FORSCHUNGSCAMPUS
FLEXIBLE
ELEKTRISCHE
NETZE

Aachen, 31.10.2025

Schlussbericht zum Projekt

Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN)
DC-Sozio-Ökonomik.
Niche Readiness und Marktdiffusion von
DC-Technologien (für Verteilnetze)

RWTH Aachen University
Projektleitung

Prof. Dr. phil. Stefan Böschen

Human Technology Center, Lehrstuhl für Technik und Gesellschaft

an der RWTH Aachen University

Förderkennzeichen: 03SF0592

Projektlaufzeit: 01.05.2020 – 30.04.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Autoren sind für den Inhalt dieser Veröffentlichung verantwortlich

Autoren

Yannick Schöpper, Prof. Dr. phil. Stefan Böschen (Human Technology Center – HumTec, Lehrstuhl für Technik und Gesellschaft – SoTec)

Rahil Dejkam, Dr. Razieh Nejabat, Prof. Dr. Reinhard Madlener
(Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften, insbesondere Energieökonomik – FCN)

Marisa Schirmer, Dr.-Ing. Niklas Steireif, Prof. Dr.-Ing. Susanne Mütze-Niewöhner
(Institut für Arbeitswissenschaft –IAW)

Raphaela Bartusch, Luisa Ropelato, Ola Wellmann, Prof. Dr.-Ing. Frank Lohrberg
(Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur – LA)

Sarah Hermens, Jannik Wendorff, Prof. Dipl.-Ing. Christa Reicher
(Lehrstuhl für Städtebau und Entwerfen und Institut für Städtebau und europäische Urbanistik – ISL)

Dr. phil. Claas Rahe, Prof. Dr. phil. Eva-Maria Jakobs
(Human-Computer Interaction Center/Textlinguistik und Technikkommunikation – HCIC/TLTK)

Univ.-Prof. Dr. Rik W. De Doncker
(Institute for Power Generation and Storage – PGS)

Kontakt:
Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN)
FEN GmbH
Campus-Boulevard 79
52074 Aachen
Germany

+49 241 80 22471
info@FENaachen.net
www.FENaachen.net

Inhalt

1. Übersicht..... 4

1.1. Aufgabenstellung 5

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 6

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens 8

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 8

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden 12

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 12

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 13

2. Ergebnisse der Arbeitspakete 13

2.1 Integrative Modellbildung 13

2.1.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz 13

2.1.2 Detailkonzept zur Bestimmung von Niche Readiness Levels (NRL) 14

2.1.3 Modellierung räumlich zeitlicher Faktoren der Marktdiffusion 16

2.1.4 Finalisierung Gesamtmodell 21

2.1.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept 21

2.2 Partizipative Technikgestaltung und DC-Governance 22

2.2.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz 22

2.2.2 Empirische Analyse von Formen partizipativer Technologieentwicklung 23

2.2.3 Untersuchen von Governance-Optionen für die Förderung von DC-Technologien und deren Konfiguration auf lokaler, überregionaler und nationaler Ebene 26

2.2.4 Faktoren der Entscheidungsstrukturen für die Niche Readiness Level und die Marktdiffusion 29

2.2.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept 30

2.3 Innovations-ökonomische Betrachtung der Marktdiffusion von DC-Technologien 30

2.3.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz 31

2.3.2 Analyse der Nischen-Expansionsmöglichkeiten 31

2.3.3 Analyse des Einflusses der Marktstruktur und Förderpolitiken auf die Diffusionsdynamik 33

2.3.4 Vergleichende Analyse sequentieller Ausbaustrategien (incl. Überdimensionierung wachsender Systeme; optimale Kapazitätsplanung und -auslastung) 36

2.3.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept 37

2.4 Arbeitsorganisatorische Gestaltung agiler Technologie- und Nischenentwicklungsprozesse für DC-Technologien 37

2.4.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz 37

2.4.2 Analyse und Modellierung von IST-Prozessen und -Strukturen 38

2.4.3 Empirische Untersuchung der Auswirkungen agil-integrierter Prozesse und Strukturen auf den Diffusionserfolg ... 40

2.4.4 Entwicklung und Evaluation eines Referenzprozessmodells für die integrierte Technologie- und Nischenentwicklung ... 41

2.4.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept ... 44

2.5 Freiraumplanerische Kontextualisierung und Sensibilisierung von DC-Nischenentwicklungsprozessen ... 44

2.5.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz ... 44

2.5.2 Aufbau einer Modellumgebung DC-Quartier ... 45

2.5.3 Identifizierung Infrastrukturen und Räume, Akteure und Märkte ... 48

2.5.4 Planspiel-Serie zu Wirkmechanismen und Nischenpotentialen und Meta-Studie zu Freiraum als Innovator ... 49

2.5.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept ... 52

2.6 Räumlich-planerische Nischeneinbettung von DC-Innovationen ... 53

2.6.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz ... 53

2.6.2 Analyse der Entscheidungsprozesse im Bereich Gebäudetechnik in unterschiedlichen Bauplanungsverfahren ... 54

2.6.3 Analyse von Quartiers- und Gebäudetypologien zur Definition von Parametern für die Modellierung in Use-Cases ... 56

2.6.4 Aufbau gestaltgebender Prinzipien für die stadträumlich relevanten DC-Technologien ... 59

2.6.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept ... 61

2.7 Akzeptanzkartographie von DC-Technologien ... 62

2.7.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz ... 62

2.7.2 Akzeptanzerhebung für ausgewählte DC-Technologien ... 63

2.7.3 Entwicklung einer Akzeptanzkartographie ... 65

2.7.4 Entwicklung von Themenlandkarten für DC-Technologien ... 68

2.7.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept ... 71

3. Hauptpositionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 72

4. Zusammenfassung, Nutzen und mögliche Anwendungen ... 72

5. Liste der Publikationen aus dem Projekt ... 73

6. Literaturverzeichnis ... 76

7. Liste der Tabellen ... 85

8. Liste der Abbildungen ... 85

1. Übersicht

Die Energiewende hin zu nachhaltigen Formen der Produktion, Verteilung und Nutzung von Energie stellt eine der großen gesellschaftlichen Herausforderungen der Gegenwart dar. Das Ausmaß dieser Herausforderung ist durch den Wechsel von einer zentralen zur dezentralen Energieerzeugung, der Diversifizierung und Multimodalität der Speicherung sowie der zunehmenden Sektorkopplung durch Elektrifizierung und Digitalisierung bestimmt. Dies kann nur gelingen, wenn flexibel gestaltete Verteilnetze als Rückgrat zur Verfügung stehen. Für diese Gestaltungsaufgabe verfügt die Gleichstrom-(DC)-Technologie potenziell über relevante Vorteile, insbesondere die Unterstützung dezentraler Netzstrukturen, die Minimierung von Netzkomplexität sowie die Vereinfachung der Lastflusssteuerung.

DC-Technologien haben ein hohes Potenzial für die Energiewende. Dass dieses Potenziales bisher unzureichend genutzt wird, hat historische wie auch technologische Gründe. Das Feld von DC-Technologien differiert stark bezogen auf den Technologie-Reifegrad von DC-Technologien (Technology Readiness Level, TRL) und damit ihrer Marktreife. Die Nutzung von DC-Technologien hängt aber nicht allein von der technologischen Reife ab, sondern zudem auch von den sozio-technischen Bedingungen ihrer Einbettung – die Nutzung und Umsetzung variieren z. B. stark länderabhängig. Bislang ist weitgehend unklar, welche sozio-ökonomischen Bedingungen gegeben sein müssen, um nicht nur den Reifegrad von DC-Technologien zu erhöhen, sondern deren Marktdiffusion zu unterstützen und zu beschleunigen.

Die übergreifende Forschungsfrage des Vorhabens war deshalb: Welche DC-Technologien passen in welche sozial-räumlichen Kontexte, weil sie ökonomisch sinnvoll und sozial einbettungsfähig sind, und welche Faktoren bestimmen ihre Entstehung, ihre Entwicklung in Nischen und ihre Marktdiffusion hin zu weitreichenden Transformationsprozessen? Das Vorhaben ging dieser Frage am Beispiel der Anwendungsszenarien (Use Cases) *DC Commercial Building* und *DC Quartier* nach. Das begründete sich damit, dass die Versorgung kleinerer Räume wesentlicher Teil der Umsetzung der deutschen Energiewende ist. Der Fokus richtete sich auf die Bedingungen der erfolgreichen Etablierung von DC-Technologien (und Kombinationen) sowie auf unterstützende und hemmende Faktoren ihrer Markteinführung und -verbreitung. Zentrales Ziel des Forschungsprojektes DC-Sozio-Ökonomik war daher die gemeinsame Erarbeitung eines neuartigen integrativen *Niche Readiness Level Model*, um die Entwicklung von Technologien in Nischen empirisch zu identifizieren sowie analytisch zu beschreiben. Das Modell ist ein gemeinsames Produkt des interdisziplinären Projektkonsortiums und es kombiniert sozialwissenschaftliche, ökonomische, arbeitswissenschaftliche und räumliche Perspektiven auf Technologieentwicklungsprozesse. Hierbei konnten fünf Mechanismen herausgearbeitet werden, welche das sukzessive Wachstum von der Nische in die gesellschaftliche Breite beschreiben: Framing, Exploration, Standardisierung, Akzeptanz und Imitation. Hierdurch ist das Modell entsprechend anschlussfähig gestaltet und prinzipiell offen für eine kontinuierliche Weiterentwicklung in dritten Forschungsfeldern. Ferner ist eine breitere Anwendung im praktischen Feld der Technologieentwicklung - dem Technological Readiness Level Model nicht unähnlich - prinzipiell möglich, so etwa zur Bestimmung des jeweiligen Status quo einer Technologie durch ein Unternehmen oder zur Abstimmung möglicher nächster Entwicklungsschritte.

Das Vorhaben war als eines von sechs vom BMBF geförderten Projekten im Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN) angesiedelt. Der Forschungscampus verfolgt übergreifend das Ziel, die technologischen und gesellschaftlichen Anforderungen der Energiewende an die Stromnetze zu erforschen, um so Innovationen und Strategien für die Realisierung der Energiewende unter Einsatz von DC-Technologien in Verteilnetzen zu entwickeln. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zum Gelingen der Energiewende unter Sicherung und Weiterentwicklung gesellschaftlicher und wirtschaftlicher

Rahmenbedingungen geleistet werden. Die Fachbereiche des Forschungscampus adressieren die folgenden Forschungs- und Aufgabengebiete:

- Sozio-ökonomische Wirkungen
- Netze und Systeme
- Digitalisierung und Automatisierung
- Komponenten und Betriebsmittel für Gleichstromnetze
- Standardisierung

Die Aktivitäten des Bereichs *Standardisierung* waren in der zweiten Förderphase industriell getrieben und nicht Gegenstand der Förderung. Die technisch-wissenschaftliche Expertise wurde von den Forschungsprojekten unterstützt.

Aufbauend auf den Grundlagenerkenntnissen der ersten Phase fokussierte die Forschung in der zweiten Phase darauf, Nischen (im Sinne von geschützten Innovationsräumen) als Kristallisationspunkte (Nuklei) im heutigen Ökosystem der Energienetze für das Anlaufen einer DC-Transformation zu entwickeln und nutzbar zu machen. Ein solches Bottom-up-Vorgehen war erforderlich, erstens, weil die bestehende Wechselstrom-(AC)-Infrastruktur nicht ad hoc und kurzfristig ersetzt werden kann (Lock-in-Situation), sondern vielmehr nachhaltig transformiert werden muss; zweitens, weil dieses Vorgehen die erforderlichen experimentellen Räume zur Entwicklung und Erprobung eröffnen sollte, die für den Aufbau der Akzeptanz durch alle Interessengruppen notwendig waren. Deshalb verfolgte der Forschungscampus FEN in der zweiten Phase die folgenden vier übergreifenden Ziele:

(1) Systematisches Erfassen von Grundlagen und Bedingungen einer DC-basierten Energiewende und der Verbreitung der entsprechenden Systeme bzw. Lösungen;

(2) Erforschung und Erprobung von technologischen und sozio-ökonomischen Grundlagen und Lösungsansätzen (Blaupausen) für DC-Nischen auf der Basis von Anwendungsszenarien;

(3) Entwicklung von Strategien einer bottom-up getriebenen DC-Energiewende durch Stimulation einer Diffusion der DC-Technologie aus den Nischen heraus;

(4) Vorantreiben von Prozessen der Standardisierung von DC-Technologien für deren sichere Nutzung (außerhalb der Förderinitiative Forschungscampus).

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisdarstellung des Projektes „DC-Sozio-Ökonomik: Niche Readiness und Marktdiffusion von DC-Technologien“.

1.1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel war die Entwicklung eines *neuartigen integrativen interdisziplinären* Gesamtmodells zur Bestimmung von Niche Readiness Levels (NRL) von DC-Technologien sowie eines mehrdimensionalen Analyseansatzes für das Zusammenspiel von Technology und Niche Readiness in Nischen sowie einer darauffolgenden Marktdiffusionsdynamik (AP1). Der Ansatz nutzte heuristisch die Multi-Level-Perspektive (MLP) und entwickelte eigenständig auf der Basis konzeptioneller wie empirischer Arbeiten ein Gesamtmodell für das Feld einer DC-Technologie-basierten Energiewende. Teilziele betrafen die Entwicklung von Ansätzen partizipativer Technologiegestaltung in DC-Quartieren und darauf bezogener DC-Governance-Optionen (AP2), die innovations-ökonomische Analyse der Marktdiffusion von DC-Technologien (AP3), Referenzmodelle für die arbeitsorganisatorische Beschreibung kooperativer Abläufe und Strukturen in der Technologie- und Nischenentwicklung (AP4), die freiraumplanerische Kontextualisierung und Sensibilisierung von DC-

Nischenentwicklungsprozessen (Planspiel; AP5), die Klärung räumlich-planerischer Bedingungen und Anforderungen für eine Nischeneinbettung von DC-Technologie (AP6) sowie eine Akzeptanzkartographie von DC-Technologien (AP7).

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zum Erreichen dieser Ziele wurde ein integriert-interdisziplinäres Konsortium von sechs Instituten der RWTH Aachen University aus unterschiedlichen Fachbereichen gebildet. Die RWTH Aachen University gehört mit mehr als 45.000 Studierenden zu den führenden technischen Universitäten in Deutschland. Mit insgesamt 260 Instituten in neun Fakultäten sind neben den Ingenieurwissenschaften auch die Geistes-, Gesellschafts- und Wirtschaftswissenschaften vertreten. Durch den starken Anwendungsbezug der Ausbildung genießt die Hochschule in der Industrie ein hohes Ansehen und ist in nationalen sowie internationalen Rankings regelmäßig auf den vorderen Plätzen vertreten. Die starke Orientierung an der Industrie sorgt zudem regelmäßig für zahlreiche Innovationen und Patente in diversen Forschungsbereichen.

Die am Projekt „DC-Sozio-Ökonomik: Niche Readiness und Marktdiffusion von DC-Technologien“ beteiligten Institute gehören zu den Fakultäten für Elektrotechnik und Informationstechnik, Maschinenbau, Wirtschaftswissenschaften, Architektur und Philosophie an der RWTH Aachen University und brachten maßgeschneidert ihre interdisziplinären Kompetenzen in das Projekt ein.

Lehrstuhl Technik und Gesellschaft: Der Lehrstuhl Technik und Gesellschaft ist am Human Technology Center (HumTec) der RWTH Aachen University angesiedelt. Schwerpunkte der Arbeit am Lehrstuhl sind sozialwissenschaftliche Wissenschafts- und Technikforschung sowie Innovations- und Risikoforschung. Das Human Technology Center stellt die zentrale Plattform interdisziplinärer Forschung und Lehre an der RWTH dar. In der aktuellen Förderphase der Exzellenzinitiative ist am HumTec der sogenannte Living Labs Incubator (LLI) angesiedelt. Darüber hinaus arbeitet das HumTec insbesondere an Projekten zu regionalen Innovationsökosystemen im Rheinischen Revier – und das an ganz unterschiedlichen Innovationspfaden. Hierbei spielen die Projekte Mine ReWIR-Werkstatt (BMFTR, 2022-2025), NeuroSys (BMFTR, 2022-2027) und Bioökonomie VVU (2022-2026) eine besondere Rolle.

Institut für Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN): Das Institut für Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen ist spezialisiert auf die anwendungsbezogene theoretische und empirische Analyse in den Bereichen Energieökonomik, Energiemanagement und Energiepolitik. Ein thematischer Schwerpunkt liegt auf der Verbreitung innovativer Technologien zur Unterstützung einer nachhaltigen Energieentwicklung aus ökonomischer Perspektive sowie den Bedürfnissen und dem Verhalten der Energiekonsumenten (private Haushalte, Prosumenten, Unternehmen etc.). Angestrebt wird eine detaillierte Betrachtung von Verhaltensaspekten und Motiven, Einstellungen, Präferenzen und Bedürfnissen von Unternehmen, Haushalten und der öffentlichen Hand, welche das Energieverbrauchs- und -investitionsverhalten beeinflussen bzw. erklären können mit dem Ziel, zuverlässige Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen für politische und andere Entscheidungsträger sowie der Gesellschaft im Allgemeinen bereitzustellen.

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW): Am Institut für Arbeitswissenschaft wird seit über 20 Jahren auf dem Gebiet der Arbeitsorganisation mit den Teilgebieten der Analyse, Modellierung und organisatorischen Gestaltung von Prozessen und Strukturen in sozio-technischen Systemen (s. [1], [2], [3]) geforscht. Ein Schwerpunkt liegt auf der Modellierung und Planung sogenannter schwach strukturierter (Entwicklungs-)Prozesse (s.[4]). Wesentliche Grundlagen zur integrierten Gestaltung von Produktentwicklungs- und Produktionsprozessen wurden bereits in DFG-geförderten Vorhaben erarbeitet, wie z. B. im Sonderforschungsbereich 361 und im Transferbereich 57. Die entwickelten

arbeitsorganisatorischen, personenzentrierten Modelle und Methoden konnten in Forschungsverbundprojekten (z. B. BMBF-Projekte PROLODI, INNOKAT, DEROBINO) auf andere Anwendungskontexte übertragen und weiterentwickelt werden. Dabei rückten zunehmend auch wissensintensive Dienstleistungs- und Innovationsprozesse sowie Fragen der Kooperation und Partizipation in den Fokus [5], [6], [7], [8]. Die Forschungsabteilung „Arbeitsorganisation“ des IAW der RWTH Aachen konnte – wie geplant – ihre Vorarbeiten auf den genannten Forschungsgebieten in das Projekt einbringen und bestehende Forschungslücken im Bereich der Modellierung kooperativer Technologieentwicklungs- und -diffusionsprozesse schließen.

Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur (LA): Der Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur an der Fakultät für Architektur der RWTH Aachen befasst sich in seinen Forschungsschwerpunkten mit Transformationsprozessen urbaner und suburbaner Räume. Die Forschung des Lehrstuhls für Landschaftsarchitektur orientiert sich dabei an international definierten Fragestellungen, so den globalen Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen "Sustainable Development Goals" (2016-2030) oder den Arbeitsprogrammen der EU-Kommission zur europäischen Forschung "Horizon 2020". Drei Themen werden dabei vertieft behandelt: green infrastructure, urban agriculture und cultural heritage. Der Lehrstuhl agiert in seiner Forschung mit induktiven Methoden: Aufbauend auf der Analyse einzelner Projekte und Orte werden Erkenntnisse zur Raumentwicklung gewonnen und Handlungsempfehlungen formuliert. Die Forschung in Reallaboren wird dabei immer wichtiger: Der Lehrstuhl beobachtet und beschreibt nicht nur, sondern interveniert durch landschaftsarchitektonische Strategien in alltägliche Prozesse, um neues Handlungswissen zu generieren.

Lehrstuhl und Institut für Städtebau (ISL): Der Lehrstuhl und das Institut für Städtebau (ISL) befassen sich mit den komplexen urbanen Strukturen – vom regionalen und gesamtstädtischen Kontext, über die Ebene des Quartiers bis zum Gebäude. Basierend auf dem historisch gewachsenen Bestand liegt der Fokus auf der Gestaltung und dem Weiter- und Umbau zukunftsfähiger Städte und Quartiere unter Berücksichtigung ihrer technischen, ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Rahmenbedingungen. Technische Innovationen, Digitalisierung und Globalisierung verändern die Wohn- und Arbeitswelt sowie insgesamt das Nutzungsgefüge von urbanen Strukturen. Dabei kommt dem Städtebau die Aufgabe zu, mit dem Blick auf die Raumrelevanz dieser Veränderungsprozesse die bestmögliche Umwelt für alle zu entwerfen und zu gestalten.

Human-Computer Interaction Center (HCIC/TLTK): Forschungsschwerpunkte der Professur Textlinguistik und Technikkommunikation (Human-Computer Interaction Center) bildeten Formen der (elektronisch gestützten) Kommunikation in Unternehmen und Öffentlichkeit sowie Technikkommunikation, Enterprise 2.0, Kommunikationsqualität, kommunikative Usability und Technikakzeptanz. Die Schwerpunkte wurden unter anderem mit Methoden des linguistischen Text-Minings untersucht. Für diesen Ansatz wurden an der Professur eigene Tools wie ein automatisierter Part-of-Speech-Tagger für Online-Kommentare (Autoannotator) und die Mehrebenenannotation für Akzeptanzstudien entwickelt.

Institut für Power Generation and Storage Systems (PGS): Das Institut für Power Generation and Storage Systems (PGS) ist im Bereich der Forschung, Entwicklung und Anwendung leistungselektronischer Energiewandlungs- und Speichertechnologien (Mittelspannungs-Moduleinheiten) tätig. Ziel ist die Optimierung von Wirkungsgrad und Lebenszykluskosten von Energieumwandlung und –speicherung sowie von Systemen zur Mittelspannungsverteilung und Gleichstromübertragung. Dabei wird ein gesamtoptimales System mit besonders detaillierter Betrachtung der Leistungselektronik angestrebt.

Durch eine gemeinsame Bearbeitung des Projektes „DC-Sozio-Ökonomik: Niche Readiness und Marktdiffusion von DC-Technologien“ in Zusammenarbeit mit allen Instituten konnte eine Verknüpfung interdisziplinärer Themengebiete und langjähriger Expertisen erreicht werden.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der Zielsetzung wurde das Projekt in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert.

AP1: Integrative Modellbildung

AP2: Partizipative Technikgestaltung und DC-Governance

AP3: Innovations-ökonomische Betrachtung der Marktdiffusion von DC-Technologien

AP4: Arbeitsorganisatorische Gestaltung agiler Technologie- und Nischenentwicklungsprozesse für DC-Technologien

AP5: Freiraumplanerische Kontextualisierung und Sensibilisierung von DC-Nischenentwicklungsprozessen

AP6: Räumlich-planerische Nischeneinbettung von DC-Innovationen

AP7: Akzeptanzkartographie von DC-Technologien

In Arbeitspaket 1 erfolgten die Projektinstallation, der gemeinsame Entwurf des Gesamtmodells sowie die Abstimmung der empirischen Arbeiten und zusätzlich die Koordination im Gesamt-FEN-Kontext. Die Arbeitspakete 2-7 wurden jeweils federführend von einem beteiligten Forschungspartner bearbeitet und wiesen eine einheitliche Struktur auf, die eine kontinuierliche, problemzentrierte Zusammenführung der unterschiedlichen fachlichen Expertisen der Partner und ihrer Ergebnisse sicherstellte.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

MLP als theoretisch-konzeptioneller Ausgangspunkt: Zur Untersuchung von Transformationsprozessen wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten der so genannte MLP-Ansatz (MLP = Multi-Level Perspective; [9], [10], [11] entwickelt. Er betrachtet drei Ebenen – sozio-kulturelle Landscape, sozio-technisches Regime und Nischen – sowie ihre Verknüpfung. Durch die Verknüpfung der Ebenen können Entstehung und Diffusion sozio-technischer Innovationen im Kontext von Transformationsprozessen, mithin auch: der Energiewende, sehr gut untersucht werden. Innovationen werden diesem Ansatz zufolge vor allem in Nischen vorbereitet, um dann bei genügender Anzahl und passendem Gelegenheitsfenster (insbesondere mit Blick auf die Regime-Situation) zu einem Regime-Wechsel beizutragen, also die Innovationslandschaft (in eine gewünschte Richtung) zu verändern. Eine andere Form von Wandel kann durch den Wandel kulturell-institutioneller Muster auf der Landscape-Ebene herbeigeführt werden (Beispiel: EEG). Die aktuelle Innovationssituation von DC-Technologien bietet insbesondere auf der netztechnischen Ebene ein Innovationspotenzial für die Energiewende, das bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist, etwa für die Stadtversorgung. Zugleich zeigen aber die bisher nicht ausgeschöpften Potenziale der DC–Technologie vor allem auch Herausforderungen bei der sozio-technischen Stabilisierung in Nischen. Deshalb bilden Problemstellungen der Nischenstabilisierung und -dynamik einen wichtigen Startpunkt. Zu betrachten war insbesondere die Quantität von Nischen und ihre spezifische Qualität mit Blick auf eine DC-getriebene Energiewende. Nach [12] sind Nischen komplexe Gebilde, in denen Visionen und Akteursnetze sich formieren und dabei Innovation hervorbringen. Bei aller Produktivität des MLP-Ansatzes ergibt sich eine Reihe von Kritikpunkten, wobei vor allem die mangelnde Konkretisierung und Theoretisierung der wirksamen

Faktoren hervorsticht. Deshalb griff das Vorhaben das Konzept der Nische mit der Hypothese auf, dass produktive Nischen durch ein dynamisches Gleichgewicht geprägt sind, bei dem Innovationshandeln freigesetzt und zugleich stabilisiert wird. In Abhängigkeit von Faktoren der Technologie, des ökonomischen, sozialen, organisatorischen und räumlichen Kontexts und der Stabilität von Nischen eröffnen sich Freiräume für Innovationen oder greifen Abwehrdynamiken (durch Reaktanz, Interessenskonflikte, Entscheidungsblockaden etc.) Raum. Um diese Spannung theoretisch auszuarbeiten, empirisch zu explorieren und einer Gestaltung zugänglich zu machen, wurde die multifaktorielle Kontextabhängigkeit technischer Innovationen als Niche Readiness Level konzeptionell-theoretisch entwickelt und empirisch untersucht. Die Entwicklung des NRL-Ansatzes orientierte sich dabei heuristisch am Ansatz der Technology Readiness Level (TRL) [13]. Die zentrale Idee des Ansatzes ist, den Reifegrad einer Technologie metrisch zu bestimmen. Dies erlaubt, die jeweils nächsten Schritte und die dabei erforderlichen Kosten leichter abzuschätzen, weil die Distanz zum fertigen Ergebnis genauer reflektiert werden kann. In ähnlicher Weise kann gefragt werden, welche sozio-ökonomischen Variablen einer für die Technologie-Entwicklung relevanten Nische welche Ausprägungen aufweisen müssen, damit die weitere Entwicklung dieser Technologie in der Nische die jeweils produktivsten Randbedingungen findet. Im Vorhaben wurden zum einen das Zusammenspiel von TRL und NRL in Nischen und zum anderen die Wirkungen solcher Nischenbildung auf die Markdiffusionsdynamik untersucht und zum Gegenstand einer integrativen Modellbildung gemacht. Dabei galt es zum einen, Besonderheiten des technologischen Feldes zu berücksichtigen (Infrastrukturtransformation) sowie relevante Aspekte der Charakterisierung von Nischen sowie ihrer Verschränkung mit Prozessen der Marktdiffusion aufzunehmen (Partizipative Innovationsgovernance, Arbeitsorganisation, Freiraum- und Quartiersplanung sowie Akzeptanz von DC-Technologien).

Infrastrukturentwicklung und Hype Cycle: Für die Beschreibung der Innovationsdynamik in ganz unterschiedlichen Feldern hat sich das Modell der Hype Cycles als fruchtbar erwiesen (vgl. z.B. [14]). Danach vollzieht sich die Etablierungsdynamik von Innovationen nach einem Muster zunehmend überschießender Erwartungen, die, weil der Enttäuschungsfall mehr oder weniger unausweichlich ist, kräftig gedämpft werden, um dann langsam bis zu einem Produktivitätsplateau wieder anzusteigen. Auch für den vorliegenden Fall war die generelle Relevanz von Hype Cycle-Dynamiken unbestritten. Jedoch fokussierte das Projekt dezidiert Infrastrukturen. Diese unterliegen besonderen sozio-technischen Stabilisierungserfordernissen, gerade bei einem Systemwechsel. Der Systemwechsel in der Energiewende von einem zentralen auf ein durch dezentrale Strukturmuster geprägtes System rückte die sozio-technische Stabilisierung von Technologieoptionen in Nischen sowie einer darauf aufbauenden Diffusionsdynamik in den Blick. Die Entwicklung von Infrastrukturen in der Gegenwart kann als ein Phänomen gesehen werden, bei dem die Materialisierung historisch gewachsener und kulturell eingebetteter großer sozio-ökonomisch-technologischer Systeme in den Blick genommen wird. Die Entwicklung solcher ‘networks of power’ [15] lässt sich als „posing a linked series of sociotechnical problems“ [16] verstehen, um die ko-evolutionäre Entwicklung von physischen, technischen, organisatorischen, rechtlichen und alltäglichen sozialen und ökonomischen Praktiken analysieren zu können. Die je besonderen Einbettungsbedingungen werden gerade in solchen Zusammenhängen virulent, bei denen eine Veränderung von Infrastruktursystemen im Raum steht. Denn dies bedeutet, dass das sozio-ökonomisch-technische System neu konfiguriert wird. Dabei können bspw. Bürger:innen nicht mehr umstandslos als Externe des Systems begriffen werden, mehr noch lassen sich die gerade im Kontext der Energiewende auftretenden Akzeptanzprobleme als nicht-adäquat gezogene Systemgrenzen deuten [17].

Innovationsgovernance durch Partizipation: Partizipation wird seit vielen Jahren als Schlüssel für die Wissensproduktion (vgl. z.B. Überblick: [18], [19]) wie Innovationsproduktion (vgl. z.B. [20]) gesehen und in der Zwischenzeit unter dem Stichwort Open Innovation als zentrales Konzept der EU geführt (vgl. z.B. [21]; aber schon: [22]). Insbesondere im Rahmen der Energietransformation (aber ebenso

anderer gesellschaftlicher Problemlösungsprozesse) hat man in ganz unterschiedlichen Regionen und Ländern die Erfahrung gemacht, dass Effektivität und Legitimität von Problemlösungen wesentlich durch lokale Beteiligung von Bürger:innen bestimmt werden und dass die Stabilität solcher Arrangements durch eine materielle Beteiligung gesteigert werden kann (vgl. z.B. [23]). Stabile lokale Nischen können daher als Anker der DC-Transformation angesehen werden. Entscheidende Impulse zu einer Innovationsgovernance durch Partizipation im lokal-regionalen Kontext kommen aus der Forschung zu Realexperimenten bzw. Reallaboren. Die Idee von Realexperimenten (vgl. [24], [25]) hat in der Zwischenzeit insbesondere unter dem Topos des Reallabors eine ganz eigene Form und Dynamik entfaltet. Seit den ersten Ideen zur Realisierung von Reallaboren lässt sich in der Zwischenzeit nicht nur eine ganze Reihe von Initiativen zur Förderung beobachten, sondern es haben sich auch konkrete Formen von Reallaboren national und international etabliert (vgl. z.B. [26], [27], [28], [29]). Der Begriff Reallabor stellt im Grunde einen Sammelbegriff für eine große Anzahl verwandter Begriffe dar, z.B.: Living Labs, Social Innovation Labs oder Transition Labs. Gemeinsam ist diesen gleichwohl, dass in ihnen Probleme dynamisch aufgegriffen und transdisziplinär-problemlösend bearbeitet werden (vgl. zum transdisziplinären Prozess: [30]). Erweiterung von Wissen, wechselseitiges Lernen oder Gestaltung der Situation können Zielfelder solcher transdisziplinärer Prozesse sein (vgl. [31]). Akteure aus der Zivilgesellschaft spielen in diesen Ansätzen zumeist eine entscheidende Rolle. In Reallaboren können durch die Einbindung zivilgesellschaftlicher Akteure sowie Bürger:innen Problemlösungschancen verbessert werden, sei es durch die Schaffung von materiellen Gegenständen (vgl. [23], [32]), die Integration verschiedener Perspektiven (vgl. [33]) oder die Gestaltung eines Partizipationskontinuums (vgl. [34]). Vor diesem Hintergrund werden inkrementelle Suchprozesse in lokal-regionalen Umgebungen als Chance auf Lernprozesse gesehen, um Ideen gemeinsam zu entwickeln, auszuprobieren, zu verändern und so kontextbezogene, von den beteiligten Akteuren getragene Lösungen zu generieren. Jedoch fehlen bisher Ansätze einer integrierten Betrachtung solcher Reallabore als Nischen, um übergreifende Faktoren von Stabilität und Innovationspotenzial identifizieren zu können. Übertragen auf das hier relevante Feld der Innovationen in der DC-Technologie eröffnete dieser Forschungsstrang die Chance, lokale und regionale Nischen-Situationen so auszuleuchten, dass dabei sehr genau die spezifischen kulturellen und sozialen Einbettungs-, Stabilisierungs- wie auch Transformationsperspektiven von, mit und durch DC-Technologien herausgearbeitet und in einen Zusammenhang mit Erfordernissen einer partizipativen Governance der Wissens- und Innovationsproduktion gestellt werden konnten.

Arbeitsorganisation: Anstrengungen und Aufwände zur Entwicklung und Diffusion innovativer Technologien werden zu großen Teilen in Arbeitszusammenhängen erbracht. Die Aktivitäten zur Realisierung offener, partizipativer Innovations- und Diffusionsprozesse setzen Prozesse und Strukturen voraus, die die kooperative Bewältigung in heterogenen Akteursnetzen ermöglichen und befördern. Neben der klassischen (mikro-)ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung und der Mensch-Technik-Interaktion befasst sich die arbeitswissenschaftliche Forschung zwar durchaus mit makroergonomischen Aspekten der organisatorischen Arbeitsgestaltung, überschreitet allerdings nur sporadisch die Grenzen betrieblicher Strukturen[35], [36]. Eine solche Überschreitung ist jedoch erforderlich, wenn Technologie- und Nischenentwicklung integriert und von Akteuren inner- und außerhalb von Organisationen zum Zwecke einer effektiveren Technologiediffusion vorangetrieben werden sollen. Denn bisher werden Technologie- und Nischenentwicklung (als initialer Part der Technologiediffusion) in der Diffusionslogik als zwei inhaltlich und chronologisch getrennte Prozesse betrachtet [37], [38]. Eine engere Verzahnung beider Prozesse könnte das synchrone Erreichen passgenauer Technologie- und Nischenreifegrade begünstigen und den Gesamtprozess der Technologieentwicklung und -diffusion beschleunigen. Prinzipien, wie Parallelisierung, (partielle) Integration und Kompetenzzusammenführung, sind in der Produktentwicklung bereits seit langem etabliert (s. z. B. [39], [40], [41]), ein Nachweis der Übertragbarkeit auf die integrierte

Technologieentwicklung und -diffusion existierte zu Beginn des Vorhabens jedoch nicht. Entsprechendes galt auch für die Organisationskonzepte der agilen Produktentwicklung (s. z. B. [42], [43]) und die darauf basierenden integrierenden Methoden und Strukturen (s. [44], [45]). Zu Projektstart mangelte es an evaluierten arbeitsorganisatorischen Referenzmodellen, die Abläufe und Strukturen für die hier betrachteten respektive zu entwerfenden kooperativen, integrierten Prozesse beschreiben und dabei gleichzeitig der geforderten Agilität gerecht werden.

Freiraumplanung: Bisher wurden in der Freiraumplanung grundlegende Transformationen nur begrenzt theoretisch-konzeptionell ausformuliert. Typischerweise wurd das Innovationsgeschehen bislang reaktiv betrachtet und insbesondere als Umweltverträglichkeit und Akzeptanz untersucht ([46]). Die freiraumplanerischen Dimensionen einer erfolgreichen Nischenbildung sind daher nur in Ansätzen und ohne klare Zielsetzung auf Innovation beforscht worden. So hat das Konzept des „Placemaking“ [47]die Rolle gestalteter Freiräume in der Bildung innovationsorientierter Akteursnetze verdeutlicht. Das im Rahmen der Transformationsforschung entwickelte Format der Living Labs hat andererseits aufgezeigt, dass der konkrete Raum bzw. Freiraum eine wichtige Dimension im Innovationsprozess ist [48]. Empirisch gesehen gibt es zwar Innovationsprogramme, in denen die Freiraumplanung eine zentrale Rolle spielt wie bspw. Bauausstellungen oder Regionalen. Insbesondere die Internationale Bauausstellung Emscher Park hat die Innovation einer ganzen Region – des Ruhrgebietes – in einem freiraumplanerischen Gesamtansatz betrieben, wenn nicht gar zelebriert. Diese Ansätze erfolgen aber allesamt auf der Ebene der Innovationslandschaft. Hier werden Anreize für Innovationen sozio-technischer Systeme gesetzt. Eine gezielte Adressierung und Stimulierung dieser Systeme über Nischen erfolgt typischerweise nicht. Dabei verändern neue Technologien gerade den Freiraum wie das Beispiel erneuerbare Energien zeigt. Eine Verknüpfung dieser Ansätze im Hinblick auf das Konzept der Niche Readiness stand daher noch aus.

Städtebau und Quartiersentwicklung: Auch hier fehlte bislang eine systematische Integration von infrastrukturellen Innovationen in stadträumlichen Konzepten der Nischenanalyse. Die Nutzung von Nischen in städtischen Kontexten wurde zwar bereits anhand von Fallstudien untersucht, bezog sich jedoch auf Zwischennutzungen [49]. Nischen werden räumlich definiert als kleine geschützte Räume, in denen neue Praktiken, jenseits von harten Auswahlkriterien und Widerständen entwickelt werden können [50]. Zwischennutzungen bilden dabei nur einen Teil der möglichen Implementierungen. Die Kombination von technologischen Innovationen im Raum und strategischem Nischenmanagement bedurfte daher einer klaren Zielsetzung und Operationalisierung [51]. In der stadtmorphologischen Forschung waren Analogien zu den Maßstabsebenen der Nischen, Regime und Landschaftsebenen zwar identifizierbar, ein Matching der Konzepte stand allerdings noch aus. In Städten und damit in räumlichen Kontexten, entstehen oft Anstöße für einen Transformationsprozess [52], jedoch fehlte hier bislang eine zusammenhängende Einschätzung der Nischeneinbettung.

Akzeptanz von DC-Technologien: Entscheidungen für oder gegen Technologien hängen maßgeblich von der Sicht der beteiligten Akteure auf die Technologie ab. Ein in diesem Zusammenhang relevantes Konstrukt ist das der Technikakzeptanz. Sie wird in der Literatur als vielschichtiges Konstrukt interagierender Größen beschrieben [53]. In den letzten zehn Jahren entstanden viele Akzeptanzstudien zu Aspekten der Energiewende, insbesondere zu Infrastrukturprojekten, Energieformen, Maßnahmen im urbanen Raum [54], zur Energiewende als gesellschaftliche Herausforderung [55] oder zum Zusammenhang von Akzeptanz und Partizipation [56]. Das Verständnis von Akzeptanz variiert dabei je nach Disziplin (z.B. Soziologie, Psychologie, Politik-, Umwelt- oder Kommunikationswissenschaft) und Fokus (einstellungsbezogene Ansätze, Ansätze der Begleit-, Projekt- und Wirkungsforschung, sozial-psychologische Analysen, soziologische Deutungsversuche und normative Ansätze; vgl. [57]). Die Ansätze berücksichtigen unterschiedliche Akzeptanzdimensionen und -ausprägungen. Das beantragte Vorhaben fasste Akzeptanz als (individuelles oder kollektives)

Bewertungsergebnis [58]. Relevant waren Größen wie Bewertungssubjekt, -gegenstand, -kontext und -zeitpunkt, wahrgenommene Bewertungsaspekte, Vergleichsgrößen und Bewertungsmaßstäbe. Die Akzeptanz neuer Technologien wie auch die wahrgenommenen Risiken variieren je nach Akteursgruppe [59] und ihren Voraussetzungen [60]. Die meisten Energie-Akzeptanz-Studien betrachten Bürger:innen, nicht jedoch Entscheider:innen in Nischenentwicklungsprozessen [61], [62]. Nach [63] fehlen in Nischen häufig formalisierte Organisationsstrukturen (z.B. etabliert durch große Energiekonzerne oder Stadtwerke). Sie sind anfangs häufig geprägt durch informelle Handlungspraxen (z.B. bei Energieprojekten: Bürgerversammlungen, lokale „Experten zweiter Ordnung“ oder Absprachen unter Lokalpolitikern). DC-Technologien und ihre Anwendungsgebiete umfassen ein breites Spektrum, das nur in Ansätzen von der Akzeptanzforschung gesehen wurde. Die meisten Studien betrachteten Versorgungsleistungen als Teil eines smarten (DC-)Grids [64], [65], [66], [67]. Es gab zum damaligen Zeitpunkt kaum Studien zur Akzeptanz des Einsatzes von DC-Technologien in Gebäuden und Stadtquartieren, insbesondere aus Sicht der sie gestaltenden Expert:innen. Eine Ausnahme ist eine Studie von Glasgo [68], in der Expert:innen dazu befragt wurden, wo sie die größten Herausforderungen beim Einsatz von DC-Technologie in Gebäuden sehen. Die Studie bezieht sich auf die USA. Als Herausforderungen bzw. Barrieren nannten die Befragten ein zu geringes Wissen von Entscheider:innen über die Technologien sowie die geringe Größe von Märkten für DC-Geräte und Komponenten. Studien für Deutschland fehlten zum damaligen Zeitpunkt, insbesondere zu Faktoren und Argumenten, die die Entscheidungsfindungsprozesse von Expert:innen beeinflussen. Es gab bislang keine Akzeptanzstudien, die verschiedene DC-Technologien in einem Anwendungsbereich bezogen auf Entscheidergruppen betrachten und Überblicke zu Hierarchien akzeptanzhemmender und -fördernder Argumente bieten, die für die Nischenentwicklung genutzt werden könnten. Ob und wie Technologien wahr- und angenommen werden, schien u.a. abhängig von der Qualität ihrer kommunikativen Einführung und Begleitung (z.B. [69]). Letztere erforderten ein gutes Verständnis der Faktoren, die zu Entscheidungen für oder gegen eine Technologie führen sowie der Themen, die in diesem Kontext für Zielgruppen relevant sind. Brettschneider schlug für die Identifizierung derartiger Themen das Verfahren der Themenlandkarte vor. Themenlandkarten erfassen relevante Themen für einen Gegenstandsbereich (z.B. die Vorplanungsphase der Projektkommunikation von Bau- und Infrastrukturprojekten; [70]). Sie erfassen die Sicht unterschiedlicher Stakeholder auf Themen eines Gegenstandsbereichs und systematisieren diese gewichtet auf drei Ebenen [71] als: (1) Themendimensionen, die für die Gesamtbewertung des Objektbereichs relevant sind, (2) daraus abgeleitete Themenfelder (die gruppenabhängig unterschiedlich „wichtig“ sein können) und (3) Einzelthemen, die in Kommunikationsstrategien konkret räumlich-zeitlich für Stakeholdergruppen und ihre Anforderungen umgesetzt werden. Interessant waren insbesondere risikoreiche oder positiv besetzte Themen.

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Im Projekt DC-Sozio-Ökonomik wurden weder bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte Dritter verwendet noch eigene Schutzrechte angemeldet.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden Bibliotheken, wie die Universitätsbibliothek der RWTH Aachen sowie in der Wissenschaft übliche Datenbanken genutzt. Fachliteratur sowie weitere genutzte Informations- und Dokumentationsdienste werden im Falle von Verwendung in Kapitel 2 aufgeführt und im Literaturverzeichnis (Kapitel 5) zusammengestellt. Darüber hinaus wird auf das Literaturverzeichnis für die im Vorhaben entstandenen Publikationen verwiesen (s. Kapitel 4).

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde am Forschungscampus Flexible Elektrische Netze durchgeführt. Als Teil des Projektverbundes erfolgte ein kontinuierlicher Austausch sowie eine projektübergreifende Bearbeitung von Querschnittsthemen. In diesem Rahmen wurden gemeinsam mit beteiligten Industrie- und Hochschulpartnern in Workshops wissenschaftlich-technische Fragestellungen gemeinsam entwickelt, erörtert und ggf. Lösungen erarbeitet. Darüber hinaus wurde im Projektverlauf die Kooperation mit wissenschaftlichen Partnern aus dem Ausland intensiviert, wie Kapitel 2 im Einzelnen zu entnehmen ist.

2. Ergebnisse der Arbeitspakete

2.1 Integrative Modellbildung

Ziel des Arbeitspaketes 1 war die Entwicklung eines übergeordneten Gesamtmodells der Nischenentwicklung und Marktdiffusion von DC-Technologien. Hierfür wurden die Teilergebnisse aus AP2 bis AP6 kontinuierlich zusammengeführt und in ein Gesamtmodell der Niche Readiness integriert.

2.1.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

Gegenstand des AP1.1 war die Entwicklung einer gemeinsamen konzeptionellen Grundlage sowie eines aufeinander abgestimmten Erhebungsansatzes.

Die konzeptionelle Fundierung des Projektes ging ganz wesentlich auf die Multi Level-Perspective sowie das Strategic Niche Management zurück. Diese beiden Forschungsstränge prägten entscheidend die Perzeption des Nischenbegriffes (siehe Kap. 1.4). Daran anschließend bestand zunächst das Erfordernis, die Nische als heuristisches Instrument zu begreifen, welches als sog. „Boundary Object“ zwar einen integrativen Fluchtpunkt bot, zugleich aber auch selektiv unterschiedliche Auslegungen und Differenzierungen zuließ (siehe dazu insbesondere AP2.1). In den Workshops zu Projektbeginn wurden deshalb tentativ verschiedene Möglichkeiten von Differenzierung und Vereinheitlichung ausgelotet. Zu diesem Zweck wurde bspw. mittels visueller Tools („Coggle“) eine konklusive Typisierung von Nischen angestoßen. Dieser Zwischenschritt war nötig, um darauf aufbauend einen ersten Modell-Prototypen zu entwickeln, welcher die Komplexität und damit die Vielgestaltigkeit von Nischen in entsprechender Weise abbildet. Abbildung 1 zeigt den Modell-Prototypen auf Grundlage des sog. Morphologischen Kastens.

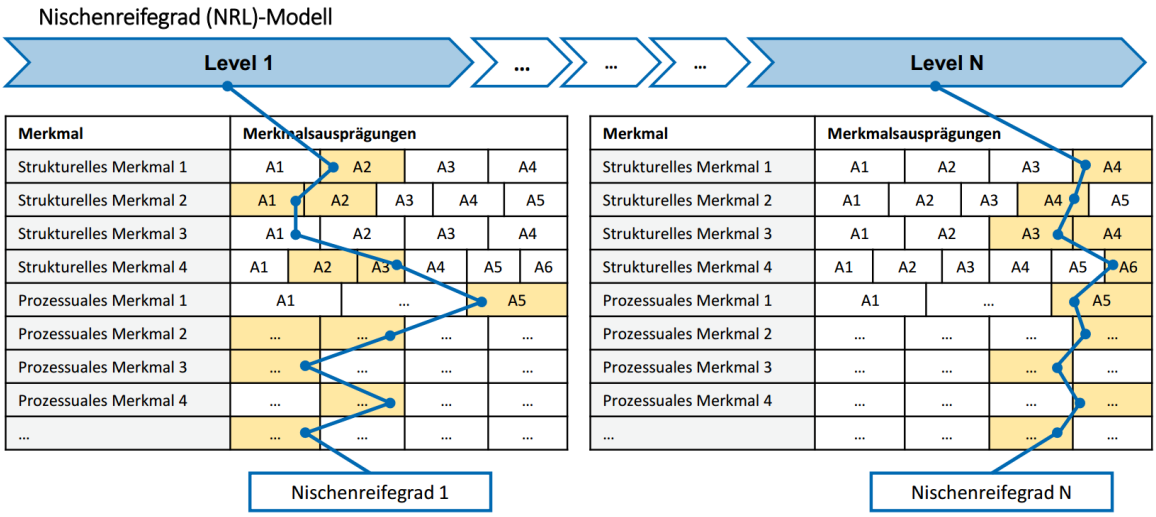


Abbildung 1: Modellprototyp des Niche Readiness Level Model

Darüber hinaus wurden im AP1.1 zentrale Absprachen zur empirischen Erhebungsstrategie getroffen. Auf diese Weise konnte die Durchführung von Interviews größtenteils im interdisziplinären Verbund erfolgen. Hierzu war es notwendig, die Interviewleitfäden zu vereinheitlichen und bestimmte Fragetypen nach unterschiedlichen Fachbereichen zu differenzieren. Auf diese Weise konnte eine konzertierte Arbeitsweise auf Ebene der wissenschaftlichen Beschäftigten laufend sichergestellt werden. Zugleich wurden Dopplungen in der Kontaktanbahnung vermieden und vorhandene Ressourcen konnten effizient im Verbund genutzt werden.

2.1.2 Detailkonzept zur Bestimmung von Niche Readiness Levels (NRL)

Auf Grundlage der gemeinsamen Datenerhebung, welche im Einzelnen in den spezifischen Arbeitspaketen beschrieben wird, wurden fünf Mechanismen als zentrale Dimensionen eines ersten Arbeitsentwurfes des Niche Readiness Level Model gewonnen. Im Folgenden wird das NRL-Model entlang dieser fünf Mechanismen – Framing, Exploration, Standardisierung, Akzeptanz und Imitation – systematisch erläutert. Für jeden Mechanismus werden zunächst die theoretischen Grundlagen dargestellt, um den Mechanismus als solchen zu beschreiben. Kapitel 2.1.3 setzt diese Strukturierung fort und diskutiert auf dieser Grundlage räumlich-zeitliche Faktoren der Marktdiffusion anhand der empirischen Befunde für DC-Systeme.

Framing: Der Mechanismus des Framings fungiert im NRL-Model als zentrale Schnittstelle zwischen den sozio-ökonomischen Lösungsansätzen auf der Nischenseite und artikulierten Problemlagen im Regime. Im Fall von DC-Technologien bedeutet dies, dass spezifische technische Konfigurationen – etwa ein quartiersbezogenes DC-Microgrid – als potenzielle Lösung für systemische Herausforderungen wie Netzengpässe oder die Integration erneuerbarer Energien im bestehenden Stromsystem positioniert werden. Die empirische Analyse zeigte, dass die Wahrnehmung und Bewertung von DC-Technologien keineswegs eindeutig ist, sondern vielmehr von einer hohen Ambiguität und einer starken Kontextabhängigkeit geprägt wird. Insbesondere die antizipierte Problemlage im Regime, beispielsweise ausgelöst durch aktuelle Ereignisse, bestimmte Themenkonjunkturen oder bedeutsame Marktentwicklungen, haben maßgeblichen Einfluss auf die Perzeption und Attributierung von DC-Systemen. Auf diese Weise bilden Nischen und Regime auch in dieser Hinsicht ein relationales Verhältnis aus, das über den zeitlichen Verlauf veränderlich ist und dementsprechend re-konfiguriert werden kann.

Exploration: Der Mechanismus der Exploration beschreibt die Art und Weise, wie Akteure im Rahmen von Nischenprojekten versuchen, eine Passfähigkeit zwischen ihren spezifischen Anwendungskontexten und den Selektionskriterien des Regimes herzustellen. Mit Selektionskritierien sind in diesem Fall bestimmte sozio-ökonomische, regime-seitig stabilisierte Randbedingungen gemeint wie etwa der rechtliche und regulatorische Rahmen, gewohnte Business-Modelle, übliche Planungsmuster und weitere stabile Arrangements. Dabei lassen sich zwei grundlegende Strategien unterscheiden: Einerseits die fit-and-conform-Kompatibilität, bei der Projektlösungen gezielt an die bestehenden Regelsysteme angepasst werden, und andererseits eine Form subversiver Kompatibilität, bei der etablierte Regeln umgedeutet oder temporär ignoriert werden, um innovative Ansätze zu ermöglichen. Die empirische Untersuchung zeigte, dass der Einsatz dieser Strategien je nach Kontext stark variieren kann.

Standardisierung: Standardisierung wird im Rahmen des Niche Readiness Level Models als vielschichtiger Mechanismus verstanden, der weit über die bloße Vereinheitlichung technischer Komponenten hinausgeht. Sie umfasst ebenso die Entwicklung und Etablierung von Geschäftsmodellen, standardisierten Prozessen und Planungsmustern, die für eine systematische Integration von DC-Technologien in bestehende Infrastrukturen notwendig sind. Standardisierung fungiert damit als Brücke zwischen der Vielfalt innovativer Ansätze auf der Nischenseite und den etablierten Regelsystemen des Regimes.

Akzeptanz: Der Mechanismus der Akzeptanz beschreibt die Verbindung zwischen der Wahrnehmung von DC-Innovationen in der Nische und den geteilten Wertvorstellungen verschiedener regime-seitiger Akteursgruppen. Akzeptanz ist dabei als ein individueller oder kollektiver Bewertungsprozess zu verstehen, in dessen Verlauf eine Technologie auf Basis spezifischer Kriterien beurteilt und mit bestehenden Zielvorstellungen abgeglichen wird. Die empirische Analyse zeigte, dass die Akzeptanz von DC-Technologien stark vom jeweiligen Anwendungskontext abhängt und maßgeblich durch die Sichtbarkeit und die kommunikative Vermittlung der Technologie beeinflusst wird.

Imitation: Der Mechanismus der Imitation beschreibt die Übertragung erfolgreicher sozio-ökonomischer Konfigurationen aus der Nische in breitere gesellschaftliche Praxen im Regime. Imitation fungiert damit als zentraler Diffusionspfad für neue Technologien und ist eng mit den Routinen und Alltagspraktiken unterschiedlicher sozialer Gruppen verknüpft. Die empirischen Daten zeigen, dass insbesondere Planer:innen und Architekt:innen aktiv nach Best-Practice-Beispielen suchen, um eigene Projekte an erfolgreichen Vorbildern auszurichten. Imitation ist somit ein wichtiger Treiber für die Verbreitung von DC-Technologien, insbesondere in Feldern, in denen Unsicherheit bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit besteht.

Zusammenfassend zeigt das Niche Readiness Level Model, dass die Entwicklung und Diffusion von DC-Technologien durch ein komplexes Zusammenspiel von Framing, Exploration, Standardisierung, Akzeptanz und Imitation geprägt ist. Der Modellkern wird durch die folgende Abbildung 2 repräsentiert.

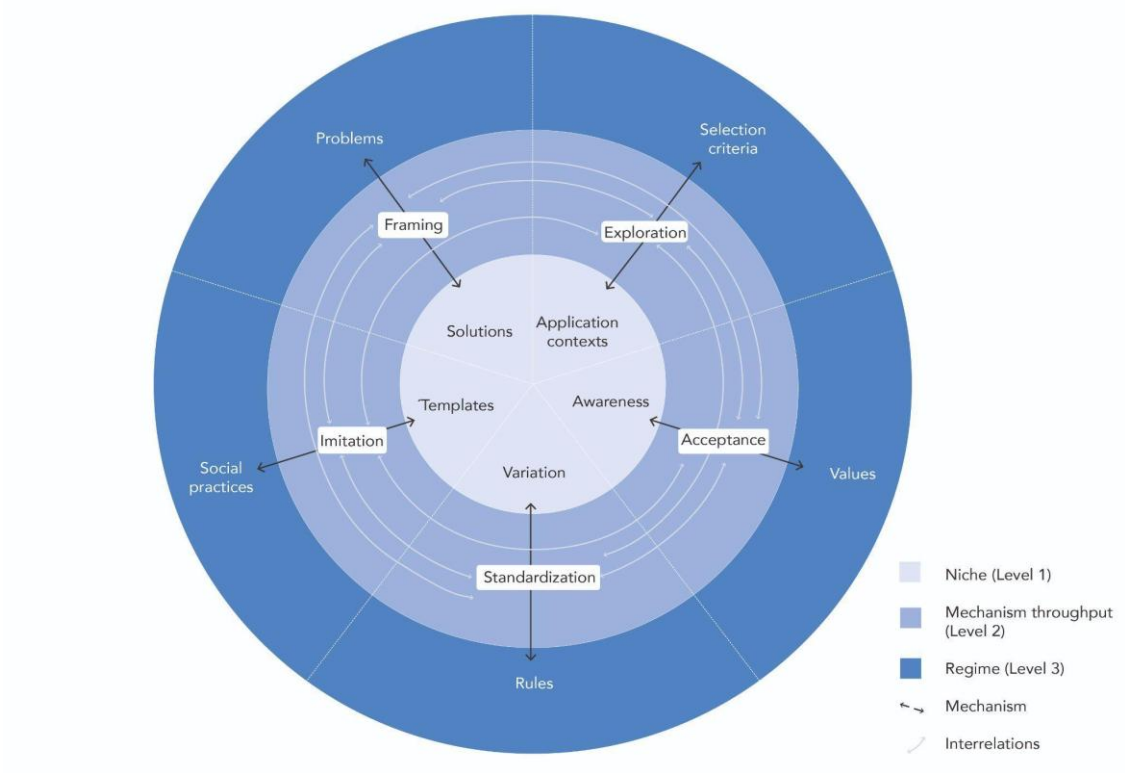


Abbildung 2: Der Kern des Niche Readiness Level Model

Im Rahmen des AP1.2 wurde unter Federführung des AP2 eine gemeinsame Veröffentlichung des Modells als FCN Working Paper realisiert [72]und ebenso als Aufsatz in einem renommierten Journal einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht [73]. Zudem wurden erste Ergebnisse auf der International Sustainability Transitions Conference (IST) im Jahr 2022 am Standort Melbourne vorgestellt [74] sowie im Rahmen eines Research Seminar im selben Jahr am MSDI präsentiert [75].

Ferner wurde auf Grundlage dieser Einsichten ein Beitrag zur sozialwissenschaftlichen Infrastrukturforschung erarbeitet, welcher die fortdauernde Adaptivität von Infrastrukturen zum Gegenstand hat [76]. Dieser Beitrag schließt an Überlegungen an, die sich im Rahmen der Exnovation bestehender Infrastrukturen und damit zusammenhängender Problemlagen stellten, so etwa Fragen des Lock-Ins sowie der inkrementellen Entwicklung von Infrastrukturen entlang von Pfadabhängigkeiten. Insofern kann die Stabilität von Infrastrukturen im Hinblick auf eventuelle zukünftige Anpassungen an veränderte Umweltbedingungen zum zentralen Hindernis erwachsen und auf diese Weise Transformationsprozesse empfindlich blockieren, sodass eine sorgsame Vorbereitung neuer Technologien in Nischen zum Erfordernis wird. Der Beitrag thematisiert daher, ob Infrastrukturen durch ein neuartiges sozio-ökonomisches Design unter Wahrung ihrer grundsätzlichen Stabilität dennoch an Wandlungskapazität gewinnen können, um sich graduell und laufend an neue Umweltbedingungen anzupassen. Dabei sind drei sozio-ökonomische Qualitäten dieser Infrastrukturen besonders entscheidend: ihre Skalierbarkeit, ihre Updatefähigkeit sowie ihre Inklusivität. Der Beitrag exemplifiziert diese Überlegungen abschließend u. a. anhand der Etablierung von DC-Systemen. An der Erstellung des Beitrags war federführend das AP2 beteiligt (siehe unten).

2.1.3 Modellierung räumlich zeitlicher Faktoren der Marktdiffusion

Das AP1.3 befasste sich mit den räumlichen und zeitlichen Faktoren der Marktdiffusion. Diese Faktoren bilden sich vor allem auf der Ebene der mechanistischen Nische-Regime-Interaktion ab. Die Stabilisierung von Technologien im sozio-ökonomischen Regime ist sehr voraussetzungsvoll, deshalb

wird diese im Modell mehrdimensional (durch die Mechanismen) abgebildet. Empirisch zeigten sich unterschiedliche Qualitäten und Strategien von Throughputs, also je spezifische Verbindungen von Input und Outcome. Für jeden Mechanismus können so unterschiedliche Stile differenziert werden. Die hiesige empirische Forschung blieb dabei auf den Bereich der DC-Systeme beschränkt, jedoch bietet das Modell entsprechende Anschlussoptionen für weitere Forschungsarbeiten von Dritten, welche die unterschiedlichen Throughputs in weiteren Feldern empirisch ausleuchten und kritisch evaluieren können.

Für das empirische Feld der DC-Anwendungen in Deutschland lässt sich eine ganz klare Differenzierung von industriellen und nicht-industriellen DC-Anwendungen veranschlagen. Diese ist in anderen Ländern weit schwächer ausgeprägt oder gar nicht erst vorhanden. Es sei daran erinnert, dass im Rahmen des hiesigen Forschungsprojektes der Auftrag bestand, ausschließlich nicht-industrielle DC-Anwendungen zu explorieren. Aus diesem Grund wurden die industriellen Anwendungen nicht in der Tiefe beforscht, jedoch aber so weit, um verlässliche Aussagen zur Relation dieser beiden Felder treffen zu können. Ferner wurde die industrielle DC-Anwendung für die hiesigen Zwecke als produktive Kontrastfolie genutzt, um auf dieser Grundlage unterschiedliche Throughput-Qualitäten identifizieren zu können. Die folgende Darstellung ist daher stark an der Differenzierung nicht-industrieller und industrieller DC-Anwendungen orientiert.

Framing: Im industriellen Kontext wurde DC von den befragten Akteuren überwiegend als effizienzsteigernde und kostensparende Technologie gerahmt. Industrievertreter betonen typischerweise geringere Energieverluste durch den Wegfall mehrfacher AC/DC-Umwandlungen sowie die Möglichkeit, Rekuperationsenergie aus Fertigungsprozessen besser nutzbar zu machen. Darüber hinaus wird auf die Reduktion des Materialeinsatzes, insbesondere von Kupfer, hingewiesen, was angesichts steigender Rohstoffpreise als zusätzlicher Vorteil wahrgenommen wird. Die empirischen Daten belegen, dass diese Argumentationslinie im industriellen Sektor weitgehend konsistent und kohärent ist und als Grundlage für die Entwicklung und Implementierung von DC-basierten Lösungen dient.

Demgegenüber ist das Framing im nicht-industriellen Bereich deutlich fragmentierter beschaffen. Zwar wird DC hier vereinzelt als nachhaltige und ressourcenschonende Technologie beschrieben, jedoch fehlen bislang überzeugende Narrative, die einen klaren Mehrwert gegenüber etablierten AC-Lösungen darstellen. Die Interviewdaten zeigen, dass der Verweis auf Nachhaltigkeit häufig strategisch eingesetzt wird, etwa um Fördermittel zu akquirieren oder das eigene Projekt im Wettbewerb um kritische Ressourcen entsprechend gut zu positionieren. In Einzelfällen werden auch soziale Aspekte wie Fairness, Komfort oder Betriebssicherheit als Argumente für DC genannt, diese Attribute bleiben jedoch eher randständig und finden bislang keine breitere Resonanz im Feld. Insgesamt lässt sich feststellen, dass Innovation in diesem Segment häufig um ihrer selbst willen als wertvoll angesehen wird, ohne dass dies zwingend mit konkreten technischen oder ökonomischen Vorteilen verbunden wäre. Die empirischen Befunde deuten darauf hin, dass im nicht-industriellen Bereich eine Vielzahl konkurrierender Framings existiert, die bislang keine starke Verknüpfung zwischen den spezifischen DC-Konfigurationen und den übergeordneten sozio-ökonomischen Problemlagen im Regime herstellen können. Damit fehlen derzeit tragfähige Bezugspunkte, die eine breitere Diffusion der Technologie im nicht-industriellen Sektor unterstützen könnten.

Exploration: In industriellen Kontexten dominiert mehrheitlich eine fit-and-conform-Strategie. Hier profitieren die Akteure von vergleichsweise günstigen Rahmenbedingungen, da industrielle DC-Anwendungen häufig „behind-the-meter“ realisiert werden können und somit weniger stark durch externe Regulierungen eingeschränkt sind. Beispielsweise können Produktionsstätten eigene Nanogrids aufbauen, ohne in erheblichem Maße auf die Zuarbeit von Netzbetreibern angewiesen zu

sein. Die Energieerzeugung und -nutzung erfolgt in der Regel innerhalb einer Organisation, was die regulatorische Komplexität reduziert und größere Freiräume für technisches Experimentieren schafft. Die empirischen Daten belegen, dass diese Konstellation die Implementierung von DC-Technologien in der Industrie erheblich erleichtert und die Innovationsdynamik in diesen Fällen insgesamt fördert.

Im nicht-industriellen Bereich gestaltet sich die Exploration deutlich schwieriger. Auch hier sind die Akteure gezwungen, ihre Projekte an die bestehenden regulatorischen Anforderungen anzupassen, jedoch können sie weit weniger autonom vorgehen. Insbesondere die Anbindung an das öffentliche Stromnetz stellt eine erhebliche Hürde dar, da Netzbetreiber hier als Gatekeeper agieren und nicht selten restriktive Vorgaben machen. Die Interviews zeigen, dass Konflikte mit Netzbetreibern, etwa hinsichtlich der Einhaltung von Messvorschriften oder der Erhebung zusätzlicher Gebühren, durchaus verbreitet sind. In Einzelfällen können diese Konflikte durch institutionelle Nähe, etwa wenn ein kommunales Unternehmen sowohl als projektinvolvierter Akteur als auch als Netzbetreiber fungiert, entschärft werden. Fehlt diese Nähe, können entsprechende Verhandlungen sich teils langwierig und diffizil gestalten.

Ein weiteres zentrales Ergebnis der empirischen Analyse ist jedoch die Anwendung subversiver Praktiken, die sich insbesondere im nicht-industriellen Bereich beobachten lassen. Einige Akteure entscheiden sich bewusst dafür, regulatorische Vorgaben zu ignorieren oder besonders weit auszulegen, um entsprechende Vorhaben zu realisieren. Dies geschieht häufig in der Hoffnung, auf diese Weise besonders nachteilige Regulierungen schlicht zu umgehen. Diese Akteure versuchen gewissermaßen, Projekte „unter dem Radar“ zu realisieren, wobei sie ein hohes Umsetzungsrisiko einzugehen gewillt sind. Ferner sind empirisch auch hybride Strategien erkennbar, bei denen DC-Technologien etwa nur teilweise implementiert oder bauliche Vorkehrungen („DC-ready“) getroffen werden, um eine spätere Nachrüstung zu ermöglichen. Diese Reaktionen demonstrieren, dass entsprechende Projekte im DC-Bereich nur zu einem gewissen Teil als geschützte Räume im Sinne der MLP gelten können. Vielmehr liegt eine deutlich reduzierte Experimentabilität vor, da der Energiebereich als besonders sensible und zugleich kritische Infrastruktur wahrgenommen wird, deren ordnungsgemäße Funktion zu jeder Zeit sichergestellt sein muss.

Standardisierung: Die empirischen Befunde zeigen, dass sich die Standardisierung im industriellen Sektor bereits auf einem vergleichsweise hohen Niveau befindet. Dies manifestiert sich unter anderem in der Durchführung groß angelegter Forschungsprojekte wie „DC Industry I“ und „DC Industry II“, die explizit auf die Entwicklung technischer Industriestandards abzielen. Aus diesen Initiativen sind branchenübergreifende Allianzen wie die „Open DC Alliance“ hervorgegangen, die sich der Standardisierung von DC-Komponenten und -Systemen widmen. Auch auf europäischer Ebene existieren mit der „Current OS Foundation“ Bestrebungen zur Entwicklung einheitlicher technischer Normen. Diese Aktivitäten konzentrieren sich jedoch fast ausschließlich auf industrielle Anwendungen, da die technischen Anforderungen (z.B. hinsichtlich Spannungsebenen) im nicht-industriellen Bereich erheblich abweichen können. Über die technische Standardisierung hinaus verfügen die Akteure im industriellen Sektor über umfangreiche Erfahrungen aus der Realisierung von Demonstrationsprojekten, was die Entwicklung von standardisierten Verfahren und Kalkulationsgrundlagen für Energie- und Kosteneinsparungen ermöglicht.

Im nicht-industriellen Bereich hingegen besteht ein eklatanter Mangel an Standardisierung in nahezu allen relevanten Domänen. Insbesondere fehlen verbindliche rechtliche Vorgaben für den Netzanschluss von DC-Systemen, was die Akteure tendenziell dazu zwingt, individuelle Lösungen (mit Netzbetreibern) zu verhandeln. Auch im Bereich der Netzplanung und des Netzbetriebs mangelt es an standardisierten DC-Komponenten in den branchenüblichen Toolboxen. In der Praxis greifen etwa Netzplaner daher häufig auf AC-Komponenten zurück, da diese schlicht und ergreifend als planbare

Komponenten verfügbar sind. Im Bauwesen fehlen darüber hinaus standardisierte Planungsmuster und Leitfäden für die Integration von DC-Technologien, sowohl im Hinblick auf die Gestaltung von Freiflächen (z.B. DC-Freileitungen, Batteriespeicher) als auch für die Innenraumplanung. Während im Neubau gewisse Potenziale für modulare Lösungen bestehen, gestaltet sich die Nachrüstung im Bestand als technisch äußerst anspruchsvoll.

Ein zentrales Ergebnis der empirischen Untersuchung ist, dass alle befragten Akteure Standardisierung als entscheidenden Hebel für die breite Diffusion von DC-Technologien betrachten. Die Frage der Standardisierung bildete den gemeinsamen Fluchtpunkt aller Interviews. Allerdings verbleibt als Koordinationsproblem bislang ungelöst, welche Akteure zu welchem Zeitpunkt welche Standardisierungen anstoßen sollten. Die derzeitige Situation wurde von nicht wenigen Interviewpartner:innen als klassisches Henne-Ei-Problem beschrieben: Ohne eine signifikante Nachfrage werden kaum Standardisierungsprozesse angestoßen, gleichzeitig hemmt das Fehlen von Standards die Entstehung einer breiteren Nachfrage und die Realisierung von Projekten.

Akzeptanz: Im industriellen Bereich ist die Akzeptanz für DC-Systeme vergleichsweise hoch, was vor allem auf die wahrgenommenen wirtschaftlichen Vorteile zurückzuführen ist. Die Befragten erkannten die Potenziale für Effizienzsteigerungen und Kosteneinsparungen an und bewerteten die Technologie daher überwiegend positiv. Im nicht-industriellen Bereich hingegen ist die Bekanntheit und Akzeptanz von DC-Technologien deutlich geringer. Häufig wird DC nicht einmal als Innovation wahrgenommen, sondern bleibt im Schatten etablierter AC-Lösungen. Die Realisierung von DC-Projekten in diesem Segment hängt in der Regel am Engagement einzelner Bauherren, die aus persönlichem Interesse oder Überzeugung auf die Technologie setzen. Die Motivation ist dabei weniger durch externe Anreize als vielmehr durch intrinsische Faktoren geprägt.

Die empirischen Daten verdeutlichen, dass für eine breitere Akzeptanz von DC-Technologien insbesondere eine überzeugende Wertkommunikation erforderlich ist. Die Interviewpartner:innen forderten eine klare Darstellung des Mehrwerts von DC gegenüber konventionellen AC-Systemen, wobei insbesondere Aspekte wie Nachhaltigkeit, Versorgungssicherheit und Resilienz gegenüber Energieknappheit und Preisschwankungen hervorgehoben werden sollten. Reine Effizienz- oder Kostenvorteile wurden als wenig überzeugend eingeschätzt. Ein weiteres Hemmnis für die Akzeptanz ist die geringe Sichtbarkeit der Technologie: Da DC-Systeme im Betrieb kaum wahrnehmbar sind und keine signifikanten Veränderungen im Alltag der Nutzer bewirken, fehlt es an anschaulichen Beispielen, die die Vorteile greifbar machen. Die empirischen Befunde legen nahe, dass Demonstrationsprojekte und gezielte Kommunikationsmaßnahmen erforderlich sind, um die Akzeptanz in nicht-industriellen Kontexten zu erhöhen. Insgesamt befindet sich die Akzeptanz von DC-Technologien in diesen Bereichen noch in einem frühen Stadium, und es sind erhebliche Anstrengungen notwendig, um bestehende Vorbehalte und Wahrnehmungsdefizite zu überwinden.

Imitation: Die Analyse der Demonstrationsprojekte machte deutlich, dass die Anzahl und Sichtbarkeit von Vorbildern je nach Anwendungsbereich stark variiert. Im industriellen Sektor existieren zahlreiche Demonstrationsprojekte, die als Referenz für weitere Implementierungen dienen können. Besonders hervorzuheben ist die „NeXT Factory“, die einen weithin sichtbaren Referenzpunkt für die Machbarkeit und den Nutzen von DC-Systemen im industriellen Maßstab bietet. Im nicht-industriellen Bereich hingegen sind entsprechende Demonstrationsprojekte bislang selten. Ein Beispiel ist das „DC Nanogrid House“ an der Purdue University, das die technische Realisierbarkeit eines teilweise DC-basierten Wohngebäudes demonstriert. Die geringe Anzahl an Vorbildern in diesem Segment erschwert jedoch die breite Diffusion und Nachahmung. Die empirischen Daten legen nahe, dass gerade durch die Orientierung an Best Practices in Form tatsächlich materialisierter DC-Systeme ein erhebliches Potenzial für die Weiterentwicklung und Diffusion von DC-Technologien besteht.

Der Mechanismus der Imitation sollte keineswegs als Endpunkt eines linearen Innovationsprozesses missverstanden werden. Vielmehr ist die Imitation bestehender Konfiguration als Motor graduell neuer Variationen zu interpretieren, da hierdurch wiederum neue Impulse in die anderen Domänen eingetragen werden, so etwa neue Explorationsbedarfe oder ein re-konfiguriertes Framing. Auf diese Weise bleibt Imitation als evolutiver Mechanismus verankert, der kontinuierlich graduelle Adaptionen anregt.

Mit dem Imitationsmechanismus sind insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Domänen angesprochen. Ein vergleichsweise präzises und kohärentes Framing kann auf diese Weise bspw. förderlich für Technikakzeptanz wirken oder Explorationen als solche zunächst einmal erst ermöglichen. Zugleich mag eine Technologie bereits weit fortgeschritten sein im Rahmen verschiedener Standardisierungsprozesse, jedoch ohne Akzeptanzbasis womöglich keine real-weltliche Exploration oder Imitation erfahren. Die Fülle möglicher Wechselwirkungen ist groß und kann in diesem Rahmen nur kursorisch gestreift werden. Der Anschluss von Folgeuntersuchungen könnte das Potenzial bislang noch nicht entdeckter Wechselwirkungen allerdings laufend weiter erschließen, weil sich diese in anderen Feldern möglicherweise auf gänzlich andere Art und Weise konfigurieren.

Abbildung 3 zeigt abschließend die empirische Analyseergebnisse und die Niche Readiness für industrielle und nicht-industrielle DC-Gebäude im Kontext Deutschland.

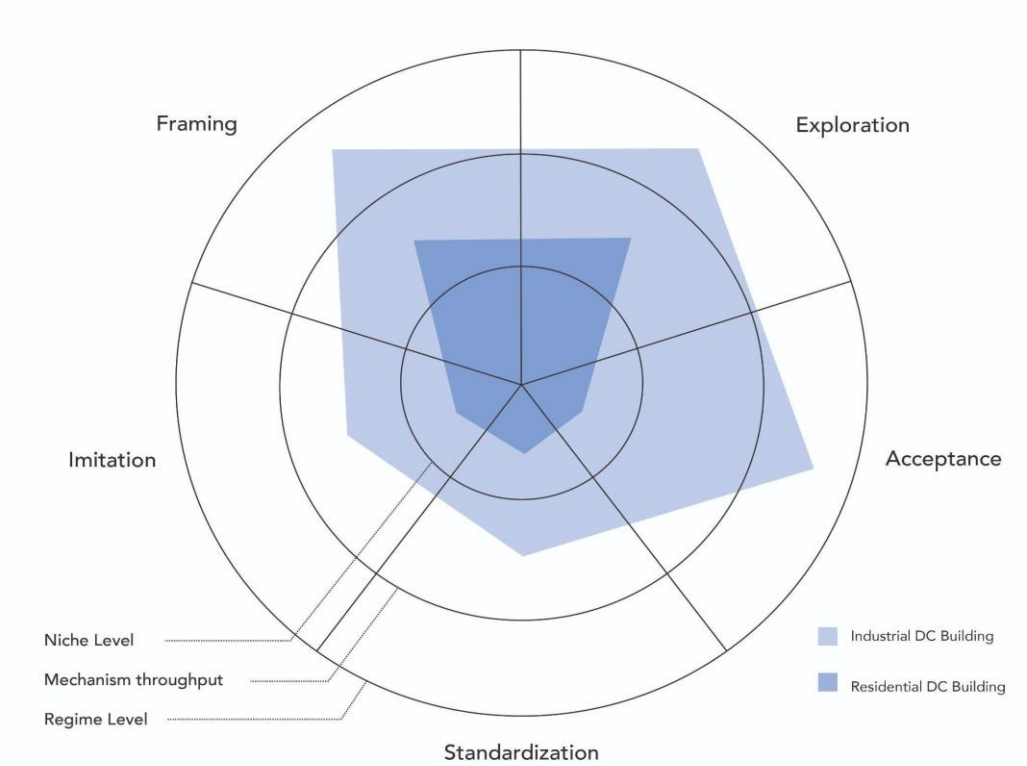


Abbildung 3: Niche Readiness-Bestimmung für industrielle und nicht-industrielle DC-Gebäude in Deutschland

Die Ergebnisse dieser Analyse wurden in verkürzter Form als Perspectives Paper im Fachjournal *Environmental Innovation & Societal Transitions* publiziert [73]. Der Fachartikel ist eine gemeinsame Forschungsarbeit unter Federführung des AP2.

2.1.4 Finalisierung Gesamtmodell

Im AP1.4 erfolgte die Finalisierung des Gesamtmodells. Zu diesem Zweck wurde insbesondere das bestehende internationale Netzwerk genutzt, um das Modell in international-vergleichender Perspektive zu verfeinern. Dies geschah konzeptionell in Abstimmung mit dem Monash Sustainability Development Institute (MSDI) und in empirischer Hinsicht durch die Zusammenarbeit mit der Canterbury University.

In konzeptioneller Hinsicht wurde gezielt der Austausch mit den Kolleg:innen des MSDI gesucht, um das Modell einer kritischen Prüfung zu unterziehen. So konnte die Argumentationslinie insgesamt robuster gestaltet werden, um das Modell vor dem Hintergrund bereits bestehender Forschungsarbeiten in diesem Bereich besonders passfähig zu gestalten.

In empirischer Hinsicht konnte durch die Zusammenarbeit mit der Canterbury University eine Datenerhebung in Neuseeland vorgenommen werden, um die Readiness von DC-Microgrids im neuseeländischen Kontext auszuloten und damit die Universalität der veranschlagten Mechanismen zu testen. Hierbei wurde die Relevanz der einzelnen Mechanismen in codierter Form gezielt abgefragt, wobei kein Mechanismus als irrelevant betrachtet wurde. Auch wurde lediglich eine einzelne Ergänzung zu den vorgeschlagenen Alternativen ins Feld geführt. Insgesamt lässt sich hieraus schließen, dass der grundsätzliche Modellkern hierdurch prinzipiell bestätigt wird, da keiner der Mechanismen als klar nicht-signifikant identifiziert wurde und das Innovationsfeld durch die präsentierten Mechanismen zugleich umfassend abgedeckt zu sein scheint. Allerdings stellt diese Form der Befragung keine repräsentative Validierung dar, die Interpretation der Daten gibt also lediglich bedingt Aufschluss über die tatsächliche Validität des Modells.

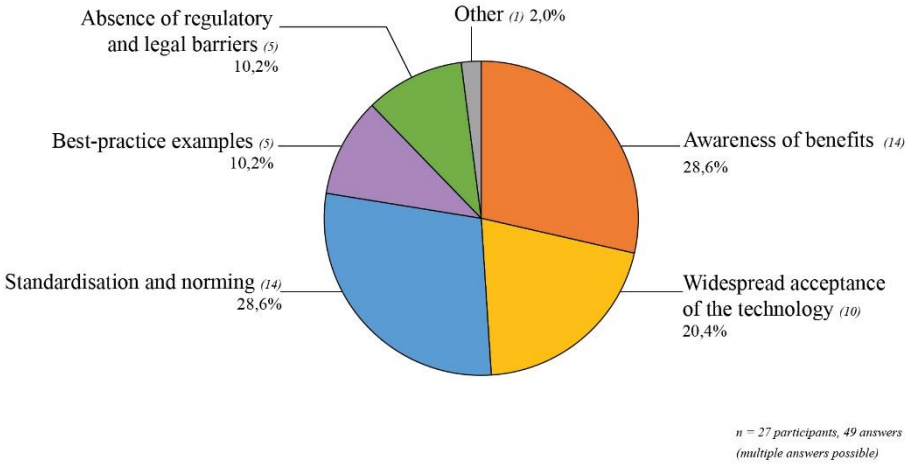


Abbildung 4: Antworten auf den Fragekomplex "Most relevant aspects for introducing innovative technologies in the participant's field." [80]

Das finalisierte Gesamtmodell ist Gegenstand eines Working Papers [77]. Eine Publikation in einem Fachjournal ist in Vorbereitung und soll nach Projektabschluss erfolgen.

2.1.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Die Integration der Teilergebnisse der jeweiligen fachspezifischen Arbeitspakete ist im Einzelnen den entsprechenden Sektionen der betreffenden Arbeitspakete zu entnehmen (siehe unten, AP2 bis AP7). Die Entwicklung des Modells wurde in vierteljährlich veranstalteten Intensivworkshops laufend konsolidiert. Teilergebnisse der unterschiedlichen Arbeitspakete konnten auf diese Weise in die

Modellentwicklung integriert werden. Ferner konnte das Konsortium Teilerkenntnisse mit dem über den Projektverlauf aufgebauten Netzwerk spiegeln. Dies betrifft zum einen die FEN-Industriepartner sowie zum anderen die Partner des internationalen Netzwerks, das über den Projektverlauf entwickelt wurde. Des Weiteren konnten die Teilergebnisse, wie oben beschrieben, zu einem gänzlich neuen Beitrag verdichtet werden, der an die sozialwissenschaftliche Infrastrukturforschung anschließt. Insofern konnte die iterative Integration der Ergebnisse zu Forschungsaktivitäten anregen, die über die Erstellung des NRL-Modells hinausgingen.

2.2 Partizipative Technikgestaltung und DC-Governance

In AP2 wurden Formen partizipativer Technikgestaltung sowie relevante Governancestrukturen für eine DC-getriebene Energiewende untersucht. Die Bearbeitung des Arbeitspaketes erfolgte durch den Lehrstuhl für Technik und Gesellschaft der RWTH Aachen. Im Zentrum des Erkenntnisinteresses stand die Frage, welche Regelungsformen hinsichtlich der beiden DC-Use Cases Gebäude und Quartiere derzeit bestehen und welche perspektivischen Entwicklungsmöglichkeiten sich vor dem Hintergrund der sozialen Perzeption und infrastrukturellen Einbettung von DC-Systemen ergeben. Das Arbeitspaket umfasste die folgend beschriebenen Arbeitsschritte.

2.2.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

AP2 ist aufgrund seiner sozialwissenschaftlichen Ausrichtung eng mit dem allgemeinen AP1 verwoben. Beide Arbeitspakete fußten konzeptionell auf Literatursträngen der Transition Studies mit besonderer Berücksichtigung der MLP und des SNM.

Ganz konkret befasste sich das AP2.1 zum einen mit dem Transfer wesentlicher konzeptioneller Ideen auf das konkrete empirische Feld. Hierzu war zunächst eine Vorarbeit erforderlich, welche sich gegenständlich mit der Entwicklung von Nischen im Energiebereich auseinandersetzte. In diesem Zusammenhang wurde eine Studie zur historisch-kontrastierenden Entwicklung von Nischen für die Onshore-Windenergie und die Photovoltaik in Deutschland angefertigt. Diese unveröffentlichte Studie diente als konzeptionelle Vorarbeit zur grundsätzlichen Verständigung über die Bestimmung von Nischen als relationale Entitäten, deren konkrete Form sich durch die Kombination endogener (bspw. Akteursnetzwerke) und exogener (Abgrenzung zum sog. Regime) Merkmale bestimmt. Anhand der gewählten Fallbeispiele wurde deutlich, wie unterschiedlich die beiden Nischen gewachsen waren und welche Komplexität sich mit der Modellierung von Niche Readiness Leveln verbindet. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den für die Onshore-Windenergie identifizierten Entwicklungsverlauf.

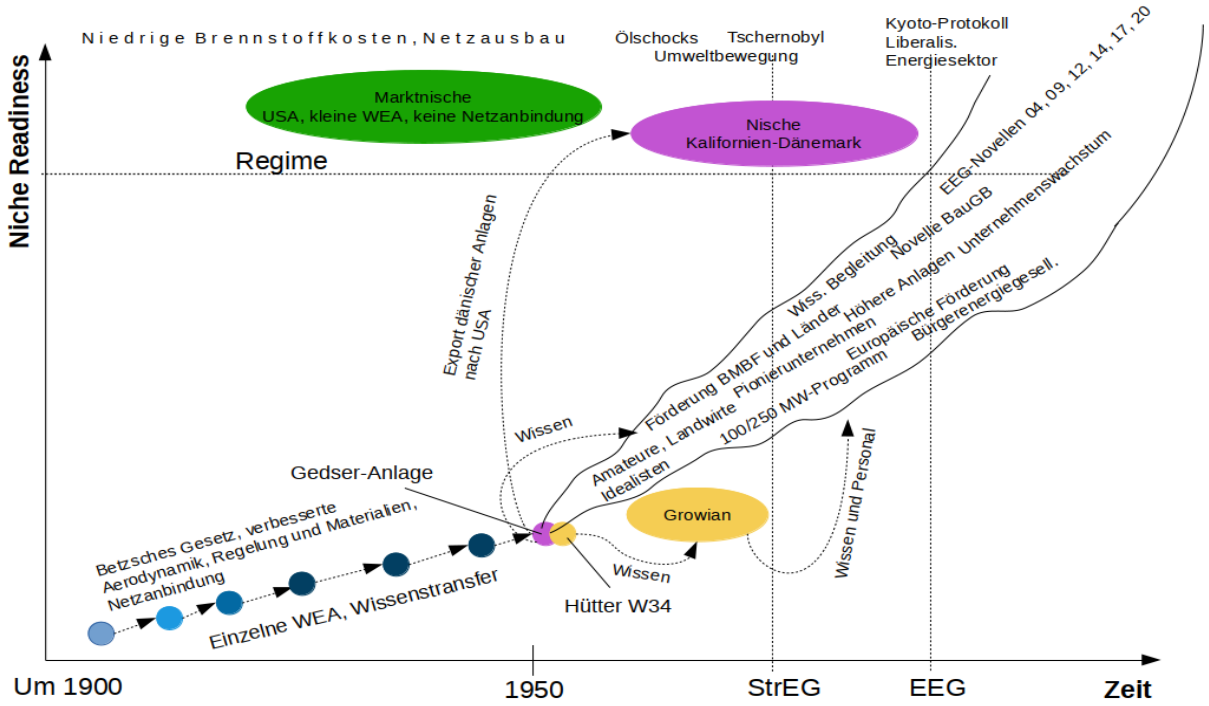


Abbildung 5: Nischenentwicklung für Onshore-Windenergieanlagen seit 1900; Quelle: [78, p. 49]

Zum anderen waren fachliche Koordinationsbedarfe zwischen den Arbeitspaketen auszuloten, um für die Bearbeitung der folgenden Teilarbeitspakete eine konzertierte Vorgehensweise zu veranschlagen. Da der konzeptionelle Begriff der Nische als Boundary Object fungiert, war das AP2 federführend daran beteiligt, die Differenz von geteiltem und vereinheitlichtem Verständnis konsortiumsintern zu koordinieren. Fachlich wurde dieses Verhältnis durch eine Masterarbeit ausgeleuchtet, die im Rahmen des AP2 angefertigt wurde [79]. Die Erkenntnisse ermöglichten einen reflexiven Umgang mit dem Nischenkonzept im Konsortium und erlaubten auf dieser Grundlage unterschiedliche Akzentuierungen des Nischenbegriffes, ohne dabei die Integrität der übergreifenden Rahmung in Frage zu stellen.

2.2.2 Empirische Analyse von Formen partizipativer Technologieentwicklung

Gegenstand des AP2.2 war die Frage der sozialen Gestaltungsfähigkeit entsprechender DC-Konfigurationen. Wie in AP2.3 beschrieben, wurde die Bearbeitung des Arbeitspaketes 2.2 bedingt durch die Corona-Pandemie zugunsten des AP2.3 nach hinten verschoben. Basierend auf den Erkenntnissen des AP2.3 sowie in Verzahnung mit dem allgemeinen AP1 wurde in diesem Arbeitspaket mit der Transformationswerkstatt ein zentrales Instrument zur Analyse partizipativer Gestaltungsprozesse entwickelt. Die Transformationswerkstätten waren Bestandteil transdisziplinärer Forschung des Arbeitspaketes, aber auch im Projektteam. Das Workshopformat war darauf ausgerichtet, gemeinsam mit Akteuren aus dem empirischen Feld DC-Lösungen zu reflektieren und zu konfigurieren. Schließlich zeigt die empirische Forschung, dass DC-Systeme ganz unterschiedliche Gestalten aufweisen, weil sie in je besonderer Weise durch lokale Randbedingungen geprägt sind. Das technische Design sowie die Imagination von „marktfähigen“ DC-Systemen fällt daher sehr unterschiedlich aus. Durch die Transformationswerkstätten konnten infrastrukturell bedeutsame Problemlagen identifiziert und vor diesem Hintergrund die Rolle sowie die Passfähigkeit unterschiedlicher DC-Konfigurationen gemeinsam erörtert werden. Es wurde hierfür mit zunehmender empirischer Erfahrung das Format angepasst und im späteren Projektverlauf ein begleitender, standardisierter Fragebogen in deutscher und englischer Sprache entwickelt. Dieser kann in das Konzept eingebunden werden, das Format ist jedoch auch ohne Fragebogen durchführbar.

Das Format wurde an verschiedenen internationalen Stationen durchgeführt, u. a. am Forschungscampus FEN in Aachen, an der Monash University in Melbourne (Australien), bei Projektierern in den Bundesstaaten Vermont und Indiana, USA, sowie an der University of Canterbury in Christchurch, Neuseeland (siehe AP2.4). Auf Grundlage der Transformationswerkstätten konnte ein international vergleichender Status quo der DC-Entwicklung erarbeitet werden. Ausgehend vom Befund einer zurzeit noch recht schwach ausgeprägten empirischen Relevanz von DC-Gebäuden und DC-Quartieren in Deutschland, gewann der Vergleich internationaler Cases im Projektverlauf erheblich an Bedeutung. In der Kontrastierung dieser Cases wird die Relevanz der sozialen Randbedingungen und kontextuellen Einbettungen besonders deutlich, denn diese DC-Konfigurationen verbinden sich in je spezifischer Weise mit bestimmten infrastrukturellen Herausforderungen und Problemlagen. Entscheidend ist also die Passfähigkeit entsprechender DC-Nischen mit den jeweils vorherrschenden infrastrukturellen Kontextbedingungen. Diese Passfähigkeit bestimmt im Wesentlichen über die konkrete Form der DC-Konfiguration. Für die unterschiedlichen Kontexte lassen sich folgende Beschreibungen veranschlagen.

DC zur Effizienzsteigerung: In Deutschland stellen sich DC-Alternativen vor allem dann als attraktiv dar, wenn Akteure diesen einen wirtschaftlichen Mehrwert beimessen. Dieser Mehrwert soll in den meisten Fällen durch Energie- oder Materialeinsparungen erzielt werden. Energie ist in Deutschland im Verhältnis zu anderen Ländern (etwa den USA) verhältnismäßig teuer. Es besteht daher großes Interesse seitens der Industrie, mittels DC-Konfigurationen entsprechende Einsparpotenzale zu heben. Für Deutschland insbesondere lässt sich zwischen DC-Anwendungen in industriellen sowie nicht-industriellen Kontexten unterscheiden. In industriellen Kontexten gewinnen DC-spezifische Mehrwerte besonderes Gewicht, da sich die Senkung von Energiekosten für (energieintensive) Unternehmen bereits in kleinerem Umfang als attraktiv darstellen können. Das Einsparpotenzial fällt umso höher aus, je mehr Rekuperationsenergie via DC-Systeme zurückgewonnen werden kann. Zudem ist häufig eine vergleichsweise simple Nachrüstbarkeit gegeben, die in nicht-industriellen Kontexten nur selten anzutreffen ist. Die Entwicklung industriell einsatzfähiger DC-Systeme ist vergleichsweise stark vorangeschritten, dabei kann Deutschland als weltweit führendes Land gesehen werden. Allerdings gibt es derzeit lediglich begrenzte Spillover-Effekte mit Blick auf nicht-industrielle Anwendungskontexte. Bedeutsam bleibt für den Fall der Bundesrepublik, dass der individuelle wirtschaftliche Begründungszusammenhang derzeit der zentrale treibende Faktor für die Implementation innovativer Technologien im Energiebereich darstellt. Volkswirtschaftliche Faktoren (wie etwa die Knappheit von Kupfer), Gesichtspunkte der Energieresilienz oder der Versorgungssicherheit spielen auf individueller Entscheidungsebene meist keine Rolle.

DC zur Resilienzsteigerung: In einigen anderen Ländern ist dagegen eher entscheidend, ob DC-Lösungen zur individuellen oder systemischen Resilienzsteigerung beitragen können. Dies ist z. B. in Neuseeland und insbesondere in den USA der Fall, wo die Energieversorgung physisch (durch oberirdische Kabelführung) äußeren Einflüssen (Schneefälle, Stürme, Überschwemmungen und Waldbrände) deutlich drastischer ausgesetzt ist, wodurch es in der Folge häufiger zu Stromausfällen kommt. Es besteht daher ein individuelles Schutzinteresse (für Privathaushalte) sowie ein systemisches Interesse des Netzbetreibers, kleinere Netzareale zu unterhalten, die in solchen Fällen weiterhin Energie bereitstellen können.

DC zur Elektrifizierung ländlicher Räume: In landwirtschaftlich geprägten Ländern mit zersiedelter Bevölkerungsstruktur gewinnen DC-Microgrids immer weiter an Bedeutung, da sich potenziell große Synergien im Zusammenspiel von PV-(Freiflächen-)Anlagen und batterieelektrischen Speichersystemen ergeben. Dies könnte als Backbone für energieschwache Siedlungen nützlich sein, die nur limitierten Zugang zu Elektrizität haben. In Industrieländern eher die Ausnahme (Neuseeland, Australien), gibt es in weniger industrialisierten Staaten einen großen Bedarf an solchen Systemen.

DC als Lösung für ad hoc-Probleme: Der exakt umgekehrte Fall liegt in der Region BeNeLux vor, insbesondere in den Niederlanden. Hier herrschen chronische Netzengpässe, sodass DC-Lösungen als alternative Netzerweiterungen in Betracht kommen. Dies ist etwa möglich durch die direkte DC-Kopplung von größer dimensionierten PV-Dachanlagen mit Batteriespeichern oder E-Ladestationen. Diese Konfigurationen binden weitere Akteursgruppen ein, vor allem Wohnungsbaugenossenschaften, die über einen großen Immobilienstock verfügen. In diesen Fällen ist DC als Netzbypass und insgesamt als Entlastung des Netzes zu sehen. Im Vordergrund steht die technische Machbarkeit des Netzanschlusses, der etwa in den Niederlanden aufgrund der dortigen Netzsituation teilweise mehrere Jahre dauern kann. Eine ähnliche Situation zeichnet sich derzeit aufgrund des zuletzt sehr dynamischen PV-Zubaus möglicherweise sehr zeitnah auch für die Bundesrepublik ab.

DC zur besseren Integration Erneuerbarer Energien: Es wird ein Mehrwert von DC-Netzstrukturen dahingehend ausgewiesen, dass eine bessere Integration Erneuerbarer Energien prinzipiell möglich sei. Dies würde netztechnische Steuerungsprobleme, die sich gegenwärtig stellten, schließlich entgegenwirken, setzt zugleich aber einen gewissen Grad der Vermaschung voraus. Konkret stellt sich in einigen infrastrukturellen Kontexten diese Argumentationslinie als bedeutsam dar, so etwa in Ländern mit einem hohen Anteil volatil einspeisender PV-Leistung, wie etwa Deutschland. Zugleich wird die Materialisierung dieses Mehrwertes typischerweise in einiger zeitlicher Entfernung gesehen. Darüber hinaus wird diese Qualität meist als systemischer Mehrwert präsentiert, der auf Verteil- oder Übertragungsnetzebene durch eine bestimmte Form der kollektiven Netzbewirtschaftung zu realisieren ist, individuelle Entscheidungen für oder gegen DC-Systeme derzeit aber eher weniger stark beeinflusst.

DC als ressourcensparende Technologie: DC sei technologisch geeignet, in größeren Mengen Kupfer einzusparen, etwa im Leitungsbau und beim Einsatz leistungselektronischer Komponenten. Die Bedeutsamkeit dieser Qualität ist allerdings stark vom jeweiligen infrastrukturellen Kontext abhängig und vor allem davon, wie groß der Netzausbaubedarf im Wege der jeweiligen Dekarbonisierungsstrategie dimensioniert ist. Das volkswirtschaftliche Einsparpotenzial kritischer Ressourcen könnte unter bestimmten Umständen in individuelle Anreize umgesetzt werden. So etwa wenn der Kupferpreis auf ein Niveau stiege, welches signifikante, also wirtschaftlich bedeutsame Vorteile beim Leitungsbau und herkömmlichen Transformatoren (dann: DC-DC-Converter) entstehen ließe.

Die konkreten infrastrukturellen Kontexte zur Anwendung von DC-Systemen bestimmen maßgeblich über die involvierten Akteursgruppen, die Art und Weise ihrer Einbindung und die tatsächlichen Möglichkeiten ihrer Mitgestaltung. Hinsichtlich einer breiteren Marktdiffusion von DC-Systemen ist wesentlich, in welche Kontexte diese Systeme eingelassen sind und inwiefern sie sich dazu eignen, bestehenden Problemlagen geeignet und zügig zu begegnen. Im Speziellen lässt sich für Deutschland festhalten, dass ein breiterer Einsatz von DC-Systemen für nicht-industriellen Gebäude und Quartiere aufgrund der derzeit vorherrschenden Gewichtung individuell-wirtschaftlicher Gesichtspunkte für die unmittelbare Zukunft nicht zu erwarten ist. Allerdings könnten veränderte regulatorische Rahmenbedingungen, wie etwa das zurzeit in politischer Verhandlung befindliche Energy Sharing-Gesetz, sowie eine höhere Priorisierung alternativer Gesichtspunkte im Lichte veränderter sektoraler Bedingungen, wie etwa das Potenzial individueller Resilienzsteigerungen vor dem Hintergrund zunehmender Starkwetterergeignisse oder Blackout-Szenarien, ggf. eine sehr rasche Innovationsdynamik zugunsten von DC-Gebäuden und -Quartieren in Gang setzen.

Anschließend an die Projektarbeiten innerhalb des AP2.2 entstand unter Federführung des AP2 ein Beitrag des Projektkonsortiums zur sozialwissenschaftlichen Infrastrukturforschung [76], der die obigen Punkte aufgreift und in einen allgemeinen Ansatz zur Entwicklung anpassungsflexibler

Infrastrukturen überführt (siehe dazu auch in AP1). In diesem Beitrag werden Skalierbarkeit, Updatefähigkeit und Inklusivität von Infrastrukturen als Schlüsseldimensionen für das dauerhafte Absichern von infrastruktureller Anpassungsflexibilität diskutiert. Diese konzeptionelle Grundlage soll im Nachfolgeprojekt FEN Living Lab Hub aufgegriffen und weiter ausgebaut werden.

Ferner entstand in Zusammenarbeit mit den neuseeländischen Kollegen der University of Canterbury ein Fachartikel, der auf der internationalen Leitkonferenz (IECON 2024) der IEEE Industrial Electronics Society in Chicago (USA) als Beitrag platziert werden konnte [80]. Die Präsentation des Beitrags erfolgte durch den neuseeländischen Forschungspartner. Dieser Beitrag thematisierte als Kontrastfolie zur Situation in Deutschland den Fortschritt von DC-Microgrid-Anwendungen in Neuseeland auf Grundlage des Niche Readiness Level Model. Zur Erarbeitung dieser Inhalte wurde im Verbund mit AP6 eine Umfrage unter neuseeländischen DC-Expert:innen realisiert. Mithilfe eines standardisierten Fragebogens konnte zudem das Niche Readiness Level Model empirisch auf Plausibilität geprüft werden (siehe AP1.4).

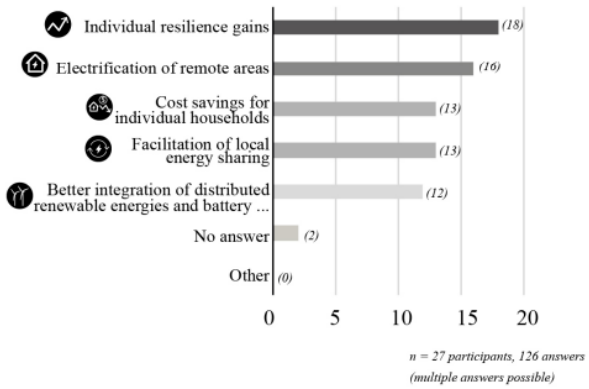


Abbildung 6: Die fünf relevantesten Qualitäten von Microgrids in Neuseeland [80]

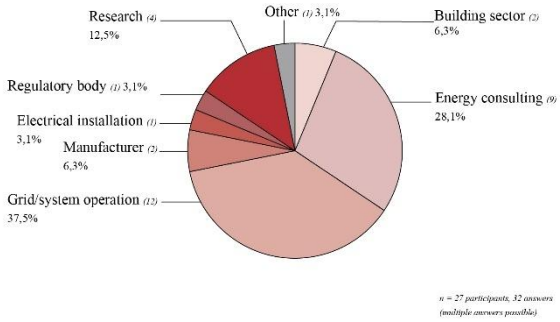


Abbildung 7: Die Zusammenstellung des Samples [80]

2.2.3 Untersuchen von Governance-Optionen für die Förderung von DC-Technologien und deren Konfiguration auf lokaler, überregionaler und nationaler Ebene

Das AP2.3 hatte zum Gegenstand, die gegenwärtige Governance von DC-Systemen zu erheben und in diesem Zusammenhang bedeutsame Kriterien herauszustellen, die mitunter zu einer Optimierung dieser Regelungszusammenhänge beitragen könnten. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte der erstmalige Feldzugang. Dieser wurde durch zwei wesentliche Rahmenbedingungen grundsätzlich geprägt. Dies ist zum einen die damalige Corona-Pandemie und zum anderen die strukturelle Knappheit wissenschaftlich verwertbarer empirischer DC-Fälle (DC-Gebäude und -Quartiere). Ersteres führte zum Vorziehen des AP2.3, da eine Durchführung von Präsenzveranstaltungen zum damaligen Zeitpunkt nicht möglich war. Zweitens führte die Knappheit empirischer Fälle zu einer partiellen Ausweitung der Untersuchung auf ausländische DC-Konfigurationen. Durch dieses komparative Vorgehen ließ sich zudem besser nachvollziehen, wie DC-Konfigurationen sozial eingebettet sind. Auf dieser Grundlage wurde eine Interviewstudie mit DC-Expert:innen durchgeführt sowie mehrere Hintergrundgespräche geführt. Das Sample umfasste schwerpunktmäßig Akteure in Deutschland, deckte jedoch auch Länder wie die Niederlande, die USA, Australien und Neuseeland ab. Aus diesen Forschungsdaten wurde ganz wesentlich das Niche Readiness Level Model gewonnen, an dessen Konzeption das AP2 aufgrund der fachlichen Nähe federführend mitwirkte. Für die Governance von DC-Systemen lassen sich im Einzelnen folgende Schlüsse ableiten.

Regulatorik: Es findet seitens gesetzlicher Regelungsstrukturen keine substanzielle Diskriminierung von DC-Systemen statt, da der Gesetzgeber im Grundsatz die Verwendung von AC-Systemen als solche nicht zwingend vorschreibt. Jedoch erwachsen etwa aus dem Energiewirtschaftsgesetz, dem Erneuerbare-Energien-Gesetz, dem Messstellenbetriebsgesetz und dem Gebäudeenergiegesetz bestimmte gesetzliche Verpflichtungen hinsichtlich zu berücksichtigender Schutz- und Messvorrichtungen. Diese sind in vielen Fällen nicht als DC-Komponenten am Markt verfügbar. Insofern ist über den Umweg der Komponentenverfügbarkeit eine de facto-Privilegierung von AC-Systemen gesetzlich fixiert. Ausnahmetatbestände für DC, etwa in Form von Experimentierklauseln, bestehen derzeit nicht. Vielmehr werden unter der gegenwärtigen gesetzlichen Regelungsstruktur innovative Betriebskonzepte, wie etwa der genossenschaftliche Betrieb eines Quartiersnetzes oder Energy Sharing-Konzepte, aufgrund des vergleichsweise hohen Aufwands einer rechtstreuen Projektumsetzung sowie damit zusammenhängender realer Umsetzungsrisiken im Allgemeinen ohnehin eher benachteiligt. DC-Projekte bleiben auf diese Weise i.d.R. an behind-the-meter-Modelle gebunden, welche der Umsetzung entsprechender Projekte typischerweise enge Grenzen setzen und bestimmte Settings als bevorzugte Implementierungspunkte verankern, so etwa Rechenzentren oder industrielle Netze. Ansatzpunkte für eine Veränderung des Regelungsgeflechts in Richtung einer Privilegierung neuartiger DC-Konfigurationen im hiesigen Sinne bietet möglicherweise die derzeit in Planung befindliche Umsetzung der Europäischen Electricity Market Design Reform III im Hinblick auf den Gesichtspunkt des Energy Sharings. Ferner könnte die strategische Nutzung von Experimentierklauseln, so etwa im Kontext von Reallaboren, die Implementation von DC-Systemen grundsätzlich erleichtern.

Anreizstrukturen: Derzeit existieren nur geringfügige Anreizstrukturen für die reale DC-Anwendung in nicht-industriellen Bereichen. Schließlich sind bspw. Projektierer und Bauherren von Quartieren grundsätzlich von der Gruppe der späteren Bewohner zu unterscheiden. Insofern besteht für diese Akteure typischerweise kein Anreiz, ein neuartiges und womöglich mit erheblichen Umsetzungsrisiken behaftetes Betriebsmittel einzusetzen. Die Implementierung von DC-Systemen im nicht-industriellen Bereich ist derzeit auch deshalb kaum vorangeschritten, weil potenzielle Vorzüge dieses technischen Designs entweder unklar sind (fehlende Erprobung und Demonstration), marginal erscheinen (Effizienzsteigerungen im einstelligen Bereich) oder DC sich für die fraglichen Akteursgruppen als gänzlich unbekannte Technologie darstellt. Diese Zusammenhänge begründen eine insgesamt unzureichende Anreizstruktur, da Interessen unterschiedlicher sozialer Gruppen (Projektierer, Eigentümer und Bewohnende) häufig nicht deckungsgleich gelagert sind und i.d.R. der Mehrwert von DC nicht klar ist bzw. nicht erkannt wird. Allerdings zeigt diese Struktur dennoch ein großes individuelles Anreizpotenzial für zukünftige Einsatzperspektiven von DC auf. So nutzten einige Akteure die relative Unbekanntheit von DC ganz gezielt strategisch, um hieraus innovatorische Erzählungen zu formieren, welche ein geplantes Vorhaben als tatsächlich neuartig erscheinen lassen, um auf diese Weise einen Vorteil bei der Zuteilung von Fördermitteln zu erreichen. Konkret wurde in mindestens einem Fall versucht, durch den Einsatz von DC an Fördermittel für die Umsetzung innovativer Vorhaben zu gelangen. Die relative Unbekanntheit dieser technologischen Lösung könnte also in gegenwärtigen Innovationsregimen in Kommunen, Ländern und im Bund also ein entsprechendes Potenzial zur Akquise von Fördermitteln bereitstellen und darin einen eigene Anreizstruktur für bestimmte Akteursgruppen begründen. Hierin liegt zugleich eine Form von Selbstreferenzialität, denn die befragten Akteure räumten ein, dass für die Begründung des DC-Systems der Charakter als Innovation an sich entscheidend war, unabhängig von den ins Feld geführten Mehrwerten, die sich damit verbanden.

Sektorstrukturen: Für den Erfolg von DC-Projekten liegt ein besonders neuralgischer Punkt in der Frage des Netzanschlusses. Netzbetreiber besetzen im gegenwärtigen Energiesektor weiterhin eine Schlüsselrolle, sie fungieren als Gatekeeper der elektrischen Versorgungsinfrastruktur. Für diese

Akteursgruppe ist typisch, dass sie in Deutschland ein eher konservatives Vorgehen veranschlagen. In den USA beispielsweise liegt eine Schwierigkeit umgekehrt in einem eher sparsamen Vorgehen dieser Akteure und daraus resultierenden schwächeren Netzstrukturen. In Deutschland hingegen bewegen sich die Netzbetreiber im regulatorischen Rahmen der sog. Anreizregulierung. Da die Netzentgelte in Deutschland derzeit via bezogener Kilowattstunde erhoben werden, besteht ein wirtschaftliches Interesse an einer möglichst hohen Durchleitungsquote in den Verteilnetzen. Da der Netzanschluss von DC-Systemen tendenziell mit einer vergleichsweise geringeren Netznutzung einhergeht, könnten Netzbetreiber durch einen breiteren Rollout solcher Systeme ihre wirtschaftliche Refinanzierungsbasis bedroht sehen. Empirisch zeigte sich dies in einem Fall im Raum Norddeutschland. Dort kam es zu einem Rechtsstreit zwischen Projektierer und Netzbetreiber, da aufgrund einer einzigen fehlenden Messstelle der Netzanschluss des gesamten Objektes verweigert wurde. Letztinstanzlich wurde zugunsten des Projektierers entschieden. Dieser Konflikt spiegelte exemplarisch und in besonderer Härte einen (zumindest stellenweise gegebenen) sektoral begründeten Interessenkonflikt wider. Empirisch lässt sich jedoch ebenso beobachten, dass durch den Modus der Verhandlung oder sogar durch Eigenmotivation des Netzbetreibers solche diffizilen Konflikte abgewendet oder gänzlich vermieden werden konnten. Für die Governance von DC-Systemen ist daher zu schlussfolgern, dass eine frühzeitige Einbindung des Netzbetreibers sowie das Aufzeigen eines bestimmten Mehrwerts (wirtschaftlicher, regelungs- oder ressourcentechnischer Natur) für den Projekterfolg i.d.R. von herausragender Bedeutung sind.

Koordinationsfragen: Für die reale und in der Breite ausgerollte DC-Anwendung ist eine Reihe unterschiedlicher Akteursgruppen erforderlich, die miteinander in einem interdependenten Verhältnis stehen. Dieser Umstand markiert eine eigenständige Barriere für die Umsetzung von DC-Projekten, da im Wesentlichen unklar ist, welche Akteursgruppe wesentliche Innovationsimpulse setzen sollte. Vielmehr zeigte sich eine wechselseitige Verweisung aufeinander, die in der empirischen Forschung seitens DC-Expert:innen vielfach als "Henne-Ei-Problem“ dargestellt wurde und daher eine individuell unzureichende Anreizstruktur weiter manifestierte. Auf diese Weise klagten Projektierer über zu wenige DC-Produkte und Verfahrensstandards oder Wissensdefizite im Umgang mit DC, Komponentenhersteller hingegen über zu wenig Nachfrage nach DC-Produkten. Beide Gruppen sahen substanzielle DC-Vorteile, die sich prinzipiell verwirklichen ließen, so etwa eine einfachere Betriebsführung (DC-Netze) oder potenziell einzusparende Ressourcen (DC-Komponenten). Zur Überwindung dieser Lücke könnten gemeinsame Verbundprojekte dienlich sein, die eine konzertierte Vorgehensweise und gemeinsames Lernen erlauben. In Deutschland gibt es im industriellen DC-Bereich eine fortgeschrittene Entwicklung in der Standardisierung, Fertigung und Anwendung von DC-Komponenten, die auf zwei entsprechende Verbundprojekte zurückgeht. Für den Bereich nicht-industrieller DC-Anwendungen lässt sich daher ableiten, dass eine Erprobung eines DC-zentrierten Vorgehens womöglich gewichtige Impulse für eine breitere DC-Anwendung setzen könnte.

Konklusion: Konklusiv lässt sich aus diesen Beobachtungen schließen, dass die derzeitige DC-Governance substanzielle Defizite aufweist, die das Ausrollen einer DC-basierten Energiewende auf absehbare Zeit eher behindern wird. Um den aufgezeigten Monita in der gegenwärtigen DC-Governance produktiv zu begegnen, zeigen sich die oben beschriebenen Einzelmaßnahmen als möglicherweise aussichtsreiche Optionen. In zusammenfassender Würdigung stellt sich als das gewichtigste Defizit der gegenwärtigen Governance eine nur *sehr eingeschränkte Experimentabilität von DC-Systemen im nicht-industriellen Bereich* dar. Daher empfiehlt sich der strategisch-gezielte Aufbau von DC-Testumgebungen, um diese Systeme in ihrer ganzheitlichen Wirkung und unter der Mitwirkung einer Reihe unterschiedlicher, für den Projekterfolg kritischer Akteure kollaborativ zu entwickeln respektive zu erproben. Eine hierfür geeignete experimentelle Umgebung stellen vor allem Reallabore dar, welche sich inzwischen als strategisch bedeutsame Elemente moderner Innovationsregime etabliert haben.

2.2.4 Faktoren der Entscheidungsstrukturen für die Niche Readiness Level und die Marktdiffusion

Das Arbeitspaket hatte zum Gegenstand, die in AP2.2. und AP2.3 gewonnenen Erkenntnisse zusammenzuführen und darauf aufbauend Entwicklungsperspektiven für DC-Systeme zu entwickeln. Aufgrund der in AP2.3 begonnenen und im Projektverlauf intensivierten komparativen Methodik, wurden diese Entwicklungsperspektiven als Kontrastfolie unterschiedlicher DC-Cases entwickelt. Ferner wurde es aufgrund der fortgeschrittenen Modellentwicklung im AP1 möglich, das Niche Readiness Level Model als heuristische Grundlage für die Bemessung von Status quo und Entwicklungsperspektiven unterschiedlicher DC-Systeme zu verwenden.

In Zusammenarbeit mit Partnern der University of Canterbury (Projekt Future Architecture of the Network) wurde, an den Beitrag auf der Fachkonferenz IECON 2024 anschließend, eine Transformationswerkstatt mit über 20 Teilnehmenden am Standort Christchurch durchgeführt. Durch diese empirischen Einblicke in die infrastrukturellen Gegebenheiten vor Ort konnte im Verbund mit den neuseeländischen Kollegen eine vergleichende Perspektive für den Use Case DC-Microgrids an unterschiedlichen Standorten entwickelt werden, die sich wie folgt gliedert:

Germany (industrial)
Case Description: DC microgrids in production facilities
Framing: Business interest focused on energy efficiency.
Exploration: Several explorations conducted.
Standardization: Ongoing standardization by business association ODCA.
Acceptance: Major industrial actors accept it for efficiency gains.
Imitation: Partially expected.
Prospects: DC factories will quickly become subject to imitation as several projects have shown feasibility and economic viability.

Germany (non-industrial)
Case Description: Grid-connected DC microgrids in urban neighborhoods
Framing: No clear framing due to varied benefits without key drivers.
Exploration: Few explorations due to lack of DSO benefits.
Standardization: Most standards currently missing (grid planning, protection, project calculation).
Acceptance: Low awareness among grid planners; major obstacle is low acceptance from DSOs.
Imitation: None identified at the moment.
Prospects: No key driver identified for DC microgrids in Germany; resilience is not currently a driver, and DSOs do not view DC as a solution for future grid management issues.

New Zealand
Case Description: Grid-connected or islanded DC microgrids in remote areas (e.g., farms, small villages)
Framing: Higher value placed on energy resilience than efficiency or monetary arguments.
Exploration: Limited explorations so far; some experience with microgrids in farming contexts.
Standardization: No significant standardization yet.
Acceptance: Little awareness among key stakeholders; positioning of DSOs is largely unclear.
Imitation: None reported so far.
Prospects: Huge potential for accelerated adoption once feasibility is demonstrated; resilience and access to electricity are prioritized over monetary values.

United States
Case Description: Grid-connected yet islandable DC microgrids in urban areas

Framing: Clear framing around adapting to changing conditions such as (planned) power outages due to severe weather events.
Exploration: Multiple explorations supported by local utilities across various states (CA, FL, NM, VT, and more).
Standardization: Development underway by EMergeAlliance and some universities; demand for standardized procedures remains high due to varying state rules.
Acceptance: Potential for high acceptance among utility companies; they are often driving actors behind these initiatives.
Imitation: Networking between projects has reached a significant stage.
Prospects: Likely to maintain legacy grid structures under changing weather events; strategic interest from utility companies to explore feasible alternatives.

In Kollaboration mit dem AP6 sowie mit den Kollegen der neuseeländischen Partneruniversität University of Canterbury ist zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ein Fachartikel in Vorbereitung.

2.2.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes wurden zu jedem Zeitpunkt eng mit der Entwicklung des übergreifenden AP1 verzahnt, nicht zuletzt aufgrund der fachlichen Nähe. Teilergebnisse wurden in die gemeinsamen vierteljährlich stattfindenden Projektworkshops auf Konsortiumsebene einbracht. Auf operativer Ebene der wissenschaftlichen Mitarbeitenden wurden die Ergebnisse in den monatlichen Treffen diskutiert. Insbesondere mit den Arbeitspaketen 6 und 7 erfolgte eine eng vermaschte Zusammenarbeit. Das AP2 war an der Durchführung einer Lehrveranstaltung des AP6 beteiligt und wirkte zudem an dem Verbundvorhaben der AP5 und 6 „Energie-Hub: Eine neue urbane Nische?“ mit. Darüber hinaus erfolgte ein regelmäßiger Austausch mit den Beteiligten der technischen FEN-Partnerprojekte im Rahmen verschiedener Themenworkshops und regelmäßig stattfindender Treffen sowie mit den Industriepartnern, so etwa im Rahmen der halbjährlichen Steering Committees. Ferner wurden die Ergebnisse auf Fachkonferenzen vorgestellt und diskutiert sowie in diversen Fachkolloquien und öffentlichkeitswirksamen Formaten vorgestellt [74], [75], [81], [82]. Im Projektverlauf konnte das AP2, größtenteils im Verbund mit AP6, ein tragfähiges DC-Netzwerk von internationaler Reichweite aufbauen, so insbesondere mit australischen, neuseeländischen, niederländischen und US-amerikanischen Akteuren. Mit der University of Canterbury konnte auf diese Weise eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen werden. Im Rahmen des Nachfolgeprojektes FEN Living Lab Hub soll an die vorliegenden Ergebnisse entsprechend angeschlossen werden.

2.3 Innovations-ökonomische Betrachtung der Marktdiffusion von DC-Technologien

Arbeitspaket 3 untersuchte die wirtschaftlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen, die die Verbreitung von Gleichstrom-Technologien (DC) in Wohngebäuden prägen. Die Verbreitung von DC-Technologien fand in einem komplexen sozio-technischen und marktwirtschaftlichen Umfeld statt, das durch Pfadabhängigkeiten und technologische Lock-in-Effekte gekennzeichnet war, die lange Zeit Wechselstrom-Infrastrukturen begünstigt hatten. Unter Berücksichtigung dieser strukturellen Beschränkungen zielte AP3 darauf ab, die wirtschaftlichen Treiber und Barrieren zu erforschen, welche die Entscheidungen von Haushalten zur Anwendung beeinflussen.

Die erhebliche Heterogenität unter den Marktakteuren stand im Mittelpunkt von AP3. Faktoren wie unterschiedliche Haushaltslastprofile, Zahlungsbereitschaft, Zugang zu Finanzierung und soziodemografische Merkmale spielen allesamt eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung von Adoptionspfaden. Durch die Berücksichtigung dieser Vielfalt zielte das Arbeitspaket darauf ab, aufzuzeigen, wie sich DC-Technologien am besten über spezifische Nischen und Nutzersegmente verbreiten lassen.

2.3.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

In diesem Teilarbeitspaket wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um eine solide Grundlage für die Analyse der Verbreitung von Gleichstromtechnologien zu schaffen. Dabei wurden die verschiedenen Interessengruppen und Marktakteure, die an der Einführung von Gleichstromsystemen beteiligt sind – darunter private Haushalte, Prosumenten, Technologieanbieter und politische Entscheidungsträger:innen – systematisch ermittelt und untersucht. In enger Zusammenarbeit mit den technischen Projektpartnern wurde zusätzliches Wissen über die technischen Merkmale, die Herausforderungen bei der Umsetzung und die möglichen Anwendungen von Gleichstromtechnologien gesammelt. Dieser interdisziplinäre Austausch stellte sicher, dass die wirtschaftliche und sozioökonomische Analyse auf einem realistischen Verständnis der verfügbaren DC-Technologielandschaft basierte.

In dieser konzeptionellen Phase wurde eine eingehende Suche und Bewertung geeigneter Analysemethoden durchgeführt. Da Gleichstromtechnologien noch nicht in großem Umfang auf dem Markt verfügbar sind, kam man im FCN-Projektteam zu dem Schluss, dass Simulationsstudien und diskrete Auswahlexperimente geeignete Analysemethoden sind. Mithilfe dieser Methoden ist es möglich, eine Reihe von hypothetischen Szenarien zu entwickeln und systematisch zu analysieren, die unterschiedliche Marktbedingungen, technologische Konfigurationen, politische Anreize und Haushaltsmerkmale widerspiegeln. Auf diese Weise bieten sie umfassende Einblicke in den potenziellen wirtschaftlichen Nutzen und die verschiedenen Möglichkeiten der Einführung von Gleichstromtechnologien in unterschiedlichen Nutzersegmenten.

2.3.2 Analyse der Nischen-Expansionsmöglichkeiten

Der Übergang von AC- zu DC-Haushaltsarchitekturen stellte eine bedeutende Möglichkeit zur Nischenerweiterung dar, insbesondere unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Anreize, welche die Einführung in verschiedenen Haushaltssegmenten vorantrieben. Um das Potenzial für die Verbreitung von DC-Technologien über die frühen Adopter hinaus zu bewerten, wurde eine umfassende Simulationsstudie mit Daten von 600 deutschen Haushalten aus zwölf repräsentativen Haushaltstypen durchgeführt. In der Studie wurden fortgeschrittene Modellierungstechniken verwendet, darunter stündliche Lastprofilsimulationen, Berechnungen der Energieerzeugung und des Verbrauchs sowie Peer-to-Peer-(P2P)-Handelsszenarien. Damit wurde die wirtschaftliche Machbarkeit von DC-Systemen unter verschiedenen Bedingungen bewertet. Durch die Analyse verschiedener Kombinationen von Photovoltaik- und Batteriegrößen, Strompreisszenarien und Haushaltsmerkmalen identifizierte die Studie Schlüsselfaktoren, die das Kostensparpotenzial von DC-Architekturen und ihre Fähigkeit zur Expansion in den Mainstream-Wohnungsmarkt beeinflussen.

Die wirtschaftliche Analyse zeigte, dass DC-Haushaltskonfigurationen im Vergleich zu herkömmlichen AC-Systemen jährliche Kosteneinsparungen von etwa 90 € für einen durchschnittlichen privaten Haushalt boten. Die Studie zeigte zudem, dass die Gesamthaushaltslast der primäre Bestimmungsfaktor für das Kostensparpotenzial ist. Dabei generierte jede zusätzliche kWh des jährlichen Verbrauchs Einsparungen in Höhe von 1,68 € ct. Dieses Ergebnis deutete darauf hin, dass Erweiterungsmöglichkeiten in Nischen besonders vielversprechend für Haushalte mit hohem Verbrauch und solche waren, die energieintensive Technologien wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge einsetzen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, erweiterte die Einführung von Peer-to-Peer-Handel die wirtschaftliche Attraktivität von DC-Systemen in der Haushaltspopulation erheblich und schuf Marktchancen, welche über die frühen Adopter hinausgehen.

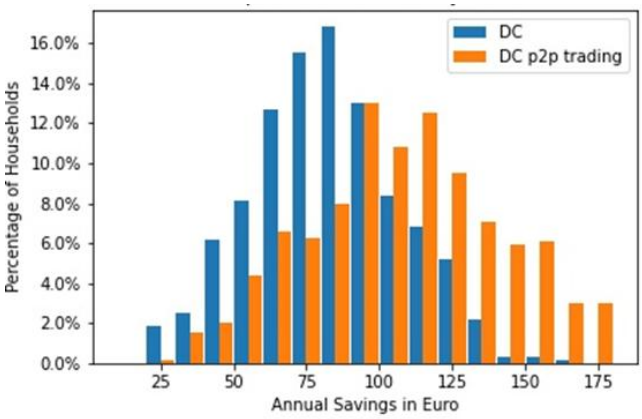


Abbildung 8: Histogramm der jährlichen Kosteneinsparungen von Haushalten mit einem DC-System, mit und ohne P2P-Handel (Optimale PV- und Batteriegröße)

Die Analyse verschiedener Haushaltstypen und ihrer Lastcharakteristika lieferte wertvolle Erkenntnisse über Möglichkeiten der Marktsegmentierung. Abbildung 9 zeigt die starke Korrelation zwischen der jährlichen Haushaltslast und dem Kostensparpotenzial. Sie demonstrierte, dass der Haushaltstyp die Einsparungen hauptsächlich durch seinen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch und weniger durch spezifische Lastmuster bestimmt. Diese Beziehung deutete darauf hin, dass die Einführung von DC-Technologien für größere Haushalte mit höherem Energiebedarf am attraktivsten war, insbesondere für Haushalte mit Kindern und Rentnerhaushalte, die typischerweise höhere Grundverbrauchswerte aufwiesen.

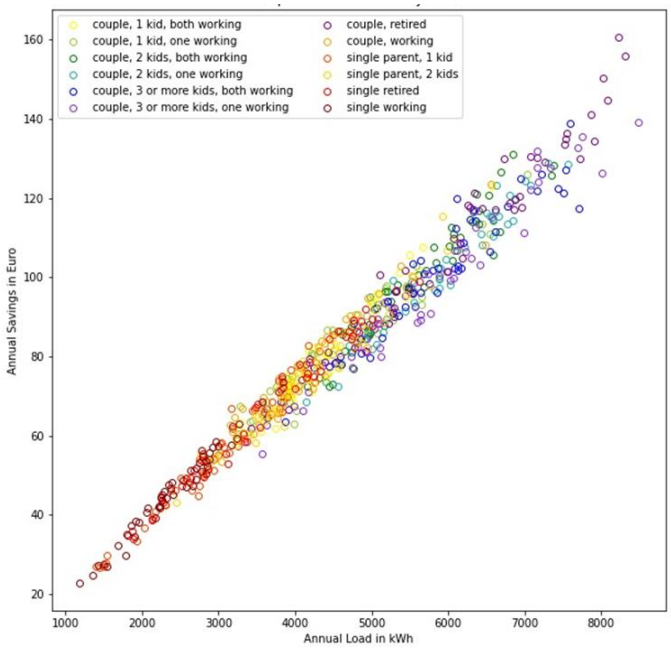


Abbildung 9: Jährliche Kosteneinsparungen durch DC-Konfiguration vs. Haushaltslasten (Optimale PV- und Batteriegröße)

Die Studie untersuchte verschiedene PV- und Batteriekonfigurationen und zeigte optimale Dimensionierungsstrategien auf, mit denen sich die wirtschaftlichen Vorteile von DC-Systemen maximieren ließen. Wie Abbildung 10 zeigt, wurden Kosteneinsparungen bei spezifischen Kombinationen von PV-Kapazität (2,5 kWp) und Batteriespeicher (10 kWh) maximiert, wobei für größere Installationen abnehmende spezifische Erträge (d.h. pro kWp bzw. kWh) beobachtet wurden.

Die Analyse zeigte außerdem, dass der Prozentsatz der DC- versus AC-Last innerhalb von Haushalten minimalen Einfluss auf die Gesamtkosteneinsparungen hatte. Dies deutete darauf hin, dass das primäre Wertversprechen in den Erzeugungs- und Speicherkomponenten und nicht in der Lastwandlungseffizienz lag.

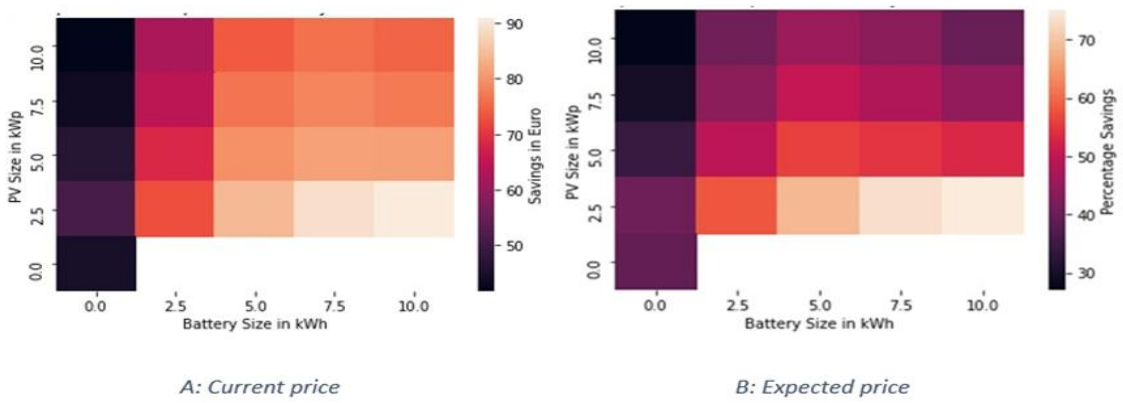


Abbildung 10: Jährliche durchschnittliche Kosteneinsparungen für verschiedene PV- und Batteriegrößen

Die Peer-to-Peer-Handelsanalyse zeigte ein erhebliches Nischenerweiterungspotenzial in Energiegemeinschaften auf. Dort konnten DC-Konfigurationen von verstärkten Effizienzgewinnen profitieren. Die Studie zeigte, dass P2P-Handelsszenarien die wirtschaftliche Attraktivität von DC-Systemen erhöhten, indem sie höhere Verkaufspreise für überschüssige Erzeugung und niedrigere Beschaffungskosten für Netzstrom ermöglichten. Diese Erkenntnis deutete darauf hin, dass die Verbreitung von DC-Technologien in Gemeinden, die lokalen Energiehandel ermöglichten, beschleunigt erfolgen konnte. Dadurch ergaben sich Möglichkeiten für eine gezielte Marktentwicklung in Gebieten mit einem förderlichen regulatorischen Rahmen, wie ihn das deutsche Direktlieferungs-System für elektrische Energie bot.

Die Preissensitivitätsanalyse zeigte, dass die Wirtschaftlichkeit von DC-Systemen sowohl von den Strompreisen als auch von den Einspeisevergütungsniveaus beeinflusst wurde. Höhere Preise begünstigten dabei generell die Anwendung von DC-Technologien. Die Studie kam jedoch zu dem Ergebnis, dass sinkende Einspeisevergütungen und eine erwartete Stabilisierung der Strompreise den wirtschaftlichen Vorteil von DC-Systemen mit der Zeit verringern konnten. Dies unterstrich die Bedeutung des Timings für den Markteintritt und politische Unterstützungsmaßnahmen.

Die Studie wurde als FCN-Arbeitspapier veröffentlicht und lieferte grundlegende Einblicke, um die wirtschaftlichen Treiber der Verbreitung der DC-Technologie auf dem Wohnungsmarkt zu verstehen.

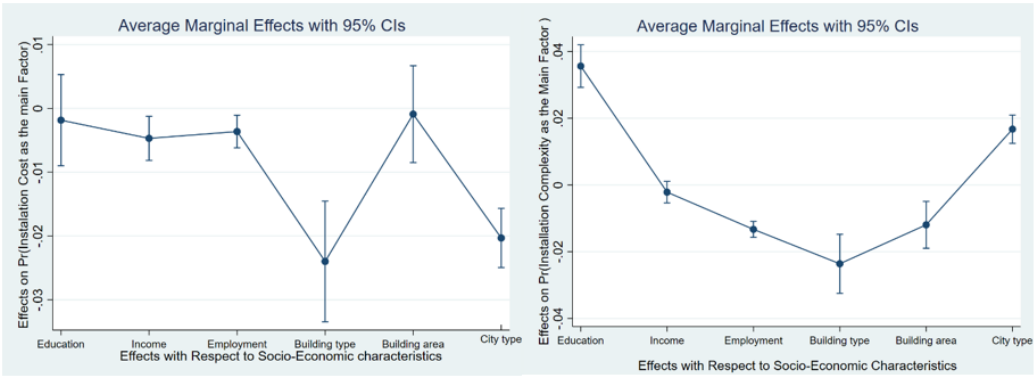
2.3.3 Analyse des Einflusses der Marktstruktur und Förderpolitiken auf die Diffusionsdynamik

Die Implementierung von DC-Technologien in Wohngebieten erforderte umfangreiche infrastrukturelle Veränderungen. Folglich beeinflussten die Investitionskosten sowie die Verfügbarkeit von Subventionen zur Deckung dieser Vorabkosten die Bereitschaft der Haushalte, die Technologie anzuwenden, erheblich. Eine Bewertung dieser Vorabkosten im Hinblick auf die potenzielle Kosteneffizienz und die langfristigen Einsparungen, die DC-Systeme bieten konnten, lieferte wertvolle Einblicke in die Auswirkungen dieser wirtschaftlichen Überlegungen auf die Anwendungsentscheidungen von Haushalten und somit auf die Verbreitung von DC-Technologien im Wohnungssektor. Um diese Dynamik zu erforschen, wurde eine empirische Studie mit Daten einer repräsentativen Stichprobe von 2.784 deutschen Haushalten durchgeführt. Die Befragung untersuchte

umfassend die Schlüsselfaktoren für die Anwendung von DC-Technologien, mit Fokus auf Nutzercharakteristika, die Effizienz von DC-Technologien sowie die Kompatibilität und Komplexität von DC-Systemen. Mithilfe einer Mixed-Logit-Modellierung, multinomialer logistischer Regression und Analyse der marginalen Effekte identifizierte die Studie die Schlüsselfaktoren, welche die Haushaltsadoption von hybriden AC/DC-Netzen beeinflussten. Die Ergebnisse zeigten, dass kostenbezogene Faktoren die primären Treiber von Anwendungsentscheidungen waren. Während die allgemeine Bevölkerung niedrigere anfängliche Investitionskosten priorisierte, legten Energie-Prosumer und E-Auto-Besitzer größeren Wert auf langfristige Energieeinsparungen. Dies unterstrich die Notwendigkeit spezifischer Anreize für verschiedene Bevölkerungsgruppen. Die Studie zeigte außerdem, dass Haushalte typischerweise eine maximale Amortisationsdauer von elf Jahren akzeptierten, wenn sie darüber entscheiden, ob sie in ein hybrides AC/DC-Heimnetz investieren sollten.

Bei der sozio-demografischen Analyse wurden sechs sozioökonomische Faktoren berücksichtigt: Bildungsniveau, Jahreseinkommen, Beschäftigungsstatus, Art des Wohngebäudes, Fläche des Wohngebäudes und Art der Metropolregion. Mithilfe der Antworten zu drei von den Befragten zu beurteilenden Themenfeldern wurde die sozioökonomische Bewertung der Stichprobe durchgeführt.

Bei der ersten Frage zu den Hauptbarrieren für die Einführung eines hybriden AC/DC-Heimnetzes wurden die Installationskosten und die Installationskomplexität von 49,5 % bzw. 31 % der Befragten als primäre Bedenken ausgewählt. Wie Abbildung 11 zeigt, spielte der Wohnungstyp eine bedeutende Rolle, wobei Mehrfamilienhaushalte unterschiedliche Präferenzen aufwiesen. Abbildung 11 (b) zeigt außerdem, dass Personen mit höherer Bildung und solche, die in größeren Städten lebten, stärkere Bedenken bezüglich der Installationskomplexität äußerten. Dies deutete auf eine potenzielle Bewusstseinslücke bezüglich DC-Technologien selbst unter Verbrauchern hin, die typischerweise zur Gruppe der frühen Adopter gehörten.



(a) Marginal effects of socio-economic characteristics on considering initial installation cost important

(b) Marginal effects of socio-economic characteristics on considering installation complexity important

Abbildung 11: Sozioökonomische Einflüsse auf Hauptbedenken bei der DC-Technologie-Adoption

Beim zweiten Themenfeld sollten die Befragten den aus ihrer Sicht ansprechendsten Vorteil eines hybriden AC/DC-Netzes aus einer bereitgestellten Liste auswählen. Zur Auswahl standen: Unabhängigkeit vom Netz, geringere Anforderungen an die Verkabelung, längere Lebensdauern elektronischer Geräte, reduzierte Umweltauswirkungen von Energie und verbesserte Effizienz beim E-Auto-Laden. Die Ergebnisse zeigten, dass die erhöhte Lebensdauer elektronischer Geräte am häufigsten ausgewählt wurde (30 % der Befragten wählten diese Option als erste Wahl), dicht gefolgt

von der verbesserten Effizienz beim Laden von E-Autos (28 % der Befragten wählten diese Option als erste Wahl). Die sozioökonomische Analyse dieser Frage, die in Abbildung 12 dargestellt ist, zeigte, dass die Art des Wohngebäudes den größten positiven Einfluss auf die Priorisierung der Gerätehaltbarkeit hatte. Diese Einblicke deuteten darauf hin, dass DC-Technologien eine starke Marktnische etablieren konnten, wenn ihre Hauptvorteile effektiv demonstriert und potenziellen Nutzern entsprechend kommuniziert wurden.

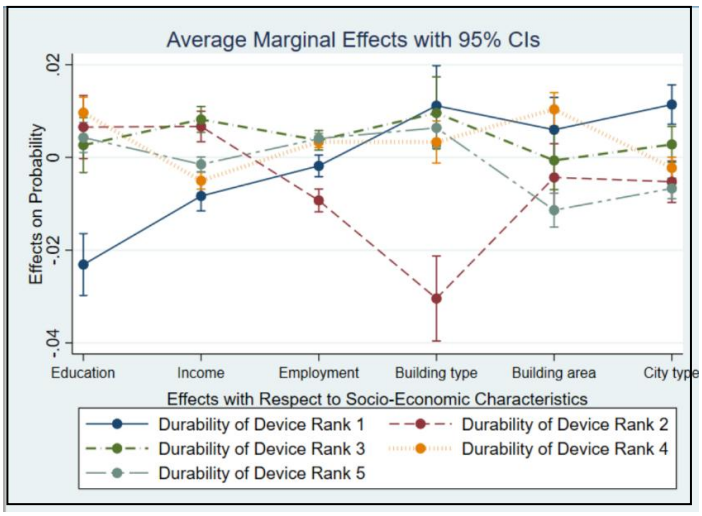


Abbildung 12: Sozioökonomische Merkmale und Berücksichtigung der Erhöhung der Gerätehaltbarkeit

Beim dritten Themenfeld wurden potenzielle Geschäftsmodelle bewertete und die Haushaltsentscheidungsfindung bezüglich eines Angebots untersucht, das ein Solarpanelsystem, eine DC-Verkabelung und eine vergünstigte Heim-Auto-Ladestation in einem Paket kombiniert. Insgesamt berichteten etwa 52 % der Befragten, dass sie entweder sehr oder zumindest ein wenig interessiert an

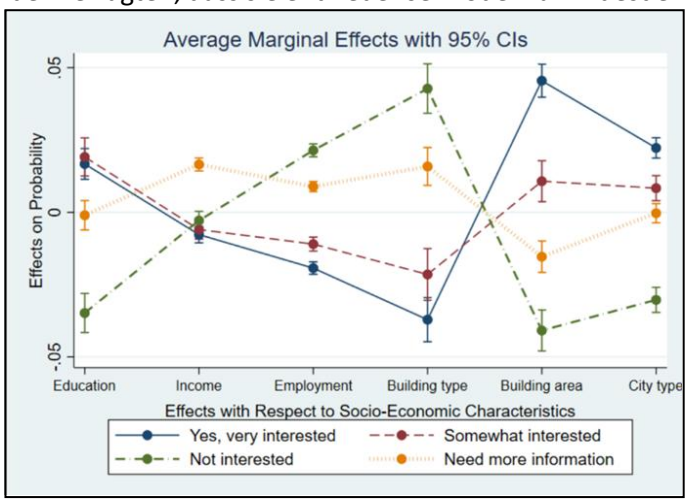


Abbildung 13: Sozioökonomische Merkmale und Interesse an dem Angebot

diesem Angebot waren. Wie in Abbildung 13 dargestellt, zeigte die sozioökonomische Analyse, dass die Fläche des Wohngebäudes den stärksten positiven Effekt auf Haushalte hatte, die sehr an dem Angebot interessiert waren. Die Art des Wohngebäudes hatte dagegen den negativsten Effekt: Haushalte, die in Mehrfamilienhäusern lebten, akzeptierten das Angebot weniger wahrscheinlich.

Diese Studie wurde als FCN-Arbeitspapier veröffentlicht [83] und eine aktualisierte Version davon wird derzeit in einer Fachzeitschrift begutachtet.

2.3.4 Vergleichende Analyse sequentieller Ausbaustrategien (incl. Überdimensionierung wachsender Systeme; optimale Kapazitätsplanung und -auslastung)

Unter Berücksichtigung der bestehenden Monopol- und Lock-in-Bedingungen auf dem AC-Technologiemarkt konzentrierte sich Arbeitspaket 3.4 auf die Heterogenität von Kundenpräferenzen und untersuchte die Bedingungen, unter denen eine Koexistenz von AC- und DC-Technologien möglich sein könnte. Mithilfe agentenbasierter Modellierung wurden sequenzielle Expansionspfade untersucht, welche die Anwendung von DC-Technologien in spezifischen Marktnischen ermöglichen konnten.

Aufbauend auf dem theoretischen Rahmen von Arthur [84] sowie den Erweiterungen von Bassanini und Dosi [85] wurden drei verschiedene Agententypen näher betrachtet: private Haushalte, öffentliche Gebäudebetreiber und Betreiber von Industriegebäuden. Jeder Agententyp zeigte unterschiedliche Präferenzstrukturen in Bezug auf fünf Schlüsselattribute des Stromsystems: Stromkosten, Wartungskosten, Zuverlässigkeit, Autonomie und Umweltauswirkungen. Das Modell berücksichtigte agentenspezifische Auszahlungsfunktionen, die heterogene Präferenzen und variierende, steigende Grenzerträge bei der Anwendung von DC-Technologien abbildeten. Das Rahmenwerk des Modellierungsansatzes war in Abbildung 14 dargestellt.

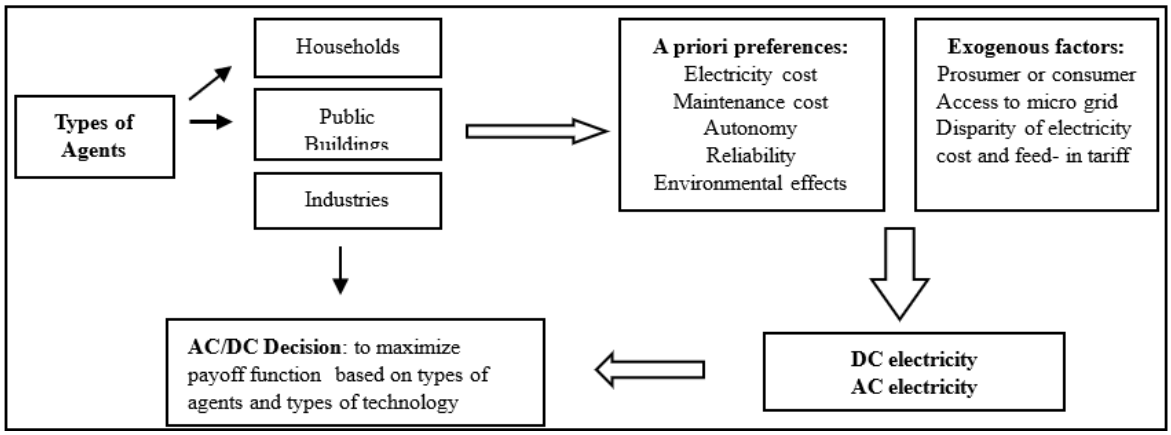


Abbildung 14: Rahmenwerk des Modellierungsansatzes

Das vorläufige Rahmenkonzept identifizierte eine erhebliche Heterogenität der Präferenzen zwischen den Marktsegmenten. Während Haushalte Kostenüberlegungen priorisierten, betonten Betreiber öffentlicher Gebäude aufgrund regulatorischer Anforderungen Umweltauswirkungen. Industriegebäude-Betreiber konzentrierten sich wiederum auf Zuverlässigkeit und Autonomie als operative Notwendigkeiten. Diese Heterogenität deutete auf potenzielle Pfade für die Koexistenz von DC-Technologien mit etablierten AC-Systemen hin, insbesondere in spezialisierten Marktnischen. In die Analyse flossen auch drei exogene Faktoren ein, die Anwendungsentscheidungen beeinflussten: Verbraucher- versus Prosumer-Status, Mikronetz-Verfügbarkeit und die Differenz zwischen Strompreisen und Einspeisevergütung. Diese Faktoren schufen differenzierte wirtschaftliche Anreize, die DC-Konfigurationen unter spezifischen Bedingungen begünstigen konnten – insbesondere für Prosumer mit Solarerzeugungskapazitäten und Zugang zu lokaler Mikronetz-Infrastruktur.

Erste Modellierungsergebnisse zeigten, dass sequenzielle Expansionsstrategien, die auf spezifische Marktsegmente abzielten, eine Verbreitung der DC-Technologie ohne direkte Konkurrenz mit dem etablierten AC-Monopol ermöglichen konnten. Als potenziell lebensfähige anfängliche Nischen erwiesen sich industrielle Anwendungen, die Zuverlässigkeit und Autonomie priorisierten, gefolgt von Prosumer-Gemeinschaften und Betreibern von öffentlichen Gebäuden, deren Handeln von Umweltmandaten getrieben war. Die vollständige Analyse und die Ergebnisse dieser agentenbasierten Modellierungsstudie befanden sich noch in der Fertigstellungsphase und sollen in einem weiteren Arbeitspapier im Detail noch zeitnah veröffentlicht werden. Die Ergebnisse werden zum besseren Verständnis der Bedingungen für die Koexistenz von Technologien beitragen und die Entwicklung gezielter Markteintrittsstrategien für DC-Technologien in Wohn- und Gewerbeanwendungen unterstützen.

2.3.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Das für Arbeitspaket 3 verantwortliche FCN Projektteam beteiligte sich aktiv an saisonalen Workshops und regelmäßigen Treffen innerhalb des Projektkonsortiums. Es setzte sich kritisch mit dem Niche Readiness Modell auseinander, insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht. Durch die Diskussionen und das Feedback von AP3 wurde sichergestellt, dass die wirtschaftliche Dimension in die Entwicklung eines umfassenden Niche Readiness Modells integriert wurde. Der Beitrag von FCN zu diesen gemeinsamen Bemühungen trug letztlich dazu bei, das Modell zu formen, das als gemeinsames FCN-Arbeitspapier [72] und Zeitschriftenartikel [86] veröffentlicht wurde.

Die Diskussionen über das Modell wurden durch die aktive Teilnahme an der FEN-Studienreise nach Ozeanien darüber hinaus weiter bereichert. Expertenworkshops und Besuche am Monash Sustainable Development Institute (Monash University, Melbourne/AUS), an der University of Canterbury (Christchurch/NZ) und an der University of Technology Sydney (UTS, Sydney, AUS) lieferten wertvolle Perspektiven und verstärkten somit die Anwendbarkeit und Robustheit des Modells.

2.4 Arbeitsorganisatorische Gestaltung agiler Technologie- und Nischenentwicklungsprozesse für DC-Technologien

In Arbeitspaket 4 (AP4) wurde unter der Verantwortung der Forschungsabteilung „Arbeitsorganisation“ des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAW) die arbeitsorganisatorische Gestaltung einer agil-integrierten Technologie- und Nischenentwicklung für DC-Technologien untersucht. Im Fokus standen prozessuale und strukturelle Gestaltungsdimensionen und ihre Wirkung auf den Projekt- und Diffusionserfolg. Ziel des AP4 war es, ein Referenzmodell für die erfolgreiche Gestaltung kooperativer, agiler Prozesse und Strukturen zu erarbeiten und zu evaluieren. Zur Untersuchung der spezifischen Forschungsfragen wurden qualitative und quantitative Forschungsmethoden eingesetzt (Mixed-Method-Ansatz). Die im Vorhaben durchgeführten Untersuchungen lieferten die empirische Basis für ein Promotionsvorhaben (s.[87]).

2.4.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

Das Unterarbeitspaket 4.1 beinhaltete die Mitwirkung an der Entwicklung und Abstimmung des übergeordneten Gesamtkonzepts (Niche Readiness Model) und des gemeinsamen Erhebungsansatzes im Projekt (s. Ausführungen zu AP1 in Kapitel 2.1). Der spezifische Beitrag des IAW bestand insbesondere darin, arbeitsorganisatorische Anforderungen an eine agil-integrierte Technologie- und Nischenentwicklung von DC-Technologien einzubringen. Hierzu wurden Literaturanalysen zu verschiedenen Teilaspekten durchgeführt. Eine systematische Literaturrecherche und -analyse konzentrierte sich auf die Identifizierung relevanter struktureller und prozessbezogener

Gestaltungsfaktoren in agilen, kooperativen Entwicklungsprojekten. Hierbei erwies sich eine Strukturierung der Ergebnisse entlang der vier organisationalen Dimensionen *Unternehmen*, *Teamprozess*, *Teamstruktur* und *Individuum* als zielführend. Die Ergebnisse der Literaturanalyse sowie einer anschließenden Evaluation durch Projektmanagerinnen und -manager (n = 260) konnten auf der IEEM 2020-Konferenz publiziert und präsentiert werden (s.[88]). Des Weiteren wurden bereits etablierte Ansätze und Prinzipien aus der (agilen) integrierten Produkt- bzw. Technologieentwicklung (v. a. Phasen- und Reifegradmodelle) recherchiert und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den Untersuchungskontext analysiert [89].

2.4.2 Analyse und Modellierung von IST-Prozessen und -Strukturen

Mit dem Ziel, die relevanten Akteure und Phasen energietechnologischer Nischenprojekte zu identifizieren, wurde eine Interviewstudie mit Beteiligten an laufenden oder bereits abgeschlossenen (Pilot-)Projekten und Reallaboren geplant und durchgeführt. Der entwickelte Interviewleitfaden umfasste neben Angaben zum fachlichen Hintergrund u. a. eine kurze Charakterisierung des betrachteten Nischenprojektes. Die Befragten wurden anschließend gebeten, den Projektverlauf chronologisch zu beschreiben und im Hinblick auf die beteiligten Akteure zu reflektieren. Von 78 kontaktierten Personen erklärten sich zwölf Expertinnen und Experten bereit, an den Interviews teilzunehmen. Alle Befragten verfügten über ein abgeschlossenes Hochschulstudium. Zu den durch die Teilnehmenden vertretenen Organisationen gehörten vier Forschungseinrichtungen, drei produzierende Industrieunternehmen, drei Energieversorgungsunternehmen (europäisch und kommunal), ein Wirtschaftsförderer und ein Projektplanungsunternehmen (Ingenieurbüro). Gegenstand der analysierten Projekte waren energietechnologische Innovationen auf den Gebieten *Photovoltaik*, *Windkraft*, *Batteriespeichersysteme*, *Methanisierung* und *Wasserstoff*. Die Interviews dauerten durchschnittlich 45 Minuten und wurden im Rahmen einer am IAW betreuten Masterarbeit geführt, transkribiert und (erstmalig) inhaltsanalytisch ausgewertet [89]. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden relevante Analyseschritte durch einen weiteren Wissenschaftler wiederholt.

Als Ergebnis entstand u. a. eine Akteurskarte, die einen strukturierten Überblick über die zahlreichen Akteure liefert, die in energietechnologischen Nischenprojekten eine Rolle spielen (s. Abbildung 15). Die aus den Interviews extrahierten Akteure lassen sich sechs Akteursgruppen zuordnen: 1. Energiewirtschaft, 2. Gesellschaft, 3. Politik/Verwaltung/Behörden, 4. Kunden, 5. Industrie und 6. Wissenschaft. Eine ausführliche Darstellung des Vorgehens und der Stichprobe findet sich in [90]

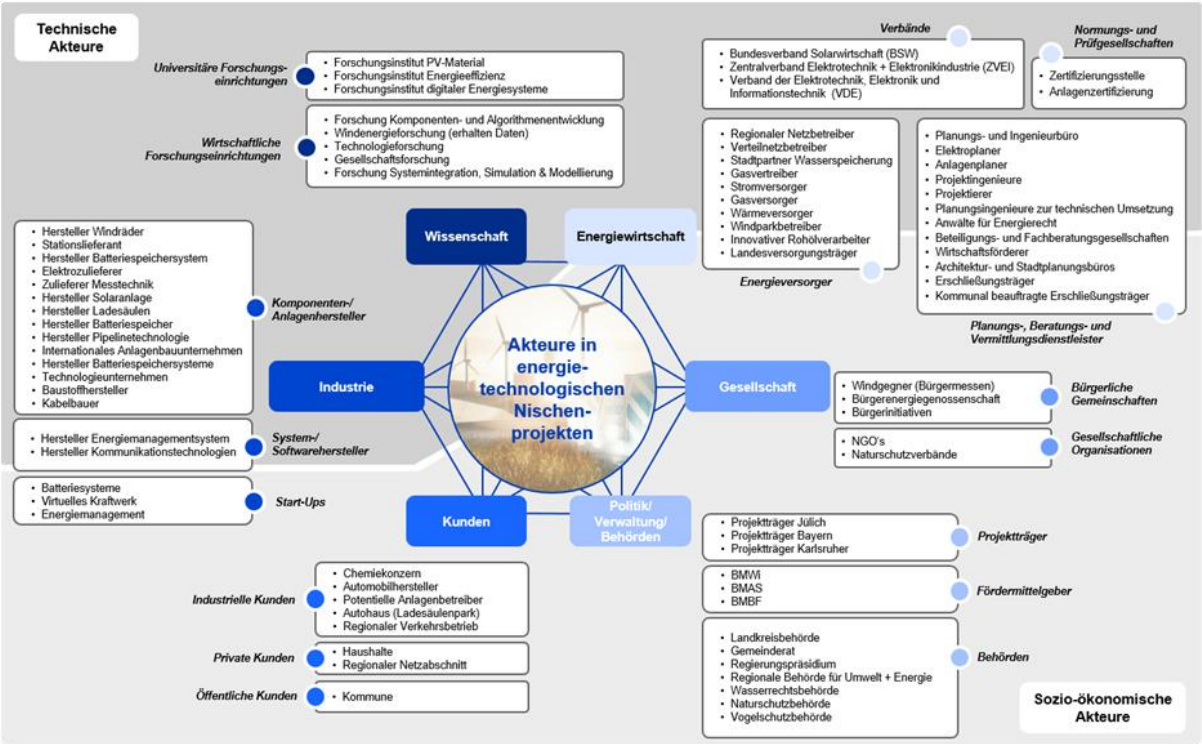


Abbildung 15: Akteure in energietechnologischen Nischenprojekten (modifizierte Darstellung in Anlehnung an [89]; entnommen aus [90, p. 7])

Neben strukturellen Gegebenheiten lieferte die Studie auch Ergebnisse zu den bestehenden Prozessen. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die von den Befragten berichteten Phasen, die zwar sehr unterschiedlich benannt wurden, inhaltlich aber z. T. große Ähnlichkeiten aufwiesen. Insgesamt konnten neun Phasen identifiziert und differenziert werden (s. Legende in Abbildung 16, a bis i; j = sonstige Phasen).

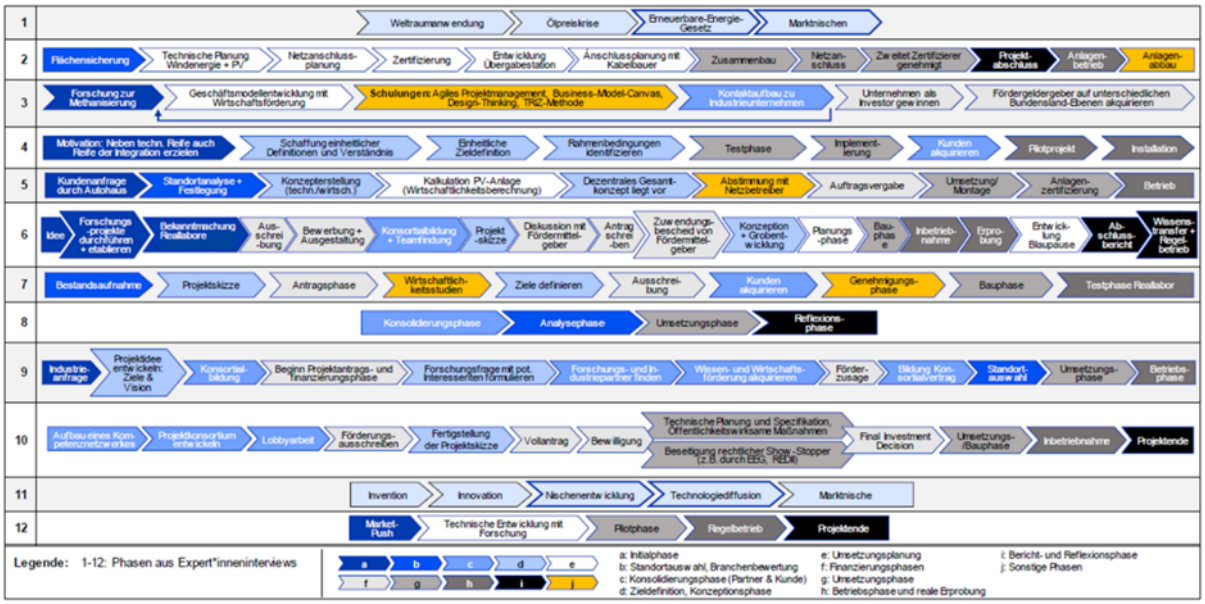


Abbildung 16: : Phasen in energietechnologischen Nischenprojekten (modifiziert entnommen aus [89, p. 86])

2.4.3 Empirische Untersuchung der Auswirkungen agil-integrierter Prozesse und Strukturen auf den Diffusionserfolg

Während die erste Interviewstudie (AP4.2) vorrangig der Exploration von Nischenentwicklungsprozessen diente, zielte eine zweite Interviewstudie darauf ab, organisatorische Gestaltungsfaktoren zu identifizieren, die die erfolgreiche, agile Entwicklung sowie die anschließende Diffusion von Energietechnologien begünstigen. Die Studie lieferte zusammen mit den Literaturanalysen (AP4.1) wesentliche Grundlagen für die Konzeption und Operationalisierung des zu entwickelnden Referenzmodells (s. AP4.4). Die Interviewstudie wurde deutschsprachig als extended Abstract beim *Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft 2023* (s. [91]) und englischsprachig im *Journal of Innovation and Technology Management* (IJITM) (s.[92]) veröffentlicht. Ausführliche Darstellungen des methodischen Vorgehens, der Stichprobe und der Ergebnisse finden sich in [92] und werden im Folgenden mit Bezug auf diese Publikation verkürzt berichtet: Mittels eines teilstrukturierten Interviewleitfadens wurden insgesamt 28 Expertinnen und Experten auf dem Gebiet der Energietechnik (mit besonderem Schwerpunkt auf neuen nachhaltigen Anwendungen, Lösungen oder Produkten) befragt. Alle Befragten nahmen relevante betriebliche Positionen bei der Entwicklung neuer Energietechnologien (u. a. DC-Technologien) ein und verfügten über eine technische Ausbildung (27 mit abgeschlossenem Hochschulstudium) sowie über ausreichende Kenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Agilität. Die Interviews dauerten zwischen 45 und 60 Minuten und hatten einen explorativen Charakter. Der Leitfaden umfasste u. a. Fragen, die darauf abzielten, die Konstrukte Technologieentwicklungs- und Technologiediffusionserfolg aus Expertensicht zu definieren sowie agilitätsförderliche Faktoren auf den vier organisationalen Ebenen vor dem Zielbild einer integrierten Technologieentwicklung und -diffusion herauszuarbeiten [92].

Als Herausforderungen in der Technologieentwicklung wurden z. B. unsichere Entwicklungsanforderungen und Anwendungskontexte, fehlende Standards, Normen und Regulatorien, Unsicherheit in Bezug auf das Vorgehen im Projekt sowie unternehmensinterne Barrieren (z. B. limitierte Budgets) angeführt. Der Entwicklungserfolg in der Technologieentwicklung wird aus Sicht der Befragten insbesondere über das Einhalten der Zielgrößen Qualität, Zeit und Kosten sowie eine effiziente und effektive Projektdurchführung bemessen. Den Diffusionserfolg einer neuen Technologie machen die Befragten nicht nur an ökonomischen Kennwerten (z. B. finanzielle Profitabilität, ROI, Marktanteil), sondern auch an der Erlangung neuer Problemlösungskompetenz, technischen Leistungs- und Qualitätsverbesserungen sowie erzielter Aufmerksamkeit für die wissenschaftlichen Ergebnisse und Erkenntnisse fest. Agilität kann den Expertinnen und Experten zufolge dazu beitragen, die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen zu erhöhen, das Management unsicherer Anforderungen zu verbessern und einen schnelleren Erwerb von Wissen und Kompetenzen (durch kontinuierliches Re-Engineering) zu ermöglichen. Um dies zu erreichen, sehen die Befragten einen agilitätsförderlichen Beitrag in zahlreichen organisationalen Gestaltungsfaktoren. Die am häufigsten genannten Faktoren je organisationaler Dimension sind nachfolgend aufgelistet:

- Unternehmensebene: u. a. Vertrauen, Handlungsspielraum, verfügbare Ressourcen, Infrastruktur;
- Teamprozessebene: u. a. Entwicklungsarbeit in kurzen definierten Zeitsegmenten (Iterationen), systematische Planung von Arbeitsphasen, kontinuierliches (externes) Feedback;
- Teamstrukturebene: u. a. interdisziplinäre und cross-funktionale Teamzusammensetzung, flache Hierarchien, gemeinsame Werte, einheitliches Zielverständnis;

- Individualebene: u. a. agilitätsförderliche Fähigkeiten und Eigenschaften der Beteiligten wie bspw. Kommunikationsfähigkeit, Lernbereitschaft, Neugierde, Offenheit und die Fähigkeit zum Umgang mit Veränderungen. [92]

2.4.4 Entwicklung und Evaluation eines Referenzprozessmodells für die integrierte Technologie- und Nischenentwicklung

AP4.4 hatte zum Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse zu Zusammenhängen zwischen agil-integrierten, kooperativen Prozessen und Strukturen und dem Diffusionserfolg in ein Referenzprozessmodell mit allgemeiner Gültigkeit für verschiedene spezifische DC-Anwendungsfälle zu überführen.

Referenzmodelle sind u. a. in der Wirtschaftsinformatik zur Beschreibung von Informationssystemen verbreitet. Im Unterschied zu unternehmens- oder projektspezifischen Informationsmodellen handelt es sich um generische Modelle, die eine (größere) Klasse von Anwendungsfällen repräsentieren und für die Gestaltung von spezifischen Individualmodellen Empfehlungscharakter besitzen (vgl.[93]).

Auf der Basis der qualitativen Vorstudien wurde zunächst ein theoretisch-konzeptionelles Untersuchungsmodell entwickelt, in dem die relevanten Untersuchungsgrößen miteinander in Beziehung gesetzt wurden. Aus betriebs- und arbeitsorganisatorischer Sicht können Nischen unterschiedlich organisiert sein. Wie sich in der ersten Interviewstudie gezeigt hat, findet die Entwicklung innovativer Energietechnologien typischerweise in Pilot-Projekten oder Reallaboren mit Projektcharakter statt. Da es sich hierbei um teambasierte Kooperationsprozesse handelt, wurde bei der Konzeption eine in der Teamforschung verbreitete, empirisch evaluierte (Referenz-)Modellstruktur aufgegriffen: In einem sogenannten Input-Prozess-Output-Modell werden Input-Variablen mit Variablen des Teamprozesses und abhängigen Output-Variablen (z. B. Projekterfolg) in Beziehung gesetzt (s. z. B. [36], [94], [95], [96]). Für verschiedene Anwendungskontexte konnte die Prozessvariable „Qualität der Zusammenarbeit“ als Mediator zwischen Input und Output empirisch nachgewiesen werden, z. B. für den Produktionskontext von Latos [97]und die Softwareentwicklung von Högl & Gemünden [94]. Ein empirisch evaluiertes Teammodell für den Anwendungskontext *agile Technologieentwicklung* lag zum Zeitpunkt der Studiendurchführung hingegen nicht vor [87]

Das auf der Grundlage der Ergebnisse der Literaturanalysen und der zweiten Interviewstudie (s. AP4.3) abgeleitete hypothetische Modell zur Beschreibung agil-integrierter Prozesse und Strukturen in der Technologieentwicklung berücksichtigt insgesamt vier Konstrukte als Input-Größen: „Individualagilität“ (IA), „Agilität der Teamstruktur“ (ATS), „Qualität der agilen methodischen Unterstützung“ (QAM) sowie „Agilität der betrieblichen Rahmenbedingungen“ (AOC). Die „Qualität der Teamzusammenarbeit“ (TWQ) bildet die Prozessgröße. Der „Erfolg des Technologieentwicklungsprojekts“ (PS) stellt die (abhängige) Output-Größe dar. Im Hinblick auf die Zielsetzung des Forschungsvorhabens wurde die Modellstruktur um die zusätzliche Outcome-Dimension „Erfolg der Technologiediffusion“ (DS) zu einer IPOO-Struktur erweitert. Das (ursprüngliche) Modell postuliert insgesamt 16 Beziehungen zwischen den sieben Konstrukten. Die formulierten Hypothesen umfassen elf direkte Wirkbeziehungen zwischen den Untersuchungsgrößen (Input → Prozess; Prozess → Output und Prozess → Outcome; Output → Outcome) sowie fünf Mediationshypothesen. Hinsichtlich der Mediationshypothesen wurde angenommen, dass TWQ die Beziehung zwischen den vier Input-Größen und PS mediiert und PS wiederum den Zusammenhang zwischen TWQ und DS.

Im nächsten Schritt wurden die sieben Untersuchungsgrößen operationalisiert. Grundlage hierfür bildeten die im Rahmen der zweiten Interviewstudie (s. AP4.3) erarbeiteten Charakteristika von agil-

integrierten Prozessen und Strukturen. Die Input-Konstrukte AOC (10 Items), ATS (12 Items), IA (13 Items) und QAM (10 Items) sowie das Prozess-Konstrukt TWQ (9 Items) wurden als formative Konstrukte spezifiziert. Die beiden abhängigen Konstrukte PS (7 Items) und DS (7 Items) wurden als reflektive Konstrukte konzeptualisiert.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Modell und die nachfolgend skizzierte empirische Evaluationsstudie zur Überprüfung der Hypothesen sowie bestehende Limitationen detailliert in einem Zeitschriftenbeitrag dokumentiert worden sind. Der Beitrag wurde beim *International Journal of Innovation and Technology Management* eingereicht und befindet sich derzeit noch im Reviewprozess [98].

Zur Datenerhebung wurde eine Online-Fragebogenstudie geplant und durchgeführt, an der 332 Expertinnen und Experten aus der Technologieentwicklung in Deutschland teilnahmen. Die Akquisition der Teilnehmenden erfolgte über einen Panel-Anbieter, um eine ausreichend große Stichprobe zu gewährleisten. Für die Bearbeitung des Fragebogens wurden die Befragten gebeten, sich an ein (bereits abgeschlossenes) Entwicklungsprojekt zurückzuerinnern, an dem sie aktiv und als Teil eines Teams beteiligt waren.

Die Teilnehmenden (97 weiblich, 235 männlich) verfügten mindestens über einen Bachelorabschluss sowie über eine durchschnittliche Berufserfahrung von 17,2 Jahren (*SD* = 10,9 Jahre). Mit Bezug auf das in der europäischen Norm DIN EN 16603-11 definierte neunstufige Modell des Technologiereifegrads (TRL) wurden die in den Projekten angestrebten Technologielösungen insbesondere den Technologiereifegraden TRL3 (nachgewiesene Funktionslösung der Technologie), TRL6 (Demonstrator mit Nachweis der Funktion in Einsatzumgebung) und TRL7 (einsatzfähiger (Modell-)Prototyp) zugeordnet.

Da es sich bei den Untersuchungsgrößen vorrangig um latente Konstrukte handelt und das Modell insgesamt eine relativ hohe Komplexität aufweist, wurde für die statistische Analyse die Partial Least Squares-Strukturgleichungsmodellierung (PLS-SEM) gewählt. Die Modellierung und Auswertung erfolgte mit Hilfe der Software *SmartPLS*. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Teil der postulierten Zusammenhänge bestätigt werden konnten, während andere verworfen werden mussten. Insgesamt konnten neun von elf Hypothesen zu direkten Pfadbeziehungen im Modell aufrechterhalten werden. U. a. konnte bestätigt werden, dass die drei strukturellen Agilitätskonstrukte AOC, ATS und IA in signifikant positivem Zusammenhang sowohl zur TWQ als auch zum PS stehen. Keine signifikanten Zusammenhänge ließen sich hingegen zwischen dem prozessualen Agilitätskonstrukt QAM und den beiden Konstrukten TWQ und PS nachweisen. Weiterhin konnte ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der TWQ und dem PS sowie zwischen der TWQ und dem DS festgestellt werden. Auch zwischen PS und dem DS wurde ein signifikant positiver Zusammenhang ermittelt.

Von den fünf als Mediationshypothesen geprüften indirekten Effekten konnten auf Basis der ausgewerteten Daten drei bestätigt werden. Demnach mediiert TWQ den Zusammenhang zwischen AOC und PS sowie den Zusammenhang zwischen ATS und PS, die Beziehungen zwischen IA und PS sowie zwischen QAM und PS hingegen nicht. Zudem zeigte sich, dass PS als Mediator zwischen TWQ und DS wirkt. Die vereinfachte Darstellung des Modells zur Beschreibung von agilen, kooperativen Technologieprozessen und den gefundenen positiven Beziehungen zum Projekt- sowie Diffusionserfolg findet sich in Abbildung 17.

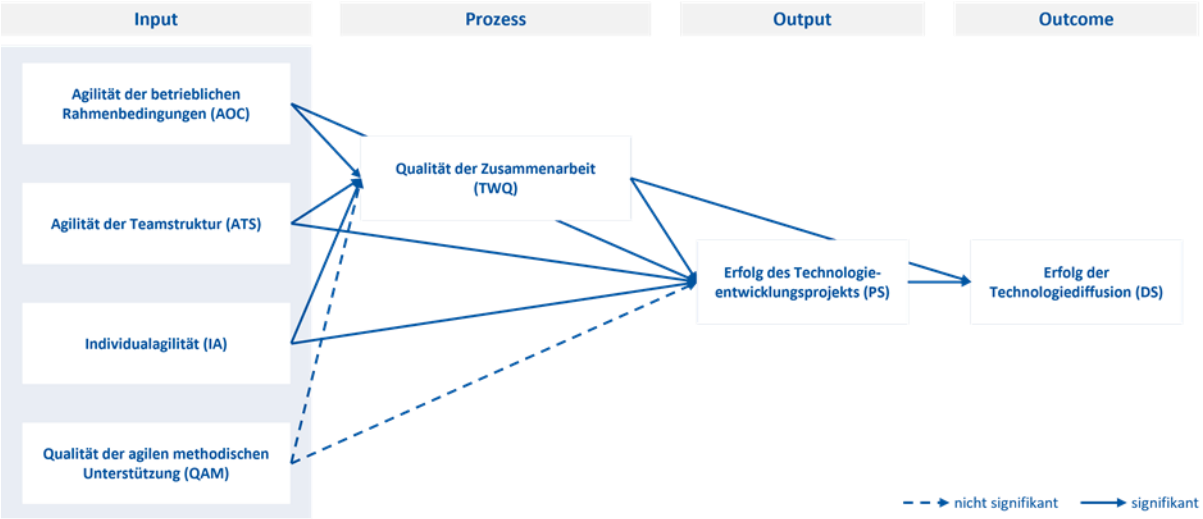


Abbildung 17: Referenzmodell für die Gestaltung agiler, teambasierter Technologieentwicklungsprojekte mit positiver Wirkung auf Projekt- und Diffusionserfolg (in Anlehnung an [98])

Eine empirische Evaluation allein anhand abgeschlossener DC-Use-Cases war im Projektverlauf nicht möglich, da derartige Anwendungsfälle nicht in ausreichender Zahl existierten oder zugänglich waren. Das entwickelte Modell bietet allerdings im Sinne eines Referenzmodells für die agile Technologieentwicklung die Möglichkeit, Empfehlungen für die Gestaltung von agilen, kooperativen Entwicklungsprozessen von DC-Technologien abzuleiten, deren Umsetzung eine erfolgreiche Zusammenarbeit im Projekt sowie die spätere Technologiediffusion begünstigen können.

Gestaltungsempfehlungen können sowohl aus dem Struktur- als auch aus dem dahinter liegenden Messmodell abgeleitet werden. Auf Strukturmodellebene wurden dazu die (direkten) Pfadbeziehungen der Modellkonstrukte analysiert. Die entlang der Hauptachse des IPOO-Modells gefundenen signifikant positiven Zusammenhänge weisen darauf hin, dass ein aus verschiedenen Perspektiven als erfolgreich beurteiltes Projekt ein wichtiger Stellhebel für den Diffusionserfolg ist und dass der Erfolg des Entwicklungsprojekts selbst maßgeblich durch eine gute Zusammenarbeit und durch eine ausgeprägte strukturelle Agilität im Technologieentwicklungsprojekt prädiziert wird. In der Technologieentwicklungspraxis sollten die strukturellen Agilitätsdimensionen (AOC, ATS und IA) somit gezielt adressiert werden, um die Qualität der Zusammenarbeit im Team sowie den Projekterfolg zu steigern und damit auch einen Beitrag zum Diffusionserfolg zu leisten.

Wie die Ausprägungen der strukturellen Agilitätsdimensionen gesteigert werden können, wird durch die Analyse der (formativ spezifizierten) Messmodelle deutlich. Für die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen wurden diejenigen Indikatoren herangezogen, die über signifikante Indikatorgewichte verfügen. Agilitätsförderliche organisationale Rahmenbedingungen (Konstrukt AOC) sind z. B. die Verfügbarkeit ausreichender zeitlicher, finanzieller und personeller Ressourcen, eine betriebliche Offenheit für neue Zusammenarbeitskonzepte, das Einräumen ausreichender Entscheidungsfreiräume für das Projektteam und eine solide räumliche Infrastruktur [98].

Neben dem Referenzmodell kann auch die im Vorhaben erarbeitete Akteursübersicht (s. AP4.2) sowohl in anschließenden Forschungsaktivitäten im Projekt *DC-Sozio-Ökonomik* als auch bei der Planung von energietechnologischen (Pilot-)Projekten oder Reallaboren genutzt werden, um beispielsweise relevante Akteure zu identifizieren und einzubeziehen [90]. Im Vorhaben wurde bezüglich der Partizipationsplanung in energietechnologischen Nischenprojekten allerdings noch Forschungsbedarf

deutlich. So ist noch unzureichend erforscht, in welchen Entscheidungssituationen sich eine Beteiligung welcher Akteure, in welchem Umfang und in welcher Form erfolgsfördernd oder sogar -mindernd auswirken kann. Es ist zu erwarten, dass derartige Situationen besondere Anforderungen an die Beteiligten stellen und organisatorische Fragen, die z. B. die Verfügbarkeit, die Organisationszugehörigkeit oder die Kompetenzen und Befugnisse betreffen, an Relevanz gewinnen [90]. Diese Forschungsfragen sollen im Falle einer Förderung in der dritten Förderphase adressiert werden.

2.4.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Die Aktivitäten in AP4.5 umfassten das iterative Zurückspielen der gewonnenen Erkenntnisse aus AP4 in das integrative Gesamtkonzept des sozio-ökonomischen Konsortiums, die Weiterentwicklung, Konkretisierung und Ausgestaltung des Niche Readiness Models sowie die Mitwirkung an gemeinsamen Publikationen (s. AP1 in Kapitel 2.1.5 sowie Kapitel 4). Das IAW brachte eigene Teilergebnisse ein, reflektierte Zwischenstände in internen Arbeitstreffen und erweiterte die Diskussion im Rahmen der Workshops um eine arbeitsorganisatorische Perspektive. Ferner wirkte das IAW bei der Vernetzung mit nationalen und internationalen Partnern mit, wie z. B. dem neuseeländischen Forschungsprojekt FAN (Future Architecture of the Network). Das IAW beteiligte sich außerdem mit einer Übungseinheit an einer multidisziplinären Lehrveranstaltung unter Leitung der beteiligten Architekturlehrstühle (Thema der Veranstaltung „Energie-Hub: Eine neue urbane Nische?“).

2.5 Freiraumplanerische Kontextualisierung und Sensibilisierung von DC-Nischenentwicklungsprozessen

Im Arbeitspaket 5 (AP5) wurden die nachfolgenden Unterarbeitspakete zusammengestellt und aufbereitet. Das Ziel des AP5 war die Entwicklung innovativer Planungsaspekte und Gestaltungspotenziale für DC-Technologien aus einer freiraumplanerischen Perspektive unter Berücksichtigung der wichtigen Rolle der Freiraumplanung im Innovationsprozess und der Zusammenhänge zwischen räumlicher Nische und Planungsaspekten. Um die Freiraumperspektive in das Gesamtmodell integrieren zu können und die räumliche Nische besser zu verstehen, wurden DC-Quartiere und Use Cases definiert und wurden empirisch ausgearbeitet in dem Versuch, die Rolle des "Freiraums als Innovator" durch Theoriebildung zu entwickeln.

2.5.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

Im Rahmen von AP5.1 wurden zentrale Ergebnisse zur Kontextualisierung von Gleichstromtechnologien (DC) in der Freiraumplanung erzielt. Ein besonderer Erkenntnisgewinn lag in der klaren Definition der räumlichen Nischen für DC-Technologien sowie der Rolle des Freiraums als Innovationsmotor in urbanen Transformationsprozessen. Die durchgeführte Literaturrecherche ermöglichte eine fundierte Einordnung von DC-Technologien aus freiraumplanerischer Perspektive. Dabei wurden Einflussfaktoren wie die Energieerzeugung im öffentlichen Raum, räumliche Anforderungen für DC-Infrastrukturen sowie deren gestalterische Integration im Quartier identifiziert. Es wurde deutlich, dass Freiräume über rein funktionale Anforderungen hinaus auch soziale, kommunikative und identitätsstiftende Rollen in Bezug auf DC-Nischen übernehmen können. Ein wesentliches Ergebnis stellte die Typisierung von DC-Nischen auf Quartiers- und Gebäudeebene dar. Durch den interdisziplinären Austausch, insbesondere in den Quartalsworkshops, konnten Hauptkategorien benannt werden, die für die Theoriebildung zur Rolle des Freiraums im

Innovationsgeschehen zentral sind. Die entwickelten Kategorien umfassen etwa den Grad der technischen Integration, das Nutzungsspektrum des Freiraums sowie sozio-kulturelle Faktoren wie Autarkiebedürfnisse oder Partizipationspotenziale.

In einer engen Kooperation mit den technischen Partnern sowie dem Arbeitspaket AP6 wurde eine Workshop-Reihe durchgeführt, in der Frei- und Stadtraum zunächst differenziert betrachtet und anschließend auf DC-spezifische Schnittstellen hin abgeglichen wurden. Die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Überführung in ein kooperatives Gesamtmodell. Darüber hinaus wurden im Hinblick auf die Gesamtmodellentwicklung mehrere Leitfragen formuliert und die zentrale Schlüsselakteure wie Energiedienstleister, Wohnungsbaugesellschaften, Kommunen und Nutzergruppen klar verortet und deren jeweilige Rolle im Planungs- und Innovationsprozess herausgearbeitet. Besonders hervorzuheben ist die Erkenntnis, dass technologische Innovation im DC-Bereich häufig durch soziale Impulse getragen werden – etwa durch das Streben nach energetischer Selbstversorgung oder nach gemeinschaftlicher Organisation.

Der Austausch mit technischen Partnern und externen Akteuren hat herausgestellt, dass es beim Aufbau eines DC-Quartiers häufig andere Gründe als technische gibt, beispielsweise den Wunsch nach Autarkie. Ein Workshop unter Federführung des AP2 mit einem DC-Entrepreneur aus den Niederlanden unterstrich die Relevanz solcher sozialen Faktoren. Der hier diskutierte „Second DC-Grid“-Ansatz verdeutlichte exemplarisch, wie Freiräume als physische und soziale Plattformen für neue technologische Systeme fungieren können. Zusammenfassend lieferte AP5.1 wesentliche Bausteine für die freiraumbezogene Theoriebildung zu DC-Technologien. Die identifizierten räumlichen Kategorien, Stakeholder-Rollen und Schnittstellen zu technischen Anforderungen bilden das Fundament für die weitere Entwicklung von Szenarien und das kooperative Gesamtmodell im Projekt.

2.5.2 Aufbau einer Modellumgebung DC-Quartier

Im Rahmen von AP5.2 wurde die Modellumgebung eines DC-Niedrigenergie-Quartiers entwickelt, die exemplarisch aufzeigt, wie Gleichstromtechnologien in städtebauliche und freiraumplanerische Kontexte integriert werden können. Das zentrale Ergebnis war eine visualisierte Quartierskonfiguration für einen realen Standort in der Aachener Innenstadt, die sowohl technologische als auch räumlich-funktionale Anforderungen berücksichtigt (siehe Abb. 18). Die Modellentwicklung basierte auf einer umfassenden Analyse bestehender Beispielprojekte sowie auf der Untersuchung definierter DC-Use-Cases. Dabei wurde deutlich, dass ein DC-Quartier nicht nur als technisches System, sondern als komplexes Zusammenspiel aus Gebäuden, Infrastrukturen und (Frei-)Räumen verstanden werden sollte. Daraus ergab sich ein erweiterter Anspruch an die Modellumgebung: Neben Energieversorgung und -sicherheit wurden auch gesundheitliche, gestalterische und soziale Aspekte wie Aufenthaltsqualität und Nutzbarkeit öffentlicher Räume in das Konzept einbezogen.

Ein zentraler Bestandteil des Arbeitspakets war die Umsetzung eines realitätsnahen Entwurfs für ein DC-Quartier und sein Freiraum mithilfe von CAD- und BIM-Techniken. Die modellierte Umgebung zeigte unterschiedliche Konfigurationen von DC-Technologieeinsätzen – insbesondere im Bereich von Photovoltaik, elektrischen Speichern und Gleichstromnetzen – und veranschaulicht, wie sich diese auf die Quartiersstruktur und insbesondere auf die Gebäudehülle auswirken. Dabei wurde die städtebauliche Maßstäblichkeit ebenso berücksichtigt wie die Lage des Quartiers im urbanen Kontext (Bestands- vs. Neubau, zentrale Lage, funktionale Mischung etc.).

Das Bild zeigt eine Darstellung eines DC-basierten Quartiers mit verschiedenen Gebäudetypen, Technologien und Anwendungsfällen. Es illustriert eine urbane Umgebung, die auf Gleichstrom (DC)

und flexible Energieinfrastrukturen ausgerichtet wurde. Hier werden die wichtigsten Komponenten der Grafik zusammengefasst:

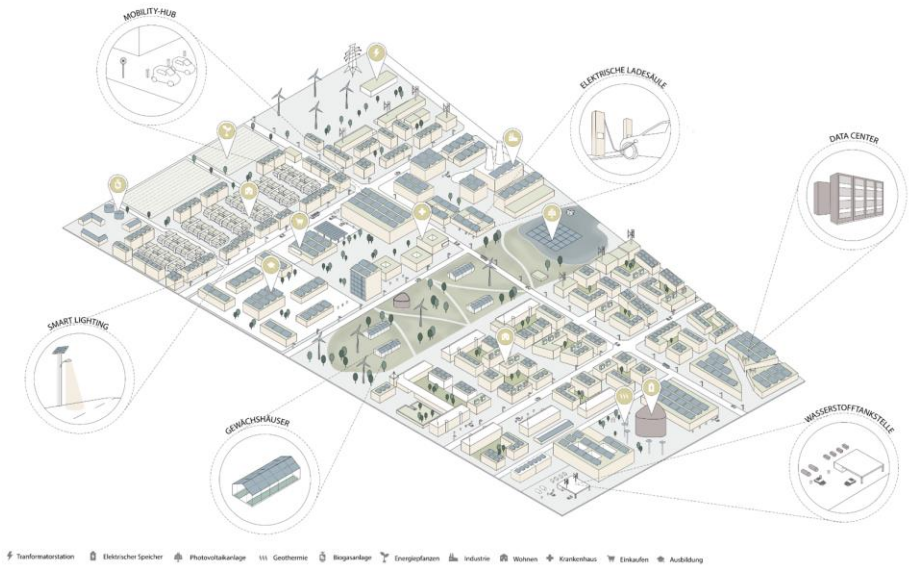


Abbildung 18: Modellumgebung DC-Quartier (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur)

Wasserstofftankstelle: nutzt Gleichstrom zur direkten Kopplung von erneuerbaren Energiequellen und Elektrolyseuren. Dies ermöglicht eine verlustarme, effiziente Wasserstoffproduktion und vereinfacht die Integration in lokale Energiesysteme wie Micro-Grids.

DC-Straßenbeleuchtung: verwendet Gleichstrom, um LED-Leuchten direkt mit Strom zu versorgen. Dadurch werden Energieverluste durch AC/DC-Wandlung vermieden. Sie ermöglicht eine effiziente Kopplung mit lokalen, erneuerbaren Energiequellen, wie beispielsweise Photovoltaik.

Mobility HUB: Ein lokal vernetzter Knotenpunkt (DC-basiert) für Elektrofahrzeuge und verschiedene Mobilitäts- und Energiesysteme wie Elektrofahrzeuge, Wasserstofftankstellen und Ladeinfrastruktur. Er ermöglichte die direkte Kopplung von erneuerbaren Energiequellen und Batteriespeichersystemen.

Gewächshäuser: Integrierte Photovoltaik- und Solaranlagen für die Erzeugung von Strom und Wärme.

Elektrische Ladesäule: Eine Schnellladestation, die Elektrofahrzeuge direkt mit Gleichstrom versorgt und dadurch deutlich kürzere Ladezeiten im Vergleich zu AC-Laden ermöglicht.

Abbildung 19: AC- und DC-Ladesäulen

Data Center: Ein Rechenzentrum mit DC-Energieversorgung.

Wesentlich zur Schärfung des planerischen Zugangs trug die interdisziplinäre Lehrveranstaltung „Energy Hub: Eine neue urbane Nische“ bei, die im Sommersemester 2022 mit Studierenden des M.Sc.-Studiengangs Architektur und Stadtplanung durchgeführt wurde. Das Projekt wurde vom BBSR gefördert und in enger Zusammenarbeit mit AP6 konzipiert und untersuchte das Potenzial eines Energiehubs für ein urbanes Quartier. Die Studierenden entwickelten planerische Ansätze zur Integration von Gleichstromtechnologien in das bestehende Stadtgefüge und legten damit den Grundstein für praxisnahe Szenarien.

Abbildung 20: Ergebnis der Lehrveranstaltung "Eine neue urbane Nische" [103, p. 201]

Abbildung 21: Quartiersanalyse energetischer Potenziale [103, p. 201]

Ein zentrales Ergebnis dieses kollaborativen Prozesses war die Erkenntnis, dass sich durch gezielte planerische Maßnahmen geeignete räumliche Nischen schaffen lassen, in denen DC-Technologien nicht nur funktional, sondern auch gestalterisch und sozial verträglich integriert werden können. Die Modellumgebung diente damit als dynamisches Werkzeug, das kontinuierlich durch Ergebnisse aus weiteren Arbeitspaketen angereichert wurde – etwa durch Erkenntnisse zu Stakeholderbedarfen, soziale Dynamiken oder technische Schnittstellen. Auf diese Weise trug AP5.2 maßgeblich dazu bei, die räumlichen und planerischen Rahmenbedingungen für die Etablierung von DC-Technologien im urbanen Raum zu konkretisieren.

2.5.3 Identifizierung Infrastrukturen und Räume, Akteure und Märkte

Im Arbeitspaket 5.3 wurde die Verzahnung von Gleichstromtechnologien (DC) mit urbanen Infrastrukturen und räumlichen Kontexten systematisch analysiert. Im Zentrum standen dabei die Fragen, an welchen Stellen DC-Technologien den öffentlichen Raum beeinflussen, welche freiraumrelevanten Akteursgruppen involviert sind und welche Märkte durch die Integration von DC adressiert bzw. neu geschaffen werden. Ein zentrales Ergebnis lag in der Identifikation relevanter Schnittstellen zwischen DC-Infrastrukturen und städtischen Freiräumen. Diese reichen von sichtbaren Elementen wie Photovoltaikanlagen, Ladesäulen oder Energiespeichern im öffentlichen Raum bis hin zu unsichtbaren, aber raumwirksamen Netzinfrastrukturen. Dabei wurde deutlich, dass sich Konflikte und Potenziale nicht nur auf funktionale, sondern auch auf ästhetisch-gestalterische und soziale Ebenen beziehen – etwa bei der Gestaltung von Energiehubs oder der Einbindung von DC-Komponenten in öffentliche Freiflächen.

Im Rahmen der unter AP5.2 genannten Lehrveranstaltung mit Studierenden des M.Sc. Architektur und Stadtplanung wurde das Quartier als Plattform für räumlich-technologische Innovation erfahrbar gemacht. In Planungswerkstätten wurden DC-bezogene Infrastrukturelemente – wie PV-Anlagen, Windmodule, kinetische Energieplatten oder Ladesysteme – integriert und auf ihre gestalterische sowie funktionale Wirkung im Stadtraum geprüft. Die Ergebnisse dieser Werkstätten wurden zusammengeführt und bildeten die Grundlage für weiterführende Diskussionen mit Planungsexpert:innen aus der Praxis. Dieser Dialog verdeutlichte, wie stark die Integration technischer Systeme von planerischen, rechtlichen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig ist.

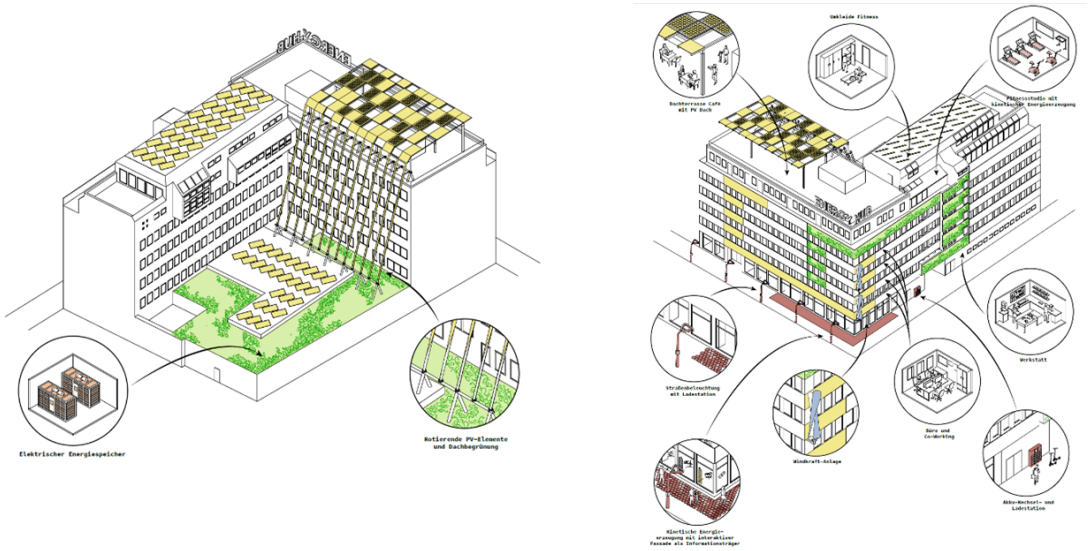


Abbildung 22: Ergebnis aus der Lehrveranstaltung „Energy-Hub: eine neue urbane Nische" [103, p. 203]

Ein wesentliches Erkenntnisinstrument war die kollaborative Durchführung leitfadengestützter Interviews mit einer Vielzahl freiraumrelevanter Akteursgruppen – darunter Vertreter:innen der kommunalen Verwaltung, Netzbetreiber, Energierechtsexpert:innen sowie Akteure der Immobilien- und Energiewirtschaft. Sie wurden mittels Akteursprofilen erfasst, wobei Angaben zu Rollen, Einflussmöglichkeiten, Interessenlagen, Kooperationsbereitschaft und potenziellen Investitionen berücksichtigt wurden. Die gemeinsame Auswertung der Interviews lieferte zentrale Erkenntnisse über bestehende Hemmnisse, aber auch über Marktchancen und Kooperationspotenziale im Zusammenhang mit DC-Technologien. Deutlich wurde: Die Akzeptanz und Verbreitung von DC im

Quartier hängt maßgeblich von der frühzeitigen Einbindung unterschiedlicher Akteursgruppen und deren spezifischen Interessenlagen ab.

Akteursgruppe	**Rolle im DC-Planungskonzept**	**Raumbezug**
Kommunal	Freiraumkonzepte	Quartiersebene
Energieversorger	Energieintegration, Netzbetrieb	Stromnetz, Ladesäule
Technologiehersteller	Komponenten	Produktebene
Planer:innen/Architekt:innen	Energiekonzepte Integration im Planungsprozesse	Gebäude-Quartiersebene
Wohnbaugenossenschaft	Energieintegration in Neubauprojekte	Gebäude-Quartiersebene
Bürgerinitiativen	Betrieb der DC-Technologie (PV-anlage, DC Micro Netze)	Quartiersebene

Tabelle 1: Akteursgruppen und ihre Rollen im DC-Freiraumkontext

Darüber hinaus konnte eine erste Kategorisierung freiraumplanerisch relevanter Märkte vorgenommen werden. Neben klassischen Energiemärkten wurden auch neue Märkte im Bereich Mobilität, Digitalisierung und Sharing-Modelle als potenziell relevant identifiziert. Diese Beobachtungen boten wichtige Anknüpfungspunkte für zukünftige Geschäftsmodelle im urbanen Kontext. Nicht zuletzt leistete AP5.3 einen zentralen Beitrag zur konzeptionellen Weiterentwicklung des räumlichen Nischenmodells, das in Kooperation mit AP6 erarbeitet wurde. Die Schnittmenge beider Perspektiven – Stadtplanung und Landschaftsarchitektur – ermöglichte eine präzise räumliche Rahmung des Nischenbegriffs auf Quartiersebene. Insgesamt zeigte AP5.3, dass DC-Technologien weit mehr als nur technische Infrastrukturen darstellen. Sie eröffneten neue räumliche und ökonomische Handlungsfelder, deren Potenzial nur durch die Integration planerischer, gesellschaftlicher und marktorientierter Perspektiven voll ausgeschöpft werden kann.

2.5.4 Planspiel-Serie zu Wirkmechanismen und Nischenpotentialen und Meta-Studie zu Freiraum als Innovator

In Arbeitspaket 5.4 widmete sich der Frage, wie sich technologische Transformationsprozesse – insbesondere im Kontext von Gleichstromtechnologien (DC) – in urbanen Quartieren erfolgreich gestalten lassen, wenn sie als kooperative Lern- und Aushandlungsprozesse verstanden werden. Im Mittelpunkt stand dabei die Konzeption und Durchführung einer Planspiel-Serie, die das Ziel verfolgte, zentrale Wirkmechanismen und Nischenpotenziale von DC-Technologien für Quartiere und ihre Freiräume gemeinsam mit relevanten Akteursgruppen zu identifizieren und zu reflektieren. Im Rahmen des Planspiels wurden Schlüsselakteure gezielt mit konkreten Nischenpotenzialen für die zukünftige Gestaltung konfrontiert. Zu diesem Zweck wurden in einem ersten Workshop Planende von Energiequartieren, Architekten:innen und Forscher:innen eingeladen, in eine Diskussion über mögliche Einsatzmöglichkeiten von Gleichstromtechnologien zu treten. Im Rahmen des Workshops wurden verschiedene Beispiele für innovative Energiekonzepte mit Quartierbezug sowie realisierte Umsetzungsbeispiele vorgestellt. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Herausforderungen, denen

sich die Akteure bei der Planung solcher Konzepte unter wirtschaftlichen, sozialen und planerischen Aspekten in Berührung kamen. Die Diskussion beleuchtete u. a. den hohen Stellenwert von Standardisierung sowie Wirtschaftlichkeit bei der Einführung innovativer Technologien. Im Planungsbereich wurden die Vorzüge verschiedener Gebäudetypologien betont, die eine effiziente Umsetzung ermöglichen. In Kooperation mit AP6 und AP2 wurde ein standardisierter Fragebogen für den Workshop entwickelt und die Daten wurden ausgewertet. Anhand des Fragebogens wurden die Rahmenbedingungen, Hemmnisse und katalysierenden Faktoren für die Platzierung von Innovationen im Bauplanungssektor identifiziert.

Aufbauend auf vorhergehenden Untersuchungen wurde ein dreistufiges Modell zur Analyse von Quartiersentwicklung erstellt. Das Modell zeigt unterschiedliche Transformationspfade von der konventionellen, AC-basierten Energieversorgung bis hin zu einem vollständigen DC- Quartier (siehe Abb. 23). In diesem Zusammenhang diente die Entwicklung von AC- zu DC-Infrastrukturen als Diskussionsanstoß für räumliche, technische und soziale Implikationen.

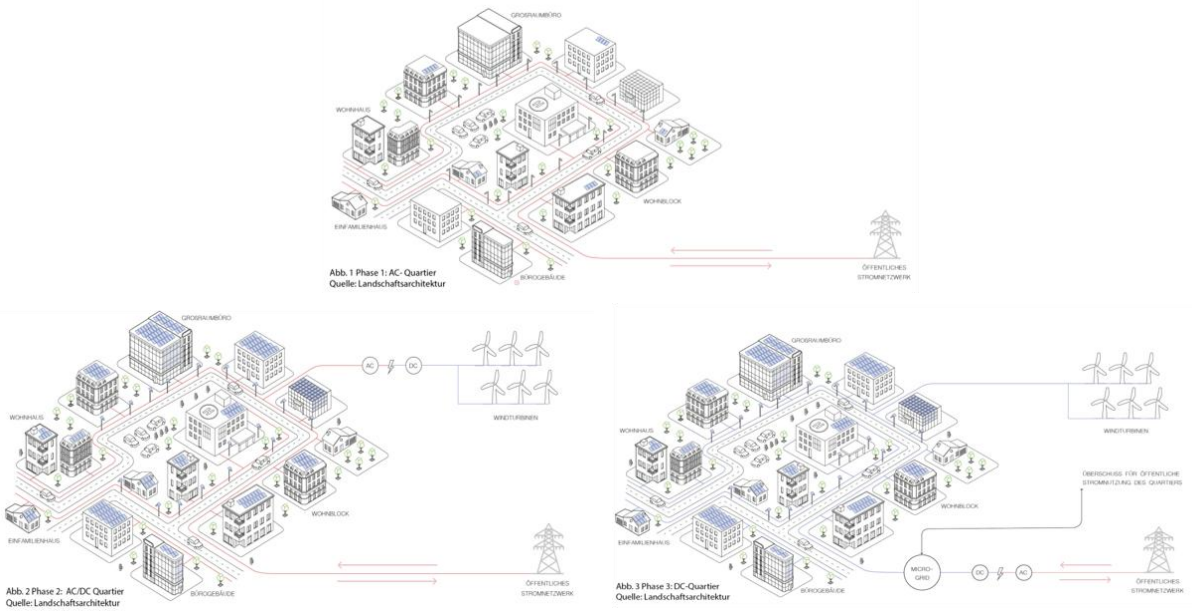


Abbildung 23: Drei Phasen der Szenarienentwicklung des Use Cases „Quartier" von AC zu DC (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur)

Auf Quartiersebene wurden für ein Quartier drei Entwicklungsphasen als Modellszenarien erstellt. Die erste Phase zeigt den aktuellen Stand bei verschiedenen Gebäudetypen. Dabei basiert das Stromnetz für Haushalte und öffentliche Einrichtungen auf Wechselstrom (AC). In der zweiten Phase gibt es weiterhin ein Wechselstromnetz für die lokale und öffentliche Nutzung, zusätzlich wird jedoch ein Gleichstromnetz über einen DC/DC-Wandler realisiert. In der dritten Phase erfolgt die Umwandlung des Stromnetzes und des öffentlichen Versorgungsnetzes in ein Gleichstromnetz. Zudem wurde das Stromnetz durch ein DC-Microgrid erweitert.

Im Zentrum des ersten Planspiels stand die gemeinsame Auseinandersetzung mit Fragen zur praktischen Integration von DC-Technologien in städtische Kontexte: Welche Rolle kann Gleichstrom

auf Quartiersebene sinnvoll einnehmen? Wo bestehen Barrieren – regulatorisch, planerisch oder sozial? Welche Synergien lassen sich freisetzen, wenn verschiedene Akteure gemeinsam an Zukunftsszenarien arbeiten? Die Teilnehmenden konnten ihre eigenen Perspektiven einbringen, Hemmnisse und Gestaltungspotenziale sichtbar machen und alternative Handlungsoptionen entwickeln. Insbesondere wurden regulatorische und wirtschaftliche Herausforderungen identifiziert, die derzeit die breite Implementierung hemmen. Zudem wurde die Bedeutung von Standardisierung und Kostenwirksamkeit hervorgehoben. Die Analyse der unterschiedlichen Gebäudetypologien hat gezeigt, dass bestimmte Bauweisen eine effizientere Nutzung von DC-Technologien ermöglichen. Fragebögen ergaben erste Hinweise darauf, welche Rahmenbedingungen und Synergien förderlich sein könnten. Aufbauend auf den Erkenntnissen des ersten Stakeholder-Workshops sowie den Analysen aus den vorangegangenen Arbeitspaketen wurde ein gezieltes Diskussionsformat entwickelt, das die Auseinandersetzung mit technologischen Transformationsprozessen systematisch strukturieren und vertiefen soll. Das Format basierte auf dem Modell der fünf Mechanismen der Nischenentwicklung (nach [73]) das aus AP1 hervorgegangen ist und in AP5.4 methodisch weiterentwickelt wurde. Ziel war es, die im ersten Workshop identifizierten Herausforderungen – etwa fehlende Standardisierung, begrenzte Ressourcen und unklare Zuständigkeiten – theoretisch zu rahmen und praktisch handhabbar zu machen.

Im Rahmen eines zweiten Planspiels wurde das entwickelte Format exemplarisch auf das Thema energetische Sanierung im Bestand angewendet. Die Auswahl dieses Themas erfolgte bewusst, da es strukturelle Parallelen zur Einführung von Gleichstromtechnologien aufweist und ebenfalls stark von kooperativen Umsetzungsstrategien abhängt. Im Mittelpunkt standen diesmal gemeinnützige Akteure, die in AP5.3 als potenziell zentrale Treiber von Nischenentwicklungen identifiziert wurden. Diese Akteursgruppe agiert häufig unter erschwerten Bedingungen, bringt jedoch durch ihre Nähe zur Zivilgesellschaft, ihre hohe Motivation und politische Vernetzung entscheidende Impulse in Transformationsprozesse ein. Das Planspiel-Format ermöglichte es den Teilnehmenden, ihre Erfahrungen entlang der fünf Mechanismen – Framing, Exploration, Standardisierung, Akzeptanz und Imitation – zu reflektieren, versteckte Herausforderungen sichtbar zu machen und Best-Practice-Beispiele zu identifizieren. Besonders relevante Themen waren der Umgang mit normativen Zielkonflikten, die Übertragbarkeit erfolgreicher Ansätze und die Frage, wie neue Denk- und Handlungsmuster in bestehende Planungs- und Entscheidungsprozesse integriert werden können.

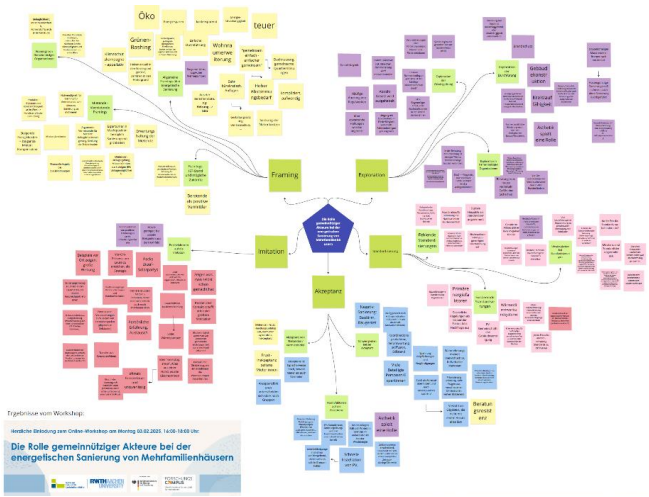


Abbildung 24: Ergebnis des Workshops "Die Rolle gemeinnütziger Akteure bei der energetischen Sanierung von Mehrfamilienhäusern" (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur)

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Mechanismen „Standardisierung“, „Imitation“ und „Framing“ als zentrale Hebel für die Verbreitung innovativer Lösungen eingeschätzt wurden. „Akzeptanz“ wurde mehrheitlich bereits als weitgehend erreicht betrachtet, während beim Framing – also der narrativen und gesellschaftlichen Einbettung von Innovationen – noch erheblicher Nachholbedarf gesehen wurde. Begleitet wurde der Workshop durch einen abschließenden Fragebogen, mit dem die Teilnehmer:innen den Entwicklungsstand der einzelnen Mechanismen bewerten konnten. Die Methode wurde von den Teilnehmenden als hilfreich und motivierend bewertet: Sie bot Raum für Reflexion, Perspektivwechsel und konkrete Ansätze zur Weiterentwicklung bestehender Strategien. Der strukturierte Aufbau des Workshops wurde als wesentlich für den zielgerichteten Austausch hervorgehoben. Das Action Learning wurde also stark durch die Teilnehmenden selbst praktiziert, die sich durch den gemeinsamen Austausch an Best Practice-Beispiele erinnerten, sich austauschten und vernetzten. Für die Planungsdisziplin kann ein solcher Workshop sehr hilfreich sein. Die entwickelte Methodenbeschreibung liegt dokumentiert vor und kann zukünftig sowohl für Themen rund um DC-Technologien als auch für andere Transformationsprozesse im Bereich der nachhaltigen Stadtentwicklung eingesetzt werden.

Zusätzlich wurde eine Meta-Studie angefertigt, die untersucht, inwieweit Freiräume Innovationen fördern können. Die Fallstudien zeigen, dass Freiräume in unterschiedlichen Maßstäben – von urbanen bis ländlichen – als Nischenräume fungieren, in denen technologische, soziale und räumliche Dimensionen von DC-Infrastrukturen erprobt und weiterentwickelt werden. Es wurde festgestellt, dass Freiräume nicht nur physische Infrastruktur bereitstellen, sondern auch die Voraussetzungen für soziale sowie ökonomische und organisatorische Innovationsprozesse ermöglichen.

2.5.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Das Arbeitspaket AP5.5 war das abschließende Teilarbeitspaket des Lehrstuhls für Landschaftsarchitektur im Forschungscampus FEN. Es baute dabei auf den erarbeiteten Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete auf. Ziel des AP5.5 war, die in den Teilpaketen von AP5 gewonnenen Erkenntnisse schrittweise und reflektiert in das integrative Gesamtmodell des Projekts (vgl. AP1) einzubinden. Im Zentrum stand die Frage, welche freiraumplanerischen Dimensionen die Entwicklung und Diffusion von Innovationsnischen beeinflussen, und wie diese Aspekte planerisch und kooperativ gesteuert werden können. Im Austausch über regelmäßige Quartalsworkshops und Arbeitstreffen wurden zentrale Befunde aus AP5 – etwa zur Rolle des Freiraums in der Nischenentwicklung, zur Integration technischer Infrastrukturen und zur Bedeutung von Akteurskonstellationen – diskutiert, gespiegelt und mit den Arbeiten aus den AP1, AP2 und AP6 verzahnt. Die so geschaffene interne Rückkopplungsschleife stellte sicher, dass freiraumplanerische Perspektiven nicht additiv, sondern integrativ in das sich entwickelnde Modell einfließen konnten. Ein besonderer Fokus lag auf der Frage, wie Planungsdisziplinen gezielt Steuerungspotenziale im Innovationsprozess aktivieren können, etwa durch Rahmensetzung, Beteiligung oder gestalterische Interventionen. Diese Fragen flossen in ein gemeinsames Paper zum Niche Readiness Level Model, das als Kurzfassung publiziert wurde [73], ein. Die Beteiligung des AP5 an einem längeren Fachartikel zum gleichen Gegenstand ist beabsichtigt.

Zur besseren Vermittlung und praktischen Anwendung der Modellbausteine wurde eine Methodenbeschreibung entwickelt, die eine strukturierte Diskussion über Transformationsprozesse ermöglicht. Dieses Format basiert auf dem in AP5.4 eingesetzten Planspiel-Ansatz und wurde für den Anfang 2025 durchgeführten Workshop angepasst. Es ermöglicht, unterschiedliche Akteure in einen strukturierten Dialog über das Modell zu bringen – nicht nur im Kontext von Gleichstrom, sondern auch übertragbar auf andere Transformationsthemen wie etwa die energetische Sanierung. Die Anwendung der Methode auf das gemeinsame Modell aus AP1 zeigte, dass dieses als Reflexions- und

Vermittlungsinstrument einsetzbar war und konkrete Impulse für die strategische Weiterentwicklung freiraumbezogener Transformationspfade geben konnte. Neben der inhaltlichen Integration war AP5.5 auch Teil der internationalen Vernetzung des Forschungscampus FEN. Der Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur nahm aktiv an Austauschformaten teil, u. a. bei der International Sustainability Transitions Conference und war an gemeinsamen Treffen mit internationalen Forschungspartnern beteiligt (vgl. AP1).

2.6 Räumlich-planerische Nischeneinbettung von DC-Innovationen

Ziel des AP6 war die Untersuchung der räumlich-planerischen Aspekte für den Einsatz von DC-Technologie. Es wurden gemeinsam mit den Partnern das Gesamtkonzept sowie der Erhebungsansatz für die Entwicklung eines übergeordneten Gesamtmodells der Nischenentwicklung und Marktdiffusion von DC-Technologien entwickelt und Kriterien und Bedingungen für die Einbettung neuer Technologien und Verfahren identifiziert. Zudem erfolgte die Analyse von Quartiers- und Gebäudetypologien zur Modellierung in Use-Cases und dem Aufbau gestaltgebender Prinzipien für die stadträumlich relevanten DC-Technologien. Iterativ wurden die Ergebnisse in das Gesamtkonzept integriert.

2.6.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

Im Arbeitspaket 6.1 wurde gemeinsam mit den Partnern das Gesamtkonzept (Niche Readiness Level Model) sowie der Erhebungsansatz entwickelt und abgestimmt. Der Fokus des Lehrstuhls für Städtebaus lag hier auf den räumlichen Aspekten des Nischenverständnisses. Aus Städtebauperspektive ist die Raumwirksamkeit des eigentlichen DC-Netzes weniger relevant als jene der Energiesystemkomponenten wie z.B. PV-Anlagen oder DC-Ladeinfrastruktur. Diese bieten ein hohes Potential, energetische Mehrwerte und die Schaffung zukunftsfähiger Quartiere zu vereinen. Ins Projekt wurde die Definition des Forschungskollegs "Nachhaltige Energiesysteme im Quartier" eingebracht und im weiteren Projektverlauf verwendet: „Ein Quartier ist ein kontextuell eingebetteter, durch externe und interne Handlungen sozial konstruierter, jedoch unscharf konturierter Raum, der überschaubare alltägliche Lebens- und Arbeitswelten und insbesondere den Wohnort umfasst. Ein Quartier wird geprägt durch seinen baulich räumlichen Zusammenhang, der die Schnittmengen individueller sozialer Sphären abbilden kann und die Identifikation handelnder Akteure mit diesem Raum prägt“ ([99, p. 46] nach [100]).

Zur Erreichung der im Antrag formulierten Ziele wurden Quartalsworkshops zu unterschiedlichen Themen wie z. B. der Nischentypisierung durchgeführt. Auf den Workshop-Erkenntnissen aufbauend erscheint ein dynamisches Gesamtmodell, welches unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren unterschiedliche Pfade der Nischenentwicklung identifizieren kann, am geeignetsten. Daraus wurde ein Gesamtkonzept entwickelt, welches im Projekt kontinuierlich weiterentwickelt und ausformuliert wurde.

Ergänzend zum Gesamtmodell wurde in Zusammenarbeit mit dem AP5 ein eigener Ansatz entwickelt, um die „Raumperspektive“ zu charakterisieren. Dazu wurden Kriterien für die Entwicklung räumlicher Nischen gesammelt, abgestimmt und graphisch aufbereitet. Kriterien stellen unter anderem die Nutzung, Besitzverhältnisse, Bauweise, baugeschichtliche Einordung, Alter, physikalischen Grundlagen der Bausubstanzen wie energetische Aspekte, Standortfaktoren, Energiekonzepte für Gebäude und Quartier, Gebäudetypen sowie das Maß der baulichen Nutzung dar.

2.6.2 Analyse der Entscheidungsprozesse im Bereich Gebäudetechnik in unterschiedlichen Bauplanungsverfahren

Ziel des Arbeitspaketes war die Identifizierung von Kriterien und Bedingungen für die Einbettung neuer Technologien und Verfahren in Gebäuden. Das einst als DC-Gebäude geplante Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems (CARL) an der RWTH Aachen University wurde im initialen Projektantrag als Referenzobjekt festgehalten. An dem Bauvorhaben sollten die Entscheidungsabläufe untersucht werden, um Ansätze zur Integration von neuen Technologien in Gebäuden herauszufiltern. Dabei war die Analyse der Bauablaufpläne und die verschiedenen Leistungsphasen vorgesehen, um klare Einstiegskriterien für die Begleitung realer Bauvorhaben ansetzen zu können. Letztendlich wurde das CARL jedoch nicht mit einem DC-Gebäudenetz umgesetzt, lediglich der Anschluss an das vorhandenen DC-Mittelspannungsnetz auf dem Campus Melaten wurde vorgesehen und teilweise Leerrohre im Gebäude geplant.

Daher wurden Experteninterviews durchgeführt, um Kriterien und Bedingungen für die Einbettung neuer Technologien und Verfahren zu identifizieren. Folgende Kriterien konnten identifiziert werden:

Als Herausforderungen und denkbare Ansatzpunkte der Nischenentwicklung wurden eine fehlende Standardisierung der Komponenten (z. B. im öffentlichen Bau, dass Komponenten nicht offiziell zugelassen sind), fehlende Regularien (Risikoerwartung, Verantwortlichkeit) als auch erhöhte Einstandskosten, sowie die Ausbildung und Verfügbarkeit geeigneter Fachplaner:innen genannt. Fehlende Fachkräfte in Planung und Ausführung erschweren die Umsetzung. Hinzu kommen fehlende Erfahrungswerte (planerisch, regulatorisch und auf der Ausführungsseite). Die gegenwärtigen Planungsprozesse sind aufwendig und kostenintensiv. Fachplaner:innen müssen sich umfassend in neue Technologien einarbeiten, was zusätzliche Zeit erfordert und Kosten verursacht. Es sind vermehrt Rücksprachen mit Expert:innen notwendig, beispielsweise bezüglich des Erdungskonzeptes. Dies führt dazu, dass Entscheidungsprozesse und Budgetplanungen angepasst werden müssen, insbesondere in Bezug auf die Schutztechnik erweist sich die DC-Technik als teurer.

Erschwerend bei öffentlichen Projekten kommt bei der Einholung von Angeboten hinzu, dass von Bewerber:innen Referenzprojekte mit einem gewissen Finanzvolumen gefordert sind. Hierdurch entsteht das Risiko, kein Angebot im Zuge einer öffentlichen Ausschreibung zu erhalten. Zudem bewerben sich auf die Ausschreibungen meist Firmen mit weniger innovativen Ideen und Standardabläufen.

Oftmals passen DC-Pilotprojekte nicht in den normalen Bauablauf bzw. zu den Standardbauverfahren. Diese Projekte werden oft in Begleitung durch Forschungsprojekte durchgeführt. Die Integration neuer Technik kann zu Abweichungen vom gewohnten Bauablauf führen, was oft höhere Risiken sowie Kosten und mögliche Zeitverzögerungen für den Auftraggeber bedeuten kann. Insbesondere zeigt sich, dass die Durchführung einer Abnahme von DC-Systemen aufgrund der derzeitigen Regelwerke schwierig ist. In einigen Fällen erfolgt zunächst eine Abnahme der verbauten AC-Systeme, um im Nachgang eine DC-Umrüstung vorzunehmen. Ein zentrales Problem stellt sich bei Altbauten dar: Die Erneuerung bestehender Anlagen ist oft mit hohen Kosten verbunden, da diese im Zuge einer Erneuerung auf den aktuellen Stand der Technik gebracht werden müssen.

Technisch gesehen ist der Bau von DC-Systemen machbar, jedoch wird die derzeitige Marktverfügbarkeit als begrenzt angesehen, da es nur wenige Hersteller gibt und die bestehenden Systeme häufig teuer sind. Ein weiterer Aspekt betrifft die Normung im Bereich der DC-Technologien. Derzeit existieren keine ausreichenden Sicherheitsstandards. Die Befragten betonten die Notwendigkeit für gesetzliche Regelungen sowie die Gründung von Vereinigungen oder Verbänden zur Entwicklung einheitlicher Normen. Eine solche Standardisierung würde nicht nur Sicherheit schaffen, sondern auch ermöglichen, Produkte über einen längeren Zeitraum zu entwickeln und marktfähig zu

gestalten, wobei zudem die Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen gewährleistet sein sollte. Ebenfalls stellen Anschlussbedingungen seitens der Netzbetreiber eine Herausforderung dar. Die fehlenden praktischen Beispiele für potenzielle Kunden, Planungsbüros und Auftraggeber erhöhen zudem die Hemmschwelle zur Auseinandersetzung mit neuen Lösungen. Es mangelt an Bewusstsein für DC-Systemlösungen.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sollten bereits früh DC-Potenziale erkannt werden, damit Maßnahmen für (eine spätere Umrüstung auf) DC-Technologien getroffen werden können. Es empfiehlt sich, DC-Technologien und Systeme von Beginn an in den Planungsprozess zu inkludieren und von Fachleuten in der Planung Unterstützung zu holen. Im Bauablauf sollten entsprechende Abnahmen frühzeitig eingeplant und Sachverständige frühzeitig eingebunden werden, um sicherzustellen, dass sowohl das Gebäude als auch Elektroinstallationen rechtzeitig geprüft werden.

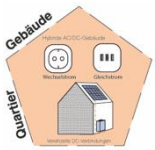
Aufgrund der bestehenden Herausforderungen bei der Integration von DC-Netzen in Gebäuden haben sich im Bauprozess verschiedene Ansätze entwickelt, um einzelnen dieser Herausforderungen zu begegnen. Derzeitige Ansätze, um den Herausforderungen zu begegnen, sind folgende:

Modulare serielle Bauweise

Modulare serielle Bauweise: Modulare Raummodule ermöglichen, einzelne Raumeinheiten unter industriellen Bedingungen herzustellen und anschließend auf der Baustelle zu montieren. Im Hinblick auf die Elektroinstallation bietet dies den Vorteil, dass diese bereits in der Fabrik in einer kontrollierten Umgebung und unter vereinheitlichten Arbeitsabläufen durchgeführt werden können. So kann Fachexpertise an den Produktionsorten der Raummodule gebündelt werden und Routinen und Abläufe im Produktionsprozess aufgebaut werden.

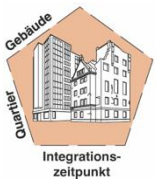
Umrüstung von Haushaltsgeräten

Umrüstung DC-Haushaltsgeräte: Aufgrund der derzeit noch vorhandenen Anzahl an AC-Verbraucher im Bereich der Haushaltsgeräte (z.B. Kühlschrank, Spülmaschine, …) in Gebäuden und der niedrigen Menge an Haushaltsgeräten als verfügbare DC-Endgeräte entsteht eine „Henne- und Ei-Problem“, erst das Netz auf DC umzurüsten oder erst die Verfügbarkeit von DC-Geräten sicherzustellen. Um diesem Problem zu begegnen, gibt es Ansätze von Forschungseinrichtungen oder privaten Unternehmen, (Haushalts-)Geräte auf Gleichstrom umzustellen. In kleinen Pilotprojekten wie etwa im Zuge der Errichtung des Nano-Grid-Houses der Purdue Universität wurden vereinzelt einige Haushaltsgeräte umgerüstet. Für Pilotprojekte haben einzelne Hersteller auch schon kleine Mengen ihrer Geräte (Kühlschrank, Spülmaschine, Waschmaschine, Trockner) als DC-Variante hergestellt, siehe Projekt Salisbury Square in Vermont. Ein weiterer Ansatz stellt der Einsatz von kleinen (Haushalts-)Geräten als akkubetriebene Geräte dar, wie z. B. Föhn und Staubsauger.

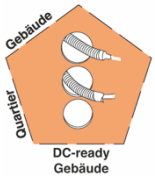


Hybride AC/DC-Gebäudenetz

Doppelte Netzinfrastruktur in einem Haus ermöglicht, dass die DC-Vorteile genutzt, jedoch AC-Haushaltsgeräte und (AC-)Altgeräte ebenfalls verwendet werden können. Es gibt verschiedene Stufen des parallelen Ausbaus einer hybride AC/DC-Elektrizitätsversorgung im Gebäude. Dies reicht von Beispielen, in denen, neben der AC-Elektrizitätsversorgung im Gebäude, einzelne DC-Komponenten wie die Photovoltaikanlage auf dem Dach mit dem Heimspeicher durch eine DC-Verbindung vernetzt wird, um Wandlungsverluste zwischen Energieerzeugung und -speicherung zu vermeiden. Dies reicht bis zu parallelen AC- und DC-Netzen in Gebäuden (siehe Projekt Salisbury Square, Vermont (USA) oder das Circl Building, Amsterdam (NL)).



DC-Projekte werden hauptsächlich im **Neubau** realisiert, da die Technologie von Anfang an im Planungsprozess berücksichtigt werden kann. Im Bestand kommen die Maßnahmen in Deutschland aufgrund der (versteckten) Leitungen hinter dem Putz erst bei Leitungserneuerungen im Zuge einer Gebäudesanierung in Frage. In Deutschland ist es in Wohngebäuden unüblich, die Leitungen über den Putz zu verlegen, anders als in Industriegebäuden.



Für Gebäude, bei denen im (Um-)Bauprozess erst einmal nur Leerrohre und DC-Anschlussmöglichkeiten und Verbraucher geplant und verbaut werden, hat sich der Begriff **DC-ready** etabliert. In diesem Fall werden erst nach der Bauabnahme bzw. zu einem späteren Zeitpunkt DC-Kabel nachgerüstet, entweder durch einen neuen Bauauftrag oder ggf. im Zuge eines Forschungsprojektes. Je nach Gebäudetyp ist es einfacher, Leerrohre im Bauprozess einfach einzuplanen, um später einen größeren Gestaltungsspielraum zu haben. Einzelne Gebäudetypen wie beispielsweise Bürogebäude haben den Vorteil, dass durch eine abgehängte Decke die Elektrokabel weiterhin zugänglich sind und so einfacher ergänzt oder ausgetauscht werden können.

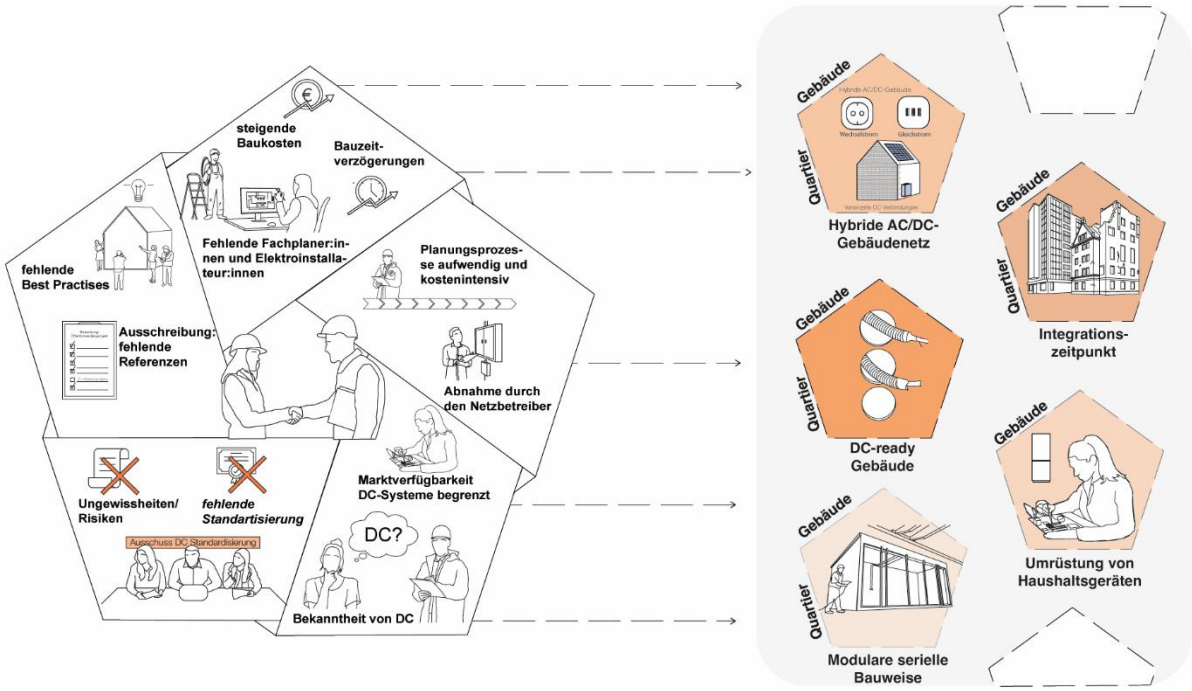


Abbildung 25: Herausforderungen bei der Integration von DC-Netzen in Gebäuden und sich daraus entwickelte Ansätze (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen)

2.6.3 Analyse von Quartiers- und Gebäudetypologien zur Definition von Parametern für die Modellierung in Use-Cases

Ziel des Arbeitspaketes war die Analyse von Quartiers- und Gebäudetypologien zur Definition von Parametern für die Modellierung in Use-Cases. Hierzu wurden Literaturanalysen zu verschiedenen Quartieren, stadtmorphologischen Strukturen und weiteren Teilaspekten durchgeführt. Die Ergebnisse der Literaturanalyse ergaben elf verschiedene Stadtraumtypen [101], die im Bezug zu ihrer Entstehungszeit und ihrem energetischen Potenzial näher analysiert wurden.

Folgende Stadtraumtypen wurden dabei kategorisiert und in Steckbriefen hinsichtlich ihrer Charakteristika Potenziale ausgearbeitet:

1.Vorindustrielle Stadt / Altstadt, 2.Innerstädtische Baublöcke der Gründer- und Vorkriegszeit, 3.Wiederaufbau-Ensembles der 50er-Jahre, 4. Dörfliche und kleinteilige Strukturen, 5. Werks- und Genossenschaftssiedlungen der Gründer- und Vorkriegszeit, 6. Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der 50er-Jahre, 7. Hochhaussiedlungen der 70er-Jahre und Plattenbausiedlungen in den neuen Bundesländern, 8. Geschosswohnungsbau seit den 60er-Jahren, 9. Einfamilienhausgebiete, 10. Gewerbe- und Industriegebiete, 11. Zweckbaukomplexe und öffentliche Einrichtungen Büro- und Infrastrukturkomplexe, Einkaufszentren, Freizeitanlagen. Es erfolgte eine Anwendung der Stadtraumtypen auf die Aachener Innenstadt. Diese sind in Abbildung 26 dargestellt.

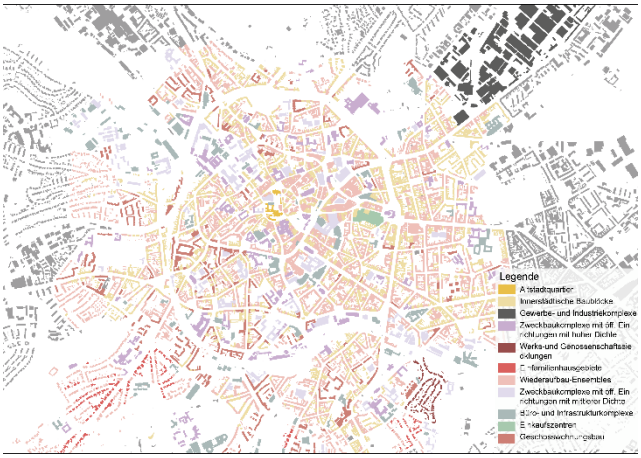


Abbildung 26: Stadtraumtypen in der Aachener Innenstadt (eigene Darstellung nach Mohamad Alkhabaz, 2022)

Die Stadtraumtypen weisen unterschiedliche Potenziale hinsichtlich der Sanierung, Strom- und Wärmeerzeugung auf. Das Solarpotenzial hängt unter anderem von der Bebauungsdichte des Stadtraumtyps, von Einschränkungen durch komplizierte Dachformen, Verschattungseffekten von Dachaufbauten und von einer höheren Gestaltungssensibilität ab. Generell bieten die ermittelten Stadtraumtypen eine gute Voraussetzung für die solaraktive Nutzung. Weitere Parameter wie die bauliche Nutzung, Eigentumsverhältnisse und Wohnformen, die Bebauungsdichte, die Nutzungsklassifizierung sowie sozio-demographischen Merkmalen der Bewohnerschaft charakterisieren die einzelnen Stadtraumtypen.

Zudem wurden auf der Gebäudeebene prototypisch drei Szenarien (Ausgangslage, Hybrides AC-DC-Netz und DC-Konfiguration) für ein Einfamilienhauses, welches eine Photovoltaik (PV)-Anlage auf dem Dach als Energieproduzenten, eine E-Ladestation für ein Elektroauto und einen elektrischen Energiespeicher aufweist, erarbeitet und aufgezeigt. In den meisten Fällen besitzen die Personen, die in einem Einfamilienhaus wohnen, auch das Gebäude. Dies führt dazu, dass diese auch in die Immobilie investieren. Die energetischen Eigenschaften eines Einfamilienhauses sind stark von der Bausubstanz abhängig. Für den Energieverbrauch ist neben der Bausubstanz auch der energetische Bedarf durch die jeweilige Haushaltsorganisation von Bedeutung. Dieser kann sich je nach Nutzungsverhalten der Bewohnenden unterscheiden. Grundsätzlich sind Einfamilienhäuser energetisch betrachtet weniger effizient als Mehrfamilienhäuser. Dies liegt zum Beispiel an einem ungünstigeren Verhältnis von Oberflächen zu Volumen.

Typische Geräte (Gleichstrom) bei einer Wohnnutzung: Smartphones, Smart TVs, Hifi-Anlage, Telefon, Laptops, batteriebetriebene Haushaltsgeräte, Photovoltaikanlagen, Elektroautos, LED-Beleuchtung, Stromspeicher, Klimaanlage, Wärmepumpe

Typische Geräte (Wechselstrom) bei einer Wohnnutzung: Kaffeemaschine, Waschmaschine, Kühlschrank, Küchenmaschine, Waffeleisen, Fön, Backofen, Spülmaschine

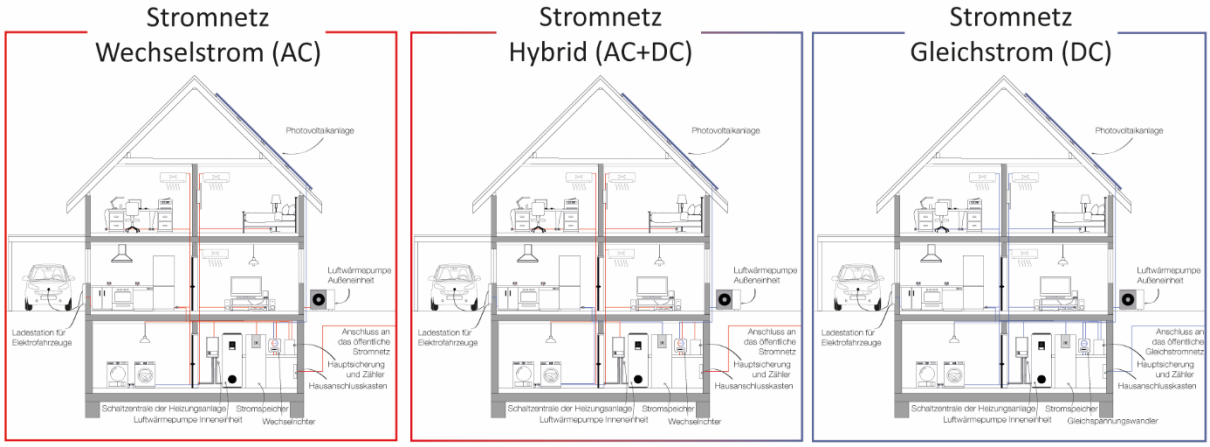


Abbildung 27: Einfamilienhaus Szenarien (AC, AC/DC, DC) (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen)

Das **erste Szenario** stellt den derzeit überwiegend vorkommenden Fall eines auf Wechselstrom (AC) basierenden Hausnetzes und öffentlichen Netzes dar. In diesem Szenario wird der erzeugte Gleichstrom (DC) der PV-Anlage mithilfe eines Wechselrichters in Wechselstrom umgewandelt, der Wechselstrom zu den jeweiligen Energieverbrauchen geleitet, wo dieser für die verschiedenen DC-Energieverbraucher (Laptop, LED-Lampe, Akku eines Elektrofahrzeugs, Elektrospeicher, etc.) wieder in Gleichstrom umgewandelt wird und dabei Wandlungsverluste entstehen. Das **zweite Szenario** weist immer noch ein öffentliches und hausinternes Wechselstromnetz auf, jedoch wurde die PV-Anlage mit dem Energiespeicher durch ein DC-Stromkabel über einen Gleichstromrichter gekoppelt, um Umwandlungsverluste zwischen den beiden Anwendungen zu vermeiden. Große Verbraucher wie die E-Ladesäule sind ebenfalls an das DC-Hausnetz angeschlossen. Im **dritten Szenario** sind das Hausnetz und das öffentliche Netz zu einem Gleichstromnetz umgewandelt worden. Zudem ist eine Umrüstung der bislang auf Wechselstrom funktionierenden Geräte zu Gleichstromgeräten erfolgt. Das öffentliche AC-Netz ist aus Kapazitätsengpässen um ein DC- Microgrid ergänzt oder ersetzt worden, welches einen Energietransfer im Quartier ermöglicht.

Aus den Erkenntnissen der Analyse der Quartierstypen und einer Literaturrecherche wurden Use-Cases für DC-Infrastrukturen im urbanen Kontext ermittelt. Diese sind in der nachfolgenden Graphik zusammengestellt. Use-Cases werden dabei als Anwendungsfälle betrachtet bei denen DC schon eingesetzt wird oder die ein großes Potential als DC-Anwendung bieten:

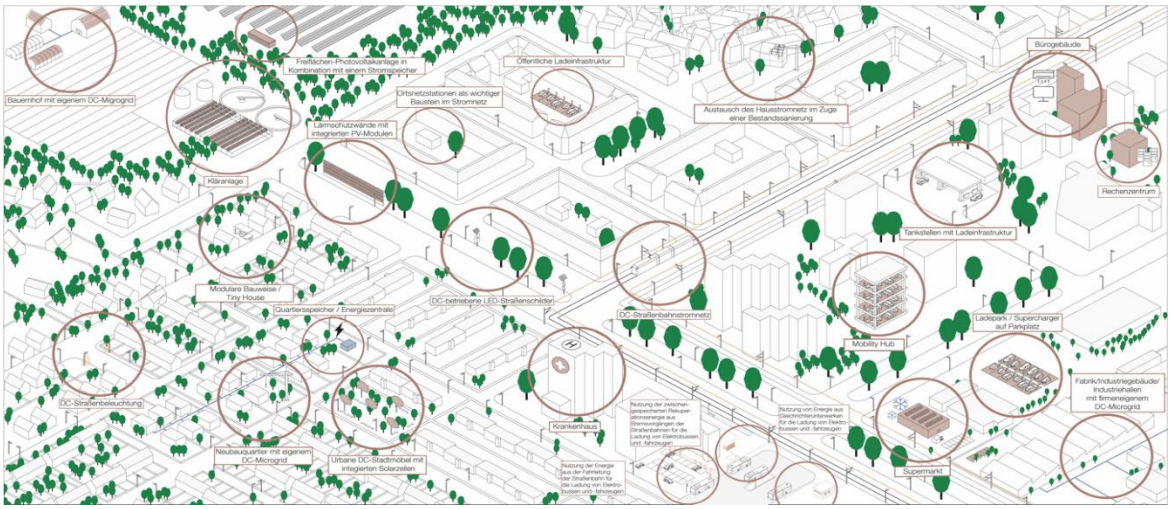
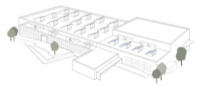
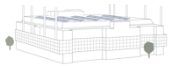


Abbildung 28: DC-Use-Cases im urbanen Raum (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen)

Nachfolgend wird auf einzelne Use-Cases genauer eingegangen:



Fabrik/Industriegebäude/Industriehallen: viele Energieumsätze, Rekuperation, viele Vorteile von DC umsetzen, Gebäudetyp ermöglicht einfacher und schneller Renovierungsarbeiten (parallele Leitungen dazulegen, Stromschienen umfunktionieren)

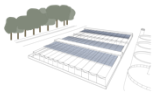


Rechenzentrum: hoher Energieumsatz, IT-Geräte (z. B. Server), Klimageräte und Beleuchtung benötigen Gleichstrom, Senkung der Verluste und Energieverbrauch durch Gleichstrom

Bürogebäude: viele DC-Verbraucher (Laptops, Beleuchtung, Klimageräte, …), bei der Nutzung eigener PV-Kapazitäten, weniger Wandlungsverluste

Mobility Hub: Der Ausbau der E-Mobilität und dem damit verbundenen Ladepunkteausbau in bspw. Parkhäusern kann ein Ansatz für das Zusammendenken von (DC-) Ortsnetzstation und DC-Technologien (wie Ladeinfrastruktur) und Photovoltaikanlagen auf/in Parkhäusern/Mobilitätsstationen sein. Energieinfrastrukturen + Speicher [102]

Supermarkt ein Großteil des Stromverbrauchs geht von den Kälteanlagen und der Beleuchtung aus. Dach und Parkplatzfläche bietet PV-Potenzial + Ladeinfrastruktur für Kunden



Kläranlagen mit PV-Systemen auf den Betriebsgeländen. PV-Anlagen, die aus der EEG-Förderung bald herausfallen, bieten die Möglichkeit, über Batteriespeicher auf dem Betriebsgelänge nachzudenken und Energie aus PV-Anlagen zu speichern

Bauernhof (Landwirtschaft/Gewächshäuser): Stromerzeugung durch Photovoltaik auf Gewächshaus oder auf Dachkonstruktion über Agrarfläche, Verteilung Strom über DC-Microgrid, Nutzung Strom für LED-Beleuchtung, Betrieb Bewässerungsanlage mit Gleichstrom

DC-Straßenbeleuchtung: LED-Beleuchtung + Gleichstrom -> Verringerung Umwandlung

Öffentliche Ladeinfrastruktur: DC-Ladestationen für schnelleren Ladeprozess, Fahrzeugakku ebenfalls gleichstrombasiert, Stromumwandlung im on-board-Charger nicht notwendig, direkte DC-Übertragung zwischen Ladestation und Fahrzeugbatterie

DC-betriebene Straßenbahn, die sich in einigen Städten bereits vorfinden lassen, können als energetischer Gunstraum für DC-Technologien fungieren, z. B. zur Nutzung des Stromnetzes von Straßenbahnsystemen zur Förderung von E-Mobilität [103]

DC-Microgrid auf Quartiersebene: Energieunabhängigkeit und Widerstandsfähigkeit, Möglichkeit des Energy Sharings im Quartier

„Second DC-Grid“: neben bestehendem DC-Netz, Ergänzung eines DC-Netzes -> zusätzlich Kapazitäten zum bestehenden Netz, Anschluss PV und Wärmepumpen, Ladestationen für E-Autos und E-Fahrräder, 5G-Sender, Laternen, etc. ans DC-Netz, Quartiersansatz: Personen ohne Zugang zu eigener PV-Anlage profitieren durch DC-Netz und deren angeschlossenen Verbrauchern wie Ladestationen von dem im Quartier/Nachbarschaft erzeugten Strom

2.6.4 Aufbau gestaltgebender Prinzipien für die stadträumlich relevanten DC-Technologien

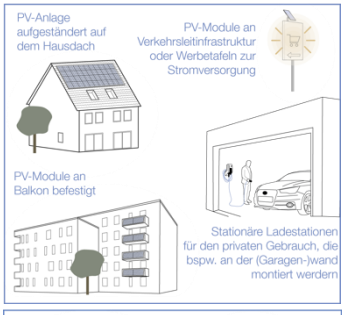
Ziel des Arbeitspaketes war die Untersuchung von möglichen Integrationsansätzen von relevanten DC-Energieinfrastrukturen, bspw. in verdichteten innerstädtischen Bereichen. Als städteräumlich relevante und sichtbare DC-Technologien wurden dabei Photovoltaikanlagen (Energieerzeugung), Batteriespeicher auf Quartiersebene (Energiespeicher) und Ladestationen (Verbraucher) betrachtet.

Photovoltaik hat sich als Technologie zur Energieerzeugung (DC) bereits von der Nische in den Markt entwickelt und ist ein fester Bestandteil von Gebäuden und durch gesetzliche Bestimmungen der jeweiligen Bundesländer für Neubauten verpflichtend geworden. In Nordrhein-Westfalen beispielsweise gilt eine Solarpflicht für alle neuen Nichtwohngebäude seit 2024, für neue Wohngebäuden ab 2025, und für Dachsanierungen aller Bestandsgebäude ab 2026, einzelne Ausnahmen sind dabei vorhanden. Die elektrische Ladeinfrastruktur stellt einen zentralen Baustein für die Umsetzung der Energiewende im Verkehrssektor dar. Ladeinfrastrukturen finden neben dem privaten Einsatz auch Anwendung im öffentlichen Raum, dort schreitet der Ausbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur voran. Mit dem voranschreitenden Ausbau erneuerbarer Energien werden zudem Energiespeicher immer wichtigere Infrastrukturen für die Energiewende, um dem zeitlichen Versatz der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien und Energieverbrauch zu begegnen. Die Speicher erfüllen nicht nur ihre technische Funktion, sondern können auch zur Aufwertung von Brachflächen, zur Schaffung neuer Orte im Quartier und zur Sensibilisierung für neue Technologien genutzt werden.

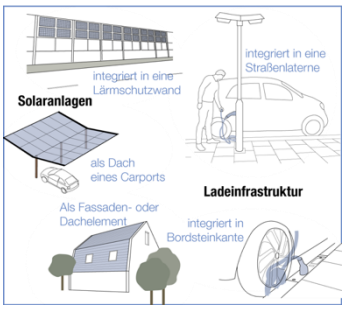
Im Laufe der Projektlaufzeit wurde eine große Bandbreite an konkreten Entwürfen zu Umsetzungsmöglichkeiten, Szenarien und Visionen zur räumlichen Einbettung für die städteräumlich relevanten DC-Technologien (Photovoltaik, Batteriespeicher und Ladesäulen) erarbeitet. Durch die Einbindung von Studierenden konnten diese für das Thema DC-Infrastrukturen sensibilisiert und gleichzeitig eine hohe Anzahl an verschiedenen Ansatzpunkten realisiert werden. So konnten mittels einer explorativen research-by-design-Methodik räumlich wirksame Antworten auf die Frage der Integration von Energieinfrastrukturen in bspw. verdichtete innerstädtische Bereiche untersucht werden. Im Projektzeitraum wurden fünf Lehrveranstaltungen zu dem Thema Gebäude/Quartier und Energie durchgeführt, dabei wurden insgesamt 30 Entwürfe zu Umsetzungsmöglichkeiten, Szenarien und Visionen zur räumlichen Einbettung für die städteräumlich relevanten DC-Technologien erarbeitet. Aus diesen wurden verschiedene gestaltgebende Prinzipien abgeleitet. Es lassen sich zwei Ansätze erkennen: Zum einen dem Ansatz, die städteräumlich relevanten DC-Technologien in bzw. an Gebäuden oder Infrastrukturen wie Laternen zu integrieren oder zu addieren. Zum anderen der Ansatz, dass die städteräumlich relevanten DC-Technologien nicht zu etwas ergänzt werden, sondern als eigenständige Infrastruktur bestehen und verschiedenen Ansätzen folgen.

Integration in Gebäude/bestehende Infrastruktur*:*

Addition: Städteräumlich relevante DC-Technologien werden an Gebäuden oder Infrastrukturen wie Laternen addiert, dies erfolgt meist im Bestand oder als nachträgliche Ergänzung. Infrastrukturen werden zu bestehenden Gebäuden/Bauteilen addiert. Beispiele dafür sind die Photovoltaikmodule, die parallel bzw. auf der bestehenden Dacheindeckung oder an einer Balkonbrüstung mithilfe von Balkonhaken und Modulklemme montiert werden. Weitere Ansätze bieten aufgeständerte PV-Module auf Garagen oder Flachdächern.



Integration/Substitution: Die DC-Infrastrukturen ersetzen Bauteile oder werden in eine bestehende Infrastruktur eingesetzt, wodurch der optische Eindruck der Anlage reduziert wird. Dies erfolgt oftmals im Bestand im Zuge einer Sanierung oder im Neubau. Zum Beispiel werden Photovoltaikmodule in die Dacheindeckung /Fassade eingelassen bzw. ersetzen diese und stellen die Dacheindeckung/Fassadenmodule oder Verschattungselemente dar.



Eigenständige Infrastruktur:

Technologie: Der Fokus in diesem Ansatz liegt auf der Technologie selbst. Diese wird als eigenständige Infrastruktur im Raum aufgestellt/verwendet. Die Funktion der Anlage steht dabei im Vordergrund. Ein Beispiel dafür sind Freiflächenphotovoltaikanlagen oder Stromspeicher, deren Hülle ein Schiffscontainer darstellt.

Mixed-Use-Ansätze: Hierbei findet eine Kombination der Infrastruktur mit einer weiteren Nutzung statt, dadurch lässt sich die Flächennutzung besser ausnutzen, z. B. weil Freiflächenphotovoltaikanlagen mit einer landwirtschaftlichen Nutzung (Pflanzen oder Tiere) kombiniert werden. Die Module dienen dabei zusätzlich als Sonnenschutz.

Design: Dieser Ansatz zielt auf die Gestaltung der Infrastruktur ab, diese erhält ein (wiedererkennbares) Design bzw. fügt sich durch ihr Design in den Raum ein. Ein Beispiel hierfür ist die Gestaltung der Hülle eines Quartiersspeichers mit einem ansprechenden Design. Einige der Energiespeicher, die im Zuge der Neighbourhood Battery Initiative in Melbourne, Australien entstanden sind, haben eine durch einen Künstler gestaltete Hülle. Ein anderes Beispiel ist die Gestaltung von Ladesäulen durch das Firmendesign und -logo des Betreibers.

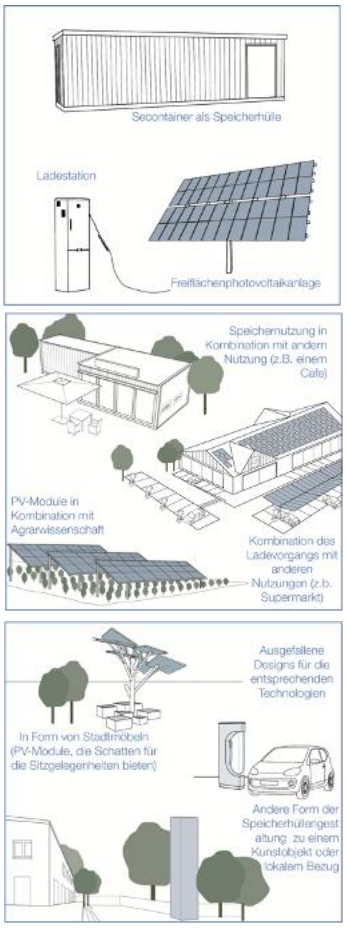


Abbildung 29: Abbildungscollage zu Formen der städtebaulichen Integration von DC-Technologien

2.6.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

In diesem Arbeitspaket wurden die Zwischenergebnisse aus AP6 iterativ in den Gesamtansatz des Projektkonsortiums integriert. Ziel war es, die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und die praktische Relevanz der raumbezogenen Kriterien kontinuierlich sicherzustellen. Workshops zur Anforderungsaufnahme und Modellbildung sowie eine regelmäßige Ergebnisdiskussion mit den FEN-Partnern trugen dazu bei, verwertbare Modelle, Methoden und Erkenntnisse für die integrierte DC-Technologieentwicklung und -diffusion zu generieren. Durch die quartalsweisen veranstalteten Workshops sowie die monatlichen Treffen der beteiligten wissenschaftlichen Projekt-Mitarbeiter:innen konnten Ergebnisse in das Gesamtkonzept einfließen. Auf der Grundlage, der gemeinsam mit AP2 und AP7 durchgeführten Expert:innen-Interviews wurden die fünf identifizierten Mechanismen (Framing, Exploration, Normierung, Akzeptanz und Imitation), die zur Niche Readiness beitragen (siehe AP1), weiter ausgearbeitet. Die Mechanismen wurden in einen ersten Modellansatz überführt, der bereits in verschiedenen Papern veröffentlicht wurde (siehe [72], [73]). Ferner konnte im Verbund mit AP2 ein Fachartikel erarbeitet werden, der zentrale bauliche Herausforderungen bei der Umsetzung von DC-Systemen thematisiert und voraussichtlich im letzten Quartal des Jahres 2025 veröffentlicht werden wird [104].

In Kooperation mit AP5 wurde im Rahmen des vom BBSR geförderten und durch die Fakultät für Architektur der RWTH Aachen ausgerichteten „Zukunft Bau Pop-up Campus“ die Lehrveranstaltung Energie-Hub: Eine neue urbane Nische durchgeführt. Aus dem Projekt ist ein Buchbeitrag „Energy-

Hub - eine neue urbane Nische“ im Rahmen des Buches „Zukunft Bau Pop-up Campus Aachen“ erschienen [105]. Die Ergebnisse wurden während der abschließenden Festivalwochen des Pop-up Campus im Rahmen einer Ausstellung und einer Podiumsdiskussion der Öffentlichkeit präsentiert. Der Zukunft Bau – Pop-up Campus Aachen ermöglichte, als niederschwelliger Experimentierraum, die Betrachtung räumlicher Dimensionen wissenschaftlicher Fragestellungen aus dem Forschungscampus (FEN).

Im Rahmen des Projektes DC-Sozio-Ökonomie wurde ein internationales Netzwerk mit Wissenschaftler:innen und diversen Institutionen in Ozeanien (Monash University und Forschungsprojekt FAN (Future Architecture of the Network)) und den USA aufgebaut und durch verschiedene Dienstreisen im Projektzeitraum intensiviert. Durch den Austausch mit Wissenschaftler:innen und diversen Institutionen vor Ort wurde deutlich, dass vergleichbare Probleme in der Netzinfrastruktur durch aktuelle und künftige Kapazitätsprobleme aufgrund steigender Ausbauzahlen an PV und Ladestationen bestehen, für die es Lösungsansätze braucht. Auf der Grundlage der Treffen konnten umfangreiche Kooperationen mit Akteuren aus Forschung aufgebaut werden. Aus dem Austausch und der Kooperation mit Wissenschaftler:innen dem Forschungsprojekt FAN ist ein Konferenzbeitrag für die IECON 2024 von AP2 und AP6 zusammen mit dem Workstream 4 des FAN-Konsortiums entstanden (siehe [80]).

2.7 Akzeptanzkartographie von DC-Technologien

Ziel des Arbeitspaketes war die Identifizierung akzeptanzhemmender und -fördernder Faktoren, die das Handeln der Akteure beeinflussen. Im Berichtszeitraum wurden AP 7.1-7.5 wie geplant bearbeitet und abgeschlossen. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse werden im Folgenden pro Unterarbeitspaket zusammengefasst.

2.7.1 Entwicklung Gesamtkonzept und Erhebungsansatz

Ziel von AP7.1 waren Beiträge zur kooperativen Entwicklung des Erhebungsansatzes. Dies umfasste u.a. die Identifizierung der exemplarisch zu betrachtenden DC-Technologien (Energieerzeugung, Energieübertragung, DC-Applikationen) und Stakeholder für die Akzeptanzstudien sowie terminologische Klärungen und die Erarbeitung eines Gesamtbilds.

Durch kontinuierliche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in regelmäßigen Gesamtmeetings sowie in bilateralen Diskussionen wurde sichergestellt, dass projektintern eine gemeinsame Perspektive auf Niche Readiness für DC-Technologien entwickelt wurde. Konkret wurden vier Maßnahmen eingesetzt, um die Arbeiten an Gesamtkonzept und Erhebungsansatz fortzuführen: Workshops mit Vertreter:innen aus der Industrie, projektinterne Workshops, Expert:innen-Interviews und Kooperationen mit Forschungsinstitutionen.

Workshops mit Vertreter:innen aus der Industrie: In einer Workshopreihe wurden zusammen mit den Projektpartnern, den technischen FEN-Projekten und Industrievertretern die Themen Netzbetrieb und Technologieentwicklung vertieft diskutiert. Erhoben wurden Anforderungen an DC-Technologien (z.B. Kosten-Nutzen-Verhältnis, Platzbedarfe) in verschiedenen Kontexten (z.B. auf Gebäude- oder Netzebene), mögliche Barrieren in der Technologiediffusion (z.B. die Rohstoffkrise) und Akzeptanzfaktoren bei der Umsetzung einer DC-Wende (z.B. Auswirkungen auf das Straßenbild). Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für eine differenzierte Sicht auf Einflussfaktoren der Nischenentwicklung von DC-Technologien und stellten eine konsistente Perspektivenentwicklung über alle FEN-Projekte hinweg sicher. Der Projektpartner Textlinguistik und Technikkommunikation war in den Workshops vertreten, um die Sicht auf DC-Akzeptanz zu repräsentieren und in die Diskussion

einzubringen. Hierzu wurden die Workshops aufwendig vor- und nachbereitet. Die oben beschriebenen Ergebnisse wurden in projektinternen Workshops aufgegriffen und fortgeführt.

In projektinternen Workshops wurden relevante Aspekte des Niche Readiness-Ansatzes vertieft bearbeitet (u.a., Nischentypisierung, Shieldingmaßnahmen, Vergleiche zwischen DC-Technologien). Der Projektpartner Textlinguistik und Technikkommunikation brachte sich sowohl in der Konzeption, Vorbereitung und Durchführung als auch in der Auswertung der Workshops ein. Die Workshops ermöglichten eine geteilte Sicht auf den Niche Readiness-Ansatz sowie auf relevante Teilaspekte (z.B. Klärung von Fachbegriffen wie ‚soziale Praktiken'). Insbesondere wurden hier Akzeptanzaspekte in die Diskussion eingebracht, in Hinsicht auf Einflussfaktoren aus der Sicht der vertretenen Disziplinen geprüft und für die Akzeptanzkartographie in AP7.4 aufbereitet. Die Ergebnisse der Workshops wurden in Publikationen und Vorträgen veröffentlicht.

Im zweiten Projektjahr wurde von mehreren Projektpartnern eine gemeinsame Interviewstudie mit Teilnehmenden aus Forschung und Industrie initiiert. Hierzu wurden passende Interviewees recherchiert und akquiriert sowie individualisierte Interviewleitfäden in Hinsicht auf die Expertisegebiete der Teilnehmenden konzipiert, um durch die kombinierte Sichtweise auf den Gegenstand der Nischenentwicklung von DC-Technologien Synergien zu schaffen. Das Thema ‚Akzeptanz von DC-Technologien' war in allen Interviews Teil der Diskussion. Ergebnis sind vielfältige, differenzierte Akzeptanzfaktoren aus der Sicht von Entscheidern (z.B. Anforderungen an die Amortisierung und notwendige Erfahrungswerte im Umgang mit DC), die in die projektinternen Workshops einflossen.

Die vierte Maßnahme umfasste den Aufbau von Kooperationen mit nationalen und internationalen Forschungsinstitutionen, die sich mit dem Thema ‚Technologieentwicklung' in Nischen befassen. Hervorzuheben ist hier zum einen der Austausch mit dem Monash Energy Institute der Monash University (Melbourne, Australien): Es wurden hierzu auf der International Sustainability Transitions Conference (IST) die Arbeiten des Partners TLTK zum Thema ‚Innovation Communication in Transitions to Sustainable Direct-Current Technologies' vorgestellt [106] und zusammen mit einem Vertreter des AP2 ein Vortrag gehalten, in dem der Entwicklungsansatz und der Stand des Niche Readiness Level Model vorgestellt wurden [75]. Zum anderen wurden während eines Auslandsaufenthaltes beim IC² Institute der University of Texas (Austin, USA) die Anforderungen an Energy Communities auf Basis lokaler Wertesysteme untersucht und daraus Hinweise für die Akzeptanz von DC-Technologien abgeleitet [107].

2.7.2 Akzeptanzerhebung für ausgewählte DC-Technologien

Ziel des APs war die empirisch basierte Identifizierung akzeptanzhemmender und -fördernder Faktoren (Argumente, Wissen, Rolle, etc.), die das Handeln relevanter Akteure beeinflussen. Hierzu wurde zunächst anhand einer Literaturrecherche eine systematische Übersicht über DC-Technologien sowie gängiger Akzeptanzkriterien (Nutzen-Risiko-Relation) erstellt (siehe Abb. 30).

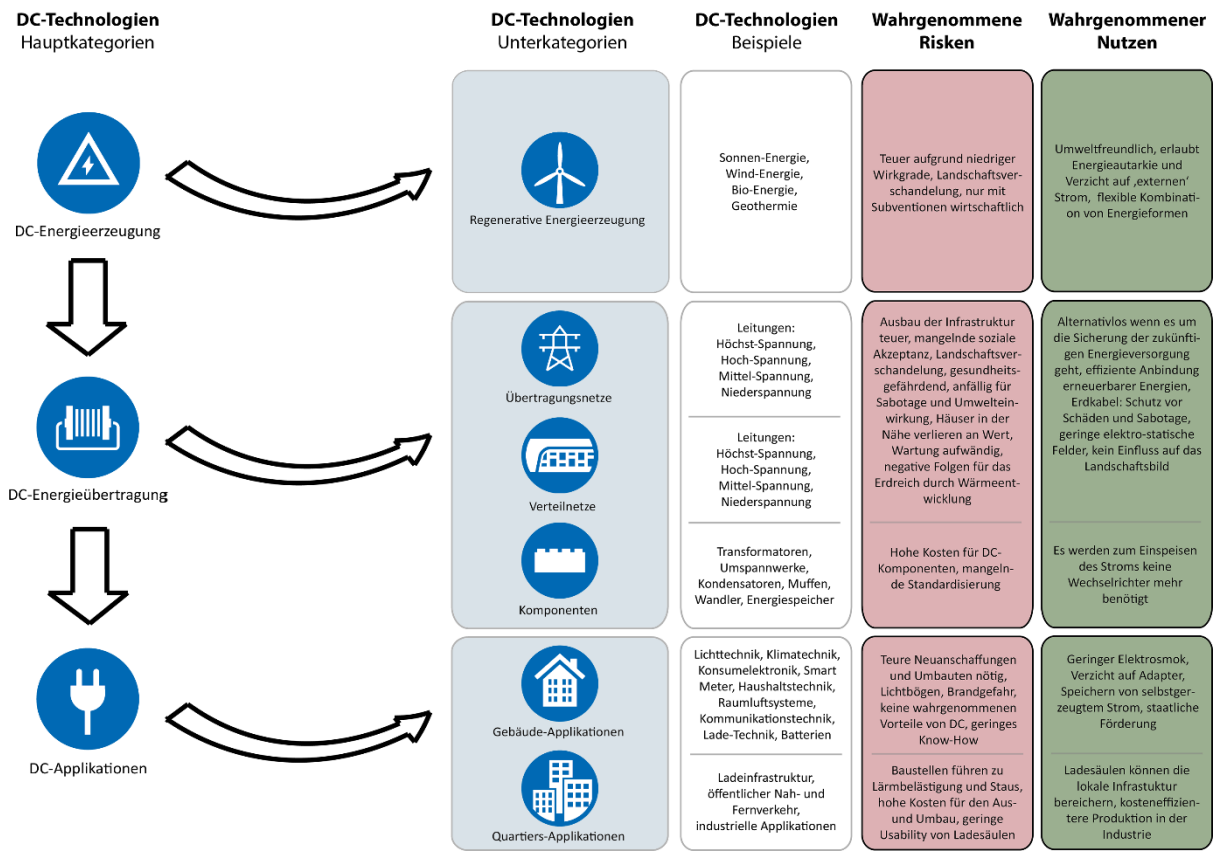


Abbildung 30: Übersicht zu DC-Technologien

Um die Akzeptanz ausgewählter DC-Technologien zu untersuchen, wurde die Methode des Akzeptanzminings entwickelt, verfeinert und erprobt. Mit dieser Methode lassen sich akzeptanzrelevante Aspekte in großen Korpora identifizieren. Die durchgeführten Arbeiten und ihre Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Entwicklung des Akzeptanzminings: In einer umfangreichen Text-Mining-Studie wurde die Akzeptanz ausgesuchter DC-Technologien (z.B. Ladeinfrastruktur für elektrische Fahrzeuge, Solid State Transformatoren) in unterschiedlichen Stadien der Nischenentwicklung (z.B. frühe Konzeptionsphase, Technologiediffusion nach Auflösung der Nische) untersucht. Die Studie fokussierte die Frage, welche Erkenntnisse sich aus öffentlichen Diskussionen in sozialen Medien für die Nischenentwicklung gewinnen lassen. Dabei wurde untersucht, welche sozioökonomischen Faktoren die erfolgreiche Diffusion von Gleichstromtechnologien aus der Nische in den Massenmarkt bestimmen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Öffentlichkeit in sozialen Medien Argumente für und gegen eine Technologie aushandelt und dabei ihre eigenen Erwartungen im Laufe der Nischenentwicklung formt. Die Maßnahmen der Nischenakteure (Shielding, Nurturing, Empowerment) wurden im Hinblick auf diese Erwartungen kritisch untersucht. Weichen die Erwartungen der Nischenakteure und die der Öffentlichkeit signifikant voneinander ab, kann die öffentliche Wahrnehmung negativ beeinflusst werden. Insbesondere in Hinblick auf die Ladesäulentechnologie deuten die Daten teilweise auf eine ablehnende Haltung sowie auf die Bereitschaft hin, die Technologie aktiv zu boykottieren. Hierfür werden verschiedene Schlüsselargumente angeführt (z.B. Nachteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit gegenüber dem öffentlichen Personennahverkehr, mangelnde Reife des Ladeinfrastrukturausbaus für die intendierte Einstellung des Verbrennungsmotors), die bereits bei der Nischeninitiierung erhoben, kontinuierlich gemonitort und in die Nischenentwicklung einbezogen werden sollten. Der vom Projektpartner Textlinguistik und Technikkommunikation entwickelte Ansatz des ‚Acceptance Mining'

bietet Hinweise für die Gestaltung von Nischen in gesellschaftlich akzeptierte Richtungen: Der Ansatz zeigt, welche Maßnahmen zur Nischenentwicklung (Abschirmung, Förderung, Empowerment) im Fokus der öffentlichen Diskussion stehen und wie diese Maßnahmen bewertet werden. Er ermöglicht zudem, die öffentliche Wahrnehmung von Nischenentwicklungsmaßnahmen in verschiedenen Phasen der Nische und Wendepunkte in Stimmungen zu untersuchen. Die qualitative Analyse der Nutzerkommentare liefert Argumente für diese Wahrnehmung. Der Ansatz liefert vielfältige Hinweise für die Bewertung von Nischen und der in ihnen entwickelten Technologien, insbesondere zu wahrgenommenen Bewertungsaspekten, Vergleichsgrößen und Bewertungsmaßstäben [58]. Solche Informationen bilden die Grundlage für die Kommunikation und Kooperation zwischen Nischenakteuren und der Öffentlichkeit auf Augenhöhe. Der Ansatz und die Ergebnisse der Studie wurden auf der International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2021, siehe [108]) vorgestellt, in einer umfangreichen Folgestudie fortgeführt und in einer Journalpublikation veröffentlicht [109].

Weiterentwicklung und Erprobung des Akzeptanzminings: In dieser Studie wurde eine Kombination aus Text Mining und Akzeptanzforschung als methodischer Ansatz ("Acceptance Mining") entwickelt, um die Entwicklung innovativer Technologien in Nischen zu erleichtern. Am Beispiel von Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge wird der Ansatz an einer Stichprobe von über 20.000 Nutzerkommentaren aus sozialen Medien und Diskussionsforen erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass Acceptance Mining in allen Phasen der Nischenentwicklung wertvolle Erkenntnisse über die Anforderungen der Öffentlichkeit liefert, die eine sozialverträgliche Gestaltung von Nischen ermöglichen. Insbesondere deckt die Methode Anforderungen und Risiken von Nischenentwicklungsmaßnahmen wie Abschirmung, Pflege und Ermächtigung von Nischen aus Sicht der Öffentlichkeit auf. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf die Potenziale des Acceptance Mining für die Entwicklung von Innovationen in Nischen sowie auf seine Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten diskutiert. Acceptance Mining und seine Anwendung auf eine Fallstudie sind vor allem für Forschende und Akteure aus dem praktischen Feld interessant, die sich mit der Entwicklung von Nischen beschäftigen; die Ergebnisse der Studie liefern wertvolle Erkenntnisse für Fachleute, die sich mit der Entwicklung von Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge beschäftigen.

2.7.3 Entwicklung einer Akzeptanzkartographie

Ziel dieses Unterarbeitspakets war die Erarbeitung einer strukturierten Übersicht über akzeptanzrelevante Phänomene und Argumente für DC-Technologien in der Nischenentwicklung. Hierzu wurden die Ergebnisse aus AP7.2 vertieft durch Studien zur Akzeptanzbestimmung des Einsatzes von DC in Gebäuden, in lokalen Communities und in der Innovationskommunikation. Die Ergebnisse lieferten wesentlichen Input für die Erstellung der Themenlandschaften (AP7.4). Die Studien und ihre Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Akzeptanzwahrnehmung von DC-Technologien in Gebäuden: Um zu untersuchen, wie die Diffusion von DC-Gebäuden gefördert werden kann, muss analysiert werden, wie die Technologie öffentlich beworben wird, um das Bewusstsein und die Akzeptanz zu erhöhen. Der Ansatz des "strategischen Nischenmanagements" (SNM) besagt, dass eine erfolgreiche Nischenentwicklung davon abhängt, dass die Akteure Erwartungen an die Technologie formulieren und diese in Narrative einbetten, die die Marktdiffusion rechtfertigen [110]. Strategien zur Kommunikation einer sich abzeichnenden Zukunftsvision sind daher für die Gestaltung von Nischenentwicklungsprozessen notwendig – insbesondere in Kontexten relativer Unsicherheit wie bei der Nischeninitiierung, jedoch eher selten Gegenstand des SNM. In einer Studie wurde untersucht, wie DC-Technologien öffentlich kommuniziert werden (insbesondere bezogen auf Nachhaltigkeit) und welche Erkenntnisse sich daraus für Technologieakzeptanz, -diffusion und -entwicklung in Nischen ableiten lassen. Die gewählte Methodik

kombinierte eine qualitative Inhaltsanalyse von Informationsmaterialien mit Text-Mining-Methoden, um die Inhalte der Materialien im Hinblick auf werbliche Elemente (Tonalität der Texte, Worthäufigkeiten, Belege für Behauptungen, Angabe von Zeithorizonten für die DC-Diffusion, Verwendung von Expertenzitaten) zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Mehrheit der analysierten Artikel mit den Nachhaltigkeitspotenzialen von Gleichstromnetzen in einzelnen Gebäuden befasst – z. B. in Privatgebäuden (18,06 % der Auszüge), Gewerbegebäuden (14,57 %,), Industriegebäuden (10,74 %), Rechenzentren (6,39 %) und Net-Zero-Gebäuden (5,37 %). Das Potenzial von Gleichstromnetzen in Stadtvierteln, die mehrere Gebäudenetze verbinden und eine gemeinsame Energieerzeugung ermöglichen, wird in 7,16 % der Auszüge (23 Dokumente) beschrieben. Von solchen "Energiegemeinschaften" wird erwartet, dass sie die Energieeffizienz einzelner DC-Gebäude erhöhen und Hausbesitzern mit unzureichender Dachflächenausrichtung ermöglichen, an einer nachhaltigen Energienutzung teilzunehmen. Die Vorteile in Hinsicht auf Nachhaltigkeit werden genannt, aber selten erklärt. Die Erkenntnisse lassen Rückschlüsse auf Anforderungen an die akzeptanzfördernde Kommunikation von DC-Technologien in Gebäuden zu und ermöglichen Ansätze für die Gestaltung von Energie-Communities, die in der dritten Studie ergänzt wurden.

Akzeptanzwahrnehmung von Energietechnologien in lokalen Communities: In der dritten Studie wurde untersucht, inwieweit die Werte der Gemeinschaft und die Präferenzen der Bürger:innen bei der Verbreitung nachhaltiger Energietechnologien eine Rolle spielen. Drei texanische Gemeinden wurden mit einem Multi-Methoden-Ansatz untersucht, um die kommunalen Werte und Governance-Präferenzen in Bezug auf die Energienutzung zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass fünf grundlegende Werte die Wahrnehmung der Energienutzung in den Gemeinden beeinflussen: Wachstum, Unabhängigkeit, Nachhaltigkeit, bezahlbares Leben und Mobilität. Hinsichtlich der Präferenzen für die Steuerung wurden drei Formen der Beteiligung an kommunalen Prozessen ermittelt: Information, Kommunikation und Beteiligung an der Entscheidungsfindung. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Werte genutzt werden können, um die Erwartungen an nachhaltige Energien auszurichten und darauf bezogene Narrative zu gestalten. Um die oft "unsichtbaren" Energietechnologien für die Bürger greifbar, erlebbar und diskutierbar zu machen, sollten Demonstrationsprojekte (wie Energieinnovationszentren und Reallabore) als Instrumente zur Verankerung nachhaltiger Energien in einer Gemeinde in Betracht gezogen werden. Die Studie wurde während eines Auslandsaufenthalts beim IC² Institute der University of Texas in Austin von Herrn Dr. Digmayer durchgeführt und als Paper beim Journal ‚IEEE Transactions on Technology and Society' veröffentlicht [107]. Darüber hinaus wurden Erkenntnisse zur DC-Nutzung in einem Buchbeitrag mit Prof. Clay Spinuzzi und Dr. Gregory Pogue (beide University of Texas) veröffentlicht [111].

Innovationskommunikation von DC: Ein wichtiger Aspekt von Technologieentwicklungen in geschützten Räumen (Nischen) ist die Artikulation von Erwartungen durch die beteiligten Akteure. Solche Bemühungen erhöhen das öffentliche Bewusstsein für technologische Innovationen und ziehen weitere Akteure an. Bislang ist wenig erforscht, wie Akteure Gleichstromtechnologien kommunizieren, die als wesentliches Element einer nachhaltigen Energieversorgung anerkannt sind. In der vierte Studie [106] wurde untersucht, wie Visionen zu den Potenzialen von Gleichstromtechnologien und damit verbundene Erwartungen von Nischenakteuren kommuniziert werden. Die Studie stützte sich auf das Modell des strategischen Nischenmanagements, insbesondere auf Nurturing-Aspekte, die aus interagierenden Prozessen des sozialen Lernens sowie der Artikulation von technologischen Erwartungen und Visionen bestehen. Erwartungen tragen zur erfolgreichen Nischenentwicklung bei, wenn sie von vielen Akteuren geteilt werden, spezifisch und von hoher Qualität sind. Eine unklare Kommunikation von Erwartungen und Visionen kann die Vertrauensbildung und die Zufriedenheit mit den zwischen Nischenakteuren erzielten Ergebnissen beeinträchtigen. Um die kommunikativen Bemühungen von Nischenakteuren zur Artikulation von Visionen und Erwartungen zu untersuchen, greift die Studie auf den Ansatz der Innovationskommunikation zurück. Die

Innovationskommunikation untersucht, wie Unternehmen Produkt-, Prozess- und Dienstleistungsinnovationen intern und extern bekannt machen. Krugsberger [112] schlägt ein Innovationsprozessmodell vor, das definiert, wie Innovationen in Märkte diffundieren. Das Modell unterscheidet fünf Phasen: Eine Wissens-, Überzeugungs-, Entscheidungs-, Implementierungs- und Bestätigungsphase. Jede Phase stellt spezifische Anforderungen an die kommunikativen Aufgaben eines Unternehmens. Mittels Dokumentenanalyse wurden die Inhalte von 50 online veröffentlichten Artikeln und Dokumenten von Institutionen und Unternehmen untersucht, die an der Entwicklung von DC-Technologien beteiligt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die meisten kommunikativen Bemühungen auf die Wissensphase beziehen, in der die Verbreitung von Informationen über eine Innovation und deren Vorteile im Vordergrund steht. Um die Potenziale von Gleichstromtechnologien zu verdeutlichen, werden insbesondere drei Ansätze verwendet:

- Vergleich zwischen Wechsel- und Gleichstrom: Die Perspektive betont den traditionellen Wettbewerb zwischen Wechsel- und Gleichstrom, der um 1890 zugunsten des AC entschieden wurde. Es wird erwartet, dass diese historische Entscheidung überdacht und Gleichstrom in die bestehende Wechselstrominfrastruktur integriert wird, um die bekannten Nachteile von Wechselstrom zu kompensieren.
- Erläuterung von Marktentwicklungen: In dieser Perspektive entsprechen die bisher vorherrschenden Wechselstromtechnologien nicht mehr den aktuellen Anforderungen der Energieerzeuger und -verbraucher. Die Erwartung ist, dass DC-Technologien diese Lücke füllen können und somit als Zukunftstechnologie und als Enabler für andere technologische Entwicklungen (z.B. Industrie 4.0) fungieren.
- Fallstudien: In dieser Perspektive werden geplante oder umgesetzte DC-basierte Prototypen und die vorhergesagten oder erreichten Energieeinsparungen vorgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Ausweitung der Fallstudie auf größere Zusammenhänge der Branche erhebliche Vorteile bringen könnte.

In allen Ansätzen werden die Vorteile von Gleichstromtechnologien genannt, die sich je nach Anwendungsbereich unterscheiden: Verteilungsnetze, industrielle/gewerbliche/private Gebäude und die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (siehe Abb. 31).

Category	Total	Distribution Grids	Industrial Buildings	Commercial Buildings	Private Buildings	Charging Infrastructure
Efficiency	●	●	●	●	●	◑
Sustainability	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Stability	◑	●	◑	◔	◔	○
Flexibility	◑	◑	◑	◔	◔	●
Savings	◔	◔	◔	◔	◔	○
Integration	◔	◔	◔	○	○	○
Availability	◔	◔	◔	○	○	○

Legend
● Frequently discussed
◑ Partly discussed
◔ Rarely discussed
○ Not discussed

Abbildung 31: Häufigkeit der in Werbematerialien diskutierten DC-Vorteile

Die Ergebnisse zeigen mehrere Optimierungsmöglichkeiten auf: Es werden verschiedene Vorteile von Gleichstromtechnologien genannt, diese werden aber nicht für mögliche Zielgruppen kontextualisiert (z.B. in Bezug auf Nachhaltigkeit), mit Beispielen illustriert oder mit konkreten Zahlen untermauert (z.B. Kosteneinsparungen von Gleichstromhäusern). Nachteile von Gleichstromtechnologien werden nur selten erwähnt und nicht im Hinblick auf mögliche Lösungen diskutiert. Insbesondere die von der Öffentlichkeit wahrgenommenen Risiken (wie EMF-Felder) werden nicht angesprochen. Darüber hinaus werden in den analysierten Dokumenten nur sporadisch mögliche Entwicklungsszenarien für Gleichstromtechnologien im Hinblick auf notwendige Voraussetzungen und Zeithorizonte dargestellt. Würden solche Schwachstellen in der Kommunikation verbessert und mit werblichen Elementen angereichert (z.B. Einbeziehung von Experten), könnte ein Übergang zur DC-Nutzung erleichtert werden.

2.7.4 Entwicklung von Themenlandkarten für DC-Technologien

Ziel des AP7.4 war die Erarbeitung von Themenlandkarten für die Nischenentwicklung. Das Vorgehen adaptiert die Methode der Themenlandkarten. Erfasst werden Themen, die für die Nischenentwicklung von DC-Technologien für entscheidungsrelevante Gruppen relevant sind. Die Themenlandkarte umfasst Themendimensionen, Themenfelder und (gewichtete) Einzelthemen.

Die Erstellung der Themenlandschaft für DC-Technologien in Gebäuden und Quartieren basiert auf einem Mehrmethodenansatz, der die Ergebnisse der oben beschriebenen Studien mit den Ergebnissen einer Expert:innen-Interview-Studie und einer Literaturstudie zusammenführt. Die Analyse umfasste sechs Schritte: (1) Die Datensets wurden annotiert (Kodierungen: positive Erwartung, negative Erwartung, Narrativ) (Erwartungen, die als besonders wichtig für die Diffusion von DC in Gebäuden und Quartieren gelten). (2) Die vorläufigen Ergebnisse wurden trianguliert, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Alle Items, die nur in einem Datenset genannt wurden, wurden verworfen. Items wurden nur dann als wichtige Faktoren markiert, wenn die entsprechenden Erwartungen in vier oder mehr Datensets als sehr relevant für die Verbreitung von DC beschrieben wurden. (3) Mittels qualitativer Inhaltsanalyse wurde ein Kategoriensystem entwickelt. Das System (siehe Abb. 32) enthält drei Themendimensionen (positive Erwartungen an die Nischenentwicklung bzw. akzeptanzfördernde Aspekte, negative Erwartungen bzw. akzeptanzhemmende Aspekte sowie Narrative), sechs übergeordnete Themenfelder (technologische Perspektive, ökonomische Perspektive, Bauperspektive, administrative Perspektive, soziale Perspektive, Umweltperspektive) sowie 78 gewichtete Einzelthemen (in Form von 7 Narrativen, 32 positiven Erwartungen und 39 negativen Erwartungen). Für die Darstellung der Akzeptanzkartographie wurden verschiedene Darstellungsmöglichkeiten in der Literatur identifiziert (u.a. Heatmaps, Info-Maps, Diagramme). Als übersichtlichste Variante wurde eine Baumdarstellung mit der Verwendung von Sternen für besonders wichtige Erwartungen gewählt. Die Kategorien und zugehörigen Erwartungen werden im Folgenden zusammengefasst.

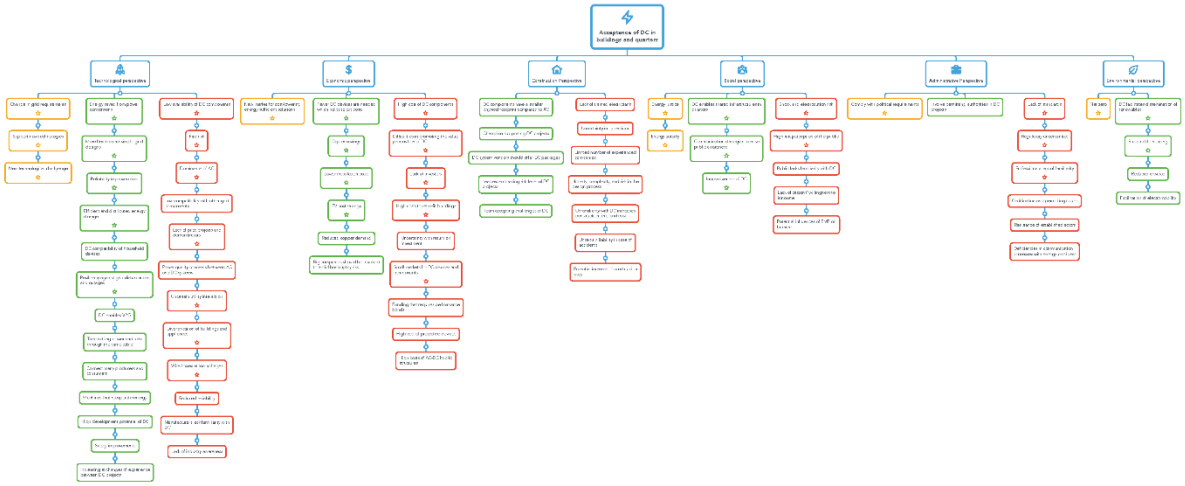


Abbildung 32: Akzeptanzkartographie für die Nutzung von DC-Technologien

Technologische Perspektive: In dieser Kategorie beziehen sich die Erwartungen auf die technische (Energie-)Infrastruktur. Die positiven Erwartungen umfassen mehrere Aspekte: Die Vermeidung von Verlusten bei der Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt, wie es in den derzeitigen Verteilungsnetzen für Gebäude der Fall ist, ermöglicht Energieeinsparungen, zumal verschiedene Haushaltsgeräte mit Gleichstrom kompatibel sind. Dennoch ist der Aspekt der Energieeffizienz umstritten: Während einige Befragte die Einsparungen bei der Umwandlung als größtes Verkaufsargument für Gleichstromgebäude ansehen, schätzen andere diesen Vorteil als vernachlässigbar ein. Eng mit diesem Aspekt verbunden ist die Möglichkeit, Energiespeicher effizient in Gleichstromhäuser zu integrieren. Für Systeme ohne Speicher ist die Gleichstromverteilung im Allgemeinen nicht kosteneffizient. Gleichstrom würde auch die Rückspeisung von Energie aus Batteriespeichern in Elektrofahrzeugen in das Netz ermöglichen (V2G). Geringere Umwandlungen (und die in der Regel zuverlässigeren DC/DC-Wandler) führen auch zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit des Netzes. Darüber hinaus ermöglichen Gleichstromeigenschaften wie flexible Spannungskreise und Laststeuerung eine größere Freiheit und Variabilität, um flexiblere und einfachere Netzdesigns als mit Wechselstrom zu realisieren. Insbesondere ermöglichen Gleichstromnetze die Übertragung von Strom und Daten über das gleiche Kabel. Weitere Vorteile sind die verbesserte Widerstandsfähigkeit gegenüber Netzstörungen und -ausfällen sowie die verbesserte Sicherheit durch den Einsatz von Gleichstrom in Gebäuden.
Negative technologische Erwartungen beziehen sich auf folgende Aspekte: Es wird kritisiert, dass einige Gleichstromkomponenten noch nicht in großen Stückzahlen als "off the shelf"-Produkte produziert werden, so dass ihre Verfügbarkeit im Bedarfsfall nicht gewährleistet werden kann. Die derzeitige Dominanz von Wechselstrominfrastrukturen führt zu einem generellen Mangel an Angebot und Nachfrage nach Gleichstromprodukten, insbesondere aufgrund eines mangelnden Bewusstseins der Industrie für die potenziellen Vorteile und Anwendungsfälle von Gleichstromtechnologien sowie eines Mangels an Herstellern, die mit der Entwicklung gleichstrombasierter Produkte vertraut sind. Die Integration beider Formen der Energieverteilung bringt weitere Konsequenzen mit sich, wie z. B. eine geringe Kompatibilität zwischen AC- und DC-Komponenten. Infolgedessen wird befürchtet, dass die Verwendung von Wechselstrom, Gleichstrom oder Kombinationen zu einer Diversifizierung von Gebäuden führen könnte, da Geräte und Dienstleistungen nicht universell ausgetauscht werden können, ohne dass der Stromkreistyp angegeben wird. Sicherheitsbedenken sind eine weitere negative

Erwartung, da Gleichstrom-Stromkreise anfällig für Lichtbögen seien und ohne geeignete Präventionsmaßnahmen ein höheres Brandrisiko darstellen könnten als vergleichbare Wechselstrom-Stromkreise. Darüber hinaus berichten Studien über Bedenken hinsichtlich der Stromqualität und Zuverlässigkeit von Gleichstromtechnologien, was die Kontroversen in Bezug auf die Erwartungen an Gleichstrom widerspiegelt. Es wird kritisiert, dass es noch zu wenige Pilotprojekte und Demonstratoren gibt, um solche Aspekte zu untersuchen. Eine letzte negative Erwartung ist, dass bei niedrigen Spannungen Leitungsverluste auftreten könnten.

Wirtschaftliche Perspektive: Die Erwartungen beziehen sich hier auf finanzielle Aspekte. Positive Erwartungen sind Einsparungen aufgrund eines geringeren Bedarfs an Gleichstromkomponenten (insbesondere an Umrichtern), geringere Investitionsausgaben für die Anschaffung von Gleichstromtechnologien in Gebäuden, niedrigere Installations- und Wartungskosten, geringere Photovoltaikkosten und ein geringerer Kupferbedarf für Kabel. Darüber hinaus könnte die Akzeptanz von Gleichstromgebäuden durch die Einbeziehung großer Unternehmen erleichtert werden, um Konkursrisiken zu vermeiden.

Zu den negativen Erwartungen gehören die hohen Kosten der Gleichstromkomponenten aufgrund ihrer fehlenden Massenproduktion (siehe technologische Erwartungen) und die damit verbundenen Risiken (siehe technologische und soziale Erwartungen). Aufgrund der begrenzten Erfahrungen mit der tatsächlichen Energieeffizienz von Gleichstromanlagen in verschiedenen Umgebungen werden Unsicherheiten in Bezug auf die Investitionsrendite wahrgenommen. Diese Unsicherheiten stellen eine Herausforderung für die effiziente Förderung des Wertes von DC-Gebäuden dar. Die mangelnde Vertrautheit mit der Gleichstromtechnik führt zu einem kleinen Markt für Gleichstromgeräte und -komponenten, der derzeit eine Ausweitung des Verkaufs verhindert, sowie zu einem Mangel an Investoren für Gleichstromprojekte und -produkte. Darüber hinaus wird berichtet, dass die Finanzierung von DC-Projekten häufig Erfüllungsgarantien erfordert, die Unternehmen aufgrund der Unsicherheiten und Herausforderungen bei der Durchführung von DC-Projekten zu vermeiden versuchen.

Bauperspektive: Erwartungen dieser Kategorie beziehen sich auf die Struktur von DC-Gebäuden sowie auf entsprechende Planungsprozesse und deren Ausführung. Zu den positiven Erwartungen gehören die folgenden Aspekte: Da DC-Komponenten kleiner sind und in geringerer Anzahl benötigt werden, wird davon ausgegangen, dass diese Vorteile eine flexible Nutzung des Raums in Gebäuden ermöglichen. Darüber hinaus zeigen die Erfahrungen mit DC-Projekten, dass ein Champion (eine einflussreiche Persönlichkeit innerhalb oder außerhalb eines Unternehmens), der den Einsatz von DC in Gebäuden fördert, Projektleiter, die das Risikoniveau von DC-Projekten akzeptieren, und Projektteams, die die Herausforderungen von DC annehmen, wesentlich zum Erfolg von Projekten im Bereich DC-Gebäude und damit zu deren Verbreitung beitragen. Die Anbieter von DC-Systemen sollten den Verbrauchern ein Paket von DC-Endanwendungen anbieten.

Zu den negativen Erwartungen gehört eine allgemeine Unsicherheit in Bezug auf Gleichstromsysteme in Gebäuden. Dieses Problem wird noch dadurch verstärkt, dass es nur wenige erfahrene Unternehmen gibt, die auch schnell in Konkurs gehen können, wenn sie zu klein sind und bei der Verbreitung von Gleichstromtechnologien wenig Erfolg haben. Mehrere Projekte sind daher mit einem hohen Maß an Neuartigkeit, Komplexität und Risiko im Entwicklungsprozess von DC-Gebäuden konfrontiert. Insbesondere wird von erhöhten Bauzeiten und -kosten berichtet, die auf die Unkenntnis der Integration von Gleichstrom in Gebäuden zurückzuführen sind.

Administrative Perspektive: Die Erwartungen beziehen sich hier auf die Genehmigungsverfahren und -behörden bei DC-Projekten. Die Kategorie umfasst nur negative Erwartungen. Sie beziehen sich in erster Linie auf fehlende Standards (z. B. für Spannungen, Steckverbinder und

Kommunikationsprotokolle für die Stromsteuerung) und regulatorische Unsicherheiten (z. B. regulatorische Rahmenbedingungen, die zwischen Wechsel- und Gleichstrom für Stromkreise aller Spannungsebenen im Hinblick auf den Einsatz von Gleichstrom in Gebäuden unterscheiden). Solange es Fachleuten wie Regulierungsbehörden an Vertrautheit und Erfahrung mit Gleichstrom mangelt, wird die Zertifizierung und Genehmigung des Einsatzes von Gleichstrom in Gebäuden eine große Herausforderung darstellen.

Soziale Perspektive: Die Erwartungen in dieser Kategorie beziehen sich auf die Menschen und die Gesellschaft. Positive Erwartungen beziehen sich auf die Aussicht, dass die Gleichstromtechnik der Gesellschaft Vorteile bringt, insbesondere aufgrund der Möglichkeit, dass die Gleichstromtechnik Infrastrukturen in Nachbarschaften ermöglicht, die von den Bewohnern für die Energieerzeugung (z. B. Photovoltaik) und den Energieverbrauch (z. B. durch den Einsatz von Batteriespeichern) gemeinsam genutzt werden. Auf diese Weise können "Energiegemeinschaften" gegründet werden, in denen alle Beteiligten von gemeinsamen Infrastrukturen profitieren.

Negative Erwartungen beziehen sich auf einen allgemeinen Mangel an Vertrautheit der Öffentlichkeit mit DC. Sollte der Bekanntheitsgrad steigen, bestehen weitere Herausforderungen für die Verbreitung von DC-Gebäuden in einer potentiell risikoreichen Wahrnehmung. Zu den geäußerten Risiken gehören Gesundheitsgefahren, die von der Gleichstromtechnik für den Menschen ausgehen können, wie z. B. Stromschläge aufgrund von Lichtbögen, die bei der Nutzung von Gleichstrom auftreten könnten. Die Öffentlichkeit könnte sich auch gegen eine weitere Verbreitung der Gleichstromnutzung in Gebäuden entscheiden, wenn der Mehrwert der Gleichstromnutzung nicht verständlich kommuniziert werden kann.

Umweltperspektive: Die Erwartungen in dieser Kategorie beziehen sich auf das Ökosystem und die Nachhaltigkeit. Es wurden drei positive Erwartungen ermittelt: DC könnte nachhaltiges Wohnen erleichtern. Insbesondere könnte die Verbreitung von DC die Verbreitung von Technologien für erneuerbare Energien (wie Photovoltaik) fördern. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, durch den Einsatz von Gleichstrom den Elektroschrott zu reduzieren, da keine externen Stromversorgungen mehr benötigt werden.

2.7.5 Iterative Integration der Ergebnisse in das Gesamtkonzept

Ziel des AP7.5 waren Beiträge zur Entwicklung des Gesamtansatzes. Die in AP7.2 bis AP7.4 erarbeiteten Ergebnisse wurden in regelmäßig stattfindenden Workshops mit den Partnern in das Niche Readiness Level Model (AP1) integriert. Es wurde geklärt, wie sich die identifizierten Akzeptanzfaktoren und Themen auf die Größen Markt, Akteure und Raum beziehen lassen und welche Relevanz sie für Niche Readiness und Marktdiffusion haben, etwa durch ihren Bezug zu Planungs-, Deutungs-, Kooperations- und Entscheidungsstrukturen. Ergebnis ist ein Gesamtmodell der Nischenentwicklung und Marktdiffusion von DC-Technologien, das akzeptanzrelevante Faktoren und kommunikationsrelevante Themen für Aushandlungsprozesse inkorporiert als Input für die technischen Vorhaben.

Das Modell der Niche Readiness für DC-Technologien wurde von den Projektpartnern in mehreren Publikationen sowie Vorträgen (siehe Literatur und Vorträge im Anhang) veröffentlicht und bekanntgemacht. Feedback zum theoretischen Ansatz (auf Basis sozialer Mechanismen) aus Kolloquien mit internen (RWTH HumTec) und externen Partnern (u.a. Monash University, University of Texas) trug wesentlich zur Erweiterung und Verfeinerung des Modells bei. Der soziale Mechanismus ‚Akzeptanz und Akzeptabilität von DC-Technologien' geht auf die Arbeiten des Projektpartners TLTK zurück und ist wesentlicher Bestandteil des Modells. Das Modell und seine Mechanismen sowie Grundlagen wurden den technischen FEN-Projekten in verschiedenen Workshops erläutert, um es für die Gesamtziele des Forschungscampus ‚Flexible Elektrische Netze' nutzbar zu machen.

3. Hauptpositionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises angegeben. Der größte Teil entfiel auf Personalkosten (wissenschaftliches Fachpersonal und studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte). Die verbleibenden Mittel wurden insbesondere für die Vergabe von Aufträgen und Dienstreisen verwendet.

Position	Ausgaben
Summe Personal	1.288.772,96 €
Vergabe von Aufträgen	21.601,62 €
Dienstreisen	15.997,02 €

Tabelle 2: Hauptpositionen des zahlenmäßigen Nachweises

4. Zusammenfassung, Nutzen und mögliche Anwendungen

Das Niche Readiness Level Model als zentrales Ergebnis des Arbeitspaketes 1 kann in verschiedenen Hinsichten für Forschungszwecke sowie für partizipative Technikentwicklungsprozesse genutzt werden. Forscherisch bieten sich viele Anknüpfungspunkte, um die entwickelte Modellheuristik auch für andere Kontexte anzuwenden oder anwendbar zu machen. Dabei bietet sich eine Reihe von konzeptionellen Innovationspotenzialen, etwa durch fortlaufende Falsifizierung der entwickelten Mechanismen zum Zwecke ihrer kritisch-evaluativen Fortentwicklung. Durch den integrativen Modellcharakter und den gewählten Abstraktionsgrad wird ein niedrigschwelliger Zugang für unterschiedliche Fachdisziplinen eröffnet, die Anwendung des Modells bleibt daher nicht auf das Feld der Transition Studies beschränkt. So kann das Modell bspw. einen Ausgangspunkt für integrativ gestaltete empirische Erhebungsstrategien darstellen, wie im späteren Projektverlauf von AP2 und AP6 gezeigt wurde. Ferner kann das NRL-Modell durch Überführung in konkrete Veranstaltungsformate grundsätzlich auch einen performativen, in das Transformationsfeld hineinwirkenden Effekt begründen und perspektivisch zum Werkzeug partizipativ orientierter Technikentwicklung avancieren. Am Beispiel des Technological Readiness Level Model lässt sich erkennen, wie die Verbreitung eines solchen Modells ganz konkrete Auswirkungen für die Bewertung eines Technologiestandes oder den Entwurf bestimmter Entwicklungsszenarien mit sich bringen kann. In ähnlicher Weise kann das hier präsentierte Niche Readiness Level Model einen Prototypen für ein ähnlich universell andwendbares Tool darstellen, welches zukünftig Aufschluss über die Reifung sozio-ökonomischer Innovationen geben könnte. Eine erste Anwendung des NRL-Modells als Vorlage zur Durchführung eines Stakeholderworkshops erfolgte bspw. im Projektverlauf bereits durch das AP5. Darauf aufbauend lässt sich das NRL-Modell prinzipiell zu einem multi-sektoral einsetzbaren Tool weiterentwickeln.

Mit Blick auf Fragen der DC-Entwicklung lässt sich an den klaren Projektbefund der unzureichenden real-experimentellen Einbettungskontexte für DC anschließen. Daher adressiert das Folgeprojekt FEN Living Lab Hub ebenjene real-experimentelle Leerstelle, indem es gezielt eine bottom-up Infrastrukturentwicklung durch DC-Reallabore anregt. Hierdurch sollen DC-Konfigurationen als solche nicht nur kollaborativ entwickelt und in geschützten Umgebungen real getestet, sondern darüber hinaus entscheidende Innovationsimpulse gesetzt werden, welche kritische Netzwerkbildung, gemeinsames Lernen und kontextübergreifende Replizierungen ermöglichen.

Das im Projektverlauf entstandene internationale DC-Netzwerk kann dabei dienlich sein, den Standort Aachen als international bedeutsames Zentrum der DC-Entwicklung weiter zu verankern. Die in der zweiten Förderphase begonnenen Aktivitäten sollen konsequent in Form von Nachfolgeaktivitäten wie etwa gemeinsamen Forschungsprojekten fortgeführt werden. Es besteht in der internationalen

Zusammenarbeit ein vermehrtes Interesse an den im Projekt DC-Sozio-Ökonomik versammelten Fachdisziplinen, da die internationale Forschung stark durch ausschließlich elektrotechnische Disziplinen dominiert wird. Die Form der angebotenen sozio-ökonomischen Expertise sowie die inter- und transdisziplinäre Verbundforschung des Forschungscampus FEN begründen daher ein internationales Alleinstellungsmerkmal.

Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse der fachspezifischen Arbeitspakete für eine Reihe unterschiedlicher Akteursgruppen wie etwa Projektierer, Policy-Maker, Planungsbehörden, Architekt:innen, Prosumer, Banken, Versicherungen u. a. selektiv nutzen. Da eine Vielzahl dieser Akteure nicht mit DC-Systemen vertraut ist, bieten die Ergebnisse erste Anhaltspunkte für derzeitige Barrieren sowie mögliche, in Aussicht gestellte Mehrwerte für den Roll-Out von DC-Systemen.

5. Liste der Publikationen aus dem Projekt

R. Bartusch and S. Hermens, ‘Energy-Hub - eine neue urbane Nische’, in *Zukunft Bau Pop-up Campus Aachen*, Stand: Oktober 2023., G. Hagel, A. Rose, and Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Eds., Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023, pp. 200–205.

S. Böschen *et al.*, ‘Infrastructures and Transformation: Between Path Dependency and Opening-Up for Experimental Change’, in *Transformation Towards Sustainability*, P. Letmathe, C. Roll, A. Balleer, S. Böschen, W. Breuer, A. Förster, G. Gramelsberger, K. Greiff, R. Häußling, M. Lemme, M. Leuchner, M. Paegert, F. T. Piller, E. Seefried, and T. Wahlbrink, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2024, pp. 93–117. doi: 10.1007/978-3-031-54700-3_4.

C. Digmayer, ‘What Niche Design Can Learn from Acceptance Mining’, presented at the AHFE 2021 Virtual Conferences on Human Factors in Software and Systems Engineering, Artificial Intelligence and Social Computing, and Energy, online, 29/07 2021.

C. Digmayer, ‘Innovation communication in transitions to sustainable direct-current technologies’, presented at the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST), Melbourne, Australia, 25/11 2022.

C. Digmayer, ‘The Customer Experience of Energy Services’, presented at the 14th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2023), San Francisco, California, USA, 24/07 2023.

C. Digmayer, ‘The Customer Experience of Energy Services’, presented at the The Sixteenth international Conference on Advancesy in Computer-Human Interactions, Venice, Italy, 28/04 2023.

C. Digmayer and E.-M. Jakobs, ‘What Niche Design Can Learn from Acceptance Mining’, in *Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering*, vol. 271, T. Z. Ahram, W. Karwowski, and J. Kalra, Eds., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 271, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 485–492. doi: 10.1007/978-3-030-80624-8_61.

C. Digmayer and E.-M. Jakobs, ‘Unlocking the potential of public opinions for niche development using acceptance mining’, *Methodological Innovations*, vol. 16, no. 1, pp. 78–90, Mar. 2023, doi: 10.1177/20597991221150088.

C. Digmayer and G. P. Pogue, ‘Using Community Values and Governance Preferences to Facilitate Transitions Toward Sustainable Energies’, *IEEE Trans. Technol. Soc.*, vol. 4, no. 4, pp. 314–324, Dec. 2023, doi: 10.1109/TTS.2024.3358984.

M. Goppold, C. Mayer, M. Frenz, and V. Nitsch, ‘Erhebung erweiterter curricularer und unterstützender Maßnahmen in der elektrotechnischen dualen Ausbildung aufgrund von DC-Technologie’, in *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?*, Dortmund: GfA-Press, 2020.

S. Hermens and Y. Schöpper, ‘Gleichstromsysteme als Baustein der Energiewende: Herausforderungen und Ansätze von Gleichstromnetzen in der Stadtplanung’, *RaumPlanung: Mitteilungen des Informationskreises für Raumplanung (IfR) e.V.*, vol. 234, in press 2025.

T. Kirchner, ‘Zwischen Hierarchie und Holokratie: Literaturrecherche zur Identifikation innovativer Arbeitsorganisationsformen mittels KI-gestützter Tools’, Bachelorarbeit, RWTH Aachen University, 2024.

C. Larisch, S. Hermens, and J. Wendorff, ‘Straßenbahntrassen als energetische Gunsträume: Städtebauliche Integration technischer Infrastrukturen im Kontext der Energiewende’, *Transforming cities*, vol. 8, no. 4, pp. 53–57, 2023.

C. Larisch, J. Wendorff, M. Birk, and S. Hermens, ‘Mobilstationen als Stadtbaustein der Energie-und Verkehrswende’, presented at the Mobility, Knowledge and Innovation Hubs in Urban and Regional Development. Proceedings of REAL CORP 2022, 27th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society, CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning, 2022, pp. 495–503.

R. Nejabat and R. Madlener, ‘Factors Influencing Household Decisions to Adopt Hybrid AC-DC Homes: Empirical Evidence from German Homeowners’, *FCN Working Paper*, vol. 18, 2024.

G. P. Pogue, C. Spinuzzi, and C. Digmayer, ‘Mentors, Markets, and Money: How Entrepreneurs Can Leverage Feedback Loops with Stakeholders to Articulate Value Propositions’, in *New Leadership Communication—Inspire Your Horizon*, N. Pfeffermann and M. Schaller, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 389–408. doi: 10.1007/978-3-031-34314-8_28.

J. Schäfer, ‘Die soziotechnische Nische als Grenzobjekt - Eine Fallstudie am Beispiel des Projekts FEN-2’, Masterarbeit, RWTH Aachen University, Aachen, 2022.

M. Schnitzler, ‘Reifegradmodell für die Entwicklung von Nischen zur Diffusion innovativer Technologien’, Masterarbeit, RWTH Aachen University, Aachen, 2021.

Y. Schöpper, ‘FEN, DC-Socio-Economics: Assessing Niche Readiness for DC Applications’, presented at the FENomenal Friday, Aachen, 28/04, 2023.

Y. Schöpper and S. Böschen, ‘Stimulating niche-regime interaction through intermediary activities: The case of DC neighbourhoods in Germany’, presented at the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST), Melbourne, Australia, 25/11 2022.

Y. Schöpper and C. Digmayer, ‘Toward niche readiness - Achieving socio-economic maturity in the bottom-up transition to DC power systems’, presented at the Lecture series des Monash Sustainable Development Institutes (MSDI), Melbourne, Australia, 28/11, 2022.

Y. Schöpper *et al.*, ‘Towards Niche Readiness: Achieving Socio-Economic Maturity in the Bottom-Up Transition of DC Power Systems’, presented at the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST), Melbourne, Australia, 25/11 2022.

Y. Schöpper *et al.*, ‘Developing a Niche Readiness Level Model to Assess Socio-Economic Maturity: The Case of DC Technologies in the Transition to Flexible Electrical Networks’, *FCN Working Paper No. 11/2023*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4683145.

Y. Schöpper *et al.*, ‘Towards niche readiness: Achieving socio-economic maturity in the bottom-up transition to DC power systems’, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 51, 100831, 2024, doi: 10.1016/j.eist.2024.100831.

Y. Schöpper, S. Hermens, A. Lapthorn, and S. Silva, ‘Assessing Niche Readiness of DC Microgrid Applications: Insights from New Zealand’s Energy Transition to Carbon Neutrality’, in *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Conference (IECON 2024) - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Chicago, USA, 2025, pp. 1–7, doi: https://doi.org/10.1109/IECON55916.2024.10905481.

Y. Schöpper *et al.*, ‘Unleashing Flexibility for a Sustainable Energy Transition: A Niche Readiness Level Model for Direct Current Technologies’, in *Proceedings of the 4th Social Science and Humanities Energy Research Workshop*, Zürich, Switzerland, 2024.

Y. Schöpper *et al.*, ‘A Niche Readiness Level Model for Assessing the Maturity of Socio-Economic Niches: The Case of Direct Current Technology Applications’, *FCN Working Paper No. 14/2024*, 2024.

Y. Schöpper and J. Schäfer, ‘Studie zur Entwicklung der Windenergie und Photovoltaik in Deutschland’, unv. Studie, 2021.

T. Schubert, ‘Klimaneutralität im Gebäudebestand: Analyse und Bewertung von Potenzialen des Lean Managements im Handwerk am Beispiel der Installation von Photovoltaikanlagen’, Bachelorarbeit, RWTH Aachen University, Aachen, 2024.

N. Steireif, V. Nitsch, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Design Factors for Organizational Agility in Power Technology Development: An Interview Study in Germany’, *Int. J. Innovation Technol. Management*, vol. 20, no. 04, 2350022, 2023, doi: 10.1142/S0219877023500220.

N. Steireif, M. Schirmer, M. Schnitzler, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Towards an Extended Team Model for Agile Development of Complex Products’, in *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, Singapore: IEEE, 2020, pp. 280–284. doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309811.

N. Steireif, ‘Auswirkungen organisationaler Agilität auf die Teamarbeit und den Projekterfolg in der Technologieentwicklung’, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2024. doi: 10.18154/RWTH-2024-04931.

N. Steireif, V. Nitsch, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Gestaltung von agilen Organisations- und Teamstrukturen: Ergebnisse einer Interviewstudie mit Entwickler*innen von Energietechnologien’, in *Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse: Bericht zum 69. Frühjahrskonkress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, GfA-Press, 2023.

N. Steireif, M. Schirmer, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Organizational Agility in Technology Development: Effects on Teamwork Quality, Project Success and Technology Diffusion Success’, International Journal of Innovation and Technology Management, eingereicht zur Publikation 2025.

N. Steireif, M. Schnitzler, M. Schirmer, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Akteure in energietechnologischen Nischenprojekten : Arbeitsbericht aus dem Forschungsprojekt „DC-Sozio-Ökonomik“’, RWTH Aachen University, 2025. doi: 10.18154/RWTH-2025-01224.

A. Stratmann, J. Wendorff, and S. Hermens, ‘Städtebau und elektrische Speicher–ein Zusammenspiel im Energiequartier’, presented at the CITIES 20.50–Creating Habitats for the 3rd Millennium: Smart–Sustainable–Climate Neutral. Proceedings of REAL CORP 2021, 26th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society, CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning, 2021, pp. 737–744.

6. Literaturverzeichnis

[1] B. A. Latos, M. Harlacher, F. Burgert, V. Nitsch, P. Przybysz, and S. Mütze-Niewöhner, ‘Complexity Drivers in Digitalized Work Systems: Implications for Cooperative Forms of

Work', *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 3, no. 5, pp. 166–185, 2018, doi: 10.25046/aj030520.

[2] S. Mütze-Niewöhner and H. Luczak, 'Prospective Job Design and Evaluation in Early Stages of Production System Design', in *Proceedings of the Seventh International Symposium on Human Factors in Organizational Design and Management (ODAM)*, 2003, pp. 323–328.

[3] S. Mütze-Niewöhner, C. Mayer, M. Harlacher, N. Steireif, and V. Nitsch, 'Work 4.0: Human-Centered Work Design in the Digital Age', in *Handbook Industry 4.0*, W. Frenz, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, pp. 985–1019. doi: 10.1007/978-3-662-64448-5_52.

[4] S. Schneider, R. Laue, A. Storch, and S. Mütze-Niewöhner, 'Graphical Modelling and Simulation of Product Development Projects', in *Proceedings of the 2012 European Simulation and Modelling Conference (ESM)*, 2012, pp. 285–292.

[5] T. Myskovszky von Myrow, S. Mütze-Niewöhner, and S. Duckwitz, 'Towards a Conceptual Model of Team-Based Innovation: Enablers and Obstacles of Innovation Productivity', in *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2014, pp. 1030–1036.

[6] T. Myskovszky von Myrow, P. Przybysz, S. Mütze-Niewöhner, and C. M. Schlick, 'Partizipatives Innovationsmanagement in altersgemischten Teams', in *Exploring Demographics: Transdisziplinäre Perspektiven zur Innovationsfähigkeit im demografischen Wandel*, S. Jeschke, A. Richert, F. Hees, and C. Jooß, Eds., Wiesbaden: Springer Spektrum, 2015, pp. 541–553. doi: 10.1007/978-3-658-08267-4_42.

[7] S. Schneider, P. M. Przybysz, M. Bornewasser, S. Mütze-Niewöhner, and C. M. Schlick, 'Simulationsgestützte Analyse der Innovationsfähigkeit altersheterogener FuE-Teams', in *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen: Bericht zum 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V.*, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., Ed., Dortmund: GfA-Press, 2013, pp. 115–118.

[8] B. A. Latos, C. Holtkötter, J. Brinkjans, P. Kalantar, P. M. Przybysz, and S. Mütze-Niewöhner, 'Partizipatives und simulationsgestütztes Vorgehen zur Konzeption einer flexiblen und demografierobusten Montagelinie', *Z. Für Arbeitswissenschaft*, vol. 72, pp. 90–98, 2017, doi: 10.1007/s41449-017-0020-8.

[9] F. W. Geels, 'From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory', *Res. Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 897–920, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.respol.2004.01.015.

[10] F. W. Geels, 'Regime Resistance against Low-Carbon Transitions: Introducing Politics and Power into the Multi-Level Perspective', *Theory Cult. Soc.*, vol. 31, no. 5, pp. 21–40, Sep. 2014, doi: 10.1177/0263276414531627.

[11] F. W. Geels and J. Schot, 'Typology of sociotechnical transition pathways', *Res. Policy*, vol. 36, no. 3, pp. 399–417, 2007, doi: 10.1016/j.respol.2007.01.003.

[12] J. Schot and F. W. Geels, 'Strategic niche management and sustainable innovation journeys: Theory, findings, research agenda, and policy', *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, vol. 20, no. 5, pp. 537–554, 2007, doi: 10.1080/09537320802292651.

[13] J. C. Mankins, 'Technology readiness assessments: A retrospective', *Acta Astronaut.*, vol. 65, no. 9–10, pp. 1216–1223, 2009, doi: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.

[14] F. Alkemade and R. A. A. Suurs, 'Patterns of expectations for emerging sustainable technologies', *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 79, no. 3, pp. 448–456, 2012, doi: 10.1016/j.techfore.2011.08.014.
[15] T. P. Hughes, 'The Evolution of Large Technological Systems', in *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*, W. E. Bijker, T. P. Hughes, and T. Pinch, Eds., Cambridge, MA: MIT Press, 1987, pp. 51–82.
[16] P. N. Edwards, 'Infrastructure and Modernity: Force, Time and Social Organization in the History of Sociotechnical Systems', in *Modernity and Technology*, T. J. Misa, P. Brey, and A. Feenberg, Eds., Cambridge, MA: MIT Press, 2004, pp. 185–226.
[17] A. Grunwald, 'Das Akzeptanzproblem als Folge nicht adäquater Systemgrenzen in der technischen Entwicklung und Planung', in *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation*, C. Fraune, Ed., Wiesbaden: Springer VS, 2019, pp. 29–43. doi: 10.1007/978-3-658-25947-3_2.
[18] J. Lezaun, N. Marres, and M. Tironi, 'Experiments in Participation', in *The Handbook of Science and Technology Studies*, U. Felt, R. Fouché, C. A. Miller, and L. Smith-Doerr, Eds., Cambridge, MA: MIT Press, 2017, pp. 195–221.
[19] A. H. Kimura and A. J. Kinchy, *Science by the People: Participation, Power, and the Politics of Environmental Knowledge*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 2019.
[20] E. von Hippel, *Democratizing Innovation*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
[21] European Commission, *Open Innovation, Open Science, Open to the World: A Vision for Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. doi: 10.2777/061652.
[22] U. Felt and B. Wynne, *Taking European Knowledge Society Seriously*. Brussels: DG Research, European Commission, 2007.
[23] M. Ryghaug, T.-M. Skjølsvold, and S. Heidenreich, 'Creating energy citizenship through material participation', *Soc. Stud. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 283–303, 2018, doi: 10.1177/0306312718758566.
[24] M. Groß, H. Hoffmann-Riem, and W. Krohn, *Realexperimente: Ökologische Gestaltungsprozesse in der Wissensgesellschaft*. Bielefeld: transcript, 2005.
[25] S. Böschen, M. Groß, and W. Krohn, *Experimentelle Gesellschaft: Das Experiment als wissensgesellschaftliches Dispositiv*. Baden-Baden: edition sigma, 2017.
[26] J. Evans and A. Karvonen, 'Give me a laboratory and I will lower your carbon footprint! Urban laboratories and the governance of low-carbon futures', *Int. J. Urban Reg. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 413–430, 2014, doi: 10.1111/1468-2427.12072.
[27] N. Schäpke *et al.*, *Reallabore im Kontext transformativer Forschung: Ansatzpunkte zur Konzeption und Einbettung in den internationalen Forschungsstand*. Lüneburg: Leuphana Universität Lüneburg, 2017.
[28] O. Parodi *et al.*, 'Insights into and Recommendations from Three Real-World Laboratories: An Experience-Based Comparison', *GAIA - Ecol. Perspect. Sci. Soc.*, vol. 27, no. 1, pp. 52–59, 2018, doi: 10.14512/gaia.27.1.12.
[29] U. Schneidewind, K. Augenstein, F. Stelzer, and M. Wanner, 'Structure Matters: Real-World Laboratories as a New Type of Large-Scale Research Infrastructure: A Framework

Inspired by Giddens' Structuration Theory', *GAIA - Ecol. Perspect. Sci. Soc.*, vol. 27, no. 1, pp. 12–17, 2018, doi: 10.14512/gaia.27.1.4.

[30] W. Krohn, A. Grunwald, and M. Ukowitz, 'Transdisziplinäre Forschung revisited: Erkenntnisinteresse, Forschungsgegenstände, Wissensform und Methodologie', *GAIA - Ecol. Perspect. Sci. Soc.*, vol. 26, no. 4, pp. 341–347, 2017, doi: 10.14512/gaia.26.4.10.

[31] C. Mitchell, D. Cordell, and D. Fam, 'Beginning at the End: The Outcome Spaces Framework to Guide Purposive Transdisciplinary Research', *Futures*, vol. 65, pp. 86–96, 2015, doi: 10.1016/j.futures.2014.10.007.

[32] N. Marres, *Material Participation: Technology, the Environment and Everyday Publics*. London: Palgrave Macmillan, 2012.

[33] A. Engels and K. Walz, 'Dealing with Multi-Perspectivity in Real-World Laboratories: Experiences from the Transdisciplinary Research Project Urban Transformation Laboratories', *GAIA - Ecol. Perspect. Sci. Soc.*, vol. 27, no. 1, pp. 39–45, 2018, doi: 10.14512/gaia.27.1.10.

[34] S. Meyer-Soylu, O. Parodi, H. Trenks, and A. Seebacher, 'Das Reallabor als Partizipationskontinuum: Erfahrungen aus dem Quartier Zukunft und Reallabor 131 in Karlsruhe', *Tech. – Theor. Prax.*, vol. 25, no. 3, pp. 31–40, 2016.

[35] K. J. Zink, 'Nachhaltige Arbeitssysteme in (internationalen) Wertschöpfungsketten und die Rolle der Arbeitswissenschaft', *Z. Für Arbeitswissenschaft*, vol. 71, no. 2, pp. 92–100, 2017, doi: 10.1007/s41449-017-0009-0.

[36] C. Schlick, R. Bruder, and H. Luczak, *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-56037-2.

[37] S. Albers, 'Diffusion und Adoption von Innovationen', in *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement: Strategie – Umsetzung – Controlling*, S. Albers and O. Gassmann, Eds., Wiesbaden: Gabler Verlag, 2005, pp. 415–434.

[38] A. Albers and J. Gausemeier, 'Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung', in *Smart Engineering: Interdisziplinäre Produktentstehung. acatech DISKUSSION*, R. Anderl, M. Eigner, U. Sendler, and R. Stark, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 17–29.

[39] W. Eversheim *et al.*, 'Management integrierter Produktentstehungen', in *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*, W. Eversheim and G. Schuh, Eds., Berlin: Springer, 2005, pp. 21–53.

[40] M. Richter, 'Prozessmanagement in der Produktentwicklung', in *Handbuch Unternehmensorganisation*, O. Riedel, K. Hölzle, S. Schlund, and D. Spath, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, pp. 1–19.

[41] J. Stjepandić, N. Wognum, and W. J. Verhagen, *Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges*. Berlin: Springer, 2015.

[42] B. Boehm and R. N. Turner, *Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed*. Melbourne: Addison-Wesley Professional, 2003.

[43] E. C. Conforto, F. Salum, D. C. Amaral, S. L. D. Silva, and L. F. M. D. Almeida, 'Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other Than Software Development?', *Proj. Manag. J.*, vol. 45, no. 3, pp. 21–34, 2014, doi: 10.1002/pmj.21483.

[44] G. Schuh, C. Dölle, J. Kantelberg, and A. Menges, 'Identification of Agile Mechanisms of Action as Basis for Agile Product Development', *Procedia CIRP*, vol. 70, pp. 19–24, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.01.004.

[45] K. Goevert and U. Lindemann, 'Further Development of an Agile Technique Toolbox for Mechatronic Product Development', in *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2018, pp. 2015–2026.

[46] S. Schöbel and D. Czechowski, 'Beyond Infrastructure and Superstructure – Intermediating Landscapes', in *Revising Green Infrastructure: Concepts between Nature and Design*, D. Czechowski, T. Hauck, G. Hausladen, and B. Raton, Eds., Milton Park: Taylor & Francis, 2014, pp. 171–192.

[47] D. Fürst, L. Dietrich, L. Gailing, M. Lahner, K. Pollermann, and A. Röhring, 'Konstituierung von Kulturlandschaften als Handlungsräume', in *Kulturlandschaft als Handlungsraum: Institutionen und Governance im Umgang mit dem regionalen Gemeinschaftsgut Kulturlandschaft*, D. Fürst, L. Gailing, K. Pollermann, and A. Röhring, Eds., Dortmund: Rohn, 2008, pp. 89–102.

[48] A. Timpe and R. Hansen, *proGIreg: Co-designing Nature-based Solutions in Living Labs*. Aachen: RWTH Aachen University, 2019.

[49] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung and Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, *Schriftenreihe Werkstatt: Praxis. Projekt des Forschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau"*. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2008.

[50] P. Olsson, V. Galaz, and W. Boonstra, 'Sustainability transformations: A resilience perspective', *Ecol. Soc.*, vol. 19, no. 4, pp. 1–13, 2014, doi: 10.5751/ES-06799-190401.

[51] U. Pesch, A.-L. Vernay, E. Van Bueren, and S. Pandis Iverot, 'Niche entrepreneurs in urban systems integration: On the role of individuals in niche formation', *Environ. Plan. Econ. Space*, vol. 49, no. 8, pp. 1922–1942, Aug. 2017, doi: 10.1177/0308518X17705383.

[52] P. Späth and H. Rohracher, 'Energy Regions: The Transformative Power of Regional Discourses on Socio-Technical Futures', *Res. Policy*, vol. 39, no. 4, pp. 449–458, 2010, doi: 10.1016/j.respol.2010.01.017.

[53] P. Sellke and O. Renn, 'Risk Governance of Pervasive Computing Technologies', *Int. J. Technol. Knowl. Soc.*, vol. 4, no. 1, pp. 215–224, 2008.

[54] N. M. A. Huijts, 'The Emotional Dimensions of Energy Projects: Anger, Fear, Joy and Pride about the First Hydrogen Fuel Station in the Netherlands', *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 44, pp. 138–145, 2018, doi: 10.1016/j.erss.2018.04.028.

[55] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, *Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen: Anmerkungen zu einem aktuellen gesellschaftlichen Problem*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2011.

[56] C. Fraune, M. Knodt, S. Gölz, and K. Langer, *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation: Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung*. Wiesbaden: Springer VS, 2019.

[57] T. Petermann and C. Scherz, 'TA und (Technik-)Akzeptanz(-forschung)', *Tech. – Theor. Prax.*, vol. 14, no. 3, pp. 45–50, 2005.

[58] E.-M. Jakobs, 'Technikakzeptanz und -kommunikation: Ein vielschichtiges Konstrukt', in *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation*, C. Fraune, M. Knodt, S. Gölz, and K. Langer, Eds., Wiesbaden: Springer VS, 2019, pp. 301–322. doi: 10.1007/978-3-658-25063-5_15.

[59] J. de Chazal, F. Quétier, S. Lavorel, and A. V. Doorn, 'Including Multiple Differing Stakeholder Values into Vulnerability Assessments of Socio-Ecological Systems', *Glob. Environ. Change*, vol. 18, no. 3, pp. 508–520, 2008, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.04.005.
[60] O. Renn, 'The Social Amplification/Attenuation of Risk Framework: Application to Climate Change', *WIREs Clim. Change*, vol. 2, pp. 154–169, 2011, doi: 10.1002/wcc.99.
[61] W. R. Scott, *Institutions and Organizations*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2001.
[62] D. Stark, *The Sense of Dissonance*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2009.
[63] C. Kunze, *Soziologie der Energiewende: Erneuerbare Energien und die Transition des ländlichen Raums*. Stuttgart: Ibidem-Verlag, 2012.
[64] H. Thomas, A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückrad, D. Salmieri, and C. Rubbia, 'Superconducting Transmission Lines – Sustainable Electric Energy Transfer with Higher Public Acceptance', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 59–72, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.064.
[65] B. Zaunbrecher, M. Stieneker, R. D. Doncker, and M. Ziefle, 'Does Transmission Technology Influence Acceptance of Overhead Power Lines? An Empirical Study', in *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, Lisbon, Portugal, 2016. doi: 10.5220/0005925301270134.
[66] C. Digmayer and E.-M. Jakobs, 'Risk Perception of Complex Technology Innovations: Perspectives of Experts and Laymen', in *Proceedings of the IEEE International Professional Communication Conference (ProComm)*, 2016. doi: 10.1109/ProComm.2016.7740518.
[67] P. Lienert, B. Sütterlin, and M. Siegrist, 'Public Acceptance of High-Voltage Power Lines: The Influence of Information Provision on Undergrounding', *Energy Policy*, vol. 112, pp. 305–315, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.10.046.
[68] B. Glasgo, I. Azevedo, and C. Hendrickson, 'Expert Assessments on the Future of Direct Current in Buildings', *Environ. Res. Lett.*, vol. 13, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1088/1748-9326/aae0f5.
[69] E. Reimer, E.-M. Jakobs, A. Borg, and B. Trevisan, 'New Ways to Develop Professional Communication Concepts', in *Proceedings of the IEEE International Professional Communication Conference (ProComm)*, 2015. doi: 10.1109/ProComm.2015.7298287.
[70] Verband Deutscher Ingenieure (VDI), *Standortbezogene Akzeptanzprobleme in der deutschen Industrie- und Technologiepolitik: Zukünftige Herausforderungen der Energiewende*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2014.
[71] F. Brettschneider, 'Erfolgsbedingungen bei Großprojekten', in *Politik mit Bürgern – Politik für Bürger, Bürgergesellschaft und Demokratie*, M. Glaab, Ed., Wiesbaden: Springer VS, 2016, pp. 219–238. doi: 10.1007/978-3-658-13768-6_13.
[72] Y. Schöpper *et al.*, 'Developing a Niche Readiness Level Model to Assess Socio-Economic Maturity: The Case of DC Technologies in the Transition to Flexible Electrical Networks', *FCN Work. Pap.*, Nov. 2023, doi: 10.2139/ssrn.4683145.
[73] Y. Schöpper *et al.*, 'Towards niche readiness: Achieving socio-economic maturity in the bottom-up transition to DC power systems', *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 51, p. 100831, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.eist.2024.100831.

[74] Y. Schöpper *et al.*, 'Towards Niche Readiness: Achieving Socio-Economic Maturity in the Bottom-Up Transition of DC Power Systems', in *Proceedings of the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST 2022)*, Melbourne, Australia, 2022.
[75] Y. Schöpper and C. Digmayer, 'Project Presentation of DC-cio-Economics for MSDI-Research Seminar', 2022.
[76] S. Böschen *et al.*, 'Infrastructures and Transformation: Between Path Dependency and Opening-Up for Experimental Change', in *Transformation Towards Sustainability*, P. Letmathe, C. Roll, A. Balleer, S. Böschen, W. Breuer, A. Förster, G. Gramelsberger, K. Greiff, R. Häußling, M. Lemme, M. Leuchner, M. Paegert, F. T. Piller, E. Seefried, and T. Wahlbrink, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2024, pp. 93–117. doi: 10.1007/978-3-031-54700-3_4.
[77] Y. Schöpper *et al.*, 'A Niche Readiness Level Model for Assessing the Maturity of Socio-Economic Niches: The Case of Direct Current Technology Applications', *FCN Work. Pap. No 142024*, 2024.
[78] Y. Schöpper and J. Schäfer, 'Studie zur Entwicklung der Windenergie und Photovoltaik in Deutschland', 2021.
[79] J. Schäfer, 'Die soziotechnische Nische als Grenzobjekt - Eine Fallstudie am Beispiel des Projekts FEN-2', Masterarbeit, RWTH Aachen University, Aachen, 2022.
[80] Y. Schöpper, S. Hermens, A. Lapthorn, and S. Silva, 'Assessing Niche Readiness of DC Microgrid Applications: Insights from New Zealand's Energy Transition to Carbon Neutrality', in *Proceedings of the 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2024)*, Chicago, USA, 2025.
[81] Y. Schöpper and S. Böschen, 'Stimulating Niche-Regime Interaction through Intermediary Activities: The Case of DC Neighbourhoods in Germany', in *Proceedings of the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST 2022)*, Melbourne, Australia, 2022.
[82] Y. Schöpper, 'FEN, DC-Socio-Economics: Assessing Niche Readiness for DC Applications', presented at the FENomenal Friday, Apr. 28, 2023.
[83] R. Nejabat and R. Madlener, 'Factors Influencing Household Decisions to Adopt Hybrid AC-DC Homes: Empirical Evidence from German Homeowners', *FCN Work. Pap.*, vol. 18, 2024.
[84] W. B. Arthur, 'Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events', *Econ. J.*, vol. 99, no. 394, pp. 116–131, 1989, doi: https://doi.org/10.2307/2234208.
[85] A. Bassanini and G. Dosi, *Competing Technologies, International Diffusion and the Rate of Convergence to a Stable Market Structure.* Laxenburg, Austria: IIASA Interim Report. IIASA, : IR-98-012, 1998.
[86] Y. Schöpper *et al.*, 'Towards Niche Readiness: Achieving Socio-Economic Maturity in the Bottom-up Transition to DC Power Systems', *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 51, p. 100831, 2024, doi: 10.1016/j.eist.2024.100831.
[87] N. Steireif, 'Auswirkungen organisationaler Agilität auf die Teamarbeit und den Projekterfolg in der Technologieentwicklung', RWTH Aachen University, 2024. doi: 10.18154/RWTH-2024-04931.
[88] N. Steireif, M. Schirmer, M. Schnitzler, and S. Mutze-Niewohner, 'Towards an Extended Team Model for Agile Development of Complex Products', in *2020 IEEE International*

Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, Singapore: IEEE, Dec. 2020, pp. 280–284. doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309811.

[89] M. Schnitzler, 'Reifegradmodell für die Entwicklung von Nischen zur Diffusion innovativer Technologien', Master's thesis, RWTH Aachen, 2021.

[90] N. Steireif, M. Schnitzler, M. M. Schirmer, and S. Mütze-Niewöhner, 'Akteure in energietechnologischen Nischenprojekten: Arbeitsbericht aus dem Forschungsprojekt "DC-Sozio-Ökonomik"', Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen University, Aachen, 2025.

[91] N. Steireif, V. Nitsch, and S. Mütze-Niewöhner, 'Gestaltung von agilen Organisations- und Teamstrukturen: Ergebnisse einer Innterviewstudie mit Entwickler*innen von Energietechnologien', in *Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- unnd Lernprozesse: Bericht zum 69. Frühjahrskonkress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, GfA-Press, 2023.

[92] N. Steireif, V. Nitsch, and S. Mütze-Niewöhner, 'Design Factors for Organizational Agility in Power Technology Development: An Interview Study in Germany', *Int. J. Innov. Technol. Manag.*, vol. 20, no. 04, p. 2350022, Jun. 2023, doi: 10.1142/S0219877023500220.

[93] O. Thomas, 'Das Referenzmodellverständnis in der Wirtschaftsinformatik : Historie, Literaturanalyse und Begriffsexplikation', Universität des Saarlandes, 2006. doi: 10.22028/D291-23772.

[94] M. Hoegl and H. G. Gemuenden, 'Teamwork Quality and the Success of Innovative Projects: A Theoretical Concept and Empirical Evidence', *Organ. Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 435–449, Aug. 2001, doi: 10.1287/orsc.12.4.435.10635.

[95] J. E. Mathieu, J. R. Hollenbeck, D. Van Knippenberg, and D. R. Ilgen, 'A century of work teams in the Journal of Applied Psychology.', *J. Appl. Psychol.*, vol. 102, no. 3, pp. 452–467, 2017, doi: 10.1037/apl0000128.

[96] J. E. Mathieu, P. T. Gallagher, M. A. Domingo, and E. A. Klock, 'Embracing Complexity: Reviewing the Past Decade of Team Effectiveness Research', *Annu. Rev. Organ. Psychol. Organ. Behav.*, vol. 6, no. 1, pp. 17–46, Jan. 2019, doi: 10.1146/annurev-orgpsych-012218-015106.

[97] B. A. Latos, 'Auswirkungen von Komplexität auf die Performance von Produktionsgruppen', Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2020.

[98] N. Steireif, M. Schirmer, and S. Mütze-Niewöhner, 'Organizational Agility in Technology Development: Effects on Teamwork Quality, Project Success and Technology Diffusion Success', vol. International Journal of Innovation and Technology Management, eingereicht zur Publikation 2025.

[99] R. G. Heinze and E. Drewing, 'Das Quartier: Soziologische Annäherungen an einen schillernden Begriff', in *Handbuch Energieeffizienz im Quartier. Clever versorgen, umbauen, aktivieren*, C. Reicher and A. Schmidt, Eds., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021, pp. 31–55. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-21873-7_3

[100] O. Schnur, Ed., *Quartiersforschung: Zwischen Theorie und Praxis*, 2nd ed. Wiesbaden: Springer VS, 2014.

[101] D. Everding, ‘Projekte, Lösungsmodelle und Anforderungsprofile eines solaren Städtebaus’, in *Solarer Städtebau. Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild*, D. Everding, Ed., Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2017, pp. 125–228.

[102] C. Larisch, J. Wendorf, M. Birk, and S. Hermens, ‘Mobilstationen als Stadtbaustein der Energie-und Verkehrswende’, CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning, 2022, pp. 495–503.

[103] C. Larisch, S. Hermens, and J. Wendorff, ‘Straßenbahntrassen als energetische Gunsträume: Städtebauliche Integration technischer Infrastrukturen im Kontext der Energiewende’, *Transform. Cities*, vol. 8, no. 4, Art. no. 4, 2023.

[104] S. Hermens and Y. Schöpper, ‘Gleichstromsysteme als Baustein der Energiewende: Herausforderungen und Ansätze von Gleichstromnetzen in der Stadtplanung’, *Raumplan. Mitteilungen Informationskreises Für Raumplan. IfR EV*, vol. 234, in press 2025.

[105] R. Bartusch and S. Hermens, ‘Energy-Hub – eine neue urbane Nische’, in *Zukunft Bau Pop-up Campus Aachen*, G. Hagel, A. Rose, and S. R. (BBSR) Bundesinstitut für Bau-, Eds., Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023.

[106] C. Digmayer, ‘Innovation communication in transitions to sustainable direct-current technologies’, presented at the 13th International Sustainability Transitions Conference (IST), online/ Melbourne (Australien), 25/11 2022.

[107] C. Digmayer and G. P. Pogue, ‘Using Community Values and Governance Preferences to Facilitate Transitions Toward Sustainable Energies’, *IEEE Trans. Technol. Soc.*, vol. 4, no. 4, pp. 314–324, Dec. 2023, doi: 10.1109/TTS.2024.3358984.

[108] C. Digmayer and E.-M. Jakobs, ‘What Niche Design Can Learn from Acceptance Mining’, in *Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering*, vol. 271, T. Z. Ahram, W. Karwowski, and J. Kalra, Eds., in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 271. , Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 485–492.

[109] C. Digmayer and E.-M. Jakobs, ‘Unlocking the potential of public opinions for niche development using acceptance mining’, *Methodol. Innov.*, vol. 16, no. 1, pp. 78–90, Mar. 2023, doi: 10.1177/20597991221150088.

[110] A. Smith and R. Raven, ‘What is protective space? Reconsidering niches in transitions to sustainability’, *Res. Policy*, vol. 41, pp. 1025–1036, 2012.

[111] G. P. Pogue, C. Spinuzzi, and C. Digmayer, ‘Mentors, Markets, and Money: How Entrepreneurs Can Leverage Feedback Loops with Stakeholders to Articulate Value Propositions’, in *New Leadership Communication—Inspire Your Horizon*, N. Pfeffermann and M. Schaller, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 389–408. doi: 10.1007/978-3-031-34314-8_28.

[112] S. Krugsberger, ‘Strategische Innovationskommunikation Ein phasenbasiertes Konzept für die Kommunikation von Innovationen in Unternehmen am Beispiel der digitalen Transformation und Industrie 4.0’, Universität Hohenheim, 2019.

7. Liste der Tabellen

Tabelle 1: Akteursgruppen und ihre Rollen im DC-Freiraumkontext 49
Tabelle 2: Hauptpositionen des zahlenmäßigen Nachweises 72

8. Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Modellprototyp des Niche Readiness Level Model 14

Abbildung 2: Der Kern des Niche Readiness Level Model 16

Abbildung 3: Niche Readiness-Bestimmung für industrielle und nicht-industrielle DC-Gebäude in Deutschland 20

Abbildung 4: Antworten auf den Fragekomplex “Most relevant aspects for introducing innovative technologies in the participant’s field.” 21

Abbildung 5: Nischenentwicklung für Onshore-Windenergieanlagen seit 1900; Quelle: [78, p. 49] 23

Abbildung 6: Die fünf relevantesten Qualitäten von Microgrids in Neuseeland 26

Abbildung 7: Die Zusammenstellung des Samples 26

Abbildung 8: Histogramm der jährlichen Kosteneinsparungen von Haushalten mit einem DC-System, mit und ohne P2P-Handel (Optimale PV- und Batteriegröße) 32

Abbildung 9: Jährliche Kosteneinsparungen durch DC-Konfiguration vs. Haushaltslasten (Optimale PV- und Batteriegröße) 32

Abbildung 10: Jährliche durchschnittliche Kosteneinsparungen für verschiedene PV- und Batteriegrößen 33

Abbildung 11: Sozioökonomische Einflüsse auf Hauptbedenken bei der DC-Technologie-Adoption 34

Abbildung 12: Sozioökonomische Merkmale und Berücksichtigung der Erhöhung der Gerätehaltbarkeit 35

Abbildung 13: Sozioökonomische Merkmale und Interesse an dem Angebot 35

Abbildung 14: Rahmenwerk des Modellierungsansatzes 36

Abbildung 15: Akteure in energietechnologischen Nischenprojekten (modifizierte Darstellung in Anlehnung an [89]; entnommen aus [90, p. 7]) 39

Abbildung 16: : Phasen in energietechnologischen Nischenprojekten (modifiziert entnommen aus [89, p. 86]) 39

Abbildung 17: Referenzmodell für die Gestaltung agiler, teambasierter Technologieentwicklungsprojekte mit positiver Wirkung auf Projekt- und Diffusionserfolg (in Anlehnung an [98]) 43

Abbildung 18: Modellumgebung DC-Quartier (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur) 46

Abbildung 19: AC- und DC-Ladesäulen 46

Abbildung 20: Ergebnis der Lehrveranstaltung "Eine neue urbane Nische" [103, p. 201] 47

Abbildung 21: Quartiersanalyse energetischer Potenziale [103, p. 201] 47

Abbildung 22: Ergebnis aus der Lehrveranstaltung „Energy-Hub: eine neue urbane Nische" [103, p. 203] 48

Abbildung 23: Drei Phasen der Szenarienentwicklung des Use Cases „Quartier" von AC zu DC (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur) 50

Abbildung 24: Ergebnis des Workshops "Die Rolle gemeinnütziger Akteure bei der energetischen Sanierung von Mehrfamilienhäusern" (Quelle: Institut und Lehrstuhl für Landschaftsarchitektur) 51

Abbildung 25: Herausforderungen bei der Integration von DC-Netzen in Gebäuden und sich daraus entwickelte Ansätze (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen) .. 56

Abbildung 26: Stadtraumtypen in der Aachener Innenstadt (eigene Darstellung nach Mohamad Alkhabaz, 2022) 57

Abbildung 27: Einfamilienhaus Szenarien (AC, AC/DC, DC) (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen) 58

Abbildung 28: DC-Use-Cases im urbanen Raum (Quelle: Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Entwerfen) 58

Abbildung 29: Abbildungscollage zu Formen der städtebaulichen Integration von DC-Technologien 61

Abbildung 30: Übersicht zu DC-Technologien 64

Abbildung 31: Häufigkeit der in Werbematerialien diskutierten DC-Vorteile 67

Abbildung 32: Akzeptanzkartographie für die Nutzung von DC-Technologien 69