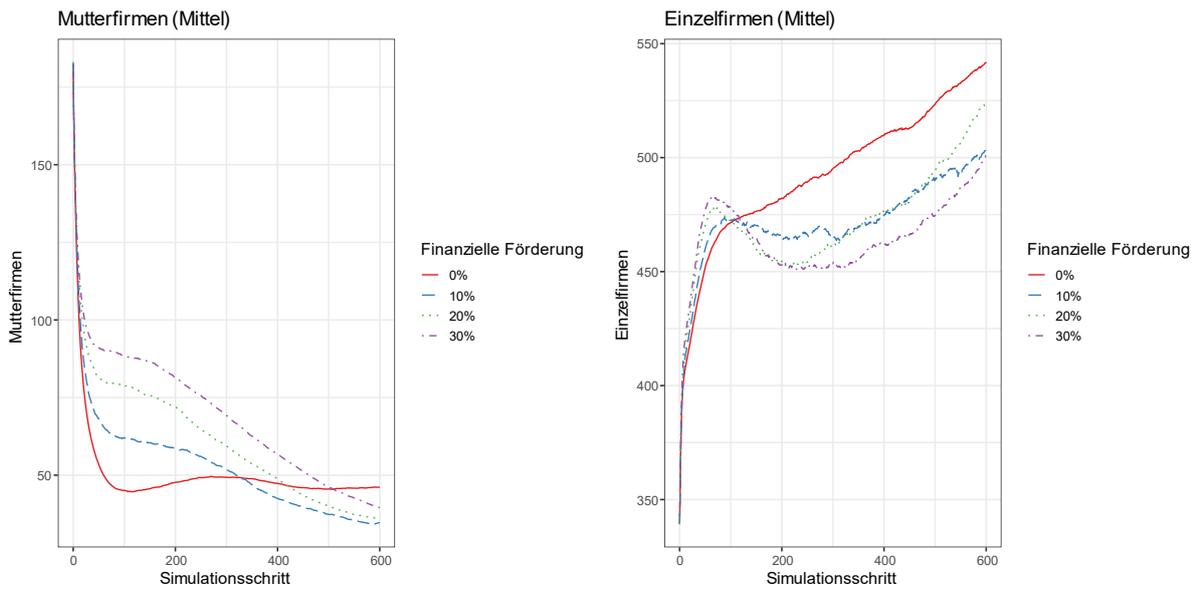


Abbildung 91: Verlauf der Population von Mutterfirmen und Einzelfirmen im Experiment „Finanzielle Förderung“

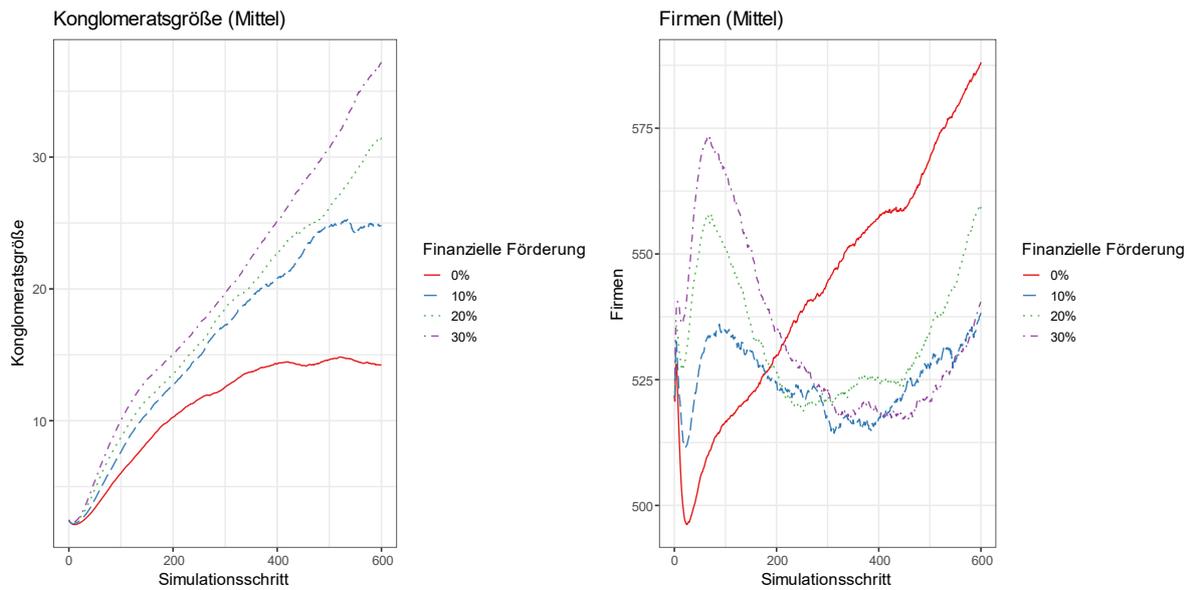


Abbildung 92: Verlauf der Konglomeratsgröße (Anzahl Tochterfirmen pro Konglomerat) und der Population von Firmen, d.h. Einzelfirmen plus Konglomerate, im Experiment „Finanzielle Förderung“

Ebenso zeigt sich bei den Start-ups (Abbildung 93), die wesentlich für das Wachstum der Einzelfirmen verantwortlich sind, dass mit finanzieller Förderung der bestehenden Unternehmen anfangs deutlich weniger Start-ups gegründet werden bzw. überleben. Mittel- bis langfristig ist die Start-up-Entstehungsrate aber vergleichbar, egal ob es finanzielle Förderung gibt oder nicht, denn die Steigung der Populationskurven ist jeweils ähnlich. Nur bei 20% Förderung scheint gegen Ende der Simulation das Wachstum der Start-ups im Mittel erhöht zu sein, allerdings ist hier auch die Schwankungsbreite (Varianz oder Standardabweichung) deutlich größer als in den anderen Fällen. Die finanzielle Förderung scheint also für Innovation hinsichtlich Start-ups nicht förderlich, unter gewissen Umständen eventuell sogar hinderlich zu sein.

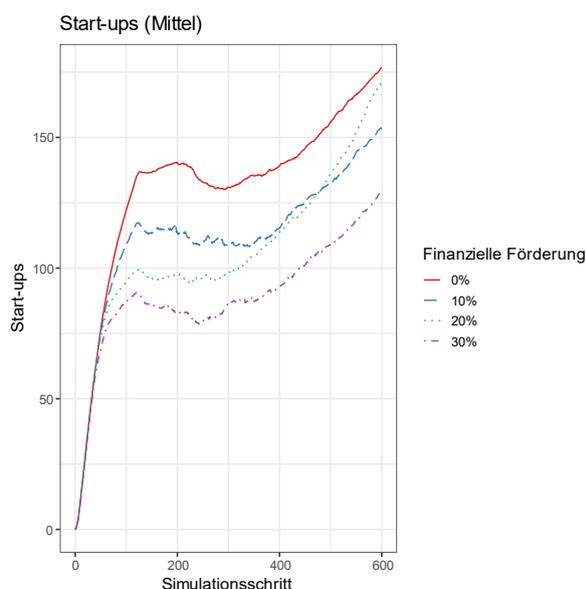


Abbildung 93: Die Start-up-Population im Experiment „Finanzielle Förderung“

Betrachtet man das Gesamtsystem, so gibt es durchaus deutlich mehr Innovation, wenn finanziell gefördert wird, siehe Abbildung 94 links. Betrachtet man aber die Zahl der Innovationen, die zu einem erfolgreichen Produkt führten (Abbildung 94 rechts), fällt der Unterschied zwischen den Förderhöhen deutlich geringer aus oder ist sogar marginal. Dies ist ein gänzlich anderes Verhalten als bspw. im Experiment 5 zur Unternehmensstrategie (Kapitel 8.6), bei dem sich die durch F&E entstandenen Innovationen durchaus vermarkten ließen. Es scheint also, als ob die durch finanzielle Förderung entstehende zusätzliche Innovation größtenteils überflüssig ist, am Markt gar nicht gebraucht wird und daher nicht verwertet werden kann. Die Subventionen scheinen also im Wesentlichen die Kassen der Konzerne zu füllen, aber für das Innovationssystem keinen Mehrwert zu bieten.

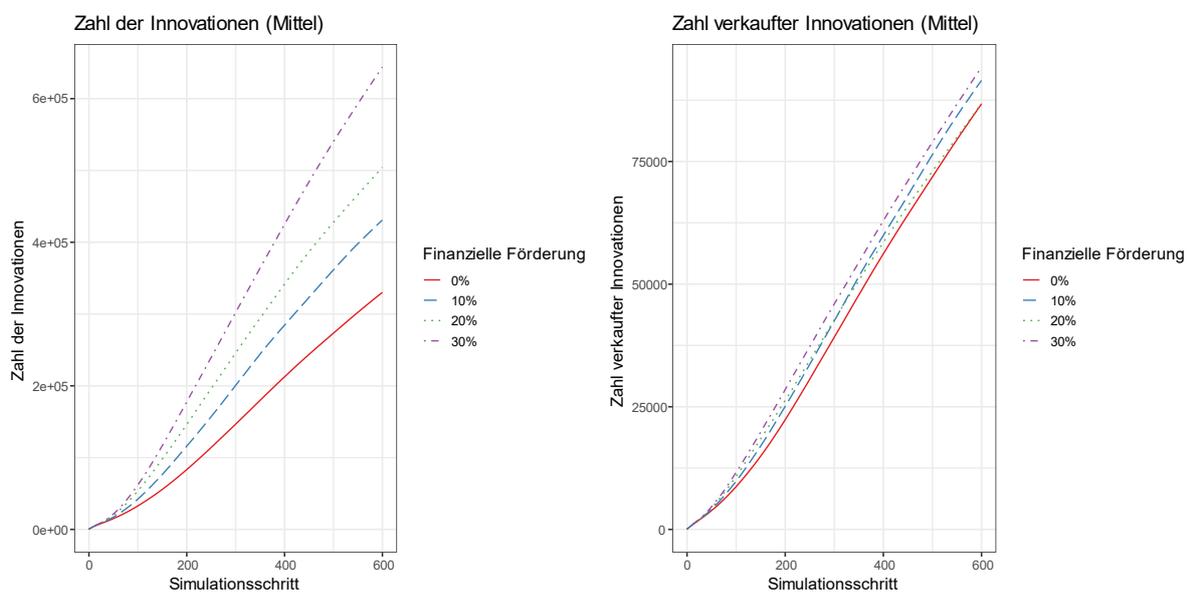


Abbildung 94: Die Innovationszahl (links) und Zahl am Markt verkäuflicher Innovationen (rechts) im Experiment „Finanzielle Förderung“

Man würde erwarten, dass die finanzielle Förderung, die ja die Produktionskosten senkt, dazu führt, dass Firmen ihre Produkte günstiger anbieten, um sich auf dem Merit-Order-Markt einen größeren Marktanteil und damit einen höheren Umsatz zu sichern. Aber selbst das scheint nicht uneingeschränkt der Fall zu sein: Zwar liegt der effektive Preis, also Preis pro kWh Kapazität und pro Jahr Lebensdauer, bei den Batterien für Elektrofahrzeuge (BEV) mit der Förderung im Mittel etwas niedriger (Abbildung 95 links). Dafür ist er bei Batterien für Werkzeuge umso höher, je mehr bezuschusst wird (Abbildung 95 rechts). Und das mit geringerer Schwankungsbreite, also offenbar systematisch. Bei den anderen Batterietypen (stationäre Anwendung, portable Anwendung, Mikro) ist kein nennenswerter Unterschied im Preis erkennbar. Eventuell weist dies aber auch darauf hin, dass das implementierte Produktionskapazitätsmanagement noch nicht einwandfrei funktioniert und die Firmen, die besonders günstig anbieten, es nicht schaffen, ihre Produktion hochzufahren und so den Markt stärker zu bedienen.

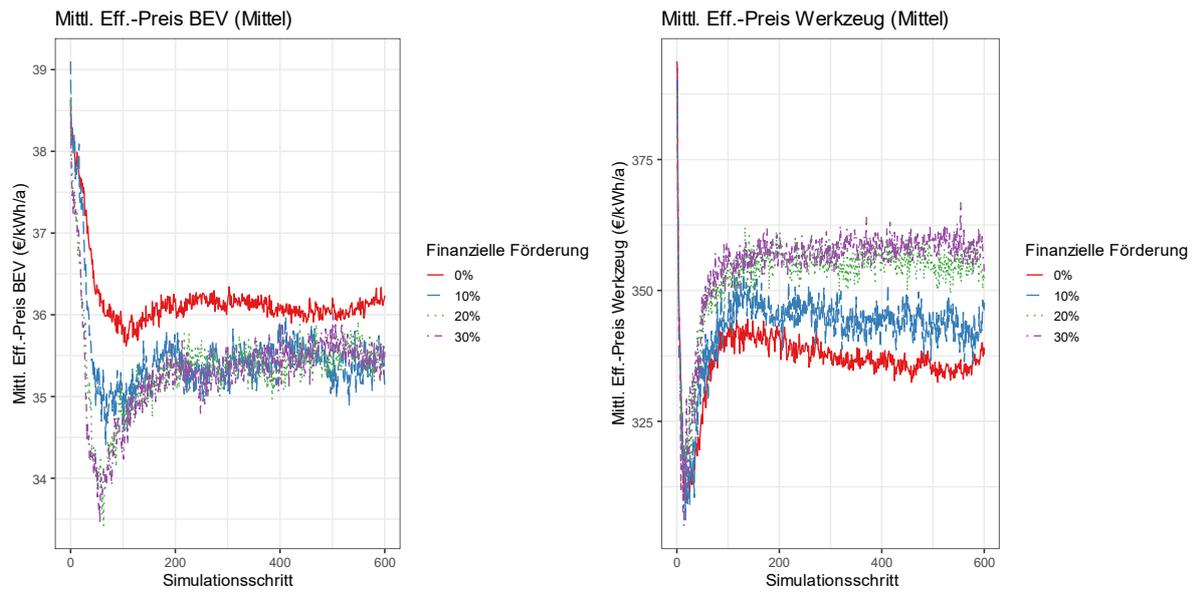


Abbildung 95: Verlauf des mittleren Effektivpreises für BEV-Batterien und Werkzeug-Batterien im Experiment „Finanzielle Förderung“

9 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine wesentliche Herausforderung für die Gestaltung zukünftiger Energiesysteme ist es, Wirkungszusammenhänge in sozialen Prozessen einzubeziehen. Wichtig ist es aber, dass solche Zusammenhänge nicht nur in Fallstudien untersucht werden, sondern für Betrachtungen in der Zukunft berücksichtigt werden können. Ein besonders relevantes Element der Energiewende, das sowohl empirisch schon gut erforscht ist als auch modelltechnisch bereits für andere Sektoren abbildbar ist, ist die Entstehung technologischer Innovationen. Die Erstellung eines Modells, mit dem Politikmaßnahmen zur Unterstützung der Innovationsdynamik analysiert werden können, stand im Fokus des Projekts.

Mit dem im Projekt gewählten Ansatz, der agentenbasierten Modellierung, kann die Entstehung aggregierter Größen auf Makroebene durch das heterogene Verhalten einzelner Akteure modelliert werden. Mit Hilfe von „Wenn-dann“-Analysen können in Experimenten externe Rahmenbedingungen und Maßnahmen variiert werden und ihre Auswirkungen auf Innovationsnetzwerke ermittelt werden. Grundlage dafür ist natürlich, dass die wesentlichen Zusammenhänge im Modell erfasst sind.

Im Projekt ergaben sich eine ganze Reihe von Herausforderungen auf verschiedenen Ebenen. Die erste Frage im Projekt stellte sich bezüglich des technologischen Fokus. Das Ziel war, eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende auszuwählen, in dem Sinne, dass die Technologie die Anwendung bestimmter Erzeugungstechnologien ermöglicht, indem sie bestimmte Systemaufgaben übernimmt, die für die technische Funktionalität des Energiesystems notwendig sind, aber mit der neuen Erzeugungsvariante nicht abgedeckt werden können. Um die Technologie zu identifizieren, wurden verschiedene Szenarien zukünftiger Energieversorgung mit hohem Anteil schwankender Energiebereitstellung durch die Nutzung erneuerbarer Energien bis 2050 untersucht. Zudem wurden Systemaufgaben, die durch die Analysen mit stündlicher Auflösung nicht abgedeckt werden konnten, diskutiert. Aus den Analysen wurden verschiedene Technologien, die in Zukunft Systemrelevanz haben werden, identifiziert. Vor dem zusätzlichen Hintergrund der Anforderungen im Projekt, wie absehbare Innovationspotentiale und Datenlage, wurden schließlich Akkumulatoren bzw. Lithium-Batterien als eine wesentliche Schlüsseltechnologie ausgewählt.

Um das Modell auf möglichst relevante Fragestellungen für Schlüsseltechnologien auszurichten, wurde zunächst ein Literaturreview durchgeführt und darauf aufbauend Interviews mit Experten geführt sowie in einem Workshop zusammengestellte Hemmnisse und mögliche Maßnahmen diskutiert und ergänzt. Um ein möglichst vollständiges Bild zu erhalten, wurde die Theorie technologischer Innovationssysteme als Basis herangezogen, die bereits eine gute Heuristik zur Untersuchung bietet, entlang derer Hemmnisse analysiert werden können. Vor allem die Elemente und Funktionen technologischer Innovationssysteme konnten hierzu herangezogen werden. Aus ihnen wird klar, dass Wissensentstehung und Wissensaustausch wesentliche Elemente für ein solches Innovationssystem sind.

Als Ausgangspunkt für das Projekt wurde das Basis-SKIN-Modell verwendet (Gilbert et al. 2010). In ihm sind mit Hilfe eines evolutionären Ansatzes bereits viele Prozesse in Innovationsnetzwerken grundlegend modelliert. Dieses wurde auf den inhaltlichen Bereich

der Energieversorgung übertragen und, soweit notwendig, erweitert. Der Fokus auf die Wissensentstehung und den Wissensaustausch ist die Besonderheit des Modells. Mit der Modellierung von Wissen wird im Modell eine neue Dimension adressiert, die noch in keinem anderen Modell zur Untersuchung von Energiesystemen abgebildet wurde. Das so erarbeitete SKIN-Energy wird auf der Nachfrageseite durch das Modell AMIRIS ergänzt. Anhand der ausgewählten Modelle und der identifizierten Hemmnisse und möglichen Gegenmaßnahmen wurden Fragen an die Modelle und daraus Anpassungs- und Erweiterungsbedarfe identifiziert.

In der Umsetzung der Modellierungen ergaben sich bezüglich des SKIN-Modells eine ganze Reihe von Herausforderungen, für deren Lösung tief in den Mechanismus von SKIN eingegriffen werden musste. Dabei war es stets eine besondere Schwierigkeit, das Modell zwar genauer zu spezifizieren, aber die evolutionären Mechanismen des Modells zu erhalten. Die Basisfunktionalität wurde nur so weit angepasst, wie es notwendig war. Eine wesentliche Änderung war die Überarbeitung der Wissensrepräsentation, indem die Menge übertragenen Wissens eingeführt wurde, woraus dann Zuwachs an Expertise und daraus Produktqualität ermittelt wurde. Die Austausch- und Forschungsprozesse blieben zunächst unverändert. Des Weiteren wurde klar, dass öffentlich geförderte Forschung im Bereich einer Hochtechnologie wie Lithium-Ionen-Batterien eine wesentliche Rolle spielt. Deswegen wurde eine Modellierung von öffentlicher Forschung ergänzt. Äußerst relevant im Bereich neuer Schlüsseltechnologien ist zudem die Entstehung von Start-ups, deren Prozesse nur sehr rudimentär im Basis-Modell abgebildet sind. Auch wichtig im Bereich von Batterien, die nicht immer selbst das Endprodukt darstellen, ist die Abbildung großer Firmen als Konglomerate, die im Basis-Modell nicht enthalten sind. Relevante Beispiele sind etwa Fahrzeughersteller, deren Forschungsabteilungen sich mit der Entwicklung von Batteriesystemen beschäftigten. Die modellierten Tochterfirmen können dann auch als „Abteilungen“ großer Firmen interpretiert werden. Eine weitere, ganz wesentliche Änderung betrifft die Abbildung von Produkten in einer gerichteten Wertschöpfungskette, die mit dem Basis-SKIN nicht möglich ist. Ganz wesentlich für die Modellierung und vor allem die Anbindung an die Nachfrage bzw. an die Märkte ist die Übersetzung der nicht festgelegten Geldeinheiten in Kosten und Preise sowie die Entstehung und Verbesserung für Systemdienstleistungen relevante Parameter von Technologien, wobei auch die auf Expertise basierende Produktqualität einbezogen wurde. Neben der stationären Energieversorgung mussten noch weitere wesentliche Märkte abgebildet werden, um eine Gesamtnachfrage nach Batterien abschätzen zu können.

Die Modellierung von Erlöspotentialen der Schlüsseltechnologien stellte sich als herausfordernd dar. Nachdem aus historischen Preiszeitreihen keine belastbaren Korrelationen für die Sekundärregelenergiemärkte gefunden werden konnten, wurde dieser Markt mit AMIRIS grundlegend modelliert. Diese wesentliche Erweiterung des Modells ermöglicht eine bessere Abschätzung von Erlöspotentialen der Schlüsseltechnologien, welche aus technischer Sicht gut für den Einsatz zur Erbringung von Systemdienstleistungen geeignet sind. Die abgeschätzten Werte entsprechen bei den betroffenen Annahmen Maximalwerten für die Erlöse aus Arbitrage am Day-Ahead-Markt und Systemdienstleistung am Sekundärregelmarkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erlöspotentiale im Vergleich zu historischen Werten gering ausfallen. Zusätzliche Märkte, welche theoretisch auch für die

Vermarktung von Batteriekapazitäten in Frage kommen, wie etwa der Intraday-Markt oder der Primärregelenergiemarkt, sind im Modell derzeit noch nicht berücksichtigt. Aufgrund ihrer hohen Komplexität und zeitlichen Kurzfristigkeit ist die langfristige Modellierung sehr herausfordernd, jedoch für zukünftige Arbeiten als interessante Modellerweiterung zu sehen.

Die Kalibrierung von SKIN stellt einen wesentlichen Teil der Modellierung dar. Erst dadurch wird das Modell auf die realistischen Bedingungen angepasst. In einem ersten Schritt wurden relevante Akteure identifiziert. Hierzu wurden Mitgliederlisten von Verbänden, Ausstellerlisten von Messen, Patentdaten und Förderdatenbanken herangezogen. Des Weiteren wurden in einer detaillierteren Patentanalyse sowie aus Daten zu Wirtschaftsunternehmen Eigenschaften der Akteure herausgezogen, aus denen dann Typen entwickelt werden konnten. Unterschieden wurden schließlich Forschungsinstitute, Start-up-Firmen, kleine/mittlere Unternehmen und große Unternehmen. Aus den Daten wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen erstellt, aus denen sich die Eigenschaften der Typen in der Simulation ergeben. Als weiteres wurden die Erlöspotentiale aus AMIRIS genutzt, um die Modellierungen auf Seiten der Anwendung stationärer Speicher zu kalibrieren. Die Anbindung gestaltete sich schwierig, da durch die Modellierung nicht alle Anwendungen abgedeckt werden konnten. Ganz wesentlich sind für die Untersuchungen des Innovationssystems Lithium-Batterien andere, teilweise bereits etablierte Märkte wie die von Werkzeugen oder portablen Geräten und der sich voraussichtlich stark entwickelnde Fahrzeugmarkt. Auch diese mussten über entsprechende Kalibrierung im Modell berücksichtigt werden. Um auch die Rolle ausländischer Zellhersteller im Modell abbilden zu können, wurde zusätzlich eine Analyse zur Ansiedlung einer Lithium-Ionen-Zellproduktion in Europa bzw. Deutschland auf Basis empirischer Untersuchungen zur globalen Wind- und Photovoltaikindustrie durchgeführt. Diese zeigte auf, dass durchaus verschiedene Entwicklungen denkbar sind, in denen eine eigene Zellherstellung entsteht oder ausländische Zellhersteller ihre Produktion und ggf. auch Entwicklung nach Europa oder sogar Deutschland verlegen. Der Versuch einer Validierung des Modells anhand historischer Daten erscheint aufgrund der permanent sich verändernden Rahmenbedingungen im Bereich Lithium-Batterien als nicht zielführend. Deshalb wurde darauf verzichtet und dafür mehr Aufwand in die Modellanpassung und Kalibrierung gesteckt.

Um das Potential der erarbeiteten Modelle zu zeigen, wurden sechs Experimente definiert und durchgeführt, die auf die Beantwortung der an die Modelle gestellten Fragen zielen. In Experiment 1 wird der Anteil heimischer Firmen in der Zellproduktion variiert. Es ergibt sich, dass sich das Innovationssystem bei der Nutzung von Zellen ausländischer, im Modell „unsterblicher“, Hersteller stabiler entwickelt. Im Fall einer Mischung einheimischer und ausländischer Zellhersteller ist die Zahl der verkauften Innovationen pro Firma bzw. Abteilung am höchsten, was auf einen höheren Innovationserfolg pro innovierende Firma bzw. Abteilung in diesem Fall hinweist. Im zweiten Experiment wurde die Intensität der öffentlichen, breit angelegten Forschungsförderung variiert. Hier zeigt sich eine etwas stärkere Innovationstätigkeit mit anwachsender Förderung. Der Effekt ist jedoch relativ gering. Einen größeren Einfluss hätten voraussichtlich gezielter ausgerichtete Förderungen. Um dies genauer zu untersuchen, wären weitere Experimente notwendig. In Experiment 3 waren die

vorgesehenen Variationen aufgrund eines Fehlers leider wirkungslos. Dadurch konnte es aber genutzt werden, um die Signifikanz von Abweichungen in den Experimenten zu untersuchen. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse deutlich näher beisammen lagen, als es in Experiment 1 und 2 der Fall war, so dass die dort beobachteten Abweichungen signifikant zu sein scheinen. Im vierten Experiment wurde der Effekt der Strategie bei der Partnersuche auf die Innovationstätigkeit untersucht. Die Strategie, Partner entlang bzw. parallel zur eigenen Wertschöpfungskette zu suchen, ist im Experiment leicht erfolgreicher als quer zur Wertschöpfungskette, bei Konkurrenten. Interessant ist, dass bei Zellherstellern, wie sie im Modell abgebildet sind, im Gegensatz zu anderen Akteuren die Orientierung an Konkurrenten eine erfolgreichere Strategie zu sein scheint. Im fünften Experiment wurde die Unternehmensstrategie von Konglomeraten variiert. Optionen waren Durchführung firmeninterner Forschung und Akquisitionen fremder Firmen. Während sich mit Akquisition die Konglomerate vor allem vergrößern, ergeben sich mit erhöhter firmeninterner Forschung insgesamt mehr Innovationen im System. Das Gesamtkapital des Innovationssystems ist bei reiner firmeninterner Forschung ohne Akquisitionen am höchsten. Experiment 6 konzentriert sich auf die Untersuchung des Effekts finanzieller Förderung von Produkten. Als Ergebnis ist zu sehen, dass die Förderung zu geringerer Diversität, wenigen aber größeren Konzernen führt. Die Innovationstätigkeit wird deutlich erhöht. Die Zahl verkaufter Innovationen zeigt allerdings nur geringe Unterschiede. Die erhöhte Innovationstätigkeit in den Konglomeraten führt also nicht zu wesentlich mehr erfolgreichen Produkten.

Die Experimente zeigen, wie die Modelle verwendet werden können, um die Dynamik des Innovationssystems zu analysieren. Obwohl die ersten Ergebnisse bereits einige interessante Zusammenhänge aufzeigen, sollen diese hier zunächst nur die Potentiale der Modelle zeigen. Für belastbarere Aussagen wären tiefergehende Untersuchungen einzelner Fragen sinnvoll, die auch noch weitere gezielte Variationen beinhalten sollten.

Insgesamt konnten im Projekt die zwei Modelle AMIRIS und SKIN weiterentwickelt werden, um Innovationsnetzwerke für die ausgewählte Schlüsseltechnologie Lithium-Batterie zu simulieren. Die Experimente haben exemplarisch aufgezeigt, welche Ergebnisse aus „Wenn-Dann-Analysen“ mit den Modellen zu erwarten sind. Die Beispiele zeigen, dass agentenbasierte Modelle gut für die Modellierung sozialer Prozesse im Bereich der Innovationsentstehung von Energietechnologien angewendet werden können. Das vorhandene Basis-SKIN-Modell musste dazu allerdings deutlich überarbeitet und mit weiteren Modulen und Details versehen werden. Die Basisprozesse blieben dabei in weiten Teilen unverändert. Aber auch hier gibt es noch weitere Verbesserungsmöglichkeiten, die für weitere Projekte angegangen werden sollten.

Die Modellierungen zeigen aber auch, wie aufwändig solche Modellierungen sein können, und wie schwierig es ist, konkrete Aussagen zu treffen. Allerdings ist dabei auch zu beachten, dass Zukunftsaussagen anderer Modelle ebenso zu relativieren sind. In der Analyse zukünftiger Energiesysteme werden üblicherweise Szenarien herangezogen, die Aussagen über Möglichkeiten der Entwicklung unter den modellierten Annahmen treffen (vgl. Acatech et al. 2015). Dabei werden meist technische und ökonomische Zusammenhänge berücksichtigt. Entwicklungen in der Gesellschaft und Akzeptanz von Technologien sowie die

hier betrachteten unterstützenden Prozesse für Wissensgestehung und -austausch werden nicht betrachtet. Was diese angeht, wird davon ausgegangen, dass sie in einer bestimmten angenommenen Weise organisiert sind. Auswirkungen und Maßnahmen in dem Bereich können daher auch in Analysen nicht berücksichtigt werden. Auch techno-ökonomische Szenarien sind daher immer auch in ihren Aussagen bezüglich der zukünftigen Entwicklung beschränkt. Nichtsdestotrotz sind solche Studien wichtig, um Zusammenhänge diskutieren und informierte rationale Entscheidungen treffen zu können. Allein das Aufzeigen möglicher Zusammenhänge, die sonst nicht oder nur wenig Beachtung finden könnten, ist ein großer Mehrwert. In bisher komplett unberücksichtigten Bereichen ist sogar die Diskussion der Zusammenhänge schon gewinnbringend, um diese transparenter zu machen und ggf. auf wesentliche Sachverhalte hinzuweisen. Dabei sind immer die Möglichkeiten und Grenzen der Modelle zu berücksichtigen.

Im Projekt zeigte sich eine Reihe wesentlicher Herausforderungen, die in weiteren Arbeiten angegangen werden sollten. Neben der Übertragung des Modells SKIN-Energy auf andere Technologien sollte untersucht werden, ob und wie es zu vereinfachen ist, so dass das Modell in Zukunft breitere Anwendung finden kann. Des Weiteren stellt sich die Frage, welche weiteren Ergänzungen und Verknüpfungen mit anderen Analysen notwendig sind, um es breiter einsetzen zu können. Mit den Arbeiten im Projekt Manifold, gefördert vom BMWi, und dem Projekt MoMeEnT, gefördert von der DFG, wird das Modell SKIN-Energy aktuell in weiteren Bereichen angewendet und weitere dazu relevante Modellerweiterungen entwickelt und implementiert.

Referenzen

- Abernathy, W. J.; Utterback, J. M. (1975) A dynamic model of process and product innovation. OMEGA, The international Journal of Management Science, Vol. 3, No. 6, pp. 639–656
- Abernathy, W.J.; Utterback, J.M. (1988) Innovation over time and in historical context. In: Tushman, M.L., Moore, W.L. (Eds.), Readings Manag. Innov. Harper Collins Publishers, New York, NY, pp. 25–36
- Acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.) (2015) Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V., Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V., Berlin
- Adams, R.; Bessant, J.; Phelps, R. (2006) Innovation Management Measurement: A Review. International Journal of Management Reviews, 8, 21-47
- Ahrweiler (2010) Innovation in Complex Social Systems, an introduction. In: Ahrweiler, P. (ed.) Innovation in Complex Social Systems. Routledge, New York
- Ahrweiler, P.; Gilbert, N.; Pyka, A. (eds.) (2015a): Joining complexity science and social simulation for innovation policy. Agent-based modelling using the SKIN platform. Cambridge Scholars: London
- Ahrweiler, P.; Pyka, A. (2015) Innovation. In: Saam, N. et al. (eds.): Handbuch Modellbildung und Simulation. VS-Verlag, Wiesbaden
- Ahrweiler, P.; Pyka, A.; Gilbert, N. (2015b): Policy Modelling of Large-Scale Social Systems: Lessons from the SKIN Model of Innovation. In: Ahrweiler, P., Gilbert, N., and Pyka, A. (eds.) (2015): Joining complexity science and social simulation for innovation policy. Agent-based modelling using the SKIN platform. Cambridge Scholars: London
- Akhil, A. A.; Huff, G.; Currier, A. B.; Kaun B. C.; Rastler D. M.; Chen, S. B.; Cotter, A. L.; Bradshaw, D. T.; Gauntlett, W. D. (2013) DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in collaboration with NRECA. Sandia National Laboratories, SAND2013-5131, Albuquerque
- Alexander, A. T. (2012) Maximising the outcome of University to Industry Knowledge Transfer. Doctoral thesis, University of Exeter, Exeter
- Appleby, A. (2011) MurmurHash. URL <https://sites.google.com/site/murmurhash/>, last visited on 02/19/2020
- Appleby, A. (2016) MurmurHash3.cpp. URL <https://github.com/aappleby/smhasher>, last visited on 02/19/2020
- Axelrod, R. (1997) The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration., Princeton University Press, Princeton
- Badedda, J.; Kairies, K.-P.; Thien, T. (2016) Batterien am Netz: Vom Heimspeicher bis zur stationären Großbatterie. - Berlin : Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)
- Bedrich, K. (2010) Speichertechnologien in Elektroautos und für Photovoltaikstrom in Hinblick auf ein autarkes Gesamtsystem [Bericht].: TU Bergakademie Freiberg

- Benger, R.; Beyer, K.; Brenner, S.; Funck, F.; Güttel, R.; zum Hingst, J.; Lietz, F.; Mbuy, A.; Minke, C. (2013) Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit. Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn), Goslar
- Berkley LAB (2017) Annual U.S. Turbine Installation Capacity by Original Equipment Manufacturer (OEM) 1990-2016. Based on Wind Technologies Market Report, personal information from Mark Bolinger, Lawrence Berkeley National Laboratory, 21.12.2017
- Bommer, M.; Jalajas, D. (2004). Innovation sources of large and small technology-based firms. *IEEE Transactions in Engineering Management*, 51, 13-17
- Brenner, T. (2006) Agent Learning Representation - Advice on Modelling Economic Learning. In Tesfatsion & Judd, eds. *Handbook of Computational Economics - Volume 2*. Elsevier
- Bünger, U.; Crotogino, F.; Donadei, S.; Gatzen, C.; Glaunsinger, W.; Kleinmaier, M.; Könemund, M.; Landinger, H.; Lebioda, T. J.; Leonhard, W.; Sauer, D.; Weber, H.; Wenzel, A.; Wolf, E.; Woyke, W.; Zunft, S. (2009) Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. ETG Task Force Energiespeicher, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG). VDE, Frankfurt
- Büscher, C.; Schippl, J.; Sumpf, P. (Hrsg.) (2019) Energy as a sociotechnical problem: an interdisciplinary perspective on control, change, and action in energy transitions. 2019. Routledge, London
- Buttler, A.; Hentschel, J; Angerer, M. (2015) Statusbericht Flexibilitätsbedarf im Stromsektor. Bericht, Technische Universität München
- Carlsson und Stanciewicz (1991) On the Nature, Function and Composition of Technological Systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 1(2): 93-118
- Christen, T; Carlen, M. W. (2000) Theory of Ragone plots. *Journal of power sources* 91(2):210–216
- Cohen, W. M.; Levinthal, D. (1989) Innovation and learning: the two faces of R&D, *The Economic Journal*, 99, 569–96
- Cormen, T. H.; Cormen, T. H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R. L.; Stein, C. (2001) *Introduction To Algorithms*. MIT Press
- Danish Energy Agency (2017): Stamdataregister for vindkraftanlæg, ultimo september 2017, <https://ens.dk/service/statistik-data-noegletal-og-kort/data-oversigt-over-energisektoren>
- Davies, A. (1997) The life cycle of a complex product. In: *International Journal of Innovation Management*, 1 (3), pp. 229-256.
- Deissenroth, M.; Klein, M.; Nienhaus, K.; Reeg, M. (2017) Assessing the Plurality of Actors and Policy Interactions: Agent-Based Modelling of Renewable Energy Market Integration. *Complexity*, 2017

- Denholm, P.; Ela, E.; Kirby, B.; Milligan, M. (2010) The role of energy storage with renewable electricity generation, National Renewable Energy Laboratory. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>
- DERri (2014) Guidelines for testing grid connected storage. D_JRA-2.1.4, Distributed Energy Resources Research Infrastructures (DERri) FP7 European project, Brüssel
- Droste-Franke, B. (2015a) Energiespeicher und alternative Energieausgleichsoptionen aus diversen systemischen Perspektiven. Technikfolgenabschätzung, Theorie und Praxis (TATuP), 03/15, ITAS KIT, Karlsruhe
- Droste-Franke B. (2015b) Review of the need for storage capacity depending on the share of renewable energies. In: Moseley P. and Garce J. (Hg.): Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing. Elsevier, Amsterdam
- Droste-Franke, B. (2015c) Using the Systems Web Approach to gain improved transparency and quality in complex system studies as basis for better-informed risk governance – lessons learned from energy system analyses. Special Issue Risk Governance and Risk Communication, International Journal of Performability Engineering (IJPE), 577-587
- Droste-Franke, B. (2018) Instrumente in der Systemanalyse für die Realisierung einer robusten Energieversorgung. In: Decker, Michael/Lindner, Ralf/Lingner, Stephan/Scherz, Constanze/Sotoudeh, Mahshid (Hrsg.) "Grand Challenges" meistern, Der Beitrag der Technikfolgenabschätzung. Reihe: Gesellschaft - Technik - Umwelt, Bd. 20, Nomos, 331–346
- Droste-Franke, B. (2020) Challenges and potential improvements of system analyses for sector coupling. A discussion along dimensions of sociotechnical problems. TATuP Vol. 29, No. 2, 45–51
- Droste-Franke, B.; Carrier, M.; Kaiser, M.; Schreurs, M.; Weber, C.; Ziesemer, T. (2015) Improving Energy Decisions. Towards Better Scientific Policy Advice for a Safe and Secure Future Energy System, EA-Schriftenreihe „Ethics of Science and Technology Assessment“, Band 42, Springer-Verlag, Heidelberg/New York.
- Droste-Franke, B.; Paal, B. P.; Rehtanz, C.; Sauer, D. U.; Schneider, J.-P.; Schreurs, M.; Ziesemer, T. (2012) Balancing Renewable Electricity. Interdisciplinary Perspectives on Energy Storage, Smart Grids, E-Mobility and Network Extension. Ethics of Science and Technology Assessment, Volume 40, Springer, Berlin
- Duffner, F; Krätzig, O.; Leker, J. (2020) Battery plant location considering the balance between knowledge and cost: A comparative study of the EU-28 countries. Journal of Cleaner Production, 264, 121428
- DWG (2015) Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland, Deutsche WindGuard (DWG) im Auftrag des Bundesverband Windenergie (BWE) und des Verband der Deutschen Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA).
- Eckl-Dorna W (2019) Elektroauto Batterie: Daimler Großkunde von "Gigafactory" in Sachsen-Anhalt. manager magazin URL <https://www.managermagazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektroauto-wer-baut-europas-erste-batterie-gigafactory-a-1174306.html>, last visited on 02/17/2020

- Ehrhart, K.-M.; Belica, M.; Ocker, F. (2016) Positionspapier: Umstrukturierung des deutschen Sekundärregelmarktes für Strom
- EIS-SKIN (2020) EIS-SKIN model source code. Github repository.
<https://github.com/InnovationNetworks/skin/tree/master/EIS-SKIN> last visited on 09/15/2020
- Eliasson, G. (1990). The firm as a competent team, *Journal of Economic Behaviour and Organization*, 19, 273–98
- Elsner, P.; Fishedick, M.; Sauer, D.U. (2015) Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 [Bericht].: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.
- ENTSO-E (2014) 10-Year Network Development Plan 2014. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), Brüssel
- ENTSO-E (2017) [Online]. - 2017. - <https://transparency.entsoe.eu/>
- EPFL (2016) MurmurHash3 - Scala Standard Library 2.11.8 - scala.util.hashing.MurmurHash3. URL <https://www.scala-lang.org/api/2.11.8/index.html#scala.util.hashing.MurmurHash3>, last visited on 02/19/2020
- EPI (2018) The Great Transition: Shifting from Fossil Fuels to Solar and Wind Energy. Earth Policy Institute, http://www.earth-policy.org/?/data_center/C23/
- European Commission (2017) [Online]. - 2017. - https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_de
- EU (2019) Der europäische Grüne Deal. Europäische Kommission, COM (2019) 640 final, Brüssel, 11.12.2019.
- Fagerberg, J. (2006) Innovation, a guide to the Literature. In: Fagerberg, J.; Mowery, D.; Nelson, R.R. (2006) *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford University Press, Oxford
- Fagerberg, J.; Mowery, D.; Nelson, R.R. (2006) *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford University Press, Oxford
- Foray, D. (2007) Tacit and codified knowledge. In H. Hanusch and A. Pyka (Hrsg.): *Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*. Edward Elgar, Cheltenham
- Ford, D.; Ryan, C. (1981) Taking technology to market. *Harvard Business Review*, Vol. 59, S. 117-126
- Freeman, C. (1987): *Technology, policy, and economic performance: Lessons from Japan*. Pinter Publishers, London & New York
- Frieske, B. (2017) Patentsuche im Bereich von Lithium-Strategien. Persönliche Kommunikation
- Gerhardt, N.; Richts, C.; Hochloff, P. (2014) Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien [Bericht].: Agora Energiewende
- Gilbert, N. (2008) *Agent-Based Model*. London: Sage

- Gilbert, N., Ahrweiler, P.; Pyka, A. (2007) Learning in Innovation Networks: Some Simulation Experiments. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*, 378(1): 667-693
- Gilbert, N.; Ahrweiler, P.; Pyka, A. (2010) The SKIN (Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks) model. University of Surrey, Johannes Gutenberg University Mainz and University of Hohenheim. URL <https://github.com/InnovationNetworks/skin>, last visited on 03/20/2020
- Gilbert, N., Ahrweiler, P., Pyka, A. (Hrsg.) (2014) *Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks*. Springer, Heidelberg
- Görner, K.; Lindenberger, D. (2014) Virtuelles Institut „Strom zu Gas und Wärme“ – Vorprojekt | Technologie Steckbrief [Bericht].: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI), Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)
- Grunwald, Armin (2004) Strategic knowledge for sustainable development: the need for reflexivity and learning at the interface. *Int. J. Foresight and Innovation Policy*, Vol. 1, Nos. 1/2
- Grunwald, A. (2016) *Nachhaltigkeit verstehen. Arbeiten an der Bedeutung nachhaltiger Entwicklung*. oekom, München
- GWEC (2018): *Global Wind Report 2006-2017*. Global Wind Energy Council, <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>.
- Härdtlein, M.; Reith, S; Kirch, F.; Eltrop, L. (2016) *Datengrundlagen und Konzeption für den Online-Wärmekosten-rechner für Wohn-und Nichtwohngebäude [Konferenz]*. – Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
- Hanusch, H.; Pyka, A. (Hrsg.) (2007) *Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*. Edward Elgar, Cheltenham
- Hartmann, N.; Eltrop, L.; Bauer, N.; Salzer, J.; Schwarz, S.; Schmidt, M. (2012) *Stromspeicherpotenziale für Deutschland [Bericht]*.: Universität Stuttgart - IER, IHS, ZSW
- Hasche, B., Haiges, M. & Schulz, S., 2016. *Die Integration von Batteriespeichern am Regelleistungsmarkt - eine modellgestützte Bewertung*, 50Hertz
- Heide, D.; von Bremen, L.; Greiner, M.; Hoffmann, C.; Speckmann, M.; Bofinger, S. (2010) Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future highly renewable Europe. *Renew. Energy* 35:2483 – 2489
- Hekkert, M.; Negro, S.; Heimeriks, G. und Harmsen, R. (2011): *Technological Innovation System Analysis. A manual for analysts*. http://www.innovation-system.net/wp-content/uploads/2013/03/UU_02rapport_Technological_Innovation_System_Analysis.pdf am 06.06.2017
- Hekkert, M. P.; Suurs, R. A. A.; Negro, S. O.; Kuhlmann, S.; Smits, R. E. H. M. (2007): *Functions of Innovation Systems: A New Approach for Analysing Technological Change*. *Technological Forecasting and Social Change* 74(4):413–432

- Hoppmann, J. (2018): The role of interfirm knowledge spillovers for innovation in mass-produced environmental technologies: Evidence from the solar photovoltaic industry. *Organization & Environment*, 2018, Vol. 31(1), 3-24
- Huenteler, J.; Schmidt, T. S.; Ossenbrink, J.; Hoffmann, V. H. (2016) Technology life-cycles in the energy sector — Technological characteristics and the role of deployment for innovation. In: *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 104, 2016. IRENA (2017) *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, URL <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>, last visited on 03/10/2020
- IEA PVPS (2019) *Trends in Photovoltaic applications 2019*. Report IEA PVPS T1-36: 2019, https://iea-pvps.org/trends_reports/2019-edition/
- IRENA (2018) *Renewable Power Generation Costs in 2017*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- ISE (2020) *Photovoltaics Report*. FHG-ISE, 23.06.2020, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- IWR (2019a) Bosch und chinesische CATL kooperieren bei Batteriezellen, IWR-Pressedienst, 05.09.2019, <https://www.iwr.de/news.php?id=36280>
- IWR (2019b) VW startet Batteriezell-Entwicklung und -Fertigung in Salzgitter, IWR-Pressedienst, 23.09.2019, <https://www.iwr.de/news.php?id=36318>
- IWR (2019c) EU genehmigt Milliarden-Subventionen für Batteriezellen-Fertigung. IWR-Pressedienst, 09.12.2019, <https://www.iwr.de/news.php?id=36467>
- IWR (2020) Batteriezellen-Produktion startet 2024 am Opel-Standort in Kaiserslautern, IWR-Pressedienst, 07.02.2020, <https://www.iwr.de/news.php?id=36561>
- Jaeger, A. (2013): California: Wind farms retrospective. In: Maegaard, P., Krenz, A., Palz, W. (2013): *Wind power for the world: the rise of modern wind energy*. Pan Stanford Series on Renewable Energy Volume 2, Taylor & Francis Group, LLC.
- Janich, P. (2001) *Logisch-pragmatische Propädeutik. Ein Grundkurs im philosophischen Reflektieren*, Velbrück Wissenschaft, Weilerswist.
- Janich (2004a) *Technik*. In J. Mittelstraß (Ed.): *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Sonderausgabe, Metzler, Stuttgart.
- Janich (2004b) *Technologie*. In J. Mittelstraß (Ed.): *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Sonderausgabe, Metzler, Stuttgart.
- Janßen, T.; Lechtenböhrer, S.; Kunz, C. (2015) *Metaanalyse: Entwicklung der Preise für fossile Brennstoffe [Bericht]*.: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Kellis, M; Demaine, E; Indyk, P (2011) *Overview of Hash Tables (Recitation 05)*. In: 6.006 *Introduction to Algorithms*, MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, URL <https://courses.csail.mit.edu/6.006/spring11/rec/rec05.pdf>
- Kirchner, A.; Mayer, N.; Kunz, C., Koziel, S. (2016) *Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr [Bericht]*.: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.

- Klepper, S. (1997) Industry Life Cycles. In: *Industrial and Corporate Change*, 6 (1), pp. 145–182
- Klepper, S. (2002) Firm survival and the evolution of oligopoly. *Rand Journal of Economics*, Vol. 33, No. 1, Spring 2002, 37-61
- Kline, S.; Rosenberg, N. (1986) An overview of innovation. R. Landau; N. Rosenberg (eds.). *The positive sum strategy*. National Academy Press, Washington, 275-306
- Knebel, A. et al. (2014) Metaanalyse: Potenziale der Bioenergie [Bericht].: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Kollmann, T.; Hensellek, S.; Jung, P.B.; Kleine-Stegemann, L. (2019) *Deutscher Startup Monitor 2019*. Bundesverband Deutsche Startups e.V.
- Kunz, C. (2016) Studienvergleich: Entwicklung der Stromgroßhandels- und der CO2-Zertifikatspreise [Bericht].: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Kunz, C. (2013) Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland [Bericht].: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Lebedeva, N.; Di Persio, F.; Boon-Brett, L. (2017) Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe, EUR 28534 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-66948-4, doi:10.2760/6060, JRC105010
- Lee, K.; Malerba, F. (2017) Catch-up cycles and changes in industrial leadership: Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems. *Research Policy*, 46, 338-351
- Lott, M.C.; Kim, S.I.; Tam, C. (2014) *Technology Roadmap. Energy Storage*. International Energy Agency (IEA), Paris
- Lowe, M.; Tokuoka, S.; Trigg, T.; Gereffi G. (2010) *Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain*. URL [https://millenniumindicators.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-ion%20Batteries%20\(Gereffi%20-%20May%202010\).pdf](https://millenniumindicators.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-ion%20Batteries%20(Gereffi%20-%20May%202010).pdf), last visited on 03/10/2020
- Lund, H., Möller, B.; Mathiesen, B. V.; Dyrelund, A. (2010) The role of district heating in future renewable energy systems. *Bericht, Elsevier - Energy* (35)
- Lundvall, B.-A. (1992) *National systems of innovation: Toward a theory of innovation and interactive learning*. Pinter, London.
- Lutz, C., Flaute M.; Lehr, U.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; auf der Maur, A.; Ziegenhagen, I. Wünsch, M.; Koziel, S.; Piégsa, A. & Straßburg, S. (2018) *Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende*, GWS, Fraunhofer ISI, DIW, DLR, Prognos, GWS Research Report Series 18-4, GWS - Institute of Economic Structures Research
- Memmler, M.; Schrempf, L.; Hermann, S.; Schneider, S.; Pabst, J.; Dreher, M. (2014) *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2013. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013 [Bericht].: Umweltbundesamt*
- Menhart, M.; Pyka, A.; Ebersberger, B.; Hanusch, H. (2004) Product innovation and population dynamics in the German insurance market. *Zeitschrift für die gesamte Versicherungswissenschaft*, September 2004, Volume 93, Issue 3, pp 477–519

- Müsgens, F.; Ockenfels, A.; Peek, M. (2014) Economics and design of balancing power markets in Germany. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 55, 392–401
- Negro, S. O., Alkemade, F., Hekkert, M. P. (2012) Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6): 3836–3846
- Nelson, R. R. (1993) *National innovation systems: A comparative analysis*. Oxford University Press, Oxford
- Noack, C.; Burggraf, F.; Hosseiny, S. S.; Lettenmeier, P.; Kolb, S.; Belz, S., Kallo, J.; Friedrich, K. A.; Pregarer, T., Cao, Karl-Kiên; Heide, D.; Naegler, T., Borggreffe, F.; Bünger, U.; Michalski, J.; Raksha, T.; Voglstätter, C.; Smolinka, T.; Crotogino, F.; Donadei, S.; Horvath, P.-L.; Schneider, G.-S. (2015) Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck [Bericht].: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, KBB Underground Technologies GmbH
- O’Sullivan, M. (2020) Industrial Life Cycle: Relevance of national markets in the development of new industries for energy technologies – the case of wind energy. *Journal of Evolutionary Economics*, 14.05.2020, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00191-020-00677-5.pdf>.
- Pape, C.; Arbach, S.; Gerlach A.-K.; Kühn, P.; Pfaffel, S., (2013) *Entwicklung der Windenergie in Deutschland. Eine Beschreibung von aktuellen und zukünftigen Trends und Charakteristika der Einspeisung von Windenergieanlagen*. Agora Energiewende, Kurzstudie, Berlin
- Perez, C.; Soete, L. (1988) Catching-up in technology: entry barriers and windows of opportunity. In: Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G., Soete, L. (Eds.): *Technical change and economic theory*. Pinter Publishers, London, pp. 458-479
- Perrin, M.; Lemaire, E.; Bourien, Y. M.; Martin, N. (2015) Requirements for test procedures (WP IV). In: Doetsch, C.; Droste-Franke, B.; Mulder, G.; Scholz, Y.; Perrin, M. (Hg.): *Electric Energy Storage – Future Energy Storage Demand, final report to International Energy Agency (IEA), ECES26, Paris*
- Pillot, C. (2017): *The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016-2025*. URL http://cii-resource.com/cet/FBC-TUT8/Presentations/Pillot_Christophe.pdf, last visited on 03/10/2020
- Pillot, C. (2019): *The rechargeable battery market and main trends 2018-2030*. 28. May 2019, <http://cdn.ceo.ca.s3.amazonaws.com/1em2t4r-02%20-%20Presentation%20Avicenne%20-%20Christophe%20Pillot%20-%2028%20Mai%202019.pdf>
- Polanyi, M. (1966) *The Tacit Dimension*, Doubleday
- Porter, M. (1990): *The competitive advantage of nations*. *Harvard Business Review*, March-April 1990, 73-93

- Porter, M.E. (2010) Wettbewerbsvorteile: Spitzenleistungen erreichen und behaupten. Campus Verlag, Frankfurt
- Preisinger, I; Bryan, V. (2018) China's CATL to build its first European EV battery factory in Germany. Reuters URL <https://www.reuters.com/article/us-bmw-catl-batteries-idUSKBN1JZ11Y>, last visited on 02/17/2020
- Pyka, A. (2007) Innovation networks. In H. Hanusch and A. Pyka (Eds.): Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics. Edward Elgar, Cheltenham.
- Pyka, A.; Gilbert, N.; Ahrweiler, P. (2007) Simulating knowledge-generation and distribution processes in innovation collaborations and networks. *Cybernetics and Systems* 38(7):667–693, DOI 10.1080/01969720701534059
- Qnovo (2016) The Cost Components of a Lithium Ion Battery. URL <https://qnovo.com/82-the-cost-components-of-a-battery/>, last visited on 03/10/2020
- Rahimzei E, Sann K, Vogel M (2015) Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Positionspapier 885, VDE, URL <https://shop.vde.com/kompendium-li-ionen-batterien>, last visited on 02/17/2020
- Rehtanz, C.; Agricola, A.-Cl.; Seidl, H.; Mischinger, S.; Greve, M.; Häger, U.; Hilbrich, D.; Kippelt, S.; Kubis, A.; Liebenau, V.; Noll, T.; Rüberg, S.; Schlüter, T.; Schwippe, J.; Spieker, C.; Teuwesen, J. (2014) dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Voraussetzungen für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Endbericht, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin
- Röckmann, C., Lagerveld, S. & Stavenuiter, J. (2017) Operation and Maintenance Costs of Offshore Wind Farms and Potential Multi-use Platforms in the Dutch North Sea. In B. B. & L. R., eds. *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean*. Springer.
- Roland Berger (2012) Technology & Market Drivers for Stationary and Automotive Battery Systems. URL <https://www.ilfoglio.it/userUpload/Batteries2012RolandBergerReport1.pdf>, last visited on 03/10/2020
- Sakti, A.; Michalek, J.J.; Fuchs, E.R.; Whitacre, J.F. (2015) A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification. *Journal of Power Sources* 273:966–980, DOI 10.1016/j.jpowsour.2014.09.078
- Sandrock, M.; Westholm, H; Kunz, C. (2015) Metaanalyse: Energiewende im Wärmesektor [Bericht].: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Sauer, D.U. (2010) Energiespeicher für ein stabiles Stromnetz [Konferenz]. - Essen: Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)
- Schilperoord, M. (2016) Start-Ups When and Where? Using the SKIN Platform for Modelling the Birth of New Firms. In: P. Ahrweiler, N. Gilbert, & A. Pyka, eds. *Joining Complexity Science and Social Simulation for Innovation Policy. Agent-based Modelling using the SKIN Platform*. Cambridge Scholars Publishing, pp. 326–348

- Schmidt, B. (2000) Die Modellierung menschlichen Verhaltens, Delft, Erlangen, Ghent, San Diego: SCS – European Publishing House
- Schumpeter, J. (1912) The Theory of Economic Development. Oxford University Press, Oxford
- Schumpeter, J. (1993) Die Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Achte Auflage, Duncker&Humblot, Berlin
- Spieker, S.; Kopiske, J.; Tsatsaronis, G. (2016) Flexibilität aus Wind- und Photovoltaikanlagen im Regelenergiemarkt 2035
- Steinke, F.; Wolfrum, P.; Hoffmann, C. (2012) Grid vs storage in a 100% renewable Europe, Renewable Energy 50 (2013) 826 e 832
- Stephan, A; Schmidt, T. S.; Bening, C. R.; Hoffmann V. H. (2017) The sectoral configuration of technological innovation systems: Patterns of knowledge development and diffusion in the lithium-ion battery technology in Japan. Research Policy 46(4):709–723, DOI 10.1016/j.respol.2017.01.009
- Sterner, M.; Eckert, F; Thema, M.; Bauer, F. (2015) Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Kurzstudie im Auftrag von BEE e.V. und Hannover Messe, Regensburg / Berlin / Hannover
- Sterner, M.; Stadler, I. (2014) Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Springer, Berlin
- Stifterverband (2017): Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft, ,ɑ:rən'di: Zahlenwerk 2017, Stifterverband Wissenschaftsstatistik, https://www.stifterverband.org/arendi-zahlenwerk_2017, Abruf am: 22.06.2018
- TESLAMAG (2020): Panasonic bleibt Tesla-Partner: Akku-Vertrag über 10 Jahre, mehr Volumen vereinbart, TESLAMAG 18.06.2020, <https://teslamag.de/news/akku-partner-tesla-und-panasonic-liefer-vertrag-mindestens-10-jahre-28841>.
- The Wind Power (2018): Wind farm database. Status 3.2018, <https://www.thewindpower.net/index.php>
- Urban, C. (2004) Das Referenzmodell PECS: Agentenbasierte Modellierung menschlichen Handelns, Entscheidens und Verhaltens. Dissertation, Faculty for the Department for Mathematics and Informatics, University of Passau. Available at: <http://www.opus-bayern.de/uni-passau/volltexte/2005/47/>.
- Viebahn, P.; Vallentin, D; Höller, S. (2012) Integrated assessment of carbon capture and storage (CCS) in the German power sector and comparison with the deployment of renewable energies [Bericht].: Elsevier (Applied Energy 97)
- Watts, C.; Gilbert, N. (2014) Simulating Innovation. Computer-based Tools for Re-Thinking Innovation. London: Edward Elgar
- Weisstein, E. W. (2020) Hash Function. From MathWorld–A Wolfram Web Resource. URL <http://mathworld.wolfram.com/HashFunction.html>, last visited on 02/19/2020

- Wenzel, B.; Kunz, C. (2015) Metaanalyse: Stromspeicher in Deutschland [Bericht].: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Wieczorek, A; Hekkert, M. (2012) Systemic instruments for systemic innovation problems: A framework for policy makers and innovation scholars. *Science and Public Policy*, 39(1): 74-87
- Wilensky U (1999) NetLogo, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. URL <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, last visited on 02/19/2020

Anhang 1: Zusätzliche Ergebnisse

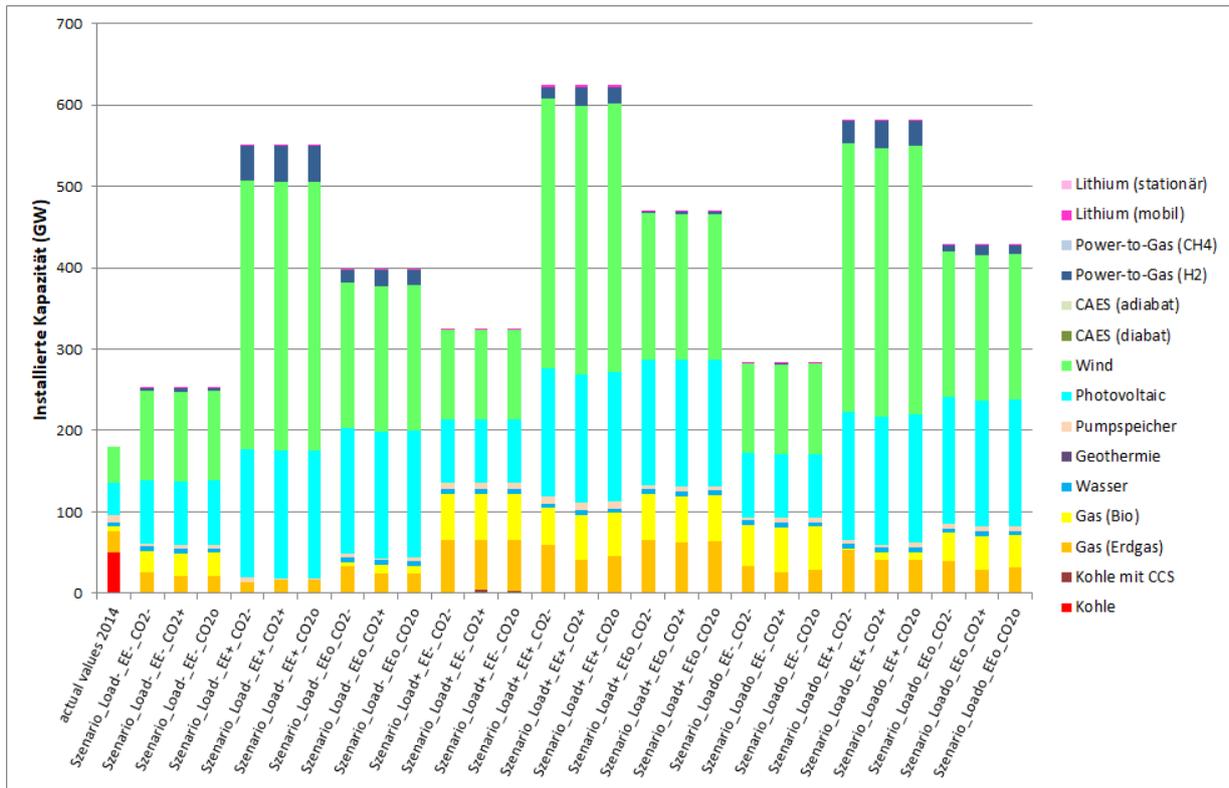


Abbildung 96: Optimaler Kraftwerkspark für die unterschiedlichen Rahmenbedingungszusammensetzungen mit Erzeugung aus Wind und Sonne

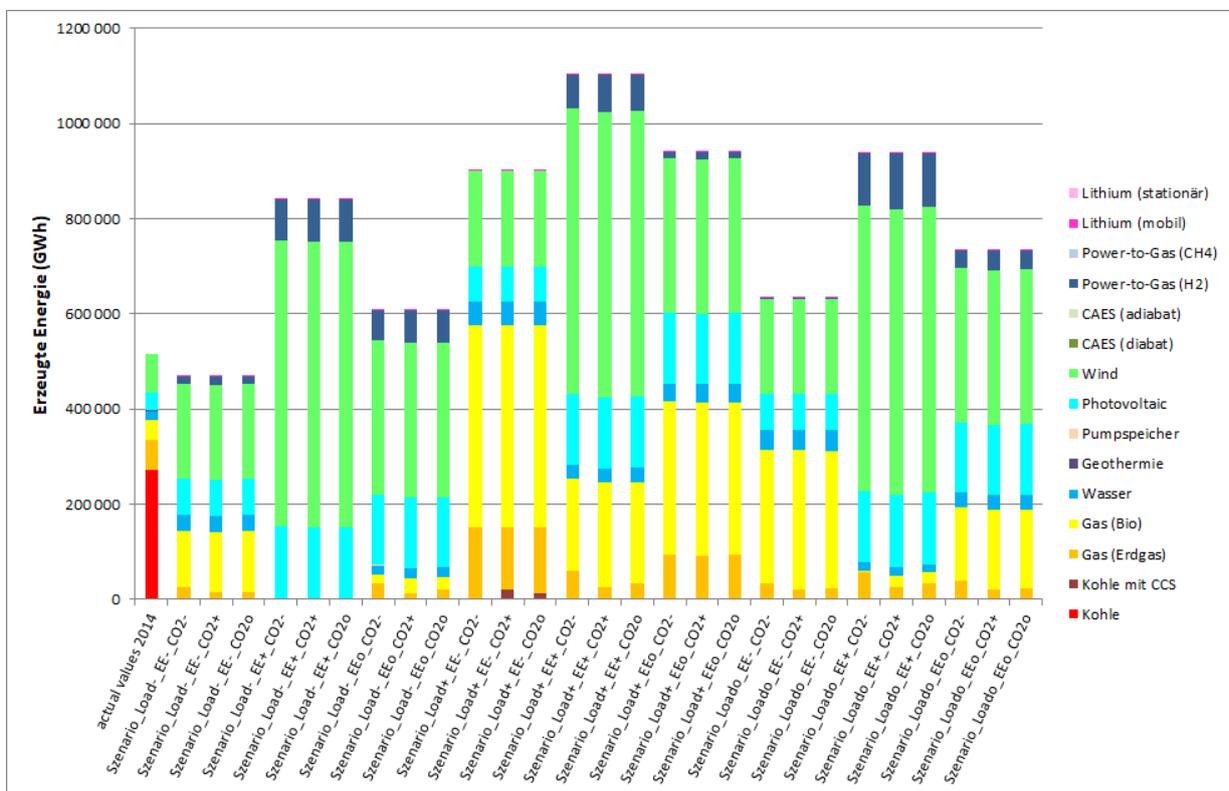
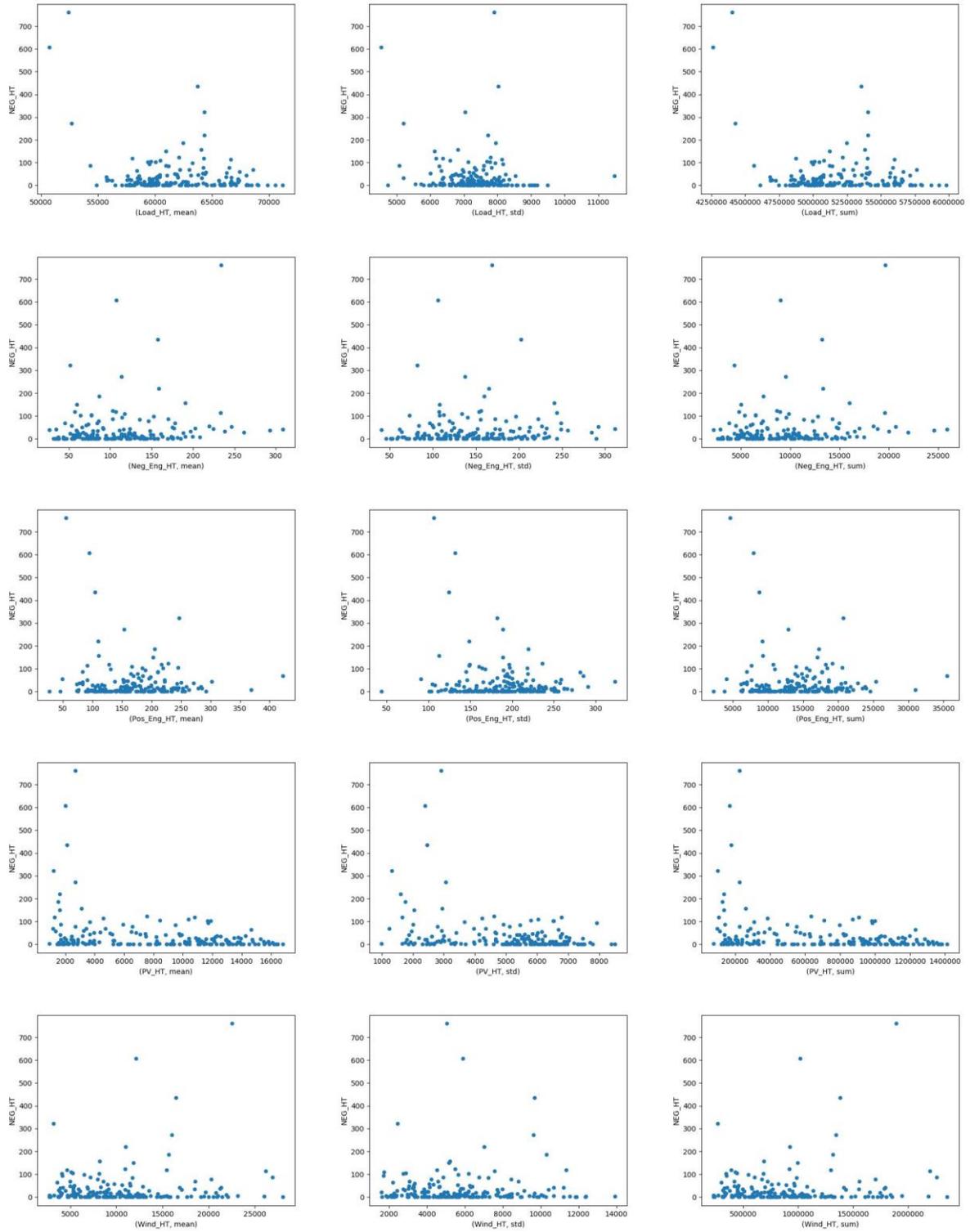


Abbildung 97: Energieerzeugung des optimalen Kraftwerksparks für die unterschiedlichen Rahmenbedingungszusammensetzungen mit Erzeugung aus Wind und Sonne



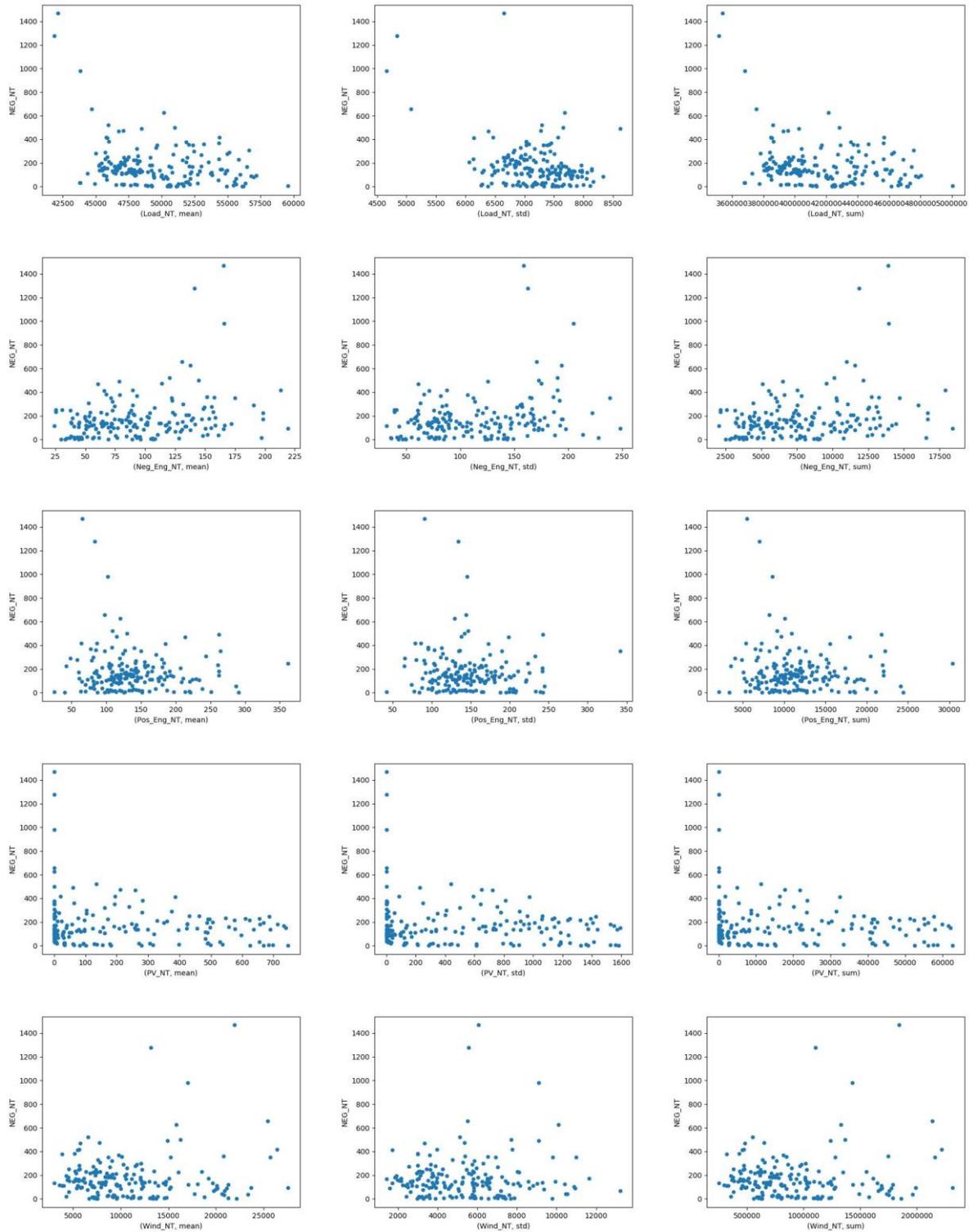
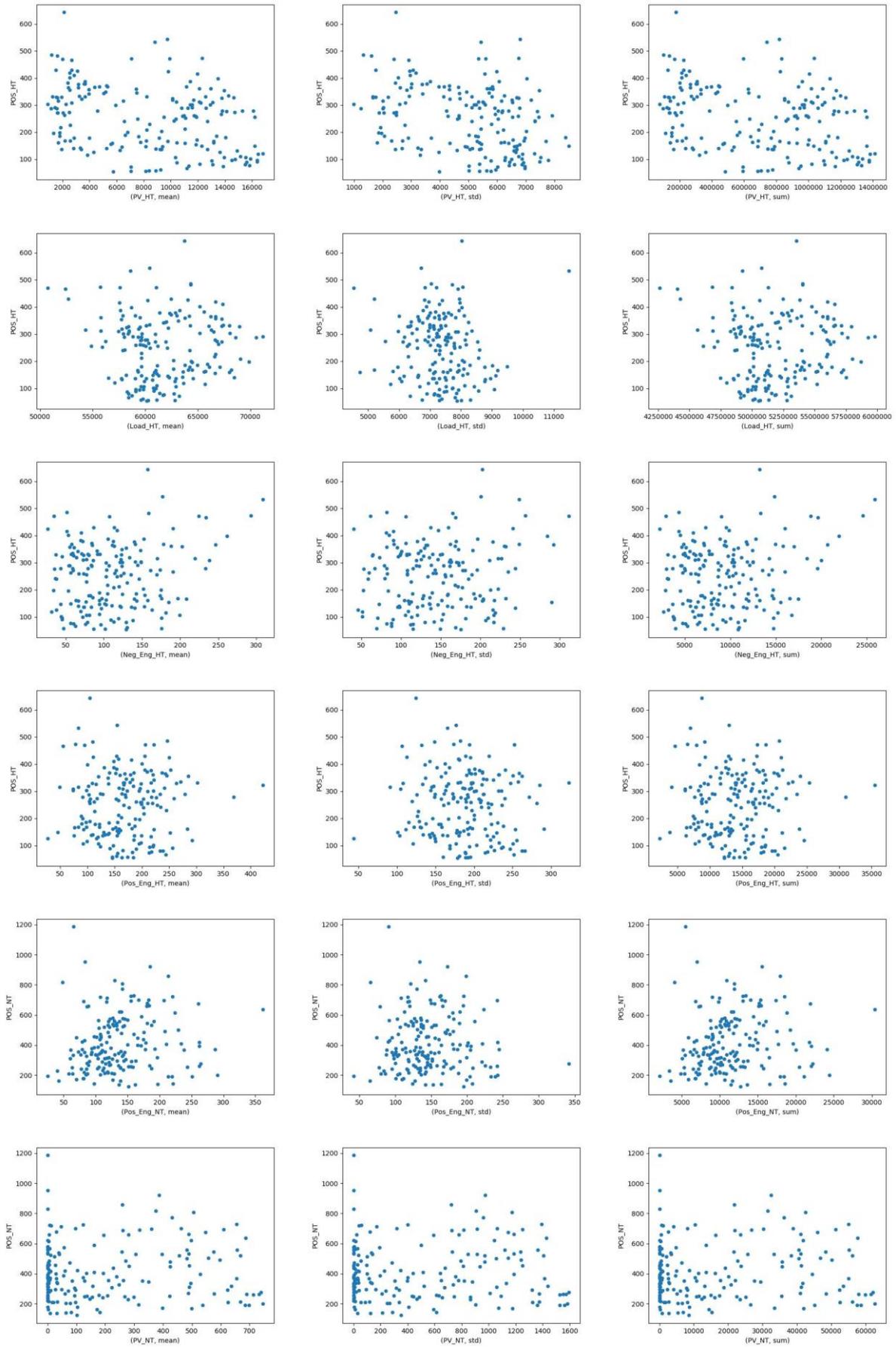


Abbildung 98: Korrelationsanalysen zu unterschiedlichen Kombinationen aus Last, EE- Einspeisung zu negativen SRL-Preisen in Hochtarif- (HT) und Niedertarifzeiten (NT).



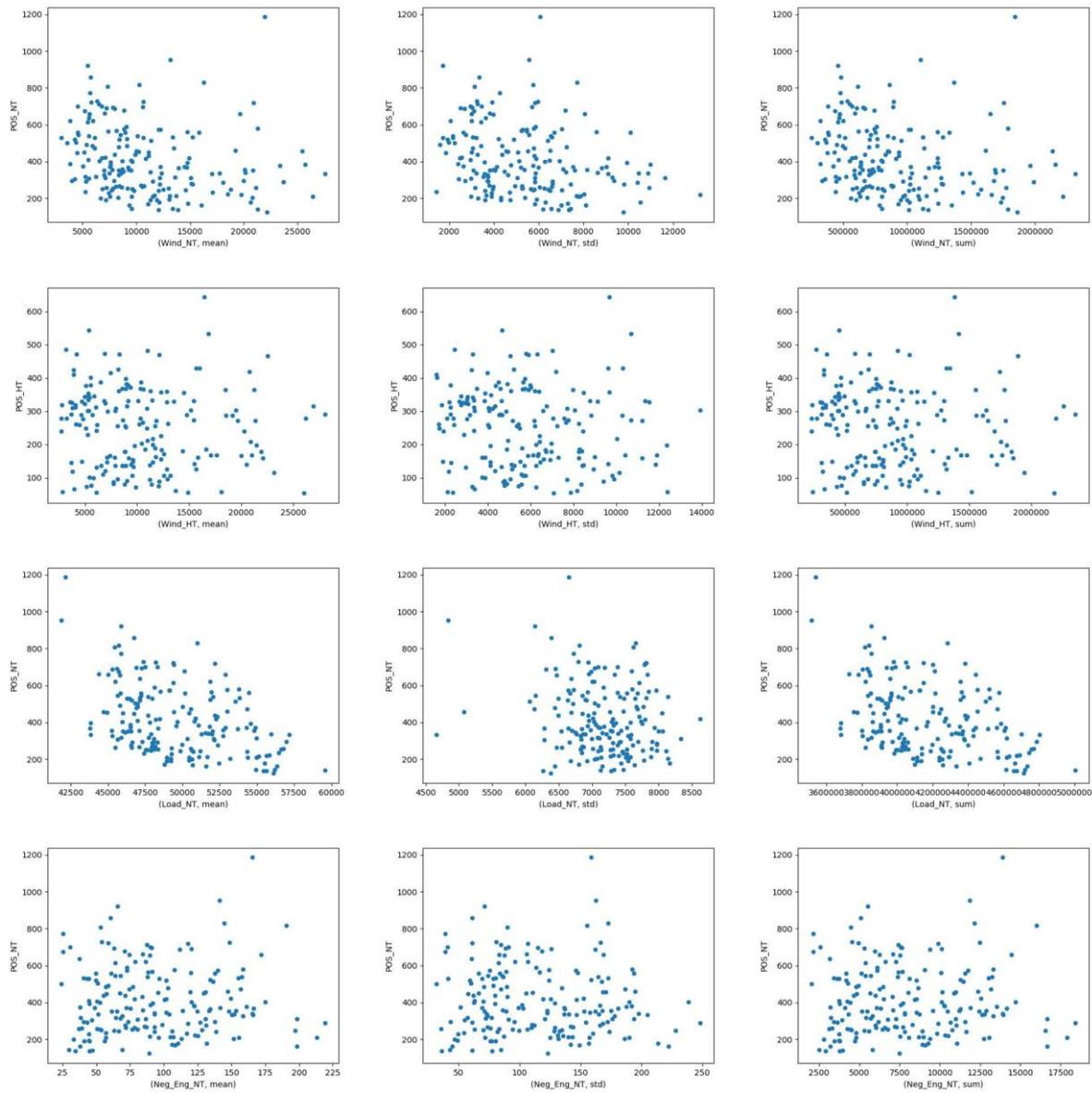
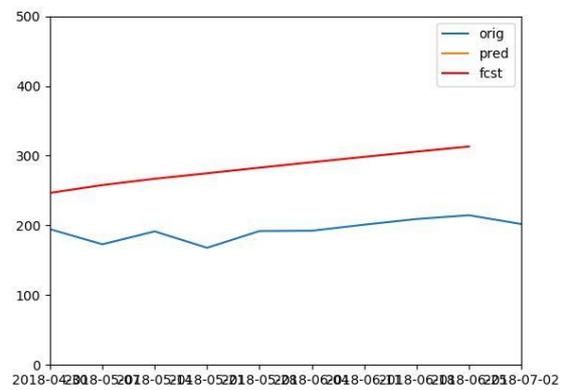
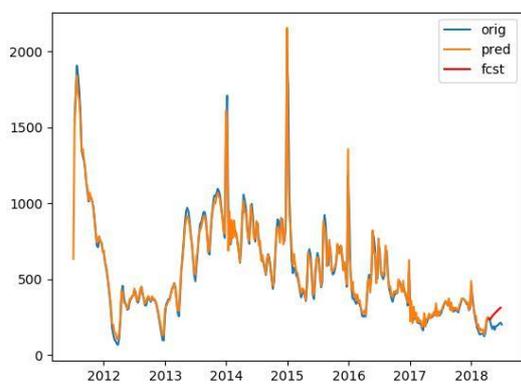
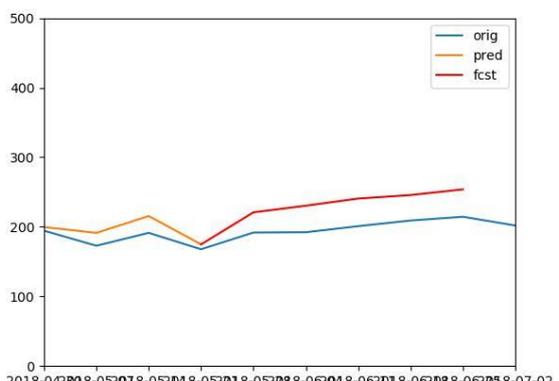
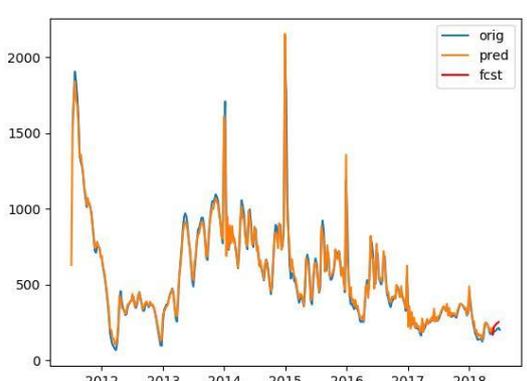
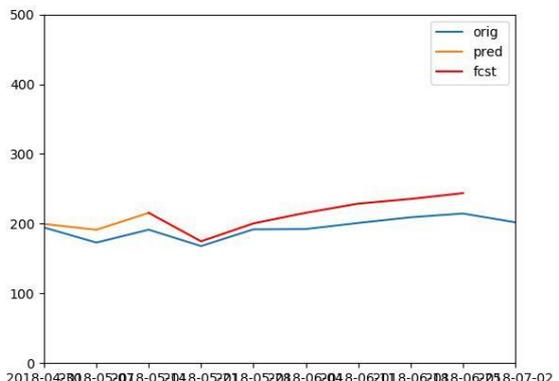
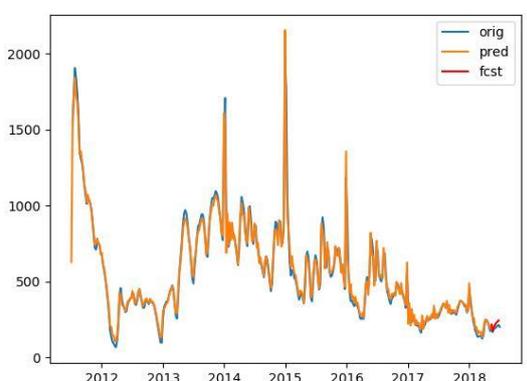
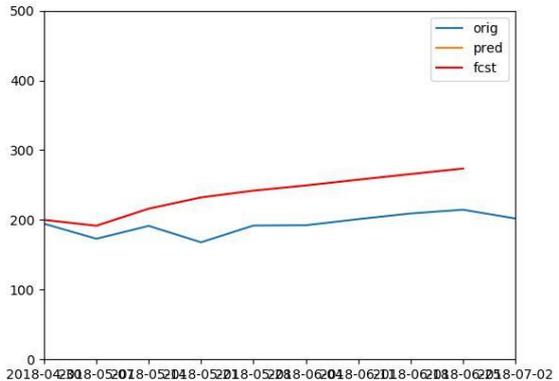
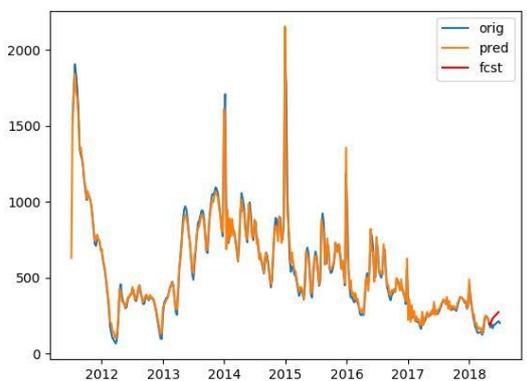
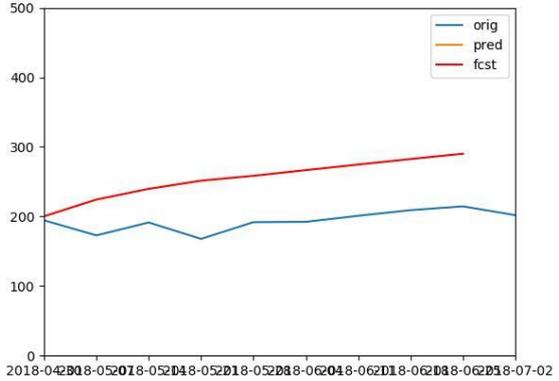
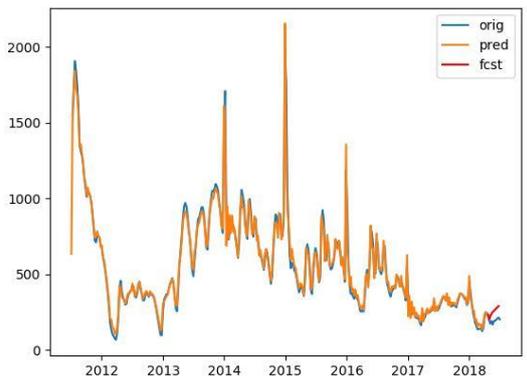


Abbildung 99: Korrelationsanalysen zu unterschiedlichen Kombinationen aus Last, EE- Einspeisung zu positiven SRL-Preisen in Hochtarif- (HT) und Niedertarifzeiten (NT).





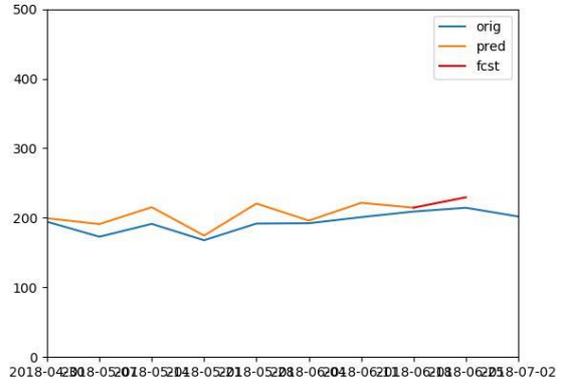
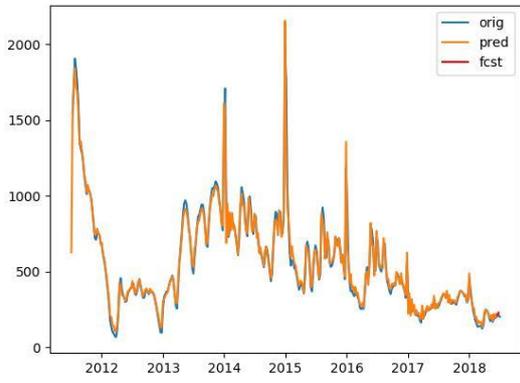
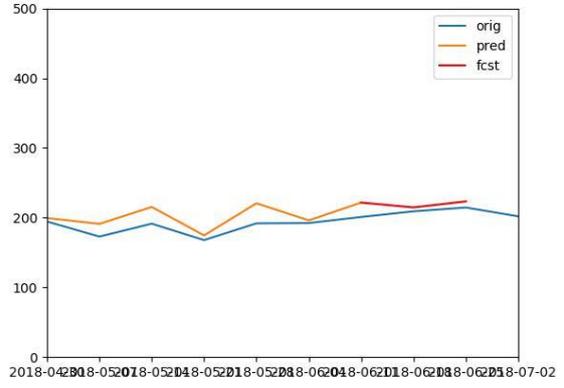
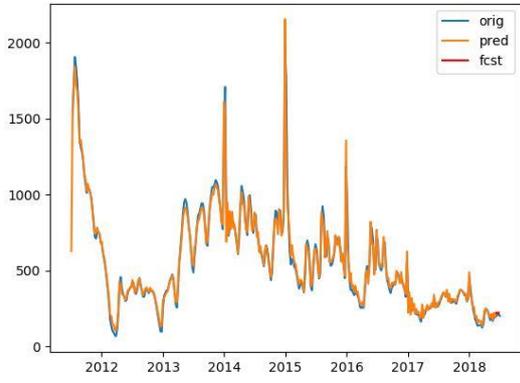
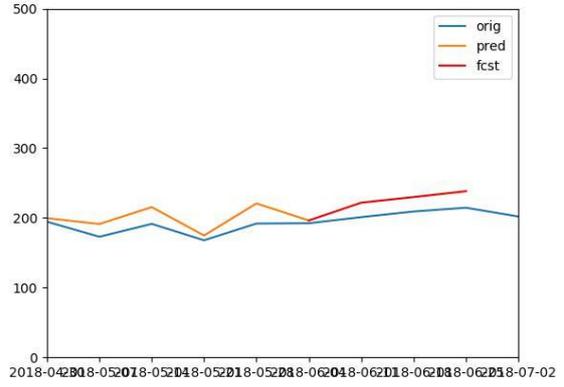
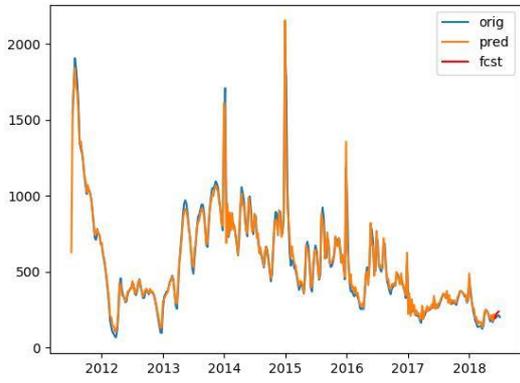
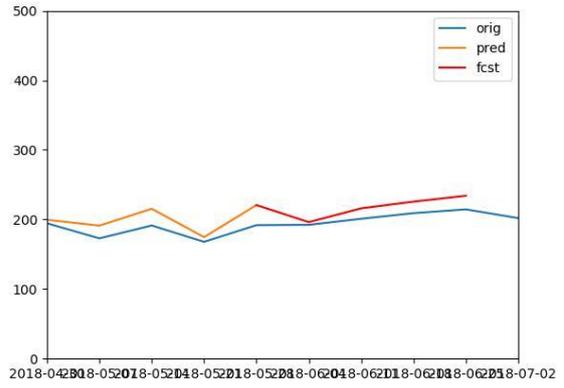
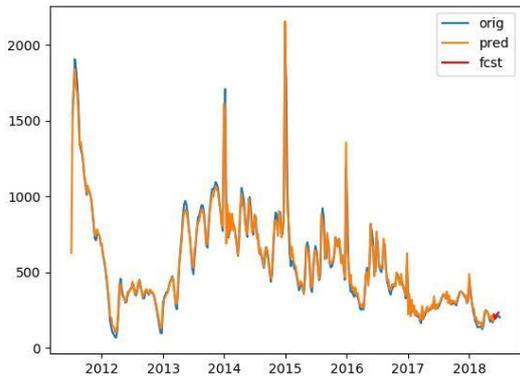


Abbildung 100: Darstellung der historischen Preise (blau), die mit Hilfe des ARIMA Modells abgeleitete Zeitreihe (orange) und die vorhergesagten Werte (rot). Links sind diese drei Kurven für den gesamten Untersuchungszeitraum zu sehen, rechts sind die letzten 10 Wochen zu sehen. Die Vorhersagedauer beträgt in den Bildern beginnend bei zehn Wochen (oben) absteigende Vorhersageintervalle bis eine Woche (unten).

Tabelle 29: Modelltechnische Annahmen des Simulationsmodells AMIRIS

	Variabel	Einheit	Wert	Kommentar
Brennstoffpreise	Gas	EUR/MWh	27	
		Ho		
	Braunkohle	EUR/MWh	6	Lutz et al. (2018)
	Steinkohle	EUR/MWh	9	
	Öl	EUR/MWh	112,5	
Spezifische Emissionen	Gas	tCO2/MWh	0,202	
	Braunkohle	tCO2/MWh	0,364	
	Steinkohle	tCO2/MWh	0,341	
	Öl	tCO2/MWh	0,267	
Verfügbarkeit	Gas	%	97	
	Braunkohle	%	98	
	Steinkohle	%	96	
	Öl	%	93	
Speicherparameter	E2P	h	5	
	Ladeeffizienz	%	87	
	Entladeeffizienz	%	87	
	Voraussicht	h	168	
	Planungsperiode	h	24	

Tabelle 30: Modelltechnische Annahmen des Optimierungsmodells in GAMS

	Variabel	Einheit	Wert	Kommentar	
Preiszeitreihen	Day-Ahead Preise, historisch 2016	€/MWh	Zeitreihe		
	Day-Ahead Preise, aus AMIRIS	€/MWh	Zeitreihe	Siehe Szenariobeschreibung in Abschnitt 6.3	
	Leistungspreise SRL-Markt, historisch 2016	€/MW	Zeitreihe		
	Leistungspreise SRL-Markt, aus AMIRIS	€/MW	Zeitreihe	Siehe Szenariobeschreibung in Abschnitt 6.3	
	Arbeitspreise SRL-Markt, historisch 2016	€/MWh	Zeitreihe		
	Arbeitspreise SRL-Markt, aus AMIRIS	€/MWh	Zeitreihe	Siehe Szenariobeschreibung in Abschnitt 6.3	
	Speicherparameter	SoC Min.	MWh	0	
		SoC Max.	MWh	1	
		SoC Init.	MWh	0.5	
	E2P	h	1-10		
	Ladeeffizienz	%	92.20, 93.54, 94.87		
	Entladeeffizienz	%	92.20, 93.54, 94.87		
	Vorhersage Periode	h	8760		

Anhang 2: Formale Aspekte des Schlussberichts

Vorhaben

Verbundvorhaben: Netzwerkanalyse und Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich (InnoSEn) – FKZ 03ET4032

I Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

Im Projekt sollten Methoden und Modelle entwickelt werden mit denen für die Umsetzung innovativer Schlüsseltechnologien Hemmnisse im Bereich des Wissens und Wissensaustausches im Bereich der Innovationsgenese zwischen Akteuren identifiziert und Maßnahmen zu ihrer Beseitigung analysiert und diskutiert werden können.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde vom Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB) (vormals EA European Academy for Technology and Innovation Assessment) zusammen mit Partnern der Abteilung Systemanalyse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. in Stuttgart und des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen durchgeführt.

Für die Arbeiten wurde von vielen bereits vorhandenen wissenschaftlichen Arbeiten und vor allem von den Modellen SKIN und AMIRIS sowie Ergebnissen des Projekts ESYS und dort verwendeten Modellen ausgegangen. Details finden sich oben im inhaltlich wissenschaftlichen Teil des Berichts.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in sechs Arbeitspaketen für die Dauer von drei Jahren geplant. Nach einer kostenneutralen Verlängerung konnten die Ergebnisse wie geplant fertiggestellt werden.

4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Wie bereits oben erwähnt, wurden für das Projekt bereits vorhandene Modelle erweitert und angewendet. Im Falle des SKIN-Modells wurde eine Share-Alike-Lizenz in Anspruch genommen, die die Modifikation und den Einsatz des Modells für wissenschaftliche Zwecke erlaubt. Das vom DLR weiterentwickelte und verwendete AMIRIS-Modell ist am DLR selbst entwickelt worden. Die Ergebnisse des ESYS-Projekts sind im ISEA RWTH Aachen mit eigenen Modellen selbst errechnet worden.

- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die im Projekt verwendete Fachliteratur ist dem Literaturverzeichnis des inhaltlich wissenschaftlichen Teils dieses Berichts zu entnehmen (s.o.).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen von Expertenworkshops wurden zunächst Hemmnisse und mögliche Gegenmaßnahmen identifiziert, woraus Fragen an die Modelle abgeleitet wurden, Zwischenergebnisse diskutiert sowie Verbesserungsvorschläge gesammelt und das finale Modell und entsprechende Simulationsläufe vorgestellt. Wir danken den Teilnehmern der Workshops sehr herzlich für ihre wertvollen Beiträge: Dr. Michael Krausa (KLiB), Helena Teschner (BVES), Dr. Jochen Seier (PtJ), Benjamin Kraft (Varta), Dr. Tobias Buchmann (ZSW), Bernhard Riegel (Hoppecke) und Tobias Struck (WEMAG).

II Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Projekt wurden Analysen zu Schlüsseltechnologien durchgeführt, Methoden zur Analyse empirischer Daten im Rahmen von Heuristiken Technologischer Innovationssysteme entwickelt, das SKIN-Basismodell weiterentwickelt und angewendet und das Modell AMIRIS für die Ermittlung von Erlösmöglichkeiten erweitert und angewendet. Die detaillierten Ergebnisse sind dem inhaltlich wissenschaftlichen Teil des Berichts zu entnehmen.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Ausgaben bzw. Kostenpositionen stellen die Personalkosten dar. Diese sind wie geplant für das Projekt eingesetzt worden. Zudem wurden Patentdaten, statistische Daten und Daten zu Wirtschaftsunternehmen im Projekt verwendet. Details zu ihrer Verwendung finden sich im inhaltlich wissenschaftlichen Bericht und den jeweiligen Verwendungsnachweise.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt sind umfangreiche wissenschaftliche Analysen, Modellentwicklungen und -anwendungen durchgeführt worden. Sie wären mit geringerem Aufwand nicht leistbar gewesen. Für Details der umfangreichen Arbeiten wird auf den inhaltlich wissenschaftlichen Teil des Berichts verwiesen.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Aus dem Projekt sind als Ergebnis zwei erweiterte Modelle erarbeitet worden, die aktuell bereits in weiteren Projekten eingesetzt werden, und ein inhaltlicher Bericht der Arbeiten verfasst worden, der zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung in den einzelnen Bereichen der Arbeiten beiträgt. Details zum inhaltlich wissenschaftlichen Teil siehe Hauptteil des Berichts oben.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Vorhabens gab es auf dem Gebiet des Vorhabens keine wesentlichen Weiterentwicklungen bei anderen Stellen, die im Projekt berücksichtigt werden mussten. Veränderungen im Innovationssystem konnten soweit wie möglich aufgrund von Informationen durch enge Kontakte zu den Experten, Teilnahme an Konferenzen und über die Expertenworkshops berücksichtigt werden.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Projekts werden zum einen in Form des Modells SKIN-Energy als Source-Code unter einer Share-Alike-Lizenz veröffentlicht. Die Veröffentlichung der wissenschaftlichen Aspekte des Vorhabens erfolgt mit diesem Schlussbericht. Des Weiteren sind Ergebnisse des Projekts bereits während seiner Laufzeit an diversen Stellen veröffentlicht worden:

Präsentationen/Vorträge auf internationalen Konferenzen/Workshops (Auswahl mit Schwerpunkt auf InnoSEn):

- Droste-Franke: „Analysing innovation networks of key technologies for realizing future long-term viable energy systems“, The 2nd EAEPE Research Area [X] 'Networks' Workshop (European Association for Evolutionary Political Economy), Entrepreneurship – Innovation – Transformation, 28.-29.11.17, Bochum
- Droste-Franke, Fohr: „Approaches for the analysis of innovation networks regarding energy storage technologies“, Posterpräsentation, 11th International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2019, 14-16 March 2017, Düsseldorf
- Droste-Franke, Fohr: „Simulating Innovation of Key Technologies in German Energy Transition“, Social Simulation Conference, 25.-29.9.17, Dublin
- Fohr, Droste-Franke: Analysing and Visualising Innovation Networks of Key Technologies in the German Energy Transition, European Conference on Social Networks, 26.-29. September 2017, Mainz
- Droste-Franke, Fohr: “Towards Simulating Innovation of Electro-Chemical Storage as Key Technology in German Energy Transition”, The 3rd EAEPE Research Area [X] 'Networks' Workshop (European Association for Evolutionary Political Economy), The Role of Innovation Networks for Sustainable Economic Development, 30.11.-01.12.17, Bremen
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen, Weidle: „Empirische Analysen von Innovationsnetzwerken für Lithium-Batterien“, Posterpräsentation und Präsentation der Netzwerkanalysen auf dem Kongress des Batterieforum Deutschland 2018, 24.-26.1.18, Berlin
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen, Weidle: „Towards Improved Innovation Processes of Electro-Chemical Energy Storage in Germany“, 12th International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2019, 13-15 March 2018, Düsseldorf
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen, Weidle: „Simulation von Innovationsprozessen im Bereich Speichertechnologien“, AP2-Treffen Kopernikusprojekt ENavi, 26.3.18, Stuttgart
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen: „Simulating Technological Innovation Micro Processes – Towards Experience-based Robust Policy Recommendations“, Behave Conference 2018, 5.-7- September 2018, Zürich
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen, Voge, Weidle: “Simulating Technological Innovation Networks – Generalisable Elements using the Example of Lithium Batteries”, The 4th EAEPE Research Area

[X] 'Networks' Workshop (European Association for Evolutionary Political Economy), "New ways of innovation policy design and its evaluation – insights from complex adaptive systems and beyond, 15.-16.11.19, Budapest

- Droste-Franke: Präsentation der Netzwerkanalysen auf dem Kongress des Batterieforum Deutschland 2019, 23.-25.1.19, Berlin
- Droste-Franke, Fohr, Nietgen, Voge: "Towards improved innovation processes of electro-chemical energy storage in Germany via agent-based simulation", Posterpräsentation, 13th International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2019, 12-14 March 2019, Düsseldorf
- Droste-Franke: "Beispiel für den Einsatz agentenbasierter Simulation zur Maßnahmenanalyse ", Gesellschaft für Evaluation e.V. (DG Eval), Jahrestagung 2019, 12.9.19
- Droste-Franke, Voge, Fohr, Nietgen, van Doren: „Simulating Innovation Networks of Lithium Batteries as Key Technologies in German Energy Transition. Knowledge Exchange – Between Theory and Calibration for Capturing Real Life“, Social Simulation Conference, 23.-27.9.19, Mainz
- Droste-Franke, Voge: "Simulating Technological Innovation Networks. Modelling Value Chains and Product Space Using the Example of Lithium Batteries", The 5th EAEPE Research Area [X] 'Networks' Workshop (European Association for Evolutionary Political Economy), Innovation Networks and Economic Transition, 21.-22.11.19, Stuttgart
- O'Sullivan: "Industrial Life Cycle: Relevance of national markets in the development of new industries for energy technologies – the case of wind energy", 17. ISS Konferenz „Innovation, Catch-up, and Sustainable Development“, 2.-4.7.2018, Seoul, Südkorea.
- Nitsch, Deissenroth: Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Batteriespeichern in kombiniertem Einsatz am Day-Ahead und Sekundärregelmarkt. EnInnov 2020, 12.-14. Feb. 2020, Graz, Österreich.
- Jacqué, Bussar, Sauer: "Identification of System-Relevant Key Technologies for Flexibility in the Electricity Sector in Germany up to the Year 2050", Posterpräsentation, 13th International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2019, 12-14 March 2019, Düsseldorf

Zudem wurden auf Basis der Arbeiten zu InnoSEn zusammen mit anderen Autoren bisher drei Papers veröffentlicht:

- Droste-Franke, Fohr: Simulating Innovation of Key Technologies in German Energy Transition. Proceedings of Social Simulation Conference 2017, Dublin, 2017
- Globisch, Droste-Franke, Fohr, Wassermann: „Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende. Beratungsorientierte Verbindung von Empirie und sozialwissenschaftlichen Simulationsmodellen, TATuP 28/3 (2019)
- O'Sullivan: Industry life cycle: relevance of national markets in the development of new industries for energy technologies – the case of wind energy, Journal of Evolutionary Economics, 14.05.2020, <https://doi.org/10.1007/s00191-020-00677-5>.

Weitere Ergebnisse aus dem Projekt werden im Laufe des nächsten Jahres zu erwarten sein. Hierzu zählen unter anderem:

- Nitsch, Deissenroth, Schimeczek, Bertsch: Modelling of battery storages on different German electricity markets using an agent-based market model. 8th International PhD Day of the AAEE Student Chapter, 8. Okt. 2020, Linz, Österreich.
- O'Sullivan: "The relevance of national markets for the development of new industries in the energy sector." 43rd, IAEE, Paris, France. Status: Abstract accepted, Konferenz wurde auf Grund der Coronavirus-Pandemie um ein Jahr verschoben.

- Nitsch, Deissenroth, Schimeczek, Bertsch: Economic evaluation of the application of battery storage systems in combined use on the day-ahead and automatic Frequency Restoration Reserves market, Manuscript submitted to Applied Energy (2020).

Darüber hinaus sind die Ergebnisse Teil zweier Dissertationsvorhaben beim DLR.