



ARBEITSPAPIER

Pfadabhängigkeiten

Querschnittsanalyse auf Basis von 15 Transformationsfeldern
im Rahmen des Projekts Evolution2Green –
Transformationspfade zu einer Green Economy

Jens Clausen, Klaus Fichter (Borderstep)
unter Mitarbeit von Valentin Tappeser (adelphi) und Siegfried Behrendt (IZT)

Stand: März 2017

Projektleitung

adelphi research gemeinnützige GmbH

Alt-Moabit 91
14193 Berlin

T +49 (0)30-89 000 68-0
F +49 (0)30-89 000 68-10

www.adelphi.de
office@adelphi.de

Projektpartner

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Clayallee 323
14169 Berlin

T: +49 (0)30 - 306 45 1000

www.borderstep.de
info@borderstep.de

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH

Schopenhauerstr. 26
14129 Berlin

T: +49 (0) 30 80 30 88-0

www.izt.de
info@izt.de

Abbildung Titel: © Pixelbliss - shutterstock.com

evolution2green wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.



Executive Summary

In routine paths, binding forces generally stabilize the path for a long time and make it very resistant to changes of any kind. Achieving a deviation from the path may be very difficult and competing paths can be locked out. The concept of path dependencies serves in the evolutionary economics for the analysis and explanation of these binding and release forces (Nelson, 1987; Nelson & Winter, 1982). Gavetti and Levinthal (2000) see backward-oriented dynamics that are based on experiences opposing forward-looking dynamics supported by cognitive assumptions (Gardini, Hommes, Tramontana & de Vilder, 2009, Gavetti & Levinthal, 2000). Path dependencies often have a dual function: on the one hand they stabilize historically grown paths; on the other hand, they are also important for the emergence of new paths (Vergne & Durand, 2010, p. 738).

Within the scope of the project Evolution2Green, path dependencies in 15 transformation fields have been investigated and described in detail.

In order to identify structures behind the various path dependencies revealed in the analysis, these studies were subjected to a comparative analysis. All path dependencies mentioned in the 15 studies were tabulated and briefly characterized. The path dependencies were assigned to five types of path dependencies. According to the Metaplan method, these path dependencies were recorded and clustered on single cards. The present study presents the results of the comparative analysis.

In Chapter 2, the underlying typology is explained and scientifically classified.

Chapter 3 documents the selection of the 15 transformation fields in which path dependencies were searched.

Chapter 4 describes the path dependencies found in each of the four transformation areas, as well as their network relationships, their temporal development, and their relation to transformation approaches.

Chapter 5 provides a detailed analysis of the basic types of path dependencies and elaborates four typical network relationships, ie, characteristic systems of lock-ins, and describes their dynamics.

Chapter 6 derives first consequences from the analysis.

Zusammenfassung

In Routinepfaden wirken in der Regel erhebliche Bindungskräfte, die den Pfad für lange Zeit stabilisieren und gegen Änderungen jeder Art sehr widerstandsfähig machen können. Eine Abweichung vom Pfad zu erreichen wird dann sehr schwierig, konkurrierende Pfade können „ausgeriegelt“ werden (Lock-out). Das Konzept der Pfadabhängigkeiten dient der Evolutorischen Ökonomik zur Analyse und Erklärung dieser Bindungs- und Ausriegelungskräfte (Nelson, 1987; Nelson & Winter, 1982). Gavetti und Levinthal (2000) sehen dabei rückwärts gerichtete und auf Erfahrungen aufbauende Dynamiken den vorwärts gerichteten, durch kognitive Annahmen gestützten Dynamiken gegenüberstehen (Gardini, Hommes, Tramontana & de Vilder, 2009; Gavetti & Levinthal, 2000). Pfadabhängigkeiten haben oft eine Doppelfunktion: einerseits stabilisieren sie historisch gewachsene Pfade, andererseits sind sie auch für die Ausprägung neu entstehender Pfade von Bedeutung (Vergne & Durand, 2010, S. 738).

Im Rahmen des Projektes Evolution2Green wurden Pfadabhängigkeiten in 15 Transformationsfeldern, die vier „Wendethemen“ bzw. Transformationsbereichen zugeordnet sind, untersucht und im Detail beschrieben.

Um Strukturen hinter den vielfältigen in der Analyse ans Licht gebrachten Pfadabhängigkeiten zu erkennen, wurden diese Studien einer vergleichenden Analyse unterzogen. Alle Pfadabhängigkeiten, die in den 15 Studien erwähnt wurden, wurden tabellarisch erfasst und kurz charakterisiert. Die Pfadabhängigkeiten wurden den fünf Typen von Pfadabhängigkeiten zugeordnet. Nach dem Metaplanverfahren wurden diese Pfadabhängigkeiten auf Einzelkärtchen erfasst und geclustert. Die vorliegende Studie stellt die Ergebnisse der vergleichenden Analyse dar.

In Kapitel 2 wird die zugrundeliegende Typologie erläutert und wissenschaftlich eingeordnet.

Kapitel 3 dokumentiert die Auswahl der 15 Transformationsfelder, in denen nach Pfadabhängigkeiten gesucht wurde.

Kapitel 4 beschreibt die Pfadabhängigkeiten, die in den vier Wendethemen jeweils gefunden wurde sowie ihre Netzwerkbeziehungen, die zeitliche Entwicklung und ihren Bezug zu Transformationsansätzen.

Kapitel 5 leistet eine Detailanalyse der grundlegenden Typen von Pfadabhängigkeiten und arbeitet vier typische Netzwerkbeziehungen, also charakteristische Systeme von Lock-ins heraus und beschreibt ihre Dynamiken.

Kapitel 6 leitet erste Konsequenzen aus der Analyse ab.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	8
2 Pfadabhängigkeiten	9
2.1 Typen von Pfadabhängigkeiten	11
2.2 Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten	13
3 Die Auswahl der 15 Transformationsfelder	16
4 Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen	21
4.1 PKW-Mobilität	21
4.1.1 Transformationsansätze	25
4.1.2 Hierarchie und Beziehung zwischen den Transformationsansätzen	25
4.1.3 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze	26
4.1.1 Fazit	27
4.2 Landwirtschaft und Ernährung	27
4.2.1 Transformationsansätze	31
4.2.2 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze	31
4.2.3 Fazit	33
4.3 Wärmeversorgung	33
4.3.1 Transformationsansätze	37
4.3.2 Hierarchie und Beziehung zwischen Transformationsansätzen	38
4.3.3 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze	39
4.3.4 Fazit	40
4.4 Rohstoffversorgung	40
4.4.1 Transformationsansätze	46
4.4.2 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze	46
4.4.3 Fazit	48
5 Pfadabhängigkeiten	49
5.1 Detailanalyse der Typen von Pfadabhängigkeiten	51

5.1.1	Rechtliche Pfadabhängigkeiten	51
5.1.2	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	52
5.1.3	Technische Pfadabhängigkeiten	54
5.1.4	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	55
5.1.5	Nutzungsbezogene Pfadabhängigkeiten	57
5.1.6	Fazit	59
5.2	Typische Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten	59
5.2.1	Gebaute Infrastrukturen und Nutzungsnotwendigkeiten	59
5.2.2	Persistente Nutzungsgewohnheiten	61
5.2.3	Technisch-institutionelle Komplexe mit starken technischen Defiziten	63
5.2.4	Technisch-institutionellen Komplexe mit verfügbarer Alternative	64
6	Fazit	67
6.1	Zentrale Erkenntnisse zu Pfadabhängigkeiten	67
6.2	Konsequenzen für die Wendethemen	67
6.3	Weitere Konsequenzen	69
6.4	Konsequenzen für die Transformationsforschung	70
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang 1: Verzeichnis Pfadabhängigkeiten	76
6.5	PKW-Mobilität	76
6.6	Landwirtschaft und Ernährung	78
6.7	Wärmeversorgung	80
6.8	Rohstoffversorgung	82
	Anhang 2: Mögliche Transformationsfelder zur Analyse in AP 2	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der techno-industrielle Komplex aus Stromproduktion, Transport und Verbrauch	12
Abbildung 2: Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten	14
Abbildung 3: Erster Auswahlschritt Transformationsfeldanalysen	17
Abbildung 4: Auswahlheuristik für die Transformationsfeldanalysen	17
Abbildung 5: Finale Auswahl der Transformationsfeldanalysen	18
Abbildung 6: Lock-in System in Straßenbau und Automobilität	22
Abbildung 7: Lock-in System PKW-Antriebe	23
Abbildung 8: Lock-in System PKW-Entsorgung	24
Abbildung 9: Lock-in System im Fleischkonsum	28
Abbildung 10: Lock-in System beim Einsatz von Stickstoff und Pestiziden sowie bei „grünen Infrastrukturen“	30
Abbildung 11: Lock-In in einen hohen Wärmeenergieverbrauch von Gebäuden	35
Abbildung 12: Lock-in in fossile Wärmeversorgung von Gebäuden	36
Abbildung 13: Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten	37
Abbildung 14: Lock-in in ein massebasiertes Recycling	43
Abbildung 15: Lock-In auf eine Erdöl-basierte Chemieindustrie	44
Abbildung 16: Lock-in in eine nachsorgende Abwasserreinigung	45
Abbildung 17: Zahl und Typ von Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen	49
Abbildung 18: Starke und schwache Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen	50
Abbildung 19: Starke und schwache Pfadabhängigkeiten nach Typ	50
Abbildung 20: Überblick über Typen rechtlicher Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele	51
Abbildung 21: Überblick über Typen ökonomischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele	53
Abbildung 22: Überblick über Typen technischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele	54
Abbildung 23: Überblick über Typen organisatorischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele	55
Abbildung 24: Überblick über Typen nutzungsbezogener Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele	57
Abbildung 25: Lock-in System in Straßenbau und Automobilität	60
Abbildung 26: Lock-in System im Fleischkonsum	62
Abbildung 27: Lock-in System der PKW mit Verbrennungsmotor	64
Abbildung 28: Lock-in System in der landwirtschaftlichen Produktion	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typen von Pfadabhängigkeiten	13
Tabelle 2: Fertiggestellte Transformationsfeldstudien in AP 2	19
Tabelle 3: Anzahl Pfadabhängigkeiten in PKW-Verkehr	21
Tabelle 4: Anzahl Pfadabhängigkeiten in Landwirtschaft und Ernährung	28
Tabelle 5: Anzahl Pfadabhängigkeiten in der Wärmeversorgung	34
Tabelle 6: Anzahl Pfadabhängigkeiten in der Rohstoffversorgung	41
Tabelle 7: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der PKW-Mobilität	76
Tabelle 8: Übersicht Pfadabhängigkeiten in Landwirtschaft und Ernährung	78
Tabelle 9: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der Wärmeversorgung	80
Tabelle 10: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der Rohstoffversorgung	82
Tabelle 11: Mögliche Transformationsfelder zur Analyse in AP 2	85

Abkürzungsverzeichnis

BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie
BtL	Biomass to Liquid,
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare Energien Wärme Gesetz
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MLP	Multi Level Perspective
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
No_x	Stickoxide
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment

1 Einleitung

Das Projekt Evolution2Green wird von adelphi gemeinsam mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Borderstep Institut durchgeführt. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung thematisiert das Vorhaben Transformationspfade hin zu einer Green Economy und die Gestaltung von Pfadwechseln.

Im zweiten Arbeitspaket des Projektes erfolgte die Analyse von 15 durch signifikante Umweltauswirkungen und erhebliche Transformationshemmnisse geprägten Transformationsfeldern in den Bereichen Mobilität, Energie, Ernährung/Landwirtschaft und Ressourcen. Diese Transformationsfelder wurden anhand des im ersten Arbeitspaket entwickelten Modells der evolutischen Ökonomik (Clausen & Fichter, 2016) auf Pfadabhängigkeiten untersucht, die einer Transformation zur Green Economy entgegenwirken. Weiter wird ein Überblick über die bekannten Transformationsansätze geschaffen und diese den drei Leiststrategien Effizienz, Konsistenz und Suffizienz zugeordnet (Behrendt, Göll & Korte, 2016). Die Pfadabhängigkeiten wurden in jedem Feld mit Blick auf ihre hemmende Wirkung auf die verschiedenen Transformationsansätze gewichtet.

Ziel des Projekts ist es, wesentliche Voraussetzungen für erfolgreiche Pfadwechsel zu identifizieren und mögliche Praktiken für die Transformation zu einer Green Economy zu identifizieren. Das Hauptziel dieses Arbeitspapiers ist es, konkrete Erscheinungsformen von Pfadabhängigkeiten mit Schwerpunkt auf Transformationsfelder zu einer Green Economy zu identifizieren.

Das vorliegende Papier stellt die Querschnittsanalyse zu den 15 Transformationsfeldstudien dar.

2 Pfadabhängigkeiten

Viele Arbeiten in der Innovationsforschung nutzen das Konzept der Pfadabhängigkeiten, um die Tatsache zu erklären, dass Veränderungen oft schwierig zu erreichen sind, vor allem in Bezug auf die Transformation zu einer Green Economy. Die überwiegende Mehrheit der Beiträge erklärt Pfadabhängigkeiten als vorwiegend technisches Phänomen. Die QWERTY-Tastatur (David, 1985; Liebowitz, 1995) und die Videokassettsysteme Betamax und VHS (Vergne & Durand, 2010) werden häufig als Beispiele herangezogen. Pfadabhängigkeiten gehen jedoch weit über technische Lock-ins hinaus. Das Projekt "Evolution2Green" hat u.a. zum Ziel, wesentliche Pfadabhängigkeiten als Hindernisse für die Transformation zu analysieren und dabei einen besonderen Schwerpunkt auf sozioökonomische Pfadabhängigkeiten in 15 verschiedenen Transformationsbereichen in Deutschland zu setzen.

In einem routinemäßigen Pfad bestehen in der Regel beträchtliche Bindungen, die ihn über lange Zeiträume stabilisieren und ihn sehr resistent gegen Veränderungen jeglicher Art machen können. Eine Abweichung vom bestehenden Pfad wird sehr schwierig und konkurrierende Pfade können ausgeriegelt werden. Die evolutorische Ökonomik greift das Konzept der Pfadabhängigkeiten auf, um sowohl die Bindungen als auch die Kräfte, die Alternativen ausschließen, zu analysieren und zu erklären (Nelson, 1987; Nelson & Winter, 1982). In diesem Zusammenhang differenzieren Gavetti und Levinthal (2000) einerseits rückwärts gerichtete Dynamiken, die auf Erfahrungen aufbauen, und andererseits Dynamiken, die nach vorn gerichtet sind und von kognitiven Annahmen unterstützt werden (Gardini et al., 2009; Gavetti & Levinthal, 2000).

Nill (Nill, 2009; Nill, Sartorius & Zundel, 2005) unterscheidet zwischen Lock-in im Wettbewerb einer etablierten Technologie und einer neuen Lösung („alt-neu Wettbewerb“) einerseits und dem Wettbewerb zwischen zwei neuen Lösungen („Neu-neu Wettbewerb“) auf der anderen Seite. Bei Pfadabhängigkeiten im Falle konkurrierender neuer Technologien wurden von Arthur (1989) „increasing returns“ gefunden, also Skalen- und Lerneffekte sowie Vorteile durch bessere Koordination und Netzwerke, sogar im Falle nicht unbedingt überlegener Alternativen. Durch kontingente Ereignisse kann dabei eine der Alternativen einen ersten Vorteil erlangen und später den Markt dominieren. Andere Autoren untersuchen Pfadabhängigkeiten im Hinblick auf konkurrierende neue Technologien in der Phase der Nischenbildung (Nill, 2009) und im Nischenmanagement (Kemp, 1994).

David (2000) arbeitete intensiv an Definitionen der Pfadabhängigkeit. Vergne und Durand führen eine formale Definition der Pfadabhängigkeit ein, die zwischen Pfadabhängigkeit und anderen Mechanismen der Art "Geschichte ist von Bedeutung" unterscheidet. Fälle von Pfadabhängigkeit werden hier mit stochastischen Prozessen, Kontingenzereignissen, selbstverstärkende Mechanismen und Lock-ins verknüpft (Vergne & Durand, 2010, S. 741). Garud et al. (2010) diskutieren und verwerfen Vergne und Durand systematisch und eröffnen damit den Raum für eine Diskussion über Mechanismen der Pfadkreation. Es muss aber angemerkt werden, dass der Prozess, den sie als Pfadkreation beschreiben (Garud et al., 2010; Karnøe & Garud, 2012) deutliche Überschneidungen mit der Entrepreneurship-Forschung (Casson, 1982; Schumpeter, 1983) sowie mit Arbeiten zu sozialen Netzwerken von Entrepreneuren aufweist (Aldrich & Zimmer, 1986; Jarillo, 1988). Weiter sind Parallelen zur Clusterforschung (Kärcher-Vital, 2002; Porter, 1998), festzustellen.

Mit Blick auf die Praktikabilität und die politische Relevanz des Konzepts der Pfadabhängigkeit ist diese in diesem Papier sehr breit wie folgt definiert:

Der Begriff Pfadabhängigkeit beschreibt, dass ein Ereignis von vorangegangenen Ereignissen oder bislang üblichen Denk- und Verhaltensweisen abhängig ist. Das Konzept der Pfadabhängigkeit besagt allgemein, dass eine kausale Wirkung von früheren Ereignissen der Ereigniskette A, B, C, D, E ... auf spätere vorliegt.

Diese Definition wurde gewählt und berücksichtigt, dass die auf dieser Definition basierende Analyse Pfadabhängigkeiten mit Schwerpunkt auf den "alt-neu Wettbewerb" identifiziert, wobei im Allgemeinen eine alte, nicht nachhaltige Technologie oder Lösung mit einer neuen, nachhaltigeren Technologie oder Lösung konkurriert. Die Definition ist viel breiter als die, die z.B. von Vergne und Durand genutzt wurde und bringt damit die Gefahr mit sich, auch Effekte zu umfassen, die andere allgemein als Hemmnisse beschreiben könnten.

Damit stellt sich die Frage, wie ein Hemmnis gegenüber einer Pfadabhängigkeit abgegrenzt werden kann. Hierzu wäre zunächst das Hemmnis zu definieren:

Ein Hemmnis oder Hindernis ist etwas, was sich hemmend oder erschwerend auf die (erwünschte) Entwicklungsrichtung eines Prozesses auswirkt, unabhängig davon, ob es historisch bedingt ist (Pfadabhängigkeit) oder ein Faktor der aktuellen Kontextbedingungen ist.

Sowohl aktuelle Kontextbedingungen wie auch eine Pfadabhängigkeit können sich also erschwerend auf einen Prozess auswirken. Das Spezifikum der Pfadabhängigkeit liegt darin, dass die Hemmung historischer Natur ist, also von vorangegangenen Ereignissen oder bisher üblichen Denk- und Verhaltensweisen abhängig. Es mag zur Abgrenzung der Begriffe weiter führen, den in den Transformationsfeldstudien gefundenen Pfadabhängigkeiten eine Reihe von Hemmnissen gegenüber zu stellen, die z.B. als wesentlich für die (Nicht-)Durchführung von Umweltmaßnahmen in Unternehmen gefunden wurden (Hitchens, Trainor & Clausen, 2003, S. 65, 107, 151, 224), also letztlich die Diffusion von Umweltinnovationen hemmen:

- Schwierigkeiten in der Beschaffung von Kapital,
- zu lange Amortisationszeit von möglichen Investitionen,
- Mangel an qualifiziertem Personal,
- Unsicherheiten in der Anwendung neuer Technologien,
- andere Prioritäten des Managements,
- Mangel an Managementzeit,
- Dominanz des Profitmotivs über das Umweltschutzmotiv,
- Mangel an qualifizierten Zulieferern oder Beratern.

Die meisten dieser Hemmnisse sind nicht durch Pfadabhängigkeiten begründet. Nur der Mangel an qualifiziertem Personal, Zulieferern und Beratern ist ohne einen historischen Vorlauf nicht erklärbar. Die anderen Hemmnisse begründen sich primär durch Sichtweisen auf die Gegenwart oder Zukunft, Prioritäten oder Meinungen und lassen sich durchaus klar von Pfadabhängigkeiten abgrenzen.

D'Este et al. (2012) kategorisieren ein ähnliches Spektrum an Hemmnissen, wieder mit dem Fokus auf Unternehmen. Sie unterscheiden Kostenfaktoren (hohe ökonomische Risiken, zu hohe Innovationskosten, Kosten und Verfügbarkeit der Finanzierung), Wissensfaktoren (Mangel an qualifiziertem Personal sowie an Wissen über Technologie und Markt), Marktfaktoren (dominierende etablierte Unternehmen, Unklarheiten bezgl. Nachfrage) und regulative Faktoren (Notwendigkeit der Erfüllung von nationalen Regeln und solchen der EU). Mit Bezug zu Pfadabhängigkeiten ist in den von D'Este aufgeführten Hemmnissen der Mangel an qualifiziertem Personal und Wissen wie auch die Dominanz etablierter Firmen im Zielmarkt hinzuweisen. Bei den anderen untersuchten Hemmnissen kann der Charakter einer Pfadabhängigkeit auch hier nicht erkannt werden.

2.1 Typen von Pfadabhängigkeiten

In der Literatur, die sich mit Pfadabhängigkeiten beschäftigt, werden verschiedene Arten von Rückkopplungsschleifen und selbstverstärkenden Effekten diskutiert (Lehmann-Waffenschmidt & Reichel, 2000, 349). In vielen Fällen wird dabei keine systematische Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Pfadabhängigkeiten gemacht. Dies wäre aber wichtig, um Chancen für bewussten Wandel und Innovation besser zu erkennen und zu verstehen. Ein interessantes Beispiel eines differenzierteren systematischen Ansatzes findet sich bei Nill (2009, 138), der sechs Arten von Lock-in-Verstärkern unterscheidet :

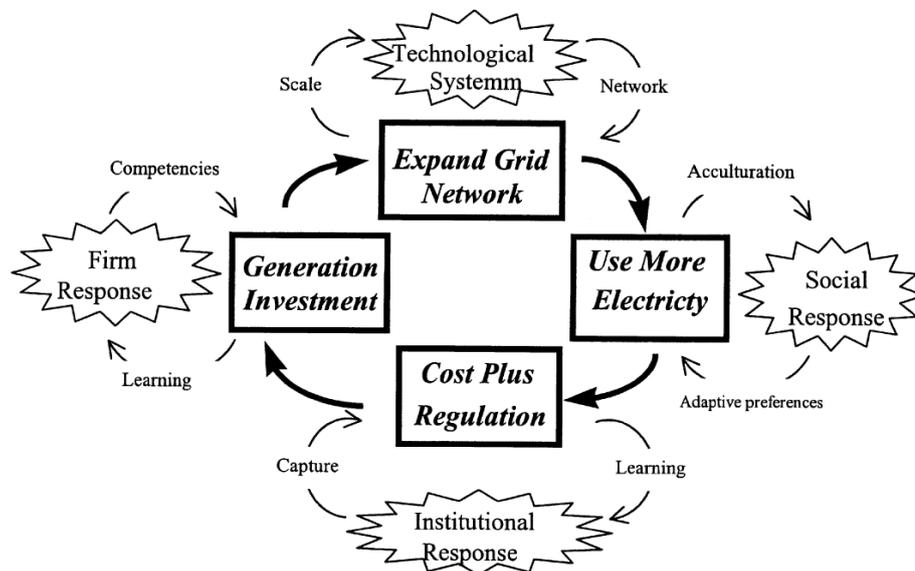
1. *"Irreversible Investitionen in die etablierte Technologie,*
2. *Wechselkosten aufgrund von technischen Komplementaritäten,*
3. *Unsicherheit über die Güte der neuen Technologien,*
4. *"Set-up" Kosten der neuen Technologie,*
5. *Koordinationsprobleme seitens der Akteure, die die neuen Technologien vorantreiben sowie*
6. *institutionelle Wechselhemmnisse."*

Unruh (2000) setzt Pfadabhängigkeit in den Kontext der Entwicklung technologischer Systeme. Lock-in entsteht bei ihm, wenn zusammenhängende Komponenten eines Systems einen hohen Wert für die Anwender sowie für Produzenten entwickeln und sich in spezifischen und oft sehr stabilen Produktions- und Konsumverhältnissen ausdrücken. Als Beispiel für ein technisches System erwähnt Unruh (2000, S. 822) Autos und den Individualverkehr, einschließlich der Zulieferindustrie, der Erdölproduktion und -verteilung, der Kautschukhersteller und Straßenbauer. Er beschreibt so ein umfängliches System, das größer ist, mehr Leistung hat und schwieriger zu ändern ist als eine einzelne Technologie. Die Langzeitstabilität eines solchen Systems wird dadurch gestärkt, dass Unternehmen an die Entwicklung des dominanten Designs gebunden sind und sich so auf inkrementelle Innovationen konzentrieren, um ihre Produkte zu optimieren. Diese Unternehmen sind selten die Quelle radikaler Innovationen. Da etablierte Unternehmen in der Regel höhere Gewinne und Cashflows generieren als mögliche neue Wettbewerber mit neuen (nachhaltigen) Produkten, haben sie einen besseren Zugang zu Kapital, um ihre Investitionen zu finanzieren und so die Lock-in-Bedingungen weiter zu verschärfen. Zusätzlich zu den so entstehenden Unterschieden in der Verfügbarkeit von endogenen Kapital folgt die Verfügbarkeit externer Finanzierungen der gleichen Dynamik. Finanzinstitute sind generell in ihrer Kreditvergabe risikoavers und vergeben Kredite häufiger an etablierten Unternehmen als an Wettbewerber mit neuen und weniger bewährten Produkten (Unruh, 2000, S. 823). Wenn das System an Größe wächst, entstehen Industrieverbände und Gewerkschaften und bündeln häufig ihre Interessen. Die Anwender sind ebenso in das System eingebunden, da sich der hohe praktische Nutzen der Systemdienste in Verhaltensinstitutionen und sozialen Normen manifestiert. Die wichtigsten Arten von Pfadabhängigkeiten, die Unruh sieht, sind:

- Ein erfolgreiches technisches System, das sich im Laufe der Zeit entwickelt hat und physische, soziale und informative Elemente umfasst,
- Produzenten des dominanten Designs, die ihre Produktionsanlagen besitzen und Profit machen, mit der langfristigen Wirkung, nur im Rahmen des dominanten Designs zu denken,
- Industrieverbände und Gewerkschaften, die von dem etablierten Weg profitieren und Lobbyismus für ihre Interessen betreiben,
- Benutzer des dominanten Designs, die die jeweiligen Produkte besitzen und in den täglichen Routinen und Kulturen des Gebrauchs gebunden sind

Unruh nutzt den Fall der Stromnetze, um den folgenden Überblick über die zugrunde liegende Systemdynamik zu geben:

Abbildung 1: Der techno-industrielle Komplex aus Stromproduktion, Transport und Verbrauch



Quelle: Unruh (2000, S. 325)

Öffentliche Institutionen spielen nach Ansicht von Unruh eine besondere Rolle. Während die oben erwähnten Pfadabhängigkeiten alle Elemente einer Marktlogik sind (ähnlich auch bei Kirchner (2008, S. 331)), in denen ein stabiles Wechselspiel der Akteure von spezifischen Produktions- und Konsummustern profitiert, kann die öffentliche institutionelle Politik die Marktlogik außer Kraft setzen (Unruh, 2000, S. 324). Wenn politische und regulative Institutionen erst einmal beschlossen sind, neigen sie dazu, für lange Zeiträume zu bestehen. Lobby-Bemühungen von Akteuren des etablierten Regimes nutzen diese Dynamik oft um ihre Interessen zu wahren und dominante Pfade trotz veränderter Marktbedingungen zu verlängern. Aus bestimmten Gründen kann jedoch eine Regierung ihre regulatorische Macht auch nutzen, um einen Pfad zu ändern. Solche Gründe könnten die nationale Sicherheit oder die öffentliche Sicherheit, die Bereitstellung eines Universaldienstes für alle Bürger oder Fälle von so genannten natürlichen Monopolen sein (Unruh, 2000, S. 325). Auch in den Fällen eines sehr erfolgreichen Technologiesystems können schädliche Auswirkungen auf die Umwelt ein Grund für die Regierung sein, durch politische Maßnahmen einen Pfadwechsel herbeizuführen. Es kann vermutet werden, dass die Akteure des etablierten Pfades versuchen werden, die Regierung davon abzubringen und wenn es ihnen nicht gelingt, sie zumindest daran zu hindern, Regulierungen umzusetzen, die zur Änderung des Pfades wirklich effektiv sind. Folglich nutzt Nill (2009, S. 471) den Begriff der "Pfadwirksamkeit" bei der Bewertung von Pfadänderungskonzepten.

In dieser Studie wird eine Abgrenzung verschiedener Arten von Pfadabhängigkeiten vorgestellt, die hauptsächlich auf der Arbeit von Unruh (2000) und Beiträgen von Fichter und Clausen (2013, S. 90, 2016) basiert. Folgende Hauptarten von Pfadabhängigkeiten werden unterschieden:

Tabelle 1: Typen von Pfadabhängigkeiten

Typen von Pfadabhängigkeiten
Technologische Pfadabhängigkeiten, die durch fehlende alternative oder komplementäre Produkte oder Infrastrukturen entstehen
Ökonomische Pfadabhängigkeiten, z.B. durch Skalenvorteile
Organisatorische Pfadabhängigkeiten, die sich aus Prozessroutinen, Verfahren oder der Unternehmenskultur ergeben
Benutzerspezifische Pfadabhängigkeiten auf der Grundlage von Wahrnehmungen von Unsicherheiten, Verhaltensroutinen und kulturellen Normen
Gesetzliche Pfadabhängigkeiten auf der Grundlage von Gesetzen, Subventionen, technischen Normen und Genehmigungsanforderungen, die nicht nur die Rechtsgrundlage der Stabilität des beherrschenden Pfades bilden können, sondern auch auf Wirksamkeit bzw. Unwirksamkeit politischer Regelungen, die auf einen Pfadwechsel abzielen, beruhen können

Es wird hier ein Spektrum von Pfadabhängigkeiten behandelt, welches den Wandel zu einer Green Economy in Deutschland erschwert. Die in diesem Papier vorgestellte Analyse wird mit Schwerpunkt auf die Transformationsfelder Mobilität, Wärme, Ernährung/Landwirtschaft und Rohstoffe/Ressourcen durchgeführt. Die Arbeit soll nicht primär zur wissenschaftlichen Diskussion von Pfadabhängigkeiten als solchen beitragen, sondern zielt darauf, einen Blick auf den tatsächlichen Zustand der Transformation und Strategien zu deren Änderung zu werfen und so einen Beitrag dazu zu leisten, Pfadabhängigkeiten zu überwinden und Pfadwechsel herbeizuführen.

2.2 Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten

Die Analyse von Pfadabhängigkeiten scheint eine fruchtbare Methode der Transformationsforschung zu sein. Jänicke, Schreurs und Töpfer (2015) haben kürzlich hervorgehoben, wie wichtig es ist, vielfältige Vorteile (Co-Benefits) zu schaffen und möglichst viele Akteure und Gruppen in Transformationsprojekte zu integrieren. Die systematische Analyse von Pfadabhängigkeiten generiert einen guten Überblick über unterschiedliche Gruppeninteressen, mögliche finanzielle Werte, die bei der Transformation wertlos werden würden, die Rechtspositionen von Akteuren und den rechtlichen Rahmen, der die Transformation leicht oder schwer macht. Ein wichtiges Faktum ist, dass bestehende Sektoren, die Produkte in großen Mengen verkaufen, mehr Menschen beschäftigen und eine größere Lobbyarbeit leisten können als aufstrebende Sektoren mit nur wenigen innovativen Produkten.

Aber gibt es ein Muster hinter all diesen Pfadabhängigkeiten? Die folgende Abbildung schlägt eine Struktur vor:

Abbildung 2: Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten



Quelle: Borderstep

Im Zentrum der Transformationsdynamik gibt es eine große Anzahl von Märkten, in denen Waren verkauft und gekauft werden. Viele dieser Güter oder Technologien sind Teil größerer technologischer Systeme und Regimes (Kemp, 1994) und die Transformation solcher Märkte ist stark miteinander verknüpft. Diese Güter oder technologischen Systeme können, aber müssen nicht nachhaltig sein. Lieferanten wie auch Nutzer sind in Gewohnheiten oder Organisationsstrukturen verstrickt oder einfach an Investitionen und Infrastrukturen gebunden. All dies macht es einfacher, dem alten Weg zu folgen.

Eine zentrale Voraussetzung für Veränderungen ist es, über die notwendigen Fähigkeiten (Know-how, Technologien) zu verfügen. Zur Zeit verfügen z.B. eher Asien und die USA über genügend Know-how (gemessen an Patenten sowie an der Zahl der tatsächlich verkauften Autos), um hochwertige Elektroautos zu bauen, Europa ist eher abgeschlagen. F & E, wenn nötig mit öffentlichen Mitteln, wäre ein zentrales Mittel um hier ein Lock-out herbeizuführen. In der Landwirtschaft ist es in Europa so, dass mehr und mehr genetische Bestände (von Tierrassen sowie Pflanzensorten) an private Unternehmen übereignet werden, die diese erhalten können oder nicht. Potenzielle Wege zu einer nachhaltigen Landwirtschaft auf der Basis von regionalen und klimafreundlichen Viehbeständen und Pflanzenkulturen könnten somit dauerhaft unmöglich werden.

Der Wert von Unternehmen, gemessen an der Marktkapitalisierung, stellt keine historische Pfadabhängigkeit dar, sondern ist eher von Erwartungen an die Zukunft abhängig. Man könnte diesen Wert auch als Ergebnis des Prozesses der Pfadbildung sehen. Der Energiesektor zeigt, dass eine pfaderhaltende Strategie, unterstützt durch starke Lobbyarbeit von Unternehmen und Gewerkschaften, nicht erfolgreich war. Etwa 50% der Marktkapitalisierung der 16 größten europäischen Energieunternehmen gingen in den Jahren 2008 bis 2016 verloren (Clausen & Fichter, 2016, S. 14). Es ist die Aufgabe des Top-Managements, vorausschauend zu sein und in die Lösungen der Zukunft zu investieren - nicht in die Vergangenen-

heit. Nur so können die Werte der Aktionäre der etablierten Unternehmen langfristig gesichert werden.

3 Die Auswahl der 15 Transformationsfelder

Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie und ihre Umsetzung sind zwar im zweiten Peer Review wieder hoch gelobt worden, zugleich wurde aber empfohlen, dass die Bundesregierung langfristige Rahmenbedingungen für die Umsetzung schaffen und Kapazitäten umbauen möge (Rat für nachhaltige Entwicklung, 2013). Zudem beweist der Blick in die letzten Fortschrittsberichte (Die Bundesregierung, 2012, 2016), dass sich Fortschritte keineswegs bei allen Indikatoren ergeben haben. Selbst das deutsche Vorzeigeprojekt Energiewende kann zumindest in Bezug auf den Indikator Energieproduktivität die gewünschte Wirkung nicht erreichen. Darüber hinaus werden insbesondere mit Blick auf die Indikatoren Biodiversität, Flächenanteil der ökologischen Landwirtschaft, Flächenverbrauch und Güterverkehrsintensität wie auch in anderen Feldern die Reduktionsziele nicht erreicht. Und auch die Fortschritte in anderen Bereichen sind oft nicht ausreichend. Die Gründe sind vielfältig und die Zusammenhänge oft komplex, wie für einige Bereiche leicht zu belegen ist.

Die mangelnden Fortschritte in der Energieproduktivität haben vielfältige Ursachen. Beispielhaft sei angeführt, dass z.B. im Kontext der noch reichlich vorhandenen, ungenutzten industriellen Abwärme (Grote, Hoffmann & Tänzer, 2015; Pehnt & Bödecker, 2010) wie auch der zukünftig nötigen Nutzung von Wärme aus Solarkollektorfeldern (DLR, Fraunhofer IWES & IfnE, 2011) der Pfad der gebäudeindividuellen Wärmeversorgung teilweise verlassen und der Pfad der Versorgung über Wärmenetze verstärkt eingeschlagen werden müsste. Hier stellen sowohl erhebliche technische wie auch ökonomische Pfadabhängigkeiten sowie Regelwerke und Institutionen wesentliche Probleme dar, die im Vorfeld eines Pfadwechsels zu lösen wären.

Die Zunahme der Anbaufläche des ökologischen Landbaus ist in den letzten Jahren geringer geworden. Das in der Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 ursprünglich für das Jahr 2010 gesetzte, nationale Ziel von 20% Anteil an der landwirtschaftlichen Gesamtfläche würde bei der gegenwärtigen Entwicklung erst im Jahr 2080 erreicht. Das Streichen des Zeitziels weist auf eine gesunkene politische Priorität hin, deren Ursachen nicht zuletzt in ökonomischen Pfadabhängigkeiten und Interessen von Landwirtschaft und Lebensmittelwirtschaft liegen, denen mit Maßnahmen zur Förderung des ökologischen Konsums nicht oder nur eingeschränkt bei zukommen ist.

Die Aufzählung systemischer Unterschiede zwischen den Problemen und den jeweiligen Lösungskonzepten ließe sich fortsetzen. Für die Auswahl der zu untersuchenden Transformationsfelder mussten daher Kriterien gefunden werden.

Schon im Antrag zum Projekt waren solche zwei Kriterien aufgeführt worden:

- Zielerreichungsgrad bei den Nachhaltigkeitsindikatoren der Bundesregierung sowie
- Abdeckung verschiedener Typen von Transformationsfeldern, z.B.:
 - Probleme, gegen die überhaupt noch keine Maßnahmen begonnen wurden (z.B. Recycling von Technologiemetallen),
 - Probleme, bei denen Maßnahmen bisher deutlich zu wenig Wirkung zeigen (z.B. Ökoanbaufläche),
 - Ökologische Marktsegmente, die nur zu langsam aus der Nische kommen (z.B. Wärmenetze),

Von diesen Kriterien ausgehend wurde im Herbst 2015 als erster Schritt in einem dreistufigen Verfahren eine Liste von 22 möglichen Transformationsfeldern in den Bereichen Energie und Wohnen, Mobilität, Landwirtschaft und Ernährung sowie Produktion und Stoffströme für die Analyse in AP 2 aufgestellt (vgl. Abbildung 3 und Anhang 2).

Abbildung 3: Erster Auswahlschritt Transformationsfeldanalysen



Quelle: adelphi.

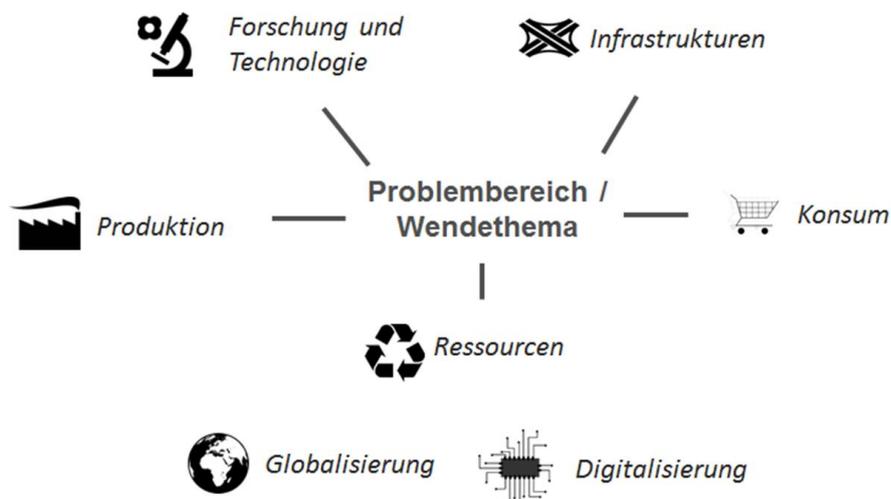
Auf der Sitzung des Expertenbeirats des Projektes wurde am 17.12.2015 die Auswahl der Transformationsfelder diskutiert. Aus dem Kreis wurde eine Reihe von Aspekten benannt, die bei der Auswahl der Transformationsfelder zu berücksichtigen wären:

- Bedeutung der Felder für die Nachhaltige Entwicklung, Mengenrelevanz,
- Aussicht auf eine erfolgreiche Transformation, Handlungsfähigkeit und Umsetzbarkeit,
- Berücksichtigung von Exnovationsprozessen,
- Berücksichtigung von Globalisierung und Digitalisierung.

Konkret empfohlen wurden die Transformationsfelder Mobilität (mit einem Fokus auf die forschungsintensive Automobilindustrie, an der Exnovationsperspektiven, Mythen und Narrative hängen), Wärmeversorgung (aufgrund ihrer Bedeutung für die Reduktion von Treibhausgasemissionen) sowie Landwirtschaft und Ernährung (inkl. nachwachsender Rohstoffe aufgrund von vielfältigen Umweltproblemen).

Unter Berücksichtigung der Positionen des Expertenbeirates wurden die schon im Vorfeld angedachten Bereiche durch das Projektteam konkretisiert und auf die Wendethemen PKW-Verkehr, Wärmeversorgung von Gebäuden, Landwirtschaft und Ernährung, sowie Rohstoffe / Ressourcen zugespitzt. Außerdem wurde eine Auswahlheuristik entwickelt, anhand derer die finale Auswahl erfolgte (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Auswahlheuristik für die Transformationsfeldanalysen

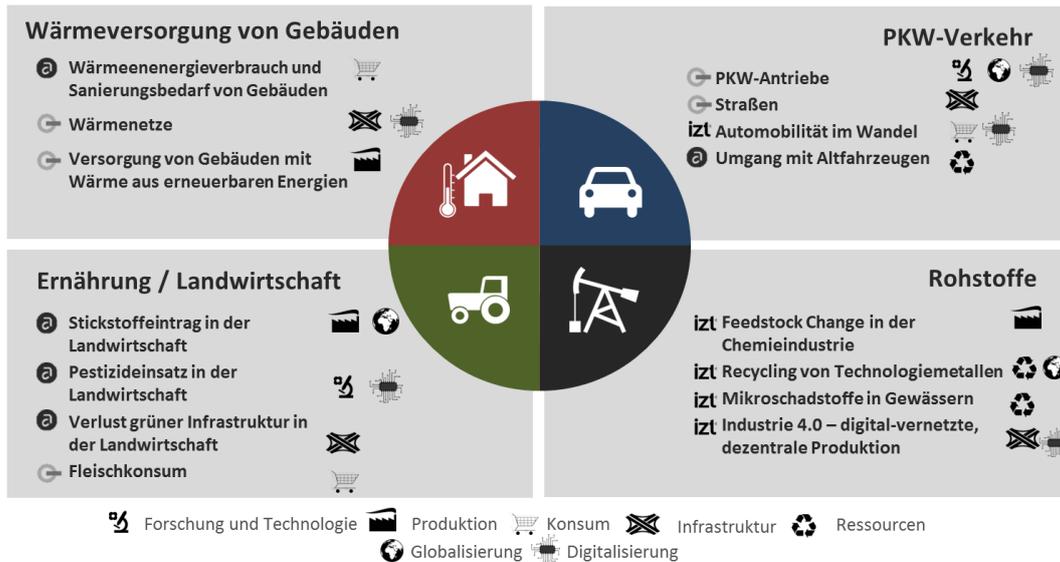


Quelle: adelphi.

Für jedes Wendethema wurden produktions- und konsumseitige, forschungs- und technologielastige, sowie mit Infrastrukturen und Ressourcen zusammenhängende Transformationsfelder identifiziert. Globalisierung und Digitalisierung wurden dabei als Querschnittsthemen mit berücksichtigt.

Die finale Auswahl der Felder ist in der folgenden Übersicht dargestellt (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Finale Auswahl der Transformationsfeldanalysen



Quelle: adelphi.

Eine Relevanz für die nachhaltige Entwicklung ist bei allen ausgewählten Feldern gegeben. Ebenso sind zu allen Themen mehrere Transformationsansätze bekannt. Die so getroffene Auswahl deckt mit einigen Studien auch Globalisierungsaspekte ab (z.B. Altfahrzeugentsorgung, Technologiemetalle), bei anderen spielen Aspekte der Digitalisierung eine Rolle (z.B. EE-Anteil an der Gebäudewärmeversorgung, Neue Nutzungskonzepte von PKW). Exnovation spielt bei PKW-Antrieben, indirekt auch beim EE-Anteil an der Gebäudewärmeversorgung eine Rolle.

Zur Prüfung und weiteren Verfeinerung des Analyseansatzes wurden bis Mitte März 2015 folgende drei Pilotanalysen durchgeführt:

- Altfahrzeugentsorgung (adelphi)
- Wärmenetz-Infrastrukturen (Borderstep)
- Feedstock-Change (IZT)

Im Rahmen der Analyse wurden mit ausgewählten Experten Interviews durchgeführt, die zum Ziel hatten, die Pfadabhängigkeit und deren Faktoren in den einzelnen Themenfeldern (Binnenlogik und -kultur) besser zu verstehen. Außerdem wurde eruiert, ob und welche Art von Transformationsansätzen für einen möglichen/wünschenswerten Pfadwechsel in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung in Frage kommen und bereits diskutiert werden.

Folgende 15 Transformationsfeldstudien mit insgesamt 567 Seiten Umfang wurden erarbeitet und stehen unter www.evolution2green.de zum Download bereit.

Tabelle 2: Fertiggestellte Transformationsfeldstudien in AP 2

Bereiche und Transformationsfelder		Zugehörige Publikation
PKW-Verkehr		
1	PKW-Antriebe	Clausen, J. (2017a). PKW-Antriebe. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
2	Straßen	Clausen, J. (2017b). Straßen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
3	Neue Nutzungskonzepte von PKW	Korte, F., Göll, E. & Behrendt, S. (2017). Automobilität im Wandel. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
4	Altautoentsorgung	Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017a). Umgang mit Altfahrzeugen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
Landwirtschaft		
5	Fleischkonsum	Clausen, J. & Mathes, M. (2017). Fleischkonsum- Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
6	Stickstoffeintrag in der Landwirtschaft	Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017b). Stickstoffeintrag der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
7	Pestizideinsatz in der Landwirtschaft	Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017c). Pestizideinsatz in der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
8	Grüne Infrastrukturen	Tappeser, V.; Kohlmorgen, N.; Marsden, K. (2017). Verlust grüner Infrastruktur in der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
Wärmeversorgung von Gebäuden		
9	Wärmenetze	Clausen, J. (2017c). Wärmenetze. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
10	Wärmeenergieverbrauch und Sanierungsbedarf von Gebäuden	Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017d)(2017a). Wärmeenergieverbrauch und Sanierungsbedarf von Gebäuden. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
11	EE-Anteil an der Gebäudewärmeversorgung	Clausen, J. (2017d). Versorgung von Gebäuden mit Wärme aus erneuerbaren Energien. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
Rohstoffversorgung		
12	Feedstock- Change	Behrendt, S. (2017a). Feedstockchange in der Chemieindustrie. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

		Economy. Berlin.
13	Technologiemetalle	Behrendt, S. (2017b). Recycling von Technologiemetallen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
14	Persistente Stoffe (novel entities)	Behrendt, S. (2017c). Mikroschadstoffe in Gewässern. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
15	Dezentrale Produktion	Odenbach, J.; Göll, E.; Behrendt, S. (2017). Industrie 4.0 – digital-vernetzte dezentrale Produktion Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

4 Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen

Die Pfadabhängigkeiten in den 15 Transformationsfeldern, die vier „Wendethemen“ bzw. Transformationsbereichen zugeordnet sind, sind in den 15 Transformationsfeldstudien im Detail beschrieben. Die 15 Studien wurden von den jeweiligen Autorinnen und Autoren erarbeitet und von jeweils zwei weiteren Mitgliedern des Projektteams aus den anderen Instituten mit Blick auf Bedeutung, Zuordnung und Beschreibung der jeweils identifizierten Pfadabhängigkeiten geprüft. Besonders bedeutende Fragen wurden in Telefonkonferenzen diskutiert. Um Strukturen hinter den vielfältigen in der Analyse ans Licht gebrachten Pfadabhängigkeiten zu erkennen, wurde wie folgt vorgegangen:

- Alle Pfadabhängigkeiten, die in den 15 Studien erwähnt wurden, wurden tabellarisch erfasst. Die Pfadabhängigkeiten blieben dabei den fünf Typen von Pfadabhängigkeiten (vgl. Tabelle 1) zugeordnet.
- Nach dem Metaplanverfahren wurden diese Pfadabhängigkeiten auf Einzelkärtchen erfasst und von einem Team des Borderstep Instituts geclustert. Jeweils innerhalb der fünf Pfadtypen wurden dabei Cluster möglichst ähnlicher Pfadabhängigkeiten gebildet. Die Clusterung wurde dem gesamten Projektteam zur Kommentierung vorgelegt. Diese Cluster wiederum bilden die Basis für die in Kapitel 5.1 dokumentierte detaillierte Typologie von Pfadabhängigkeiten.
- In Kenntnis dieser Typologie und mit Blick auf die Spezifika der jeweiligen Transformationsfelder und Wendethemen wurden anschließend von den jeweils für die Transformationsfeldstudien verantwortlichen Autorinnen und Autoren die in den folgenden Abschnitten 4.1 bis 4.4. erstellten Grafiken erarbeitet, mit denen insbesondere die Netzwerkbeziehungen zwischen den einzelnen Pfadabhängigkeiten herausgearbeitet wurden.
- Abschnitt 5.2 stellt dann den vom Projektteam erarbeiteten Versuch dar, hinter diesen Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten typische Muster zu identifizieren und beispielhaft darzustellen.

4.1 PKW-Mobilität

Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die 51 Pfadabhängigkeiten, die in den vier Transformationsfeldstudien im Feld PKW-Mobilität gefunden wurden. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei aus Sicht der Autorinnen oder Autoren der jeweiligen Transformationsfeldstudie das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

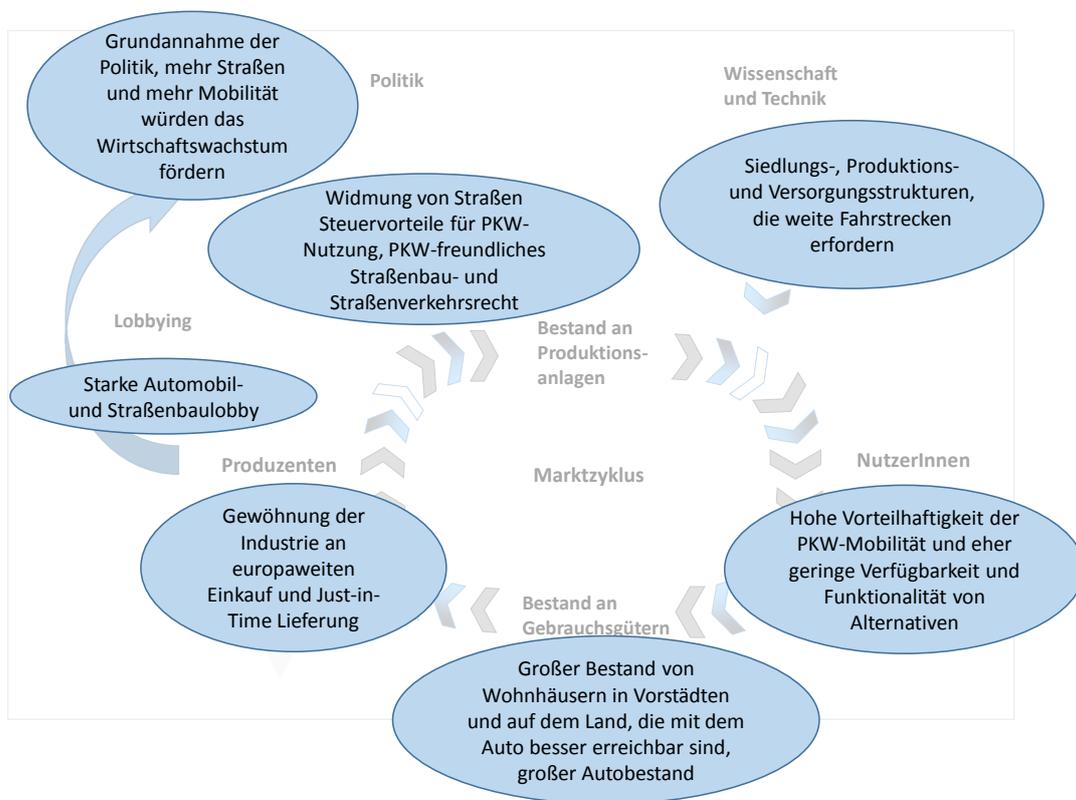
Tabelle 3: Anzahl Pfadabhängigkeiten in PKW-Verkehr

Anzahl	Typ					Summe
	Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten	
Starke	10	5	7	5	3	30
mittlere und schwache	4	8	2	2	5	21
Gesamt	14	13	9	7	8	51

Die größte Zahl von Pfadabhängigkeiten findet sich bei den rechtlichen und ökonomischen Pfadabhängigkeiten, organisatorische und nutzungsbezogene Pfadabhängigkeiten konnten nur wenige identifiziert werden. Etwas über die Hälfte der Pfadabhängigkeiten wurde als stark eingestuft.

Im Bereich PKW-Mobilität können drei grundsätzlich unterschiedliche Systeme von Pfadabhängigkeiten unterschieden werden. Dies ist zum einen das sich selbst stabilisierende und konsumorientierte System der Straßen in Verbindung mit der Gewöhnung an das Automobil zur Bewältigung langer Strecken. Deutlich andere Dynamiken stabilisieren das System der Verbrennungsmotoren und wiederum anders wirken die Pfadabhängigkeiten bei der Fahrzeugersatzung zusammen.

Abbildung 6: Lock-in System in Straßenbau und Automobilität

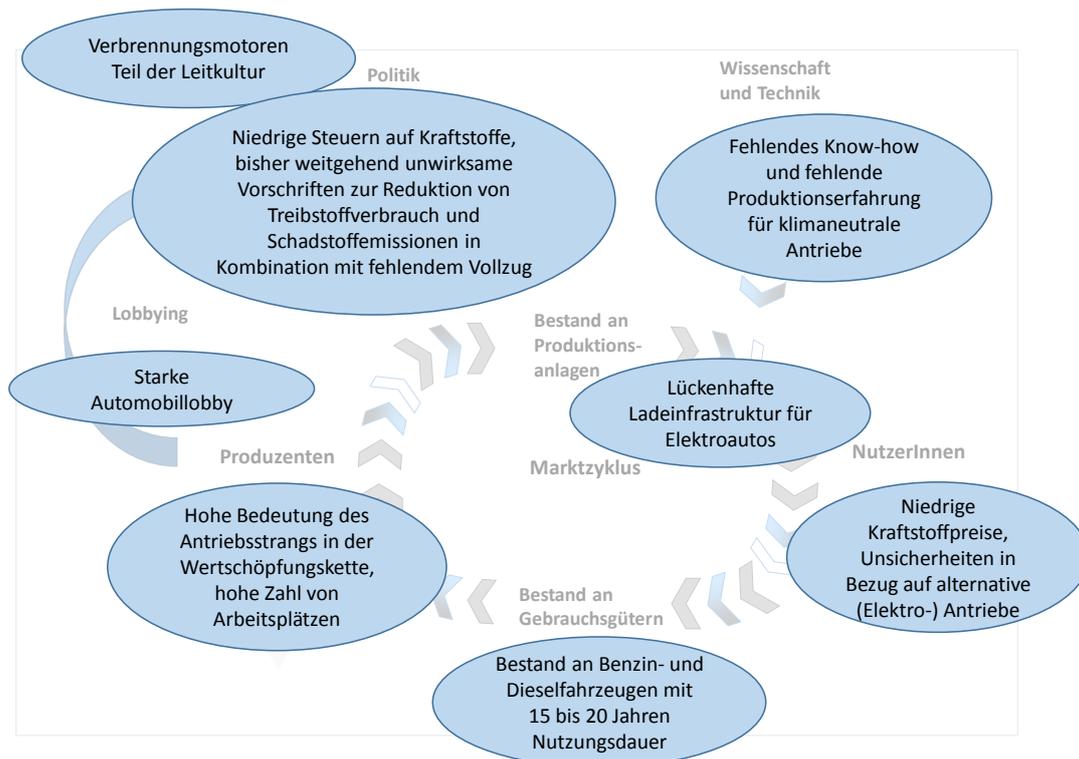


Das Lock-in System in Straßenbau und Automobilität zeichnet sich durch eine extrem hohe Abhängigkeit von gebauten Infrastrukturen und aus ihnen folgenden Mobilitätsanforderungen. Die Tatsachen,

- dass erhebliche Anteile der Wohngebäude wie auch Gewerbegebiete durch den öffentlichen Nahverkehr nur mäßig erschlossen sind,
- dass die zur Arbeit, zum Einkaufen und zu den Schulen zurückzulegenden Strecken durch Gewöhnung an das Automobil immer länger geworden sind,
- dass wohnortnahe Versorgungsinfrastrukturen (Läden, Schulen usw.) in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich ausgedünnt wurden,
- dass die Siedlungsdichte vielerorts zu niedrig ist, um Carsharing-Angebote wirtschaftlich zu betreiben und Carsharing-Angebote zum täglichen Pendeln zur Arbeit ohnehin weder ökonomisch noch ökologisch viel verbessern

führen dazu, dass die Nutzung eines Automobils für viele BürgerInnen einen weiterhin hohen Nutzen im Alltag hat. Der Lock-in Typ ist definitiv getrieben durch gebaute Infrastrukturen und vielfältige Nutzungserfordernisse. Der Komplex aus Produzenten, Lobbystrukturen und rechtlichen Regeln spielt dem gegenüber eine – auch im Vergleich zu anderen Lock-in Strukturen – eher sekundäre Rolle.

Abbildung 7: Lock-in System PKW-Antriebe



Das technologische Lock-in auf die Produktion von Autos mit Benzin- und Dieselantrieb hat einen wesentlich instabileren Charakter als der Bedarf an Straßen und Autos an sich. Zwar verfügen Millionen Nutzer über Autos mit Verbrennungsmotor, deren mögliche Nutzungsdauer sich auf die Dauer eines möglichen Pfadwechsels auswirkt, ihre Mobilitätsbedürfnisse werden sie zukünftig aber auch mit Autos mit Elektro- oder Brennstoffzellenautos ohne wesentliche Einbußen bei der Nutzung befriedigen können. Mittelfristig besteht sogar die Chance auf eine im Vergleich zum Verbrenner deutlich günstigere Automobilität.

Der Kern der Lock-in Struktur besteht daher in den (begrenzten) technischen Fähigkeiten der Produzenten zur Produktion von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Weder das Wissen in Form von Patenten (Clausen, 2017a) noch die Produktionsanlagen für wesentliche Komponenten sind zur Zeit in Deutschland vorhanden. Die durch Lobbyaktivitäten geschaffenen und gegen die Erfordernisse des Klimaschutzes verteidigten Vorteile für der Verbrennertechnologie sowie das erfolgreiche Unterlaufen von Vorschriften zur Senkung des Verbrauchs und Reduktion des Schadstoffausstoßes führt die deutschen Hersteller gegenwärtig in eine Situation, die der ehemalige Umweltminister Jürgen Trittin wie folgt charakterisiert: „Wir müssen uns fragen, wie man verhindern kann, dass es den deutschen Autoherstellern so geht wie RWE und Eon: Entwicklung verpennt und plötzlich randständig.“ (Hannoversche Allgemeine Zeitung, 2017a).

Ähnlich wie auch die landwirtschaftliche Produktion lässt sich das Lock-in als technologisch-ökonomisch-politisches System beschreiben.

Wiederum einer anderen Logik folgt die bisher aus Umweltsicht wenig erfolgreiche Entwicklung der Fahrzeugentsorgung. Nur rund eine halbe Million der in 2013 schätzungsweise 2,86 Mio. Altfahrzeuge wurde in Deutschland als Altfahrzeug deklariert und dem offiziellen Verwertungsregime zugeführt. Mindestens 1,6 Millionen, wahrscheinlicher jedoch gut 2 Mio. Fahrzeuge verließen als Gebrauchtwagen das Land (Tappeser & Chichowitz, 2017a, S. 8).

Abbildung 8: Lock-in System PKW-Entsorgung



Zwar lässt sich das Lock-in auch hier als technologisch-ökonomisch-politisches System beschreiben, aber die Dynamiken sind deutlich unterschiedlich. Basierend auf dem Eigentumsrecht und dem international (noch?) gültigen Primat des Freihandels hat sich ein System entwickelt, in dem kaum noch nutzbare Altfahrzeuge als Gebrauchtwagen deklariert und exportiert werden. In den Zielländern werden sie zu deutlich niedrigeren Lohnkosten repariert und einer neuen Nutzungsphase zugeführt. Die Vorteile dieses Systems haben im Wesentlichen eine Gruppe von teilweise im rechtlichen Graubereich agierenden Exporteuren sowie die Werkstätten und Nutzer in den Zielländern. Deutsche Akteure wiederum ersparen sich die aufwendige Demontage und das Recycling. Den Autobesitzern scheint der Verbleib ihrer Fahrzeuge im Wesentlichen egal zu sein.

Die zeitliche Entwicklung der Pfadabhängigkeiten rund um die Automobilität ist durch eine Reihe von Ereignissen gekennzeichnet.

- Straßen sind mit der ortsübergreifenden Zivilisation zum Transport von Nachrichten, Handelswaren und Heerscharen seit tausenden von Jahren verbunden.
- Nach einer Phase des Massenguttransportes auf Kanälen bis 1850 und einer Phase der Dominanz von Eisenbahnen bis 1960 verlagerte sich auch der Warenverkehr zunehmend auf die Straßen und erreicht heute ein Volumen, für das Kanäle und Schienenwege nicht mehr ausreichen würden.
- Durch kontingente Ereignisse setzte sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts der Verbrennungsmotor als dominante Antriebstechnologie durch.

- Mit dem Beginn der Massenmotorisierung zunächst in den USA und ab den 1960er Jahren auch in Europa ermöglichte der PKW eine erschwingliche Individualmobilität bisher unbekanntes Ausmaßes.
- Als Folge dieser hohen Mobilität veränderten sich Siedlungs-, Produktions- und Versorgungsstrukturen dergestalt, dass die täglichen Wege vieler Menschen immer weiter wurden und heute ohne den PKW kaum zu bewältigen sind. Parallel stieg das Mobilitätsbudget der privaten Haushalte von ca. 12,5% in 1970 auf heute knapp 25%, was sich auf den Umsatz und die Zahl der Arbeitsplätze der Branche auswirkt.
- Als Folge der hohen Automobilität und insofern als „selbstverstärkender Effekt“ wird die Versorgung dünn besiedelter Gebiete mit Nahverkehrsdienstleistungen und Einkaufsmöglichkeiten kontinuierlich schlechter und die Zahl der PKWs nimmt, der Versorgungsnot folgend, weiter zu.

4.1.1 Transformationsansätze

Als Transformationsansätze sind rund um die Automobilität aufzuführen:

- Verschiedene Konzepte der verkehrsberuhigten, fußgänger- und fahrradfreundlichen Umgestaltung von Straßen innerhalb von Siedlungen sowie das Ziel des nicht-weiter Ausbaus überörtlicher Straßen oder sogar des Rückbaus als Suffizienzstrategien (ausgeführt in einer von vier Studien),
- die Ausrüstung des Straßennetzes mit Verkehrslenkungssystemen (vorwärtskompatibel auch als Vorbereitung auf das autonome Fahren) als Effizienzstrategie sowie mit Ladesystemen für die Elektromobilität als kombinierte Effizienz-Konsistenz-Strategie (aufgeführt in einer von vier Studien),
- verschiedene Formen von Carsharing und multimodaler Mobilität sowie auch zukünftige Modelle des autonomen Fahrens (ggf. ohne eigenes Eigentum am Auto), die sämtlich Effizienzstrategien sind (aufgeführt in einer von vier Studien),
- verschiedene Formen alternativer und perspektivisch klimaneutraler Antriebe, die mit Blick auf ihre Versorgung mit erneuerbarer Energie als Konsistenzansatz einordnen kann (aufgeführt in einer von vier Studien),
- die recyclinggerechte Fahrzeugkonstruktion, die vermehrte Zuführung von Fahrzeugen zu inländischen Verwertungsprozessen und internationale Recyclingpartnerschaften, die alle Effizienz und Konsistenz (im Sinne von Materialkreisläufen) verknüpfen (aufgeführt in einer von vier Studien).

4.1.2 Hierarchie und Beziehung zwischen den Transformationsansätzen

Transformationsansätze im Themenfeld Mobilität erstrecken sich nicht nur über den gesamten Lebenszyklus eines „fahrbaren Untersatzes“, typischerweise dem Auto, sondern darüber hinaus auf die zur Nutzung notwendige Infrastruktur.

- **Konstruktion und Antriebstechnik des Autos:** Brennstoffzellenfahrzeuge, Hybrid- sowie Plug-In-Hybridfahrzeuge und Elektrofahrzeuge, ggf. mit eingebauten Range Extender sind Antriebstechnologien. Des Weiteren ist schon während des F&E Prozesses die spätere möglichst leichte Demontierbarkeit als notwendige Bedingung eines erfolgreichen und effizienten Recyclings mitzudenken.

- **Art und Weise der Mobilität:** Ansätze zur nachhaltigen Mobilität sind Carsharing und die multimodale Mobilität. Als Zukunftstechnologien, zu denen weitere F&E notwendig ist, sind das autonome Fahren und das vernetzte Auto zu sehen.
- Die dazu **nötige Infrastruktur(anpassung):** Neben grundsätzlichen Planungskonzepten einer Fußgänger- und fahrradfreundlichen Stadt spielen „Upgrade-Maßnahmen“ bestehender Strukturen, etwa lokale Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung sowie Kapazitätserhöhung und Verkehrslenkung, aber auch überregionale Maßnahmen wie die Straßenausrüstung mit Ladestationen für Elektroautos eine Rolle.
- **Methoden des Recyclings:** Neben der Erhöhung der Rückführquote in inländischen Verwertungsstrukturen stellt sich die Betonung der globalen Produktverantwortung in Form von Recycling-Partnerschaften (z.B.Bo2W-Ansatz) als Ansatz dar.

Die Felder sind dabei stark verwoben: Infrastruktur und Antriebstechnik stehen etwa in direkten Wechselwirkungen (z.B. Aufbau ausreichender Elektro-Ladestationen), ein gleichzeitiges Vorantreiben mehrerer Aspekte ist unabdingbar.

Auch zur Nutzung multimodaler Mobilität oder von Carsharing stellt das Vorhandensein verschiedener, möglichst aneinander angepasster Verkehrsmittel bzw. das Vorhandensein von Carsharing-Betreibern eine notwendige Bedingung dar. Vernetzte Autos bzw. autonomes Fahren betreffen sowohl die Technikentwicklung als auch die nötige Infrastruktur.

4.1.3 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze

Zur Stabilisierung tragen zunächst die mächtige Autolobby und allgemein das selbstreproduzierende System in der Autoindustrie mit der großen Zahl an von ihr abhängigen Arbeitsplätzen bei. Rechtlich wird das Auto auf mehreren Ebenen bevorzugt.

Das etablierte System der Straßen wird stabilisiert durch rechtliche Pfadabhängigkeiten im Straßenbau- und Straßenverkehrsrecht wie z.B. der dauerhaften Widmung von Straßen, sowie vielfältigen ökonomischen und organisationalen Pfadabhängigkeiten.

Eine Reihe spezieller Pfadabhängigkeiten wirkt sich nur auf einzelne Transformationsansätze aus:

Konstruktion und Antrieb: Bezüglich der Antriebstechnik wirken sich neben den auch durch Steuervorteile erzeugten niedrigen Preisen für fossile Kraftstoffstoffe und dem hohen Wert des Antriebsstranges am Gesamtwert auch unwirksame bzw. mangelhaft vollzogene rechtliche Instrumente (z.B. bzgl. NOx- und Feinstaubemissionen) auf die geringe Pfadwechsellmotivation aus. Forschung und Entwicklung sind auf Verbrennungskraftmaschinen spezialisiert, weshalb alternative Antriebstechnologien technologisch noch nicht mit Verbrennungsmotoren gleichziehen können und es deutschen Automobilhersteller an Know-how mangelt. Von den Herstellungskosten für Elektroautos bilden die Batterien den Löwenanteil – in Deutschland werden jedoch keine Lithium-Ionen-Batterien hergestellt. In der Produktion spielt bisher die Möglichkeit der späteren Demontierbarkeit keine wirkliche Rolle.

Nutzung und Infrastruktur: Die Pfadabhängigkeiten des Nutzens von Mobilität und der Infrastruktur gehen fließend ineinander über und bedingen sich wechselseitig. Unter dem Aspekt des Nutzens stellt sich der geringe relative Vorteil von Angeboten wie Carsharing oder öffentlichen Verkehrsmitteln als Pfadabhängigkeit dar. Das eigene Auto, das ja ohnehin bei vielen bereits vor der Wohnungstür steht, ist verknüpft mit Freiheits- und Unabhängigkeitsgefühlen, will als Statussymbol präsentiert werden, bietet Schutz als privater Raum. Die Zahlungsbereitschaft für PKWs ist hoch. Zudem wird das Auto als Mobilitätsmittel steuerlich bevorzugt, doch für elektrobetriebene Fahrzeuge fehlt es vielfach an (öffentlichen) Ladestationen und nutzerbezogen an Wissen hierzu.

Recycling: Relativ unabhängig von bisher genannten Pfadabhängigkeiten zeigen sich die Recycling-Ansätze. Hier macht die hohe (und im Zuge der Digitalisierung weiter zunehmende) Materialvielfalt der Fahrzeuge eine komplexe Demontage notwendig. Unter dem Primat des Freihandels und der nicht unbedeutenden wirtschaftlichen Rentabilität zeigen sich gesetzliche Lücken, insbesondere bezogen auf die nationalen Regulierungskompetenzen sowie der Schwierigkeiten der Definition von Gebrauch- und Altfahrzeugen. In den Export-Zielländern hängen viele Arbeitsplätze am Geschäft. Die erhöhte Rückführung in inländische Verwertungsstrukturen wird gehemmt durch mengenbasierte Verwertungsquoten. Nutzer interessieren sich zudem wenig für die Restverwertung ihrer PKWs.

4.1.1 Fazit

Den geringsten Einfluss haben die existierenden Pfadabhängigkeiten auf die Suffizienzstrategien der Gestaltung innerörtlicher Straßen. Der Einfluss der Pfadabhängigkeiten wird im Mittel als „niedrig bis mittel“ eingestuft.

Die Effizienzansätze (teilweise und abhängig von Rahmenbedingungen übergehend in einen Suffizienz- und Konsistenzcharakter) der alternativen Mobilität (Carsharing, autonomes Fahren, multimodale Mobilität), der Verkehrslenkung und des Hybridantriebs werden etwas stärker durch Pfadabhängigkeiten gebremst. Der Einfluss der Pfadabhängigkeiten wird im Mittel aber auch hier als „knapp mittel“ eingestuft.

Die kombinierten Effizienz- und Konsistenzansätze des Fahrzeugrecyclings werden durch Pfadabhängigkeiten „mittel“ behindert.

Die Konsistenzansätze der Antriebe durch erneuerbaren Strom in Elektro- oder Brennstoffzellenautos, werden durch Pfadabhängigkeiten „knapp stark“ behindert.

Die Analyse der Pfadabhängigkeiten rund um die PKW-Mobilität führt wenig überraschend nicht zu einem völlig neuen Blick auf Schwierigkeiten der Transformation der Individualmobilität. In drei Aspekten schärft sie jedoch den Blick auf Probleme der Veränderung:

- Das ausgesprochen starke Lock-in aufgrund „gebauter Strukturen“ in Straßenbau und Siedlungsstruktur dämpft die Erwartungen, dass mit Transformationsansätzen wie Carsharing die gesamte PKW-Mobilität deutlich, d.h. um 20% oder mehr, reduziert werden kann.
- Die Tatsache, dass in Deutschland mehr als 40 Mio. PKW im Einsatz sind zeigt, dass die Transformation genug Zeit braucht, um diese hohe Zahl von PKW erst auszunutzen und dann auszutauschen. Der politische Planungshorizont sollte länger sein als die durchschnittliche Nutzungsdauer eines PKW.
- Es wird deutlich, dass der mit der Autonutzung verbundene hohe Ressourcenbedarf zur Zeit nur zu einem sehr kleinen Anteil nicht durch Recycling gedeckt wird. Ökonomische Pfadabhängigkeiten haben die Recyclingwirtschaft in eine Exportwirtschaft gewandelt, eine Erhöhung der Recyclingquote ist damit kein „innerdeutsches Umweltthema“ sondern ein mit der Globalisierung zusammenhängendes ökonomisch-ökologisches Thema.

4.2 Landwirtschaft und Ernährung

Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die insgesamt 64 Pfadabhängigkeiten, die in den vier Transformationsfeldstudien des Bereichs Landwirtschaft gefunden wurden. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei aus Sicht der Autorinnen oder Autoren

der jeweiligen Transformationsfeldstudie das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

Tabelle 4: Anzahl Pfadabhängigkeiten in Landwirtschaft und Ernährung

Anzahl	Typ	Ökonomische	Technische	Organisatorische	Nutzerbezogene	Summe
	Rechtliche					
Starke	19	6	8	13	5	51
mittlere und schwache	1	4	5	1	2	13
Gesamt	20	10	13	14	7	64

Die größte Zahl von Pfadabhängigkeiten findet sich bei den rechtlichen Pfadabhängigkeiten, nutzungsbezogene Pfadabhängigkeiten konnten nur wenige identifiziert werden. Der überwiegende Teil der Pfadabhängigkeiten wurde als stark eingestuft.

Im Bereich Landwirtschaft und Ernährung können zwei grundsätzlich unterschiedliche Systeme von Pfadabhängigkeiten unterschieden werden. Dies ist zum einen das sich selbst stabilisierende und konsumorientierte System des hohen Fleischkonsums, zum anderen das technologisch-ökonomisch-politische System der landwirtschaftlichen Produktion mit seinen Transformationsfeldern „Stickstoffeinsatz“, „Pestizideinsatz“ und „grüne Infrastrukturen“.

Abbildung 9: Lock-in System im Fleischkonsum



Im Kontext des Fleischkonsums existiert ein weitgehend stabiler Markt, in dem eine hochkonzentrierte Fleischbranche in Produktion und Handel preiswerte Produkte zur Verfügung stellt, die die meisten Konsumenten wertschätzen und kaufen. Die Produktion baut auf der industriellen Haltung von High-Input Rassen auf und ist durch die Sonderstellung der Landwirtschaft im Umweltrecht wie auch die finanzielle Förderung der konventionellen Landwirtschaft abgesichert. Die Förderlogik beruht auf der von Wirtschaft und Politik vertretenen und

durch Lobbying verstärkten Annahme, dass viel billiges Fleisch wesentlicher Teil der Grundversorgung sein muss.

Die Transformation dieses Regimes erfolgt einerseits dadurch, dass einzelne KonsumentInnen das System „verlassen“ und als Vegetarier oder Veganer dem Fleischkonsum den Rücken kehren. Eine Reaktion des Systems auf dieses Verhalten ist kaum möglich und findet nur begrenzt und in einzelnen Fällen statt (Clausen & Fichter, 2016, S. 30).

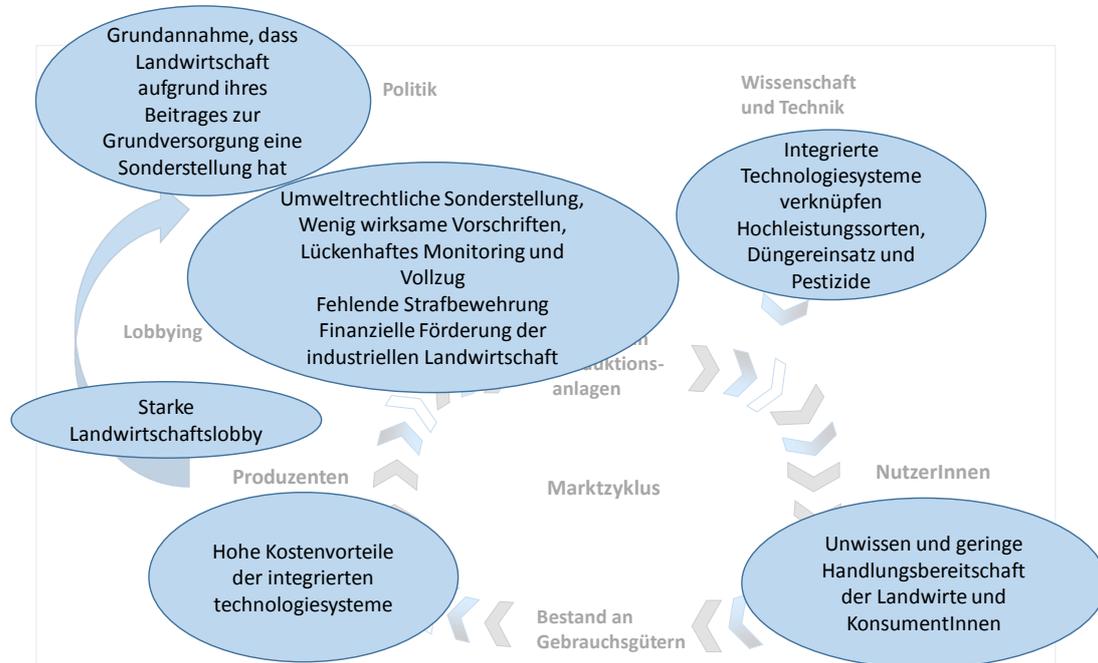
Ein zweiter Ansatz sind vielfältige und wiederkehrende Informationsbemühungen aus der Gesundheits- und Umweltpolitik, den Fleischkonsum zu reduzieren oder Fleisch aus artgerechterer oder umweltschonender Produktion, z.B. Biofleisch, zu konsumieren. Eingesetzt werden durchweg weiche politische Instrumente der Information und Kommunikation, deren Wirkung auf die Transformation der Märkte bisher begrenzt ist. Der vom Umweltbundesamt im Januar 2017 ins Gespräch gebrachte Vorschlag, Fleisch durch Erhöhung des Mehrwertsteuersatzes zu verteuern (Umweltbundesamt (Hrsg.), 2016, S. 67) und so erstmals ein „härteres“ Instrument einzusetzen, wurde von den Lobbies und dem Mainstream der Politik spontan und entrüstet zurückgewiesen.

Etwas anders sieht das Lock-in System beim Einsatz von Stickstoff und Pestiziden sowie bei „grünen Infrastrukturen“ aus. Die Rolle der KonsumentInnen wie sogar der Landwirte ist hier eher passiv. Dominieren tun in der Produktion hochentwickelte und integrierte Technologiesysteme, typischerweise speziell gezüchtete oder gentechnisch hergestellte Pflanzensorten, deren Einsatz untrennbar mit dem Einsatz von Dünger und oft spezifischen Pestiziden verbunden ist und die kostengünstig zu produzieren und vielfach äußerst umweltschädlich sind.

Wesentlicher Profiteur dieses Systems sind Agrarkonzerne sowie letztlich Handel und KonsumentInnen, denen, so lange das System nicht zum ökologischen Kollaps führt, preiswerte Nahrungsmittel zur Verfügung stehen.

Die zentrale Stabilisierung des Systems erfolgt auf Basis der Grundannahme, dass die Landwirtschaft aufgrund ihres Beitrages zur Grundversorgung eine Sonderstellung im Umweltrecht hat. Diese Sonderstellung hat zur Folge, dass viele umweltbezogene Vorschriften in der Landwirtschaft bisher wenig wirksam sind, dass ein nur lückenhaftes Monitoring stattfindet und der Vollzug ebenso starke Schwächen aufweist. Wird dennoch ein Rechtsverstoß entdeckt, fehlt manchmal eine Strafbewehrung. Hinzu kommt die finanzielle Förderung der industriellen Landwirtschaft.

Abbildung 10: Lock-in System beim Einsatz von Stickstoff und Pestiziden sowie bei „grünen Infrastrukturen“



Als grundsätzliche Alternative zu diesem vorherrschenden System der Agrarproduktion bietet sich der ökologische Landbau an, der jedoch seinen Marktanteil aufgrund hoher Kostennachteile nur langsam und in engen Grenzen ausweitet. Die staatlichen Labellsysteme und die finanzielle Förderung des Ökolandbaus reichen bis dato nicht aus, seine Kostennachteile am Markt auszugleichen.

Der Einsatz von Pestiziden und Dünger soll auch durch Effizienzstrategien verringert werden. Der Ausbau bzw. die Sicherung grüner Infrastrukturen soll durch Unterschützstellung und Renaturierung erfolgen.

Die zeitliche Entwicklung der Pfadabhängigkeiten in der Landwirtschaft ist durch eine Reihe von Ereignissen gekennzeichnet.

- Noch im 19. Jahrhundert wurden in Folge von Erkenntnissen zur Pflanzengesundheit erste Dünger und Pestizide entwickelt.
- Mit den Anfängen der Pflanzenzucht zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann auch die staatliche Verwaltung der Landwirtschaft unter der Maxime der Sicherung der Volksernährung.
- Mit der Erfindung des Insektizids DDT¹ begann 1939 die Verbreitung hochwirksamer Pestizide mit starken Nebenwirkungen.
- Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts stand die Technologie der Hybridzucht sowohl in der Pflanzen- wie in der Tierzucht zur Verfügung.

¹ Dichlordiphenyltrichlorethan

- Mit dem Massenkonsum der Nachkriegszeit begannen sich die industrielle Lebensmittelverarbeitung wie auch die industrialisierte landwirtschaftliche Produktion zu entwickeln.
- In den Jahren seit ca. 1960 fand ein kontinuierlich stärker werdendes Lock-in statt, dessen wesentliche Kennzeichen ein immer weiter steigender Verbrauch an Dünger und Pestiziden, eine immer stärkere züchterische Engführung der Tierrassen und Pflanzensorten und ein Aussterben zahlreicher Landsorten und Landrassen ist. Weiter äußert sich das Lock-in in (einer abnehmenden Anzahl von) immer größer und einflussreicher werdenden Agrar- und Handelskonzernen, einem bis ca. 1990 stetig steigenden Fleischkonsum, Über- und Fehlernährung großer Teile der Bevölkerung und vielem mehr.

4.2.1 Transformationsansätze

Als Transformationsansätze sind im Bereich Landwirtschaft und Ernährung aufzuführen:

- Vegetarismus und Veganismus als individuelle und suffiziente Wege, das System des Fleischkonsums zu verlassen (aufgeführt in einer von vier Studien),
- der ökologische Landbau, der als konsistenter Ansatz die in vielfältiger Weise umweltgerechtere Agrarproduktion mit artgerechterer Tierhaltung verbindet (aufgeführt in allen vier Studien),
- Mengenreduktionsstrategien, mit denen als Effizienzansätze und vielfach im Rahmen einer „Digitalisierung der Landwirtschaft“, die innerbetriebliche Stickstoffbilanz verbessert, der überregionale Nährstoffausgleich gefördert oder Pestizide gezielter und in kleinen Mengen ausgebracht werden sollen (aufgeführt in zwei von vier Studien),
- der Schutz von Landschaftselementen und die Renaturierung von Lebensräumen, die Konsistenz und Suffizienz verbinden (ausgeführt in einer von vier Studien).

4.2.2 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze

Die Betrachtung der Pfadabhängigkeiten bezogen auf Transformationsansätze zeigt eine Art Schalensystem: Im Kern stehen die einzelnen Transformationsansätze, welche durch spezifische Pfadabhängigkeiten gehemmt werden. Die zweite Schale formt der nationale rechtliche und organisatorische Rahmen. Die internationale Konkurrenz schließlich bildet die dritte Ebene der Diffusionshemmnisse.

4.2.2.1 Erste Schale: spezifisch wirkende Pfadabhängigkeiten

Bezüglich des Ansatzes der innerbetrieblichen Stickstoffeffizienz zeigen sich:

- Das Düngerecht ist wenig wirksam, die Förderung von Bio-Energie durch das EEG sorgt für erhöhte Stickstoffeinträge,
- Hochleistungs-Hybridsorten sind hochrentierlich und benötigen eine hohe Stickstoffverfügbarkeit sowie oft auch den Einsatz spezifischer Pestizide und bilden als System eine starke ökonomische Pfadabhängigkeit,
- die schwere Abschätzbarkeit des Nährstoffgehaltes von Wirtschaftsdünger macht seine optimale Nutzung kompliziert.

Dem Ansatz des überregionalen Nährstoffaustausches mangelt es zur Umsetzung an Technologien und Praktiken.

Die Reduktion der Pestizidverwendung in der Landwirtschaft wird unter Anderem gehemmt durch:

- den hohen Bedarf an Pestiziden durch Monokulturen und Hochleistungssorten,
- die letztlich hohe Rentabilität der Pestizidverwendung,
- den Mangel an landwirtschaftlichem Fachwissen im Umgang mit geringen Pestizidmengen.

Im Bereich Grüne Infrastruktur zeigen sich insbesondere ökonomische Pfadabhängigkeiten. Für Landwirte ist es schlicht nicht wirtschaftlich, Grünstreifen zu ermöglichen. Rechtliche Rahmenbedingungen etwa in Form des Natura 2000-Schutzgebietsnetzwerks sind nicht effizient.

Innerhalb der Fleischwirtschaft sind es wenige große Firmen, welche vielen Menschen einen Arbeitsplatz bieten. Die Fleischproduktion wird indirekt durch Agrarsubventionen stark gefördert, während Kontrollen von Umweltauflagen und der Artgerechtigkeit der Tierhaltung lückenhaft sind.

Ein umwelt- und artgerechter Fleischkonsum wird nur von weichen Instrumenten gefördert. Hinzu kommt das mangelnde Wissen des Verbrauchers bzgl. der Produktionsbedingungen sowie dessen Neigung, lieber viel billiges Fleisch als wenig hochwertiges zu kaufen. Die Grundannahme in der Politik, billiges Fleisch stelle eine Sozialleistung dar, stabilisiert die politische Unterstützung dieses Systems.

Pfadabhängigkeiten, die Vegetarismus bzw. Veganismus im Wege stehen, sind auf der Nutzerebene anzusiedeln: Allgemein ist die Wertschätzung wie auch der durchschnittliche Konsum von Fleisch und tierischen Lebensmitteln hoch. Der Konsum ist tief in der alltäglichen Lebenswelt verankert und gilt geradezu als Teil deutscher Leitkultur.

Dem ökologischen Landbau ist als spezifisch wirkende Pfadabhängigkeit nur der Fachkräftemangel zuzuordnen, er wird jedoch durch fast alle anderen Pfadabhängigkeiten indirekt ebenfalls behindert.

4.2.2.2 Zweite Schale: nationale rechtliche und organisatorische Konstrukte

Auf nationaler Ebene ist die sehr starke und mächtige Landwirtschaftslobby auszumachen, die zudem Einfluss auf die rechtliche Trennung von Landwirtschafts- und Umweltverwaltung hat. Landwirtschafts- und Umweltverwaltung sind auf allen Ebenen getrennt und folgen ihrem System nach unterschiedliche Logiken.

Rechtliche Konstrukte zum Schutz der Umwelt erweisen sich daher sowohl in der Konstruktion als auch im Vollzug an vielen Stellen als lückenhaft, die Landwirtschaft kann ihre Sonderstellung unhinterfragt behaupten. Hinzu kommen als unterkomplex bewertete Modelle der Risikobewertung.

Landwirtschaft findet in Deutschland im Spannungsfeld eines hohen Kostendrucks statt, getrieben durch die Nachfrage der Verbraucher nach preiswerten Lebensmitteln. Quer zu den spezifischen Pfadabhängigkeiten wirkt daher die Problematik der mangelnden Internalisierung externer Kosten im etablierten System, wodurch nachhaltige Produkte und Verfahren meist kaum wettbewerbsfähig mit den konventionellen Produkten sind.

Nicht nachhaltige Ansätze werden zusätzlich durch die oft nicht nachhaltigen „Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik“ der EU stabilisiert.

4.2.2.3 Dritte Schale: Internationaler Wettbewerb

Selbst wenn nationale Hemmnisse im hohen Maße beseitigt wären, ist noch immer mit der internationalen Konkurrenz zu rechnen, welche schon jetzt Massen an vielfältigen Agrarprodukten zu sehr günstigen Preisen auch auf den deutschen Markt bringt und so einen großen Konkurrenz- und Kostendruck erzeugt.

4.2.3 Fazit

Den geringsten Einfluss haben die existierenden Pfadabhängigkeiten auf die Suffizienzstrategien Vegetarismus und Veganismus. Dem freiwilligen Verlassen des Systems können die etablierten Strukturen des Regimes nichts entgegensetzen. Der Einfluss der Pfadabhängigkeiten wird im Mittel als „niedrig“ eingestuft.

Die Effizienzansätze der Mengenreduktionsstrategien werden durch Pfadabhängigkeiten deutlich stärker behindert. Der Einfluss der Pfadabhängigkeiten wird im Mittel als „mittel bis stark“ eingestuft.

Die Strategien zum Schutz grüner Infrastrukturen verbinden Konsistenz und Suffizienz und sie werden ebenfalls durch Pfadabhängigkeiten „mittel bis stark“ behindert.

Der Ökolandbau erweist sich als die universellste Transformationsstrategie. Er würde in allen vier hier untersuchten Transformationsfeldern die Entwicklung entscheidend und positiv vorantreiben. In allen vier Studien wurde jedoch die Stärke sämtlicher gegen die Verbreitung des Ökolandbaus wirkender Pfadabhängigkeiten als „stark“ beurteilt. Die Überwindung der gegen diese Transformationsstrategie wirkenden Pfadabhängigkeiten stellt damit die größte Herausforderung dar.

Die Analyse der Pfadabhängigkeiten rund um die Landwirtschaft führt wenig überraschend nicht zu einem völlig neuen Blick auf Schwierigkeiten der Transformation in Landwirtschaft und Ernährung. In zwei Aspekten schärft sie jedoch den Blick auf Probleme der Veränderung:

- Charakteristisch für den Fleischkonsum ist der individuelle Charakter der Entscheidung, was man isst. Die Transformation dieses Regimes erfolgt nicht zuletzt dadurch, dass einzelne KonsumentInnen das System „verlassen“ und als Vegetarier oder Veganer dem Fleischkonsum den Rücken kehren. Eine Reaktion des Systems auf dieses Verhalten ist nur eingeschränkt und indirekt möglich. Vielmehr wird das alternative Angebot weiter ausgebaut.
- Die zentrale Stabilisierung des landwirtschaftlichen Produktionssystems erfolgt auf Basis der Grundannahme, dass die Landwirtschaft aufgrund ihres Beitrages zur Grundversorgung einer Sonderstellung im Umweltrecht bedarf. Die Durchsetzung von Umweltvorschriften findet zudem teilweise nicht durch die Umwelt-, sondern durch die Landwirtschaftsverwaltung statt. Der Vollzug weist vielfältige Lücken auf.

4.3 Wärmeversorgung

Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die insgesamt 49 Pfadabhängigkeiten, die in den drei Transformationsfeldstudien des Bereichs Wärmeversorgung gefunden wurden. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei aus Sicht der Autorinnen oder Autoren der jeweiligen Transformationsfeldstudie das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

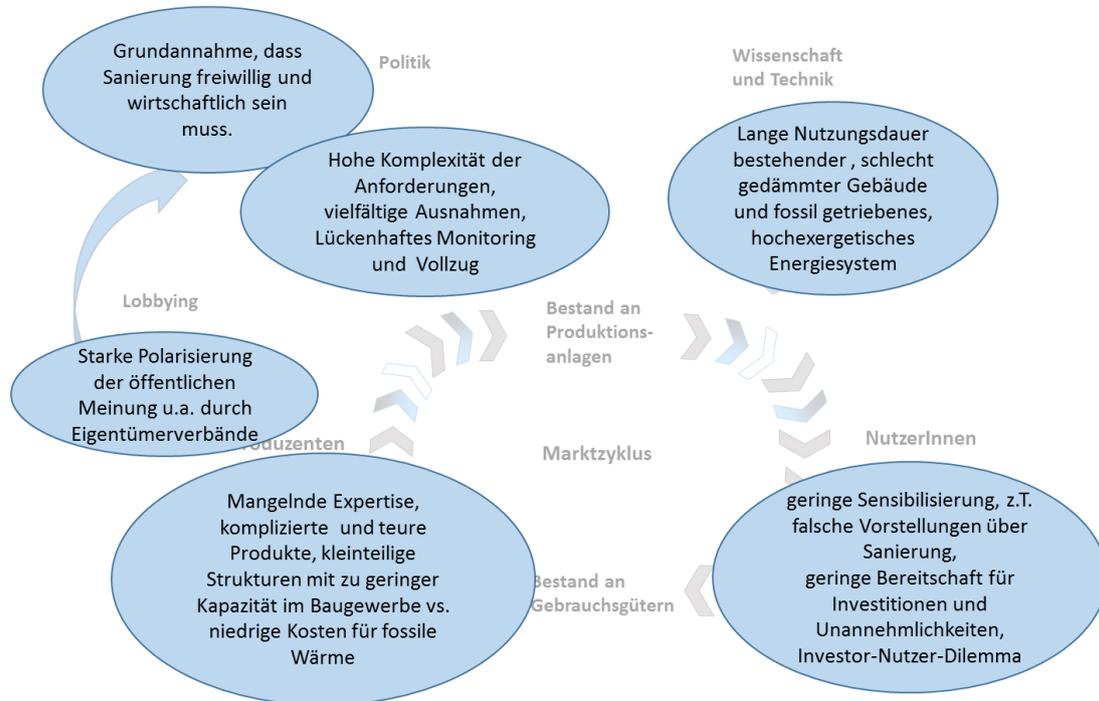
Tabelle 5: Anzahl Pfadabhängigkeiten in der Wärmeversorgung

Typ	Rechtliche	Ökonomische	Technische	Organisatorische	Nutzerbezogene	Summe
Starke	12	7	5	6	4	34
mittlere und schwache	1	4	4	5	1	15
Gesamt	13	11	9	11	5	49

Betrachtet man die Anzahl und Stärke der verschiedenen Pfadabhängigkeiten, zeigt sich eine leichte Dominanz rechtlicher Pfadabhängigkeiten, aber auch ökonomische, organisatorische und technische Pfadabhängigkeiten spielen eine wichtige Rolle. Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten sind weniger häufig, werden jedoch größtenteils als stark bewertet.

Die drei untersuchten Transformationsfelder Energieverbrauch von Gebäuden mit Fokus auf den Sanierungsbedarf im Bestand, Wärmebereitstellung in Einzelgebäuden und Wärmenetze lassen zwei eng miteinander verknüpfte Systeme von Pfadabhängigkeiten erkennen. Einerseits besteht auf der Verbrauchsseite ein Geflecht von ökonomischen, nutzerbezogenen, rechtlichen und organisationalen Pfadabhängigkeiten, die eine höhere Sanierungstätigkeit verhindern. Andererseits besteht auf Bereitstellungsseite ein technologisch-ökonomisches System der fossilen Wärmeerzeugung auf Einzelhausbasis, das nur schwierig zu durchbrechen ist.

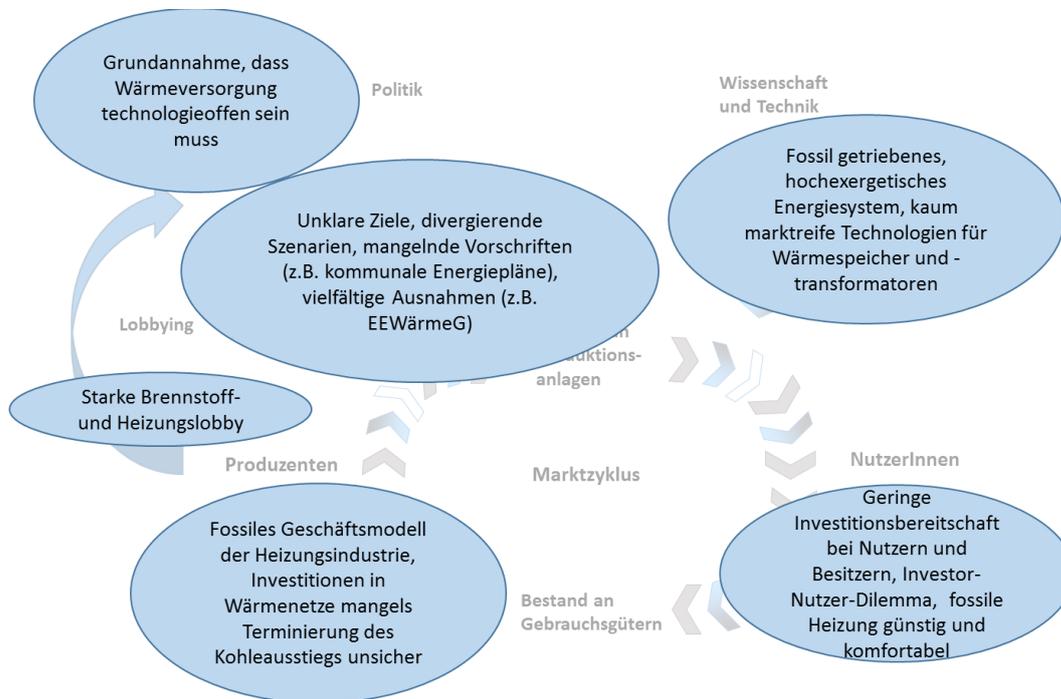
Im Kontext der Sanierung werden langlebige Gebäude in größtenteils sehr kleinteiligen Besitzstrukturen zuverlässig und vergleichsweise günstig durch fossile Wärme versorgt, sodass Nutzer und Besitzer wenig Eigeninteresse an einer energetischen Sanierung entwickeln und entsprechend nur in geringem Maße bereit für Investitionen, Aufwand, Lärm und Unannehmlichkeiten sind. In Mietgebäuden und bei Eigentümergemeinschaften sind Finanzierung und Entscheidungsfindung besonders schwierig. Dienstleistungen zur Durchführung der Sanierung sind für den Kunden wenig überschaubar und mit Risiken behaftet, die durch Mythen und negative Schlagzeilen im öffentlichen Diskurs medial verstärkt werden. Gesetzliche Vorgaben sind denkbar kompliziert, werden kaum kontrolliert und beruhen auf der durch Eigentümerlobbies verstärkten Grundannahme, dass energetische Sanierungen nur im Falle einer freiwilligen Sowieso-Sanierung und unter dem Gebot der Wirtschaftlichkeit stattzufinden haben (siehe Abbildung 5).

Abbildung 11: Lock-In in einen hohen Wärmeenergieverbrauch von Gebäuden


Gleichzeitig erfolgt mit der schrittweisen Dämmung von Fenstern, Wänden, Dächern und Kellerdecken des Gebäudebestands bei gleichzeitig steigenden Wärmeschutzanforderungen schon ein langsamer Wandel. Strategien, um diesen zu beschleunigen bestehen insbesondere in staatlichen Finanzausschüssen und einer verbesserten Beratung und Planung mit Hilfe von Sanierungsfahrplänen. Weiterreichende Verpflichtungen werden nicht diskutiert.

Im Bereich der Wärmeversorgung stellt sich die Situation zum Teil ähnlich dar, bzw. ist eng mit dem die Sanierungspraxis bedingenden Pfadabhängigkeitensystem verknüpft. Auch hier sind die Nutzungszyklen eines Versorgungssystems lang und ein Wechsel aufwendig, was das bestehende System stabilisiert. Etwaige Investitionen in eine Heizungsanlage auf Basis erneuerbarer Energien, genauso wie die Nutzung eines (zusätzlich zu entwickelnden) Niedrigenergiewärmenetzes sind im Gebäudebestand meist nur in Kombination mit umfangreichen Dämmungsmaßnahmen und dem Wechsel von Heizkörpern sinnvoll. Nutzer und Besitzer sind ähnlich wenig sensibilisiert oder investitionsbereit. Rechtliche Vorgaben sind von Ausnahmen und Vollzugsdefiziten geprägt, die Heizungsindustrie ist auf fossile Energieträger fokussiert und tritt gemeinsam mit der Brennstofflobby für einen technologieoffenen, sprich weniger von erneuerbaren Energien geprägten Wärmemarkt ein. Wärmespeicher und –transformatoren stellen einen technologischen Engpass dar. Zusätzlich ist im Fall von Wärmenetzen ein erhöhter, externer Koordinationsaufwand notwendig (siehe Abbildung 6).

Abbildung 12: Lock-in in fossile Wärmeversorgung von Gebäuden



Alternativen zum bestehenden System der Wärmeversorgung finden sich in verschiedenen Technologien zur Wärmebereitstellung und Verteilung aus erneuerbaren Energien, u.a. durch Solar- und Geothermie, kalte Netze, Wärmepumpen sowie Holz- und Pelletheizungen.

Die zeitliche Entwicklung der Pfadabhängigkeiten im Bereich der Wärmeversorgung verdeutlicht das komplexe Zusammenspiel technologischer, rechtlicher, ökonomischer, organisationaler und nutzerbezogener Pfade.

Bis ins späte Mittelalter wurden auf dem heutigen Bundesgebiet vor allem Holzhäuser gebaut, die eine wesentlich bessere Wärmedämmung aufwiesen, als die späteren Steinbauten. Ab dem 19. Jahrhundert setzte sich die 38 cm dicke Vollziegelwand durch und wurde zum rechtlich verankerten Baustandard („Normalwand“) sowie von Architekten, Handwerkern und Bauherren gleichermaßen getragenen Mythos solider Konstruktion und Dämmleistung², der bis in die Nachkriegszeit beibehalten wurde und sich zum Teil bis heute in Form der gleichwertigen Vollziegelstärke als leichtverständliche Maßeinheit für die Dämmleistung von Gebäuden erhalten hat. Der Entwicklungsdruck lag eher auf der Heizungstechnik. Zentralheizungen auf Warmwasserbasis gehen auf das 18. Jahrhundert zurück, ersetzen aber erst mit der Verbreitung der Ölheizung nach dem zweiten Weltkrieg den Kohleofen in der Fläche. Fernwärmenetze wurden im 19. Jahrhundert populär, fristen jedoch bis heute ein Nischendasein. Eine dezidierte Dämmung von Gebäuden wurde trotz Entwicklung von Dämmstoffen für industrielle Zwecke seit dem 19. Jahrhundert erst in den 1960er Jahren technologisch weitergedacht und erhielt in Folge der Ölkrise mit den Wärmeschutzverordnungen ab 1977 einen rechtlichen Rahmen im Neubau. Aufgrund inzwischen weit verbreiteter Zentralheizungen war der Anreiz für die Dämmung des Gebäudealtbestands jedoch reichlich gering – rechtliche Anforderungen für den Bestand folgten in den 1980er Jahren, den Ländern wurde jedoch explizit freigestellt, Kontrolle und Vollzug auszusetzen, sodass sich der Lock-In in

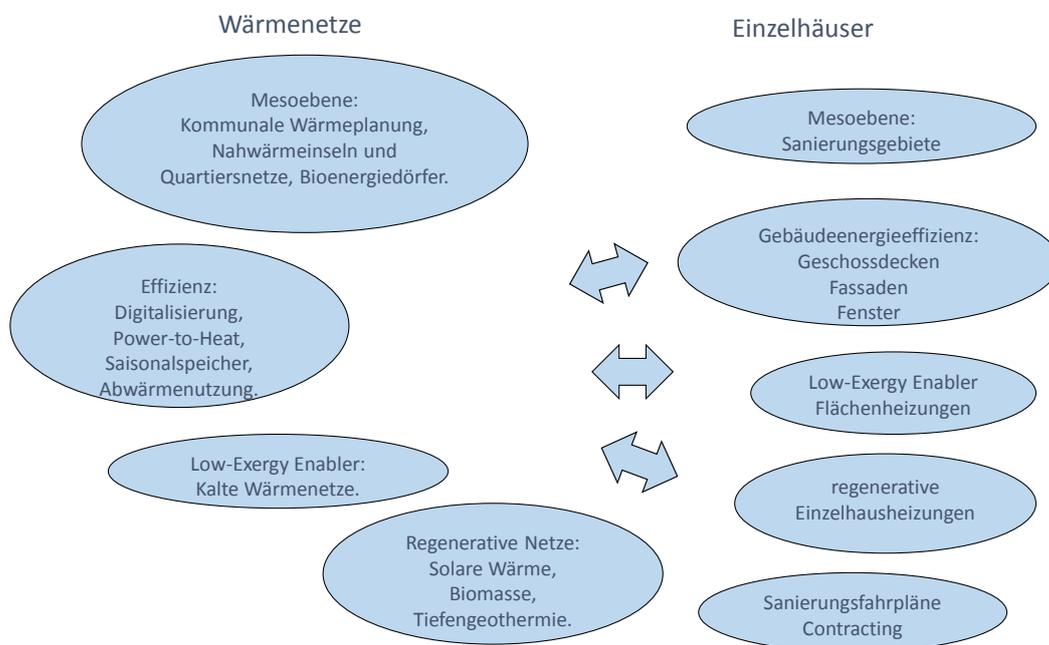
² Die Fokussierung auf den Vollziegelstandard ging sogar soweit, dass dieser – trotz eigentlich höherer Dämmleistung – als Referenzrahmen für die Dämmwerte von Holzhäusern herangezogen wurde (Eicke-Henning 2011).

einen unsanierten Gebäudebestand in Kombination mit hochexergetischer Energieversorgung auf Gebäudeebene verfestigen konnte.

4.3.1 Transformationsansätze

Beim Blick auf die Transformationsansätze im Themenbereich Wärmeversorgung fällt eine Hierarchie zwischen Ansätzen auf der gebäudeübergreifenden Mesoebene und Ansätzen auf der Ebene individueller Wärmenetze bzw. Gebäude auf. Weiter sind Unterschiede zwischen der Fortführung des High-Exergy-Pfades und des mit Blick auf der Begrenztheit fossiler Rohstoffe zukunftsweisenden Low-Exergy-Pfades von Bedeutung. Zudem charakterisieren sich die so zu bildenden Gruppen von Transformationsansätzen durch einige unterschiedliche, jeweils spezifische Pfadabhängigkeiten.

Abbildung 13: Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten



Konsistenzbasierte Ansätze setzen zumeist eine Verknüpfung von Dämmmaßnahmen und dem Wechsel zu erneuerbaren Energien zur Wärmeproduktion voraus. Gerade solar- und geothermische Anlagen sowie „kalte“ (low exergy) Nah- und Fernwärmenetze sind auf gute Wärmedämmung und die Installation von Flächenheizungen angewiesen – während die Installation von biomassebasierten Heizungen ohne grundlegende Änderungen an bestehenden Gebäuden und Wärmeverteilsystemen möglich ist, stehen deren limitierte Verfügbarkeit und Nutzungskonflikte einer flächendeckenden Ausbreitung entgegen. Effizienzbasierte Einzelansätze wie eine Erneuerung fossiler Heizungsanlagen oder die Dämmung einzelner Gebäudeelemente sind wesentlich weiter verbreitet, führen im Resultat jedoch nicht unbedingt zu einer Erreichung bestehender Ziele im Wärmesektor.

4.3.2 Hierarchie und Beziehung zwischen Transformationsansätzen

Auf einer Mesoebene lassen sich im Bereich der Wärmenetze die Transformationsansätze der kommunale Wärmeplanung, der Nahwärmeinseln und der Quartiersnetze sowie auf dem Land auch Bioenergiedörfer identifizieren. Diese Ansätze umfassen neben ggf. technischen Maßnahmen zusätzlich bzw. vornehmlich auch organisatorische Konzepte und stecken einen Rahmen ab, in dem dann konkrete technische Projekte umgesetzt werden können.

Mit Fokus auf Wärmenetze lassen sich darüber hinaus drei Gruppen von technischen Ansätzen identifizieren:

- Effizienzorientierte Ansätze, mit denen sowohl konventionelle (fossile) Wärmenetze effizienter gemacht werden können, die aber auch die Voraussetzungen für Low-Exergy Netze (regenerativ) verbessert werden,
- die „kalten Wärmenetze“, mit denen insbesondere die Möglichkeit der Nutzung von Low-Exergy Energiequellen wie solarer Wärme mit Saisonspeicher, aber auch Abwärme verbessert werden,
- regenerative Wärmequellen zur Versorgung von Wärmenetzen, wie große Solarthermiefelder, geothermische Wärme und Biomassekraftwerke.

Auf der Ebene der Einzelhäuser existiert eine Mesoebene dann, wenn z.B. die Kommune Sanierungsgebiete festlegt und in diesen bestimmte organisatorische oder finanzielle Hilfen für die wärmetechnische Sanierung durch die Gebäudeeigentümer bereitstellt. Auch mit Fokus auf Gebäude lassen sich verschiedene Maßnahmentypen identifizieren:

- Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs wie die Verbesserung der Wärmedämmung an Wänden, Fenstern und Türen sowie Geschossdecken und Dächern,
- der Einbau von Flächenheizungen, die niedrigere Vorlauftemperaturen zulassen und so die Möglichkeit der Nutzung von Low-Exergy Energiequellen wie solarer Wärme oder Wärme aus „kalten Wärmenetzen“ verbessern,
- der Einbau von Heizungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien wie Solarwärme, Wärmepumpen oder Biomasse,
- planerische Konzepte (Sanierungsfahrpläne) und ökonomische Ansätze wie Contracting, die die Realisierungschancen technischer Maßnahmen verbessern.

Zwischen der Realisierung von Maßnahmen auf der Einzelgebäudeseite und bei den Wärmenetzen bestehen Wechselwirkungen:

- Fortschreitende Wärmedämmung im Bestand senkt die Wärmeabnahme und wirkt sich so auf den Betrieb von Wärmenetzen aus. Hier können, bei gleichbleibender Wärmelieferung, zusätzliche Gebäude angeschlossen werden, um den Wärmeabsatz sicherzustellen. Die zusätzlichen Ausbaukosten der Netze wirken sich genau wie der sinkenden Absatz negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Netze aus.
- Die effizienzsteigernde Optimierung von Wärmenetzen durch Methoden der Digitalisierung stößt dort an Grenzen, wo das Wärmenetz über keine gebäude- und nutzerindividuellen Daten verfügt. Das Smart Building wird so zur Voraussetzung eines intelligenten Netzes.
- Die Existenz oder der Neubau von Netzen können planerisch durch die Kommune durch ein Fernwärmevorranggebiet gefördert bzw. festgeschrieben werden. In solchen Fällen unterliegt die Veränderung von Heizungsanlagen in Einzelgebäuden Einschränkungen.

4.3.3 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze

Eine Reihe von Pfadabhängigkeiten, welche den etablierten High-Exergy-Pfad stabilisieren, wirken sich übergreifend auf alle Transformationsansätze aus.

- Übergreifend wirken zunächst rechtliche Pfadabhängigkeiten und behindern so die Umsetzung fast aller Transformationsansätze. Rechtliche Instrumente im Wärmekontext sind häufig sehr komplex (z.B. Sanierungsvorschriften) oder von Ausnahmen durchzogen sind (z.B. Lücken in der Förderpolitik von Wärmenetzen, Lücken im EE-WärmeG, „Oma-Regelung“). Rechtliche Vorschriften unterliegen zudem z.T. einem mangelnden Vollzug (z.B. Sanierungsvorschriften).
- Eine wichtige ökonomische Pfadabhängigkeit ist der Wert der bereits gebauten Infrastruktur (etwa die Gasnetze) und der Wert des derzeitigen Gebäudebestandes. Die hohen Pfadwechselkosten, die mit fast allen Transformationsansätzen rund um die Wärme verbunden sind, wirken sich übergreifend aus.
- Über alle Transformationsansätze hinweg wirken sich auch die niedrigen Kosten fossiler Energieträger aus, die sich indirekt auch auf die Politik auswirken. Der politische Anspruch einer preiswerten Grundversorgung für die Bevölkerung hemmt den Willen und die Möglichkeit der Politik dafür zu sorgen, dass die Energiepreise die „ökologische Wahrheit sagen“. Viele Eigentümer bzw. Mieter schlecht sanierter Häuser und Wohnungen sind aufgrund der niedrigen Energiepreise und daher niedrigen Heizkosten mit dem gegenwärtigen Status zufrieden und spüren keinen Handlungsdruck.
- Eine weitere generell wirksame Pfadabhängigkeit besteht in den wirkmächtigen Akteuren, welche ein Interesse an der Beibehaltung des derzeitigen Pfades haben und sich in verschiedenen Lobbyverbänden einsetzen. Solche Akteure sind die Betreiber fossiler Kraftwerke, die Wärmenetze speisen, und auch die thermotechnische Industrie mit ihrem Verband, dem Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH).

Eine Reihe von Pfadabhängigkeiten wirkt sich aber auch fokussiert auf einzelne Transformationsansätze aus. Am auffälligsten ist hier, dass besonders die Transformationsansätze auf der Mesoebene der Wärmenetze durch Pfadabhängigkeiten stark behindert werden.

- Als technische Pfadabhängigkeit wirkt sich hier zunächst der Zustand aus, dass es zwar umfangreiche Gasnetze (50% Anschlussgrad der Haushalte), aber nur wenig Wärmenetze (13% Anschlussgrad der Haushalte) gibt.
- Der Grundsatz der Technologieneutralität und auch die Angst, in Freiheitsrechte (Wahl der eigenen Heizung) einzugreifen hemmen die kommunale Wärmeplanung und die Ausweisung von Fernwärmevorranggebieten.
- Die Geschäftsmodelle der etablierten Wärmeversorger lassen sich nur begrenzt auf kleine Quartiersnetze übertragen und es herrscht ein deutlicher Mangel an Akteuren, die Wärmenetze betreiben wollen und können. So findet sich z.B. selbst bei Existenz einer nutzbaren Abwärmequelle häufig kein Akteur, der diese zu den Kunden transportiert.
- Die Wirtschaftlichkeit fossiler Kraftwerke, der nicht terminierte Kohleausstieg, aber auch Gewerkschaften wie die IGBCE und Verdi hemmen kommunale Planungsansätze ebenfalls, wenn diese etablierte Strukturen in Frage stellen. Zudem befinden sich viele Kommunen in einem Dilemma, da die Anteile an ihren Stadtwerken für sie eine wichtige finanzielle Stütze bilden

Zu einer zögerlichen Umsetzung führt auch, dass kalte Wärmenetze als Schlüsseltechnologie einer Low-Exergy Wärmeversorgung noch nicht ausgereift sind. Hier wirken sich vornehmlich technische Pfadabhängigkeiten aus:

- Komponenten wie der Saisonalspeicher und der Wärmetransformator (eine wärmegetriebene Wärmepumpe) sind wenig erprobt und es finden sich national kaum Hersteller mit Erfahrung,
- die Legionellenprophylaxe erfordert hohen Aufwand,
- es mangelt an Demonstrationsprojekten.

Bezogen auf gebäudeindividuelle Sanierungsmaßnahmen ist zum einen die Besitzstruktur der Wohngebäude und Wohnungen problematisch. Ca. 54 % der Wohnungen werden vermietet. Damit verbunden ist das Investor-Nutzer-Dilemma bei Sanierungsmaßnahmen. Und Einzeleigentümer von Wohneigentum stellen ebenfalls ein Hemmnis dar, da sie sich z.B. als Eigentümer von Eigentumswohnungen in Mehrfamilienhäusern aber auch als Eigentümer einzelner Reihenhäuser auf Sanierungskonzepte einigen müssen, was häufig nicht gelingt. Auch Unkenntnis, Mythen und Angst vor Unbequemlichkeiten sind als Hemmnisse bei Sanierungsmaßnahmen wirksam.

Mit Fokus auf gebäudeindividuelle Maßnahmen ist auch die mangelnde Fachexpertise von Planern und Handwerksunternehmen von Bedeutung.

Als materielles Hemmnis bei der Wahl der Heizungsanlage ist aus gesellschaftlicher Perspektive von Bedeutung, dass die Verfügbarkeit von Biomasse beschränkt ist. So bietet eine Biomasseheizung zwar für den Einzelnutzer die Vorteile, dass das Wärmeverteilsystem mit Konvektorheizkörpern wie bei jeder anderen High-Exergy Heizung genutzt werden kann, aus übergreifender Perspektive ist aber eben wichtig, dass der Anteil von Biomasseheizungen nicht beliebig gesteigert werden kann.

4.3.4 Fazit

Die Analyse der Pfadabhängigkeiten rund um die Wärmeversorgung führt wenig überraschend nicht zu einem völlig neuen Blick auf Schwierigkeiten der Transformation in der Wärmeversorgung. In drei Aspekten schärft sie jedoch den Blick auf Probleme der Veränderung:

- Sowohl die vorhandenen, unsanierten Gebäude wie auch die fehlenden Wärmenetzstrukturen erfordern hohe Pfadwechselkosten und dementsprechend eine lange Zeit für den Pfadwechsel.
- Die verteilten und manchmal komplexen Eigentumsstrukturen (Eigentümergeinschaften) stellen im Kontext hoher Pfadwechselkosten eine besondere Herausforderung dar.
- Der rechtliche Rahmen führt zu niedrigen Preisen für fossile Energie und ist in Bezug auf die Vorschriften, die den Wandel fördern sollen, von Inkonsistenz und einem fast komplett fehlenden Vollzug geprägt. Die Anreizwirkung des Rechtsrahmens für den Pfadwechsel ist noch sehr begrenzt.

4.4 Rohstoffversorgung

Der Rohstoffverbrauch spiegelt die Entwicklung von Produktion und Konsum wider. Pfadabhängigkeiten, die einer Rohstoffwende entgegenstehen, sind damit grundsätzlich tief eingebettet in die Entwicklung der Industriegesellschaft und deren strukturellen Wandel, der mit Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft gekennzeichnet werden kann. Globalisierungsprozesse im Sinne von grenzüberschreitender Produktion und Handel und weltweit sich vernetzenden Wertschöpfungsketten prägen die Pfadabhängigkeiten mit Blick auf die Rohstoffversorgung. Ordnet man die Entwicklung in einer längeren Perspektive ein, dann

kann man festhalten: In der industriellen Revolution verschob sich der Rohstoffverbrauch weg von nachwachsenden Rohstoffen, hin zu Kohle und Erdöl. Die erste Erdölraffinerie entstand 1859. Die Erdölpreise sanken deutlich und die Raffinerien nahmen in der Anzahl zu. Leuchtöle, besonders Petroleum, ermöglichten neue Lichtquellen. Nach der Einführung des elektrischen Lichts war Erdöl zunächst nicht mehr attraktiv, doch bald nach der Entwicklung des Automobils setzte sich Erdöl (Benzin) durch. Dies stimulierte auch die stoffliche Nutzung. Erdöl wurde in der chemischen Industrie immer wichtiger, wo es zur Herstellung von Kunststoffen und immer mehr anderen Chemieprodukten eingesetzt wurde. Gleichzeitig vervielfachten sich die Mengen von Eisen und Stahl, die für Gebäude, Eisenbahnen, Schiffe, Autos, Maschinen, Haushaltsgeräte und viele andere Güter gebraucht werden. Die vorindustrielle Eisenherstellung kann nur geschätzt werden, sie dürfte im Jahr 1700 bei etwa 300.000 Tonnen³ gelegen haben. Mit der Industrialisierung stieg die Stahl- und Eisenproduktion: Im Jahr 1850 lag sie bei 12 Millionen Tonnen - 1980 bei 1,2 Milliarden Tonnen und im Jahr 2005 bei über 1,9 Milliarden Tonnen. Durch die Elektrifizierung gewann Kupfer erheblich an Bedeutung. Es wurde sowohl hinsichtlich der Art als auch der Menge mehr Metall als je zuvor eingesetzt (Exner, Held & Kümmerer, 2016, S. 3).

„Einen weiteren richtiggehenden Schub bekam die Entwicklung dann nochmals ab etwa 1980. Immer mehr Metalle und Halbmetalle wurden in einer breiten Palette von Anwendungen funktionalisiert. Dies führte in wenigen Jahrzehnten dazu, dass inzwischen nahezu alle stabilen Elemente des Periodensystems mit ihren spezifischen Potenzialen genutzt werden. Durch die Digitalisierung, Miniaturisierung und Vernetzung wird die Bedeutungszunahme von Metallen in den 2010er-Jahren mit ungeheurer Dynamik noch weiter vorangetrieben: Sensoren, digitale Geräte bis hin zum Internet der Dinge, Wearables, Vernetzung von Konsumgütern aller Art wie zunehmende Vernetzung in den Wertschöpfungsketten und in der Produktion (derzeit unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ gängig) sorgen für zunehmende Nachfrage nach Metallen des gesamten Periodensystems“

Exner et al. (2016) sprechen angesichts dieser Entwicklung von einer Metallisierung der Wirtschaft. Dies wird noch forciert durch die Energiewende und dem dadurch ausgelösten Bedarf an Metallen.

Im Zuge dieser Entwicklungen haben sich koevolutiv in wechselseitiger Beeinflussung seit der Industrialisierung (teilweise inkrementell, teilweise schubartig) Pfadabhängigkeiten herausgebildet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Pfadabhängigkeiten, die in den vier untersuchten Transformationsfeldstudien gefunden wurden. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei aus Sicht der Autorinnen oder Autoren der jeweiligen Transformationsfeldstudie das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

Tabelle 6: Anzahl Pfadabhängigkeiten in der Rohstoffversorgung

Pfadabhängigkeit Anzahl	Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technologische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten	Summe
Starke	6	7	13	5	5	36
mittlere und	3	2	4	1	2	12

³ Vgl. <http://www.oekosystem-erde.de/html/rohstoffe.html> vom 17.1.2017.

schwache						
Gesamt	9	9	17	6	7	48

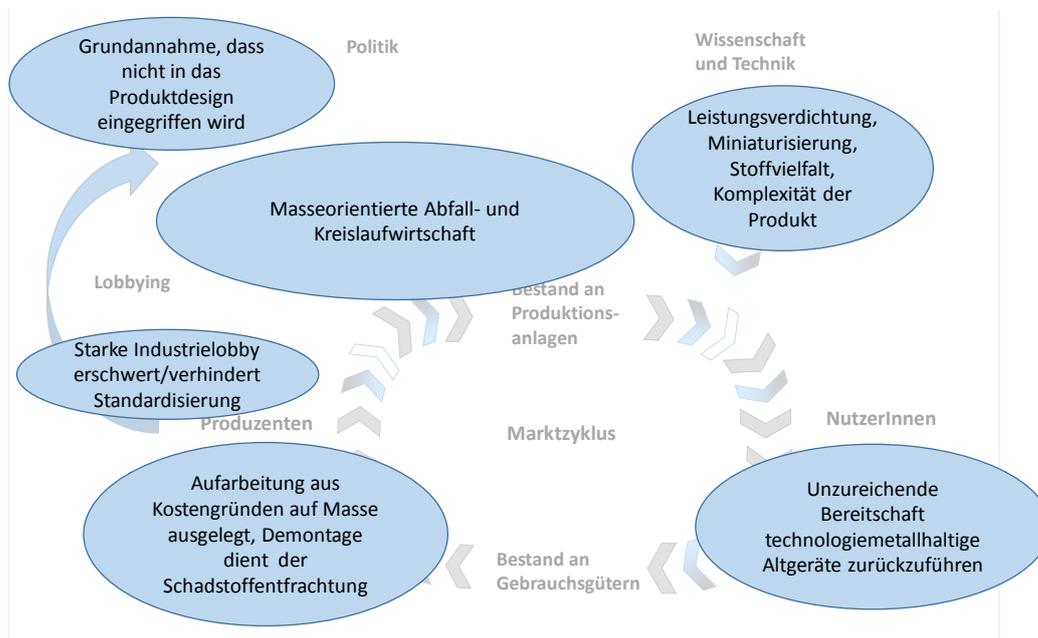
Es dominieren deutlich technologische Pfadabhängigkeiten, gefolgt von rechtlichen und ökonomischen Pfadabhängigkeiten. Auch was die Stärke anbetrifft, überwiegen technologische Pfadabhängigkeiten, was darauf hinweist, dass es sich um vielstufige und vielfach verzweigten Prozessketten und Infrastrukturen handelt, die sich nur schwer transformieren lassen.

Jenseits dieser allgemeinen Betrachtung ist festzustellen, dass der Lock-in jeweils spezifisch für Rohstoffe und die damit verbundenen Rohstoffregimes ist, die sich herausgebildet haben. Öl ist nicht gleich Kupfer. Die Rohstoffregimes und die sich in ihnen konstituierenden Pfadabhängigkeiten sowie die damit verbundenen Möglichkeiten für einen Pfadwechsel unterscheiden sich stark.

Der Lock-in in ein Recyclingsystem, das wesentlich auf Masseströme ausgerichtet ist, ist auf ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren zurückzuführen. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts wurde zunächst eine geordnete, nachgeschaltete Abfallwirtschaft aufgebaut, die sich sukzessive zu einer verzweigten Entsorgungs- und Verwertungswirtschaft entwickelte. Stoffliche und thermische Verwertung dienten zunächst vor allem der unmittelbaren Gefahrenabwehr und der Reduktion der Restabfallmengen angesichts befürchteter Entsorgungsnotstände. Das Abfallwirtschaftsgesetz (1980er) markiert mit dem Konzept der Kreislaufwirtschaft den Übergang zum integrierten Umwelt- und Ressourcenschutz, blieb aber bis heute im Wesentlichen massebasiert. Unter den Technologiemetallen wurde lediglich das Recycling von Edelmetallen und einigen Sondermetallen forciert. Bei den meisten anderen Technologiemetallen fehlten die Preisanreize für ein Recycling. Hinzu kamen die geringen Materialmengen für eine Verwertung. Erst in den letzten Jahren sind viele der Technologiemenen erst für ein Recycling mengenrelevant geworden oder werden dies in Zukunft (z.B. Photovoltaik, Li-Ionen-Batterien).

Nicht zuletzt spielt die fehlende Bereitschaft der Wirtschaft in eine Sammel- und Aufarbeitungslogistik und Recyclingverfahren zu investieren eine Rolle. Dies hat sich auch durch den zeitweisen Rohstoffboom nicht wesentlich geändert. Insbesondere die seither hohen Preisvolatilitäten an den Primärrohstoffmärkten stellen ein Risiko für die Recyclingwirtschaft dar. Kurz-, mittel- und langfristig kann es durchaus sehr unterschiedliche Preisentwicklungen geben. Eine große Unbekannte bei Projektionen des zukünftigen Preisniveaus sind Marktinterventionen durch Regierungen und die oligopolartigen Angebotssituationen. Beide Faktoren sprechen für volatile Preise, was Investitionen in Techniken und Anlagen zur Verwertung von Technologiemetallen erschwert. Hinzu kommt eine zunehmende dissipative Verwendung von Technologiemetallen in Endprodukten, die eine Erhöhung des Rückgewinnungsgrades erschwert. Weitere Pfadabhängigkeiten bestehen in den vorhandenen Sammel- und Logistik(infra)strukturen, die sich in Jahrzehnten entwickelt und etabliert haben. Die Aufbereitungsverfahren für Altprodukte und Schrotte sind heute noch weitestgehend auf Massenströme ausgelegt. Die Demontage dient in erster Linie der Schadstoffentfrachtung, nur in geringem Maße werden verwertbare Komponenten freigelegt. Begünstigt wird die Ausrichtung auf eine Verwertung der Massenströme durch die WEEE-Direktive bzw. nationale Gesetze zur Rücknahme von Altgeräten und Produkten, wie das Elektro-Gesetz, die massebasierte Verwertungsquoten vorgeben.

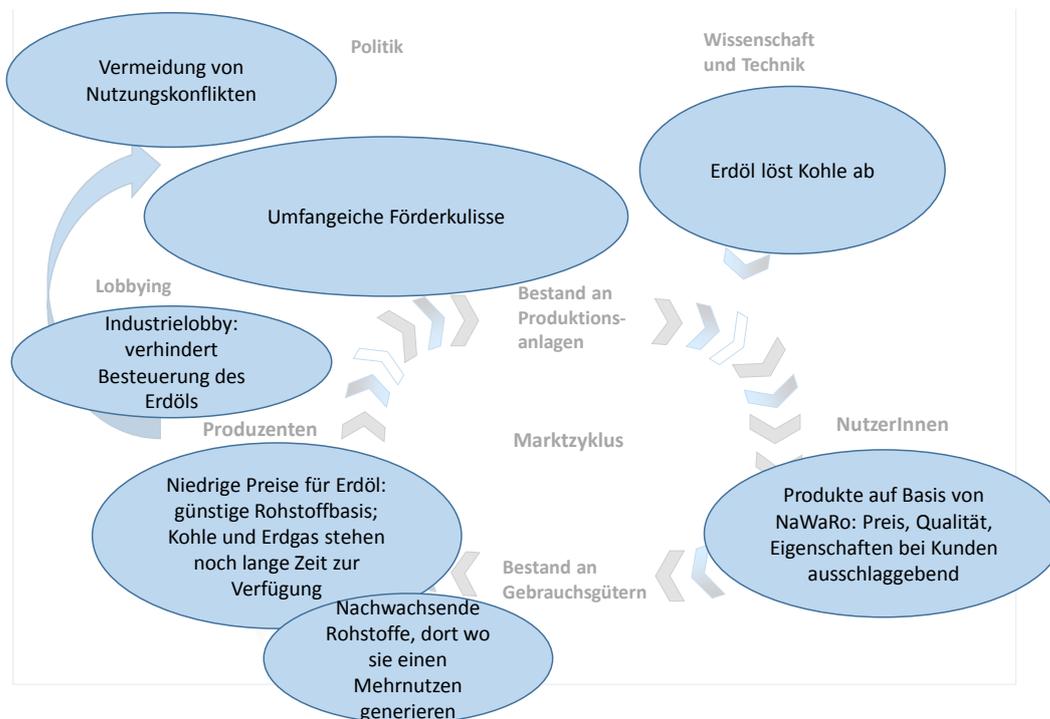
Abbildung 14: Lock-in in ein massebasiertes Recycling



Die Transformation erfordert das Zusammenspiel dreier Ebenen: erstens ist ein recyclinggerechtes Produktdesign erforderlich, zweitens ist eine Erfassung der Altprodukte zu gewährleisten und drittens ist eine angepasste Aufarbeitung der Produkte erforderlich, so dass möglichst wenig Technologiemetalle verloren gehen. Da Technologie- und Marktentwicklungen die Dissipation tendenziell erhöhen, sind rechtliche Rahmenbedingungen zu entwickeln, die Anreize für das Recycling von Technologiemetallen schaffen. Produktkennzeichnungen und Informationsmaßnahmen sind nicht ausreichend, vielmehr sind Mindestanforderungen an die Recyclingfähigkeit verpflichtend vorzuschreiben. Über massebasierten Quoten hinaus sollten zusätzlich für Technologiemetalle spezifische Verwertungsraten und –anforderungen definiert werden. Zwar wird die Berücksichtigung rohstofflicher Anforderungen zwar generell als notwendig erachtet, erste Schritte zur Erweiterung der vor allem auf die Energieeffizienz ausgerichteten EU-Ökodesign-Richtlinie sind erfolgt (Progress II), werden aber tatsächlich bis dato nur sehr zögerlich aufgegriffen.

Bei Erdöl, das heute die Rohstoffbasis der Chemieindustrie dominiert, ist der Lock-in ungefähr Mitte des 20. Jahrhunderts zu verorten. Erdöl hat seinerzeit die Kohle abgelöst, da es kostengünstig war und zudem neue Möglichkeiten zur Herstellung von Chemikalien bot. Die Chemieindustrie nutzt heute kostengünstige Stoffströme aus der Erdöl verarbeitenden Industrie, um daraus Basischemikalien und Endprodukte herzustellen. Im Laufe von Jahrzehnten sind vielstufige und verzweigte Wertschöpfungsketten entstanden, in denen über komplexe und sehr unterschiedliche Prozesse mehr als 100.000 Produkte hergestellt werden. Aufgrund dieser Pfadabhängigkeit kann die Chemieindustrie die Herstellung von Basischemikalien nicht einfach umstellen. Sie würde einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil aufgeben, nämlich die Verbundproduktion, das heißt aufeinander abgestimmte, hocheffiziente Produktionsverbände, in denen der Stoff einer Produktionsanlage zum Grundstoff einer anderen wird.

Abbildung 15: Lock-In auf eine Erdöl-basierte Chemieindustrie

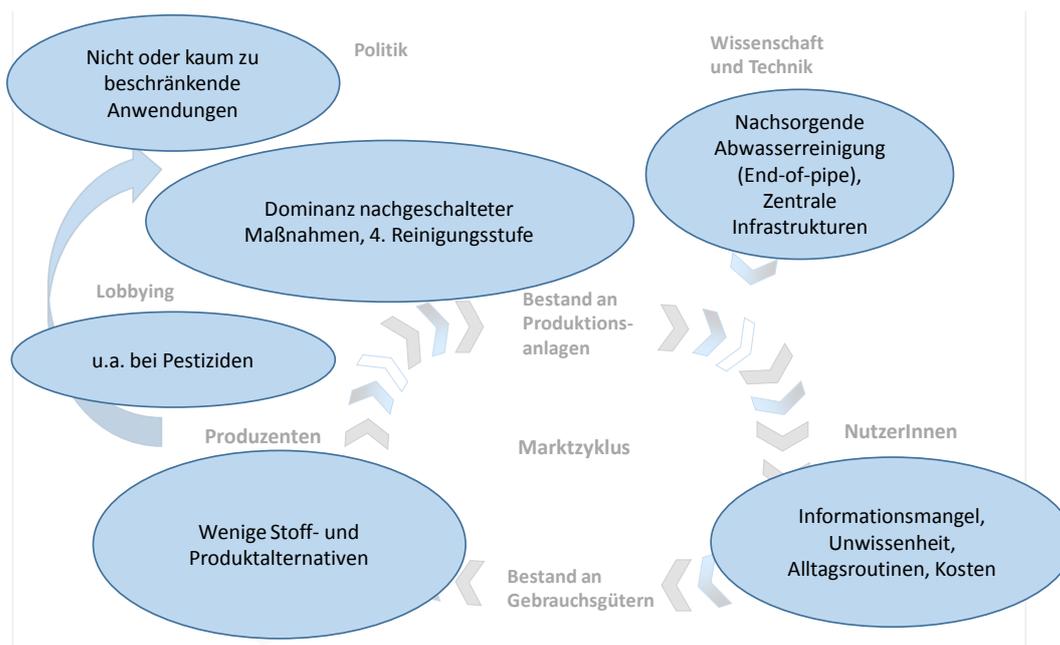


Im Fokus zum Feedstock Change der Chemieindustrie stehen Effizienzsteigerungen, die verstärkte Nutzung von „Non-Food“-Biomasse, Optimierung der Verarbeitungsprozesse und die Entwicklung neuer Produkte. Für den Übergang auf nachwachsende Rohstoffe sind neue Synthesestrategien und Herstellungsprozesse erforderlich, die es erlauben, chemische Produkte aus heterogener Biomasse herzustellen und in bestehende Prozesse kaskadenförmig zu integrieren. Eine Schlüsselrolle nimmt dabei die industrielle Biotechnologie ein. In Anbetracht der enormen wirtschaftlichen Stärken und hervorragenden Strukturen ist aber auf absehbare Zeit kein Feedstock Change wahrscheinlich, vielmehr ist zu erwarten, dass biologische Verfahren dort zum Einsatz kommen, wo die Produkte sich durch verbesserte Eigenschaften im Markt durchsetzen oder wirtschaftlicher herzustellen sind als mit herkömmlichen chemischen Synthesen. Selbst langfristig ist bei steigenden Erdölpreisen nicht unbedingt mit einem Aufbrechen der Pfadabhängigkeiten zugunsten eines Wechsels hin zu nachwachsenden Rohstoffen zu rechnen. Einerseits stehen noch lange Kohle und Erdgas als alternative Rohstoffquellen für Erdöl zu Verfügung, andererseits ist davon auszugehen, dass Verfügbarkeit und Preis von nachwachsenden Rohstoffen aufgrund der Nutzungskonkurrenzen limitierende Faktoren für einen umfassenden Feedstock Change der chemischen Industrie sein werden. Dies betrifft insbesondere die Knappheit des Angebots an Biomasse, das nur unter Inkaufnahme von ökologischen Nebeneffekten, wie von Behrendt (2017a) herausgearbeitet wurde, stark ausgeweitet werden kann.

Ergänzend dazu wurden die Pfadabhängigkeiten bei synthetischen organischen Substanzen untersucht, die in Folge ihrer Freisetzung als sogenannte Mikroschadstoffe die Gewässer belasten. Es handelt sich um eine Vielzahl von Chemikalien und Arzneistoffen, auch Mikroplastik gehört dazu. Der Lock in vollzieht sich im Laufe des letzten Jahrhunderts als Reaktion auf zunehmende Umweltprobleme im Bereich der Gewässer. Im Lauf der Zeit wird eine umfangreiche Infrastruktur aus Kanalisationen und Kläranlagen aufgebaut, die sich mit dem Stand der Technik entwickelt (mechanische, biologische und chemische Verfahren). Auf diese Weise konnte der Eintrag sauerstoffzehrender Substanzen und auch die Einträge der

Nährstoffe aus dichter besiedelten Gebieten in Gewässer deutlich reduziert werden. Seit den 90er Jahren werden zunehmend Belastungen durch Arzneimittel, Industriechemikalien und Pestiziden festgestellt. Entsprechend der Grundlogik der nachsorgenden Abwasserreinigung wurden Techniken entwickelt mit denen Kläranlagen um eine 4. Reinigungsstufe nachgerüstet werden können, um Mikroschadstoffe zu eliminieren. Sie werden großtechnisch bereits auf verschiedenen Kläranlagen erprobt. Dabei zeigt sich, dass ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen in hohen Umfang aus dem Abwasser entfernt werden kann, allerdings nicht vollständig.

Abbildung 16: Lock-in in eine nachsorgende Abwasserreinigung



Ein Pfadwechsel bedeutet, dass neben der Aufrüstung von Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe („End-of-Pipe“) den quellenorientierten Maßnahmen ein höheres Gewicht eingeräumt wird. Dazu gehört die Substitution von Stoffen, die Veränderung der Produkte, die Reduzierung der Anwendungen in Industrie, Gewerbe und Haushalten sowie ein verantwortungsvolleren Umgang beim Gebrauch und bei der Entsorgung von Produkten. Die Potentiale sind jeweils stoffspezifisch.

Quer zu den Fallstudien wurde die Digitalisierung und Automatisierung der Produktion untersucht. Unter dem Stichwort „Industrie 4,0“ werden die Möglichkeiten einer stärkeren Verschmelzung von physischer und virtueller Welt zusammengefasst. Die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation, ad-hoc-vernetzte und umgebungssensitive Mikrosysteme können eine Effizienzsteigerung in Produktion, Logistik und Service bewirken. Am Ende der Kette sind Demontagefabriken denkbar, die automatisch Produkte zerlegen und damit händische Prozesse ablösen. Hinzu kommt, dass eine so weitgehende Vision der Durchdringung der Wertschöpfungsketten mit digitalen Komponenten, die immer und überall eingeschaltet und weitgehend drahtlos vernetzt sind, neue Produktionskonzepte möglich machen. Solche neuen Konzepte sind beispielsweise der 3-D-Druck oder dezentrale Produktionsformen. Grundsätzlich sind Pfadwechsel vorstellbar. Allerdings sind die Effekte höchst ambivalent. Auffällig ist, dass der Idee einer „Industrie 4.0“ ein hohes Energie- und Rohstoffeffizienzpotential attestiert wird, aber mit der Debatte um eine Green Economy kaum verknüpft, geschweige denn mit praktischen Projekten unterlegt ist.

4.4.1 Transformationsansätze

Die Transformationsansätze im Themenfeld Rohstoffe lassen sich anhand des Produktlebenszyklusses kategorisieren. Eine Rolle spielen dabei die Auswahl der genutzten Rohstoffe und deren Art und Weise der Weiterverarbeitung in der Produktion und Anwendung, aber auch die kontrollierte Entsorgung und ein anschließendes Recycling (vgl. Abbildung Anhang)

- **Rohstoffauswahl bzw. Produktgestaltung:** Ansätze der Transformation bilden im Themenfeld Feedstock Change die nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe, im Bereich Metalle das Ökodesign unter dem Aspekt der späteren Möglichkeit zur leichten Demontage sowie in Bezug auf die Vermeidung von Mikroschadstoffen die Stoffsubstitutionen.
- **Produktion und Anwendung:** Die Transformationsansätze zielen zum einen auf die Verbesserung bestehender Produktionstechniken, zum anderen auf die Erschließung neuer ab: Sie umfassen die Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Möglichkeiten der Industrie 4.0, die dezentrale Produktion sowie integrierte chemische Prozesse und neue Wertschöpfungsketten und die Optimierung bestehender und neuer Bioproduktionssysteme im Bereich Feedstock change.
- **Entsorgung und Recycling:** Die gezielte Rückführung bzw. Sammlung von nicht mehr gebrauchten Produkten ist eine Vorbedingung des Recyclings. Im Bereich Mikroschadstoffe kann dies durch die geregelte Entsorgung schadstoffhaltiger Produkte geschehen, in der Industrie spricht man von Retro-Logistik. Recycling-Partnerschaften könnten der globalen Verantwortung Rechnung tragen. Am Ende des Produktionszyklusses bilden Pre-Shredding-Verfahren, z.B. automatische Demontagefabriken (Smart Disassembly Factories) Ansätze in Richtung einer Green Economy.

4.4.2 Pfadabhängigkeiten und Transformationsansätze

Das etablierte, nicht nachhaltige System der Rohstoffwirtschaft wird von einigen stark wirkenden und zu einem großen Teil technischen Pfadabhängigkeiten stabilisiert. Im Themenfeld Rohstoffe sind nur wenig übergreifende und vergleichsweise viele auf die einzelnen Problemfelder wirkenden Pfadabhängigkeiten auszumachen. Eine übergreifend wirksame Pfadabhängigkeit stellt die Vorstellung der Notwendigkeit des Vorhandenseins billiger Rohstoffe für die Wirtschaft dar.

In Bezug auf **Rohstoffauswahl- und Produktgestaltung** zeigen sich folgende Pfadabhängigkeiten:

Ökodesign Technologiemetalle: Die dissipative Verwendung von Technologiemetallen an weilen Stellen im Produkt ist etabliert; Käufer legen wenig Wert auf die Umweltverträglichkeit als Produkteigenschaft

Produktgestaltung Mikroschadstoffe: Das Vorhandensein heterogener Anwendungskontexte für eine Vielzahl von Stoffen sorgt für eine große Komplexität; Stoffsubstitutionen sind nur eingeschränkt möglich, zudem können diese mit hohen Kosten verbunden sein. Die Stoffregelungskompetenzen liegen bei der EU. Vorkonfektionierte Packungsgrößen bei Medikamenten sorgen von vornherein für Überschüsse.

Nutzung nachwachsender Rohstoffe für den Feedstock Change: Die Preise für Erdöl sind niedrig während die Preisentwicklung für erneuerbare Rohstoffe volatil und schwer langfristig planbar ist, was auch auf die Konkurrenz mit anderen Nutzungsansprüchen zurückzuführen ist; auch das EEG sorgt für die Verteuerung von Biomasse. Weiter ist die Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe begrenzt.

Zahlreiche Pfadabhängigkeiten hemmen auch die Veränderung der Rohstoffwirtschaft auf der Ebene der Produktion, allerdings recht selektiv.

Mit Blick auf die Idee von Industrie 4.0 konnten z.B. keine spezifischen Pfadabhängigkeiten im Kontext der **Realisierung von Industrie 4.0 in etablierten Wertschöpfungsketten** ausgemacht werden.

Verknüpft sich der Gedanke von Industrie 4.0 jedoch mit der Idee der **dezentralen Produktion** auf Basis von open-source Know-how, hemmende zahlreiche Pfadabhängigkeiten die Entwicklung:

- Rechtlich sind viele Fragen der Industrial Security (z.B. des Datenschutzes) nicht geklärt. Auch Anspruch auf den Schutz firmeninternen Know-hows steht Kooperationen auf open source Basis entgegen, denn Schutzrechte können in dezentralen Produktionsstrukturen auf open source Basis nicht wahrgenommen werden. Bei Kooperationen kleiner vernetzter ökonomischer Einheiten liegen für den letztendlichen Inverkehrbringer der Produkte spezifische Haftungs- und gewährleistungspflichten vor. Auch hemmt der Mangel an offenen Standards ökonomisch nicht-integrierte Produktionsketten.
- Die Entwicklung dezentraler Produktionsstrukturen ist zudem kostenintensiv. Mit Blick auf die Unsicherheit des Produktabsatzes bleibt damit eine hohe Unsicherheit, wann Investitionen in dezentrale Produktion rentabel sind. Vorbedingung für dezentrale Produktion ist weiter ein flächendeckendes leistungsfähiges (Glasfaser-)Netz, welches in Deutschland gegenwärtig noch wesentliche Lücken hat.
- Sollten die Stückzahlen aus dezentraler Produktion steigen, dann ist aus der etablierten Produktion Widerstand zu erwarten. Denn hochentwickelte, funktionale zentrale Produktionsstrukturen sind vorhanden und ein wachsender dezentraler Produktionssektor könnte zu Befürchtungen bzgl. Kompetenz- und Arbeitsplatzverlust bei etablierten Anbietern führen.

Der Feedstock Change der chemischen Industrie erfordert **integrierte chemische Prozesse und die Optimierung bestehender Bioproduktionssysteme** und wird ebenfalls von Pfadabhängigkeiten deutlich behindert:

- Technisch machen vielfach verzweigte Wertschöpfungsketten sowie der Mangel an „rohstofftoleranten“ Prozessen Probleme. Die Verknüpfung von Einzeltechnologien zu komplexen Biotechnologien steht noch aus und es bestehen hohe Mengenschwellen für Anlagen mit hoher Effizienz. Auch sind Produkte von Bioraffinerien oft inkompatibel mit herkömmlichen chemischen Wertschöpfungsketten.
- Weiter Pfadabhängigkeiten bestehen in den Risiken einer weitgehend neuen Bio-Produkt- und Rohstoffstrategie, der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse, den noch oft unklaren ökologischen Vorteilen biobasierter Produkte sowie der Tatsache, dass Kunden biomassebasierter Produkte nicht unbedingt als Vorteil sehen.

Im Bereich **Entsorgung und Recycling** zeigt sich bezüglich der Retro-Logistik von Technologiemetallen die auf Nationsgrenzen beschränkte Regulierungskompetenz als hemmend. An einer klaren Definition zwischen gebrauchter Ware und Schrott mangelt es, sodass Exporte von Altprodukten oft in einem rechtlichen Graubereich stattfinden. Die getrennte Erfassung und Sammlung von Produkten mit Technologiemetallen funktioniert kaum.

Die Rückgewinnung von Technologiemetallen durch Demontage und Recycling wird gehemmt durch technische Pfadabhängigkeiten, da z.B. die Zugabe von „Gewürzmetallen“ die Stoffvielfalt erhöht und die dominierende Schredder-Technologie die vielen unterschiedlichen Materialien nicht separieren kann. Metallkombinationen in Produktion passen manchmal nicht zu etablierten Schneidverfahren. Mengenquoten setzen falsche Anreize im Re-

cycling und Anreize für (hohe) Investitionen in Recyclinganlagen sind durch niedrige und volatile Rohstoffpreise und aufgrund unklarer Anlagenrentabilität kaum gegeben.

Für *Mikroschadstoffe* sind Kläranlagen zentraler Ort der Sammlung und Eliminierung. Aufgrund dieser zentralen und kontrollierten Reinigung von Abwässern bietet sich eine zusätzliche 4. oder 5. Reinigungsstufe an. Aber die Forschung zu Abwasserreinigungstechnologien ist weiter als die Anwendung, hier gilt es eine Lücke zu schließen. Rechtliche Vorschriften fordern zwar Gewässerqualität, sind jedoch oft maßnahmenoffen. Auch die Wasserrahmenrichtlinie begrenzt die Einleitung von lediglich 45 prioritären Stoffen.

4.4.3 Fazit

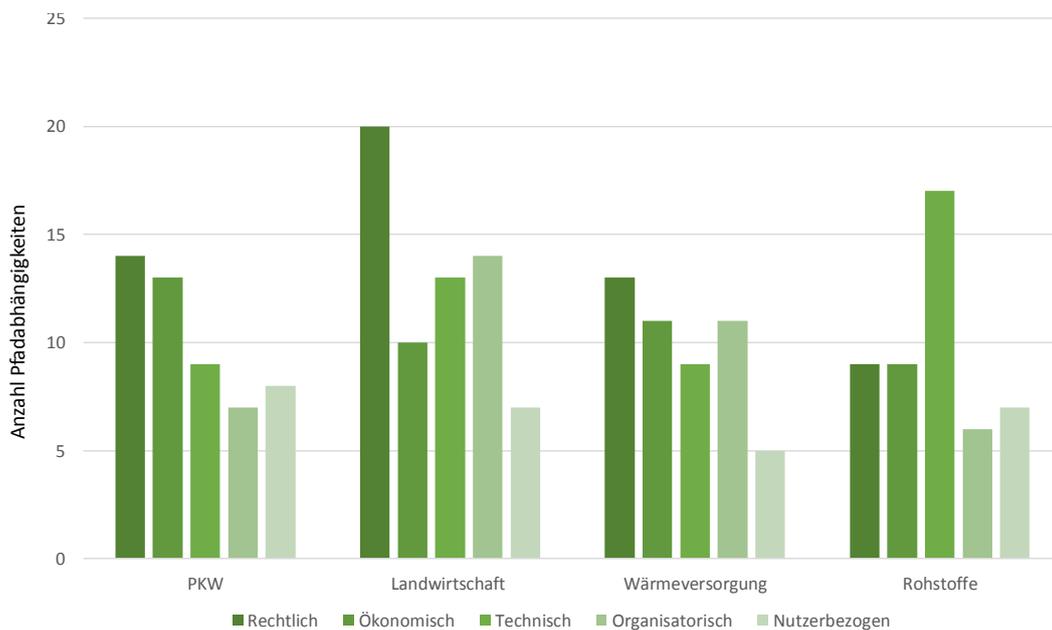
Die Analyse der Pfadabhängigkeiten rund um die Rohstoffversorgung führt wenig überraschend nicht zu einem völlig neuen Blick auf Schwierigkeiten der Transformation in der Rohstoffversorgung. In einigen Aspekten schärft sie jedoch den Blick auf Probleme der Veränderung:

- Die Zahl der in Produkten eingesetzten Elemente hat sich in den letzten Jahrzehnten stark erhöht. Das Recyclingsystem ist aber immer noch auf Mengenrohstoffe wie Stahl, Papier und Glas ausgerichtet. Die Vorhandene Technologie (z.B. Shredderanlagen) stabilisiert die Ausrichtung auf Massenrohstoffe.
- Das Recycling von Kleinmengenrohstoffen wie Technologiemetallen wird dadurch erschwert, dass diese verteilt in sehr vielen Produkten eingesetzt werden. Ökodesign, welches versucht, die Stoffvielfalt zu reduzieren und bestimmte Stoffe so einzusetzen, dass sie einfach demontierbar sind (z.B. durch Clusterung von Elektronikkomponenten) ist mit Blick auf die Produktvielfalt und deren weltweite Herkunft nur schwer umzusetzen.
- Der chemischen Industrie stehen die für einen Feedstock-Change erforderlichen Mengen nachwachsender Rohstoffe nicht zur Verfügung, da diese im Lebensmittel- und Energiesektor eingesetzt werden.

5 Pfadabhängigkeiten

In diesem Kapitel werden die in der Vorstudie (Clausen & Fichter, 2016) systematisierten sowie den Transformationsfeldstudien (vgl. Kapitel 3) identifizierten Pfadabhängigkeiten im Überblick betrachtet. Es wird nach einem kurzen Überblick über Zahl und Stärke der gefundenen Pfadabhängigkeiten zunächst in einer Detailanalyse (Abschnitt 5.1) die bereits aufgestellte Typologie von Pfadabhängigkeiten auf empirischer Basis weiter verfeinert und danach die Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten analysiert (Abschnitt 5.2). Abschließend leitet Abschnitt 5.3 die Konsequenzen für die vier Wendethemen ab.

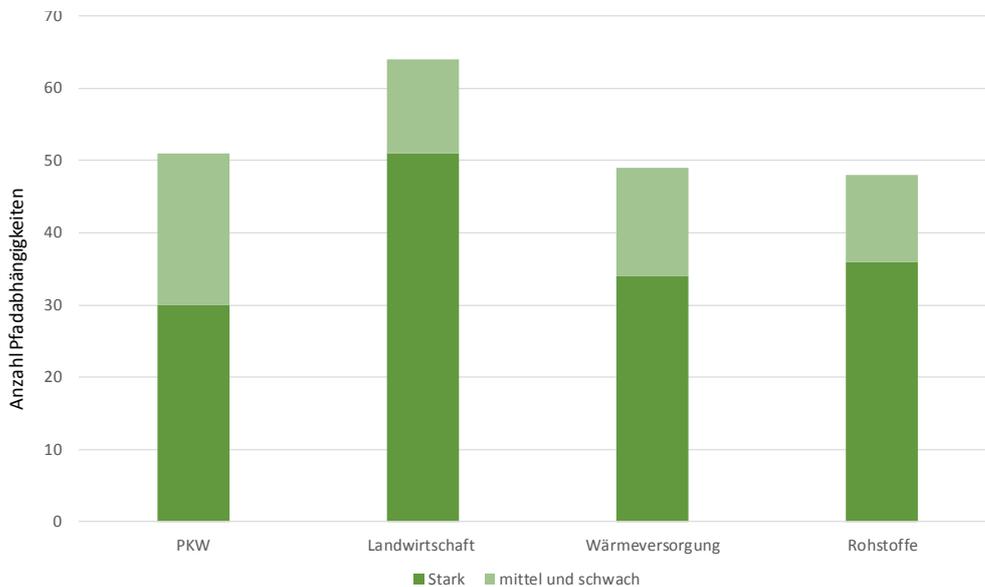
Abbildung 17: Zahl und Typ von Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen



Der Überblick über die Typen von Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen lässt erkennen, dass in der Landwirtschaft rechtliche Pfadabhängigkeiten in großer Zahl vorhanden sind und auch technische und organisatorische Pfadabhängigkeiten das Regime stabilisieren. In der Rohstoffwirtschaft dagegen wurden besonders viele technische Pfadabhängigkeiten identifiziert. In der Verteilung der Pfadabhängigkeiten rund um die PKW-Nutzung und in der Wärmeversorgung dagegen lässt auf einen technisch-ökonomischen Komplex schließen, der rechtlich gut abgesichert ist.

Von den insgesamt 212 identifizierten Pfadabhängigkeiten wurden 61 (29%) als schwach oder mittelstark ausgeprägt, 151 (71%) als starke Pfadabhängigkeiten charakterisiert. Die Verteilung starker und schwacher Pfadabhängigkeiten über die Wendethemen ist weitgehend ausgeglichen.

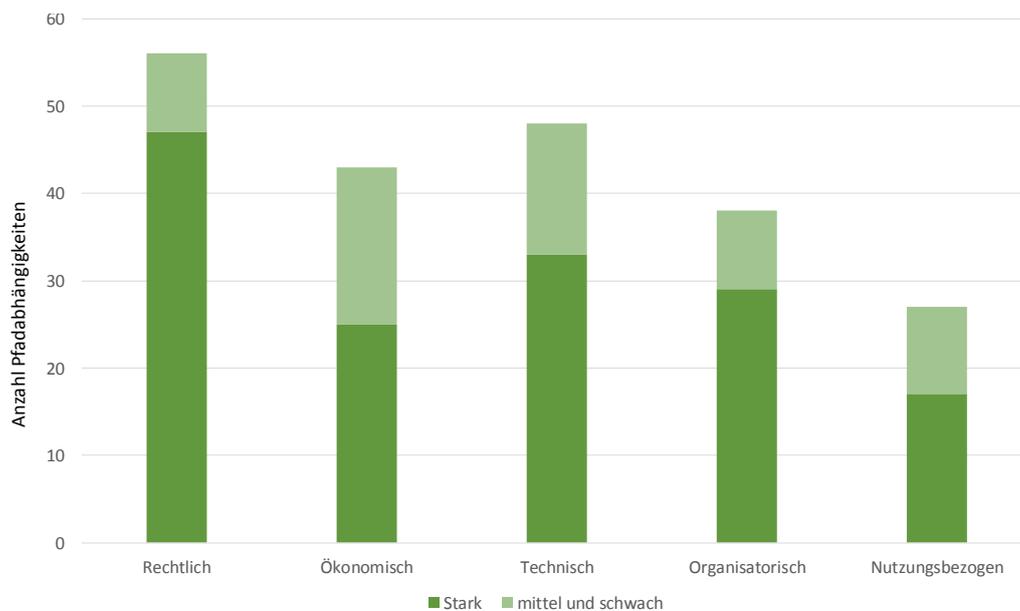
Abbildung 18: Starke und schwache Pfadabhängigkeiten in den vier Wendethemen



Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert aus Sicht der Autorinnen oder Autoren der jeweiligen Transformationsfeldstudie das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

Bei der Verteilung starker und schwacher Pfadabhängigkeiten anhand der Typologie der Pfadabhängigkeiten fällt auf, dass besonders bei den ökonomischen wie auch bei den technischen Pfadabhängigkeiten ein vergleichsweise hoher Anteil der identifizierten Pfadabhängigkeiten als nicht so stark eingestuft wurde.

Abbildung 19: Starke und schwache Pfadabhängigkeiten nach Typ



5.1 Detailanalyse der Typen von Pfadabhängigkeiten

In diesem Abschnitt werden die Pfadabhängigkeiten wie am Beginn von Kapitel 4 beschrieben vor dem Hintergrund der empirischen Erhebung typisiert und dabei das in der Vorstudie aufgestellte System von fünf Typen (vgl. Tabelle 1) weiter detailliert.

5.1.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der 15 Transformationsfelder förderte Hinweise auf 56 rechtliche Pfadabhängigkeiten zu Tage. Der Fokus der Analyse lag dabei auf Pfadabhängigkeiten, die einerseits das vorherrschende System stabilisieren und dabei andererseits die Transformation des Systems verhindern. Im Ergebnis könnten die im Feld „rechtliche Pfadabhängigkeiten“ gefundenen Strukturen auch dem Lobbyistenhandbuch „Kleiner Leitfaden zur Vermeidung von wirksamem Umweltrecht“ entnommen sein.

Abbildung 20: Überblick über Typen rechtlicher Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele



Die Basis der rechtlichen Pfadabhängigkeiten bilden falsche oder angesichts der ökologischen Herausforderung nicht mehr zeitgemäße Grundannahmen, auf deren Basis Recht entsteht. Gefunden wurde hierfür eine Reihe von Beispielen:

- Das Primat des Freihandels über das Umweltrecht, welches gerade im internationalen Warenverkehr der Durchsetzung ökologischer Ziele Grenzen setzt,
- die grundlegende Ausnahme der Landwirtschaft aus dem Umweltrecht, die der Sicherstellung der Lebensmittelproduktion dienen soll und dabei doch langfristig zur Zerstörung der Grundlagen ebendieser Lebensmittelproduktion führt,

- der Grundsatz der Technologieneutralität, der die Förderung konkreter Technologien erschwert oder weniger wirksam macht.

Im Zentrum des gegenwärtig an viel zu vielen Stellen wenig wirksamen Umweltrechts fanden wir Gesetze und Verordnungen mit Lücken, Hintertüren oder anderen Elementen, die ihre Wirksamkeit beschränken. Oft ist auch ein fehlendes Monitoring oder ein unzureichender Vollzug Hauptgrund der Unwirksamkeit. Beispielhaft sind aufzuführen:

- Maßnahmenoffene Vorschriften,
- fehlende Zielklarheit der Vorschriften,
- eingebaute Hintertüren wie beim EEWärmeG, welches im Ergebnis überwiegend zu effizienzsteigernden Maßnahmen führt,
- Vorschriften, die aufgrund ihrer Komplexität kaum umsetzbar und noch weniger vollziehbar sind, z.B. im Baurecht, aber außerhalb unserer Untersuchungen letztlich auch im Emissionshandel,
- fehlende Vorschriften zum Monitoring,
- fehlende Vorschriften oder Mittel zur Organisation eines wirksamen Vollzugs.

Ein weiteres wesentliches rechtliches Instrument zur Verhinderung von Wandel besteht im Steuer- und Abgaberecht, aufgrund dessen vielfach die „Preise nicht die ökologische Wahrheit“ sagen. Zu den hier wichtigen Varianten zählen:

- Niedrige Steuern auf fossile Energieträger, die regenerative Lösungen unwirtschaftlich machen,
- niedrige Rohstoffsteuern,
- ein Förderrahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), der in völlig unzureichender Weise ökologische Ziele verfolgt und stattdessen industriellen und umweltbelastenden Landbau fördert.

Abgerundet wird das Bild eines zur Transformation weitgehend ungeeigneten Rechtsrahmens durch eine Reihe von Vorschriften, mit denen zur Messung des Erfolgs ungeeignete Indikatoren vorgeschrieben werden, z.B. setzen die Mengenquoten im Recycling keine Anreize zur Kreislaufführung von nur in kleinen Mengen enthaltenen Technologiemetallen. Andere Vorschriften fehlen ganz, z.B. eine Verpflichtung der Kommunen, kommunale Wärmeversorgungspläne zu erstellen.

5.1.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der 15 Transformationsfelder förderte Hinweise auf 43 ökonomische Pfadabhängigkeiten zu Tage.

Abbildung 21: Überblick über Typen ökonomischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele



Im Zentrum der ökonomischen Pfadabhängigkeiten steht der Kostendruck. Gefunden wurde hierfür eine Reihe von Beispielen:

- Die (noch) bestehende faktische Unmöglichkeit, in der Anschaffung teurere regenerative Heizungstechnologien wie Wärmepumpen in einem Markt abzusetzen, der durch billige Gasthermen und billiges Gas dominiert wird,
- die gleichermaßen faktische Unmöglichkeit, die heute noch teureren Elektroautos in Ländern abzusetzen, in denen der Preisunterschied nicht über Förderungen oder steuerliche Vorteile ausgeglichen wird,
- die in der Landwirtschaft aufgrund des Kostendrucks etablierte Spirale aus preiswerter und umweltbelastender Produktion, die den Anspruch auf preiswerte Lebensmittel immer neu entstehen lässt,
- sowie ähnlicher Effekte aufgrund der internationalen Wettbewerbssituation.

Wesentlich sind auch die Werte, die Industrie und Konsumenten in existierende Artefakte sowie Strukturen gesteckt haben und deren Wert sie langfristig nutzen wollen. Hierzu gehören:

- Das Eigentum der öffentlichen Hand (Straßen, Infrastrukturen) wie auch der privaten Haushalte (Häuser, Autos und Geräte) und der Industrie (Produktionsanlage und Geschäftsmodelle),
- der Wert von etablierten Geschäftsmodellen der Unternehmen,
- der Wert von Anlageinvestitionen, z.B. die kommunalen Beteiligungen an fossil ausgerichteten Energieversorgern, der direkt in die politische Entscheidungsfindung zurückwirkt.

Unsicherheiten und Preisvolatilitäten schaffen weitere Pfadabhängigkeiten, besonders in den Rohstoffmärkten, aber auch z.B. hinsichtlich des (wann?) kommenden Kohleausstiegs. Weiter werden bestimmte Strukturen dadurch stabilisiert, dass sie mit illegalen Wettbewerbern

mithalten müssen, z.B. im Pestizidhandel und im Recycling von Elektronikkomponenten. Das Investor-Nutzer Dilemma schließt die Aufzählung ökonomischer Pfadabhängigkeiten ab.

5.1.3 Technische Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der 15 Transformationsfelder förderte Hinweise auf 48 technische Pfadabhängigkeiten zu Tage.

Abbildung 22: Überblick über Typen technischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele



Fundamental sind dabei die bisher wenigen technischen Unmöglichkeiten aufgrund von dauerhafter Nicht-Verfügbarkeit von Ressourcen. An zwei Stellen konnten wir entsprechende Pfadabhängigkeiten identifizieren:

- Die Unmöglichkeit, auf einer begrenzten landwirtschaftlichen Fläche Rohstoffe für die (fast unbegrenzten) Bedarfe der Lebensmittelwirtschaft, der Energiewirtschaft (Na-WaRo) und der chemischen Industrie (Feedstock-Change) zu produzieren,
- die Unmöglichkeit der Nutzung von alten und standortangepassten landwirtschaftlichen Pflanzensorten und Tierrassen, wenn diese ausgestorben sind.

Im Zentrum der technischen Pfadabhängigkeiten steht die normative Kraft der faktisch vorhandenen oder fehlenden Infrastrukturen und Produktionsanlagen. Beispiele sind hier:

- Die Siedlungs- Produktions- und Versorgungsstrukturen mit ihren langen Wegen,
- die Straßen-, Schienen- und Wasserwege mit ihren Kapazitätsgrenzen,
- die teils gut (Gasnetze), teils schlecht (Wärmenetze) ausgebauten Energieversorgungsstrukturen,
- die im internationalen Vergleich insgesamt und besonders in ländlichen Regionen schlechten digitalen Infrastrukturen,
- dominierende Industriestrukturen wie z.B. das Recyclingsystem mit seinen Großshreddern.

Besonders in der Landwirtschaft sind integrierte technische Systeme von Bedeutung. Pflanzensorten sind in Kombination mit bestimmten Anforderungen an die Düngung und den Pflanzenschutz gezüchtet oder gentechnisch optimiert und können wirtschaftlich nur als „Gesamtsystem“ genutzt werden.

Weiter wurden einige Fälle mangelnder technischer Kompetenz bzw. fehlender erprobter Produktionstechnologien identifiziert:

- In der Elektromobilität fehlt es an Wissen und Erfahrung mit diversen Technologien des elektrischen Antriebsstrangs. Auch fehlen in Deutschland wettbewerbsfähige Produktionstechnologien für Zellen und Batterien.
- In der Energiewirtschaft sind die Technologien zur Energiespeicherung nicht weit genug entwickelt und auch low-exergy Technologien wie der Wärmetransformator sind nicht serienreif. Technologien der Wärmeverteilung sind häufig nicht mit low-exergy Energiequellen kompatibel.
- In der Rohstoffwirtschaft fehlen komplexe Bioraffinerien deren Produkte kompatibel mit herkömmlichen Wertschöpfungsketten sind und Nachfolgetechnologien für die zu grob sortierenden Shredderanlagen.
- In der Landwirtschaft fehlt es an Methoden zur sicheren Bestimmung des Nährstoffgehalts von Wirtschaftsdünger und einem Konzept zur überregionalen Verteilung und gezielten Substitution von Kunstdünger.
- In der Recyclingwirtschaft existiert das sich gegenwärtig kontinuierlich verschärfende Problem der technischen Diversität. Immer mehr verschiedene Stoffe und Materialien werden in Produkten verarbeitet und erschweren die sorten- bzw. stoffreine Trennung nach Ablauf der Nutzungsdauer, was besonders im Kontext der knappen Technologiemetalle und seltenen Erden von Bedeutung ist.

Einige technisch-naturwissenschaftliche Fragen sind zu wenig geklärt und hemmen daher die Entwicklung. Dies gilt z.B. für die Vorteile biomassebasierter Produkte, aber auch für den Datenschutz in dezentralen Produktionssystemen.

5.1.4 Organisatorische Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der 15 Transformationsfelder förderte Hinweise auf 38 organisatorische Pfadabhängigkeiten zu Tage.

Abbildung 23: Überblick über Typen organisatorischer Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele



Die Basis der organisatorischen Pfadabhängigkeiten bilden falsche oder angesichts der ökologischen Herausforderung nicht mehr zeitgemäße Grundannahmen, auf deren Basis Organisationen geführt werden. Gefunden wurde hierfür eine Reihe von Beispielen:

- Niedrige Preise für Lebensmittel und Heizenergie gelten implizit als Teil der Grundversorgung der Bevölkerung und Teil des Sozialsystems. Nach dem jüngsten Vorschlag des Umweltbundesamtes, die Mehrwertsteuer für Fleisch auf 19% zu erhöhen, kommentierte der Landwirtschaftsminister dies und sagte, er wolle "den Bürgern nicht durch Strafsteuern vorschreiben, was auf den Tisch kommt".⁴ Letztlich wird nach der römischen Devise regiert und dafür gesorgt, dass das Volk „panem et circensis“ bekommt, heute also eher Currywurst und Fernsehen.
- Eine weitere offensichtlich falsche Grundannahme besteht in dem immer wieder unterstellten Zusammenhang von immer weiterem Straßenbau und Wirtschaftswachstum.
- In der Politik wird als selbstverständlich angenommen, dass die Landwirtschaft im Umweltrecht einer Sonderstellung bedarf, weil sie mit der Lebensmittelproduktion zur Grundversorgung der Bevölkerung maßgeblich beiträgt. Dass diese Ausnahme, wie die Beispiele der Nitratverseuchung des Grundwassers und die aufgrund des hohen Pestizideinsatzes zusammenbrechende Biodiversität zeigen, offensichtlich dazu führt, dass in absehbarer Zeit die Landwirtschaft eben diese Funktion nicht mehr wird erfüllen können, irritiert in der jeweils laufenden Legislaturperiode kaum jemanden.⁵

Wesentlich für organisatorische Stabilitäten sind auch eingeübten Prozesse und die Kulturen in Verwaltung und Unternehmen. So ist festzustellen:

- das Unternehmen oft (zu?) lange an erprobten Verfahren und Prozessen festhalten, was sich z.B. an der langen Aufrechterhaltung von auf fossile Energien ausgerichteten Geschäftsmodellen von Energieversorgern trotz erklärter Energiewende und in der

⁴ Vgl. unter <http://www.zeit.de/wirtschaft/2017-01/christian-schmidt-klimaschutz-fleischsteuer-milchsteuer> vom 12.1.2017.

⁵ Im Januar 2017 kündigte der BDEW stark steigende Wasserpreise an, da der Entwurf der Düngeverordnung gegenwärtig nicht ausreicht, um Boden und Grundwasser vor den Folgen einer weiter zunehmenden Überdüngung zu schützen. In vielen Wasserversorgungsgebieten würde daher eine aufwendige Denitrifizierung notwendig würde (Hannoversche Allgemeine Zeitung, 2017b, S. 9).

Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren trotz klarer Erkenntnis ihrer Klimateffekte zeigt,

- weiter sind in einigen Fällen Zurückhaltung in der F&E (z.B. im Kontext von Low-Exergy Technologien) und in Folge dessen fehlende Qualifikationen im Kontext neuer Technologien und Lösungen zu beobachten.
- Unsicherheiten und die grundsätzliche Strategie der Vermeidung von Risiken lassen Organisationen zögern, sich neuem zuzuwenden.

Die Aufrechterhaltung erprobter Geschäftsmodelle und Produktionsweisen zeigt sich oft als gemeinsames Interesse von Unternehmen einer Branche. Diese setzen ihre Verbände dann als Vertreter von Lobbyinteressen in Bewegung. Die Unternehmerseite, oft über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg, vertritt ihre Lobbyinteressen in der Landwirtschaft, der PKW-Produktion und auch in der Heizungstechnik aktiv und wirksam. Unterstützend werden in manchen Branchen, z.B. Energie und Fahrzeugbau, die Gewerkschaften mit dem Argument der Erhaltung von Arbeitsplätzen aktiv.

Ein „Spezialproblem“ in der Landwirtschaft besteht darin, dass die Landwirtschaft (zum Teil aus gutem Grund, aber) im Gegensatz zu den meisten anderen produzierenden Gewerben und Industriezweigen durch ein eigenes politisches Ressort verwaltet wird. Die Landwirtschaftsverwaltung übernimmt dabei auch Aufgaben, die in anderen Wirtschaftszweigen den Umweltbehörden obliegen. Aufgrund der historisch gewachsenen Verflechtung von Landwirtschaftsverwaltung und landwirtschaftlicher Praxis wiegen die Interessen der Landwirtschaft in diesem Zusammenhang oftmals schwerer als umweltrechtliche Ziele, während die Umweltverwaltung im Kontext der Landwirtschaft zu wenig Einfluss und Möglichkeiten zum Vollzug hat.

In allen vier Transformationsbereichen haben wir auch einzelne organisatorische Pfadabhängigkeiten identifiziert, die sich kaum gruppieren lassen. Dies gilt z.B. für folgende Sachverhalte:

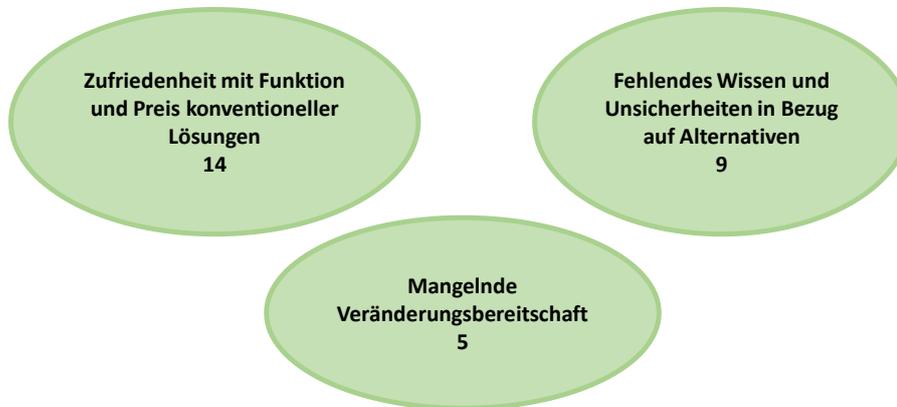
- So ist z.B. die solare Wärmeversorgung in den Statistiken verkaufter Wärmeversorger nicht sichtbar, weil hier nur „Erstgeräte“ erfasst werden. Elektroautos wurden in den Zulassungsstatistiken des Kraftfahrtbundesamtes teilweise in falsche Leistungsklassen eingestuft, da die Behörde die Einheiten kW für Leistung und kWh für Energie nicht zu unterscheiden in der Lage war (Kraftfahrtbundesamt, 2016, S. 43).
- Die kommunale Planungspraxis ist nicht darauf ausgerichtet, Wärmeversorgung als gebäudeübergreifende Planungsaufgabe wahrzunehmen.
- Es existiert keine Lösung, das Eigentum an Korridorflächen (grüne Infrastrukturen) einfach und zentral zu verwalten, wie dies z.B. in Großbritannien für viele Flächen unter Naturschutz im „National Trust“⁶ erfolgt.

5.1.5 Nutzungsbezogene Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der 15 Transformationsfelder förderte Hinweise auf 27 nutzungsbezogene Pfadabhängigkeiten zu Tage.

Abbildung 24: Überblick über Typen nutzungsbezogener Pfadabhängigkeiten und Anzahl der jeweils gefundenen Beispiele

⁶ Vgl. <https://www.nationaltrust.org.uk/our-cause> vom 12.1.2017.



Die nutzungsbezogenen Pfadabhängigkeiten lassen sich drei Kategorien zuordnen.

Im Zentrum steht die Zufriedenheit mit Funktion und Preis konventioneller Lösungen.

- Große Teile der Bevölkerung sind mit dem etablierten Regime und seinen Produkten und Services einfach zufrieden. Preiswertes Fleisch, große, schlecht sanierte aber aufgrund niedriger Energiepreise billig zu heizende Wohnungen, hochpreisige Rennreiselimousinen mit viel Komfort: viele von uns sehen bei diesen Angeboten Preis und Leistung in einem vernünftigen Verhältnis.
- Durch Gewöhnung verstärkt sich dieser Effekt der Zufriedenheit, wie z.B. auch durch das Erleben von „Freiheit“ bei der Mobilität im eigenen Auto.
- Vorhandene Alternativen können mangels besserer Funktion bei vergleichbarem Preis den Wunsch zum Wandel oftmals nicht wecken, wie z.B. die Betrachtung der regenerativen Heizanlagen, des Carsharings oder noch in 2016 der Elektromobilität zeigen.
- Folgeprobleme, die z.B. durch die Wahl recycelbarer Produkte oder durch die ordnungsgemäße Entsorgung des eigenen Altwagens vermieden werden könnten, spielen für die Konsumententscheidung der Masse kaum eine Rolle.

Stabilisiert wird das Aufrechterhalten gewohnter Konsumformen durch fehlendes Wissen und Unsicherheiten in Bezug auf Alternativen.

- Konsumentinnen und Konsumenten und teilweise auch Landwirte wissen so wenig über die umweltbelastenden Folgen des konventionellen Landbaus und die Vorteile des Ökolandbaus, dass sie ihre Konsumententscheidungen und Produktionsweisen nicht ändern.
- Unsicherheiten in Bezug auf Funktion, Reichweite und Ladesysteme führen über das Problem der zu hohen Anschaffungspreise hinaus zu einer nur sehr zögerlichen Markterschließung durch Elektromobile.
- Falsche Vorstellungen über Kosten der Sanierung und Unkenntnis über die Vorteile hinsichtlich des Wohnkomforts drücken die Zahl der Hausbesitzer, die eine umfassende energetische Sanierung angehen.

Abgerundet werden diese Pfadabhängigkeiten durch einen verbreiteten Mangel an Bereitschaft, Alternativen zu nutzen oder auszuprobieren.

5.1.6 Fazit

Die Analyse der fünf Typen verschiedener Pfadabhängigkeiten fördert einige interessante Aspekte zutage. Aufzuführen sind hier:

- Die Basis einiger rechtlicher wie auch organisatorischer Pfadabhängigkeiten bilden falsche oder angesichts der ökologischen Herausforderung nicht mehr zeitgemäße Grundannahmen, auf deren Basis Recht entsteht oder Organisationen geführt werden. Solche von Schein (1985, S. 14) als „unhinterfragte Grundannahme“ charakterisierte Entscheidungsgrundlagen können sehr effektiv und langanhaltend Änderungen hemmen.
- Im Zentrum des gegenwärtig an viel zu vielen Stellen wenig wirksamen Umweltrechts fanden wir Gesetze und Verordnungen mit Lücken, Hintertüren oder anderen Elementen, die ihre Wirksamkeit beschränken. Bei solch „lückenhaftem Umweltrecht“ scheint es sich nicht nur um Einzelfälle sondern vielmehr um ein generelles Prinzip zu handeln, dass einer vertieften Untersuchung bedarf.
- Kostendruck und hohe Pfadwechselkosten stehen einem Pfadwechsel genauso entgegen wie fehlende Technologien und Infrastrukturen, deren Entwicklung bzw. Bereitstellung ihrerseits mit Pfadwechselkosten verbunden ist. Der Minimierung von Pfadwechselkosten sollte u.U. höhere Aufmerksamkeit zukommen.
- Die Zufriedenheit vieler NutzerInnen mit den Eigenschaften und Kosten „klassischer“ Produkte (bzw. der angenommene und kommunizierte Zusatznutzen neuer Produkte) ist ein möglicherweise von der Umweltpolitik häufig unterschätztes Faktum. Es bietet sich hier ein vertieftes Studium der Frage des Zusammenhangs von Werthaltungen und Einkommen in verschiedenen gesellschaftlichen Milieus und eine möglicherweise zwischen den Milieus sehr unterschiedliche Vorbildfunktion von innovativen Leitkunden an. Hierzu gehört auch eine allgemeine Veränderungsbereitschaft („Macht der Gewohnheit“).

5.2 Typische Netzwerkbeziehungen von Pfadabhängigkeiten

Mit Blick auf die Analysen in Kapitel 4 lassen sich mehrere Systeme identifizieren, in denen zusammenwirkende Pfadabhängigkeiten Regime in jeweils unterschiedlichen Konstellationen stabilisieren. Der jeweils unterschiedliche Charakter der stabilisierenden Wirkung ist dabei aus zwei Gründen von Bedeutung:

- Je nach Dauerhaftigkeit der zugrunde liegenden Abhängigkeiten hat der Charakter der das Regime stabilisierenden Lock-in Systeme Auswirkungen auf die Zeitdauer jeder möglichen Transformation der jeweiligen Strukturen.
- Je nach involvierten Schlüsselakteuren können sehr unterschiedliche Transformationsstrategien angemessen sein.

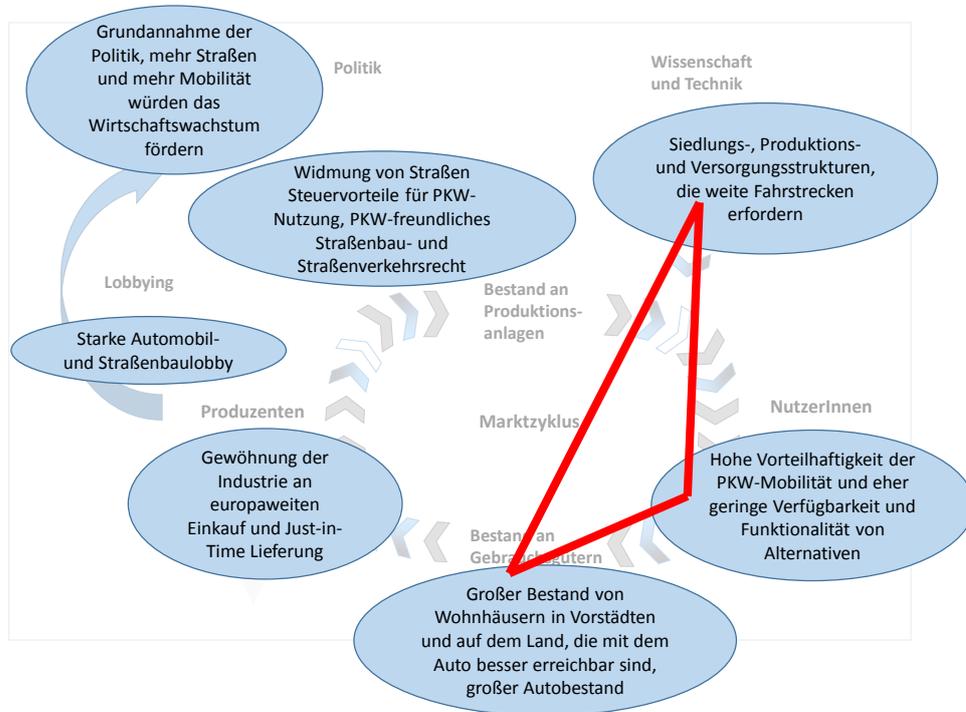
Folgende Systeme von zusammenwirkenden Pfadabhängigkeiten konnten identifiziert werden:

5.2.1 Gebaute Infrastrukturen und Nutzungsnotwendigkeiten

Als einziges Beispiel dieses wohl dauerhaftesten Lock-in wurde das Lock-in System in Straßenbau und Automobilität identifiziert.

Basis der äußerst dauerhaften Stabilität dieses Systems ist die gebaute Wohn-, Produktions- und Versorgungsinfrastruktur, die neben den Straßen letztlich auch alle über Straßen und mit Automobilen besser und schneller erreichbaren Gebäude und Destinationen umfasst.

Abbildung 25: Lock-in System in Straßenbau und Automobilität



Wohngebäude, Versorgungs- und Produktionsanlagen dürften mit zu den höchsten Werten gehören, über die unsere Gesellschaft verfügt. Ihre Nutzung ist für die gewohnte Lebensführung zentral. Die hohen hier festliegenden Werte sind untrennbar damit verbunden, dass diese Strukturen nur in äußerst langen Zeiträumen verändert werden können.

Wichtig ist der Blick auf das Faktum, dass das hohe Maß an individueller Automobilität zum Ausbau dezentraler Siedlungsstrukturen (z.B. Neubaugebiete in Vororten und Dörfern) beigetragen und so zu weiten Wegen in der täglichen Lebensführung vieler Menschen geführt hat, so dass das Auto heute von vielen als unverzichtbar empfunden wird. Ein seit Jahrzehnten zugunsten des Autos verschobener Modal-Split hat zu einem in ländlichen Regionen und Vororten deutlichen Ausdünnen des öffentlichen Nahverkehrs geführt. Alternative Mobilitätskonzepte wie stationäres und free-floating Carsharing, Online-Mitfahrzentralen und der Umweltverbund haben zwar das Potenzial jeweils fokussiert auf einzelne geografische Gebiete oder soziale Milieus Beiträge zu einem umweltverträglicheren Verkehr zu leisten, die Um- oder Durchsetzung einer autofreien oder auch nur autoarmen Gesellschaft liegt heute aber politisch in weiter Ferne.

Es folgt die politische Konsequenz, dass zur Realisierung eines klimaneutralen Individualverkehrs es nicht ausreicht, auf die zunehmende Verbreitung alternativer Mobilitätsangebote zu warten. Diese werden zwar in den kommenden Jahren den Modal-Split um einige Prozentpunkte verschieben, z.B. durch ein weiteres Anwachsen des Fahrradverkehrs, aber klimaneutrale Automobilität, z.B. mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb, wird dennoch eine zentrale Säule einer realistischen Umweltpolitik im Verkehr darstellen müssen.

Die wärmetechnische Sanierung von Gebäuden betrifft zwar ebenfalls die „gebauten Infrastrukturen“, erzwingt aber keine Änderung ihrer Nutzung. Die der Sanierung entgegenstehenden Pfadabhängigkeiten sind daher als deutlich weniger ausgeprägt einzustufen (vgl. Abschnitt 5.2.4).

5.2.2 Persistente Nutzungsgewohnheiten

Als ebenso einziges Beispiel eines im Wesentlichen auf Gewohnheiten basierenden Lock-in Systems wird das Beispiel des Fleischkonsums vorgestellt.

Im Gegensatz zur Nutzung des Automobils ist der Konsum von Fleisch keine Notwendigkeit. Er könnte grundsätzlich von jedem von uns von einem Tag auf den anderen eingestellt werden. Aufgrund der Gewöhnung an Fleisch, der Wertschätzung für Fleisch und einer Reihe gesellschaftlicher Konventionen im Kontext des gemeinsamen Essens geschieht dies nur durch eine bisher überschaubare Zahl von Vegetariern und Veganern sowie anteilig durch eine etwas größere Zahl von Menschen, die weniger Fleisch isst. Im Zentrum des Lock-in Systems steht hier der Marktzyklus, bei dem eine hohe Wertschätzung und eine angemessene Zahlungsbereitschaft auf Seiten der Kundschaft und eine leistungsfähige und profitable Branche auf der anderen Seite steht.

- die Produkte aus dem Dünger- und Pflanzenschutzkontext und ihre Hersteller auf für Ökolandbau geeignete Produkte umzustellen.

Im Vergleich zu den Zeitskalen, in denen die gebauten Infrastrukturen geändert werden können, dürfte sich dies bei vorhandenem Willen von Wirtschaft und Gesellschaft in ca. zwei Jahrzehnten bewältigen lassen. Als zeitkritisch dabei könnte sich die Tier- und Pflanzenzucht erweisen.

Ein ähnlicher Fall persistenter Nutzungsgewohnheiten scheint bei oberflächlicher Betrachtung im Kontext der preiswerten fossilen Heizung unsanierter Gebäude vorzuliegen. Da aber hier das eigentliche Bedürfnis an warmen und komfortablen Wohnräumen besteht und dieses auch mit einer regenerativen Heizanlage erfüllt werden könnte, ist dieser Fall deutlich anders zu beurteilen (vgl. Abschnitt 5.2.4).

5.2.3 Technisch-institutionelle Komplexe mit starken technischen Defiziten

Das am häufigsten gefundene Lock-in System sind sechs Fälle von technisch-institutionellen Komplexen mit starken technischen Defiziten. Wir finden sie in drei Wendethemen:

- Im PKW- Verkehr mit den PKW-Antrieben und der Altkarrosentsorgung,
- in der Wärmeversorgung mit Wärmenetzen,
- im Feld der Rohstoffe und Ressourcen beim Feedstock- Change, bei Technologiemetallen und Mikroschadstoffen.

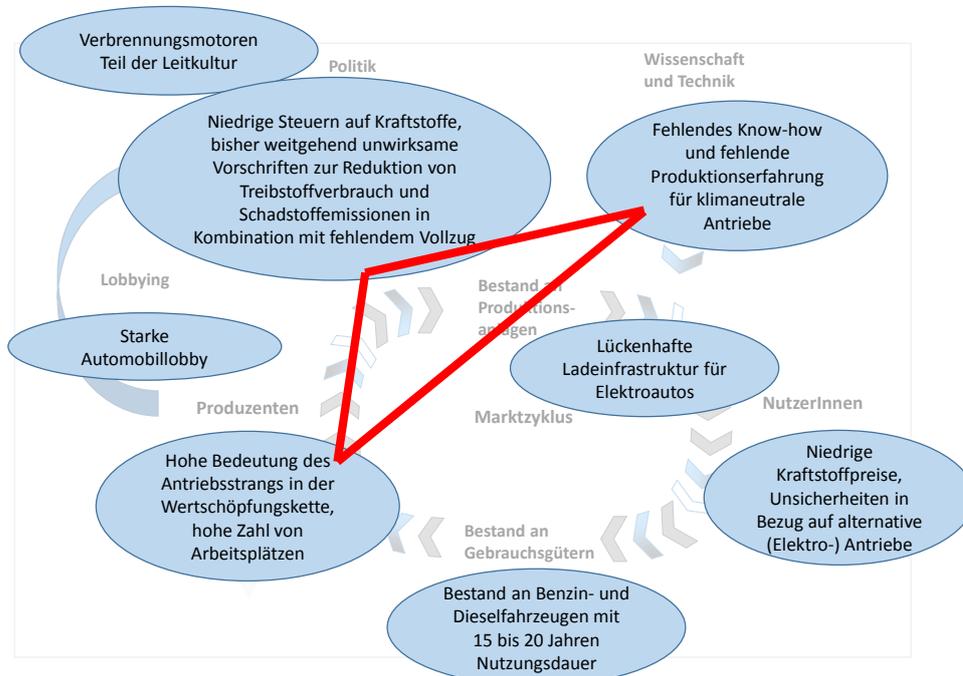
Die technisch-institutionellen Komplexe kennzeichnet zunächst, dass die Rolle der Nutzerinnen und Nutzer durchweg eher passiv oder randständig ist. Die Anbieterseite, also die Produkthersteller und die mit ihnen verknüpfte Wertschöpfungskette, kann also weitgehend machen „was sie will“, solange dabei ein funktionales, sicheres und preislich angemessenes Produkt herauskommt.

Bei denjenigen technisch-institutionellen Komplexen mit starken technischen Defiziten ist das Lock-in aber nicht nur in der Gewöhnung an ein profitables Geschäftsmodell begründet. Bei ihnen ist zusätzlich zu beachten, dass die Entwicklung technischer Alternativen entweder grundsätzlich starke Lücken hat oder aber ihre Realisierung so aufwendig ist, dass eine lange Zeit dafür veranschlagt werden muss. Die Gründe hierfür sind unterschiedlich:

- Bei PKW-Antrieben mangelt es in Deutschland an technischem Wissen und Produktionsanlagen für Elektroantriebe und ihre Komponenten,
- in der Wärmeversorgung mit Wärmenetzen mangelt es an Erfahrung mit technischen Komponenten wie Niedrigtemperatur-Wärmenetzbetrieb, Saisonalspeicher und Wärmetransformator, aber auch darüber hinaus ist der Netzaufbau aufwendig und langwierig,
- im Feld des Recyclings von Technologiemetallen, z.B. in der Altkarrosentsorgung, ist die Stoffvielfalt und die schlechte Demontierbarkeit ein Problem, welches insoweit schwer zu lösen ist, als dass sehr viele Produkte und Produktionsketten betroffen sind, ähnlich ist es auch bei der Stoffvielfalt bei Mikroschadstoffen, deren Vermeidung an der Quelle ebenfalls unzählige Produkte betreffen würde,
- beim Feedstock- Change in der chemischen Industrie liegt das technische Problem in der Nicht-Verfügbarkeit der notwendigen Mengen nachwachsender Rohstoffe einerseits und in der begrenzten Fähigkeit chemischer Prozesse, mit schwankenden Rohstoffqualitäten umzugehen.

Beispielhaft liegt ein solcher Fall im Lock-in auf den Verbrennungsmotor vor.

Abbildung 27: Lock-in System der PKW mit Verbrennungsmotor



Die Gründe für das Lock-in lassen sich wie folgt beschreiben:

- Produkte und/oder Produktionskonzepte haben sich sowohl funktional wie preislich als tauglich für den Massenmarkt erwiesen,
- sowohl durch kontinuierliche Verbesserung der zur Verfügung stehenden Technologien und Produktionsmittel wie auch über Economy-of-scale, ggf. auch durch Export, gewinnt das Regime Erfahrung, steigert die Umsätze und realisiert dauerhafte Profite,
- durch die Argumentation mit volkswirtschaftlichen Beiträgen wie Zahl der Arbeitsplätze oder Exportquote lässt sich ein Wohlwollen der Politik erreichen. Durch kontinuierliches Lobbying werden Rechtsetzungen im Sinne der Branche gestaltet und so der ökonomische Rahmen langfristig verbessert.
- Letztlich kommt hinzu, dass der langfristige Erfolg mit dem dominanten Design und die scheinbar stabilen Beziehungen zur Politik die Branche vergessen ließ, sich außer um den KVP-Prozess auch um Grundlageninnovationen zu kümmern.

Letztlich ist so nicht nur ein erfolgreiches Produktionsregime stabil, seine Infragestellung scheitert überdies am Nichtvorhandensein wesentlicher Komponenten bzw. Alternativen. Die Vorbereitung solcher Alternativen in Nischen ist nur begrenzt zu beobachten, ein unvorbereiteter Pfadwechsel ist aber kaum möglich bzw. aufgrund der für die F&E erforderlichen Fristen langwierig.

5.2.4 Technisch-institutionelle Komplexe mit verfügbarer Alternative

Technisch-institutionelle Komplexe mit verfügbarer Alternative sind zu finden:

- in der Wärmeversorgung mit dem Sanierungsbedarf von Gebäuden sowie beim EE-Anteil an der Gebäudewärmeversorgung,

- Sanierungstechnologien für die Wärmesanieung sind in einer erheblichen Angebotsbreite verfügbar,
- gleiches gilt für Heizungsanlagen auf Basis regenerativer Energie: Solarthermie, Biomasseheizungen und Wärmepumpen sind serienreif und können grundsätzlich am Markt beschafft werden, gleiches gilt mit Ausnahme einiger Technologiekomponenten für den Ausbau der Wärmenetze,
- und als Alternative der extrem umweltbelastenden industriellen Landwirtschaft bietet sich der ökologische Landbau als Gesamtkonzept oder mit seinen Einzelverfahren an.

Mit Blick auf diese Lock-in Situationen ist der Pfadwechsel grundsätzlich abhängig von seiner politischen Durchsetzbarkeit sowie von denjenigen Fristen die es braucht, die verfügbaren Alternativen aufzuskalieren.

6 Fazit

6.1 Zentrale Erkenntnisse zu Pfadabhängigkeiten

Die Analyse der fünf Typen verschiedener Pfadabhängigkeiten fördert einige interessante Aspekte zutage. Aufzuführen sind hier:

- Die Basis einiger rechtlichen wie auch organisatorischer Pfadabhängigkeiten bilden falsche oder angesichts der ökologischen Herausforderung nicht mehr zeitgemäße Grundannahmen, auf deren Basis Recht entsteht oder Organisationen geführt werden. Solche von Schein (1985, S. 14) als „unhinterfragte Grundannahme“ charakterisierte Entscheidungsgrundlagen können sehr effektiv und langanhaltend Änderungen hemmen.
- Im Zentrum des gegenwärtig an viel zu vielen Stellen wenig wirksamen Umweltrechts fanden wir Gesetze und Verordnungen mit Lücken, Hintertüren oder anderen Elementen, die ihre Wirksamkeit beschränken. Bei solch „lückenhaftem Umweltrecht“ scheint es sich nicht nur um Einzelfälle sondern vielmehr um ein generelles Prinzip zu handeln, dass einer vertieften Untersuchung bedarf.
- Kostendruck und hohe Pfadwechselkosten stehen einem Pfadwechsel genauso entgegen wie fehlende Technologien und Infrastrukturen, deren Entwicklung bzw. Bereitstellung ihrerseits mit Pfadwechselkosten verbunden ist. Der Minimierung von Pfadwechselkosten sollte u.U. höhere Aufmerksamkeit zukommen.
- Die Zufriedenheit vieler Nutzerinnen und Nutzern mit den Eigenschaften und Kosten „klassischer“ Produkte ist ein möglicherweise von der Umweltpolitik häufig unterschätztes Faktum.

6.2 Konsequenzen für die Wendethemen

Mit Blick auf Mobilität und PKW-Verkehr führt schon die Analyse der Pfadabhängigkeiten zu zwei Konsequenzen:

- Die weit verteilten Wohngebäude, Versorgungs- und Produktionsanlagen erfordern ein hohes Maß an individueller Mobilität und können nur in langen Zeiträumen verändert werden. Die Aussicht, die hier „zementierten“ Mobilitätsbedürfnisse komplett durch die alternativen Mobilitätskonzepte von Carsharing über Ridesharing bis zum Umweltverbund zu ersetzen, dürfte noch für lange Zeit unrealistisch sein. Die Notwendigkeit eines klimaneutralen Autos dürfte objektiv bestehen.
- Dagegen sind sowohl der Verbrennungsmotor wie auch das „Einwegauto“, welches nach einer Zweitnutzung irgendwo auf der Müllhalde verschwindet, keine zukunftsfähigen Konzepte. Eine Überwindung der technisch-ökonomisch-rechtlichen Lock-ins scheint hier durchaus möglich und ist in Richtung Elektromobilität ja auch schon begonnen.

Eine ähnliche Problemstruktur findet sich in Fleischkonsum und Landwirtschaft:

- Während der Fleischkonsum an sich kulturell tief verankert ist, dürfte dies nicht unbedingt für das aktuelle Ausmaß des Fleischkonsums gelten. Aber hier ist gerade die Menge eine wesentliche Ursache des Problems. Mit einer weiter wachsenden Zahl von Vegetariern und Veganern ist in den nächsten Jahrzehnten wohl zu rechnen, auch die Zahl der „wenig Fleisch Esser“ dürfte weiter zunehmen. Aufgehalten werden

können diese individuellen und bewusst von der „allgemeinen Esskultur“ abweichenden Verhaltensänderungen nicht, Einflussnahme auf die Personen dürfte nur bedingt wirksam sein. Parallel dazu wirkt aber die individuelle Suffizienzstrategie auch nur selektiv, denn sie führt nicht wie der Ökolandbau zu einer breit angelegten Reduktion der Umweltbelastungen in der Landwirtschaft.

- Bei den Produktionsmethoden der Landwirtschaft gilt dies nicht. Der ungebremsste Einsatz von Stickstoffdünger zerstört unser Grundwasser, der ungebremsste Einsatz von Pestiziden und der permanente Rückbau grüner Infrastrukturen die Biodiversität. Die durch Lobbystrukturen gut vernetzte landwirtschaftlich-politische Elite wird hier das letztlich labile Gleichgewicht des auch hier technisch-ökonomisch-rechtlichen Lock-ins nicht dauerhaft aufrechterhalten können. Der Widerspruch zur Aufrechterhaltung einer gesunden Umwelt muss weiter politisch betont und argumentativ genutzt werden. Als zentrale Maßnahmen dürften die Beendigung der umweltpolitischen Sonderstellung der Landwirtschaft und die organisatorische Trennung von Landwirtschafts- und Umweltverwaltung Bedeutung haben.

In der Wärmeversorgung stellen die Kostenvorteile auch auf der Nutzerseite eine durchaus wesentliche Pfadabhängigkeit dar:

- Das Wohnen in einem unsanierten Haus auf Basis des Heizens mit preiswerter fossiler Energie ist durchaus wirtschaftlich attraktiv. Dementsprechend problematisch ist es, teure Sanierungen oder regenerative Heizanlagen anzubieten und zu verkaufen. Ein Wettbewerber mit dem Angebot einer preiswerten Gasheizung kann da leicht die Nase vorn haben. Das Lock-in dürfte nur durch höhere Preise für fossile Energien, hohe Förderungen oder niedrigere Preise für Sanierungen oder regenerative Heizanlagen bzw. regenerative Wärmenetze aufzulösen sein. Wie schon bisher mit den Verpflichtungen, die oberste Geschossdecke und die Kellerdecke zu isolieren, könnte aber auch in Zukunft ein gewisses Maß ordnungsrechtlicher Vorschriften akzeptiert werden.
- Um Fortschritte bei der Gebäudesanierung auf breiter Front zu erzielen dürfte es hilfreich sein, die Pfadabhängigkeit des fehlenden Vollzugs zu überwinden und einen Vollzug der Vorschriften aufzubauen. Naheliegender wäre, durch gesetzliche Absicherung ihrer Rolle und durch entsprechende Qualifikation die Schornsteinfeger mit ihrer detaillierten Kenntnis des Gebäudebestandes einzubinden.
- Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist dabei zu bedenken, dass für Heizzwecke jährlich fossile Energieträger im Wert von ca. 22 Mrd. € importiert werden. Könnten diese Summen perspektivisch in thermotechnische Industrie, Bau- und Installationshandwerk umgeleitet werden, könnten 15.000 bis 20.000 zusätzliche Jobs entstehen. Ein Branchendialog zur Politikfindung könnte also zumindest aus dieser Branche erhebliche Unterstützung erhalten.

Bei der Rohstoffversorgung zeigt sich eine Sonderstellung. Im Gegensatz zu den drei anderen Wendethemen finden sich zwar übergreifende Zielorientierungen wie Kreislaufwirtschaft, NaWaRo-basierte Chemie und ubiquitäres Ökodesign, aber kaum konkret umsetzbare Ansätze und Strategien.

- Eine auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Chemie dürfte nur in Nischen realisierbar sein, da die Rohstoffbasis kaum ausreichend ist, um den kompletten Sektor zusätzlich zum Ernährungssektor und der Bioenergie zu versorgen. Eine Reihe solcher Nischen existieren bereits.
- Für das Recycling von Technologiemetallen müsste das Rückführungssystem ausgebaut werden, was machbar sein dürfte. Ohne manuelle Demontage von einzelnen Komponenten dürfte aber die Rückgewinnung eines hohen Anteils der Technologiemetalle schwierig werden. Zusätzlich ist es erforderlich, eine angestrebte Demontage

durch entsprechendes Ökodesign zu ermöglichen, z.B. durch Konzentration der Bauteile mit hohem Anteil an Technologiemetallen und ggf. auch durch standardisierte (farbliche) Kennzeichnung dieser Bauteile. Da hier weltweite Wertschöpfungsketten beteiligt sind und die Werte, die rückgewonnen werden können, eher klein sind, dürfte dies eine schwierige Aufgabe sein. Ähnliches gilt für die Vermeidung von Mikroschadstoffen an der Quelle.

6.3 Weitere Konsequenzen

Mit Blick auf die Globalisierung deutet unsere Analyse auf die Bedeutung einer vergleichsweise neuen Frage zur Dimension von Verantwortung hin. Auf Basis langjähriger Kritik von Akteuren aus der Umwelt-, Sozial- und Eine-Welt-Bewegung akzeptiert die Wirtschaft zusehends ein gewisses Maß an Verantwortung für die Zulieferkette (upstream). Auch eine Verantwortung downstream, also in Richtung auf die Kunden, wird allgemein akzeptiert. Über die Nutzungsphase hinaus aber auch die Wahrnehmung von Verantwortung für Alt-, Abfall- und Nebenprodukte wahrzunehmen, stellt jedoch eine neue Dimension von Verantwortung dar. Die Ströme an Alttextilien und Nahrungsmitteln („Keine Chiken schicken!“, (ACD/C & Evangelischer Entwicklungsdienst, 2010)) in Entwicklungsländer werden genau wie der Export von Elektronikschrott seit Jahren kritisiert. Der Umfang der Problematik im Bereich der Altautoverwertung ist riesig und verschärft das Problem.

Einen weiteren Aspekt mit globaler Auswirkung stellt die Analyse zu den Technologiemetallen dar. Für die international teils unter katastrophalen sozialen Verhältnissen und mit erheblichen Umweltbeeinträchtigungen gewonnenen Technologiemetalle gibt es bisher keine erprobten und aufskalierbaren Konzepte der Kreislaufführung. Der wachsende Bedarf kann also in absehbarer Zeit wohl nicht durch „urban mining“ gedeckt werden, sondern das Ausmaß der bisher üblichen Gewinnung unter schlechten Verhältnissen dürfte weiter zunehmen – wenn nicht entschieden dagegen gehandelt wird.

Mit Blick auf die Digitalisierung wird auch in dieser Studie deutlich, dass diese in einigen Wendethemen künftig eine erhebliche Rolle spielen wird. Die alternativen Mobilitätsangebote von Carsharing über Online-Mitfahrzentrale bis zum autonomen Fahren basieren weitgehend auf Digitalisierung. Für eine Transformation der Mobilität ist die Digitalisierung von hoher Bedeutung, aber auch sie kann die Pfadabhängigkeiten der „gebauten Umwelt“ nur begrenzt aufheben. Der Wandel zur „Industrie 4.0“ basiert unmittelbar auf weiterer Digitalisierung. In der Wärmeversorgung gibt es besondere Möglichkeiten der Effizienzsteigerung durch verbesserte digitale Steuerkonzepte von der gebäudeübergreifenden Steuerung der Wärmeversorgung bis zum Smart Home. Auch in der Landwirtschaft spielt die Digitalisierung bei der Effizienztechnologie des „precision farming“ mit.

Ein Grund, warum etablierte Unternehmen wichtige Akteure in der Transformation sind, besteht darin, dass ihr möglicher Einfluss auf die Diffusion neuer Lösungen hoch ist (Clausen & Fichter, 2017; Fichter & Clausen, 2013, 2016). Es könnte daher eine zentrale Aufgabe der Transformation sein, den Weg für den zukünftigen Erfolg der etablierten Unternehmen in Richtung Green Economy zu ebnen. Aber unsere Analyse hat auch gezeigt, dass wichtige organisatorische und kulturelle Pfadabhängigkeiten bei diesen etablierten Akteuren und auch in Politik und Verwaltung bestehen. Nicht jeder Manager in Unternehmen teilt z. B. die Vision von 100% erneuerbarer Energie, und einige von ihnen sind nicht einmal in der Lage, sich vorzustellen, dass die Pariser Klimaschutzvereinbarung jemals wirksam werden wird. Sie können sich eine Welt ohne Benzin- und Dieselfahrzeuge, ohne gas- und ölbetriebene Zentralheizung oder ohne die Gewohnheit, immer mehr neue Straßen zu bauen, nicht vorstellen. Und genau dies gilt auch für zentrale Akteure in Politik und Verwaltung. Auch wenn sie strengen Klimaschutzziele zustimmen, sind viele Akteure dennoch davon überzeugt, dass wir in Zukunft noch fossil betriebene Artefakte brauchen werden. Auch eine Welt, die

die ökologische Qualität von Produkten höher bewertet als einen möglichst niedrigen Preis kann sich diese Gruppe von Akteuren nicht vorstellen.

6.4 Konsequenzen für die Transformationsforschung

Zunächst ist festzustellen, dass die Analyse von Pfadabhängigkeiten auf historisch bedingte Hemmnisse fokussiert. Der Blick auf Pfadabhängigkeiten erklärt damit zwar an vielen Stellen die Strukturen von Lock-ins, hilft aber nur begrenzt bei ihrer Überwindung. Bei der Analyse von Transformationsfeldern sollten ergänzend auch diejenigen Hemmnisse in der Gegenwart, die sich nicht im historischen Kontext begründen, wie auch aus unterschiedlichen Vorstellungen von Zukunft erwachsende Hemmnisse mit betrachtet werden. Letztlich ist die ausschließliche Betrachtung von historisch bedingten Pfadabhängigkeiten unvollständig und sollte in den Kontext aus Gegenwart und Zukunft eingebettet werden. Hierfür kann z.B. der MoC-Ansatz herangezogen werden.

Mit Blick auf die gegenwärtige Praxis der Transformationsforschung ermöglichen die Analysen der Pfadabhängigkeiten eine Reihe von Anmerkungen.

So ist anzumerken, dass insbesondere im Kontext der Mobilität wie auch beim Feedstock-Change der chemischen Industrie auffällt, dass die existierenden Nischen nicht kontextualisiert und daher häufig überbewertet werden. Für die Entwicklung praktikabler Transformationsstrategien ist aber eine realistische Einschätzung der möglichen Verbreitung – und damit des Problemlösungsbeitrags - der verfügbaren Alternativen von hoher Bedeutung. Die Frage, welcher Anteil des Verkehrs durch Konzepte wie Carsharing, Mitfahrzentralen oder öffentlichen Nahverkehr bewältigt werden kann führt dann letztlich zu der Frage, was mit „dem Rest“ passieren soll. Es ist wenig hilfreich, wenn sich die Forschung so sehr auf die verfügbaren Transformationsansätze konzentriert, dass sie die Proportionen und deren Grenzen nicht mehr wahrnimmt.

Die starke Konzentration der Transformationsforschung auf das Nischenmanagement mag darüber hinaus den Blick auf Felder verstellen, in denen Nischen noch gar nicht existieren. Im Spektrum der hier untersuchten Felder ist dies z.B. das angestrebte aber bisher kaum irgendwo erprobte Recycling von Technologiemetallen. Aber auch die gezielte Vermeidung von Mikroschadstoffen „an der Quelle“ könnte versuchsweise mit einzelnen Branchen konzeptualisiert und erprobt werden.

Abschließend ist anzumerken, dass viele Aktivitäten der Transformationsforschung eben auf das Nischenmanagement fokussieren. Wir haben nur vergleichsweise wenige Arbeiten gefunden, die sich der Akzellerationsphase widmen („Mainstreaming“). Aber genau solche Arbeiten wären notwendig, um dort, wo bereits in Nischen erprobte Transformationsansätze zur Verfügung stehen, diesen zum Durchbruch zu verhelfen. Dies gilt wiederum beispielhaft im Rahmen unserer Analyse für die Wendethemen Wärmeversorgung und Landwirtschaft.

Literaturverzeichnis

ACDIC & Evangelischer Entwicklungsdienst. (2010). Keine chicken schicken. Wie Hühnerfleisch aus Europa Kleinbauern in Westafrika ruiniert und eine starke Bürgerbewegung in Kamerun sich erfolgreich wehrt. Bonn. Zugriff am 23.1.2017. Verfügbar unter: http://www.globaleducation.ch/globaleducation_de/resources/AN_Ln/100909_eed_keine-chicken-schicken_deu.pdf

- Aldrich, H. & Zimmer, C. (1986). *Entrepreneurship through Social Networks. The Art and Science of Entrepreneurship*. Cambridge, MA.
- Arthur, B.W. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal*, 99 (394), 116–131.
- Behrendt, S. (2017a). Feedstockchange in der Chemieindustrie. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Behrendt, S. (2017b). Recycling von Technologiemetallen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Behrendt, S. (2017c). Mikroschadstoffe in Gewässern. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Behrendt, S., Göll, E. & Korte, F. (2016). Effizienz, Konsistenz, Suffizienz. Strategieanalytische Betrachtung für eine Green Economy. Berlin. Zugriff am 19.10.2016. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/evolution2green_inputpapier_effizient_konsisten_suffizienz.pdf
- Biekart, J.W. (1995). Environmental Covenants Between Government and Industry A Dutch NGO's Experience. *Review of European Community and International Environmental Law*, 4 (2), 141–149. doi:10.1111/j.1467-9388.1995.tb00213.x
- Casson, M. (1982). *The Entrepreneur. An Economic Theory*. Oxford.
- Clausen, J. (2017a). PKW-Antriebe. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Clausen, J. (2017b). Straßen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Clausen, J. (2017c). Wärmenetze. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Clausen, J. (2017d). Versorgung von Gebäuden mit Wärme aus erneuerbaren Energien. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- Clausen, J. & Fichter, K. (2016). Evolutorische Ökonomik – Pfadabhängigkeiten. Evolution2Green Teilbericht zu AP 1.2. Berlin. Zugriff am 3.5.2016. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/evolution2green_inputpapier_pfadabhaengigkeiten.pdf
- Clausen, J. & Fichter, K. (2017). Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy. Zweiter Teilbericht. Erscheint 2017. Dessau-Roßlau.
- Clausen, J. & Mathes, M. (2017). Fleischkonsum- Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.
- David, P.A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 75 (2), 332–337.
- David, P.A. (2000). Path Dependence, its critics, and the quest for 'historical economics'. Oxford. Zugriff am 15.4.2016. Verfügbar unter: <http://www-siepr.stanford.edu/workp/swp00011.pdf>

D'Este, P., Iammarino, S., Savona, M. & von Tunzelmann, N. (2012). What hampers innovation? Revealed barriers versus deterring barriers. *Research Policy*, 41 (2), 482–488. doi:10.1016/j.respol.2011.09.008

Die Bundesregierung. (2012). Nationale Nachhaltigkeitsstrategie - Fortschrittsbericht 2012. Berlin: Die Bundesregierung.

Die Bundesregierung. (2016). Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. Berlin. Zugriff am 20.7.2016. Verfügbar unter: https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Nachhaltigkeit/0-Buehne/2016-05-31-download-nachhaltigkeitsstrategie-entwurf.pdf?__blob=publicationFile&v=4

DLR, Fraunhofer IWES & IfnE. (2011). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“. Stuttgart. Zugriff am 2.3.2016. Verfügbar unter: http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf

Exner, A., Held, M. & Kümmerer, K. (2016). Einführung - Kritische Metalle in der Großen Transformation. *Kritische Metalle in der Großen Transformation* (S. 1–16). Heidelberg.

Fichter, K. & Clausen, J. (2013). Erfolg und Scheitern „grüner“ Innovationen. Marburg: Metropolis.

Fichter, K. & Clausen, J. (2016). Diffusion Dynamics of Sustainable Innovation - Insights on Diffusion Patterns Based on the Analysis of 100 Sustainable Product and Service Innovations. *Journal of Innovation Management*, 4 (2), 30–67.

Gardini, L., Hommes, C., Tramontana, F. & de Vilder, R. (2009). Forward and backward dynamics in implicitly defined overlapping generations models. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 71 (2), 110–129.

Garud, R., Kuramaswami, A. & Karnoe, P. (2010). Path dependence or path creation. *Journal of Management Studies*, 47 (June), 760–774.

Gavetti, G. & Levinthal, D. (2000). Looking Forward and Looking Backward: Cognitive and Experiential Search. *Administrative Science Quarterly*, 45 (1), 113–137.

Grote, L., Hoffmann, P. & Tänzer, G. (2015). Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Saarbrücken: IZES. Zugriff am 4.3.2016. Verfügbar unter: http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/20150901_BMUB_Studie_Abwaerme_V.1.1.pdf

Hannoversche Allgemeine Zeitung. (2017a, Januar 18). Trittin gibt Land Mitschuld an VW-Krise. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*.

Hannoversche Allgemeine Zeitung. (2017b, Januar 20). Steigende Wasserpreise befürchtet. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*.

Harich, J. (2012). The Dueling Loops of the Political Powerplace. Clarkston GA. Zugriff am 5.8.2015. Verfügbar unter: <http://www.thwink.org/sustain/articles/005/DuelingLoops.pdf>

Hitchens, D., Trainor, M. & Clausen, J. (2003). Small and medium sized companies in Europe: environmental performance, competitiveness, and management: international EU case studies. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, ISIG.

Jänicke, M., Mönch, H., Binder, M., Carius, A. & Forschungsstelle für Umweltpolitik (Hrsg.). (1993). Umweltentlastung durch industriellen Strukturwandel? eine explorative Studie über 32 Industrieländer (1970 bis 1990) (2., durchges. Aufl.). Berlin: Ed. Sigma.

Jänicke, M., Schreurs, M. & Töpfer, K. (2015). The Potential of Multi-Level Global Climate Governance. Potsdam. Zugriff am 17.4.2016. Verfügbar unter: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/potential_of_multi_level_governance.pdf

Jarillo, C. (1988). On Strategic networks. *Strategic Management Journal*, 9, 31–41.

Kärcher-Vital, T. (2002). Clusterorientierte Förderstrategien in der Regionalpolitik und -entwicklung, Erfahrungen aus der Praxis von Zurich MedNet. Inputpapier für die Expertengruppe Neue Regionalpolitik des schweizerischen Staatssekretariats für Wirtschaft.

Karnøe, P. & Garud, R. (2012). Path Creation: Co-creation of Heterogeneous Resources in the Emergence of the Danish Wind Turbine Cluster. *European Planning Studies*, 20 (5), 733–752. doi:10.1080/09654313.2012.667923

Kemp, R. (1994). Technology and the transition to environmental sustainability. *Futures*, 26, 1023–1046.

Ketels, C. & Protsiv, S. (2013). Clusters and the New Growth Path for Europe. Working Paper no 14. July 2013. Zugriff am 17.3.2014. Verfügbar unter: www.foreurope.eu/fileadmin/documents/pdf/Workingpapers/WWWforEurope_WPS_no014_MS47.pdf

Kirchner, S. (2008). Pfadabhängigkeit als Mehrebenenphänomen: Grundlagen und Erweiterungen des Pfadansatzes. *Hamburg Review of Social Sciences*, 3 (3).

Korte, F., Göll, E. & Behrendt, S. (2017). Automobilität im Wandel. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Kraftfahrtbundesamt. (2016). Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2015 FZ 14. Flensburg. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz14_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Lehmann-Waffenschmidt, M. & Reichel, M. (2000). Kontingenz, Pfadabhängigkeit und Lock-In als handlungsbeeinflussende Faktoren der Unternehmenspolitik. In T. Beschorner & R. Pfriem (Hrsg.), *Evolutorische Ökonomik und Theorie der Unternehmung*. Marburg: Metropolis.

Liebowitz, S. (1995). Path Dependence, Lock-in, and History. *Journal of Law, Economics and Organization*, 11 (1), 205–225.

Nelson, R.R. (1987). Understanding technical change as an evolutionary process. Amsterdam ; New York : New York, N.Y., U.S.A: North-Holland.

Nelson, R.R. & Winter, S.G. (1982). An evolutionary theory of economic change. Cambridge, MA.: Belknap Press of Harvard University Press.

Nil, J. (2009). *Ökologische Innovationspolitik: eine evolutiv-ökonomische Perspektive*. Marburg: Metropolis-Verl.

Nil, J., Sartorius, C. & Zundel, S. (2005). Zeitfenster vorbereiten, öffnen und nutzen. Strategien für eine ökologische Innovationspolitik. Innovationen und Nachhaltigkeit. Jahrbuch Ökologische Ökonomik, Band 4. (S. 95–122). Marburg: Metropolis.

Odenbach, J., Göll, E. & Behrendt, S. (2017). Industrie 4.0 – digital-vernetzte dezentrale Produktion. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Pehnt, M. & Bödecker, J. (2010). Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Karlsruhe und Heidelberg: ifeu, Fraunhofer ISI & IREES. Zugriff am 4.3.2016. Verfügbar unter: http://www.ifeu.de/energie/pdf/Nutzung_industrieller_Abwaerme.pdf

Porter, M.E. (1998). Clusters and the New Economics of Competition. Harvard Business Review, 6 (79).

Rat für nachhaltige Entwicklung. (2013). Sustainability – Made in Germany, The Second Review by a Group of International Peers, commissioned by the German Federal Chancellery. Berlin. Zugriff am 18.11.2016. Verfügbar unter: https://www.nachhaltigkeitsrat.de/fileadmin/_migrated/media/20130925_Peer_Review_Sustainability_Germany_2013.pdf

Schein, E.H. (1985). Organizational Culture and Leadership. San Francisco.

Schumpeter, J.A. (1983). The theory of economic development: an inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle (Social science classics series). New Brunswick, N.J: Transaction Books.

Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017a). Umgang mit Altfahrzeugen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin. Zugriff am 17.1.2017. Verfügbar unter: www.evolution2.green.de

Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017b). Stickstoffeintrag der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017c). Pestizideinsatz in der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Tappeser, V. & Chichowitz, L. (2017d). Wärmeenergieverbrauch und Sanierungsbedarf von Gebäuden. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Tappeser, V., Kohlmorgen, N. & Marden, K. (2017). Verlust grüner Infrastruktur in der Landwirtschaft. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin.

Umweltbundesamt (Hrsg.). (2016). Umweltschädliche Subventionen in Deutschland - uba_fachbroschuere_umweltschaedliche-subventionen_bf.pdf. Dessau-Roßlau. Zugriff am 13.1.2017. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_fachbroschuere_umweltschaedliche-subventionen_bf.pdf

Unruh, G.C. (2000). Understanding carbon lock-in. Energy Policy, 28, 817–830.

Unruh, G.C. (2002). Escaping carbon lock-in. *Energy Policy*, 30, 317–325.

Vergne, J.-P. & Durand, R. (2010). The Missing Link Between the Theory and Empirics of Path Dependence: Conceptual Clarification, Testability Issue, and Methodological Implications: Path Dependence. *Journal of Management Studies*, 47 (4), 736–759.
doi:10.1111/j.1467-6486.2009.00913.x

Anhang 1: Verzeichnis Pfadabhängigkeiten

6.5 PKW-Mobilität

Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die Pfadabhängigkeiten, die in den vier Transformationsfeldstudien gefunden wurden. Im Falle der Studie „Automobilität im Wandel“ wurden diese Pfadabhängigkeiten in einigen Punkten durch Analogieüberlegungen ergänzt. Starke Pfadabhängigkeiten, die von besonderer Bedeutung erscheinen, sind durch Fettdruck herausgehoben.

Tabelle 7: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der PKW-Mobilität

Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten
Automobilität (Warum wählen die Menschen den PKW als Verkehrsmittel?)				
Steuerliche Bevorzugung von PKW-Mobilität	Hohe Zahlungsbereitschaft für die Nutzung von PKW	Siedlungsstruktur (Wohnen, Arbeiten, Einkaufen)	Selbstreproduktion des PKW-Regimes durch Lobbies, Gewerkschaften, Verbände und politische Institutionen (Auto-poiesis)	Geringe Funktionalität der Alternativen Carsharing und öffentlicher Verkehr im Vergleich zum eigenen Auto
Autofreundliches Straßenverkehrsrecht	Geringe Wirtschaftlichkeit der Alternativen Elektromobilität und Carsharing (bei hoher Nutzungsintensität)			Freiheits- und Unabhängigkeitsgefühl beim Autofahren
	Privates Eigentum an PKW und Infrastrukturen (Garagen)			Das Auto als privater Raum
Straßen (Warum gibt es so viele autogerechte Straßen? Warum werden zusätzlich welche gebaut?)				
Dauerhafte Widmung von Straßen für den Gemeingebrauch	Vergangene Investitionen in das Straßennetz und damit verbundene Industrien	Notwendigkeit von Straßen für den Personen- und Gütertransport	(vermutlich falsche) Grundannahme der Politik, das Straßenbau Wirtschaftswachstum fördert	Hohe Zahl von Personen, die den PKW als Verkehrsmittel wählen
Autofreundliches Straßenbaurecht	Auswirkung guter Infrastrukturen auf den Wert von Immobilien	Schlechte Versorgungsinfrastrukturen im ländlichen Raum	Orientierung von Industrie und Handel auf Just-in-time und kurze Lieferzeiten	Hohe Zahl von Gewerbetreibenden, die auf LKW-Logistik setzen
	Kleine regionale Wachstumseffekte durch Straßenbau	Zu wenig Schienen- und Wasserwege für den Gütertransport	Lokalpolitische Bedeutung von Straßen für neue Wohn- und Ge-	

			werbegebiete	
PKW-Antriebe (Warum werden so viele Benzin- und Dieselmotoren eingebaut?)				
Niedrige Steuern auf Kraftstoffe	25% Wertanteil des Antriebsstrangs am Autowert	Geringes Know-how der Deutschen Automobilhersteller bei Elektroantrieben	Auf Verbrennungskraftmaschinen spezialisierte F&E und Produktion	Unsicherheiten im Umgang mit Elektroautos
Unwirksame Vorschriften zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs	Hohe Anzahl Arbeitsplätze in der Automobilbranche	Keine Li-ion-Batterieherstellung in Deutschland	Starke Automobillobby mit guten Verbindungen in die Regierung	Unklarheit in Bezug auf das Vorhandensein und den Umgang mit Ladestationen
Unwirksame Vorschriften zur Reduktion der NOx- und Feinstaubemissionen	Anteil der Automobilbranche am Gesamtexport von 20%	Geringer Ausbaugrad öffentlicher Ladestationen für Elektromobilität in Deutschland		
Fehlender Vollzug der unwirksamen Vorschriften	Niedrige Kraftstoffpreise			
Fahrzeugsorgung (Warum werden alte PKW nicht dem Recycling zugeführt?)				
Primat des Freihandels	Restwerte von Altfahrzeugen in anderen Ländern in rentabler Höhe für Exporteure	Hohe Zahl an Materialien und Verbundwerkstoffen erfordert komplexe Demontage	Fehlende Kapazität für den Vollzug bei Zoll und Umweltbehörden	Nutzer hat kein Interesse an Fahrzeugverwertung nach Abmeldung
Widerspruch zwischen Eigentums- und Umweltrecht	Gebrauchtwarenökonomie mit vielen Arbeitsplätzen in Export-Zielländern	Demontierbarkeit gegenüber Effizienzzielen eher unwichtig		
Ausschließlich nationale Regulierungskompetenz	Demontageanforderung im Widerspruch zu hohen Lohnkosten in Deutschland			
Unklare Unterscheidung zwischen Gebrauchtwagen und Altfahrzeugen				
Weitgehend fehlender Vollzug des Abfallrechts				
Massebasierte Verwertungsquoten				

6.6 Landwirtschaft und Ernährung

Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die Pfadabhängigkeiten, die in den vier Transformationsfeldstudien gefunden wurden. Starke Pfadabhängigkeiten, die von besonderer Bedeutung erscheinen, sind durch Fettdruck herausgehoben.

Tabelle 8: Übersicht Pfadabhängigkeiten in Landwirtschaft und Ernährung

Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten
Fleischkonsum (Warum essen die Menschen so viel und so gern Fleisch?)				
Ein umwelt- und artgerechter Fleischkonsum wird nur durch weiche Instrumente gefördert	Fleischindustrie und Handel sind auf wenige sehr mächtige Unternehmen konzentriert	Dominierende Tierrassen sind auf High-Input Hochleistung optimiert	Grundannahme, dass viel billiges Fleisch Teil der sozialen Grundversorgung ist	Konsumenten sind an hohen Fleischkonsum gewöhnt
Durch Agrarsubventionen wird die Fleischindustrie stark gefördert	Eine hohe Zahl von Arbeitsplätzen ist von der Fleischproduktion abhängig	Tierrassen für Low-Input Tierhaltung stehen kaum noch zur Verfügung	Lobby aus Landwirtschaft und Fleischindustrie ist sehr aktiv	Konsumenten haben eine hohe Wertschätzung für Fleisch
Kontrollen von Umweltschutz und Artgerechtigkeit in der Tierhaltung sind lückenhaft			Die Vermittlung von Wissen über Tierproduktion an die Bevölkerung ist lückenhaft	Konsumenten zeigen eine hohe Zahlungsbereitschaft für viel Fleisch
Stickstoffeintrag (Warum wird so viel gedüngt?)				
Ziel, den Stickstoffeintrag auf 80kg/ha*a zu senken, wird nicht konsequent umgesetzt	Hoher Kostendruck von den Abnehmern und seitens der internationalen Konkurrenz	Dominierende Hochleistungsorten sind auf High-Input angewiesen	Grundannahme, dass die Landwirtschaft aufgrund ihrer Lebensmittelproduktion einer Sonderstellung im Umweltrecht bedarf	Landwirtschaftliches Fachwissen für Low-Input Produktion ist zu wenig verbreitet
Umweltrechtliche Sonderstellung der Landwirtschaft: Bodenschutzgesetz geht nicht über „gute fachliche Praxis“ hinaus und gilt als symbolische		Ertrag der Hochleistungs-Hybridsorten ist von hoher Stickstoffverfügbarkeit abhängig	Trennung der Umweltschutzverwaltung von der Landwirtschaftsverwaltung auf allen Ebenen	

Gesetzgebung				
Düngeverordnung wenig wirksam		Technologien und Praktiken für die überregionale Verteilung von Wirtschaftsdünger fehlen	Landwirtschaftslobby sehr aktiv	
Fehlende Strafbewehrung und lückenhafter Vollzug		Nährstoffgehalt von Wirtschaftsdünger ist oft unklar		
Starke Förderung der Bioenergie		Intensivtierhaltung mit hohem Stickstoffüberschuss		
Förderung des etablierten Systems durch GAP				
Pestizideinsatz (Warum werden so viele Pestizide eingesetzt?)				
Umweltrechtliche Sonderstellung der Landwirtschaft	Pflanzenschutz führt zu erheblichen Kosteneinsparungen	Hochleistungsfähige Hybridsorten bedingen Pestizideinsatz	Grundannahme, dass die Landwirtschaft aufgrund ihrer Lebensmittelproduktion einer Sonderstellung im Umweltrecht bedarf	Landwirtschaftliches Fachwissen für Produktion ohne oder mit wenig Pestiziden ist zu wenig verbreitet
Landwirtschaftliche Aktivitäten, die eine „gute fachliche Praxis“ befolgen, stellen keinen Eingriff in die Natur dar.	Konkurrenz zwischen Weltregionen	Komplettpakete aus Saatgut und Pestizid (System Roundup-Ready)	Trennung der Umweltschutzverwaltung von der Landwirtschaftsverwaltung auf allen Ebenen	Steigende Erträge werden als Hinweis auf ein Wohlergehen der Natur gesehen
Unterkomplexe Modelle zur Risikobewertung	F&E Ausgaben müssen amortisiert werden	Regional angepasste Landsorten nicht mehr verfügbar	Landwirtschaftslobby sehr aktiv	
Kein flächendeckendes Monitoring	Illegaler Pestizidhandel floriert	Einsatz von Pestiziden auch zur Erntevorbereitung durch Austrocknung	Fachkräftemangel in Agrarverwaltung und Vollzug	
Förderung des etablierten Systems durch GAP		Hoher Pestizidbedarf durch Monokulturen		
Grüne Infrastrukturen (Warum gibt es so wenig Hecken, Feldgehölze u.a.m.?)				
Umweltrechtliche Sonderstellung der Land-	Hoher Kostendruck von den Abnehmern und seitens der in-	Großmaschinen erfordern Großflächen	Grundannahme, dass die Landwirtschaft aufgrund ihrer Lebensmittelproduktion	Landwirte empfinden Hecken als Hindernisse

wirtschaft	ternationalen Konkurrenz erfordert Großflächen		einer Sonderstellung im Umweltrecht bedarf	
Landwirtschaftliche Aktivitäten, die eine „gute fachliche Praxis“ befolgen, stellen keinen Eingriff in die Natur dar.	Kostendruck durch hohe Pachten		Trennung der Umweltschutzverwaltung von der Landwirtschaftsverwaltung auf allen Ebenen	
Natura 2000 wird nur lückenhaft umgesetzt	Mangelnde Internalisierung der externen Kosten der fehlenden grünen Infrastruktur		Landwirtschaftslobby sehr aktiv	
Förderung des etablierten Systems durch GAP			Keine etablierte Lösung für Eigentum an Korridorflächen	
Zu wenig Kontrolle der Umsetzung von Auflagen				

6.7 Wärmeversorgung

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Pfadabhängigkeiten, die in den drei Transformationsfeldstudien des Bereichs Wärmeversorgung gefunden wurden. Starke Pfadabhängigkeiten, die von besonderer Bedeutung erscheinen, sind durch Fettdruck herausgehoben.

Tabelle 9: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der Wärmeversorgung

Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten
Wärmeenergieverbrauch (Warum verbrauchen Gebäude so viel Wärmeenergie?)				
Hohe Komplexität der Anforderungen zum Wärmeschutz macht die Umsetzung für Planer und Handwerker wie Eigentümer schwierig	Vergangene Investitionen in schlecht gedämmte Häuser, sowie Sanierungsarbeiten ohne ambitionierte Dämmung machen Nachrüstung	In Folge preiswerter Energie entstand ein großer Gebäudebestand mit hohem Wärmebedarf, der sich unsaniert fast nur durch Brennstoffe	Es fehlt an Fachexpertise zur Planung und Umsetzung guter und kostengünstiger Sanierungsmaßnahmen	Durch niedrige Energiekosten können Eigentümer unsanierte Gebäude ohne wesentliche Einschränkungen komfortabel nutzen

	teuer.	heizen lässt		
Mangel an Vorschriften zu Monitoring und Vollzug	Investor-Nutzer-Dilemma erschwert das Erzielen von Rentabilität		Eigentümerstrukturen wie z.B. Eigentümergemeinschaften erschweren das Erzielen von Konsens über Maßnahmen	Falsche Vorstellungen über Sanierungsmaßnahmen erschweren die Planung auf Seiten der Eigentümer
Komplexe Anforderungen stellen ein Problem für den Vollzug dar				Wenig Bewusstsein darüber, dass Sanierung die Wohnqualität verbessert
Vielfache Ausnahmen (z.B. Oma-regel) ermöglichen das Umgehen der Vorschriften				
Niedrige Energiepreise machen viele Maßnahmen unrentabel				
Versorgung mit EE-Wärme (Warum werden so wenige EE-Wärmeanlagen eingebaut?)				
Unklare Ziele und divergierende Szenarien erschweren die Festsetzung wirksamer rechtlicher Vorschriften	Hohe „Pfadwechselkosten“ zur Umrüstung der Gebäude auf EE	Gut ausgebauten Gasnetz für über 50% der Gebäude und kurzes Fernwärmenetz für 13% der Gebäude	Grundannahme, dass preiswerte Heizenergie Teil der sozialen Grundversorgung ist	Durch niedrige Energiekosten können Eigentümer fossil beheizte Gebäude ohne wesentliche Einschränkungen komfortabel nutzen
EEWärmeG hat Hintertüren zu Effizienzmaßnahmen	Investor-Nutzer-Dilemma erschwert das Erzielen von Rentabilität	Heizwärmebedarf von 200 bis 300 kWh/m²*a ist regenerativ kaum zu decken	Lobbyverbände wie der BDH sind nicht vom Erfolg der Wärmewende überzeugt und stützen implizit fossile Energieträger	Wenig Sensibilität und Handlungs- bzw. Investitionsbereitschaft für das Thema auf Seiten der Nutzer
Niedrige Energiepreise machen viele Maßnahmen unrentabel	Beteiligung von Kommunen an Stadtwerken hemmt lokalen politischen Druck	Wärmeverteilung durch Konvektoren nicht mit Low-Exergy Quellen kompatibel	Solare Wärmeversorgung ist in einzelnen Statistiken (wie z.B. beim BDH) nicht sichtbar	
Das Bild der „Technologie- und Energieutralität schafft Hintertüren	Geschäftsmodell der Thermo-technik Unternehmen verändert sich nur langsam		Geringe Erfahrung mit EE-Wärme auf Seiten der Installationsbetriebe	
			Ungenügend qualifizierte Energieberater	

Wärmenetze (Warum werden so wenige Gebäude über Wärmenetze versorgt?)				
Unklare Ziele und divergierende Szenarien erschweren die Festsetzung wirksamer rechtlicher Vorschriften	Hohe „Pfadwechselkosten“ zum Ausbau der Wärmenetze	Gut ausgebauten Gasnetz für über 50% der Gebäude und kurzes Fernwärmenetz für 13% der Gebäude	Wenig F&E und Demonstrationsanlagen zu Low-Exergy Wärmenetzen	Durch niedrige Energiekosten können Eigentümer fossil beheizte Gebäude ohne wesentliche Einschränkungen komfortabel nutzen
Mangelnde Vorschriften und Praxis zu kommunalen Wärmeplänen	Wärmenetze zentral für Wirtschaftlichkeit fossiler KWK-Kraftwerke	Mangel an marktreifen Technologien wie Wärmespeicher und Wärmetransformator	Erhebliche Änderungsbedarfe beim Geschäftsmodell der großen Wärmenetzbetreiber um zentrale Kraftwerke	
Das Bild der „Technologie- und Energieneutralität verhindert Fernwärmevorranggebiete	Nicht terminierter Kohleausstieg macht Investitionen unsicher	Probleme bei der Legionellen-Prophylaxe bei niedrigen Vorlauftemperaturen	Mangel an Akteuren, die Quartiersnetze betreiben wollen	
Niedrige Energiepreise machen viele Maßnahmen unrentabel	Beteiligung von Kommunen an Stadtwerken hemmt lokale Energieplanung	Wärmeverteilung durch Konvektoren nicht mit Low-Exergy Quellen kompatibel	Planungspraxis plant Wärmeversorgung gebäudeindividuell	
Förderpraxis weist Lücken auf	Geschäftsmodell der Thermo-technik Unternehmen wäre bedroht	Ressourcenknappheit bei regenerativen High-Exergy Quellen	Gewerkschaften setzen sich für fossile Kraftwerke ein	

6.8 Rohstoffversorgung

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Pfadabhängigkeiten, die in den vier Transformationsfeldstudien gefunden wurden. Starke Pfadabhängigkeiten, die von besonderer Bedeutung erscheinen, sind durch Fettdruck herausgehoben.

Tabelle 10: Übersicht Pfadabhängigkeiten in der Rohstoffversorgung

Rechtliche Pfadabhängigkeiten	Ökonomische Pfadabhängigkeiten	Technische Pfadabhängigkeiten	Organisatorische Pfadabhängigkeiten	Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten
Technologiemetalle (Warum ist das Recycling von Technologiemetallen so wenig erfolgreich?)				
Mengenquoten im Recycling setzen falsche Anreize.	Der (teils illegale) Export von Produkten mit	Technologiemetalle erhöhen die Stoffvielfalt von Produk-	Getrennte Erfassung und Sammlung	Recyclierbarkeit oder „Freiheit von Technologiemetallen“ sind

	Elektronikkomponenten entzieht diese den nationalen Recyclingsystemen	ten und stellen höchste Anforderungen an demontage- und Recyclingsysteme	von Produkten mit Technologiemetallen funktioniert nicht.	keine Produkteigenschaften, die die Kaufentscheidung beeinflussen
Unklare Unterscheidung zwischen Gebrauchtwaren und Schrott	Niedrige und volatile Rohstoffkosten schaffen keine Anreize für (hohe) Investitionen in Recyclinganlagen	Anwendung von „Gewürzmetallen“ in kleinsten Mengen führt Recycling an seine Grenzen		
Ausschließlich nationale Regulierungskompetenz		Die Verbreitete Shredder-Technologie dominiert den Recyclingsektor und kann Technologiemetalle kaum separieren		
		Metallkombinationen in Produkten passen manchmal nicht zu etablierten Scheideverfahren		
Feedstock- Change (Warum wechselt die chemische Industrie nicht zu nachwachsenden Rohstoffen als Feedstock?)				
EEG mit Förderung der Bioenergie verteuert Rohstoffe	Niedrige Erdölpreise	Hohe Mengenschwellen für große Anlagen mit hoher Effizienz	Vermeidung von Risiken in der Produkt- und Rohstoffstrategie	Kunden nehmen biomassebasierte Produkte nicht unbedingt als Vorteilhaft wahr
	Hohe Preisvolatilität bei nachwachsenden Rohstoffen	Verknüpfung von Einzeltechnologien zu komplexen Bio-raffinerien steht aus		
	Hohe Unsicherheiten bezüglich langfristiger Preisentwicklung bei nachwachsenden Rohstoffen	Produkte von Bio-raffinerien sind oft inkompatibel mit herkömmlichen chemischen Wertschöpfungsketten		
	Fehlende Finanzierungsbereitschaft aufgrund unklarer Anlagenrentabilität	Mangel an „rohstofftoleranten“ Prozessen		
		Mengenkonkurrenz mit anderen Nutzungsansprüchen (Nahrung, Energie)		

		Oft unklare ökologische Vorteile biomassebasierter Produkte		
Mikroschadstoffe (Warum werden Mikroschadstoffe immer mehr zum Problem?)				
Rechtliche Vorschriften fordern zwar Gewässerqualität, sind aber Maßnahmenoffen	Kosten für Stoffsubstitutionen können (abhängig z.B. von F&E-Kosten) sehr hoch sein	Sehr heterogene Anwendungskontexte für eine Vielzahl von Stoffen	Forschung zur Reinigung von Abwässern ist weiter als die Anwendung. Hier klafft eine Lücke.	Kundenbereitschaft, Änderungen von Produkten durch Stoffsubstitutionen anzunehmen, ist begrenzt.
Regelungskompetenz zu Verwendungsbegrenzungen und –verboten bei der EU	Nachbehandlungskosten in Abwassersystemen müssen ggf. durchgesetzt werden	Bestehende Abwasserreinigungsanlagen haben keine 4. oder 5. Reinigungsstufe		Bereitschaft zur Akzeptanz von Trennkanalisationssystemen ist begrenzt.
Wasserrahmenrichtlinie begrenzt die Einleitung von nur 45 prioritären Stoffen		Vorkonfektionierte Packungsgrößen in der Pharmazie führen kontinuierlich zu Abfall an Mikroschadstoffen.		
Dezentrale Produktion (Warum wird zentral produziert?)				
Die Wahrnehmung von Schutzrechten ist in dezentralen vernetzten Produktionsstrukturen auf open-source Basis nicht möglich	Entwicklung vernetzter Produktionsstrukturen ist kostenintensiv und abhängig von Investitionen Anderer	Hochentwickelte zentrale Produktion mit kontinuierlichen Innovationen vorhanden	Hohe Unsicherheit wann Investitionen in dezentrale Produktion sich lohnen	Wandel des Konsumenten zum Prosumenten, der in der dezentralen Produktion aktiv ist, ist sehr fraglich bzw. nur für wenige soziale Milieus, Produkttypen und Anlässe relevant
Die Kooperation kleiner vernetzter ökonomischer Einheiten ist für den letztendlichen Inverkehrbringer mit hohen Haftungsrisiken aufgrund der gesetzlichen Gewährleistung verbunden		Proprietäre Standards bzw. der Mangel an offenen Standards hemmen ökonomisch nicht-integrierte Produktionsketten	Befürchtungen bezüglich Kompetenz- und Arbeitsplatzverlust bei etablierten Anbietern	Makerbewegung nur ein Nischenphänomen
		Schlecht ausgebaute digitale Infrastruktur in Deutschland	Schutz von firmeninternem Know-how steht Kooperation auf open source Basis entgegen	Nutzer verzichten nur bei hohen Preisvorteilen auf Produkthaftungsansprüche (z.B. Flohmärkte)

		Investitionen in Kupfernetze hemmen Ausbau der Glasfasernetze		
		Viele Fragen der industrial Security (insb. Datenschutz) ungeklärt		

Anhang 2: Mögliche Transformationsfelder zur Analyse in AP 2

Tabelle 11: Mögliche Transformationsfelder zur Analyse in AP 2

Transformationsfeld	Erläuterung	Impact-Ebene	Transformationsansätze
Landwirtschaft und Ernährung			
Zu hoher Fleischkonsum	Der deutsche Fleischkonsum von 90 kg pro Jahr führt zu hohem Verbrauch von Futtermitteln, nicht artgerechter Massentierhaltung und indirekt zu einer zu hohen Flächeninanspruchnahme.	Klimaschutz Fläche Artenvielfalt Energieproduktivität Stickstoffkreislauf	Fleischarme Ernährung, Vegetarismus, Veganismus
Zu hoher Düngereinsatz	Der Stickstoffeintrag durch Düngemittel und über den Luftpfad sinkt deutlich zu langsam.	Stickstoffkreislauf Phosphorkreislauf	Ökolandbau, innerbetriebliche Stickstoffbilanz überregionaler Nährstoffausgleich
Gewässerbelastung, Phosphorknappheit	Durch nicht optimale Abwasserwirtschaft geht viel Phosphor verloren, der als Pflanzennährstoff wichtig ist und dessen Lagerstätten sehr begrenzt sind.	Stickstoffkreislauf Phosphorkreislauf	P-N-Rückgewinnung im Klärwerk, Schwarzwasserkanalisation
Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen	Vermaisung der Landschaft und Flächenkonkurrenz zu Nahrungsmitteln zeigen, dass auch nachwachsende Rohstoffe nur in begrenzter Menge nachwachsen.	Flächenverbrauch Stickstoffkreislauf Ressourcenproduktivität	BtL, Biomasse 3. Generation
(Illegale) Pestizideinträge	Über das wahre Ausmaß der Pestizideinträge be-	Artenvielfalt	Ökolandbau

	steht nur partieller Überblick. Ebenso über die Effekte von Spuren zahlreicher Pestizide in der Nahrungskette.	Gesundheit	
Verkehr und Mobilität			
Umweltbelastungen Personentransportintensität	Zu viele Personenkilometer und ein Modalmix hohem Automobilanteil führen zu vielfältigen Umweltproblemen.	Klimaschutz Energieproduktivität Ressourcenproduktivität Luftbelastung	Integrierter Verkehr, E-Mobilität
Flugverkehr	Globalisierung und Urlaubsgewohnheiten lassen den Flugverkehr explodieren.	Klimaschutz Energieproduktivität Luftbelastung	CO2-arter Luftverkehr, Regional-Tourismus
Güterverkehr	Freie Binnenmärkte und hohe Lohndifferenzen führen zu langen Transportwegen um ökonomische Vorteile abzuschöpfen.	Klimaschutz Fläche Energieproduktivität Stickstoffkreislauf	Effiziente LKWs, Logistikmanagement, Maut, Regional Sourcing, Smart Logistics
Umweltbelastungen aus Städten und Megacities	Mit zunehmender Urbanisierung bündeln sich Umweltbelastungen räumlich und massive hot spots entstehen.	Klimaschutz Energieproduktivität Ressourcenproduktivität Luftbelastung	Smart City (regionale Warenzyklen, effiziente Energie- und Mobilitätssysteme)
Energie			
Fehlende Stromspeicherung	Der Ausbau der Erneuerbaren bedarf aufgrund ihrer Volatilität guter Speichersysteme. Kostengünstige Lösungen fehlen hier weiterhin.	Klimaschutz Erneuerbare Energien	Demand Side Management, Intelligente Stromnetzinfrastruktur, Speicher F&E
Ineffiziente Gebäude- und Heiztechnik	Die Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudereich schreitet nur langsam vorwärts.	Klimaschutz Energieproduktivität Luftbelastung	Dämmung, IKT in Heizungssystemen, Passiv- und Niedrigenergiehäuser
Niedriger EE-Anteil im Wärmebereich	Ein Großteil der CO ₂ -Emissionen beruht auf dem Energieverbrauch für Wärme. Dort gibt es bisher – jenseits von Effizienzmaßnahmen – kaum Fortschritte.	Klimaschutz Erneuerbare Energien	Wärmenetze, Solarthermie
Stromverbrauch Haushalte	Trotz Energieeffizienzmaßnahmen steigt der Energieverbrauch infolge	Klimaschutz Energieproduktivität	Beschleunigte Austausch ineffizienter Produkte,

	Steigerung von Anzahl, Größe und Funktionalitäten der Elektro- und Elektronikgeräte sowie Veränderungen im Nutzerverhalten		Smart Products, Digitale Mediennutzung
Ressourcen			
Ausbreitung der Siedlungsfläche	Siedlungs- und Verkehrsflächen dehnen sich stetig aus. Zunehmende Nutzungskonkurrenzen mit Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Rohstoffabbau und Energieerzeugung.	Verlust der natürlichen Bodenfunktionen naturnaher Flächen mit ihrer Biodiversität	Revitalisierung von Branchen, Landfill Mining
Geringe Ressourceneffizienzdynamik	Ressourceneffizienzziele (Energie, Rohstoffe) der Bundesregierung werden nicht erreicht	Klimaschutz Energieproduktivität Ressourcenproduktivität	Industrie 4.0 Dezentrale Produktion
Dissipation der Technologiemetalle	Niedrige Recyclingraten für viele Technologiemetalle infolge der Feinverteilung in Produkten und fehlenden Sammel- und Aufbereitungssystemen	Rohstoffproduktivität Gesundheit	Design für Demontage, Pre-Shredering, selektive Demontage, Urban Mining
Mikroschadstoffe im Abwasser	Eintrag von Arzneimittlrückständen, Bioziden, Haushaltschemikalien und anderen Einsatzstoffen aus Gewerbe und Industrie in Gewässer – so genannte Mikroschadstoffe	Artenvielfalt Gesundheit	Ausschleusung aus Stoffkreislauf, Eliminierung im Klärwerk
Ineffizienz der Industriemotoren	Derzeit laufen in Deutschland rund 35 Millionen Drehstrommotoren. Viele sind weit älter als zehn Jahre. Nur wenige erfüllen die Wirkungsgradklassen IE2 oder gar IE3. Nur 15 Prozent sind mit einer elektronischen Drehzahlregelung ausgerüstet	Klimaschutz Energieproduktivität	Einbau von Hocheffizienzmotoren
Kunststoffe	Belastung der Weltmeer mit Plastikmüll („marine littering“)	Nachwachsende Rohstoffe Klimaschutz	Biokunststoffe
Feedstock Change	Umorientierung auf Biomasse als Grundstock	Nachwachsende Rohstoffe Klimaschutz	Bioraffinerien, integrierte Produktion
Umweltgefährdende Chemikalien	Chemische Stoffe, die im Rahmen der GHS-Kennzeichnung (Globally	Artenvielfalt Gesundheit	Substitution von gefährlicheren Chemikalien durch weniger gefährli-

	Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals) als „umweltgefährlich“ eingestuft sind		che oder inhärent sichere Stoffe
Globalisierung von Stoffströmen	Negative Umwelteffekte werden aus Deutschland immer weiter ins Ausland verlagert, indem unsere Konsumprodukte zunehmend importiert werden.	Ressourcenproduktivität, Klimaschutz, Energieproduktivität	Regionalisierung von Produktion, Lieferkettenmanagement