

TEXTE 102/2020

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 48 102 0

## **Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen – Synthese der Ergebnisse**

Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen,  
gekoppelten Infrastrukturen"

von

Martin Hirschnitz-Garbers, Mandy Hinzmann und Susanne Langsdorf  
Ecologic Institut, Berlin

Alfred Olfert, Georg Schiller und Benjamin Brunnow  
Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden

Katharina Hölscher und Julia M. Wittmayer  
Dutch Research Institute for Transition, Rotterdam


Jörg Walther  
BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
buergerservice@uba.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**

Ecologic Institut  
Pfalzburger Str. 43-44  
10717 Berlin

**Abschlussdatum:**

November 2019

**Redaktion:**

Fachgebiet I 1.6 – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass)  
Inke Schauer

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	5
1 Warum Transformationen hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen analysieren?.....	6
2 Wie wurden Transformationen in TRAFIS analysiert? .....	7
3 Kernergebnisse zu Nachhaltigkeitspotentialen und Einflussfaktoren .....	10
3.1 Bewertung von Nachhaltigkeitswirkungen –TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck .....	10
3.2 Abgeschlossene Fallbeispiele: Einflussfaktoren und Gestaltungsoptionen .....	12
3.3 Laufende Fallbeispiele: Einflussfaktoren, Gestaltungsoptionen und Reflektion.....	14
4 Fazit aus dem TRAFIS-Projekt .....	16
5 Quellenverzeichnis.....	18

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Fallbeispielansatz im TRAFIS-Projekt.....	8
Abbildung 2: Aufschlüsselung der Expert*innen-Einschätzungen zu 14 typischen Fallkonstellationen .....	11
Tabelle 1: Die neun Fallbeispiele innovativer Infrastrukturkopplungen.....	8
Tabelle 2: sektorale Zuordnung der Infrastrukturkopplungen in den Fallbeispielen .....	9
Tabelle 3: Zusammenfassung der Expert*innen-Einschätzung zu Nachhaltigkeitspotentialen.....	10
Tabelle 4: Überblick über relevante Einflussfaktoren in den abgeschlossenen Fallbeispielen .....	12
Tabelle 5: Überblick über relevante Einflussfaktoren in den laufenden Fallbeispielen .....	14

## Abkürzungsverzeichnis

<b>DSM</b>	Demand-Side-Management
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>i.d.R.</b>	in der Regel
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnologie
<b>PV</b>	Photovoltaik

## 1 Warum Transformationen hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen analysieren?

Infrastrukturen spielen eine zentrale Rolle in der Daseinsvorsorge für menschliche Gesellschaften. Sie stellen unter anderem die Energie- und Wasserversorgung, Mobilitätsangebote und Telekommunikation sowie die Abfall- und die Abwasserentsorgung für die Bevölkerung bereit. Um diese Funktionen langfristig kontinuierlich erfüllen zu können, sind großflächige physische Strukturen, flächendeckende Versorgungsnetze sowie zentrale und dezentrale Anlagen notwendig. Dadurch binden Infrastrukturen langfristig Materialbestände, schaffen Energiebedarfe und Pfadabhängigkeiten, beispielsweise indem einmal etablierte Systeme aufgrund der investierten Kosten und Amortisationszeiten eher am Laufen gehalten als durch neue Systeme ersetzt werden. Gleichzeitig bieten Innovationen im Infrastrukturbereich Hebelwirkungen für zukünftige, nachhaltige Infrastrukturfade, wenn z.B. räumlich angepasste Innovationen in anderen Kontexten getestet und angewendet werden können (Clausen et al. 2017, Trapp et al. 2017, WBGU 2016).

Die Sicherung der Versorgung bei Steigerung der Effizienz ist seit jeher ein zentrales Interesse in der Entwicklung, im Betrieb und in der Nutzung von Infrastrukturen. Zunehmend treten auch Erwartungen an eine höhere Nachhaltigkeit, einschließlich ökologischer Verträglichkeit und sozialer Gerechtigkeit bei der Erbringung von Infrastrukturdienstleistungen auch angesichts großer gesellschaftlicher Änderungen wie demographischer Wandel oder Klimawandel hinzu. Infrastruktursysteme zur Daseinsvorsorge stehen derzeit unter einem hohen Veränderungsdruck, um einen Beitrag zu den sich verändernden gesellschaftlichen Zielstellungen zu leisten: Erwartungen und Herausforderungen in Bezug auf Klimaanpassung und Klimaschutz (Stichwörter Energiewende einschließlich Atom- und Kohleausstieg, Mobilitätswende, Dekarbonisierung), Kreislaufwirtschaft sowie die Megatrends Urbanisierung und Digitalisierung geben neue Zielstellungen vor, denen auch die Entwicklung der Infrastrukturen unterliegt.

Infrastruktursysteme sind damit das Ergebnis gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen. Sie umfassen mehr als nur die physischen Komponenten und Funktionen: Infrastrukturen sind gekennzeichnet durch und wirken auf das gesellschaftliche Verständnis, wie bestimmte Dienstleistungen erbracht werden (sollten). Auch beeinflussen sie kollektive Verhaltensmuster und werden zugleich in ihrer Entwicklung von diesen beeinflusst. Infrastruktursysteme werden daher als sozio-technische Systeme verstanden (Bolton und Foxon 2015, Libbe et al. 2010). Entsprechend sind Veränderungen an Infrastruktursystemen komplexe sozio-technische Prozesse. Hieraus sowie aus der zentralen Versorgungsfunktion für Gesellschaft und Wirtschaft resultieren unmittelbar Anforderungen an die Funktionsfähigkeit, Resilienz und Wirtschaftlichkeit von Infrastrukturen. Lange Planungs- und Nutzungszeiten machen es zudem notwendig, langfristige Wandelprozesse bei der Planung zu berücksichtigen.

Eine Hoffnung, diesen Herausforderungen erfolgreich begegnen zu können, liegt in der Transformation hin zu neuartigen und nachhaltigeren Systemen durch Kopplung bisher unabhängig voneinander betriebenen Infrastrukturen. Infrastrukturkopplungen können Teil einer Nachhaltigkeitstransformation sein, wenn sie helfen, die gesellschaftlichen Ziele und Normen auf einem höheren Nachhaltigkeitsniveau zu ermöglichen – wobei mögliche Rebound-Effekte, z.B. durch gesteigerten Energieverbrauch oder zusätzliche Mobilität, mitgedacht werden müssen. Weiterhin können durch Infrastrukturkopplungen auch Fragen sozialer Gerechtigkeit von Infrastrukturdienstleistungen im Blick behalten sowie attraktivere oder gänzlich neuartige Dienstleistungen entwickelt werden (Olfert et al. 2020). Dabei sind unterschiedliche Arten der Kopplungen denkbar, beispielsweise Kopplungen von Stoff-, Material- und Energieströmen (z.B. die Nutzung von Wärme aus Abwasser), aber auch Kopplungen von Informationsströmen (z.B. IKT und Energiewirtschaft zur Verbesserung von Lastausgleich/Speicherungssystemen). Gleichermaßen geht es um sektorenübergreifende Kopplungen (z.B. zwischen Energie und Wasser) und auch um Kopplungen zwischen Teilsektoren (z.B. Power-to-Gas).

Kopplungen gehen über Grenzen hinweg – sie verbinden private und öffentliche Strukturen genauso wie zentrale mit dezentralen Elementen (z.B. dezentrale Stromspeicherung in E-Mobilen in Kombination mit dem Umbau der Energieversorgungsstrukturen hin zu regenerativen Systemen; siehe Hölischer und Wittmayer 2018). Damit erfordern die Entwicklung und der Betrieb von Infrastrukturkopplungen auch grundlegendere Änderungen in der Art und Weise, wie Infrastrukturdienstleistungen erbracht und genutzt werden, die deutlich über Detailanpassungen an bestehenden Systemen hinausgehen – sie erfordern unter anderem neue organisatorische Schnittstellen, neues Wissen über Kopplungsmöglichkeiten und die Einbindung verschiedener gesellschaftlicher Akteure.

Diese Änderungsanforderungen machen deutlich, dass Infrastrukturen als Teil eines sozio-technischen Systems verstanden werden müssen. Bestehende Infrastrukturen sind Teil eines bestehenden Regimes, welches für das in einem gesellschaftlichen Teilbereich vorherrschende bzw. dominante Modell der Problemlösung steht (Grießhammer und Brohmann 2015, Loorbach et al. 2010, Moss 2014). Das Regime umfasst neben den Infrastrukturen an sich u.a. das Geflecht von Regulierung, Marktstrukturen, Wertvorstellungen, Akteuren und ihre Handlungen, welches sich durch vielfältige Querverbindungen und Wechselbeziehungen in einer bestimmten Entwicklungsrichtung befindet und ggf. stabilisiert. Veränderungen in Infrastruktursystemen, die sich z.B. aus aktuellen Entwicklungen und anstehenden Planungsaufgaben ergeben, werden von Regimeakteuren nicht selten als Störung wahrgenommen, die zu Widersprüchen und Ablehnung führen können. Für eine Transformation bzw. tiefgreifende Systemveränderung notwendige Innovationen entstehen daher selten aus dem Regime heraus, sondern meist auf lokaler Ebene in Nischen und angepasst an die spezifischen Erfordernisse und Kontexte (Frantzeskaki und Loorbach 2010, Loorbach et al. 2015). In solchen Nischen entstehen die Keime für eine Transformation hin zu innovativen Kopplungen, welche die Entwicklung einer nachhaltigeren Gesellschaft wesentlich unterstützen – denn sie können gesellschaftlichen Wandel hin zu nachhaltigeren Konsummustern und suffizienten Lebensstilen unterstützen oder überhaupt erst ermöglichen.

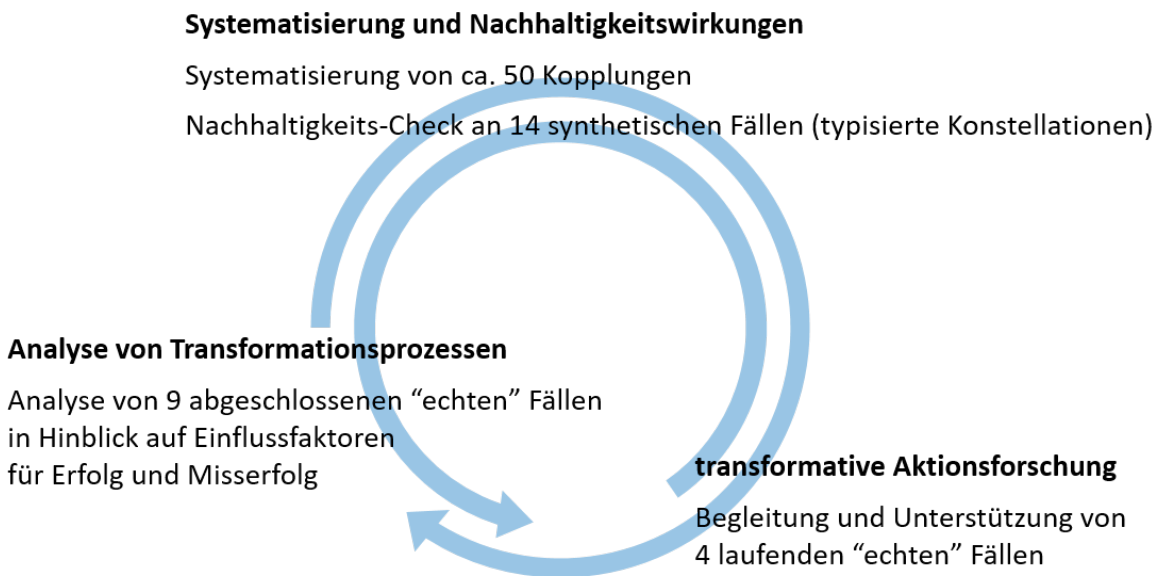
Vor diesem Hintergrund untersuchte das Projekt TRAFIS „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“ aktuelle Entwicklungen im Infrastrukturbereich, die damit einhergehenden Transformationsprozesse einschließlich möglicher unterstützender und hindernder Einflussfaktoren sowie potentielle Nachhaltigkeitswirkungen dieser neuartig gekoppelten Infrastrukturlösungen. Im Fokus standen innovative, d. h. nicht etablierte, Kopplungen (verstanden als Nischeninnovationen) in den Sektoren Verkehr, Energie, Wasser, Abwasser, Abfallwirtschaft sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Ziele des Vorhabens sind:

- ▶ Bewerten von Wirkungen von Infrastrukturkopplungen in Hinblick auf Nachhaltigkeit, insbesondere Ressourceneffizienz und Klimaresilienz.
- ▶ Systematisches Herausarbeiten von Einflussfaktoren für das Gelingen lokaler Transformationen hin zu gekoppelten nachhaltigen Infrastrukturen.
- ▶ Erproben der Möglichkeiten der unterstützenden Prozessbegleitung, Reflektieren von Ansatzpunkten und Handlungsmöglichkeiten zur politischen Unterstützung von Transformationsprozessen.

## 2 Wie wurden Transformationen in TRAFIS analysiert?

Das TRAFIS-Projekt nutzte unterschiedliche qualitative Fallbeispielanalysen, um die Vielfalt bereits umgesetzter und möglicher innovativer Infrastrukturkopplungen zu untersuchen (Abbildung 1).

Abbildung 1: Fallbeispielansatz im TRAFIS-Projekt



Quelle: Olfert et al. (2020), S. 29; verändert

In einer ersten Fallbeispielanalyse wurden **mögliche Nachhaltigkeitswirkungen von Infrastrukturkopplungen bewertet**. Dazu wurden mittels Literaturlauswertung zunächst typische Fallkonstellationen gekoppelter Infrastrukturen auf lokaler Ebene konstruiert, die eine Kopplung von Teil-Systemen repräsentieren, ohne sich auf einen konkreten Umsetzungsfall zu beziehen, d.h. ohne Standort-, Umsetzungs- oder Betriebsspezifika zu betrachten.

Die betrachteten innovativen Infrastrukturkopplungen repräsentieren Kopplungsoptionen, die in der Praxis bisher kaum erprobt sind. Über das Potential solcher und Infrastrukturkopplungen generell, zu einer Transformation hin zu mehr Nachhaltigkeit beizutragen, ist daher grundsätzlich wenig bekannt. Um Potenziale und mögliche Einschränkungen innovativer Infrastrukturkopplungen im Hinblick auf technische, wirtschaftliche, soziale und umweltbezogene Wirkungen einschätzen zu können, wurde mittels einer Delphi-Umfrage über 100 Expert\*innen aus Praxis und Forschung (Kommunen, Stadtwerke, Verbände und wissenschaftliche Institutionen) befragt (TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck). Die Ergebnisse sind in einem eigenen Band publiziert (Olfert et al. 2020).

Mit der zweiten Fallbeispielanalyse wurden neun Beispiele abgeschlossener Infrastrukturkopplungen (verstanden als Nischeninnovationen) auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene in Deutschland daraufhin untersucht, welche **Faktoren, Rahmenbedingungen und Akteure förderlich oder hinderlich Einfluss** auf die Infrastrukturkopplungen bzw. eine Nachhaltigkeitstransformation genommen haben. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Fälle (Hölscher und Wittmayer 2018).

Tabelle 1: Die neun Fallbeispiele innovativer Infrastrukturkopplungen

Fallbezeichnung und Clusterzuordnung	
1	Abwasserwärmenutzung in Waiblingen – alternative Energieerzeugung und Verteilung durch Fernwärmenetz
2	Abwasserwärmenutzung in Köln – alternative Energieerzeugung an drei Schulen
3	Serverabwärmenutzung in Hamm – Alternative Energieerzeugung in einer Wohnsiedlung
4	Wohnen & Elektromobilität im Rosensteinviertel Stuttgart – Alternative Energieerzeugung (PV, Wind), Energiespeicherung (Elektromobilität)

Fallbezeichnung und Clusterzuordnung	
5	Solardorf Müllerstraße in Norderstedt – Alternative Energieerzeugung (PV), Energiespeicherung (Elektromobilität), intelligente Netze
6	Multi-Energie-Tankstelle H2BER – Alternative Energieerzeugung (Wasserstoff, Energie) für Mobilität, Energiespeicherung
7	Hybridkraftwerk Prenzlau – Alternative Energieerzeugung (Wasserstoff, Windgas), Energiespeicherung
8	VPS Allgäu – Energiespeicherung und intelligente Netze
9	Drivy – privates Car Sharing via App – IKT für privates Car Sharing via Internetplattform

Mittels Literaturanalyse und Expert\*innen-Interviews wurde die Entwicklung der gekoppelten Infrastruktur von der Idee bis zum heutigen Stand nachgezeichnet. Anhand dieser Analysen wurden sowohl einzelfallspezifisch als auch über einen Quervergleich der neun Fallbeispiele fallübergreifende potentielle Handlungsoptionen und Gestaltungsmöglichkeiten für unterschiedliche Akteure identifiziert. Die Ergebnisse der Analyse von Transformationsprozessen in abgeschlossenen Fallbeispielen sind in einem eigenen Band publiziert (Hölscher et al. 2020).

Die dritte Fallbeispielanalyse bestand in einer **Analyse und Prozessbegleitung** von vier laufenden Fallbeispielen zur Vertiefung der Erkenntnisse aus der Analyse der abgeschlossenen Fallbeispiele. Die Fallbeispiele umfassen intra- und intersektorale Infrastrukturkopplungen<sup>1</sup> (siehe Tabelle 2) auf kommunaler und regionaler Ebene.

Tabelle 2: sektorale Zuordnung der Infrastrukturkopplungen in den Fallbeispielen

Fallbeispiel	Kopplungsart
1 Demand-Side-Management in der Kläranlage (Gemeinde Rödental)	Intersektoral: Stromversorgung mit Sekundärprozessen der Abwasserreinigung, Nutzung dezentraler Stromverbrauchs- und angebotspotentialen zur Stromnetzstabilisierung über ein virtuelles Kraftwerk
2 IKT (App)-gestützte Vernetzung der Mobilitätsangebote der Stadtwerke Augsburg (Stadt Augsburg)	Intrasektoral (Bündelung von Mobilitätsangeboten) und intersektoral: Mobilitäts- und (Strom-)Versorgungsdienstleistungen über IKT
3 Dezentrale Power-to-Gas-/KWK-Anlage mit Gasspeicher für Wärme- und Stromversorgung sowie für Klimaschutz im Altbau (Stadt Augsburg)	Intrasektoral (Energieversorgung): Nutzung von erneuerbaren Energien (Strom) zur Methan-Erzeugung für die Verwendung in einer KWK-Anlage zur Versorgung von Mieter*innen mit Wärme und Strom
4 Steinfurter Flexkraftwerke - Integration von Wasserstoff in regionale Energie- und Verkehrswende (Kreis Steinfurt)	Intrasektoral (Energieversorgung) und intersektoral (Wärme- und Mobilitätsversorgung): Nutzung von erneuerbaren Energien zur Wasserstoff-Erzeugung, Speicherung und Verwertung für Wärme, Strom, Fahrzeugantrieb

Damit untersuchte TRAFIS **relevante Faktoren, Rahmenbedingungen und Akteure** auf Ebene laufender Infrastrukturkopplungsbeispiele und inwieweit sich Erkenntnisse aus der Analyse abgeschlossener Fallbeispiele hier wiederfinden. Zugleich wurde hierbei der TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck einem Praxistest unterzogen.

<sup>1</sup> Für eine vertiefte Darstellung und Klassifizierung von intra- und intersektoralen Infrastrukturkopplungen siehe Olfert et al. 2020.

Darüber hinaus dienen die Aktivitäten in der Analyse der laufenden Fallbeispiele auch dazu, die Fallbeispiele in ihren **Transformationsprozessen zu begleiten und zu unterstützen**. Dazu wurden mittels transformativer Aktionsforschung vor Ort konkrete Unterstützungsleistungen durch TRAFIS konzipiert und seitens der Praxisakteure mögliche Bedarfe an bundespolitischer Rahmungebungen ermittelt, die Gestaltungsoptionen für die Weiterentwicklung der Kopplungen aufzeigen. Zusätzlich reflektierten die Wissenschaftler\*innen die Eignung der transformativen Forschung und der angewendeten Methoden für die Analyse und Begleitung von Infrastruktorkopplungen. Die Ergebnisse der Analyse von laufenden Fallbeispielen sind in einem eigenen Band publiziert (Hirschnitz-Garbers et al. 2020).

### 3 Kernergebnisse zu Nachhaltigkeitspotentialen und Einflussfaktoren

#### 3.1 Bewertung von Nachhaltigkeitswirkungen –TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck

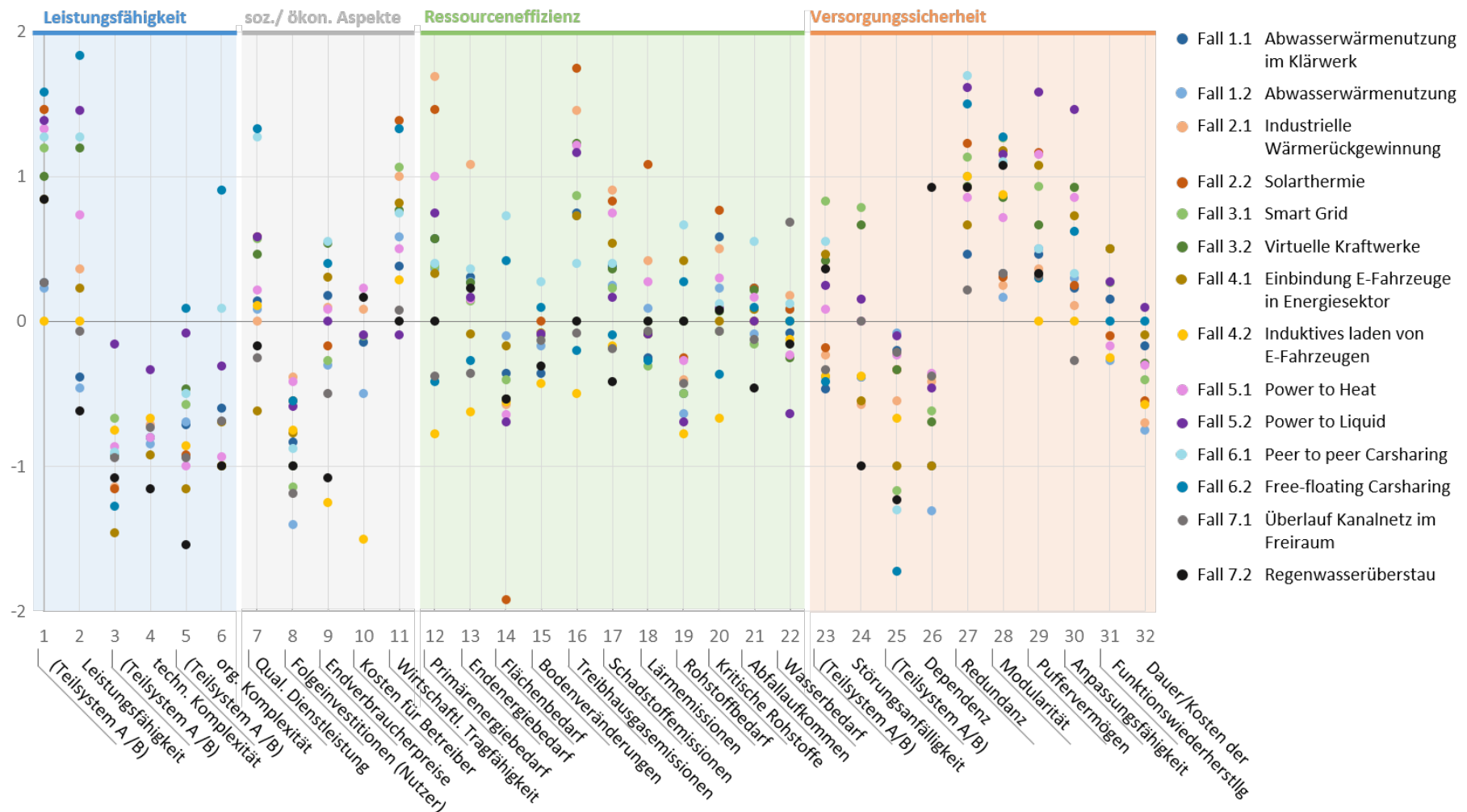
Potentielle Nachhaltigkeitswirkungen gekoppelter Infrastrukturen wurden bewertet im Hinblick auf: (a) Funktionalität, (b) soziale und ökonomische Verträglichkeit, (c) Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz sowie (d) Versorgungssicherheit im Kontext externer (vor allem wetterbedingter) Störungen. Über 14 typische Fallkonstellationen hinweg lassen sich folgende Einschätzungen zusammenfassen (Tabelle 3; siehe Abbildung 2 auf S. 11 für eine Aufschlüsselung zu den 14 Fallkonstellationen):

Tabelle 3: Zusammenfassung der Expert\*innen-Einschätzung zu Nachhaltigkeitspotentialen

Nachhaltigkeitsaspekt	Zusammenfassung von Expert*innen-Einschätzung zu Potentialen
Funktionalität gekoppelter Infrastrukturen	<p>Infrastruktorkopplungen verfügen über das Potential, die erwartete Leistung zu erbringen.</p> <p>Infrastruktorkopplungen stellen durch die Hebung bisher ungenutzter Synergien teilweise höhere Leistungspotentiale bereit als nicht gekoppelte Systeme.</p> <p>Infrastruktorkopplungen führen i.d.R. zu deutlich höherer technischer und organisatorischer Komplexität.</p>
soziale und ökonomische Verträglichkeit	<p>Potentiale im Bereich Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit werden i.d.R. ohne Einbußen in der wahrgenommenen Qualität der Dienstleistung erzielt.</p> <p>Betrieb von Infrastruktorkopplungen kann für Anbieter*innen und Nutzer*innen ökonomisch tragfähig sein.</p> <p>Inanspruchnahme der Infrastrukturdienstleistung kann teilweise spürbare Nutzer*innen-seitige Investitionen erfordern, z.B. wenn Gebäudetechnik angepasst werden muss, um die Vorteile einer neuen Infrastrukturlösung nutzen zu können.</p>
Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	<p>Neutrale bis deutlich positive Wirkungen werden bei Primärenergiebedarf, Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen erwartet.</p> <p>Leicht negative Wirkungen werden in Bezug auf Bodenbelastungen, Bedarf an Rohstoffen allgemein und kritischen Rohstoffen erwartet.</p> <p>Flächenbedarf steigt teils sehr deutlich.</p>
Versorgungssicherheit im Kontext externer (v. a. wetterbedingter) Störungen	<p>Durch neue Kopplungen von Infrastruktursystemen können neue Abhängigkeiten (Dependenzen) entstehen.</p> <p>Infrastruktorkopplungen können durch Verbesserung von Redundanz, Modularität und Puffervermögen der Systeme die lokale/regionale Versorgungssicherheit stärken.</p>



Abbildung 2: Aufschlüsselung der Expert\*innen-Einschätzungen zu 14 typischen Fallkonstellationen



Quelle: Olfert et al. (2020), S. 93; Bewertung auf der y-Achse: 2 = deutlich positive Bewertung; 1 = geringfügig positive Bewertung; 0 = keine Veränderung; -1 = geringfügig negative Bewertung; -2 = deutlich negative Bewertung. Die Kriterien Leistungsfähigkeit (1, 2), technische Komplexität (3, 4), organisatorische Komplexität (5, 6), Störungsanfälligkeit (23, 24) und Dependenz (25, 26) auf der x-Achse betrachten die Wirkungen aus den Perspektiven der jeweils gekoppelten Teilsysteme A und B. Die übrigen Kriterien thematisieren die Wirkungen des gekoppelten "Gesamtsystems" bzw. thematisieren die Perspektiven der Betreiber\*innen und Nutzer\*innen.

### 3.2 Abgeschlossene Fallbeispiele: Einflussfaktoren und Gestaltungsoptionen

In der Auswertung der neun abgeschlossenen Fallbeispiele wurden verschiedene relevante Einflussfaktoren ermittelt.

Tabelle 4: Überblick über relevante Einflussfaktoren in den abgeschlossenen Fallbeispielen

Bezug der Einflussfaktoren	Relevante Einflussfaktoren
technisch	<p>Lokale technische und physische Begebenheiten und Potentiale können die Anbindung und Umsetzung erleichtern, aber auch bestimmte Umsetzungsmöglichkeiten ausschließen oder zu verminderter Leistungsfähigkeit führen.</p> <p>Verfügbarkeit von tragfähigen und passenden technischen Optionen beeinflusst die Anwendbarkeit. Ist die Technik für eine bestimmte Kopplungsidee noch nicht ausgereift, kann das Umsetzungsmöglichkeiten ausschließen.</p> <p>Der Lebenszyklus der Infrastruktorkopplung kann über den Zeitverlauf z.B. neue technische Anforderungen und Möglichkeiten sowie durch technische Veraltung entstehenden Modernisierungsbedarf mit sich bringen.</p>
institutionell und organisatorisch	<p>Verordnungen und Normen (z.B. der rechtliche Rahmen für die Inbetriebnahme und die Bereitstellung der Dienstleistung) können vor allem dann hindernd wirken, wenn die Innovation nicht reibungslos in diesen hineinpasst.</p> <p>Netzwerk- und Kooperationsstrukturen (z.B. organisatorische Kontakte und Schnittstellen) ermöglichen den Austausch von Wissen und Ressourcen sowie Interessenvermittlung.</p>
gesellschaftlich	<p>Nutzerseitige Motivation und Finanzierbarkeit stellen die Nachfrage und Nutzung sicher, fehlendes Wissen und bestehende Nutzungspraktiken sowie erhöhte Nutzungskosten können die Nutzung jedoch auch einschränken.</p> <p>Hohe Bedienkomplexität und Kenntnisanforderungen können Nutzer*innen-seitige Akzeptanz verringern und zu Bedienfehlern führen.</p> <p>Politischer Pioniergeist und politische Anbindung können Innovationsimpulse geben und politische Sichtbarkeit für die Nutzung und Instandhaltung einer Infrastruktorkopplung fördern – gleichermaßen sind sie Ausdruck gesellschaftlicher Akzeptanz und Nachfrage.</p>
wirtschaftlich	<p>Förderprogramme (z.B. Investitions- und Forschungsförderprogramme durch EU-, Bundes- und Landesebenen) tragen durch Subventionen und Darlehen zur Finanzierung spezifischer Innovationsvorhaben bei, unterstützen Modernisierungsmaßnahmen und Ausweitungen sowie Wissenstransfer.</p> <p>Anreizstrukturen des Marktes unterstützen bestimmte Formen von Angebot und Nachfrage und können attraktive Innovationsanreize setzen. Derzeitige marktwirtschaftliche Strukturen bevorzugen jedoch kurzfristige Kosten-Nutzen-Rechnungen und behindern somit erhöhten Innovationsaufwand mit langfristigeren Amortisierungszeiten.</p> <p>Gesetzliche Rahmenbedingungen können (Fehl-)Anreize für die Investition und die Vermarktung von Innovationen setzen – bestehende Rahmen sind jedoch oftmals hindernd.</p>

Die meisten Einflussfaktoren können, je nach Kontext in dem sie wirken, sowohl unterstützende als auch hemmende Wirkungen entfalten. So können Regulierungen und Anreize für den Ausbau erneuerbarer Energien sowie Speicherkapazitäten und intelligentere Vernetzung für Versorgungssicherheit

die Gewinnchancen verbessern und Innovationen vor dem Hintergrund der angestrebten Energiewende fördern. Derzeit gibt es jedoch auch gegenläufige Tendenzen; so fällt für Wasserstoffproduktion die EEG-Umlage an und die Renditen für Eigenkapital wurden in kommunalen Stromnetzen reduziert, wodurch sich deren Gewinnchancen verringern. Außerdem wirken Einflussfaktoren unterschiedlich zu verschiedenen Momenten in den Transformationsprozessen. Beispielsweise können Förderprogramme Entwicklungspfade in Momenten unterstützen, in denen Finanzierungsaufwand besteht – wie bei der Installation und Inbetriebnahme, der technischen Anpassungen, Ausweitung und Übertragung sowie dem Wissenstransfer, während Nutzer\*innen-seitige Nachfrage über den gesamten Entwicklungspfad hinweg langfristig sein muss.

Eine Vielzahl von Akteuren kann Entwicklungspfade durch unterschiedliche Handlungen vorantreiben oder behindern und damit auch die Richtung und Dynamik der Entwicklung beeinflussen. Marktwirtschaftliche Akteure, welche in den meisten Fallbeispielen maßgeblich beteiligt waren, haben ein Interesse an der Erprobung neuer und nachhaltiger Technologien und an der Erschließung neuer Marktpotentiale. Lokale Stadtverwaltungen und kommunale Betriebe zur Stromversorgung hatten (kommunalpolitisches) Interesse, nachhaltige Stadtentwicklung zu unterstützen und Pilotprojekte in diesem Zusammenhang zu entwickeln. Im Laufe der Entwicklungspfade wurden verschiedene Arten von Netzwerken und Plattformen gebildet bzw. genutzt, um Planungsarbeiten zu unterstützen, eine Finanzierungsbasis zu schaffen und Wissen auszutauschen. Netzwerke umfassen lokale öffentliche Netzwerke (innerhalb einer Stadtverwaltung), öffentlich-private Partnerschaften, Interessengemeinschaften und Forschungspartnerschaften. Viele der Netzwerke und Partnerschaften haben zu langfristigen Kooperationen geführt, um beispielsweise an weiteren Innovationen zu arbeiten.

Es ergeben sich vier Handlungsbereiche mit verschiedenen Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten, um zu verschiedenen Zeitpunkten unterstützend in Entwicklungspfade einzugreifen:

1. Innovationsräume öffnen und gestalten:

*Ziel* – Entwicklung, Installation und Inbetriebnahme von Infrastrukturkopplungen technisch, finanziell und institutionell ermöglichen.

*Ansätze* – z.B. Ideenimpulse für Innovationen schaffen, Machbarkeitsstudien durchführen, Finanzierung sicherstellen.

2. Langfristigen Betrieb gewährleisten:

*Ziel* – Betrieb innovativer Infrastrukturkopplung organisatorisch und institutionell gewährleisten sowie gesellschaftliche Akzeptanz und Bereitschaft für die Nutzung der Infrastrukturkopplung erzeugen.

*Ansätze* – z.B. organisatorische Strukturen für den langfristigen Betrieb schaffen sowie Sichtbarkeit und Attraktivität stärken.

3. Langfristige und integrative Rahmensetzung für Synergieeffekte nutzen und gestalten:

*Ziel* – Infrastrukturkopplung im gesellschaftspolitischen Kontext einer Nachhaltigkeitstransformation positionieren.

*Ansätze* – Beitrag zu Nachhaltigkeitsveränderungen, Synergien und Zielkonflikte offenlegen und die Infrastrukturkopplung kritisch reflektieren; Veränderungsprozesse, Investitionen und Gesetzgebung langfristig und integrativ gestalten.

4. Kooperationen und Interessenvermittlung fördern:

*Ziel* – Kooperation und Koordination zwischen allen an Planung, Installation, Finanzierung, Betrieb und Nutzung einer Infrastrukturkopplung beteiligten Akteuren ermöglichen und stärken.

*Ansätze* – Wissen durch Netzwerke und Kooperationsstrukturen austauschen und in den breiteren gesellschaftlichen Diskurs einbringen; Ressourcen zusammenlegen und zwischen unterschiedlichen Interessen vermitteln.

### 3.3 Laufende Fallbeispiele: Einflussfaktoren, Gestaltungsoptionen und Reflektion

In der Auswertung der vier laufenden Fallbeispiele wurden zu den abgeschlossenen Fallbeispielen sehr ähnliche relevante Einflussfaktoren ermittelt.

Tabelle 5: Überblick über relevante Einflussfaktoren in den laufenden Fallbeispielen

Bezug der Einflussfaktoren	Relevante Einflussfaktoren
technisch	<p>Infrastrukturkopplungen erhöhen die technische Komplexität aufgrund technisch-physischen Strukturen und erfordern z.T. für die Kopplung weitere Infrastruktur(komponenten)</p> <p>Das bestehende bzw. geplante technische Set-Up der Kopplung bietet Nachhaltigkeitspotentiale (z.B. Beitrag zur lokalen Energiewende), trägt zu Versorgungssicherheit bei (z.B. über redundante, dezentrale Komponenten) und ermöglicht Weiternutzung bestehender Strukturen ohne (größere) Zusatzaufwände.</p>
institutionell und organisatorisch	<p>Zusammenarbeit sowie geschultes, Innovations- und Nachhaltigkeits-orientiertes Personal sowie Unterstützung und Innovationsbereitschaft in der Hierarchie sind förderlich für Infrastrukturkopplungen.</p> <p>Langjähriges Erfahrungswissen und eigenständige Organisationsbereiche unterstützen Infrastrukturkopplungen.</p>
gesellschaftlich	<p>Akzeptanz und Relevanz der Infrastrukturkopplung bzw. von Bestandteilen der Kopplung in Politik, Wirtschaft und der lokalen Bevölkerung stellen eine wichtige Voraussetzung für ein Gelingen von Kopplungen dar.</p>
wirtschaftlich	<p>Infrastrukturkopplungen können auf Seiten der Betreiber*innen oder der Nutzer*innen Kosten reduzieren oder zusätzliche Erlöse generieren.</p> <p>Hohe Investitionskosten und unzureichende Erlösmöglichkeiten erschweren eine (schnellere) Amortisation der Investitionskosten.</p> <p>Bestehende politische oder rechtliche Vorgaben hemmen die Kopplungen in verschiedenen Fallbeispielen. So resultieren unzureichende Erlösmöglichkeiten in mehreren Fallbeispielen aus fehlender Honorierung der Energiespeicherung durch das EEG.</p>

Relevante Unterschiede bestehen vor allem darin, dass manche Einflussfaktoren aus den abgeschlossenen Fallbeispielen – wie beispielsweise Modernisierungsbedarfe oder auch Genehmigungs- und Zulassungsfragen – in den vier laufenden Fallbeispielen aufgrund der dortigen Kopplungsphase (Konzeption und Planung in drei, Pilotanlage in einem der vier Fallbeispiele) noch nicht wirksam sind.

Des Weiteren wurden in der Prozessbegleitung der laufenden Fallbeispiele auch mögliche weitere Gestaltungsoptionen und politische Unterstützungsbedarfe aus Sicht der Fallbeispielakteure ermittelt.

Weitere Gestaltungsoptionen umfassen eine Weiterentwicklung der Infrastrukturkopplungen durch

- ▶ (neue) Geschäftsmodelle:  
Hierunter fallen (i) Ausrichtung auf Contracting-Lösungen im Fallbeispiel dezentrale Power-to-Gas-Anlage (Augsburg); (ii) attraktive, intermodal zugängliche und Benutzer\*innen-freundlich konzipierte Mobilitätsangebote im Fallbeispiel Mobilitätsapp (Augsburg) oder (iii) Erprobung von Power-to-Gas-Geschäftsmodellen für Windenergie im Fallbeispiel Steinfurter Flexkraftwerke;
- ▶ Kapazitätsaufbau:

Das umfasst (i) spezifisch auf die Infrastrukturkopplung ausgerichtete Qualifikation der Mitarbeitenden im Bereich Mechatronik für Energieanlagen im Fallbeispiel dezentrale Power-to-Gas-Anlage (Augsburg) oder (ii) organisatorische und vertragliche Abstimmung der Abnahme von in der Kläranlage erzeugter Energie im Fallbeispiel Demand-Side-Management (Rödental);

► Verstetigung und Weiterdenken:

Dieser Aspekt ist in allen Fallbeispielen relevant im Sinne (i) etablierter Netzwerke und Kontakte; (ii) guter, motivierter Mitarbeiter\*innen; (iii) Erweiterung von Akteurskreisen; und (iv) Ausdehnung der Kopplung auf weitere Kommunen bzw. über Grenzen hinaus.

Politische Unterstützungsbedarfe bestehen in den vier Fallbeispielen im Wunsch danach:

- Regulatorische Experimentierräume (rechtliche Reallabore) zu nutzen, um Anpassungen an rechtlichen Vorgaben in einem gewissen Maßstab ausprobieren zu können, die als förderlich für die Umsetzung der regionalen Energie- und Mobilitätswende angesehen werden. Hier sollten kommunalwirtschaftliche Tätigkeiten im Bereich Netzübernahme und Netzbetrieb sowie in der Mobilitätsberatung testweise zugelassen werden;
- Bestehende rechtliche Vorgaben so zu ändern, dass sie förderlich für die Umsetzung der regionalen Energiewende sind, insbesondere EEG-Vergütung für Energiespeicherung;
- Finanzielle Unterstützung für Pilotprojekte bereitzustellen und flexibler zu gestalten, beispielsweise über Investitionsansub- und Projektförderungen für Investitions- und Betriebskosten;
- Nachhaltige öffentliche Beschaffung zu stärken, um die Inanspruchnahme nachhaltigerer Produkte und Dienstleistungen (wie z.B. „grüner“ Wasserstoff) in öffentlichen Einrichtungen zu steigern.

In einer Reflektion zu Forschungsansatz und Methoden für die Prozessbegleitung der vier laufenden Fallbeispiele traten insbesondere die beiden Aspekte Vertrauensbildung und Praxisrelevanz zu Tage. Dazu dienten neben den persönlichen Treffen insbesondere die aus dem TRAFIS-Projekt angebotenen ingenieurs-technische und sozialwissenschaftliche Unterstützungsaktivitäten, die gemeinsam mit Akteuren aus den Fallbeispielen festgelegt und konzipiert wurden. Als „Türöffner“ erlaubte diese Unterstützung, Vertrauen aufzubauen und die Relevanz des TRAFIS-Projekts für die lokale Fallbeispielpraxis sichtbar zu machen. Dadurch konnte auch die Vertrauensbasis zwischen den Praxisakteuren und den Forschenden aufgebaut werden, welches tiefere Einblicke, Interviews zur gezielten Systemanalyse und kritischen Diskussionen mit Hilfe des TRAFIS-Nachhaltigkeitschecks erlaubte.

Der TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck konnte in zwei Fallbeispielen gemeinsam mit Praxisakteuren durchgeführt werden (Fallbeispiel DSM-Optionen in der Kläranlage Rödental und Fallbeispiel Mobilitätsapp in Augsburg). Dabei hat sich die grundsätzliche Eignung des Bewertungskonzepts und der einzelnen Kriterien auch im Rahmen einer Anwendung im Kreis persönlich anwesender Expert\*innen und auf Basis eines auf Papier ausgedruckten Fragebogens vollumfänglich bestätigt. Die einzelnen Kriterien wurden in ihrer Operationalisierung von den beteiligten Expert\*innen schnell und unkompliziert erfasst. Die Bearbeitung war innerhalb eines zeitlichen Rahmens von ca. 30 Minuten gut möglich. Weiterhin führte der gemeinsame Nachhaltigkeitscheck im Fallbeispiel Rödental dazu, dass unterschiedliche und teils konfliktäre Perspektiven der Beteiligten deutlich wurden und zwischen diesen dadurch vermittelt werden konnte, dass der Nachhaltigkeitscheck eine gute Grundlage für eine Sachdiskussion schaffte.

## 4 Fazit aus dem TRAFIS-Projekt

---

*Infrastrukturkopplungen sind ein wichtiger Baustein für eine Nachhaltigkeitstransformation und benötigen dazu Experimentierräume, Kümmerer\*innen mit unterstützenden Netzwerken und förderliche politische Rahmgebung*

---

Anhand der Erkenntnisse aus dem TRAFIS-Projekt wird deutlich, dass Infrastrukturkopplungen einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeitstransformation leisten, da sie

- a) fossile Energienutzung und Treibhausgasemissionen einsparen helfen und dadurch Umweltentlastungseffekte zeitigen können;
- b) für Betreiber\*innen neue Geschäftsmodelle und Erlösmöglichkeiten generieren und für Nutzer\*innen zu Kostensenkungen und attraktiveren Dienstleistungsangeboten führen können;
- c) über redundante und dezentrale Systeme netzstabilisierende Effekte bewirken und Versorgungssicherheit durch verringerte großflächige Abhängigkeiten langfristig steigern helfen;
- d) durch neue Vernetzungen und übertragbare technische Set-Ups und Routinen Synergie- und Skaleneffekte ermöglichen.

Allerdings wirkt eine Vielzahl an Einflüssen darauf, ob Infrastrukturkopplungen umgesetzt bzw. weiterentwickelt werden. Im Zusammenwirken der unterschiedlichen technischen, institutionellen, organisatorischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Einflüsse liegen sowohl komplexe Hindernisse als auch vielversprechende Ansatzmöglichkeiten begründet, um nachhaltige Infrastrukturkopplungen zu stärken und auch weiter zu verbreiten. So zeigt die Analyse der Einflussfaktoren in den abgeschlossenen und den laufenden Fallbeispielen, dass als förderlich wahrgenommene Einflüsse aktiv gestärkt werden können:

- ▶ Technologien und technologische Komponenten müssen so weiterentwickelt und verfügbar gemacht werden, dass sie in Reifegrad, technischen Potentialen und Komplexität in Kopplungsbetrieb und -wartung gut einsetzbar und auch in andere lokale Kontexte übertragbar sind.
- ▶ Kümmerer\*innen in Stadtwerken und Verwaltungen bedürfen der Unterstützung höherer Hierarchieebenen sowie gut ausgebildete und langfristig finanzierte Mitarbeiter\*innen.
- ▶ Übergreifende Schnittstellen und Netzwerke (z.B. innerhalb von Stadtverwaltungen oder Stadtwerken) müssen geschaffen werden, um mit Kopplungen aufkommende Kommunikations- und Organisationsprozessen zu vereinfachen sowie um Netzwerkaufbau und -pflege zu unterstützen.
- ▶ Hohe Investitionskosten und eine langfristige Mitarbeiteneinbindung müssen auf entsprechende Anschub- und Innovationsfördermöglichkeiten für Infrastrukturbetreiber\*innen treffen und Geschäftsmodelle für nachhaltige, gekoppelte Infrastrukturkopplungen auf langfristige Erlösmöglichkeiten.
- ▶ Qualifizierungs- und Weiterbildungsangebote müssen auf den mit Infrastrukturkopplungen aufkommenden Bedarf an technischen, aber auch ökonomischen, organisationalen und rechtlichen Kompetenzen zugeschnitten werden.
- ▶ Unterschiedliche Akteursperspektiven und gesellschaftliche Debatten müssen über partizipative Prozesse kontinuierlich integriert und ernst genommen werden, um Kontextrelevanz sowie Akzeptanz für und Inanspruchnahme von Infrastrukturkopplungen zu fördern.

Dazu braucht es politische Unterstützung, insbesondere (aber nicht nur) auf Bundesebene. Hier werden einerseits förderlichere rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen gefordert, wie z.B. die Aufnahme von Energiespeicherung als förderfähiges Element im EEG und angepasste Innovationsförderprogramme, um die Finanzierung von Infrastrukturkopplungen sicherzustellen und die Nachfrage

nach deren Produkten und Dienstleistungen zu steigern. Andererseits ist hier auch eine moderierende Rolle politischer Unterstützung wichtig, die Netzwerke und Kooperation sowie Wissensaustausch zwischen allen beteiligten Akteuren (Planung, Installation, Finanzierung, Betrieb und Nutzung einer Infrastrukturkopplung) stärkt und zwischen unterschiedlichen Interessen vermittelt. Denn für eine gelingende Transformation hin zu nachhaltigen Infrastrukturkopplungen ist jede und jeder gefragt.

Bei der Entwicklung relativ neuer Technologien oder der neuartigen Kombination von bekannten Technologien müssen technische und organisatorische Lösungen maßgeschneidert und im Betrieb erprobt werden, was sie teurer macht und potentiell neue Fehlerquellen mit sich bringt. Daher kommt der Forschungs- und Innovationsförderung auf Bundes- und Landesebene eine wichtige Funktion zu, um Infrastrukturkopplungen durch entsprechende Forschungs- und Innovationsprogramme als Piloterprobungen und auch deren Weiterentwicklung zur Marktreife zu fördern und damit den Übergang von der Forschung in die Praxis sowie von der Nische in den Mainstream zu unterstützen.

## 5 Quellenverzeichnis

- Bolton, Ronald; Foxon, Timothy J. (2015): Infrastructure transformation as a socio-technical process — Implications for the governance of energy distribution networks in the UK. *Technological Forecasting and Social Change* Volume 90, Part B, Pages 538-550
- Clausen, Jens; Göll, Edgar und Tappeser, Valentin (2017): Sticky Transformation – How path dependencies in socio-technical regimes are impeding the transformation to a Green Economy. *Journal of Innovation Management*, Vol. 5, No. 2
- Frantzeskaki, N. und Loorbach, D. (2010): Towards governing infrasystem transitions: Reinforcing lock-in or facilitating change? *Technol. Forecast. Soc. Change*, Issue includes a Special Section on “Infrastructures and Transitions” 77, 1292–1301. doi:10.1016/j.techfore.2010.05.004.
- Grießhammer, Rainer und Brohmann, Bettina (2015): Wie Transformationen und gesellschaftliche Innovationen gelingen können. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Hirschnitz-Garbers, M.; Hinzmann, M.; Langsdorf, S.; Walther, J.; Olfert, A.; Schiller, G.; Brunnow, B.; Hölscher, K. und Wittmayer, J.M. (2020): Erfolgsbedingungen und Prozessbegleitung für eine nachhaltige Umgestaltung von Infrastruktorkopplungen. Teilbericht des Vorhabens: „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“. UBA-Texte 03/2020, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Hölscher, K.; Wittmayer, J.M.; Olfert, A.; Hirschnitz-Garbers, M.; Walther, J.; Hinzmann, M.; Brunnow, B.; Langsdorf, S.; Schiller, G. (2020): Infrastruktorkopplungen als Beiträge zur Nachhaltigkeitstransformation: Einflussfaktoren und Handlungsmöglichkeiten. Teilbericht des Vorhabens: „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“. UBA-Texte 02/2020, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J. (2010): Infrastruktur und Stadtentwicklung. Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung, Berlin.
- Loorbach, D., Frantzeskaki, N. und Lijnis Huffenreuter, R. (2015): Transition Management: Taking Stock from Governance Experimentation. *J. Corp. Citizen*: 48-66. doi:10.9774/GLEAF.4700.2015.ju.00008.
- Loorbach, D., Frantzeskaki, N. und Thissen, W. (2010): Introduction to the special section: Infrastructures and transitions. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 77: 1195–1202. doi:10.1016/j.techfore.2010.06.001.
- Moss, T. (2014): Socio-technical Change and the Politics of Urban Infrastructure: Managing Energy in Berlin between Dictatorship and Democracy. *Urban Studies*, 51(7): 1432-1448.
- Olfert, A.; Brunnow, B.; Schiller, G.; Walther, J.; Hirschnitz-Garbers, M.; Langsdorf, S.; Hölscher, K.; Wittmayer, J.M. (2020): Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen. Teilbericht des Vorhabens: „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“. UBA-Texte 01/2020, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Trapp, Jan Hendrik, et al. (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. UBA Texte 64/2017, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Berlin: WBGU.