

TEXTE 99/2020

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 48 102 0

## **Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen**

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

von

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

Jörg Walther  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus

Martin Hirschnitz-Garbers, Susanne Langsdorf  
Ecologic Institut, Berlin

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

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:**

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung  
Weberplatz 1  
01217 Dresden

**Abschlussdatum:**

Dezember 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.

### **Kurzbeschreibung: Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen**

Im Rahmen des UBA-Vorhabens Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen (TRAFIS) wurden Wirkungen, Prozesse und Unterstützungsmöglichkeiten bei der Umsetzung innovativer Infrastrukturkopplungen betrachtet. Im Fokus stehen die Sektoren Wasser, Abwasser, Energie, Verkehr, Abfall und IKT. Der vorliegende Band untersucht Wirkungen von innovativen Kopplungen von Infrastrukturen in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit, Resilienz, Ressourceneffizienz sowie die soziale und ökonomische Verträglichkeit. Ein Nachhaltigkeitskonzept mit 26 Kriterien wurde entwickelt und in einer Delphi-basierten Befragung mit über 100 Expert\*innen als „Nachhaltigkeitscheck“ erprobt. Die Ergebnisse der Bewertung zeigen spezifische Stärken und Schwächen ausgewählter gekoppelter Infrastrukturlösungen. Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: (1) Infrastrukturkopplungen verfügen über das Potential, die erwartete Leistung zu erbringen. Durch Hebung bisher ungenutzter Synergien können sie teilweise höhere Leistungspotentiale erreichen als nicht gekoppelte Systeme. Jedoch führen Kopplungen in der Regel zu deutlich höherer technischer und organisatorischer Komplexität. (2) Die Qualität der Infrastrukturdienstleistung wird durch die Kopplung meist nicht beeinträchtigt. Infrastrukturkopplungen sind in den meisten Fällen für Anbieter wirtschaftlich tragfähig. Jedoch erfordern die Änderungen oft Investitionen durch die Nutzer, beispielsweise die Kunden – z. B. wenn Gebäudetechnik angepasst werden muss. (3) Für die betrachteten Infrastrukturkopplungen werden meist neutrale bis deutlich positive Wirkungen auf Primärenergiebedarf, Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen erwartet. Leicht negativ werden Wirkungen in Bezug auf Bodenbelastungen, Bedarf an Rohstoffen allgemein und kritischen Rohstoffen eingeschätzt. Der Flächenbedarf könnte teils deutlich ansteigen. (4) Durch neue Kopplungen von Infrastruktursystemen können neue Abhängigkeiten entstehen. Jedoch können Infrastrukturkopplungen durch Verbesserung von Redundanz, Modularität und Puffervermögen der Systeme auch die lokale oder regionale Versorgungssicherheit stärken.

### **Abstract: Sustainability potentials of innovative, coupled infrastructures - Sub-project report: "Transformation towards sustainable, coupled infrastructures"**

In the scope of the UBA project Transformation towards Sustainable, Coupled Infrastructures (TRAFIS), effects, processes and support options for the implementation of innovative infrastructure couplings were examined. The focus is on the water, wastewater, energy, transport, waste and ICT sectors. This volume deals with the potential effects of innovative coupled infrastructures on performance, resilience, resource efficiency and social and economic viability. A sustainability concept including 26 criteria was developed and tested as a "sustainability check" in a Delphi-based approach with over 100 experts. The results of the evaluation show specific strengths and weaknesses of coupled infrastructure solutions. In summary, the following conclusions can be drawn: (1) Infrastructure couplings have the potential to deliver the expected performance. By leveraging previously unused synergies, they can even achieve higher performance potentials than non-coupled systems. However, coupling often leads to significantly higher technical and organizational complexities of the infrastructure systems. (2) The quality of infrastructure services is generally not impaired by coupling. In most cases, infrastructure interconnections are economically viable for providers. However, the changes often investments by the users incl. costumers – e.g. if building technology has to be adapted. (3) For the infrastructure couplings under consideration, neutral to clearly positive effects on primary energy demand, total energy demand and greenhouse gas emissions are usually expected. Slightly negative effects are estimated with regard to demand for raw materials in general and critical raw materials. In some cases, land consumption increases significantly. (4) Coupling of infrastructure systems can lead to new dependencies. However, infrastructure interconnections can also strengthen local or regional supply security by improving redundancy, modularity and buffering capacity of the systems.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	17
Abkürzungsverzeichnis.....	19
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	29
I Systematisierung des Untersuchungsgegenstands.....	36
1 Hintergrund und Ziele.....	36
2 Gekoppelte Infrastrukturen.....	40
2.1 Infrastrukturen.....	40
2.1.1 Sektoren, Teil-Sektoren.....	40
2.1.2 Teil-Systeme.....	42
2.1.3 Räumliche und funktionale Systemgrenzen.....	43
2.2 Infrastrukturkopplungen.....	44
2.2.1 Arten von Kopplungen.....	44
2.2.2 Dependenz vs. Interaktion von Infrastrukturen.....	45
2.2.3 Innersektorale und intersektorale Kopplungen.....	48
2.3 Innovative Infrastrukturkopplungen.....	49
2.4 Cluster gekoppelter Infrastrukturen.....	51
2.4.1 Cluster nach funktionaler Zusammengehörigkeit.....	51
2.4.2 Cluster nach politischen Dimensionen.....	52
II Nachhaltigkeitscheck.....	54
3 Ziele und Vorgehen für die Durchführung des Nachhaltigkeitschecks.....	54
4 Nachhaltigkeits-Kriterien.....	56
4.1 Bewertungsdimensionen.....	56
4.2 Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastrukturkopplungen.....	61
4.2.1 Leistungsfähigkeit und Funktionalität.....	63
4.2.2 Soziale und ökonomische Verträglichkeit.....	64
4.2.3 Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz.....	65
4.2.4 Resilienz.....	67
4.3 Kriterienset zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastrukturen.....	74
4.4 Operationalisierung der Bewertungskriterien.....	80
4.4.1 Fragestellungen und Werteskala.....	80
4.4.2 Tests und Pre-Tests.....	81

4.4.3	Umsetzung in einem Online-Werkzeug .....	81
5	Realisierung des Delphi-basierten Nachhaltigkeitschecks .....	83
5.1	Methodische Umsetzung des Delphi-Ansatzes.....	83
5.2	Synthetische Fälle .....	86
5.2.1	Synthetische Fälle gekoppelter Infrastrukturen .....	86
5.4	Durchführung der Befragung .....	91
5.4.1	Delphi-Befragung Runde 1.....	91
5.4.2	Delphi-Befragung – Runde 2 .....	93
6	Auswertung der Ergebnisse des Nachhaltigkeitschecks .....	95
6.1	Ziel und Vorgehen bei der Ergebnisauswertung.....	95
6.2	Lesehilfe .....	95
6.3	Desaggregierte Ergebnisdarstellung .....	97
6.4	Gesamtreflexion.....	101
7	Praktikabilität des Nachhaltigkeitschecks .....	106
7.1	Anwendbarkeit der Delphi-Methode für den Nachhaltigkeitscheck innovativer Infrastrukturlösungen .....	106
7.2	Akzeptanz des methodischen Zugangs .....	106
7.3	Mögliche Adaption der Delphi-Methode.....	107
7.4	Anwendbarkeit von Nachhaltigkeitskonzept und Kriterienset.....	108
7.5	Durchführungsaufwand der Befragung .....	116
7.6	Anwendung des Delphi-basierten Nachhaltigkeitsbewertung in realen Fällen .....	117
7.6.1	Fallbeispiel Rödental – Demand-Side-Management in der kommunalen Kläranlage ....	118
7.6.2	Fallbeispiel Stadtwerke Augsburg – Mobilitätsapp .....	122
III	Ergebnisse aus den Fällen .....	125
8	Ergebnisse aus den Einzelfällen.....	126
8.1	Fall 1.1 Zentrale Wärme- und Abwärmegewinnung aus Abwasser.....	127
8.1.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	130
8.1.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	135
8.2	Fall 1.2 Dezentrale Wärmegewinnung in Abwassernetzen .....	137
8.2.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	139
8.2.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	144
8.3	Fall 2.1 Industrie- und Gewerbe-Abwärme in Wärmenetzen.....	147
8.3.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	149
8.3.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	154

8.4	Fall 2.2 Einspeisung solarthermischer Energieerzeugung in Wärmenetzen.....	157
8.4.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	159
8.4.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	163
8.5	Fall 3.1 Steuerung hybrider Energie-Netze im lokalen/regionalen Maßstab .....	166
8.5.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	169
8.5.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	174
8.6	Fall 3.2 Virtuelle Kraftwerke - Schwarmgesteuerter Betrieb von Erzeugungsanlagen zur Stromlastregulierung .....	179
8.6.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	182
8.6.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	187
8.7	Fall 4.1 Stromnetzstabilisierung durch Einbindung Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge .....	192
8.7.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	195
8.7.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	200
8.8	Fall 4.2 Induktions-basiertes Laden von Fahrzeugen in Bereichen des fließenden Verkehrs (z. B. Straßenkreuzungen).....	204
8.8.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	206
8.8.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	211
8.9	Fall 5.1 Power to Heat (PtH) - Speicherung von Überschussstrom in Wärmenetzen.....	213
8.9.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	216
8.9.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	220
8.10	Fall 5.2 Power to Liquid (PtL) – Elektrolyse von regenerativem Strom in Wasserstoff .....	224
8.10.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	227
8.10.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	232
8.11	Fall 6.1 App-basiertes Management virtueller Fuhrparks (Zusammenschluss privater Fahrzeuge zum Carsharing-Modell) .....	235
8.11.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	238
8.11.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	242
8.12	Fall 6.2 App-gestütztes Fuhrpark-Management im free-floating Carsharing .....	245
8.12.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	248
8.12.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	252
8.13	Fall 7.1 Intelligente Niederschlagswasserbewirtschaftung.....	255
8.13.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	258
8.13.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	262

8.14	Fall 7.2 Kontrollierter Überstau – Management von Überlastungssituationen im Kanalnetz in Kombination mit Multifunktions-Freiflächen im urbanen Raum.....	265
8.14.1	Nachhaltigkeitsbewertung.....	268
8.14.2	Weitere Hinweise und Anmerkungen.....	273
9	Quellenverzeichnis .....	277
A	Anhang .....	284
	Anhang 1:Überblick über relevante Sektoren und Teil-Sektoren .....	284
	Anhang 2:Überblick über innovative Infrastruktorkopplungen .....	287
	Anhang 3:Zuordnung von Kopplungen zu den Clustern nach „politischen Dimensionen“ .....	298
	Anhang 4:Zuordnung von Kopplungen zu den Clustern nach „funktionaler Zusammengehörigkeit“ .....	302

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fallbeispielansatz im TRAFIS-Projekt.....	37
Abbildung 2:	Beziehung der Basissektoren + IKT untereinander.....	49
Abbildung 3:	Entwicklung der Nachhaltigkeitskriterien in TRAFIS .....	59
Abbildung 4:	Resilienzkonzept und potenzielle Entwicklung von Resilienz in der Zeit bei gegebenen Ressourcen.....	68
Abbildung 5:	Resilienz als Kapazität eines Systems, Störungen zur absorbieren und sich wiederherzustellen.....	69
Abbildung 6:	Beispielhafte Resilienzmatrix für Stressszenarien.....	70
Abbildung 7:	Schematischer Ablauf einer zweistufigen Delphi-Befragung .....	86
Abbildung 8:	Ablaufschema der Durchführung der Delphi-Befragung.....	92
Abbildung 9:	Legende zu Abbildung 10 bis Abbildung 13:.....	95
Abbildung 10	Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Leistungsfähigkeit“ .....	97
Abbildung 11	Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	98
Abbildung 12:	Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	99
Abbildung 13	Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung“ ....	100
Abbildung 14:	Bewertungsmuster der 14 untersuchten synthetischen Fälle .....	102
Abbildung 15:	Nachhaltigkeits-Profile unterscheiden sich Fall-spezifisch – Beispielfälle 1.1 und 3.2.....	104
Abbildung 16:	Fallspezifisch unterschiedliche Spannweiten der Einschätzungen – am Beispiel der Fälle 3.1 und 5.2 .....	105
Abbildung 17:	Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Leistungsfähigkeit“.....	112
Abbildung 18:	Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Versorgungssicherheit“.....	113
Abbildung 19:	Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Ökonomische und soziale Verträglichkeit“ .....	114
Abbildung 20:	Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung“ .....	115
Abbildung 21:	Ergebnisgrafik – Nachhaltigkeitsprofil DSM Kläranlage Rödental.....	119
Abbildung 22	Inner-sektorale Kopplung im Systems der Mobility-APP der SWA Augsburg ....	122
Abbildung 23:	Ergebnisgrafik – Nachhaltigkeitsprofil swa Augsburg .....	122
Abbildung 24:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Leistungsfähigkeit“...	130
Abbildung 25:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	131
Abbildung 26:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	132
Abbildung 27:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	133
Abbildung 28:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 1.1 .....	134
Abbildung 29:	Bewertungsprofil „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 1.1 .....	134
Abbildung 30:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Leistungsfähigkeit“...	139

Abbildung 31:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	140
Abbildung 32:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	141
Abbildung 33:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	142
Abbildung 34:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 1.2 .....	143
Abbildung 35:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 1.2.....	143
Abbildung 36:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	149
Abbildung 37:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	150
Abbildung 38:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	151
Abbildung 39:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	152
Abbildung 40:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 2.1 .....	153
Abbildung 41:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 2.1 .....	153
Abbildung 42:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	159
Abbildung 43:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	159
Abbildung 44:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	160
Abbildung 45:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	161
Abbildung 46:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 2.2 .....	162
Abbildung 47:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 2.2 .....	162
Abbildung 48:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	169
Abbildung 49:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	170
Abbildung 50:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	171
Abbildung 51:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	172
Abbildung 52:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 3.1 .....	173
Abbildung 53:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 3.1 .....	173
Abbildung 54:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	182
Abbildung 55:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	183
Abbildung 56:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	184
Abbildung 57:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	185
Abbildung 58:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 3.2.....	186

Abbildung 59:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 3.2.....	186
Abbildung 60:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	195
Abbildung 61:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	196
Abbildung 62:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	197
Abbildung 63:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	198
Abbildung 64:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 4.1.....	199
Abbildung 65:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 4.1.....	199
Abbildung 66:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	206
Abbildung 67:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	207
Abbildung 68:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	208
Abbildung 69:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	209
Abbildung 70:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 4.2.....	210
Abbildung 71:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 4.2.....	210
Abbildung 72:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	216
Abbildung 73:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	216
Abbildung 74:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	217
Abbildung 75:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	218
Abbildung 76:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 5.1.....	219
Abbildung 77:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 5.1 .....	219
Abbildung 78:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	227
Abbildung 79:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	228
Abbildung 80:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	229
Abbildung 81:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	230
Abbildung 82:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 5.2.....	231
Abbildung 83:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 5.2 .....	231
Abbildung 84:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	238
Abbildung 85:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	238
Abbildung 86:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	239

Abbildung 87:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	240
Abbildung 88:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 6.1.....	241
Abbildung 89:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 6.1.....	241
Abbildung 90:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	248
Abbildung 91:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	248
Abbildung 92:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	249
Abbildung 93:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	250
Abbildung 94:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 6.2 .....	251
Abbildung 95:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 6.2.....	251
Abbildung 96:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	258
Abbildung 97:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	258
Abbildung 98:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	259
Abbildung 99:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	260
Abbildung 100:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 7.1 .....	261
Abbildung 101:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 7.1.....	261
Abbildung 102:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Leistungsfähigkeit“ ...	268
Abbildung 103:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ .....	269
Abbildung 104:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ .....	270
Abbildung 105:	Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Versorgungssicherheit“ .....	271
Abbildung 106:	Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 7.2.....	272
Abbildung 107:	Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 7.2.....	272

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die Basissektoren + IKT und die in TRAFIS betrachteten Teil-Sektoren .....	42
Tabelle 2:	Gegenüberstellung der Cluster gekoppelter Infrastrukturen .....	53
Tabelle 3:	Bezug der Bewertungsdimensionen zu Dimensionen der Nachhaltigkeit, Prinzipien der Nachhaltigkeit und dem „infrastrukturpolitischen Zieldreieck“ .....	60
Tabelle 4:	Gegenüberstellung der Bewertungsansätze von VERUM 2.0 (UBA) und Nachhaltigkeitscheck (TRAFIS) .....	62
Tabelle 5:	Ableitung der Resilienzkriterien in TRAFIS .....	71
Tabelle 6:	26 Nachhaltigkeitskriterien für die Bewertung gekoppelter Infrastrukturen .....	75
Tabelle 7:	Fallauswahl für die Bewertung im Nachhaltigkeitscheck.....	88
Tabelle 8:	Differenzierung der Tätigkeitsperspektiven von Expertinnen und Experten .....	90
Tabelle 9:	Zusagen von Expertinnen und Experten nach Tätigkeitsperspektiven .....	91
Tabelle 10:	Teilnahme von Expertinnen und Experten nach Tätigkeitsperspektiven .....	93
Tabelle 11:	Übersicht bezüglich Anzahl und Art der Rückmeldungen aus der 2. Befragungsrunde .....	94
Tabelle 12:	Antwortverhalten der Expertinnen und Experten in Bezug auf die einzelnen Fragen .....	109
Tabelle 13:	Gegenüberstellung der Anzahl der Teilnahmen durch die Expertinnen und Experten an den gebundenen und offenen Fragestellungen .....	111
Tabelle 14:	Gegenüberstellung des Aufwands der Bewertungsmethode für die Erstanwendung und bei einer möglichen Wiederholungsanwendung in der Praxis.....	116
Tabelle 15:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	127
Tabelle 16:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 1.1 .....	129
Tabelle 17:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	137
Tabelle 18:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 1.2 .....	138
Tabelle 19:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	147
Tabelle 20:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 2.1 .....	148
Tabelle 21:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	157
Tabelle 22:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 2.2 .....	158
Tabelle 23:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	166

Tabelle 24:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 3.1.....	168
Tabelle 25:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	179
Tabelle 26:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 3.2.....	181
Tabelle 27:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	192
Tabelle 28:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 4.1.....	194
Tabelle 29:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	204
Tabelle 30:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 4.2.....	205
Tabelle 31:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	213
Tabelle 32:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 5.1.....	215
Tabelle 33:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	224
Tabelle 34:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 5.2.....	226
Tabelle 35:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	235
Tabelle 36:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 6.1.....	237
Tabelle 37:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	245
Tabelle 38:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 6.2.....	247
Tabelle 39:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	255
Tabelle 40:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 7.1.....	257
Tabelle 41:	Zusammensetzung Experten-Panel .....	265
Tabelle 42:	Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 7.2.....	267

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AVV</b>	Abfallverzeichnis-Verordnung
<b>BBSR</b>	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<b>BDEW</b>	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<b>BMUB</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
<b>BMVI</b>	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
<b>BNetzA</b>	Bundesnetzagentur
<b>CAPEX</b>	Capital expenditures
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CsgG</b>	Carsharinggesetz
<b>Delphi</b>	Delphi-Befragung
<b>DGNB</b>	Deutsche Gesellschaft für nachhaltige Bauen e.V.
<b>DIHK</b>	Deutscher Industrie- und Handelskammertag
<b>DL</b>	Dienstleistung
<b>DSM</b>	Demand Side Management
<b>DWA</b>	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V.
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EEG</b>	Erneuerbare Energien Gesetz
<b>EmoG</b>	Elektromobilitätsgesetz
<b>EnWG</b>	Energiewirtschaftsgesetz
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>HS-Ebene</b>	Hausanschluss-Ebene
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnologien
<b>IÖR</b>	Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
<b>KA</b>	Kläranlage
<b>KLARIS</b>	Notwendigkeiten und Möglichkeiten zur klimaresilienten und zukunftsfähigen Ausgestaltung von nationalen und grenzübergreifenden Infrastrukturen – Projekt/Studie vom Umweltbundesamt
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MWh</b>	Megawattstunde
<b>OPEX</b>	Operation Expenses
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personen Nahverkehr
<b>OTP</b>	Over-The-Top-Dienste
<b>P2P</b>	Peer to Peer Carsharing

<b>PtH</b>	Power to Heat
<b>PtL</b>	Power to Liquid
<b>PtX</b>	Power to X
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>SDG</b>	Sustainable Development Goals
<b>SRK</b>	Stauraumkanäle
<b>SRU</b>	Sachverständigenrat für Umweltfragen
<b>SWR Rödental</b>	Stadtwerke Rödental
<b>THG</b>	Treibhausgasemissionen
<b>UNWCED</b>	United Nations World Commission on Environment and Development
<b>V2X</b>	Vehicle to everything
<b>Verum</b>	Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes

## Zusammenfassung

Im Rahmen des UBA-Vorhabens „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“ (TRAFIS) wurden Wirkungen, Prozesse und Unterstützungsmöglichkeiten bei der Umsetzung innovativer Infrastruktorkopplungen betrachtet.

Infrastruktursysteme zur Erfüllung von Funktionen der Daseinsvorsorge stehen unter einem hohen Veränderungs- und Erwartungsdruck aufgrund sich verändernder gesellschaftlicher Zielstellungen. Herausforderungen in Bezug auf Klimawandel, steigender Ressourcenverbrauch, die langfristigen Prozesse der Urbanisierung und des demographischen Wandels geben neue Zielstellungen vor, denen auch die Entwicklung der Infrastrukturen unterliegt. Solche übergreifenden Zielstellungen sind zum Beispiel Klimaanpassung, Energiewende einschließlich Atomausstieg, Kohleausstieg, Mobilitätswende, Ressourceneffizienz oder Digitalisierung – immer bei Wahrung der Daseinsvorsorge und der sozialen Gerechtigkeit. Die neuen technischen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologien, einschließlich der zunehmenden Vertrautheit der Nutzer in deren Anwendung, führen zusammen mit den neuen Zielen zu einer großen Veränderungsdynamik hin zu mehr Effizienz, Komfort und gänzlich neuen Dienstleistungen.

Grundsätzlich ist die Steigerung der Effizienz seit jeher ein zentrales Interesse der Entwickler, Betreiber und Nutzer von Infrastrukturen. Neuer ist die Erwartung einer höheren Nachhaltigkeit bei der Erbringung von Infrastrukturdienstleistungen. Dies erfordert eine komplexe Betrachtung und Abwägung von einer Vielfalt von Zielen. Das hohe Niveau technischer Infrastrukturen in Deutschland lässt wenig Raum, innerhalb der etablierten Systeme Ressourceneinsparungen alleine durch Effizienzsteigerungen zu erzielen. Es stellt sich somit die Frage nach einschneidenderen Veränderungen in etablierte, bisher überwiegend sektoral angelegte Systeme. Ein denkbarer Weg, Ressourcenverbräuche und Emissionen deutlicher zu reduzieren und zugleich die soziale Verträglichkeit von Infrastrukturdienstleistungen im Blick behalten, könnte in der Transformation etablierter Infrastrukturen hin zu gekoppelten Systemen liegen, wenn dadurch Synergien ermöglicht und genutzt werden. Die hier adressierte Transformation unterscheidet sich damit deutlich von üblichen Anpassungs- und Ressourceneffizienzkonzepten, die in der Regel auf eine Optimierung bestehender Systeme abzielen. Transformation im hier zugrundeliegenden Verständnis beinhaltet grundlegende Änderungen der Art und Weise, wie Infrastrukturdienstleistungen erbracht und genutzt werden, die deutlich über das Maß von Optimierungen bestehender Systeme hinausgehen.

Grundlegende Veränderungen erfordern technische und soziale Innovationen. Neuartige Infrastruktorkopplungen als ein Kernelement der hier thematisierten Veränderungsdynamik können beides beinhalten. Das wird im Verständnis von Infrastrukturen als soziotechnische Systeme unterstrichen. Infrastruktorkopplungen können Teil einer Nachhaltigkeitstransformation sein, wenn sie helfen, die gesellschaftlichen Ziele und Normen auf einem höheren Nachhaltigkeitsniveau zu ermöglichen. Dabei verlaufen die Veränderungsdynamiken zwischen Evolution und Disruption. Die durch die Veränderung erzeugte Unsicherheit bezüglich der Funktionsweisen, Betriebsmodi, Kooperationen, Wirkungen und möglichen Nebenwirkungen ist zeitlich begrenzt und bietet Ansatzpunkte sowohl für die Ausbildung und Materialisierung neuer Risiken als auch für deren Management.

Der vorliegende Band untersucht potenzielle Wirkungen innovativer gekoppelter Infrastrukturen in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit, Resilienz (Versorgungssicherheit), Ressourceneffizienz (incl. Ressourcenschonung) sowie auf die soziale und ökonomische Verträglichkeit. Ein Nachhaltigkeitscheck für gekoppelte Infrastrukturen wird vorgestellt und am Beispiel ausgewählter Kopplungen erprobt, um fallspezifisch Potenziale sowie mögliche Unsicherheiten und Risiken innovativer gekoppelter Infrastrukturlösungen aufzuzeigen. Das Ziel des Nachhaltigkeitschecks ist es, durch ein differenziertes Bild der jeweiligen Potenziale und Herausforderungen von innovativen Kopplungen neue Ansatzpunkte für die Entwicklung von Rahmensetzungen und Handlungsstrategien zu schaffen, die eine

nachhaltige Entwicklung mithilfe innovativer Infrastrukturlösungen unterstützen können. Die Entwicklung von Rahmensetzungen und Handlungsstrategien selbst ist nicht Teil des Vorhabens.

In einer Delphi-basierten Experten-Befragung werden strukturiert Einschätzungen ausgewählter Expertinnen und Experten in Bezug auf Nachhaltigkeitswirkungen in den genannten Dimensionen generiert. Die Befragung basiert auf einem eigens für die Untersuchung gekoppelter Infrastrukturen entwickelten und operationalisierten Nachhaltigkeitskonzept.

Eine Infrastruktorkopplung liegt im Verständnis von TRAFIS dann vor, wenn zwischen Teil-Systemen eines Sektors oder mehrerer Sektoren Abhängigkeiten bzw. Interaktionen bestehen, die Auswirkungen auf die Art und Weise des Betriebs der jeweiligen Infrastrukturen haben. Der Übergang zwischen Abhängigkeit im Sinne einer echten Dependenz hin zu einem lediglich als „Interaktion“ zu charakterisierendem Zusammenwirken ohne echte Abhängigkeiten ist in der Realität neuartiger Kopplungen gleitend. Viele der identifizierten Kopplungen werden zunächst als redundante Systemkomponenten eingeführt (z. B. bei der Einbindung alternativer Energien) und könnten nach deren Etablierung durch den Wegfall von Redundanzen zu echten Abhängigkeiten führen. In anderen Fällen bestehen jedoch auch von Anfang an zwingende Abhängigkeiten, z. B. wenn eine neue Dienstleistung (wie neue Formen des Carsharing) zwingend auf dem Funktionieren der Informations- und Kommunikations-Infrastruktur beruht.

Wir unterscheiden einseitige und wechselseitige Dependenzen bzw. Interaktionen. Einseitige Dependenzen liegen vor, wenn nur eine der z. B. zwei Infrastrukturen von der Funktion der anderen abhängig ist, die andere aber unabhängig bleibt. Von wechselseitigen Dependenzen (Interdependenzen) kann gesprochen werden, wenn die beteiligten Infrastrukturen wechselseitig von der Funktion der jeweils anderen abhängig sind.

Neben den typischerweise mit dem Begriff der Sektorkopplung angesprochenen intersektoralen Kopplungen beziehen wir auch neuartige innersektorale Interaktionen mit ein – z. B. solche mit neuartigen Teil-Systemen in bestehenden Infrastrukturen. Kopplungen können demnach auf drei Systemebenen relevant sein:

Typ 1: Sektor X  $\leftrightarrow$  Sektor Y: Teilsysteme aus mindestens zwei verschiedenen Sektoren sind funktional miteinander gekoppelt (z. B. Teilsysteme aus den Sektoren Abwasserentsorgung und Energieversorgung).

Typ 2: Teil-Sektor X.1  $\leftrightarrow$  Teil-Sektor X.2: Teilsysteme aus mindestens zwei Teil-Sektoren des gleichen Sektors sind funktional miteinander verbunden (z. B. Wärme und Strom im Energie-Sektor).

Typ 3: Teil-System X.1.1.  $\leftrightarrow$  Teil-System X.1.2: Mindestens zwei Teilsysteme des gleichen Teil-Sektors sind funktional miteinander verbunden (z. B. Stromerzeugung und Stromspeicherung).

Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Basis-Sektoren *Trinkwasserversorgung*, *Abwasserentsorgung*, *Energieversorgung* und *Verkehr*, deren Strukturen und Dienste für sich stehend und in der Kopplung zu den anderen (Teil-)Systemen betrachtet werden. Zusätzlich wird die *Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)* als verbindender Sektor berücksichtigt. Das heißt, die physischen (Teil-)Systeme der Informations- und Kommunikationstechnologien (z. B. Kabel- und Funknetze, Serverknoten etc.) erscheinen nur teilweise als eigenständige Komponenten von Kopplungen (z. B. wenn es um die Potenziale der Abwärmenutzung bei Servern geht).

Kopplungen finden meist auf der Ebene der Teil-Systeme statt. Innerhalb der Sektoren und Teil-Sektoren erfüllen Teil-Systeme unterschiedliche Aufgaben. Die betrachteten Kopplungen können auf verschiedenen räumlichen Ebenen wirken und werden durch unterschiedliche Akteure auf unterschiedlichen Ebenen (z. B. durch die öffentliche Verwaltung) verantwortet.

Als kleinste relevante räumliche Einheit für die Bereitstellung einer Infrastruktur betrachten wir das Quartier (relevant z. B. für Nahwärme- oder Nahkältenetze). Grundsätzlich können auch grundstücksbezogene Systeme eine Relevanz entfalten. Dies kann dann der Fall sein, wenn z. B. eine lokale Konzentration umgesetzter dezentraler Konzepte (NASS, Photovoltaik, Solarthermie etc.) signifikante Wirkungen auf übergeordnete (zentrale, mind. auf Quartiersebene) Strukturen entfalten – z. B. durch Unter- oder Überlastung bestehender zentraler Infrastrukturen.

Kopplungen finden in vielfältigen Kombinationen statt. Eine Analyse und Querauswertung existierender Kopplungsprojekte erlaubt folgende Beobachtungen:

- ▶ Innovationen im Bereich der technischen Kopplungen sind zwischen den Sektoren nicht gleich verteilt. Die aktuell stärkste Innovationsdynamik ist in den Sektoren Energie und Verkehr zu beobachten.
- ▶ Auch die Innovationen in den anderen Sektoren bestehen größtenteils in der Interaktion mit dem Energiesektor.
- ▶ Kopplungen mit Beteiligung der IKT sind zumeist Kopplungen der Basis-Sektoren bzw. deren Teil-Sektoren untereinander mithilfe der technischen Möglichkeiten der IKT. Die Informations- und Kommunikationstechnologie tritt nicht primär als physische Infrastruktur auf, sondern als steuerndes, die Kopplung bzw. Vernetzung ermöglichendes Element. Dennoch kann auch hier oft von Abhängigkeiten von der Funktion von der IKT zugrundeliegenden technischen Infrastruktur gesprochen werden.
- ▶ Die neuen technischen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikations-Technologien erweisen sich bei vielen Kopplungen als die eigentliche innovationstreibende Kopplungsdynamik.

Der Nachhaltigkeitscheck folgt dem Ansatz einer prozessbegleitenden formativen Evaluierung. Ziel einer solchen Evaluierung ist es, Erkenntnisse in einen Entscheidungs- oder Umsetzungsprozess einzuspeisen – als eine Grundlage für zielgerichtete informierte Entscheidungen im Prozessmanagement. Der Nachhaltigkeitscheck bildet hierfür ein breites Spektrum von Nachhaltigkeitswirkungen gekoppelter Infrastrukturen ab und verdeutlicht Möglichkeiten und Notwendigkeiten, diese zu lenken. Diese Lenkungsabsicht spiegelt den formativen Anspruch des Ansatzes wider. Damit grenzt sich der Bewertungsanspruch deutlich von einer retrospektiven zusammenfassenden Evaluierung ab (summative Evaluation), die in erster Linie das erreichte Ergebnis feststellt.

Das Vorgehen zur Realisierung des Nachhaltigkeitschecks umfasst drei Schritte:

Schritt 1: Erarbeitung und Operationalisierung eines Konzepts für die Bewertung der Nachhaltigkeit von gekoppelten Infrastrukturen

Für die Durchführung des Nachhaltigkeitschecks wird ein für den Untersuchungsgegenstand (innovative gekoppelte Infrastrukturen) und die Fragestellung (überblickhaftes Abbilden differenzierter Nachhaltigkeitswirkungen) angepasstes Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt.

Das Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung basiert auf einem grundsätzlichen Nachhaltigkeitsverständnis, welches vier für die Fragestellung relevante Nachhaltigkeitsdimensionen definiert.:

Leistungsfähigkeit und Funktionalität

*Welchen Einfluss hat die Kopplung auf Leistungsfähigkeit und Betrieb der Infrastruktur? (3 Kriterien)*

Soziale und ökonomische Verträglichkeit

*Welchen Einfluss hat die Kopplung auf Preis und Kosten der bereitgestellten Dienstleistung? (4 Kriterien)*

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

*Welchen Einfluss hat die Kopplung auf den Verbrauch natürlicher Ressourcen durch die bereitgestellte Infrastrukturdienstleistung? (11 Kriterien)*

Resilienz bzw. Versorgungssicherheit

*Welchen Einfluss hat die Kopplung auf unterschiedliche Faktoren der Versorgungssicherheit im Kontext externer Stressoren, u. a. klimatischen Extremen? (8 Kriterien)*

## **Schritt 2: Erarbeitung und Operationalisierung eines Kriteriensets**

Die Nachhaltigkeitsdimensionen sind durch ein Set von **26 Kriterien** untersetzt. Die ausgewählten Kriterien berücksichtigen zahlreiche existierende Nachhaltigkeitsbewertungsansätze mit thematischem Bezug zur Fragestellung. Die Entwicklung eines eigenen Kriteriensatzes wurde erforderlich, da kein geeigneter auf die Fragestellung und den Untersuchungsgegenstand ausgerichteter Kriteriensatz recherchiert werden konnte.

Die Operationalisierung der Kriterien erfolgt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Perspektiven von Nutzern und Betreibern sowie aus Blickrichtung der an der Kopplung beteiligten Teil-Systeme. Aus diesem Grund sind die 26 Kriterien in 32 Fragestellungen aufgelöst, welche für die Anwendbarkeit mit Akteuren unterschiedlicher Hintergründe und Perspektiven operationalisiert werden. Die Bewertung der Kriterien erfolgt anhand einer vereinfachten fünfstufigen Bewertungsskala von +2 bis +1 für positive Wirkungen, 0 für neutrale/fehlende Wirkungen und von -1 bis -2 für negative Wirkungen. Die Antwortoption „keine Angabe“ ermöglicht die Stimmenthaltung, wenn eine Bewertung nicht abgegeben werden kann.

Schritt 3: Umsetzung der Delphi-basierten Bewertung anhand von 14 synthetischen Fällen

Die Umsetzung der Nachhaltigkeitschecks erfolgt mithilfe der Delphi-Methode. Diese bietet einen geeigneten methodischen Rahmen, um Experten-basierte Einschätzungen zu unsicheren Sachverhalten systematisch zu ermitteln. In der Delphi-basierten Befragung werden synthetische Fallkonstellationen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkungen bewertet. Beide Aspekte sind unsicher, da wenig oder kein empirisches Wissen vorhanden ist. Im Rahmen der nachhaltigkeitsorientierten Befragung wird die Praktikabilität und Anwendbarkeit des Nachhaltigkeitskonzeptes und der Nachhaltigkeitskriterien untersucht.

Gegenstand der Bewertung sind sog. synthetische Fälle, d. h. konstruierte Fallkonstellationen gekoppelter Infrastrukturen auf lokaler Ebene. Sie repräsentieren jeweils eine Kopplung von zwei Teil-Systemen, jedoch ohne einen konkreten Umsetzungsfall zu beschreiben. Dahinter verbirgt sich die Absicht, Nachhaltigkeitswirkungen einer Kopplung grundsätzlich zu betrachten, d. h. ohne Betrachtung spezifischer Standort-, Umsetzungs- oder Betriebsspezifika. Die 14 definierten synthetischen Fälle repräsentieren die zuvor ermittelte Breite von möglichen Kopplungen, spiegeln zugleich aber nur einen kleinen Ausschnitt der Kopplungsdynamiken wider.

Die eingesetzte Delphi-Methode erlaubt es, in einem für alle Beteiligten begrenzten Zeitaufwand, Aussagen über unsichere Sachverhalte zu generieren. Die gezielte Auswahl von Expertinnen und Experten mit fachlicher Expertise in Bezug auf Bewertungsgegenstand und Fragestellungen, jedoch mit unterschiedlichen Erfahrungshintergründen, ermöglicht es, das im entwickelten Nachhaltigkeitskonzept aufgefüllte Spektrum von Wirkungen einzufangen. Die Befragungsergebnisse sind sowohl für wissenschaftliche Analysen als auch im Sinne der Politikberatung wertvoll.

Die Umsetzung der Delphi-basierten Expertenbefragung stützt sich auf das vorab entwickelte Nachhaltigkeitskonzept und umfasst mehrere Teil-Schritte:

- ▶ Definition des Untersuchungsgegenstandes als sog. synthetische Fälle durch eine Kurzbeschreibung der Kopplung. Jeweils zwei thematisch zusammenhängende Fälle sind zu einer Gruppe zusammengefasst, um die Bewertung der 14 Fälle in 7 Expert\*innen-Panels zu ermöglichen. Das jeweilige zu einer Gruppe zusammengefasste Fall-Paar wird durch eine eigens für diese zwei Fälle akquirierte Expertengruppe (Panel) unabhängig voneinander bewertet.
- ▶ Identifikation und Akquisition geeigneter Expertinnen und Experten zur Besetzung der Panels. Die Personen werden gezielt nach zwei Kriterien ausgewählt: a) Fachliche Expertise bzw. Erfahrungshintergrund und die b) Zugehörigkeit zu einer von vier Perspektiven (Wissenschaft, techn. Planung, Betrieb, öffentliche Verwaltung). Das Ziel war es, jedes der sieben Expertenpanels mit ca. 15 Expertinnen und Experten zu besetzen und dabei alle vier Perspektiven möglichst ausgewogen zu repräsentieren.
- ▶ Durchführung der Befragung in zwei Runden  
Die technische Durchführung der Befragung stützt sich auf ein internet-basiertes Befragungstool. In der ersten Runde der Befragung hatten die Expertinnen und Experten die Gelegenheit, a) eine strukturierte Bewertung der Nachhaltigkeitswirkungen anhand der fünfstufigen Skala vorzunehmen als auch b) die persönlichen Erwägungen in offenen Fragestellungen mitzuteilen. In der zweiten Runde waren die Mitglieder der Panels eingeladen, vor dem Hintergrund einer Zwischenauswertung die eigenen Bewertungen aus der ersten Runde zu korrigieren bzw. zu ergänzen. In der zweiten Runde waren keine offenen Fragen vorgesehen.
- ▶ Auswertung der Bewertungen  
Eine Zwischenauswertung der Bewertungen aus der ersten Runde bildet die Basis für die zweite Runde. Diese erfolgte einerseits durch die Abbildung der Bewertungsergebnisse für jedes einzelne Kriterium desaggregiert in sogenannten gestapelten Balkendiagrammen und als aggregierte Nachhaltigkeitsprofile. Andererseits wurden die im offenen Teil der Befragung genannten Erwägungen zusammengestellt und offengelegt. Die Ergebnisse der beiden Runden wurden in der Endauswertung zusammengeführt.
- ▶ Praktikabilitäts-Check von Methode und Vorgehen  
Der Praktikabilitäts-Check erfolgt zum einen als Auswertung des Antwortverhaltens. Aus der Art, wie die Befragung und die einzelnen Kriterien angenommen wurden, wird auf die Anwendbarkeit der Kriterien, wie auch des Nachhaltigkeits- und Befragungskonzepts als Ganzes, geschlossen. Zum anderen wurde das Befragungskonzept im Rahmen von Expertenworkshops in Fallstudien laufender realer Innovations-Vorhaben auf lokaler Ebene in face-to-face-Konstellationen erprobt.

Die Ergebnisse der Bewertung zeigen Stärken und Schwächen ausgewählter gekoppelter Infrastrukturlösungen. Dies ermöglicht die Formulierung von differenzierten Trendaussagen zu den ausgewählten Nachhaltigkeitskriterien. Für viele Kriterien können aus den Einschätzungen mehr oder weniger klare Trends abgeleitet werden. Als Trend ist sowohl eine mehr oder minder deutliche Verbesserung oder Verschlechterung zu verstehen als auch eine häufig anzutreffende Wirkungsneutralität. In einigen Fällen ist eine vergleichsweise große Bandbreite der Einschätzungen festzustellen, aus der auf

eine größere Unsicherheit bis hin zur Polarisierung bei den Einschätzungen geschlossen werden kann. Die Wirkungen sind für die an einer Kopplung beteiligten Teil-Systeme stets spezifisch ausgeprägt.

Zusammenfassend kann auf folgende Trends geschlossen werden:

In den meisten Fällen wird den untersuchten Infrastruktorkopplungen grundsätzlich eine gute Leistungsfähigkeit bescheinigt. Zugleich wird durch die Infrastruktorkopplungen eine Zunahme der Komplexität der technischen und organisatorischen Komponenten der sozio-technischen Systeme attestiert.

- Infrastruktorkopplungen verfügen über das Potenzial, die erwartete Leistung zu erbringen und können durch die Hebung bisher ungenutzter Synergien teilweise über höhere Leistungspotenziale verfügen als herkömmliche nicht gekoppelte Systeme.
- Die innovativen Kopplungen von Infrastrukturen führen in der Regel zu einem Anstieg der technischen und organisatorischen Komplexität.

Mit den vermehrt positiv bewerteten Leistungspotenzialen korrespondieren die ebenfalls überwiegend positiv eingeschätzten Resilienzerhöhenden Potenziale wie Redundanz, Modularität und Puffervermögen. Zugleich korrespondieren die eher negativ gelagerten Einschätzungen zur technischen und organisatorischen Komplexität mit den Resilienz-Kriterien Störanfälligkeit und Dependenz.

- Infrastruktorkopplungen können durch Verbesserung von Redundanz, Modularität und Puffervermögen der Systeme die lokale/regionale Versorgungssicherheit stärken.
- Durch neue Kopplungen von Infrastruktursystemen können neue Abhängigkeiten (Dependenzen) entstehen.
- In vielen Fällen steigen Störanfälligkeit und Dependenz.
- Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Teil-Systemen sind meist einseitig ausgeprägt. Beiderseitige Dependenzen sind eher selten.

Für die Quantität und Qualität der Dienstleistung wird bei den ausgewählten gekoppelten Infrastrukturen grundsätzlich kein nennenswerter bis ein deutlich positiver Anstieg erwartet. Es werden auch ökonomische Konsequenzen, d.h. steigende Kosten, für Nutzer wie Betreiber und gleichzeitig eine höhere ökonomische Tragfähigkeit erwartet. Für die Nutzerseite wird jedoch mit teilweise deutlichen Investitionsbedarfen gerechnet, um die Potenziale der veränderten Infrastrukturdienstleistung nutzen zu können.

- Die Potenziale im Bereich der Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit können in der Regel ohne Einbußen bei der von Nutzer\*innen wahrgenommenen Qualität und Quantität der Dienstleistung erzielt werden.
- Der Betrieb der Infrastruktorkopplung verfügt über das Potenzial, für die Anbieter und die Nutzer\*innen ökonomisch tragfähig zu sein.
- Die nutzerseitige Inanspruchnahme der Infrastrukturdienstleistung kann teilweise spürbare Investitionen erfordern, z. B. wenn die Gebäudetechnik angepasst werden muss, um die Vorteile geringerer Temperaturen im Heizsystem nutzen zu können.

Die oft neutralen Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz können als positiv bewertet werden, wenn die Potenziale für Leistung, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

- Für die Kriterien Primärenergiebedarf, Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen wird eine überwiegend neutrale bis deutlich positive Wirkung erwartet.
- Die Wirkung der Kopplungen auf die meisten herangezogenen Ressourcenkriterien werden zumeist neutral bis oft leicht positiv bewertet – was im Kontext der erwarteten Leistungssteigerungen positiv konnotiert ist.
- Die Einschätzungen bezüglich der Bedarfe nach Flächen, Rohstoffen und kritischen Rohstoffen sind eher fallbezogen. Insbesondere die Flächennachfrage kann deutlich steigen.

Die Umsetzung des Nachhaltigkeitschecks im Rahmen der Delphi-Methode hat sich bewährt, weil sie eine Bewertung unsicherer Untersuchungsgegenstände ermöglicht.

Von den Expertinnen und Experten, die eine grundsätzliche Bereitschaft zur Teilnahme an der Befragung signalisiert hatten, haben ca. zwei Drittel tatsächlich an der Befragung teilgenommen und zumeist sowohl die qualitativ angelegten Bewertungen als auch die offenen Fragestellungen beantwortet.

Die insgesamt gute Akzeptanz der Befragung deutet darauf hin, dass die Operationalisierung des Befragungskonzepts geeignet war. Die insgesamt 115 eingebundenen Expertinnen und Experten hatten in der ersten Runde insgesamt 187 Bewertungen pro Kriterium abgegeben (bei zwei bewerteten Fällen pro Person). Bei den Kriterien sind keine „Ausfälle“ zu verzeichnen – d. h. Kriterien die grundsätzlich nicht angenommen wurden.

Die grundsätzliche praktische Anwendbarkeit des Nachhaltigkeits-Konzepts und der Kriterien belegt eine relativ geringe Nutzung der Antwort-Option „keine Antwort“. Der Befragungsabschnitt Leistungsfähigkeit/Funktionalität weist den geringsten Anteil von „keine Antwort“ Antworten auf. Im Mittelfeld liegen die beiden Themenbereiche Ressourcenschonung/-effizienz und Versorgungssicherheit mit einem durchschnittlichen Anteil um die 10 %. Der Themenbereich soziale und ökonomische Verträglichkeit weist mit 12,2 % „keine Antwort“ den größten, jedoch insgesamt relativ geringen Anteil einer nicht-Beantwortung aus.

Ein weiteres Indiz für die grundsätzliche Akzeptanz und die Relevanz des Nachhaltigkeitschecks ist die Akzeptanz der optional angebotenen offenen Fragestellungen. Die meisten beteiligten Expertinnen und Experten haben von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, ihre Bewertungen durch Beantwortung der offenen Fragestellungen zu untersetzen.

Die ausführliche Ergebnisdarstellung innerhalb dieses Berichtes gliedert sich wie folgt:

**Teil I** behandelt den Forschungsgegenstand „gekoppelte Infrastrukturen“. **Kapitel 1** führt kurz in das Thema ein. **Kapitel 2** definiert das Verständnis von gekoppelten Infrastrukturen und verdeutlicht das breite Spektrum denkbarer Kopplungen. Es leitet thematische Gruppen (Cluster) von Kopplungen ab, in denen aktuell die größten Kopplungsdynamiken bei Infrastrukturen vorzufinden sind.

**Teil II** entwickelt den methodischen Rahmen für die Durchführung und Auswertung des Nachhaltigkeitschecks. **Kapitel 3** führt in die Ziele des Nachhaltigkeitschecks ein und stellt 14 ausgewählte synthetische Fälle von Infrastrukturkopplungen vor. **Kapitel 4** entwickelt ein auf gekoppelte Infrastrukturen ausgerichtetes Nachhaltigkeitskonzept und untersetzt dieses durch 26 operationalisierte Kriterien zu einem mit der Delphi-Methode anwendbaren Kriterienset. **Kapitel 5** beschreibt das Vorgehen bei der Delphi-basierten Realisierung der Nachhaltigkeitsbewertung einschließlich Auswahl syntheti-

scher Fälle, Expertenauswahl und Durchführung der online-Befragung. **Kapitel 6** bietet einen Einzelfall-übergreifenden Blick auf die Ergebnisse der Untersuchung und führt in das Lesen der Einzelergebnisse zu den 14 untersuchten Fällen ein. **Kapitel 7** diskutiert die Praktikabilität von Kriterienset und Befragungskonzept.

**Teil III** beinhaltet die Ergebnisse für die 14 betrachteten Fälle. Die in **Kapitel 8** präsentierten Ergebnisse sind Fall für Fall in zwei Abschnitte untergliedert. Im ersten Abschnitt werden die Bewertungsergebnisse zu den 26 Nachhaltigkeits-Kriterien detailliert vorgestellt. Im zweiten Teil sind die weiterführenden Anmerkungen zu erforderlichen und ggf. einschränkenden Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Umsetzung der Kopplungen thematisch geordnet zusammengefasst.

Die im vorliegenden Band vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer Veröffentlichungsreihe, welche die Ergebnisse des Gesamtvorhabens umfassend dokumentiert:

1. Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (vorliegender Band).
2. Infrastrukturkopplungen als Beiträge zur Nachhaltigkeitstransformationen: Einflussfaktoren und Handlungsmöglichkeiten – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (Hölscher et al. 2020).
3. Erfolgsbedingungen und Prozessgestaltung/-begleitung für eine nachhaltige Umgestaltung von Infrastrukturkopplungen Infrastrukturen – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (Hirschnitz-Garbers et al. 2020).

## Summary

In the scope of the UBA project “Transformation towards Sustainable, Coupled Infrastructures” (TRAFIS), effects, processes and support options for the implementation of innovative infrastructure couplings were examined.

Infrastructure systems which fulfill functions of general interest are under high pressure to adapt in order to meet expectations of changing social objectives. Challenges related to climate change, increasing resource consumption, the long-term processes of urbanisation and demographic change are setting new goals, which also apply to the development of infrastructures. Such overarching objectives are, for example, climate adaptation, energy turnaround including nuclear phase-out, coal phase-out, mobility turnaround, resource efficiency or digitisation – and all this while still safeguarding services of general interest and social justice. A strong dynamic of change towards more efficiency, comfort and partly completely new services is driven by technical possibilities of information and communication technologies, the increasing familiarity of users with their application and the new goals.

Increasing efficiency has always been a central interest of developers, operators and users of infrastructures. What is new is the expectation of sustainability in the provision of infrastructure services. This requires a complex consideration and weighing of a multitude of goals. The high level of technical infrastructures in Germany leaves little room for resource savings within the established systems to be achieved solely through efficiency increases. This raises the question of fundamental changes in established, previously predominantly sectoral systems. One conceivable way to significantly reduce resource consumption and emissions and at the same time keep an eye on the social compatibility of infrastructure services lies in the transformation of established sectoral infrastructures to coupled systems and thus leveraging unused synergies. The transformation addressed here is different from conventional adaptation and resource efficiency concepts, which generally aim to “merely” optimise existing systems. Transformation in our understanding includes fundamental changes in the way infrastructure services are provided and used.

Such fundamental changes require technical and social innovations. Novel infrastructure couplings as a core element of the dynamics of change discussed here can achieve both. This is underlined in the understanding of infrastructures as socio-technical systems. Coupled infrastructure solutions can be part of a sustainability transformation if they help to achieve societal goals and norms at a higher sustainability level. Thereby, dynamics of change take place between evolution and disruption. The uncertainty generated by the change with regard to functionalities, operating modes, cooperation needs, various types of effects and possible side effects is limited in time and offers starting points both for the emerging of new risks but as well for their management.

**This volume examines the potential effects of innovative coupled infrastructures with regard to performance, resilience (security of supply), resource efficiency (including resource conservation) and social justice and economic viability.** A sustainability check for coupled infrastructures is presented and tested using hypothetical infrastructure couplings as an example, in order to identify case specific potentials as well as possible uncertainties and risks with regard to innovative coupled infrastructure solutions. The aim of the sustainability check is to create new starting points for the development of adapted regulations and action strategies that can support sustainable development with the help of innovative infrastructure linkages through a differentiated picture of the respective potentials and challenges of coupled solutions. The development of adapted regulations and strategies for action itself is not part of the research work presented.

In a Delphi-based expert survey, structured assessments of thoroughly selected experts are generated with regard to sustainability impacts in the dimensions performance, resilience, resource efficiency as well as social justice and economic viability. The survey is based on a sustainability concept developed and operationalised specifically for the investigation of coupled infrastructures.

According to TRAFIS, an infrastructure coupling is given when there are dependencies or interactions between sub-systems of different infrastructures which impact the way in which the infrastructure is operated and the service delivered. The transition between dependency in the sense of a real dependency and an interaction without real dependencies that can only be characterized as a "co-operation" is smooth in the reality of novel couplings. Many of the identified coupling options are introduced as redundant system components (e.g. for the integration of alternative energies) and could only lead to real dependencies after their establishment by eliminating redundancies in future. In other cases, however, there are also compelling dependencies from the outset, e.g. if a new service (such as new forms of car sharing) is necessarily based on the functioning of the information and communication infrastructure.

We distinguish between unilateral and reciprocal dependencies or interactions. Unilateral dependencies exist when, for example, only one of the two infrastructures is dependent on the function of the other, but the other remains independent. One can speak of reciprocal dependencies (interdependencies) if the infrastructures involved are mutually dependent on the function of the other.

In addition to the inter-sectoral couplings typically referred to by the term "sector coupling", we also include novel intra-sectoral interactions – e.g. those introducing novel sub-systems into existing infrastructures. Couplings can therefore be relevant on three system levels:

- ▶ Type 1: Sector X  $\leftrightarrow$  Sector Y: Sub-systems from at least two different sectors are functionally coupled with each other (e.g. sub-systems from the sewage disposal and the energy supply sectors).
- ▶ Type 2: Sub-sector X.1  $\leftrightarrow$  Sub-sector X.2: Sub-systems from at least two sub-sectors of the same sector are functionally linked (e.g. heat and electricity in the energy sector).
- ▶ Type 3: Sub-system X.1.1  $\leftrightarrow$  Subsystem X.1.2: At least two subsystems of the same sub-sector are functionally interconnected (e.g. when new storage capacities are introduced in electrical energy networks).

The work concentrates on the "basic sectors" of drinking water supply, sewage disposal, energy supply and transportation, the structures and services of which are considered in general and in coupling with the other (sub-)systems. In addition, information and communication technology (ICT) is considered mainly as a "connecting sector". The physical (sub-)systems of information and communication technologies (e.g. cable and radio networks, server nodes etc.) in only a few cases appear as primary components of couplings (e.g. when using the potentials of waste heat of servers).

Couplings are usually realised at the level of the sub-systems. Within the sectors and sub-sectors, sub-systems perform different tasks. The couplings under consideration can operate at different spatial levels (such as local or regional) and are the responsibility of different actors at different levels (e.g. public administration).

The smallest relevant spatial unit for the provision of an infrastructure as considered in TRAFIS is the neighbourhood (applicable e.g. for local heating or cooling networks). Generally, object-level systems can also develop relevance as infrastructures. This can be the case if, for example, a local concentration of decentralised solutions (novel sanitation systems, photovoltaics, solar thermal systems, etc.) develop significant effects for a higher-level system infrastructure (at least at neighbourhood level).

In general, infrastructure couplings are realised in a variety of combinations. An analysis and cross-evaluation of existing identified innovative coupled infrastructure solutions leads to the following observations:

- ▶ Innovations in the field of technical couplings are not equally distributed between the sectors. Currently strongest innovation dynamics are observed in the energy and transportation sectors.
- ▶ Coupled solutions in other sectors are also largely related to interactions with the energy sector.
- ▶ Couplings with participation of ICT are usually couplings between sub-systems of the basic sectors using the technical possibilities of ICT to interconnect processes and services. Information and communication technology usually does not appear primarily as a physical infrastructure, but rather as a controlling element that enables coupling or networking. Nevertheless, increasingly the function of the infrastructures depends on the functioning of ICT.
- ▶ The new technical possibilities of information and communication technologies often prove to be the central innovation-driving component for many innovative infrastructure couplings.

The sustainability check developed to track the sustainability effects of coupled infrastructures follows the approach of a process-accompanying formative evaluation. The aim of such an evaluation is to feed findings into decision-making or implementation processes as an information basis for informed and targeted management decisions. The sustainability check covers a broad spectrum of sustainability effects and illustrates the possibilities and necessities of steering them. This clearly distinguishes the pursued evaluation approach from a retrospective summative evaluation, which primarily describes achieved result but has no impact on management decisions.

The procedure for implementing the Sustainability Check comprises three main steps:

### **Step 1: Development and operationalisation of a concept for assessing the sustainability of coupled infrastructures**

For the implementation of the sustainability check, a sustainability assessment concept adapted to the object of investigation (innovative coupled infrastructures) and the question (differentiated sustainability screening) is developed.

The sustainability assessment framework is based on a general understanding of sustainability, which defines four sustainability dimensions as particularly relevant:

- ▶ **Performance and functionality**  
How is performance and operation of the infrastructure influenced by the coupling? (3 criteria)
- ▶ **Social and economic compatibility**  
How are prices and costs of the provided service influenced by the coupling? (4 criteria)
- ▶ **Resource Conservation and Efficiency**  
How is the consumption of natural resources influenced by the coupling? (11 criteria)
- ▶ **Resilience or security of supply**  
How does the coupling influence different factors of supply security in the context of external stressors, including climatic extremes? (8 criteria)

## Step 2: Development and operationalisation of a set of criteria

The sustainability dimensions are differentiated by a set of 26 criteria. The selected criteria take into account numerous existing sustainability assessment approaches with thematic reference to the question. The development of an adapted set of criteria became necessary because no suitable set of criteria could be identified that reflected the question of our investigation.

The operationalisation of the criteria reflects the perspectives of users and operators as well as that of involved sub-systems. For this reason, the 26 criteria are translated into 32 questions, which are operationalised for the application with actors, from different backgrounds and perspectives. The evaluation of the criteria is based on a simplified five-step scale of +2 to +1 for positive impacts, 0 for neutral/missing impacts and -1 to -2 for negative impacts. The answer option "no information" allows abstention if an assessment cannot be given.

## Step 3: Implementation of the Delphi-based assessment on the basis of 14 synthetic cases

The sustainability checks of 14 hypothetical cases are implemented using the Delphi method which provides a suitable methodological framework for a systematic consideration of expert-based assessments with regard to uncertain issues. In the Delphi-based survey, synthetic case constellations of not established infrastructure solutions are evaluated with regard to their potential sustainability effects. Both aspects are uncertain in terms that little or no empiric knowledge is available. As part of the sustainability oriented survey, the practicability and applicability of the sustainability concept and the sustainability criteria are examined.

Hypothetic cases are constructed to describe typical case constellations of coupled infrastructures at local level. Each case represents the coupling of two sub-systems, but without referring to a concrete implementation case. By applying hypothetical cases we pursue to derive potential sustainability effects of a coupled solution in general, i.e. not attached to a certain case with its specific location, implementation history or operation details. The 14 defined hypothetical cases represent the previously determined breadth of possible couplings, but at the same time reflect only a small section of the coupling dynamics.

The applied Delphi method makes it possible to generate statements about uncertain issues with limited time expenditure for all participants. A targeted selection of persons with expertise for both the object of assessment and the questions for various sustainability effects is a significant asset to capture the spectrum of impacts addressed by the developed sustainability concept. The survey results are therefore valuable for both scientific analyses and policy advice.

The implementation of the Delphi-based expert survey comprises several partial steps:

- ▶ **Definition of the object of investigation** as so-called hypothetical cases by a short description of the coupled solution. Two thematically related cases are combined to form 7 expert panels. Each group of two cases is evaluated by one panel acquired specifically for these two cases. Each case is assessed independently.
- ▶ **Identification and acquisition of suitable experts** for the panels. The persons are specifically selected on the basis of two main criteria: a) Technical expertise or experience with regard to the coupling and b) the representation of the four perspectives (science, technical planning, operation, public administration). The aim was to populate each of the seven expert panels with approx. 15 experts and to represent all four perspectives in as balanced a way as possible.

► **Implementing the survey** in two rounds

The technical conduct of the survey is based on an internet-based survey tool. In the first round of the survey, the experts had the opportunity a) to carry out a structured assessment of the sustainability impacts on the basis of the five-step scale and b) to communicate their personal considerations and additional information responding to open questions. In the second round, the members of the panels were invited to correct or supplement their own assessments from the first round against the background of an interim data analysis. No open questions were offered in the second round.

► **Analysis of the assessment**

An interim evaluation of the ratings from the first round forms the basis for the second round. Interim results were summarized on the one hand by providing the disaggregated ratings for each individual criterion in so-called stacked bar charts and in aggregated sustainability profiles. On the other hand, considerations behind the ratings compiled from the open part of the assessment were disclosed to all participants. Results from the second round were integrated in the previous rating to obtain the final result.

► **Practicability check** of method and procedure

The practicability check is carried out by reflecting on the response behavior of the personal involved in the panels. On the one hand, the acceptance of the survey in total and of the individual criteria are used as indicators for the applicability of the sustainability concept, the criteria and the procedure. On the other hand, the survey concept was tested in face-to-face constellations within the framework of expert workshops in case studies of ongoing real innovation projects at local level.

The results of the evaluation show strengths and weaknesses of selected coupled infrastructure solutions. This makes it possible to formulate differentiated trend statements with regard to sustainability impacts. For many criteria, more or less clear trends can be traced in the assessments. As a trend can be understood both, a more or less significant positive or negative development or the frequently encountered neutrality of impact. Some cases, however, show a comparatively wide range of assessments, which indicates greater uncertainty or even a polarisation in the assessments. Investigated effects in most cases are different for the sub-systems involved. In summary, the following trends can be concluded:

For most of the investigated infrastructure couplings generally good performance potential is expected. At the same time, an increase in the complexity of the technical and organisational components of the socio-technical systems is seen.

- Generally, infrastructure couplings have the potential to deliver the expected performance by leveraging previously untapped synergies, and can in some cases offer higher performance potential than conventional not coupled systems.
- The innovative coupling of infrastructures usually leads to an increase in technical and organisational complexity.

Along the positively assessed performance potentials also some resilience indicators such as redundancy, modularity and buffering capacity are predominantly positively assessed. At the same time,

the rather negative assessments of technical and organisational complexities correspond to the resilience criteria of susceptibility to faults and of dependency.

- Infrastructure coupling can strengthen local or regional security of supply by improving the redundancy, modularity and buffering capacity of the systems.
- New couplings introduce new dependencies between the coupled systems.
- In many cases, susceptibility to failure and dependency increase.
- Dependencies between the involved sub-systems are usually unilateral. Interdependencies are rather rare.

Selected coupled infrastructures show rather neutral to significantly positive trends with regard to the quantity and quality of the service provided. Economic consequences, such as rising costs, both for users and operators are expected. No negative consequences for the economic viability of the solutions are expected. On the user side, however, the need for partially considerable investment is seen – e.g. in order to be able to exploit the potential of the changed infrastructure services.

- As a rule, the potentials in the area of performance and supply security can be achieved without any loss in the quality and quantity of service perceived by the user.
- The operation of infrastructure coupling has the potential to be economically viable for providers and users.
- The use of the infrastructure service can sometimes require noticeable investments by the end user, e.g. if the building technology has to be adapted in order to take advantage of lower temperatures in the heating system.

The often neutral impacts for resource efficiency can be valued as positive in cases where potentials for performance, security of supply and economic efficiency are improved.

- For the criteria primary energy demand, final energy demand and greenhouse gas emissions a predominantly neutral to clearly positive effect is expected.
- The impact of coupled solutions on most of the resource criteria is usually assessed as neutral to often slightly positive – which can have a positive connotation in the context of the expected performance increases.
- The assessments with regard to the demand for land, raw materials in general and critical raw materials are rather case specific. Particularly land demand can rise considerably.

The Delphi-based implementation of the sustainability check has proven to be applicable to the assessment of uncertain cases and questions. Of the experts who had indicated a general willingness to participate in the survey, about two thirds actually took part in the survey. Most of them answered both the qualitative assessments and the open questions. The overall good acceptance of the survey indicates that the operationalisation of the survey concept was appropriate. In the first round, a total of 115 experts were involved in the assessment, and gave a total of 187 evaluations per criterion (two cases evaluated per person). No "failed" criteria are encountered.

The basic practical applicability of the sustainability concept and the criteria is proved by the relatively low use of the answer option "no answer". Criteria of performance have the lowest proportion

of "no answer" responses. Resource efficiency and security of supply are in the midfield with an average share of around 10% refusals. Criteria of social and economic acceptability shows the largest (12,2 %) share of non-response. A further indication of a general acceptance and relevance of the sustainability check is the acceptance of open questions offered as an optional element in the first round. Most of the experts involved made use of the opportunity to underpin their assessments by answering the open questions.

The detailed presentation of results within this report is structured as follows:

**Part I** is dedicated to the definition of the research topic. **Chapter 1** briefly introduces "coupled infrastructures". **Chapter 2** defines the understanding of coupled infrastructures and clarifies the broad spectrum of couplings. From this spectrum, thematic groups (clusters) of couplings are derived which currently show the greatest dynamic with regard to innovative coupled infrastructure solutions.

**Part II** develops the methodological framework for the implementation and the analysis of the sustainability check. **Chapter 3** introduces the objectives of the sustainability check and presents 14 selected synthetic cases of coupled infrastructures. **Chapter 4** develops a sustainability concept for coupled infrastructures and operationalises these by 26 criteria to be applied in the assessment. **Chapter 5** describes the procedure for the Delphi-based implementation of the sustainability assessment, including the selection of hypothetical cases, expert selection and the realisation of the online survey. **Chapter 6** offers an overview of the results of the study across individual cases and introduces the individual results of the 14 cases examined. **Chapter 7** discusses the practicability of criteria and survey concept.

**Part III** contains the individual disaggregated results for the 14 cases. The results presented in **Chapter 8** are divided into two sections, case by case. In the first section, the evaluation results for the 26 sustainability criteria are presented in detail. In the second part, the obtained comments and considerations – e.g. with regard to restricting or required framework conditions and regulations for the successful implementation of innovative coupled infrastructures – are documented.

The work presented in this volume is part of a series of publications that comprehensively documents the results of the entire TRAFIS project:

- ▶ Sustainability potentials of innovative, coupled infrastructures – Sub-report of the project: "Transformation towards sustainable, coupled infrastructures" (present volume).
- ▶ The contribution of coupled infrastructures to sustainability transformations: Influencing factors and options for action – Sub-report of the project: "Transformation towards sustainable, coupled infrastructures" (Hölscher et al. 2020).
- ▶ Conditions for success and process management for a sustainable transformation of infrastructure coupling infrastructures – Sub-report of the project: "Transformation towards sustainable, coupled infrastructures" (Hirschnitz-Garbers et al. 2020).

# I Systematisierung des Untersuchungsgegenstands

## 1 Hintergrund und Ziele

Infrastruktursysteme zur Daseinsvorsorge stehen unter einem hohen Veränderungsdruck, um einen Beitrag zu den sich verändernden gesellschaftlichen Zielstellungen zu leisten. Erwartungen und Herausforderungen in Bezug auf Klimaanpassung und Klimaschutz, Energiewende einschließlich Atomausstieg, Kohleausstieg, Mobilitätswende, Dekarbonisierung, sowie die langfristigen Prozesse der Urbanisierung und des demographischen Wandels geben neue Zielstellungen vor, denen auch die Entwicklung der Infrastrukturen unterliegt. Solche übergreifenden Zielstellungen sind zum Beispiel die Dekarbonisierung, Digitalisierung oder die Kreislaufführung – immer bei Wahrung der Daseinsvorsorge und der sozialen Gerechtigkeit. Die neuen technischen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologien, einschließlich der zunehmenden Vertrautheit der Nutzer in deren Anwendung, führen zusammen mit den neuen Zielen zu einer großen Veränderungsdynamik hin zu mehr Effizienz, Komfort und gänzlich neuen Dienstleistungen.

Grundsätzlich ist die Steigerung der Effizienz seit jeher ein zentrales Interesse der Entwickler, Betreiber und Nutzer von Infrastrukturen. Neuer ist die Erwartung einer höheren Nachhaltigkeit bei der Erbringung von Infrastrukturdienstleistungen. Dies erfordert eine komplexe Betrachtung und Abwägung von einer Vielfalt von Zielen. Das hohe Niveau technischer Infrastrukturen in Deutschland lässt wenig Raum für spürbare Effizienzsteigerungen, um innerhalb der etablierten Systeme wesentliche Ressourceneinsparungen erzielen zu können. Ein zentrales Element der Transformation solcher Regime liegt daher in der Schaffung von neuartigen und nachhaltigeren Systemen durch Kopplung bisher unabhängig voneinander betriebenen Infrastrukturen. Damit einhergehend sollen bisher ungenutzter Synergien gehoben werden, die deutliche Reduktionen von Ressourcenverbrauch und Emissionen erlauben und darüber hinaus die soziale Gerechtigkeit von Infrastrukturdienstleistungen im Blick behalten. Unter Transformationen versteht man dabei grundlegende (radikale) Änderungen der Art und Weise wie Infrastrukturdienstleistungen erbracht und genutzt werden. Dies schließt die verwendeten Technologien, Kopplungen, das Management und die Nutzung ein und geht deutlich über das Maß von Detailanpassungen an bestehenden Systemen hinaus.

Neuartige Infrastrukturkopplungen können Teil einer Nachhaltigkeitstransformation sein, wenn sie helfen, die gesellschaftlichen Ziele und Normen auf einem höheren Nachhaltigkeitsniveau zu ermöglichen. Solche Kopplungen sind auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Gesellschaft ein unverzichtbarer Entwicklungspfad, um den Status-Quo zu verändern. Dabei verläuft die Veränderungsdynamik zwischen plötzlicher Disruption und dadurch angestoßener Evolution: „Disruptive Technologien unterbrechen die Erfolgsserie etablierter Technologien und Verfahren ... Oft sind sie zunächst qualitativ schlechter oder funktional spezieller ... und gleichen sich dann nach und nach an ihre Vorgänger an bzw. übertreffen diese in bestimmten Aspekten“ (Bendel 2018). Die durch die Veränderung erzeugte Unsicherheit bezüglich der Funktionsweisen, Betriebsmodi, Kooperationen, Wirkungen und möglichen Nebenwirkungen ist zeitlich begrenzt und bietet Ansatzpunkte sowohl für die Ausbildung und Materialisierung neuer Risiken als auch für deren Management.

TRAFIS untersucht aktuelle Entwicklungen hin zu gekoppelten nachhaltigen Infrastrukturen, die damit einhergehenden Transformationsprozesse einschließlich möglicher unterstützender und hindernder Einflussfaktoren sowie der potenziellen Nachhaltigkeitswirkungen dieser neuartig gekoppelten Infrastrukturlösungen. Im Fokus stehen innovative, d. h. nicht etablierte, Kopplungen (verstanden als Nischeninnovationen) in sozio-technischen Infrastruktursystemen und deren Nachhaltigkeitspotenziale in den Sektoren Verkehr, Energie, Wasser, Abwasser, Abfallwirtschaft sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). TRAFIS nimmt damit eine breite Untersuchungsperspektive ein. Die 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 Ansatzpunkte und Handlungsmöglichkeiten zur politischen Unterstützung von Transformationsprozessen.

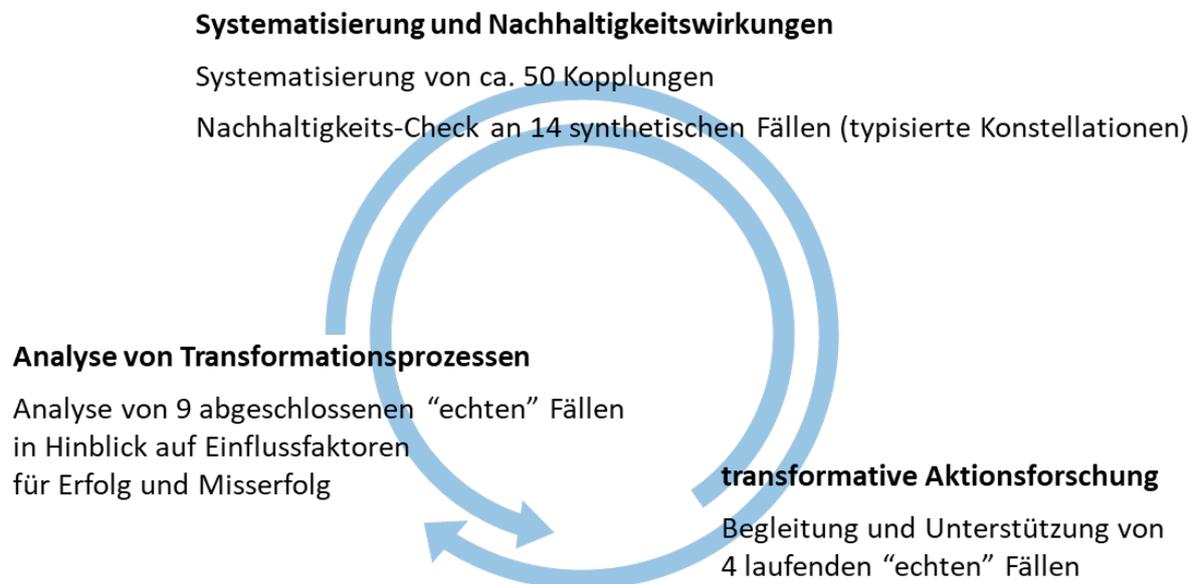
Die im vorliegenden Band vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer Veröffentlichungsreihe, welche die Ergebnisse des Gesamtvorhabens umfassend dokumentiert:

1. Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (vorliegender Band).
2. Infrastrukturkopplungen als Beiträge zur Nachhaltigkeitstransformationen: Einflussfaktoren und Handlungsmöglichkeiten – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (Hölscher et al. 2020).
3. Erfolgsbedingungen und Prozessgestaltung/-begleitung für eine nachhaltige Umgestaltung von Infrastrukturkopplungen Infrastrukturen – Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen" (Hirschnitz-Garbers et al. 2020).

Die Arbeiten wurden in drei Fallbeispielenebenen verfolgt (Abbildung 1).

**Abbildung 1: Fallbeispielansatz im TRAFIS-Projekt**

---



Quelle: Eigene Abbildung

## **Bewertung von Nachhaltigkeitswirkungen gekoppelter Infrastrukturen (Inhalt dieses Berichts)**

Entlang einer Struktur „synthetischer Fälle“ (*erste Fallbeispielebene*) hat TRAFIS zunächst nachhaltig gekoppelte Infrastruktursysteme definiert, systematisiert und geclustert, wodurch ca. 50 relevante Kopplungen auf der Ebene von Teilsystemen erfasst und beschrieben werden konnten. Da innovative Infrastrukturkopplungen in der Praxis bisher nicht bzw. nur wenig erprobt sind, liegen nur stark an einzelne Kontexte geknüpfte und schwer verallgemeinerbare Erfahrungen vor. Daher ist über das Potenzial von Infrastrukturkopplungen, zu einer Transformation hin zu mehr Nachhaltigkeit und Klimaresilienz beizutragen, wenig bekannt. Dennoch werden an Sektorkopplungen vielfach große Erwartungen geknüpft hinsichtlich des effizienten Ressourceneinsatzes, des Klimaschutzes, Kosteneinsparungen oder des Komforts für die Nutzer.

Um Potenziale und mögliche Einschränkungen innovativer Infrastrukturlösungen im Hinblick auf technische, wirtschaftliche, soziale und umweltbezogene Aspekte der Infrastrukturkopplungen einschätzen zu können, wurde in einem nächsten mittels einer Delphi-Umfrage breiter Sachverstand von über 100 Experten aus Praxis und Forschung (Kommunen, Stadtwerke, Verbände und wissenschaftliche Institutionen) einbezogen (der TRAFIS-Nachhaltigkeitscheck). Um die sehr unterschiedlichen Expert\*innen anzusprechen, wurden typische Fallkonstellationen („synthetische Fälle“) beschrieben, die die zuvor mittels einer Literaturlauswertung ermittelte Breite von möglichen Kopplungen repräsentieren, und die Bewertungskriterien auf den jeweiligen Kontext der synthetischen Fälle bezogen operationalisiert. Der hier Vorliegende Bericht stellt das Vorgehen und die Ergebnisse dieses Projektteils dar.

## **Analyse von Transformationsprozessen**

Auf der *zweiten Fallbeispielebene* wurden neun Beispiele abgeschlossener Infrastrukturkopplungsprojekte (Nischeninnovationen) auf lokaler, regionaler und nationaler in Deutschland daraufhin untersucht, welche Faktoren, Rahmenbedingungen und Akteure förderlich oder hinderlich Einfluss auf die Infrastrukturkopplungen bzw. eine Nachhaltigkeitstransformation genommen haben.

Dazu wurde anhand von Literaturlauswertung und Expert\*innen-Interviews die Entwicklung der gekoppelten Infrastruktur von der Idee bis zum heutigen Stand in einem Entwicklungspfad nachgezeichnet und illustriert. Anhand dieser Analysen wurden sowohl einzelfallspezifisch als auch über einen Quervergleich der neun Fallbeispiele fallübergreifende potenzielle 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).

## **Begleitung von Transformationsprozessen und Analyse von Unterstützungsmöglichkeiten**

Mit der dritten Fallbeispielebene widmet sich TRAFIS einerseits der Frage, welche Faktoren und Rahmenbedingungen und welche Akteure auf Ebene laufender kommunaler und regionaler Infrastrukturkopplungsbeispiele relevant sind – dabei wird auch in den Blick genommen, ob sich Erkenntnisse aus der zweiten Fallbeispielebene hier wiederfinden.

Die dritte Fallbeispielebene dient insbesondere dazu, die laufenden Praxisfälle in ihren Transformationsprozessen zu begleiten und sie im Rahmen der Projektmöglichkeiten zu unterstützen. Dazu werden in vier Fallbeispielen konkrete Unterstützungsbedarfe mittels Transformations- und der transformativen Aktionsforschung anhand moderierter Austauschprozesse vor Ort ermittelt und durch eine Begleitung laufender Prozesse eruiert. Dabei spielte auch die Frage eine Rolle, ob es aus kommunaler bzw. regionaler Sicht Bedarf an bundespolitischer Rahmungen für die lokale Ebene der Fallbeispiele geben könnte. Auf diese Weise soll die Prozessbegleitung in den Fallbeispielen laufende Kopplungsprozesse besser verstehen helfen, sowie Gestaltungsoptionen für die Weiterentwicklung und

Verstetigung der Kopplungsprozesse aufzeigen helfen und diese soweit möglich unterstützen. Zusätzlich soll über die methodische Reflektion der Erfahrungen mit der Prozessbegleitung auch Hinweise dazu gegeben werden, ob Transformations- und Aktionsforschung allgemein und die angewendeten Methoden und Ansätze im Besonderen geeignet waren, um Wissensbestände aus der Praxis in den Forschungsprozess zu integrieren und aus Praxissicht bestehende Unterstützungsbedarfe angehen zu können. Die Erkenntnisse aus der Prozessbegleitung sind ebenfalls in einem eigenen Band publiziert (Hirschnitz-Garbers et al. 2020).

Der vorliegende Band thematisiert die Entwicklung eines Nachhaltigkeitschecks und deren Erprobung im Beispiel ausgewählter innovativer Infrastruktorkopplungen. Die im Folgenden dargestellten Arbeiten dienen der Beantwortung der folgenden Fragen:

1. In bzw. zwischen welchen Infrastruktur-Sektoren finden die wesentlichen Kopplungsdynamiken statt und wie können diese systematisiert werden?
2. Wie können potenzielle Nachhaltigkeitswirkungen innovativer Infrastruktorkopplungen bewertet werden?
3. Welche Nachhaltigkeitswirkungen in Sinne Potenzialen und Herausforderungen haben innovative Infrastruktorkopplungen?

## 2 Gekoppelte Infrastrukturen

### 2.1 Infrastrukturen

#### 2.1.1 Sektoren, Teil-Sektoren

Im Zentrum des Interesses dieser Studie stehen neuartige gekoppelte Infrastrukturen der Daseinsvorsorge. Infrastrukturen sind in der Literatur hinlänglich als sozio-technische Systeme beschrieben, die eine Basis für das gesellschaftliche und wirtschaftliche Leben einer Gesellschaft darstellen (Frey 2005; Thommen 2018; Libbe et al. 2018). Libbe & Petschow (2015) beschreiben **Infrastrukturen** als *komplexe Systeme mit schwer voneinander abgrenzbaren technischen, wirtschaftlichen und institutionellen Teilsystemen*. Diesem grundsätzlichen Verständnis folgt auch TRAFIS durch Betrachtung von **Infrastruktursystemen als sozio-technische Systeme** unter Beachtung sowohl der technischen Konfiguration, der Managementseitigen Funktionen, der Nutzer der Infrastrukturdienstleistungen und der für Umsetzung und Betrieb maßgeblichen Rahmenbedingungen (Loorbach et al. 2010).

Die Arbeiten in TRAFIS konzentrieren sich auf die Basis-Sektoren Trinkwasserversorgung, Abwasserentsorgung, Energieversorgung und Verkehr, deren Strukturen und Dienste für sich stehend und in der Kopplung zu den anderen (Teil-)Systemen betrachtet werden. Zusätzlich wird die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) als verbindender Sektor berücksichtigt.

Grundlage für die Auswahl der betrachteten Sektoren sowie deren Differenzierung in Teil-Sektoren sind in erster Linie die Aufgabenbereiche der öffentlichen Daseinsvorsorge.

In den ausgewählten Sektoren werden Entwicklungen hin zu Kopplungen im Bereich der Infrastruktursysteme strukturiert gesammelt, jedoch ohne das Ziel, eine alle Infrastruktursysteme umfassende Gesamtsystematik für Infrastruktursysteme bereitzustellen.

- ▶ Der Sektor *Trinkwasserversorgung* wird insgesamt betrachtet, d. h. ohne eine interne Untergliederung in Trink-, Brauch- und Löschwasser vorzunehmen, da keine eigenständigen Veränderungen in den Teil-Sektoren beobachtet werden können.
- ▶ Bei der *Abwasserentsorgung* werden die Teil-Sektoren Schmutzwasser und Niederschlagswasser unterschieden. Unter Schmutzwasser werden Haushalts- und Industrieabwässer verstanden. Eine weitere Unterscheidung des Schmutzwassers nach Schwarz- und Grauwasser erfolgt auf Ebene der Kopplungen und wird in der Systematik nicht weiter differenziert.
- ▶ Im Bereich der *Energieversorgung* werden die üblichen Teil-Sektoren Wärme, Kraft (Elektrizität) und Gas differenziert. Der teilweise beobachteten Subsummierung des Gas-Sektors unter Wärme wird nicht gefolgt. Diese Differenzierung ist insbesondere angezeigt, um die zahlreich in Entwicklung befindlichen Kopplungen auch innerhalb des Sektors abbilden zu können.
- ▶ Im Sektor *Transport und Verkehr* wird zwischen der physischen Verkehrserschließung, den öffentlichen Verkehrsdienstleistungen sowie den dafür betriebenen Fahrzeugen unterschieden. Neben den öffentlich betriebenen Fahrzeugflotten wird hier auch der Gesamtbestand privater Fahrzeuge als infrastrukturell relevant angesehen. Der Sektor berücksichtigt in erster Linie Aspekte des Straßen- und Schienenverkehrs. Die Bereiche Schifffahrt und Flugverkehr werden in dieser Studie nicht thematisiert.

- ▶ In der *Abfallentsorgung* werden nur einige ausgewählte Abfallarten in Betracht gezogen und diese im Sinne der Übersichtlichkeit abweichend von der betreffenden Abfallverzeichnisverordnung (AVV, BMUB 2016) differenziert. Maßgeblich für TRAFIS erscheinen drei Abfallarten aus dem Komplex der Siedlungsabfälle (AVV, Nr. 20). Unterschieden wird entsprechend der bundesweit etablierten Entsorgungspraxis einerseits der Biomüll. Dies erscheint gerechtfertigt, da Bioabfälle in Deutschland 30-40 % des Siedlungsabfallaufkommens repräsentieren (BMUB 2017). Als weitere Abfallarten werden Wertstoffe sowie der Restmüll betrachtet.
- ▶ Die *Informations- und Kommunikationstechnik* ist grundsätzlich als physische Infrastruktur durch öffentlich nutzbare Telekommunikationsnetze (funk- und leitungsbasiert) einschließlich der dazugehörigen Netzwerkknoten bzw. Servern repräsentiert. Eine zentrale Bedeutung erfährt die IKT in TRAFIS aber auch in Form „verbindender Technologien“. Gerade IKT macht Kopplungen innerhalb und zwischen den Sektoren erst ermöglicht. D. h., die physischen (Teil-)Systeme der Informations- und Kommunikationstechnologien (z. B. Kabel- und Funknetze, Serverknoten etc.) erscheinen nur in Einzelfällen als eigenständige Komponenten von Kopplungen (z. B. wenn es um die Potenziale der Abwärmenutzung bei Servern geht). Meistens sind es die durch die Beteiligung von IKT ermöglichten technologischen Lösungen und Mehrwertdienste mit erwartbaren Auswirkungen auf Ressourceneffizienz und Klimaresilienz, die dem IKT-Sektor eine zentrale Rolle bei der Realisierung vieler innovativer Kopplungen zuweisen. Daher wird der IKT-Sektor meistens nicht als eigenständiger Sektor untersucht, sondern als Teil der anderen Sektoren. Zur IKT gehören aber auch weitere Elemente wie die Sensoren und Aktoren sowie die für die Interaktion wesentlichen Elemente Big Data Analyse und Algorithmik, die zusammengenommen die innovativen vernetzenden Funktionen der IKT ermöglichen. Diese Elemente der IKT stellen keine mit den Basissektoren vergleichbaren, physisch beschreibbaren Teil-Sektoren des IKT-Sektors dar. Vielmehr basieren die zentralen Anwendungen auf z. T. hochspezifischen Software-Anwendungen, welche die Kommunikation der einzelnen Komponenten (Sensoren, Aktoren) ermöglichen und diese insgesamt und in der Interaktion mit anderen Infrastrukturen zu einer Infrastruktur werden lassen. Viele dieser Anwendungen befinden sich in Entwicklung und Erprobung und sind ggf. nicht immer auf die zentralen Telekommunikationsnetze gestützt, sondern nutzen teilweise die Direktkommunikation zwischen Systemelementen. In der Breite ihrer Anwendung (z. B. V2X, Vehicle-to-X-Technologien; OTP, Over-The-Top-Dienste oder komplexe Betriebssysteme für ganze Branchen, wie die Logistik oder Stadtverwaltungen) können diese Anwendungen Bestandteil von Infrastrukturen werden (z. B. durch die Vernetzung von Verkehrssteuerung mit den teilnehmenden Fahrzeugen) oder das Funktionieren der Infrastrukturen erheblich verändern (z. B. durch Ermöglichen von komplexen Verkehrsverbindungen im Personenverkehr oder verkehrssparender bzw. renditesteigernder überregionaler und firmenübergreifender Logistikkonzepte).

Während die ausgewählten Sektoren Bereiche der Daseinsvorsorge mit Bezug zu technischen bzw. gebauten Infrastrukturen darstellen, bilden die ausgewählten Teil-Sektoren diejenigen Ausschnitte der Sektoren ab, die für die Behandlung in TRAFIS besonders relevant sind. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Zuordnung von Sektoren und Teil-Sektoren.

**Tabelle 1: Überblick über die Basissektoren + IKT und die in TRAFIS betrachteten Teil-Sektoren**

Sektoren	Teil-Sektoren	Teil-Systeme
<b>Trinkwasserversorgung</b>		
	Trinkwasser	1. Gewinnung; 2. Aufbereitung; 3. Verteilung
<b>Abwasserentsorgung</b>		
	Schmutzwasser	1. Ableitung; 2. Behandlung; 3. Einleitung
	Niederschlagswasser	1. Ableitung; 2. Behandlung; 3. Einleitung
<b>Energieversorgung</b>		
	Wärme	1. Erzeugung; 2. Speicherung; 3. Verteilung
	Kraft (Elektrizität)	1. Erzeugung; 2. Speicherung; 3. Verteilung
	Gas	1. Erzeugung; 2. Speicherung; 3. Verteilung
<b>Transport und Verkehr</b>		
	Verkehrerschließung	1. Straßen, Wege, Parkplätze; 2. Schienen
	Fahrzeuge	1. Fahrzeuge (öffentlicher Verkehr) Straße; 2. Fahrzeuge (öffentlicher Verkehr) Schiene; 3. Fahrzeuge privat
<b>Abfallverwertung</b>		
	Biomüll	1. Sammeln; 2. Behandeln; 3. Verwerten/Beseitigen
	Wertstoffe	1. Sammeln; 2. Behandeln; 3. Verwerten/Beseitigen
	Restmüll	1. Sammeln; 2. Behandeln; 3. Verwerten/Beseitigen
<b>Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)</b>		
	öffentliche Telekommunikationsnetze	1. Öffentliche Funk- und Kabelnetze incl. Netzwerkknoten/Server
	Erfassung und Regelung	1. Sensoren; 2. Aktoren
	Datenverarbeitung und Steuerung	1. Big Data Analyse; 2. Algorithmik

### 2.1.2 Teil-Systeme

Innerhalb der Sektoren und Teil-Sektoren erfüllen **Teil-Systeme** unterschiedliche Aufgaben. Auf der Ebene der Teil-Systeme finden die innovativen Kopplungen statt. Die betrachteten Kopplungen wirken auf verschiedenen räumlichen Ebenen und werden durch unterschiedliche Akteure auf unterschiedlichen Ebenen (z. B. durch die öffentliche Verwaltung) verantwortet. Akteurskonstellationen spielen in TRAFIS vor allem im Rahmen der Transformationsforschung (Hölscher et al. 2020) und im Rahmen der Aktionsforschung eine zentrale Rolle (Hirschnitz-Garbers et al. 2020). Anhang 1 differenziert für die Teil-Systeme die wesentlichen räumlichen Ebenen sowie die Verortung der Dienstleistung bei den Akteuren.

### 2.1.3 Räumliche und funktionale Systemgrenzen

Sektorkopplungen entwickeln sich aktuell dynamisch auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen und werden teilweise als Voraussetzung für das Gelingen von zentralen gesellschaftlichen Herausforderungen wie Klimaschutz, Atomausstieg, Digitalisierung/Vernetzung usw. betrachtet (Witt 2015; Kirchner et al. 2016b; Quasching 2016; DIHK 2016). Veränderungsdynamiken vollziehen sich ebenenübergreifend – von bundesweit und darüber hinaus vernetzten Systemen (Strom/Gas) bis hin zu gekoppelten Lösungen auf Objektebene (Heiztechnik, neuartige Sanitärsysteme etc.). Für Fragestellungen der Klimaresilienz und Ressourceneffizienz spielen gekoppelte Lösungen grundsätzlich auf allen Ebenen eine Rolle.

Infrastruktursysteme sind sozio-technische Systeme, deren Funktion unter anderem von einem Zusammenspiel der technischen Konfiguration baulicher Anlagen, dem Management durch das betreibende Unternehmen, von den Präferenzen und der Inanspruchnahme durch die Nutzer sowie durch gesetzliche Regelungen geprägt sind. Die Untrennbarkeit technischer Komponenten und deren Management liegen auf der Hand. Ein Betrieb technischer Anlagen ohne die Organisation und den Unterhalt durch ein betreibendes Unternehmen ist nicht möglich. Die Bedeutung der Nutzer ist weniger geklärt und scheinbar über Jahrzehnte durch eine relative Stabilität der Infrastruktursysteme und den Nutzungsroutinen in den Hintergrund geraten. Die Bedeutung der Nutzerseite hat sich spätestens in Erinnerung gebracht, als Anfang der 1990er Jahre im Osten Deutschlands im Zuge gestiegener Preise der pro Kopf-Verbrauch von Trinkwasser teilweise zu einer Unterauslastung von Wasser- und Abwassersystemen geführt hat – mit Konsequenzen für Dimensionierung und Betrieb der Anlagen sowie mit Rückwirkungen auf die Kosten der Dienstleistungen.

Nutzer von Infrastrukturdienstleistungen sind damit ein bedeutendes Element des sozio-technischen Systems i.w.S. (Hölscher et al. 2020). Bei der Betrachtung von Infrastrukturkopplungen sind diese immer dann zu berücksichtigen, wenn die Veränderung des Nutzerverhaltens entweder für die Realisierung der Kopplungen erforderlich ist bzw. wenn – bedingt durch die Kopplung – Nutzer die Infrastrukturen in einer neuen Art und Weise (z. B. Einspeisung von Strom) oder mit einer stark veränderten Intensität (z. B. Auskopplung von Grauwasser durch dezentrale Nutzung) nutzen. Dabei umfasst der Begriff „Nutzer“ sowohl Privathaushalte, privatwirtschaftliche Akteure als auch Organisationen, die allein oder als Gesamtheit durch ihr Nutzerverhalten Rückwirkungen auf den Betrieb der Infrastruktursysteme verursachen können. Beispiele sind:

- ▶ Die Bestrebungen zur Einbindung regenerativer Energiequellen in Wärmenetzen erfordert zu meist eine Absenkung der üblichen Systemtemperaturen. Dies hat Folgen – sowohl für die erreichbaren Vorlauftemperaturen zur Beheizung als auch die vielerorts betriebenen Absorptionskältemaschinen für die Kühlung.
- ▶ Die dezentralisierte Stromerzeugung (private Photovoltaik-Anlagen auf privaten Dächern) bringt es mit sich, dass Nutzer zugleich auch als Element im Teilsystem „Elektrizität-Erzeugung“ auftreten können, sofern der produzierte Strom eingespeist wird.
- ▶ Die „intelligente“ bzw. „systemdienliche“ Vernetzung objekt-basierter Erzeugungsanlagen (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung – Stichworte „virtuelles Kraftwerk“, stromgeführter Betrieb) oder Verbraucher-Anlagen (z. B. Wärmepumpen, Akkus von E-Fahrzeugen, private Stromspeicher) können im Rahmen der Schwarmsteuerung bedeutende Leistungen für das gesamte Stromnetz verrichten – etwa durch die Bereitstellung von positiver und negativer Regelenergie. Hierzu gehört auch die Nutzung von Großspeichern, die bisher nur als Verbraucher geführt waren, wie die der Telekom (Technology Review 2015).

- ▶ Nutzer erhalten ein zusätzliches Gewicht als aktives Element der Infrastruktur, wenn es darum geht, das Nutzerverhalten im Rahmen eines sog. Demand-Side-Managements mit dem Arbeitsmodus der Infrastrukturen enger abzustimmen. Dies ist z. B. absehbar möglich im Zuge der Digitalisierung in der Energiewirtschaft bzw. praktisch als Folge der Einführung sog. intelligenter Zähler (Kübler 2016; sog. smart meter, BMWI 2016) und schon heute zu Zwecken der Stromnetzstabilisierung erwünscht.
- ▶ Dieses Nutzerverhalten wird auch dann infrastrukturelevant, wenn sich daraus nennenswerte Rückwirkungen auf die Optionen der technischen Konfiguration und das betreiberseitige Management von Infrastruktursystemen ergeben. Das könnte in Zukunft ein wichtiger Beitrag zur Suffizienz in Infrastruktursystemen und damit zur besseren Versorgungssicherheit und/oder der Effizienz der Dienstleistungserbringung sein. Dies würde sich z. B. dann auswirken, wenn nutzerseitige Energiepuffer die Zeitspanne akzeptabler Versorgungsausfälle bei Stromnetzen größer machen und damit die Spielräume der Versorger erweitern bzw. den Management-Aufwand verringern (siehe Diskussion der Netzentgelte, z. B. Handelsblatt 2016). Einen ähnlichen Effekt können auch bereits die Maßnahmen zur Digitalisierung der Energiewende haben – z. B. durch die Kappung von Verbrauchsspitzen durch Demand-Side-Management-Ansätze mithilfe einer intelligenten Steuerung von Verbrauchern in den Haushalten („smart meter“, vernetzte Geräte).

Infrastruktursysteme auf Objektebene oder Einzelanlagen in Gebäuden sind nur dann im Spektrum der Arbeiten in TRAFIS, wenn sie eine kritische Masse (Infrastruktur-Relevanz) mindestens auf Quartiersebene erreichen. Als **kleinste relevante räumliche Einheit für die Bereitstellung einer Infrastruktur wurde demnach in TRAFIS das Quartier angesehen** (z. B. Nahwärme-/Nahkältenetze) – als Bezugsebene der inneren Erschließung in Abgrenzung zur Grundstückerschließung (Infrastrukturnutzer/Verbraucher). Eine Relevanz entfalten grundstücksbezogene Systeme dann, wenn z. B. dezentrale Konzepte (NASS, Photovoltaik, Solarthermie etc.) signifikante Wirkungen auf übergeordnete (zentrale, mind. auf Quartiersebene) Strukturen entfalten.

## 2.2 Infrastrukturkopplungen

### 2.2.1 Arten von Kopplungen

Grundsätzlich sind Infrastrukturkopplungen nichts Neues, einige sind über die Jahrzehnte zur Normalität geworden. Technisch-**funktionale Kopplungen** sind bekannt aus der etablierten Abhängigkeit zentraler Infrastrukturen wie der Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Wärmeversorgung oder der Verkehrsführung (Ampeln, Bahnsignale) von der Verfügbarkeit von elektrischem Strom. Auch die herkömmlichen Telefonnetze sicherten stets die Stromversorgung für den Betrieb eines Endgerätes (hier kommt es durch die Umstellung auf IP-Anschlüsse aktuell zu einer Entkopplung, indem diese Versorgung nach der Umstellung nicht mehr gewährleistet ist). Die gleiche Selbstverständlichkeit hat die routinemäßige Sammlung von Abfällen über das Straßennetz. **Organisatorische Kopplungen** sind allein aus Effizienzgründen sinnvoll und werden vielerorts durch Stadtwerke oder Zweckverbände realisiert. Auch die **räumlichen Kopplungen** sind kaum wegzudenken, wie etwa die direkte räumliche Überlagerung der Trassenführungen von Straßen und Wegen mit Wasser- und Abwasserleitungen oder Elektrizitäts-, Gas und Telekommunikationstrassen.

Von **Infrastrukturkopplungen** kann gesprochen werden, wenn **zwischen Teil-Systemen eines Sektors oder mehrerer Sektoren** Abhängigkeiten oder Interaktionen bestehen, die Auswirkungen auf die Art und Weise des Betriebs der Infrastrukturen haben. Der zu Beginn des Vorhabens angestrebte Fokus auf Kopplungen zwischen Sektoren ist im Zuge der Recherchen der Transformationsdynamiken im

Bereich der Infrastruktursysteme erweitert worden und berücksichtigt auch innersektorale Kopplungen. Demnach können für TRAFIS Kopplungen auf drei Systemebenen relevant sein:

**Typ 1: Sektor X  $\leftrightarrow$  Sektor Y**

Teilsysteme aus mindestens zwei verschiedenen Sektoren sind funktional miteinander gekoppelt (z. B. Teilsysteme aus Abwasserentsorgung und Energieversorgung).

**Typ 2: Teil-Sektor X.1  $\leftrightarrow$  Teil-Sektor X.2**

Teilsysteme aus mindestens zwei Teil-Sektoren des gleichen Sektors sind funktional miteinander verbunden (z. B. Wärme und Strom).

**Typ 3: Teil-System X.1.1.  $\leftrightarrow$  Teil-System X.1.2**

Mindestens zwei Teilsysteme des gleichen Teil-Sektors sind funktional miteinander verbunden (z. B. Stromerzeugung und Stromspeicherung).

Typ 3 der betrachteten Kopplungen spielt bei vielen im Kontext der in TRAFIS betrachteten Innovationen eine wichtige Rolle. Es wird davon ausgegangen, dass in etablierten Systemen derartige Kopplungen zwar bestehen, dort aber selbstverständlich sind und damit keiner Betrachtung im Rahmen von TRAFIS bedürfen. Ein Beispiel für etablierte Kopplungen zwischen Teilsystemen ist die Kopplung von Stromerzeugung und Stromverteilung. Neu bzw. im Sinne von TRAFIS innovativ sind z. B. innersektorale „Einkopplungen“ von neuen bzw. wenig etablierten Teilsystemen wie Speicher (Strom, Wärme) oder alternative Erzeuger (Solarenergie, Abwärme, virtuelle Kraftwerke etc.), die sowohl für die Bewirtschaftung als auch für die Nutzer der Infrastruktur Konsequenzen haben können. Beispiele sind die Zwischenspeicherung von Strom zum Ausgleich der Volatilität erneuerbarer Energiequellen oder von Bedarfsspitzen, die Einkopplung von Solarthermie in Fernwärmenetze oder die bisher v.a. diskutierte Nutzung der Speicherkapazitäten von E-Fahrzeugen zur Stromnetzstabilisierung.

Die Identifikation von für das TRAFIS Vorhaben relevanten innovativen Infrastrukturkopplungen beinhaltet daher bereits eine erste Vorauswahl von Kopplungen anhand der Frage: Ist die betreffende Kopplung bereits etabliert, oder ist sie in dieser Form oder zu diesem Zweck bisher nicht etabliert? Im Fokus dieser Vorauswahl steht die Frage: Beschreibt die Kopplung einen etablierten State-of-the-Art oder handelt sich um eine Veränderung hin zu einer wie auch immer begründeten neuartigen funktionalen Verbindung von Teilsystemen? Etablierte Kopplungen ohne Innovationswert im technisch-funktionalen oder organisatorischen Zusammenspiel der Teil-Systeme werden in TRAFIS nicht thematisiert.

## 2.2.2 Dependenz vs. Interaktion von Infrastrukturen

Der Terminus **Kopplung** beschreibt eine „**funktionale Verbindung**“ von **Infrastrukturen**. Wir sprechen von einer Kopplung von Infrastrukturen, wenn die Funktion einer Infrastruktur die Funktion einer anderen Infrastruktur voraussetzt (Dependenz). Grundsätzlich können einseitige und gegenseitige Dependenzen unterschieden werden:

- ▶ Einseitig: wenn nur eine der (z. B. zwei) an der Kopplung beteiligten Infrastrukturen von der Funktion der anderen abhängig ist, die andere aber unabhängig bleibt („dependency“, vgl. Rinaldi et al. 2001)
- ▶ Gegenseitig: wenn beide an der Kopplung beteiligten Infrastrukturen gegenseitig von der Funktion der jeweils anderen abhängig sind („interdependency“, vgl. Rinaldi et al. 2001)

In Anlehnung an (2006), Rinaldi et al. (2001) oder Petschow (2016) können unterschiedliche Arten von Dependenzen als Kopplung verstanden werden:

- ▶ Stoffliche bzw. physische Abhängigkeiten: Abhängigkeit der Funktion einer Infrastruktur von einem konkreten Material- oder Energiefluss (Input) einer anderen Infrastruktur.  
Beispiel: Transfer von Wärme, Elektrizität oder Gas zwischen den Sektoren bzw. Teil-Sektoren, künftig verstärkt die Integration der Elektrizität im Sektor Mobilität, etc.
- ▶ Informatische Abhängigkeiten: Abhängigkeit der Funktion einer Infrastruktur vom Informations-transfer (Austausch) zwischen den Infrastrukturen bzw. Infrastrukturteilen.  
Beispiel: IKT-basierte Funktionssteuerung von gekoppelten Anlagenteilen.
- ▶ Organisatorische Abhängigkeiten: Abhängigkeit der Funktion einer Infrastruktur vom organisatorischen Verbund gleicher Infrastrukturen aus verschiedenen Zuständigkeitsbereichen.  
Beispiel: Zusammenschluss kleinerer Ver- und Entsorgungsbetriebe zu Zweckverbänden.
- ▶ Räumliche Abhängigkeiten: Teile der Infrastrukturen beanspruchen den gleichen Raum durch lineare Nähe, Kreuzung oder flächige Überlagerung. In den entsprechenden Abschnitten können Eingriffe in eine oder Dysfunktionen einer Infrastruktur Einflüsse auf eine andere haben.  
Beispiel 1: Paralleler Verlauf oder Kreuzung von Rohrleitungen oder Stromtrassen – keine echte funktionale Abhängigkeit.  
Beispiel 2: Kontrollierter Überstau von Abwasserleitungen durch gezielte temporäre Flutung dafür ausgebauter öffentlicher Grün-Infrastruktur – funktionale Abhängigkeit.
- ▶ Sonstige: Verbindungen, die nicht in die vorgenannten Kategorien passen.

Im Kontext der in TRAFIS besonders thematisierten Fragen nach der Ressourceneffizienz und Klimaresilienz geht das Verständnis von „Kopplung“ über die tatsächlichen funktionalen Abhängigkeiten hinaus. Aus Sicht von TRAFIS liegt eine Kopplung von Infrastrukturen vor, wenn mindestens zwei Infrastrukturen miteinander interagieren. Dies berücksichtigt sowohl die Fälle „echter“ bzw. „**starker funktionaler Abhängigkeiten**“ (einseitiger oder gegenseitiger) als auch das ebenso funktionale, jedoch deutlich schwächere, mehr kooperative bis redundante Zusammenwirken von Teilsystemen unterschiedlicher (Teil-) Sektoren. Letztere können unter dem Sammelbegriff der „**losen Kopplungen**“ (Wolff 2010; Brand et al. 2016) zusammengefasst werden.

Mit einer solchen Aufweitung des Verständnisses von Kopplung über „Abhängigkeiten“ oder „Interdependenzen“ hinaus wird TRAFIS insbesondere den anhand der durchgeführten Recherchen beobachteten Dynamiken und Kopplungs-Trends gerecht. Dies gilt v.a. in Bezug auf Fragestellungen der Ressourceneffizienz. Insgesamt geht eine große Veränderungsdynamik von einer Vielzahl alternativer bzw. redundanter „loser“ Kopplungen aus, die sich oft dadurch auszeichnen, dass alternative Ressourcen oder Technologien auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen in bestehende Systeme eingekoppelt werden und dort ressourcenschonend wirken können. Diese neuen Kopplungen werden gezielt entwickelt, um durch Nutzung alternativer Ressourcen oder die Hebung ungenutzter Synergien spezifische gesellschaftliche Ziele (z. B. Ressourcenschonung, Klimaschutz etc.) zu erreichen. Nicht unbedingt handelt es sich hierbei dann aber um Abhängigkeiten, bei denen ein (Teil-)System bereits mit der Umsetzung auf das Funktionieren eines anderen (Teil-)Systems angewiesen ist, um seine Leistung erbringen zu können. In der Phase der Nischeninnovation handelt es sich zunächst v.a. um Ressourcen-Alternativen, deren Kapazität vollständig durch das herkömmliche System abgedeckt werden kann. Dennoch könnte eine Etablierung im zweiten Schritt dazu führen, dass künftige Auslegungen der Systeme aus Gründen der Effizienzsteigerung oder der Ressourcenverfügbarkeit auf einen Teil der Redundanzen verzichten und es dann zu echten Abhängigkeiten kommt.

Der Wandel hin zu solchen diversifizierenden bzw. redundanten Kopplungen lässt sich am Beispiel der Energienetze darstellen. Bestehende, auf traditionellen Technologien basierende monovalente, d. h. auf einer Energiequelle beruhende Systeme (Infrastrukturen, Fahrzeuge, Heizungsanlagen), entwickeln sich durch die **zentrale und/oder dezentrale Einbindung alternativer Energiequellen bzw. Energieerzeugungstechnologien** zu bi- und multi-valenten Systemen. Im Ergebnis stammt die z. B. in ein Wärmenetz eingespeiste Energie nicht mehr nur aus der Verbrennung fossiler Energieträger in einem zentralen Kraftwerk, sondern zusätzlich noch aus der Nutzung industrieller Abwärme und/oder aus Solarthermie; objektbasierte Heizungsanlagen kombinieren Wärmepumpen mit solarthermischen und Photovoltaik-Anlagen; Hybrid-Fahrzeuge verfügen zunehmend über einen Verbrennungs- und zusätzlich über einen Elektro-Motor mit entsprechendem Energiespeicher, etc.

Solche Systeme koppeln z. B. Energiequellen nicht primär mit dem Ziel, die erforderliche Leistung erbringen zu können, sondern um diese Leistung ressourcenschonender (z. B. umweltfreundlicher, billiger) oder komfortabler zu erbringen. Eine Abhängigkeit ergibt sich damit nicht hinsichtlich der grundsätzlichen Funktion, sondern hinsichtlich der Art der Funktionsweise, und um übergeordneten gesellschaftlichen Zielen (Klimaschutz) oder Nutzerinteressen (Kosten) zu genügen – z. B. durch die Einsparung oder Substitution von Ressourcen, Minderung von Emissionen oder die Netzentlastung. Beispiele für solche **diversifizierende bzw. redundante Kopplungen** sind:

- ▶ Einbinden zusätzlicher Energiequellen in bestehende Energienetze auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen:
  - überregional (erneuerbare Energien in bestehende Stromnetze),
  - lokal (Solarthermie oder Abwärme in Fernheizungssysteme) (Kreis Schweinfurt 2016; Regio Energie Solothurn 2016),
  - Objektbezogen (erneuerbare Wärme in Hausnetzen; Photovoltaik, Klein- und Mikro-Windkraft, aufkommend Brennstoffzellen mit und ohne Speicher).
- ▶ Zwischenschalten von lokalen/objektbezogenen neuartigen Sanitärsystemen (NASS) unterschiedlicher Komplexitätsstufen parallel zu bestehenden Anschlüssen an die öffentlichen Abwassernetze.
- ▶ National und lokal vielerorts geförderte dezentrale Speicher- bzw. Bewirtschaftungslösungen für elektrischen Strom und Wärme (KfW, Stadtwerke) oder Regenwasser (v.a. lokal).
- ▶ Ein prominentes Beispiel ist die sich zunehmend etablierende Technologie hybrider Antriebe im Verkehrssektor (BMVI und BMUB 2016), hier v.a. Plug-In-Hybride oder e-Fahrzeuge mit verbrennungs-basiertem Antrieb oder sog. „Range-Extender“ bzw. zukünftig verstärkt auch die Nutzung der Brennstoffzellen-Technologie zur Erzeugung der benötigten elektrischen Energie aus Wasserstoff in-situ. Während sich die genannten Technologien in unterschiedlichen Stadien der Etablierung im Automobilssektor (PKW und LKW unterschiedlich) befinden, beginnt dazu parallel deren Erprobung bei Schienenfahrzeugen (Scholz et al. 2016; Süddeutsche Zeitung 2016a) oder Kleinflugzeugen (Süddeutsche Zeitung 2016b, S. 4).
- ▶ Künftig sind aber auch weitere Kopplungen auf dezentraler Ebene denkbar, wenn etwa Fahrzeuge als Zwischenspeicher und/oder Erzeuger der im Haushalt gebrauchten elektrischen Energie fungieren (Letzteres z. B. durch die Nutzung der Brennstoffzellen-Technologie).

- ▶ Im Logistikbereich sind Entwicklungen zur Effizienzsteigerung der Warenzustellung durch Kopplung von Lieferfahrzeugen mit Zustelldrohnen im Bereich der „letzten Meile“ auch im Hinblick auf Fragen der Ressourcenschonung in Diskussion (Becker 2016).
- ▶ Nutzung von Abfällen aus z. B. der Nahrungsmittel- und Rohstoffproduktion (Verbio AG) für die Biogaserzeugung.

Zum Teil sind die so modifizierten Systeme nach der Kopplung weiterhin auf das „ursprüngliche“ zentrale Hauptsystem (i.S. „Regime“) gestützt und nicht unbedingt autarkiefähig. Bestrebungen zur zumindest Teil-Autarkie sind aber immer stärker erkennbar – angefangen von der Objektebene über die Quartiersebene bis hin zu kommunalen Leuchttürmen (z. B. energieautarke Gemeinden).

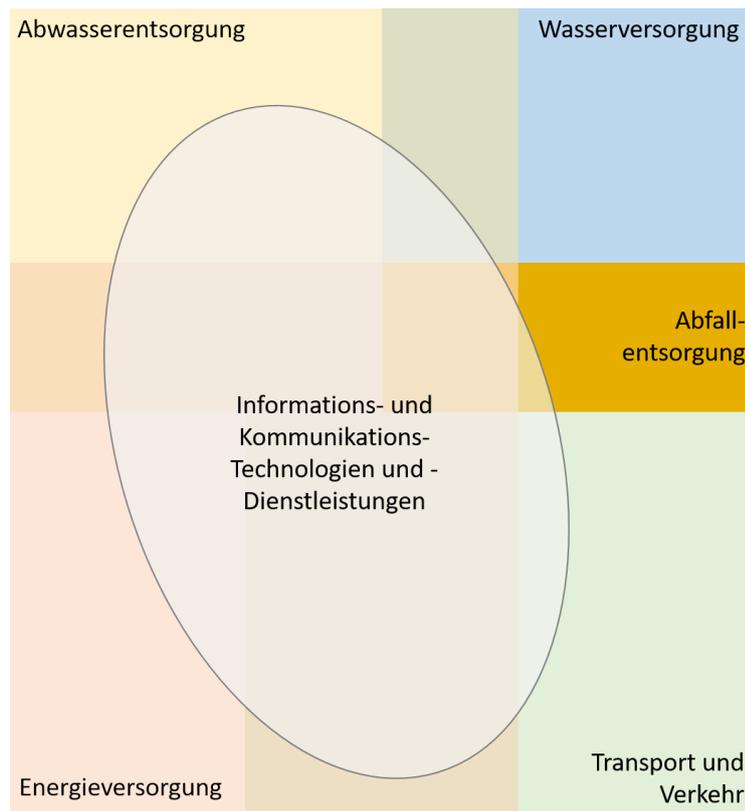
In TRAFIS werden vorrangig funktionale Kopplungen technischer Infrastruktursysteme und deren ausgewählte (Teil-)Systeme betrachtet. Im Blickfeld stehen sowohl Kopplungen, die auf Abhängigkeiten/Interdependenzen zwischen Infrastruktursystemen beruhen, als auch Kopplungen, die als mehr oder weniger lose bzw. redundante funktionale Verbindungen anzusehen sind.

### 2.2.3 Innersektorale und intersektorale Kopplungen

Die Recherche innovativer Infrastrukturkopplungen in TRAFIS (vgl. Anhang 2) bietet einen Überblick über die im Screening bestgestellten Kopplungsdynamiken innerhalb und zwischen Sektoren. Abbildung 2 zeigt schematisch die Beziehung der Basis-Sektoren + IKT untereinander. Die beobachteten Trends der Infrastrukturkopplungen legen folgende Annahmen nahe:

- ▶ Innovationen im Bereich der technischen Kopplungen sind zwischen den Sektoren nicht gleich verteilt. Die **aktuell stärkste Innovationsdynamik** ist in den Sektoren **Energie und Verkehr** zu beobachten.
- ▶ Die beobachtete Beteiligung der Sektoren an inter- und innersektoralen Kopplungen ist unterschiedlich intensiv verteilt. Auch hier findet sich eine Konzentration einerseits innerhalb des Sektors Energie mit seinen Domänen Wärme, Kraft und Gas und andererseits zwischen Energie und Verkehr. Auch die **Innovationen in den anderen Sektoren bestehen größtenteils in der Interaktion mit dem Energiesektor**.
- ▶ Kopplungen mit Beteiligung der IKT sind zumeist **Kopplungen der Basis-Sektoren und deren Teil-Sektoren mithilfe IKT** – d. h. IKT tritt nicht primär als physische Infrastruktur auf, sondern als steuerndes, ermöglichendes Element durch vernetzende Anwendungen. Oft wirkt IKT als neue Verbindungstechnologie auch zwischen Teil-Systemen von Sektoren (z. B. Regelungsleistungen der IKT bei der Energieerzeugung und -verteilung, Entwicklung „intelligenter“ Verkehrssysteme durch Ermöglichen von V2X-Technologien, oder auch nur bei der Steuerung der Druckverhältnisse in Wassernetzen durch Pumpensteuerung).
- ▶ Die eigentliche innovationstreibende Kopplungsdynamik in Bezug auf die meisten Kopplungen resultiert aus der **„ermöglichenden“ Eigenschaft der Informations- und Kommunikationstechnologien** (d. h. nicht nur der IKT-Infrastrukturen) zur Steuerung und Kommunikation bzw. Vernetzung etc., die gänzlich neuartige technische Kopplungen von Systemen auf unterschiedlichen räumlichen und System-Ebenen ermöglichen. So können z. B. private Nutzer auf Objektebene durch IKT-basierte Vernetzung und Steuerung zu Elementen überregionaler Infrastrukturen werden.

**Abbildung 2: Beziehung der Basissektoren + IKT untereinander**



Quelle: eigene Darstellung

### 2.3 Innovative Infrastrukturkopplungen

Das auf der vorgestellten Systematik aufbauende Screening nachhaltiger Infrastrukturkopplungen basiert auf einer **Identifikation und Sammlung potenziell relevanter Kopplungen**. Grundlage hierfür war die Auswertung von Quellen, wie z. B.:

- ▶ Veröffentlichungen (Zeitschriften, Broschüren, Zeitungen),
- ▶ Förderprogramme des Bundes und teilweise der Länder,
- ▶ laufende und abgeschlossene Projekte (Datenbank- und Suchwort-basierte Internet-Recherche),
- ▶ Gespräche in den Netzwerken der TRAFIS-Partner.

Das Ergebnis ist ein nicht abschließender Überblick über mögliche innovative Kopplungen mit Nachhaltigkeitspotenzial. Die Zusammenstellung enthält keine Information darüber, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Kopplung in den Quellen identifiziert wurde. Eine solche Analyse war nicht Ziel der Arbeiten. Berücksichtigt wurden aktuell geplante und laufende, in den vergangenen Jahren abgeschlossene Beispielanwendungen und Entwicklungen nicht etablierter Kopplungen sowie für die Zukunft diskutierte aber noch nicht hinreichend erprobte Kopplungen (z. B. piezoelektrische Stromerzeugung entlang von Straßen oder Bahntrassen).

Anhang 2 gibt einen **Überblick über die identifizierten innovativen Kopplungs-Trends**. Die Identifikation potenziell relevanter Kopplungen erfolgte anhand von Auswahlkriterien, die sicherstellen sollten, dass die Kopplungen sowohl transformationsrelevant sind als auch das Potenzial mitbringen, einen Beitrag zur Nachhaltigkeit (siehe Kapitel 4) zu leisten:

- ▶ **„Infrastrukturelevanz“** – Kopplungen, die das Potenzial haben, infrastrukturelevant zu wirken – z. B. auch Verbände objektbasierter Einzelanlagen, die in ihrer Gesamtheit Rückwirkungen auf den Betrieb der verbindenden Infrastruktur haben können.
- ▶ **Innovation** – Kopplungen, die in der Praxis (im Regime) noch nicht etabliert sind – sei es, weil die Technologie wenig erprobt ist (technologische Innovation) oder weil die breite Anwendung einer erprobten Technologie noch nicht erfolgt ist (Umsetzungsinnovation),
- ▶ **Nutzerrelevanz** – Kopplungen mit dem Potenzial der Wirkung auf Nutzerverhalten oder Nutzergewohnheiten.
- ▶ **Ressourceneffizienz** – Kopplungen mit dem Potenzial einer Wirkung auf Ressourcenverbrauch bzw. die Ressourceneffizienz.

Innovation ist ein zentrales Merkmal der in TRAFIS thematisierten Kopplungen. Dabei verwenden wir ein Innovationsverständnis, welches die Neuerung (i. S. Veränderung) eines Systems in den Vordergrund stellt ohne, wie dies in der Innovationforschung oft verknüpft wird, die bereits erfolgte Umsetzung und Etablierung dieser Neuerung zur Bedingung für Innovation zu machen (Specht und Möhrle 2018). Von der Innovation können die technischen, institutionellen oder sozialen (Nutzerseitigen) Elemente der betrachteten Infrastruktursysteme einzeln oder gemeinsam betroffen sein (vgl. Rennings 2000). Teilweise tangiert der Blick auf Innovation auch Veränderungen durch gänzlich neue technische Lösungen und Dienstleistungen den vom Innovationsbegriff abgegrenzten und der Innovation eher vorgelagerten Bereich der Invention (vgl. Haas 2018). Die Identifikation von innovativen Infrastrukturkopplungen beinhaltet daher bereits eine erste Vorauswahl von Kopplungen entlang der Frage: Ist die betreffende Kopplung bereits etabliert (State-of-the-Art) oder stellt sie eine (nicht etablierte) Innovation dar? Nur Kopplungen mit einer wie auch immer begründeten neuartigen funktionalen Verbindung von Teil-Systemen mit Auswirkungen im sozio-technischen System rücken ins Blickfeld unserer Untersuchung.

Die Ebene der Kopplungen ist hier von der Ebene der zugrundeliegenden Technologien zu unterscheiden. Eine physische Kopplung kann grundsätzlich mit unterschiedlichen Technologien realisiert sein. Z. B. funktioniert die Kraft-Wärme-Kopplung sowohl mit „herkömmlichen“ KWK-Anlagen als auch unter Verwendung von Brennstoffzellen. Die Speicherung von Strom kann sowohl Akku-basiert erfolgen als auch mithilfe von Wasserkraft, Druckluft, Schwungrädern etc. Negative Regelenergie kann durch zentrale Batterie-Speicher, Pumpen, Wärmepumpen oder Kfz-Flotten bereitgestellt werden. Überschussstrom kann in Wasserstoff oder weiter in Methan umgewandelt und sowohl im Gasnetz als auch separat gespeichert und ggf. rückverstromt werden. Das bei der Methanisierung eingesetzte CO<sub>2</sub>/CO kann vor Ort aus der Luft gewonnen werden oder aus industriellen Verbrennungsprozessen stammen, etc.

Die in Anhang 2 aufgeführten Beispiele für Kopplungen treffen keine Aussage über die hinter der jeweiligen Kopplung liegenden technischen Lösungen und Konfigurationen. Die Tabelle ist nach den an einer Kopplung beteiligten Sektoren, Teil-Sektoren und Teil-Systemen gegliedert. Dargestellt sind die grundsätzlichen Kopplungsmöglichkeiten ohne Berücksichtigung der jeweiligen technischen Ausführungsoptionen. Konkrete Konfigurationen von Kopplungen sind Gegenstand der (nicht technischen) Betrachtungen in den Fallstudien in TRAFIS (vgl. Kapitel 7 sowie Falluntersuchung in Hölscher et al. 2020).

Zur Illustration des Unterschieds zwischen bestehenden allgemein bekannten Kopplungen und tendenziell eher neuen bis innovativen Kopplungen sind in der Tabelle in Anhang 2 einige wenige etablierte Kopplungen belassen worden.

## 2.4 Cluster gekoppelter Infrastrukturen

Basierend auf dem oben dargestellten Screening werden aus der Gesamtheit der identifizierten gekoppelten Infrastrukturen sogenannte Cluster potenziell nachhaltiger Infrastruktorkopplungen abgeleitet. Cluster bilden thematisch zusammengehörende Gruppen von Kopplungen. Im TRAFIS-Vorhaben bilden diese einen strukturierenden Zwischenschritt für die Definition und Auswahl von Fallbeispielen im Nachhaltigkeitscheck (siehe Kapitel 3) sowie für die Analyse von Erfolgs- und Misserfolgskriterien (Hölscher et al. 2020). Die Auswahl der Fallbeispiele aus unterschiedlichen Clustern soll sicherstellen, dass die Arbeiten in TRAFIS eine große Breite unterschiedlicher Themen abdecken. Zugleich bietet die Clusterung auch eine Art Zusammenfassung des Screenings innovativer Infrastruktorkopplungen mit Nachhaltigkeitspotenzial.

„Cluster“ dienen in allen Bereichen der Wissenschaft zur Gliederung von Untersuchungsgegenständen entlang gemeinsamer Merkmale (vgl. Haas et al. 2018). Trapp et al. (2017, S. 158) bündeln Strategiepakete bei der Entwicklung gekoppelter Infrastrukturen zu Clustern und sprechen dabei von Gruppen bei denen „logische, inhaltliche Bezüge festgestellt werden konnten“.

Im hier verwendeten Sinne sind Cluster **Gruppen gekoppelter Infrastrukturen mit ähnlichen Merkmalen**. Grundsätzlich bieten viele unterschiedliche Ansätze bereits Kategorien für die Bildung zusammengehörender Gruppen, oder eben Cluster, z. B.:

- ▶ technische Funktionalität,
- ▶ gesellschaftliche Funktionen,
- ▶ Kopplungszweck,
- ▶ fachplanerische Zuordnung,
- ▶ fachpolitische Zuordnung,
- ▶ Planungsebene,
- ▶ Organisation,
- ▶ etc.

Basierend auf der Analyse der identifizierten innovativen Infrastruktorkopplungen mit Nachhaltigkeitspotenzial schlagen wir zwei Cluster-Optionen vor, mit denen die funktionalen und die politischen Interessen des Gesamtvorhabens aufgegriffen werden:

- ▶ Cluster-Option 1: Funktionale Zusammengehörigkeit
- ▶ Cluster-Option 2: Untersetzung eines übergeordneten Politikfelds

### 2.4.1 Cluster nach funktionaler Zusammengehörigkeit

Auf Basis der Gesamtübersicht identifizierter Infrastruktorkopplungen (Anhang 2) können Cluster abgeleitet werden, die vor allem funktional begründet sind, d. h. Gruppen von Kopplungen, die einem thematisch ähnlichen Zweck zugeordnet werden können. In diesem Schritt erfolgt die Ableitung von Clustern explorativ. Die Merkmale sind nicht vorbestimmt, sondern aus der Gesamtheit der identifi-

zierten innovativen Infrastrukturkopplungen mit Nachhaltigkeitspotenzial zur Strukturierung des Gesamtbildes abgeleitet. Folgende Gruppen bieten sich auf Grund der Häufigkeit der identifizierten Kopplungen an:

1. **Alternative und regenerative Energien** (v. a. Erzeugung regenerativer Energie/Energierückgewinnung und deren Einkopplung in bestehende Systeme, z. B. Wärme/Strom)
2. **Umwandlung und Speicherung von Energien** (v.a. Speicherung und Umwandlung von Überschussstrom und Wärme aus regenerativer Erzeugung; Strom-Wärme-Gas)
3. **Intelligente Netze** (v.a. Lösungen zur Lastregelung inkl. hybride Netze, Einbindung dezentraler Erzeuger, Speicher, Verbraucher)
4. **Intelligentes Flottenmanagement** (v. a. Logistiksysteme inkl. klassisches und privates Carsharing)
5. **Autonomes Fahren** (v.a. Entwicklungen hin zum autonomen Fahren)
6. **Sonstige** (verschiedene, z. B. intelligente Kanalsteuerung)

Diese Cluster dokumentieren, dass die stärkste Dynamik der Infrastrukturkopplungen auf das Thema des Umgangs mit alternativen und oft dezentralen Energiesystemen fokussiert ist. Die Dominanz dieses Themas begründet auch die erforderliche Differenzierung der Cluster in Bezug zum Energiesektor. Dennoch sind die Cluster sämtlich sektorübergreifend (Anhang 4). So sind auch die Sektoren Verkehr, Abwasser und Abfall in unterschiedlichen Konstellationen in die Energie-orientierten Kopplungen eingebunden.

## 2.4.2 Cluster nach politischen Dimensionen

Für die Bildung übergeordneter querschnittsorientierter Politikfelder bzw. relevanter „politischen Dimensionen“ bietet sich der Bericht des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2016) an. Das aktuelle Umweltgutachten liegt sehr nah an dem in TRAFIS behandelten Thema: Impulse für eine integrative Umweltpolitik (Untertitel) bzw. Vorreiterpolitik für eine ökologische Transformation (erstes Kapitel des Berichtes). Das Gutachten führt mehrere Beispiele „tief greifender ökologisch motivierter Transformationen [an, die] als notwendig erachtet [werden], um die Ressourcennutzung, Emissionen und Abfälle auf ein deutlich niedrigeres Niveau zu senken. Sie umfassen technischen, gesellschaftlichen und institutionellen Wandel und zielen auf grundlegende systemische Innovationen über längere Zeiträume“ (SRU 2016, S. 3, Ergänzungen der Autoren).

Das Gutachten nennt folgende Beispiele grundlegender systemischer Änderungen: die **Dekarbonisierung** als eines der zentralen Ziele der Energiewende, **Kreislaufführung** wichtiger Ressourcen, **Flächenschonung** sowie die naturverträgliche Landwirtschaft und Ernährung.

Die ersten zwei Nennungen stellen für unser Vorhaben zentrale, unmittelbar relevante querschnittsorientierte „Politikfelder“ mit Bezug zu Energie, Wasser, Abwasser und Abfall sowie Verkehr dar. Für Verkehr kann grundsätzlich auch ein Bezug zu Flächenschonung gesehen werden, obgleich dies vor allem im Kontext von Siedlungspolitik diskutiert wird. Naturverträgliche Landwirtschaft und Ernährung stellen dagegen kein relevantes Politikfeld in TRAFIS dar. Daher wurde die „politische Dimension“ in TRAFIS vor allem in den ersten drei Punkten des Umweltgutachtens gesehen. Als weitere zentrale politische Dimension wurde die „**Digitalisierung**“ ergänzt, wie sie in zahlreichen Strategiepapieren von Regierung und Ministerien als besonders wichtige Herausforderung thematisiert wird. Wie bereits zusammenfassend diskutiert, tritt diese Dimension primär als Bindeglied zwischen oder in Kombination mit einer der anderen drei Dimensionen in Erscheinung. Die Beziehung der genannten vier politischen Dimensionen untereinander und zu den in TRAFIS behandelten Sektoren ist in Tabelle 2 schematisch skizziert.

Die beiden hier umgesetzten Cluster-Ansätze können durchaus als alternative "Sortierkategorien" angesehen werden, die es erlauben, die identifizierten Kopplungen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten zu gruppieren. Eine abweichende Strukturierung des Gesamtbildes nach anderen Gesichtspunkten (z. B. nach beteiligten Sektoren oder nach einer räumlichen Handlungsebene) ist möglich und kann je nach Aufgabe und Perspektive sinnvoll sein. Hervorzuheben ist in unserem Fall jedoch auch die Passfähigkeit der verwendeten Cluster-Kategorien. Tabelle 2 zeigt, dass die aus der Gesamtheit der identifizierten Kopplungen abgeleiteten funktionalen Cluster gut mit den in der Clusterung nach „politischen Dimensionen“ zuordenbaren Politikfeldern in Deckung gebracht werden können.

**Tabelle 2: Gegenüberstellung der Cluster gekoppelter Infrastrukturen**

Nr.	Cluster nach funktionaler Zusammengehörigkeit	Korrespondierende politische Dimensionen
1	Gewinnung und Einbindung alternativer und regenerativer Energien <i>v. a. Erzeugung regenerativer Energie/Energierückgewinnung und deren Einkopplung in bestehende Systeme, z. B. Wärme/Strom</i>	Dekarbonisierung, Kreislauf-führung
2	Umwandlung und Speicherung v. a. regenerativer Energien <i>v. a. Speicherung und Umwandlung von Überschussstrom und Wärme aus regenerativer Erzeugung; Strom-Wärme-Gas</i>	Dekarbonisierung, Digitali-sierung
3	Intelligente Netze (z. B. Stromnetzstabilisierung, hybride Energie-netze) <i>v. a. Lösungen zur Lastregelung, inkl. Einbindung dezentraler Erzeuger, Speicher, Verbraucher</i>	Dekarbonisierung und Digi-talisierung
4	Intelligente Logistik in Personen- und Güterverkehr <i>v. a. Logistiksysteme (incl. klassisches und privates Carsharing)</i>	Digitalisierung, ggf. Flächen-schonung
5	Autonomes Fahren <i>v. a. Entwicklungen hin zum automatisierten Fahren</i>	Digitalisierung
6	Sonstige <i>verschiedene, z. B. intelligente Kanalsteuerung</i>	alle denkbar

## II Nachhaltigkeitscheck

### 3 Ziele und Vorgehen für die Durchführung des Nachhaltigkeitschecks

Der Wandel, der bislang weitgehend voneinander getrennt funktionierenden technischen Infrastrukturen hin zu gekoppelten Infrastruktursystemen, ist in vollem Gange und findet sektorübergreifend statt. Über die Potenziale vieler Infrastruktorkopplungen ist in der Breite bisher wenig bekannt. Die Systeme sind z. T. neuartig bzw. in der Praxis nicht etabliert. Innovationen können damit die technische Realisierung, die organisatorische Lösung, die Art der Dienstleistung, aber auch bei erprobter Technik eine „Umsetzungsinnovation“ bedeuten. Erfahrungen sind stark kontextualisiert und schwer verallgemeinerbar. Dennoch werden an solche sog. Sektorkopplungen vielfach große Erwartungen geknüpft hinsichtlich des effizienten Ressourceneinsatzes, des Klimaschutzes, der Kosteneinsparungen oder des Komforts für die Nutzer. Auf Seiten der Bundespolitik wird dieses Thema zunehmend bedeutsam. Insbesondere stehen Fragen nach den Potenzialen und Risiken solcher Kopplungen sowie nach Rahmenbedingungen, mit denen die Entwicklung nachhaltiger Infrastrukturlösungen unterstützt werden kann, im Raum.

Die Nachhaltigkeitsuntersuchungen in TRAFIS thematisieren nicht etablierte Kopplungen, d. h. solche, die in der Praxis nicht oder nur ungenügend umgesetzt und erforscht sind. Die Untersuchungen stützen sich daher auf synthetische Fälle – d. h. praxisnah formulierte angenommene Fälle –, keine realen Fälle von Kopplungen. Die Breite der in TRAFIS betrachteten Kopplungen fordert vor dem Hintergrund der zahlreichen möglichen Umsetzungsvarianten und Kontexte sowie der bestehenden Unsicherheiten bezüglich klimatisch induzierter Stressoren und deren Wirkung eher allgemein anwendbaren Bewertungsansatz. Daher kann der Nachhaltigkeitscheck v. a. mögliche Trends von Nachhaltigkeitswirkungen auf Basis von Experteneinschätzungen herausarbeiten und kann Detailuntersuchungen in konkreten Umsetzungsprozessen nicht ersetzen.

Ziel der hier entwickelten Nachhaltigkeits-Bewertung ist es, **erstens Nachhaltigkeitspotenziale** aufzuzeigen, die sich aus der innovativen Kopplung von Infrastrukturen entfalten können. **Zweitens**, gilt es auch, **Schwachstellen/Hemmnisse** zu identifizieren, die der Nachhaltigkeit entgegenlaufen oder die Entfaltung der Potenziale gekoppelter Infrastrukturen behindern bzw. die der Umsetzung einer erstrebenswerten Kopplung entgegenstehen und dabei **drittens** auch kritisch zu hinterfragen, welche **Rahmenbedingungen/Kontexte** dem Erreichen von Nachhaltigkeits-Zielen eher entgegenlaufen. Es handelt sich damit um einen formativen Evaluierungsansatz, der eine differenzierte Perspektive auf Chancen und Herausforderungen von Lösungsoptionen aufzeigt und somit Unterstützung für informierte Entscheidungen im Zusammenhang mit der Entwicklung neuartiger Lösungen bieten kann (Olfert et al. 2020).

#### **Schritt 1: Erarbeitung und Operationalisierung eines Konzepts für die Bewertung der Nachhaltigkeit von gekoppelten Infrastrukturen** (Kapitel 4)

Für die Durchführung des Nachhaltigkeitschecks wird ein für den Untersuchungsgegenstand (innovative gekoppelte Infrastrukturen) sowie die Fragestellung (überblickhafte Nachhaltigkeitsbewertung) angepasstes Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung innovativer gekoppelter Infrastrukturen entwickelt.

- Das Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung basiert auf einem grundsätzlichen Verständnis der Nachhaltigkeit (Kapitel 4.1), von dem vier die für die Fragestellung relevante **Nachhaltigkeitsdimensionen** abgeleitet werden: (1) Funktionalität gekoppelter Infrastrukturen, (2) soziale und

ökonomische Verträglichkeit, (3) Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz sowie (4) Versorgungssicherheit (Resilienz).

- ▶ Die Nachhaltigkeitsdimensionen sind durch ein Set von **26 Kriterien** untersetzt, welche zahlreiche existierende Nachhaltigkeitsbewertungsansätze mit thematischem Bezug zur Fragestellung berücksichtigen (Kapitel 4.2 und 4.3), wobei zu bemerken ist, dass keiner der recherchierten Bewertungsansätze spezifisch auf Infrastrukturkopplungen ausgelegt ist.
- ▶ Die ausgewählten Kriterien werden für 14 Anwendungen fallspezifisch operationalisiert (Kapitel 4.4). Die Operationalisierung der Kriterien für die Befragung erfolgt für jeden Fall spezifisch und berücksichtigt für die einzelnen Kriterien die Wirkungen in Richtung der beteiligten Infrastrukturen sowie die Perspektiven von Anbieter und Nutzer, so dass die 26 Kriterien in insgesamt 32 Fragen operationalisiert sind.

### **Schritt 2: Erarbeitung und Operationalisierung eines Bewertungskonzepts mithilfe der Delphi-Methode (Kapitel 5)**

Die Umsetzung des Nachhaltigkeitschecks erfolgt unter Rückgriff auf die Delphi-Methode. Diese bietet einen geeigneten methodischen Rahmen, um auf Basis allgemeiner Annahmen über die konstruierte synthetische Fälle von Kopplungen systematisch Experten-basierte Einschätzungen einzusammeln. Methode und Vorgehen sind in Kapitel 5.1 dargestellt.

Durch die Delphi-basierten Befragung werden (synthetische) Fallkonstellationen mithilfe des Kriteriensatzes hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkungen bewertet (Nachhaltigkeitscheck, Kapitel 6, Detailergebnisse siehe Kapitel 8). Zusätzlich wird die Praxistauglichkeit bzw. Anwendbarkeit des Nachhaltigkeitskonzepts im Allgemeinen und der Nachhaltigkeitskriterien geprüft (Praktikabilitäts-Check, Kapitel 7).

## 4 Nachhaltigkeits-Kriterien

### 4.1 Bewertungsdimensionen

Das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung ist ein mit unterschiedlicher Intensität und unterschiedlicher thematischer Gewichtung über die Ressortgrenzen hinaus verankerter Ansatz der Bundespolitik (Weiss et al. 2017, S. 58 ff). Für die Bewertung der Nachhaltigkeit generell wurden in den vergangenen Jahrzehnten auf verschiedensten Ebenen Ansätze und Kriteriensammlungen entwickelt. Diese reichen von gesamtgesellschaftlichen konzeptionellen Ansätzen, wie den Sustainability Development Goals (United Nations 2015) oder der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Die Bundesregierung 2016), bis hin zur Operationalisierung und Bewertung auf Ebene einzelner Organisationen, Projekte und Aktivitäten (Pope et al. 2004; Osranek 2017).

Der thematische Fokus, die konzeptionelle Rigidität oder die Konkretisierung in Kriterien/Indikatoren unterscheiden sich zwischen den Ansätzen mit dem Detaillierungsgrad, den Zielen der Betrachtung und dem jeweiligen Untersuchungsgegenstand selbst. Die Betrachtung einer gesamtgesellschaftlichen Nachhaltigkeit erfordert eine andere Betrachtungsebene, thematischen Fokus und Konkretisierung der Betrachtung als die Nachhaltigkeitsstrategie eines Unternehmens in einer bestimmten Branche. Als Referenz für die Operationalisierung des Nachhaltigkeitsverständnisses für die Untersuchung gekoppelter Infrastrukturen kommen daher vor allem solche Ansätze in Frage, die eine thematische Nähe und vergleichbare Ebene der Betrachtung einnehmen. Tabelle 6 beinhaltet die Referenzen zu den in TRAFIS konsultierten und berücksichtigten Bewertungsansätzen mit besonderem Bezug zu technischen bzw. baulichen Strukturen. Je nachdem welche Art baulicher Strukturen oder technischer Systeme der jeweilige Bewertungsansatz adressiert, fokussieren die Ansätze Aspekte, die mehr oder weniger für die Untersuchung von kommunalen Infrastruktursystemen geeignet sind (vgl. Kapitel 4.2). Keines der recherchierten Bewertungskonzepte ist auf Infrastrukturkopplungen ausgelegt. Es wurde daher in TRAFIS die Entscheidung getroffen, als Basis für die Entwicklung bzw. Zusammenstellung des Kriteriensets, ein spezifisches, für Infrastrukturkopplungen geeignetes konzeptionelles Nachhaltigkeitsverständnis zu entwickeln. Bei der Auswahl und Operationalisierung von Bewertungskriterien für den Nachhaltigkeitscheck in TRAFIS ist von Bedeutung, die relevanten konzeptionellen Grundlagen der Nachhaltigkeit zu beachten. Ein grundsätzlich anerkanntes Verständnis von Nachhaltigkeit entwickelt der sog. Brundtland Report, welcher Nachhaltigkeit allgemein als eine Entwicklung charakterisiert, *“which meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”* (UNWCED 1987, S. 423). Die mit diesem Verständnis verbundenen übergreifenden Ziele sind in der internationalen Literatur intensiv diskutiert und schlagen sich u. a. in den „Millenium Development Goals“ (United Nations 2000) nieder und wurden in den „Sustainable Development Goals“ (SDG) sowie der „2030 Agenda for Sustainable Development“ (United Nations 2015) weiter untersetzt. Auch viele Länder, Städte und Institutionen entwickeln ihre eigenen Ansätze und Programme für die Unterstützung und das Monitoring der eigenen Nachhaltigkeitsanstrengungen (United Nations 2015; European Commission 2016; Die Bundesregierung 2016; City of Sidney 2014; The City of New York 2011). Dennoch bleibt das grundsätzliche Verständnis der Nachhaltigkeit ein eher globales, nicht unmittelbar anwendbares Konzept (Lamming et al. 1999) mit einer geringen Anwendbarkeit in der Praxis (Brand und Jochum 2000).

Ziel unserer Arbeiten ist es, ein operables Nachhaltigkeitskonzept zu entwickeln, mit welchem Potenziale und mögliche Hemmnisse von innovativen gekoppelten Infrastrukturen auf lokaler und regionaler Ebene für die wesentlichen Kategorien der Nachhaltigkeit bewertet und dargestellt werden können.

Eine zentrale Grundlage in diesem Zusammenhang ist das grundlegende **Konzept der Nachhaltigkeit** mit seinen drei Säulen **Ökologie, Ökonomie und Soziales** (UNWCED 1987), deren Gleichgewicht mit hin als Nachhaltigkeit verstanden wird. Dieses allgemeine Konzept ist in vielerlei Hinsicht differenziert und ausgelegt worden. Dazu gehört z. B. das Verständnis einer „schwachen“ vs. einer „starken“ Nachhaltigkeit, die in ihrem Kern die Gewichtung bzw. Priorisierung der ökologischen Dimension unterscheidet (Hauff und Kleine 2014). Wie eingangs festgelegt, geht es in unserer formativ angelegten Untersuchung jedoch nicht um Gewichtung oder Aggregation. Vielmehr sollen Potenziale und Hemmnisse explorativ erkundet und nebeneinander gestellt werden. Die drei „Säulen“ dienen uns als drei wesentliche Perspektiven auf die Nachhaltigkeit.

Das „**energiepolitische Zieldreieck**“ (BMW und BMU 2010) steuert eine spezifischere Grundlage für die Bewertung bei. Diesen Ansatz interpretieren wir im Sinne der Nachhaltigkeit in vergleichbarer Form als „**infrastrukturpolitisches Zieldreieck**“, um es auf verschiedene Infrastrukturbereiche anzuwenden:

- ▶ **Versorgungssicherheit** beschreibt die Verlässlichkeit der (im Idealfall suffizienten) Verfügbarkeit einer durch die Infrastruktur bzw. Infrastrukturoption bereitgestellten Dienstleistung.
- ▶ **Wirtschaftlichkeit** bezieht sich sowohl auf die Bezahlbarkeit der Dienstleistung für die Nutzer als auch auf die Tragfähigkeit der ihr zugrundeliegenden Geschäftsmodelle für die Betreiber einer Infrastruktur bzw. Bereitsteller der jeweiligen Dienstleistung.
- ▶ **Umweltverträglichkeit** steht für den Einklang der eingesetzten Ressourcen und der Nutzung einer Infrastruktur mit den natürlichen Gegebenheiten.

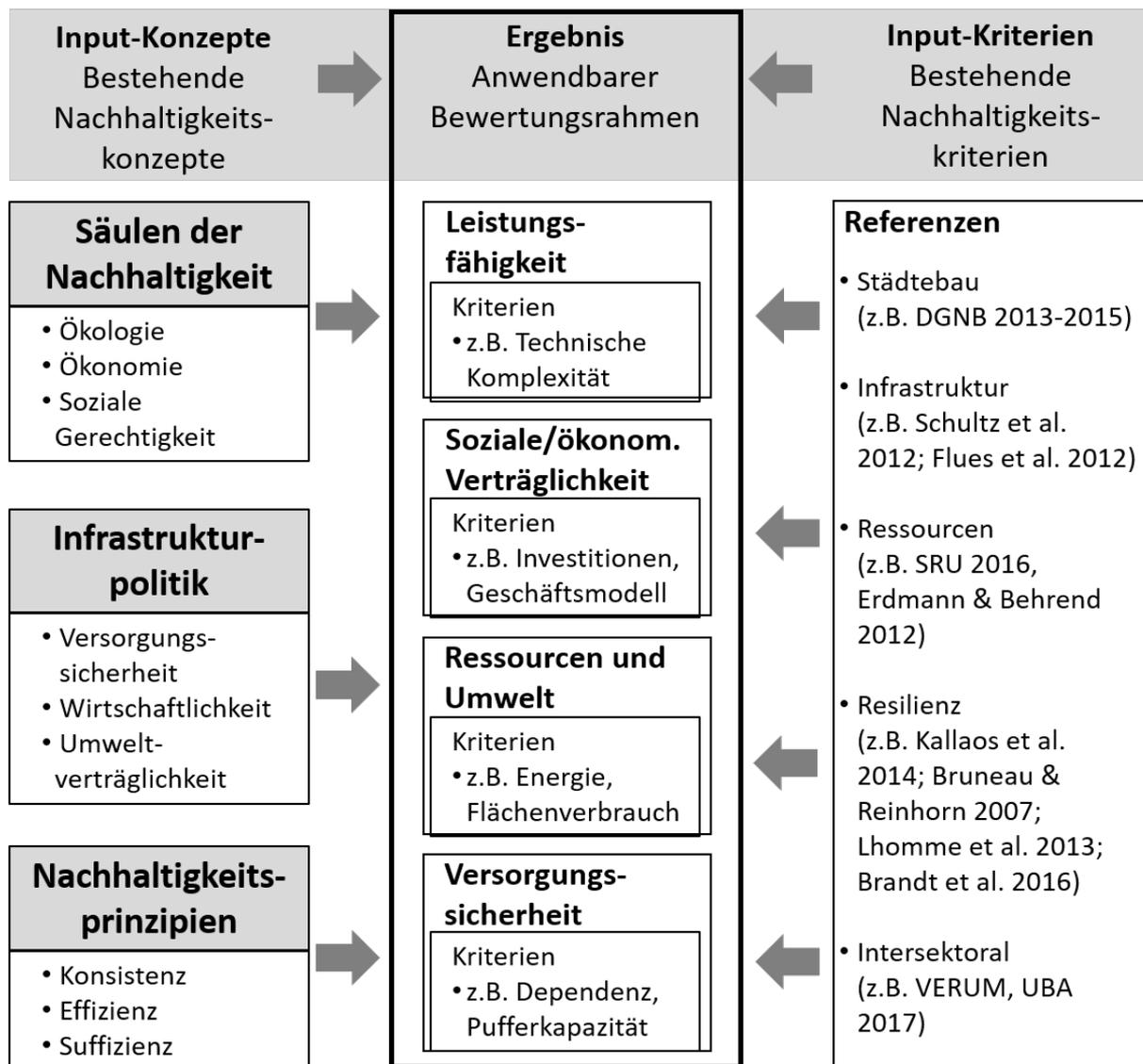
Zudem werden zur Ableitung relevanter Bewertungskriterien auch die sogenannten „Prinzipien der Nachhaltigkeit“ als ergänzendes normatives Konzept berücksichtigt (Bartelmus 2008; Dresner 2008; Rogall und Weiszäcker 2012). Dieses Konzept stellt einander ergänzende Handlungsprinzipien für das Erreichen einer Nachhaltigkeit auf:

- ▶ **Suffizienz** repräsentiert das Maß des tatsächlichen Bedarfs an Quantität und Qualität einer durch die Infrastruktur bzw. Infrastrukturoption bereitgestellten Dienstleistung. Die Bestimmung des suffizienten Maßes bedarf im Idealfall eines gesellschaftlichen Aushandlungsprozesses sowie darauf basierender Regularien. Sie steht im direkten Zusammenhang mit möglichen Rebound-Effekten, die beispielsweise durch Effizienzgewinne hervorgebracht werden können (Bezug z. B. zur Dimension „Soziales“ sowie zur Versorgungssicherheit i. S. der Bereitstellung der erforderlichen Dienstleistungen).
- ▶ **Effizienz** repräsentiert z. B. den Einsatz von Energie-, Material-, Flächen- oder Geld-Ressourcen, mit denen eine erforderliche (im Idealfall im Einklang mit dem Suffizienz-Prinzip) Dienstleistung erbracht und genutzt wird. Diese basiert auf effizienteren technischen Lösungen, aber auch auf effizienteren Management- und Nutzungskonzepten (Bezug zur Dimension „Ökonomie“ und zur „Wirtschaftlichkeit“).
- ▶ **Konsistenz** steht für den Einklang zwischen den eingesetzten Ressourcen und der Nutzung einer Infrastruktur mit ihren natürlichen Gegebenheiten. Sie ist gekennzeichnet durch die Art der gewählten Lösungen und Ressourcen, z. B. Kohle vs. Sonne bei der Stromerzeugung, und beschreibt die Umweltverträglichkeit der Lösungen im weiteren Sinne (Bezug zur Dimension „Ökologie“).

Als Ergebnis der Überschneidung dieser Kategorien schlagen wir ein Bewertungskonzept vor, welches Bezüge sowohl zu den genannten grundsätzlichen Verständnissen der Nachhaltigkeit als auch zu gebauten Infrastrukturen als Untersuchungsgegenstand haben. Diese Kategorien sind grundsätzlich noch akademisch und bieten noch keine operable Bewertungsgrundlage – jedoch markieren sie ein geeignetes Suchraster für die Auswahl geeigneter Kriterien für die Bewertung. Abbildung 3 zeigt auf, wie die genannten grundsätzlichen Kategorien der Nachhaltigkeit (Säulen, Prinzipien, Zieldreieck) auf der einen Seite und die in der Wissenschaft und Praxis entwickelten Kriteriensets im Gegenstromprinzip in den von uns eingesetzten Kriteriensatz zusammenfließen. Das von uns vorgeschlagene Bewertungskonzept umfasst die folgenden vier Kategorien:

- ▶ **Leistungsfähigkeit und Funktionalität** (vgl. Kapitel 4.2.1):  
*Was verändert die Kopplung in Bezug auf a) für die von Nutzern erwartete Leistung und b) für den Betrieb der Infrastruktur?*
- ▶ **Soziale und ökonomische Verträglichkeit** (vgl. Kapitel 0):  
*Wie ändert sich der Preis für die Nutzung und die Kosten für die Bereitstellung der jeweiligen Infrastrukturdienstleistung?*
- ▶ **Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz** (vgl. Kapitel 4.2.3):  
*Wie verändert sich der Verbrauch natürlicher Ressourcen durch die neuartige bzw. neuartig bereitgestellte Infrastrukturdienstleistung?*
- ▶ **Resilienz (i.S.v. engineering resilience)** (vgl. Kapitel 4.2.4):  
*Wie ändern sich Faktoren der Versorgungssicherheit im Zuge der neuartigen Kopplung im Kontext externer Stressoren, u. a. Wetterextremen?*  
Das Resilienzkriterium bezieht sich damit auf die Fähigkeit eines Infrastruktur-Systems, seine Funktionsfähigkeit auch bei äußeren Störungen in einem Mindestmaß aufrechtzuerhalten und das angestrebte Leistungsniveau relativ schnell und zu verhältnismäßigen Kosten zurückzugewinnen. Dies schließt sowohl die technischen als auch die managementseitigen Faktoren ein, welche die Funktion und deren Wiederherstellung beeinflussen können.

Abbildung 3: Entwicklung der Nachhaltigkeitskriterien in TRAFIS



Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3 thematisiert den Bezug der Bewertungsdimensionen zu den Grundlagen der Nachhaltigkeit. Wie gezeigt wird, decken die Bewertungsdimensionen unterschiedliche Kategorien der einbezogenen Nachhaltigkeitsverständnisse. Die Gegenüberstellung mit den Prinzipien der Nachhaltigkeit lassen erkennen, dass hier vor allem die Effizienz und teilweise Konsistenz gut eingebunden sind. Die Kategorie Suffizienz lässt sich hingegen im Rahmen unserer Untersuchung schwer operationalisieren.

**Tabelle 3: Bezug der Bewertungsdimensionen zu Dimensionen der Nachhaltigkeit, Prinzipien der Nachhaltigkeit und dem „infrastrukturpolitischen Zieldreieck“**

Bewertungsdimensionen	Bezug zu Dimensionen der Nachhaltigkeit	Bezug zu Prinzipien der Nachhaltigkeit	Bezug zu einem infrastrukturpolitischen Zieldreieck
<b>Leistungsfähigkeit und Funktionalität</b>	Soziales, Ökonomie (Bereitstellung einer Dienstleistung i. S. der Befriedigung von menschlichen Bedürfnissen und als Grundlage für Geschäftsmodelle)	v. a. Effizienz (Bezug zum potenziellen Effekt der Kopplung als Basis für Effizienzeinschätzungen)	v. a. Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit (Bezug zum pot. Effekt der Kopplung als Ausdruck einer Versorgung – Sicherung der Versorgung und Basis für Geschäftsmodelle)
<b>Soziale und ökonomische Verträglichkeit</b>	Soziales (Bezug zu Erwartungen und Möglichkeiten der Nutzer; z. B. Barrierefreiheit) Ökonomie	v. a. Effizienz Bezug zu Suffizienz denkbar, jedoch in TRAFIS nicht umgesetzt (z. B. reduziertes Maß der Leistungserwartung hätte Rückwirkung für techn. Design, Betriebsaufwand, Wirtschaftlichkeit)	Versorgungssicherheit (Bezug zur Nutzbarkeit i. S. technologischer Barrierefreiheit) Wirtschaftlichkeit (i. S. ökonomische Barrierefreiheit?)
<b>Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz</b>	v. a. Ökologie (Potenzial einer Veränderung, Ressourcen einzusparen)	v. a. Konsistenz, Effizienz (pot. Reduktion des Ressourcenbedarfs pro Dienstleistung)	Umweltverträglichkeit (pot. Reduktion des Ressourcenbedarfs pro erbrachte/abgerufene Dienstleistung)
<b>Resilienz i.S. Versorgungssicherheit (technische Resilienz)</b>	Soziales (i. S. der Befriedigung von menschlichen Bedürfnissen)	Konsistenz (z. B. Sinne Berücksichtigung von Umwelteinflüssen auf die Versorgungssicherheit); Bezug zur Suffizienz denkbar, jedoch in TRAFIS nicht umgesetzt (z. B. hätten höhere Pufferkapazitäten Rückwirkungen auf die erforderliche installierte Leistung)	Versorgungssicherheit (z. B. Sicherung bzw. schnelle Wiederherstellung der Versorgung auch bei externen Störungen)

## 4.2 Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastrukturkopplungen

Die abgeleiteten Bewertungsdimensionen bieten die Grundlage für ihre Desaggregation und Operationalisierung in Kriterien. Leitend für diesen Arbeitsschritt sind, neben den Bewertungsdimensionen selbst, einerseits der inhaltliche Kontext der Fragestellung (technische Infrastrukturen, innovative Kopplungen, bestehendes Wissensdefizit, Anwendung an synthetischen Fällen etc.). Andererseits ist es auch wichtig, anhand der Sichtung der zahlreich bestehenden Kriterien Sets mit Bezug zu Infrastrukturen potenziell geeignete Kriterien zu verifizieren. Hier einige Beispiele:

- ▶ Diaz-Sarachaga et al. (2016) vergleichen unterschiedliche Bewertungsansätze für technische Infrastrukturen und die dabei verwendeten Kriterien. Eine Hauptkritik der Autoren richtet sich gegen eine vermeintliche Überrepräsentation Umwelt-orientierter Kriterien.
- ▶ Fernández-Sánchez & Rodríguez-López (2010) analysieren Indikatoren-Sets für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauprojekten. Im Ergebnis schlagen sie einen gewichteten Indikator-Satz vor, welcher ökologische, soziale, ökonomische und managementorientierte Aspekte vereint.
- ▶ Spiller (2016) stellt eine breit angelegte Analyse von Nachhaltigkeitsindikatoren der Siedlungswasserwirtschaft vor und schlägt vier Hauptkategorien vor, die die in den ökologischen, sozialen, ökonomischen und technischen Dimensionen niederschlagen. Im Unterschied zu vielen anderen Ansätzen kann der Autor die Relevanz von Leistungs- und Resilienz-Indikatoren aufzeigen (z. B. Service-Qualität, Zuverlässigkeit oder Anpassungsfähigkeit).
- ▶ Ugwu et al. (2006) sowie Ugwu & Haupt (2007) diskutieren den Einsatz multidimensionaler Nachhaltigkeits-Bewertungen in Bezug auf Design und Ausführung von Infrastrukturvorhaben. Die Autoren entwickeln ein differenziertes Bild potenziell relevanter Kategorien inkl. Ökonomie, Gesellschaft, Ressourcenverbrauch, Gesundheit und Sicherheit, Projektmanagement etc. und operationalisieren diese durch Kriterien.

Weitere Ansätze zur Bewertung der Nachhaltigkeit bestehen für den Bereich des Städtebaus und haben einen differenzierten Blick auf Aspekte der Nachhaltigkeit einschließlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Parameter (z. B. DGNB 2013-2015 nicht veröffentlicht).

Auf einer unserem Bewertungssystem vergleichbaren überblickhaft-pragmatischen Ebene bewegt sich das am Umweltbundesamt entwickelte Verfahren für eine „Vereinfachte Umweltbewertung“ (VERUM 2.0, Berger und Finkbeiner 2017). Auch wenn für konkret auftretende Sachfragen ausgelegt, ist es dafür entwickelt, in einem engen zeitlichen Rahmen inhaltlich umfassende und systematische ökologische Erstbewertungen über Neuentwicklungen abzugeben. Im Unterschied zum hier speziell für gekoppelte Infrastrukturen entwickelten Nachhaltigkeitscheck ist der Bewertungsgegenstand von VERUM auf sehr unterschiedliche Bewertungsgegenstände ausgerichtet. Während sich VERUM mit den adressierten Belastungskategorien maßgeblich auf Fragen natürlicher Ressourcen konzentriert, blickt der Nachhaltigkeitscheck auch auf darüber hinausgehende Aspekte wie soziale und ökonomische Faktoren, die technische Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit.

**Tabelle 4: Gegenüberstellung der Bewertungsansätze von VERUM 2.0 (UBA) und Nachhaltigkeitscheck (TRAFIS)**

Vergleichsaspekte	VERUM 2.0 (Berger und Finkbeiner 2017)	Nachhaltigkeitscheck (TRAFIS)
Zielstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurzfristige systematische Erstbewertung von ökologischen Umweltwirkungen neuer Entwicklungen ohne vollständige/quantitative Untersuchungen (S. 11)</li> <li>• Betrachtung des kompletten Produktlebensweges (Rohstoffbedarf, Herstellung, Nutzung, Entsorgung) inklusive Material- u. Energievorketten (S. 15)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitative Trendabschätzung hinsichtlich Nachhaltigkeitswirkungen von Infrastrukturkopplungen</li> <li>• Betrachtet für Infrastruktursysteme angepassten Nachhaltigkeitsdimensionen</li> <li>• Globale/implizite Berücksichtigung des Produktlebensweges</li> <li>• Trendhaftes Aufzeigen von Wirkungen</li> <li>▶ Vergleichbare Bewertungsziele und Betrachtungstiefe</li> </ul>
Bewertungsgegenstand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Universelle Umweltfolgenbewertung für verschiedene Untersuchungsgegenstände wie Produkte, Verfahren o. Dienstleistungen (S. 11)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht etablierte (teils emergente) Lösungen im Bereich sozio-technischer Infrastruktursysteme der Daseinsvorsorge auf lokaler bzw. regionaler Ebene.</li> <li>• Synthetische (bzw. hypothetische) bis konkret geplante oder in der Umsetzung befindliche Fälle</li> <li>▶ Untersuchungsgegenstand eingeschränkt auf Infrastrukturen</li> </ul>
Bewertungskriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fünf Belastungsarten untersetzt in 18 Belastungskategorien (Verum, S. 16-19): 1) chemische Belastungen, 2) physikalische Belastungen, 3) biologische Belastungen, 4) Ressourceninanspruchnahme, 5) sonstige Belastungen</li> <li>• Auswahl der relevanten Belastungskategorien gemäß des Untersuchungsgegenstandes anhand der In- u. Outputs erforderlich (S. 22)</li> <li>• Universell einsetzbar ohne weitere Operationalisierung (S. 96)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vier Bewertungsdimensionen untersetzt durch insg. 26 Kriterien: 1) Leitungsfähigkeit, 2) Soziale/ökonomische Verträglichkeit, 3) Ressourcenschonung/Ressourceneffizienz, 4) Resilienz (Versorgungssicherheit)</li> <li>• Fallspezifische Operationalisierung der Kriterien erforderlich</li> <li>▶ Inhaltliche Überschneidung in der Bewertungsdimension Ressourcenschonung / Ressourceneffizienz</li> <li>▶ Zusätzlich Betrachtung sozialer und ökonomischer Wirkungen sowie Versorgungssicherheit</li> </ul>
Bewertungsskala	<p>Bewertung der Umweltwirkungen anhand einer 5-stufigen Bewertungsskala von keiner bis sehr hoher Belastung („keine Belastung“ repräsentiert jede Ausprägung positiver Wirkungen (S. 28)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse positiver und negativer Nachhaltigkeitswirkungen (Potenziale und Herausforderungen)</li> <li>• 5-Stufige Bewertungsskala („deutlich negativ“ bis „deutlich positiv“)</li> <li>▶ Vergleichbare Bewertungsschärfe</li> </ul>

Bei der Sichtung dieser und zahlreicher weiterer Ansätze fällt auf, dass insbesondere die Frage nach der Resilienz weitgehend unbeachtet bleibt. Die systematische Bewertung von Resilienz-Aspekten ist derzeit noch Gegenstand spezialisierter Forschung und Entwicklung und in Form von Kriterien bisher kaum operationalisiert (Bruneau et al. 2003; Lhomme et al. 2013; Kallaos et al. 2014; cf. Brand und von Gleich 2015).

Die Desaggregation und Operationalisierung der Bewertungsdimensionen erfolgt in Form von Kriterien, die zielgerichtet im Hinblick auf den Bewertungsgegenstand (synthetische Fälle), das Bewertungsziel (Nachhaltigkeitscheck) und die Möglichkeiten der Delphi-Methode formuliert werden. Die Auswahl der Kriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung selbst erfolgt auf Basis der folgenden Auswahlkriterien (Reihenfolge entspricht der Priorität der Auswahlkriterien):

- ▶ Relevanz für die inhaltliche Untersetzung der Fragestellungen und Ziele in TRAFIS, v. a. die Bewertungsdimensionen (vgl. Kapitel 4.1). Operationalisierbarkeit für ein vorrangig quantitatives Delphi anhand synthetischer Fallkonfigurationen.
- ▶ Ableitbarkeit aus vorangegangenen Diskussionen bzw. bestehenden Kriteriensets zur Bewertung der Nachhaltigkeit in „verwandten“ Themengebieten.
- ▶ Abbildung der wesentlichen Dimensionen und Prinzipien der Nachhaltigkeit sowie des angenommenen „infrastrukturpolitischen Zieldreiecks“.

Im Folgenden wird die Ableitung der Kriterien in den genannten Bewertungsdimensionen kurz vorgestellt.

#### **4.2.1 Leistungsfähigkeit und Funktionalität**

Die Hauptfunktion von Infrastrukturen ist die Bereitstellung von durch die Gesellschaft nachgefragten Dienstleistungen. Bei dieser ersten Bewertungsdimension geht es daher primär darum, ob die innovativ gekoppelte Infrastrukturlösung das Potenzial mitbringt, ebendiese erwartete Dienstleistung in Qualität und Quantität zu erbringen. Die wesentlichen Kriterien beziehen sich daher auf folgende Aspekte:

- ▶ Wirksamkeit (Effektivität/Leistungsfähigkeit) beschreibt die Fähigkeit, das Ziel bzw. den Nutzen (hier die jeweilige Infrastrukturdienstleistung ungeachtet der Kosten) zu erbringen (Thommen 2018).
- ▶ Komplexität der Lösung (technische Konfiguration, Managementanforderungen). Dieser Aspekt nimmt Bezug auf die Erwartung, dass Infrastrukturlösungen durch die Verknüpfung bis dahin nicht verknüpfter Teil-Systeme neue Systeme mit mehr verbundenen Elementen, neuen Abhängigkeiten (Feess 2018) sowohl in deren technischen als auch in den institutionellen Kompartimenten schaffen und daher mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Komplexität des Infrastruktursystems Einfluss haben. Dies ist ein Aspekt, der mit weiteren Kriterien in den Bereichen Wirtschaftlichkeit und Störungsanfälligkeit verknüpft ist. Die Frage der Komplexität erstreckt sich dabei auf die technischen, organisatorischen und gesellschaftlichen Systemkomponenten, wie sie auch für den Innovationsbegriff diskutiert worden sind (Rennings 2000; Jacucci et al. 2006).

#### 4.2.2 Soziale und ökonomische Verträglichkeit

Neben der Konfiguration und Leistungsfähigkeit der jeweiligen Infrastrukturlösung ist ein weiterer wesentlicher Aspekt die Akzeptabilität der Lösung – sowohl für die Nutzer als auch für die Betreiber der Infrastruktur. Die Frage der Bezahlbarkeit für die Nutzer spielt hier eine ebenso große Rolle wie die Wirtschaftlichkeit des Angebots für die Betreiber. Die Hauptkategorien hier sind demnach:

- Technische und ökonomische Barrierefreiheit (für die Nutzer), mit welcher die Teilhabe der Nutzer an den „öffentlichen“ Dienstleistungen von Infrastrukturen der Daseinsvorsorge angesprochen wird. Dabei ist Teilhabe weniger als die vielfach diskutierte „soziale Inklusion“ verstanden, sondern deutlich eingengter als die Möglichkeit der Nutzer, Infrastrukturdienstleistungen (weiterhin) zu beziehen nachdem die Art und Weise deren Erbringung sich verändert hat. Dieses kann Grundsätzlich verschiedene Aspekte betreffen, von denen hier vor allem die ökonomische und die technische Barrierefreiheit von Interesse sind. Die ökonomische Barrierefreiheit von Infrastrukturdienstleistungen ist vielfach diskutiert, z. B. in Bezug auf den Zugang zum Transportsystem (Litman und Burwell 2006) oder zum Gesundheitswesen (Wilson und Rosenberg 2004; Neutens 2015). Dies stellt die Frage nach der Erschwinglichkeit der veränderten Infrastruktur. Einerseits sind sowohl öffentliche als auch privatwirtschaftliche Infrastrukturbetreiber angehalten, mindestens kostendeckend zu arbeiten (siehe z. B. Kostendeckungsprinzip für öffentliche Infrastrukturen) – dies hat Implikationen auf den Preis, den die Verbraucher für die Inanspruchnahme von Diensten zu zahlen haben. Darüber hinaus es ist nicht abwegig anzunehmen, dass die Nutzung einer veränderten Infrastruktur auch nutzerseitige Investitionen erfordert, um sie nutzen zu können, z. B. durch den Umbau oder Installation neuer technischer Einrichtungen in Gebäuden oder Fahrzeugen oder durch die Notwendigkeit der Anschaffung von elektronischen Endgeräten für deren Bedienung.

Der Aspekt der technologischen Barrierefreiheit adressiert die Frage nach der potenziellen Exklusion von Nutzergruppen (z. B. Menschen der Altersgruppe 65+) durch den Zwang zur Nutzung von online-Diensten, um eine Dienstleistung überhaupt in Anspruch nehmen zu können (z. B. viele Carsharing-Angebote). Dieser Zusammenhang ist bereits früh untersucht und belegt worden (vgl. z. B. Verkasalo et al. 2010), dennoch wird er in der vorliegenden Untersuchung nicht aufgegriffen, da die Frage der technischen Erreichbarkeit ein in der Zeit dynamischer Aspekt ist, der stark mit veränderlichen Faktoren wie den Vorkenntnissen der Nutzergruppen, der Qualität der Umsetzung der Dienste oder der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Endgeräte zu tun hat.

- Wirtschaftlichkeit (für die Betreiber) öffnet den Aspekt der Effizienz. Für die Bemessung der Gebühren öffentlich betriebener Infrastrukturdienstleistungen in Deutschland gilt das Kostendeckungsprinzip – d. h. in diesem Fall, dass die Kosten der Bereitstellung durch den vom Verbraucher zu tragenden Preis bzw. Gebühr zu tragen sind (Franz 2005, S. 352f). Oft gilt hier ein Monopol (z. B. Wasserver- oder Abwasserentsorgung), so dass die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Geschäftsmodells hier nicht zwingend den Überlegungen zugrunde liegt. Ergänzend zur oben diskutierten Erschwinglichkeit der Dienstleistungen für die Verbraucher geht es hier um die Anbieterperspektive und die Frage nach der ökonomischen Tragfähigkeit des Geschäftsmodells als Infrastrukturanbieter insgesamt. Dies ist überall da von Interesse, wo das Geschäftsmodell eines Dienstleistungsanbieters im Wettbewerb zu anderen potenziellen Anbietern steht und ggf. Ge-

winnabsichten bedient werden sollen (z. B. bei modernen Carsharing-Anbietern, Anbieter alternativer Energien wie Abwärme etc.) – somit also auch strategisch eine Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen ist (zum Verständnis „Geschäftsmodell“ im Kontext des Wettbewerbs vgl. Grösser 2018).

### 4.2.3 Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

Effizienz steht zusammen mit Suffizienz und Konsistenz als grundlegendes normatives Konzept im Zentrum des Diskurses zu Strategien nachhaltiger Entwicklung (Rogall und Weizsäcker 2012).

Der Grundgedanke hinter Effizienz-Strategien ist die Entkoppelung von Wohlstandsentwicklung und Ressourcenverbrauch (Reutter 2007), letztlich „Mehr aus Weniger“ zu machen (Linz 2006). Die damit verbundene Vorstellung von Win-win-Situationen, in denen „die Realisierung eines angemessenen ökonomischen Wohlstandsniveaus bei gleichzeitiger Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen“ (Scholl und Clausen 1999) möglich ist, ist vermutlich die Hauptursache dafür, dass das Effizienz-Konzept im Diskurs um eine nachhaltige Entwicklung sehr prominent und positiv belegt vertreten ist. Dies umso mehr, als das politische Konzept eine direkte Entsprechung im umgangssprachlichen, typischerweise positiv konnotierten Effizienzbegriff hat. Dieser bezeichnet in der Regel ein angemessenes oder wünschenswertes Verhältnis von Aufwand und Nutzen, wobei die spezifischen Implikationen der Begriffsverwendung selten reflektiert werden: „Vielfach dient das Adjektiv ‚effizient‘ ... lediglich als Synonym für das Adjektiv ‚gut‘“ (Kleine 2002). Vor diesem Hintergrund muss das Konzept Effizienz – ähnlich wie das darüber liegende Konzept „Nachhaltigkeit“ – für große Teile des politischen und gesellschaftlichen Diskurses vor allem als „Boundary Object“ (Star und Griesemer 1989) aufgefasst werden. Boundary Objects haben, gerade aufgrund ihrer Unschärfe oder Plastizität, das diskursive Potenzial, verschiedenen Akteursgruppen als Orientierung zu dienen und zugleich als gemeinsamer Bezugspunkt zwischen diesen zu vermitteln (Schiller et al. 2012).

Das allgemeine Effizienzkonzept, das auf wirtschaftlichen Mitteleinsatz abzielt, wird als „ökonomisches Prinzip“ bezeichnet, das „ein ständiges Abwägen des Aufwands und Ertrags“ bedeutet (Streit 1991, S. 3). Nach dem ökonomischen Prinzip ist eine Einheit effizient, wenn mit einer gegebenen Inputmenge ein maximaler Output erzielt wird (Maximalprinzip) oder wenn ein gegebener Output mit einem minimalen Input erreicht wird (Minimalprinzip) (Wöhe 2002; Kositzki 2004; Schlander 2009).

Aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive ist vor allem das Konzept der technischen Effizienz von Bedeutung. Technische Effizienz bezieht sich auf mengenmäßige Beziehungen zwischen Input und Output, also auf physische Größen. Sie beschreibt das Verhältnis vom Output eines Produktionsprozesses und wird deshalb auch allgemein als Produktivität bezeichnet (Cantner et al. 2007). Technisch ineffiziente Prozesse bzw. Einheiten führen zu einer Verschwendung von Produktionsfaktoren. Im englischsprachigen Raum wird technische Effizienz auch als „engineering efficiency“, also als ingenieurwissenschaftliche Effizienz thematisiert (z. B. Cooper et al. 2006).

Da für ein Produkt in der Regel verschiedene technisch effiziente Produktionsprozesse möglich sind, bedarf es weiterer Kriterien, um zu beurteilen, welche der bestehenden technisch effizienten Varianten zu bevorzugen ist. So kann gefragt werden, welche der technisch effizienten Varianten mit gleichem Nutzen sich mit den geringsten Kosten realisieren lässt (Minimierung des einzusetzenden Kostenbudgets). Dies ist Gegenstand der betriebswirtschaftlichen Kostentheorie (Wöhe 2002, S. 357ff), die nach der kosteneffizientesten technisch effizienten Variante sucht. Neben der Orientierung an Kosten kann eine Priorisierung auch entlang anderer Kriterien erfolgen, beispielsweise der Minimierung unerwünschter Umweltwirkungen, operationalisiert durch Verwendung geeigneter Indikatoren. Eine derartige Perspektive firmiert häufig unter dem Begriff „Ökoeffizienz“. „Öko-Effizienz ist das Verhältnis der Inputs (Ressourcen) und/oder unerwünschten Outputs (Kondukte) zum erwünschten Output (Produkt)“ (Günther 2005, S. 21).

Spezifische Bedeutung gewinnt der Begriff Ressourceneffizienz daher aus einer umweltwissenschaftlichen Perspektive, die den Ressourcenbegriff auf die natürlichen Ressourcen begrenzt: „**Ressourceneffizienz drückt das Verhältnis vom Output zum Einsatz der natürlichen Ressourcen aus** (...). Hierbei wird auch die Schadstofffreisetzung als Verbrauch natürlicher Ressourcen gesehen“ (Rogall 2008, S. 26). Letzteres nimmt Bezug auf die Senken-Funktion der natürlichen Umwelt, also deren begrenzte Kapazität, Emissionen unterschiedlicher Art aufzunehmen. Betrachtet man den normativen Aspekt des Konzepts Ressourceneffizienz, dann wird nach Wegen gesucht, gewünschte Outputs mit geringerem Einsatz an natürlichen Ressourcen bereitzustellen und zu nutzen (Minimalprinzip) (Schiller et al. 2012).

Hier überschneidet sich der Begriff der Ressourceneffizienz auch mit dem bereits oben erwähnten Begriff der „Öko-Effizienz“. Allerdings liegen die in der Praxis verwendeten Definitionen und Auffassungen von Öko-Effizienz bzw. auch „ökologischer Effizienz“ in einer erheblichen Bandbreite und Unterschiedlichkeit vor, weshalb der Begriff auch als ‚schillernd‘ bezeichnet wird (z. B. Allen 2002; Scholl und Clausen 1999; für einen Überblick: Günther 2005). Vor diesem Hintergrund wird der Begriff Ressourceneffizienz für einen wissenschaftlichen Zugang als handhabbarer und tendenziell eindeutiger definierbar dem Konzept der „Öko-Effizienz“ vorgezogen (Schiller et al. 2012).

Konkretisierungen des Begriffs der natürlichen Ressourcen fallen in der wissenschaftlichen Literatur ebenso wie in politischen Strategiepapieren sehr verschieden aus (u.a. Siebert 1983; Schütz und Bringezu 2008). Auf Grundlage einer Auswertung unterschiedlicher Begriffsverwendungen auf nationaler und internationaler Ebene empfehlen Schütz and Bringezu (2008) eine zweistufige Begriffsbestimmung zur **Definition natürlicher Ressourcen**. Demnach umfassen „Natürliche Ressourcen [...] im weiteren Sinne alle Funktionen des Ökosystems Erde sowie des Sonnensystems, die vom Menschen direkt oder indirekt genutzt werden oder genutzt werden können bzw. die die Grundlage seines (Über-)Lebens und Wirtschaftens und der Ko-Existenz mit der Natur darstellen. Dazu zählen z. B. Funktionen wie die Stabilität des Klimas, der Schutz vor schädlicher Strahlung durch die Ozonschicht, die Aufnahmefähigkeit für Schadstoffe, die Stabilität und Regenerationsfähigkeit natürlicher artenreicher Lebensräume und die Solarstrahlung. Im engeren Sinne versteht man unter natürlichen Ressourcen zum einen biotische und abiotische Rohstoffe (Biomasse und Mineralien) und Wasser, die für die verschiedenen sozio-industriellen Zwecke (für Nahrungsmittel, Bau- und Werkstoffe, zur Energiegewinnung usw.) auf Grund ihrer stofflichen oder energetischen Eigenschaften oder technologischer Gegebenheiten der natürlichen Umwelt entnommen werden. Zum anderen versteht man darunter das Land, das dafür und darüber hinaus für verschiedene Zwecke und in unterschiedlicher Weise und Intensität genutzt wird (für Siedlungen und Verkehr, Land- und Forstwirtschaft, Abgrabungen, als Erholungsraum und für Naturschutz)“ (Schütz und Bringezu 2008, S. 45).

Dieses **Grundverständnis des Begriffs „natürlicher Ressourcen“** bietet insofern einen geeigneten Ausgangspunkt für TRAFIS, als Wirkungen von Infrastrukturkopplungen auf die Nutzung natürlicher Ressourcen im engeren Sinne – und in diesem Kontext insbesondere **Rohstoffe, Energie, Wasser** sowie **Flächen und Böden** im Zentrum der Auseinandersetzung mit Fragen einer ressourceneffizienten Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung stehen. Darüber hinaus sind **Emissionen** zu berücksichtigen, die Wirkungsbezüge zu natürlichen Ressourcen im weiteren Sinne aufzeigen, insbesondere zu **klima- und umweltrelevanten Emissionen**.

**Ressourceneffizienz in TRAFIS** thematisiert damit den sparsameren Umgang mit natürlichen Ressourcen – v. a. Rohstoffe, Energie, Boden, Fläche sowie die Verringerung klima- und umweltrelevanter Emissionen bei der Erbringung von Leistungen der Daseinsvorsorge durch Kopplung von Infrastrukturen.

#### 4.2.4 Resilienz

Klimaresilienz betrachtet die Resilienz der gekoppelten Infrastrukturen gegenüber externen Störfaktoren einschließlich der klimatisch induzierten bzw. beeinflussten Einwirkungen (sog. Naturgefahren), v. a. solche wie Hitze, Starkregen, Hagel, Überschwemmung, Trockenheit, Sturm, Gewitter, Schnee.

Die Resilienz von Systemen hat sich zunehmend zu einem zentralen Thema sowohl für die Betreiber als auch Nutzer von Infrastrukturen entwickelt (McDaniels et al. 2008). Seit dem Aufkommen der zunächst v. a. Ökologie-orientierten Resilienzdiskussion (Holling 1973) und einer späteren Differenzierung auch für technische Systeme (Holling 1996) ist das Konzept disziplinübergreifend weiterentwickelt worden (vgl. z. B. De Brujn, 2005). In Bezug auf das Verständnis von Infrastrukturen als sozio-technische Systeme bietet sich ein Verständnis an, welches die technischen und sozio-ökonomischen Faktoren der Resilienz beinhaltet:

*Resilience is the ability [of a System] to anticipate, prepare for, and adapt to changing conditions and withstand, respond to, and recover rapidly from disruptions (Schultz und Smith 2016).*

Demzufolge ist ein System umso resilienter, je größer die Störung ist, die es absorbieren kann, ohne durch strukturelle oder funktionale Veränderungen in ein abweichendes Funktionsregime wechseln zu müssen. Das Resilienz-Kriterium bezieht sich damit auf die **Fähigkeit** eines Infrastruktursystems, seine **Funktionsfähigkeit** auch **bei äußeren Störungen in einem Mindestmaß aufrechtzuerhalten** und das **angestrebte Leistungsniveau relativ schnell und zu verhältnismäßigen Kosten zurückzugewinnen**. Dies schließt sowohl die technischen als auch die managementseitigen Faktoren ein, die die Funktion und deren Wiederherstellung beeinflussen können.

Eine solche Betrachtung der Resilienz beinhaltet in TRAFIS mehrere für die weitere Differenzierung und spätere Operationalisierung relevante Ebenen:

1. *Welches System ist gemeint?*

Infrastruktursysteme auf lokaler bzw. regionaler Ebene mit all ihren Abhängigkeiten von den übergeordneten Ebenen (nationaler oder internationaler Verbund – z. B. bei Strom).

2. *Welche Art/Intensität von Störungen?*

Grundsätzlich sind zahlreiche interne und externe Störungsmechanismen denkbar, einschließlich der als Klimaresilienz angesprochenen klimabedingten Störungen wie Hitze, Starkniederschlag, Hagel oder Überschwemmung in ihrer angenommenen Maximalausprägung. Andere Arten externer Störungen wie Kriegis- oder Sabotageschäden werden nicht betrachtet.

3. *Was ist das anzustrebende (Mindest-)Maß an Funktionsfähigkeit, das aufrechterhalten werden muss, um noch von einem resilienten System sprechen zu können? Und was ist das im Normalbetrieb angestrebte Leistungsniveau?*

Diese Frage ist essenziell, einerseits in der Abgrenzung von robusten Systemen – diese hätten das Ziel, möglichen Störungen zu widerstehen – ein in der Realität nicht gänzlich erreichbares bzw. gesellschaftlich kaum finanzierbares Ziel. Resiliente Systeme erleiden Funktionseinbußen, sind aber in der Lage, diese teilweise zu kontrollieren (z. B. durch Antizipation und Vorbereitung, von „known knowns“ über „known unknowns“ (Groß 2010) bis „black swans“ (Kirchner et al. 2016a)) und die Funktionsfähigkeit mit verhältnismäßigem zeitlichen und finanziellen Aufwand wieder herzustellen. Dieses Verständnis kann dennoch die Robustheit von Systemelementen beinhalten.

Eine bedeutende Frage, die in TRAFIS nicht thematisiert wird: Wie stark kann eine kontrollierte bzw. planbare Funktionseinbuße sein? Diese Frage ist auch unter Suffizienzgesichtspunkten relevant: Wie viel Sicherheitspuffer in den Systemen ist ausreichend und was bedeutet das z. B. auch für die Kosten

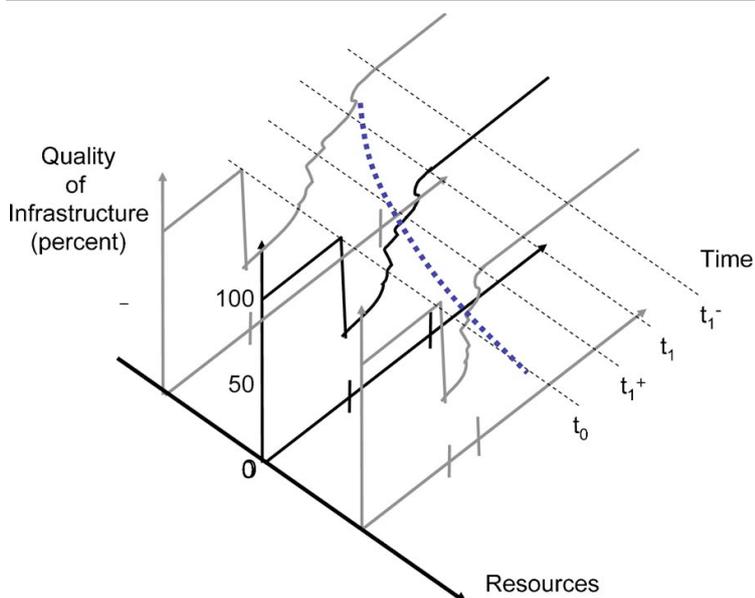
für die Errichtung und den Betrieb der Systeme? Diese Fragestellung ist gesellschaftlich noch nicht annähernd andiskutiert und kann in TRAFIS leider nicht betrachtet werden.

Grundsätzlich verfügen resiliente Systeme über Eigenschaften, die es ihnen erlauben, mit Störungen umzugehen ohne den Anspruch, diesen ohne Einschränkungen zu widerstehen (Robustheit). Der Preis sind im besten Fall planbare und zeitlich begrenzte Funktionseinbußen. Die Vorteile sind die Vermeidung von Totalzusammenbrüchen, wie sie bei unkontrollierten – weil nicht vorgesehenen – Störungen erwartbar wären. Bruneau and Reinhorn (2007) legen nahe, dass Resilienz keine gegebene stabile Eigenschaft von Systemen ist (Abbildung 4) (vgl. auch Schultz and Smith, 2016), sondern diese von unterschiedlichen technischen und sozio-ökonomischen Faktoren beeinflusst werden kann. Dies beinhaltet zugleich auch, dass bestehende Systeme ihre Resilienz auch ohne technische Änderungen verbessern können – etwa durch organisatorische Änderungen oder eine bessere Ressourcenausstattung (Geld, Personal).

4. *Schließlich ist auch die Frage zu beantworten: Was ist eine gesellschaftlich akzeptable bzw. relevante Zeitspanne (vgl. Walker et al., 2006) bzw. verhältnismäßige Kosten für die Wiederherstellung des angestrebten Leistungsniveaus?*

Walker et al. (2006) sprechen in diesem Zusammenhang von reversiblen, irreversiblen bzw. effektiv irreversiblen (d. h. nicht in gesellschaftlichen relevanten Zeiträumen und Kosten reparablen) Ausfällen.

**Abbildung 4: Resilienzkonzept und potenzielle Entwicklung von Resilienz in der Zeit bei gegebenen Ressourcen**



Quelle: Bruneau und Reinhorn 2007

Eigenschaften, welche die Resilienz von (Infrastruktur-)Systemen beschreiben, sind mehrfach aufgestellt und weiterentwickelt worden (v.a. basierend auf Bruneau et al., 2003; Walker et al., 2006) und sind für die jeweiligen Anwendungszwecke spezifiziert bzw. adaptiert worden (Bruneau und Reinhorn 2007; Schultz et al. 2012; Kallaios et al. 2014; Brand et al. 2016). TRAFIS orientiert sich an diesen erprobten Zugängen zur differenzierten Beschreibung von Resilienz im Bereich von Infrastruktursystemen. Im Folgenden sollen einige der relevanten Zugänge kurz angeführt werden. Die hier dargestellten Zugänge bilden eine Brücke zu den für TRAFIS vorgeschlagenen Kategorien und Kriterien zur Bewertung der Resilienz mithilfe der Delphi-Methode.

Bruneau and Reinhorn (2007) benennen vier Hauptkategorien zur Beschreibung von Resilienz:

- Robustness – Widerstandsfähigkeit von Systemelementen oder Teilsystemen.
- Redundancy – Ersetzbarkeit von Systemelementen.
- Resourcefulness – Verfügbarkeit von Ressourcen für Analyse, Anpassung, Management und Lernen.
- Rapidity – Reaktions-/Handlungsgeschwindigkeit.

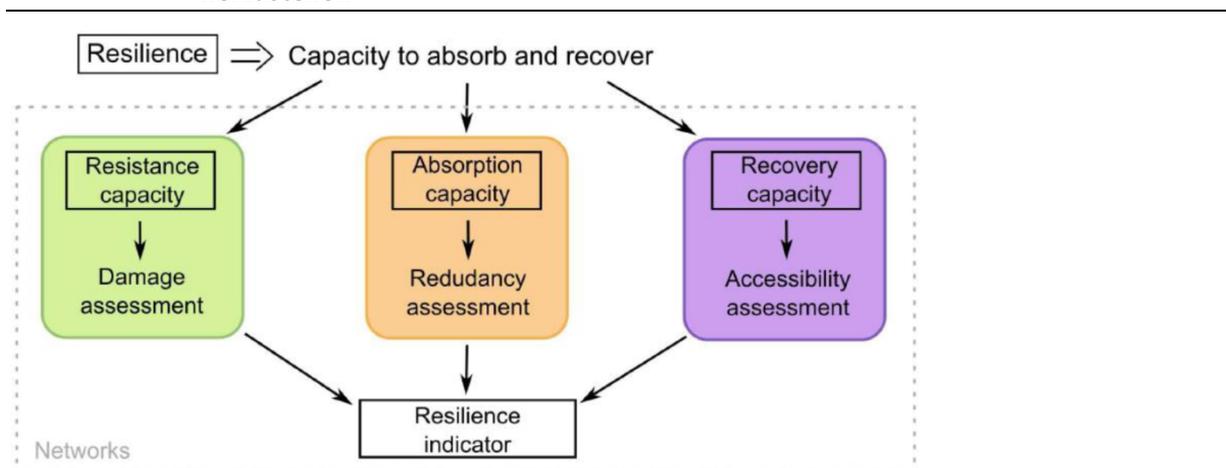
Walker et al. (2006) diskutieren fünf grundlegende Heuristiken für die Beschreibung und die Beeinflussung der Resilienz von Systemen:

- Adaptive Cycle – jeweilige Entwicklungsphase eines Systems.
- Panarchy – top-down und bottom-up – Dynamiken innerhalb eines Systems.
- Resilience – die Fähigkeit eines Systems (nach Holling 1973), äußere Störungen zu absorbieren ohne (reversibel oder irreversibel) in ein anderes Regime wechseln zu müssen.
- Adaptability – Kapazität der Akteure im System, Resilienz zu managen.
- Transformability – Kapazität eines Systems, sich von selbst grundlegend zu erneuern.

Lhomme et al. (2013) definieren Resilienz als die Kapazität eines Systems, Störungen zu absorbieren und sich wiederherzustellen. Spezifische Indikatoren werden in drei Hauptgruppen abgeleitet:

- Resistance capacity – Widerstandsfähigkeit.
- Absorption capacity – Kapazität, Störungen zu absorbieren (bezogen auf Redundanzen im System).
- Recovery capacity – Kapazität zur Wiederherstellung.

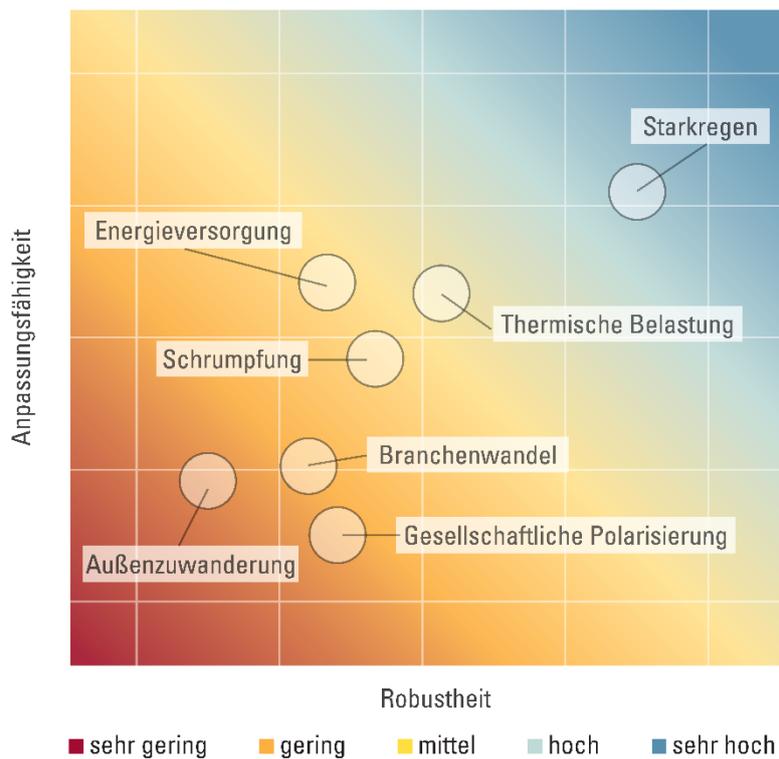
**Abbildung 5: Resilienz als Kapazität eines Systems, Störungen zur absorbieren und sich wiederherzustellen**



Quelle: Lhomme et al. 2013

Ähnlich aggregiert gehen die Akteure im Vorhaben „Stresstest Stadt“ vor (BBSR 2018), indem die Einflussgrößen der Resilienz in der Anwendung auf soziale Faktoren von Städten in zwei Hauptkategorien gebündelt werden: Robustheit und Anpassungsfähigkeit.

Abbildung 6: Beispielhafte Resilienzmatrix für Stressszenarien



Schema einer Resilienzmatrix für eine Musterstadt

Quelle: BBSR 2018, S. 39

Resilienz ist damit eine übergeordnete und zeitlich variable Systemeigenschaft, die von verschiedenen Einzeleigenschaften bestimmt wird.

Schultz et al. (2012) stellten eine Übersicht möglicher Eigenschaften resilienter Systeme zusammen, welche in spezifischen Anwendungen im Kontext von Infrastruktursystemen weiter spezifiziert wurden und auch hier zur desaggregierten Ableitung der Resilienz-Kriterien in TRAFIS genutzt werden (Tabelle 5).

**Tabelle 5: Ableitung der Resilienz Kriterien in TRAFIS**

Schultz et al. 2012 (in geänderter Reihenfolge)	Kallaos et al. 2014 (Sammlung Systemübergreifend)	Brand et al. 2016 (Anwendung auf Energiesysteme)	Ableitung von Resilienz-Kriterien für gekoppelte Infrastrukturen in TRAFIS
	<b>Performance</b> – grundsätzliche Funktionsfähigkeit eines Systems		( <b>Leistungsfähigkeit</b> /Funktionalität wird abseits der Resilienzdiskussion thematisiert)
<b>Adaptability</b> – Fähigkeit eines Systems, sich an verändernde äußere Bedingungen anzupassen	<b>Adaptability, flexibility</b> – dito + sich selbst weiter zu entwickeln		<b>Anpassungsfähigkeit/Reversibilität</b> des gekoppelten Infrastruktursystems bei veränderten gesellschaftlichen Rahmenbedingungen oder Bedrohungslagen
<b>Diversity</b> – Diversität von Arten, Menschen und Institutionen im System	<b>Diversity</b> – räumliche Streuung pot. verletzlicher Elemente; funktionale Diversität = Redundanz von Lösungswegen	<b>Varietät/Diversität</b> – (funktional/strukturell), z. B. unterschiedliche Typen von Erzeugungsanlagen und eine vielfältige Ressourcenbasis <b>Geographische Verteilung</b> – z. B. Verteilung der Erzeugungsanlagen im Raum	<b>Redundanz/Diversität</b> – von erforderlichen Rohstoffen und Anlagen zur Bereitstellung von Dienstleistungen durch die Infrastrukturkopplung (unterschiedliche Arten und Quellen/Herkünfte von Rohstoffen/Eingangsenergien, unterschiedliche Erzeugungs-, Wandlungs- und Verteilungstechnologien etc.)
<b>Redundancy</b> – Maß der Ersetzbarkeit von Systemelementen/Teilsystemen und anderer Bestandteile	<b>Redundancy, Modularity</b> – Kapazitäten, Elemente funktional zu ersetzen oder auszutauschen, Störungen und Bedarfsänderungen zu puffern	<b>Redundanz</b> – (numerisch, aber vor allem auch funktional), z. B. n-1-Kriterium, bivalente Systeme, Reservekraftwerke, Wärme über Fernwärme, Gasbackofen, Elektroheizstrahler <b>Modularität/Zellularität</b> – z. B. Nutzung von standardisierten und austauschbaren Elementen, um größere Einheiten zu bauen; Vermeidung monolithischer Strukturen	
<b>Modularity</b> – Abhängigkeitsgrad der Funktionsfähigkeit von Systemelementen/Teilsystemen voneinander	<b>Connectivity, feed backs, safe-failure</b> – gegenseitige Abhängigkeit von Systemkomponenten. Fähigkeit, Störungen zu	<b>Loose Kopplung</b> (Sektoren/Zellen) – z. B. optionale Kopplung verschiedener Systemteile (bspw. zwischen Strom- und	<b>Dependenz</b> – an der Kopplung beteiligter Infrastruktursysteme untereinander

Schultz et al. 2012 (in geänderter Reihenfolge)	Kallaos et al. 2014 (Sammlung Systemübergreifend)	Brand et al. 2016 (Anwendung auf Energiesysteme)	Ableitung von Resilienz-Kriterien für gekoppelte Infrastrukturen in TRAFIS
	absorbieren, Kaskadeneffekte zu vermeiden, Kontrollierbarkeit des Funktionsausfalls etc.	Wärmenetz), kann durch Puffer und bivalente Speisung erreicht werden	
<b>Feedbacks</b> – Geschwindigkeit, mit der sich Störungen eines Teils des Systems in der Funktion der anderen Teile niederschlagen		<b>Dämpfer, Puffer und Speicher</b> – z. B. Entkopplung von Verbrauch und Erzeugung; Schwungräder, rotierende Massen, elektrische Speicher sowie Wärme- und Gasspeicher; Pumpspeicherkraftwerke	<b>Puffer- und Speichervermögen</b> in den gekoppelten Infrastruktursystemen zum Ausgleich von Angebots- (Rohstoffe, Energie) und Bedarfsschwankungen
<b>Ressourcefulness</b> – Kapazität zur Analyse und Ressourcenbereitstellung zur Anpassung nach einer Störung	<b>Ressourcefulness</b> - dito	<b>Unverplante Ressourcen</b> – z. B. kalte Reservekraftwerke, zeitliche, finanzielle und organisatorische Puffer („slack“) <b>Handlungsfähige und überzeugte Akteure</b> – Task Forces, Akteursnetzwerke und Institutionen – z. B. Strategienetzwerke, Verbände	Indirekt, <b>technische Komplexität der Funktionswiederherstellung</b> (inkl. IKT)
<b>Rapidity</b> – Zeitbedarf zur Wiederherstellung des Systems nach einer Störung	<b>Rapidity Responsiveness</b> - dito		<b>Potenzielle Dauer</b> der Funktionsherstellung <b>Potenzielle Kosten</b> der Funktionsherstellung
<b>Robustness</b> – Fähigkeit einzelner Elemente, ein bestimmtes Maß störender Einwirkungen ohne Funktionseinbußen zu widerstehen	<b>Robustness</b> – dito		<b>Störungsanfälligkeit</b> gegenüber äußeren Einwirkungen (z. B. Hitze, Starkniederschläge, Sturm, Schnee)
	<b>Learning, Memory, Foresight</b> – Lernfähigkeit im System		
	<b>Dependance on local ecosystems</b> – Lokale Kontrolle über Ökosystemleistungen	<b>Subsidiarität</b> – Probleme werden auf einer niedrigen Organisationsebene/Skala gelöst, bevor sie auf höhere Ebenen eska-	<b>Modularität/Subsidiarität</b> – Lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten und Kompetenzen bei der Bewältigung von

Schultz et al. 2012 (in geänderter Reihenfolge)	Kallaos et al. 2014 (Sammlung Systemübergreifend)	Brand et al. 2016 (Anwendung auf Energiesysteme)	Ableitung von Resilienz-Kriterien für gekoppelte Infrastrukturen in TRAFIS
		lieren können (Vorteile: Komplexitätsreduktion, Angemessenheit durch Vor-Ort-Kenntnisse)	Störungen im gekoppelten Infrastruktursystem
		<b>Balance Feedbackmechanismen (+/-)</b> – z. B. Ausgleich von verstärkenden und begrenzenden Mechanismen (z. B. bei Förderung neuer Technologien)	

### 4.3 Kriteriensatz zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastrukturen

Basierend auf der Herleitung eines für technische Infrastrukturen im Allgemeinen und gekoppelte Infrastrukturen im Besonderen anwendbaren Nachhaltigkeitskonzepts und seiner wichtigsten Elemente wird dieses im Folgenden durch einen Gesamtsatz von Bewertungskriterien untersetzt. Der Kriteriensatz folgt mehreren Zielen:

- ▶ die Nachhaltigkeitswirkungen innovativer gekoppelter Infrastrukturen in den Bereichen Leistungsfähigkeit, Akzeptabilität, Ressourceneffizienz und Klimaresilienz abzubilden,
- ▶ technologische Alternativen in Hinblick auf ihre Nachhaltigkeitswirkungen vergleichbar zu machen (siehe z. B. die Fälle 1.1 und 1.2 zur zentralen und dezentralen Wärmegewinnung aus Abwasser),
- ▶ mögliche Stärken und Schwächen von Innovationen bzw. mögliche Aufmerksamkeitserfordernisse aufzuzeigen und nicht zuletzt
- ▶ anwendbar zu sein mit der gewählten Untersuchungsmethode (Delphi).

Dem Fokus des TRAFIS-Vorhabens auf Ressourceneffizienz und Klimaresilienz entsprechend, sind diese beiden Bewertungsdimensionen stärker desaggregiert, was sich an der Diversität der berücksichtigten Aspekte widerspiegelt (vgl. Tabelle 6). Diese Desaggregation ist an sich keine Hervorhebung deren generellen Bedeutung, sondern spiegelt ein gesteigertes Interesse an den relevanten Einzelaspekten innerhalb der Kategorien im Kontext des TRAFIS-Vorhabens wieder. Insbesondere in Bezug auf Fragestellungen der Resilienz wird zugleich ein Versuch unternommen, das oft sperrig und abstrakt empfundene Konstrukt zu operationalisieren, indem die zentralen abgeleiteten Aspekte mit anwendbaren Bedeutungen untersetzt werden. Die stärkere Desaggregation kann durch Zuweisen von Gewichtungsfaktoren leicht ausgeglichen werden.

Die Ausgewogenheit der Perspektiven der Nachhaltigkeit ist ein wichtiger Aspekt bei der Zusammenstellung und Operationalisierung der Kriterien. Tabelle 6 setzt die ausgewählten Kriterien in einen Bezug zu den oben diskutierten Nachhaltigkeits-Perspektiven. Wie sich zeigt, ist es mit den ausgewählten Dimensionen und Kriterien möglich, ein ausgewogenes Verhältnis der grundlegenden Kategorien der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie, Soziales) abzubilden. Weniger ausgewogen zeigen sich die Prinzipien der Nachhaltigkeit, bei denen das Kriteriensatz ein starkes Gewicht beim Effizienz-Prinzip entwickelt. Während das auch Konsistenz-Prinzip ebenfalls angesprochen ist, zeigt es sich zugleich als äußerst schwierig, das Suffizienz-Prinzip mit einem solchen Kriteriensatz zu thematisieren. Dies kann schlicht daran liegen, dass die Perspektive dieser Untersuchung auf den Kopplungen liegt und weniger auf dem Nutzerverhalten, welcher eine andere und deutlich komplexere Wirkungskette zugrunde liegen dürfte (gesellschaftliche Normen etc.).

**Tabelle 6: 26 Nachhaltigkeitskriterien für die Bewertung gekoppelter Infrastrukturen**

Teil 1: Leistungsfähigkeit und Funktionalität

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
Leistungsfähigkeit	1	Leistungsfähigkeit (aus Perspektive der jeweils beteiligten Teilsysteme)	Kallaos et al. 2014, DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Spiller 2016 nimmt darauf Bezug als „compliance to standards“	Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
Technische Komplexität	2	Technische Komplexität (aus Perspektive der jeweils beteiligten Teilsysteme)	keine Entsprechung, jedoch in Hinblick auf Störungsanfälligkeit und Wiederherstellungsaufwand relevant	Ökonomie	Effizienz	Wirtschaftlichkeit
Organisatorische Komplexität	3	Organisatorische Komplexität (aus Perspektive der jeweils beteiligten Teilsysteme)	keine Entsprechung, jedoch in Hinblick auf Störungsanfälligkeit und Wiederherstellungsaufwand relevant	Ökonomie	Effizienz	Wirtschaftlichkeit

Teil 2: Soziale und ökonomische Verträglichkeit

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
Soziale Verträglichkeit	4	Qualität und Quantität der Dienstleistung	Spiller 2016	Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
	5	Ökonomische Konsequenzen für die Nutzer – Technische Barrierefreiheit (Folgeinvestitionen auf Nutzerseite)	DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010	Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
	6	Ökonomische Konsequenzen für die Nutzer - Ökonomische Barrierefreiheit (Kosten der Dienstleistungen der jeweiligen Teilsysteme) (in Perspektive auf die jeweils beteiligten Teilsysteme)	SRU 2016, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Spiller 2016	Soziales	Effizienz	Wirtschaftlichkeit
Ökonomische Tragfähigkeit	7	Ökonomische Tragfähigkeit für Betreiber	DGNB 2013-2015, (Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010), (Spiller 2016)	Ökonomie	Effizienz	Wirtschaftlichkeit

### Teil 3: Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
Energie	8	Primärenergiebedarf (ohne regenerative Energie)	Berger und Finkbeiner 2017 (als Teil mineralischer Rohstoffe)	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
	9	Endenergiebedarf (gesamt)	DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Spiller 2016	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
Flächen	10	Flächenbedarf	DGNB 2013-2015, Spiller 2016, Ugwu et al. 2006, Berger und Finkbeiner 2017 (i.S. Naturraumbeanspruchung)	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
Boden	11	Ausmaß der schädlichen Bodenveränderungen (z. B. Abgrabungen, Versiegelung, Verschmutzung ...)	Berger und Finkbeiner 2017 (i.S. diffuser Stoffeinträge), DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
Rohstoffe	12	Rohstoffbedarf zur Erbringung der Dienstleistung	Berger und Finkbeiner 2017, SRU 2016, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Ugwu et al. 2006	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
	13	Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen	Erdmann und Behrendt 2012; European Commission 2014	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
Wasser	14	Wasserbedarf	Berger und Finkbeiner 2017, SRU 2016, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Ugwu et al. 2006, Diaz-Sarachaga et al. 2016, Spiller 2016, Ugwu et al. 2006	Ökologie	Effizienz	Umweltverträglichkeit
Emissionen und Abfall	15	Treibhausgasemissionen	Berger und Finkbeiner 2017, SRU 2016, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Ugwu et al. 2006, Diaz-Sarachaga et al. 2016, Spiller 2016, Ugwu et al. 2006	Ökologie	Konsistenz	Umweltverträglichkeit
	16	Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe	Berger und Finkbeiner 2017, DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Diaz-Sarachaga et al. 2016, Spiller 2016, Ugwu et al. 2006	Ökologie	Konsistenz	Umweltverträglichkeit
	17	Lärmemissionen	Berger und Finkbeiner 2017, DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht, Diaz-Sarachaga et al. 2016, Ugwu et al. 2006	Ökologie	Konsistenz	Umweltverträglichkeit
	18	Abfallaufkommen	Berger und Finkbeiner 2017 (i.S. Abwasser), DGNB 2013-2015, nicht veröffentlicht,	Ökologie	Konsistenz	Umweltverträglichkeit

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
			Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010, Ugwu et al. 2006			

Teil 4: Versorgungssicherheit (Technische Resilienz)

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
Strukturen	19	Störungsanfälligkeit gegenüber äußeren Einwirkungen (z. B. klimabeeinflussende wie Hitze, Starkniederschläge, Sturm, Schnee) (aus Perspektive der jeweils beteiligten Teilsysteme)	Berger und Finkbeiner 2017, Bruneau & Reinhorn 2007, Lhomme et al. 2013, Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014, DGNB 2013-2015, Fernández-Sánchez und Rodríguez-López 2010 (bezugnehmend auf Naturgefahren), Diaz-Sarachaga et al. 2016, bezugnehmend auf Hochwasserrisiken), Spiller 2016	Ökonomie, Soziales	Effizienz, Suffizienz	Versorgungssicherheit
	20	Dependenz (Abhängigkeit) – an der Kopplung beteiligter Infrastruktursysteme untereinander (aus Perspektive der jeweils beteiligten Teilsysteme)	Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014, Brandt et al. 2016	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
Ressourcen	21	Redundanz/Diversität – von Rohstoffen und Anlagen zur Bereitstellung von Dienstleistungen	Bruneau & Reinhorn 2007, Lhomme et al. 2013, Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014, Brandt et al. 2016	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit

Bewertungsdimensionen	Nr.	Kriterium	Bezug zu bestehenden Bewertungskonzepten	Nachhaltigkeitsaspekte		
				Dimensionen der Nachhaltigkeit	Prinzipien der Nachhaltigkeit	„Infrastrukturpolitisches Zieldreieck“
	22	Modularität/Subsidiarität – Lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten bei der Bewältigung von Störungen im gekoppelten Infrastruktursystem	Lhomme et al. 2013, Kallaos et al. 2014, Brandt et al. 2016	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
	23	Puffervermögen im gekoppelten Infrastruktursystem zum Ausgleich von Störungen (z. B. durch klimabeeinflusste Einwirkungen)	Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
Fähigkeiten	24	Anpassungsfähigkeit/Reversibilität des gekoppelten Infrastruktursystems, z. B. auf sich verändernde gesellschaftliche Rahmenbedingungen oder Gefahren	Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014, DGNB 2013-2015, Spiller 2016	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
	25	Dauer der Funktionswiederherstellung im Fall von Störereignissen	Bruneau & Reinhorn 2007, Lhomme et al. 2013, Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit
	26	Kosten der Funktionswiederherstellung im Fall von Störereignissen	Bruneau & Reinhorn 2007, Lhomme et al. 2013, Schultz et al. 2012, Kallaos et al. 2014	Ökonomie, Soziales	Effizienz	Versorgungssicherheit

## 4.4 Operationalisierung der Bewertungskriterien

Die Operationalisierung der Nachhaltigkeitskriterien ist ein aufwendiger, komplizierter und unerlässlicher Schritt, der die Schnittstelle zwischen der konzeptionellen Entwicklung des Nachhaltigkeitsverständnisses und dessen Anwendung in der Untersuchung bildet. Diese Übersetzungsleistung ist in drei Teilschritte aufgeteilt.

- ▶ Erstens, erfolgt eine fallspezifische Umsetzung der Nachhaltigkeitskriterien in Fragestellungen, die durch Expertinnen und Experten mit unterschiedlichen fachlichen und Erfahrungs-Hintergründen verstanden und im Rahmen einer Experteneinschätzung beantwortet werden können. Für die Bewertung werden anwendbare Wertmaßstäbe mit einer für alle Kriterien gleichen Werteskala entwickelt. (Kapitel 4.4.1)
- ▶ Zweitens, wird in intensiven Tests die Anwendbarkeit von Kriterienset, Fragestellungen, Bewertungsskala geprüft. (Kapitel 4.4.2)
- ▶ Drittens, werden die operationalisierten Bewertungskriterien in einem gut handhabbaren Online Tool umgesetzt und mittels eigenständiger Testläufe geprüft. (Kapitel 4.4.3)

### 4.4.1 Fragestellungen und Werteskala

Streng genommen, ist bereits die Auswahl der Kriterien ein Teil der Operationalisierung des Nachhaltigkeitskonzepts. An dieser Stelle wird unter „Operationalisierung“ die Übersetzungsleistung verstanden, die es Experten und Expertinnen ermöglicht, Kriterien anhand einer vergleichbaren Skala zu bewerten. Hierzu wird jedes Kriterium als Fragestellung umgesetzt, die den zu messenden bzw. zu bewertenden Aspekt auf den jeweiligen Gegenstand der Bewertung (synthetischer Fall) bezieht. Korrespondierend dazu wird eine fünfstufige Bewertungsskala inhaltlich an den Kontext jedes einzelnen Kriteriums angepasst.

Die vereinfachte Bewertungsskala umfasst fünf Stufen:

- (-2)** deutlich negative Bewertung (z. B. nicht geeignet, deutlich Kostensteigerung, deutlich negative Auswirkung, etc.)
- (-1)** geringfügig negative Bewertung (z. B. wenig geeignet, geringfügige Kostensteigerung, eher negative Auswirkung)
- (0)** keine Veränderung zum bekannten Regime
- (+1)** geringfügig positive Bewertung (z. B. gut geeignet, geringfügige Kostensenkung, eher positive Auswirkung)
- (+2)** deutlich positive Bewertung (z. B. sehr gut geeignet, deutliche Kostensenkung, deutlich positive Auswirkung)

Sowie die Option „keine Angabe“ für all die Fälle, in denen eine Bewertung nicht möglich erscheint.

Für das bessere Verständnis der Ergebnisse wurden die Befragten ergänzend eingeladen, ihre Erwägungen zu den Hintergründen ihrer Bewertung sowie weitere Hinweise zu Risiken und erforderlichen Rahmenbedingungen mitzuteilen.

Die fallspezifische Umsetzung der Kriterien ist Teil der Ergebnisdarstellung in Kapitel 8.

#### 4.4.2 Tests und Pre-Tests

Zentrales Ziel einer Operationalisierung ist das Herstellen von Akzeptanz, Verständlichkeit und Anwendbarkeit der Kriterien und Skalen in der Befragung. Um diese Anwendbarkeit unter „Echtwelt-Bedingungen“ sicherzustellen, wurden die Fragestellungen, Werteskalen sowie das Online-Werkzeug (Kapitel 4.4.3) in einem aufwendigen mehrstufigen Verfahren entwickelt und getestet:

- ▶ **Schritt 1 (Ausarbeitungs-Phase):** Ausarbeitung der fallspezifischen Fragestellungen in einem multi-disziplinären Projektteam mit großer Praxis-Erfahrung. Ziel und Ergebnisse sind:
  - Annäherung der Formulierungen an eine Praxis-Perspektive.
  - Konkretisierung und fallspezifische Operationalisierung der Fragestellungen und Skalenbeschreibungen.
- ▶ **Schritt 2 (Vor-Pre-Test):** Testanwendung durch unbeteiligte, fachlich kompetente Anwender außerhalb des Projektteams, jedoch noch in den Partnerinstitutionen. Ziel und Ergebnisse sind:
  - Prüfung von Verständlichkeit der Informationen, Fragestellungen, Antwortoptionen, Zeitbedarf.
  - Weitere Konkretisierung und Vereinfachung der Fragestellungen und Skalenbeschreibungen.
  - Reduzierung der pro Expertengruppe zu bearbeitenden Fälle auf zwei in Reaktion auf den festgestellten hohen Zeitbedarf für hochwertige Beiträge.
- ▶ **Schritt 3 (Pre-Test):** Test der Befragung mit Repräsentanten der Zielgruppe (Expertinnen und Experten) der Befragung. Ziel und Ergebnisse sind:
  - Konkretisierungen und Korrekturen zu Verständlichkeit der Informationen, Fragestellungen, Antwortoptionen.
  - Zahlreiche weitere Anpassungen, wie teilweise eine veränderte Reihenfolge der Fragen, Zusammenfassung offener Antwortoptionen, Reduzierung der Datenabfrage.

Die an zwei Fällen intensiv durchgespielten Operationalisierungs-Schritte führten zu Blaupausen für die Umsetzung der anderen Fälle. Die inhaltlich aufwendige Operationalisierung wurde für die übrigen Fälle ohne das nochmalige Durchlaufen der gesamten Testreihe realisiert. Ergebnis sind spezifisch für die 14 synthetischen Fälle operationalisierte Sets von als Frage formulierten Kriterien, die einzeln für den jeweiligen Fall konkretisiert oder angepasst worden sind. Die fallspezifischen Fragen zum jeweiligen Kriterium finden sich in der Ergebnisdarstellung (Kapitel 8).

#### 4.4.3 Umsetzung in einem Online-Werkzeug

Wegen einer großen Zahl (über 100) der in 14 Fällen eingebundenen Expertinnen und Experten, wurde das Befragungswerkzeug des Nachhaltigkeitschecks als Online-Fragebogen umgesetzt. Dies sollte einerseits den Bearbeitungskomfort der teilnehmenden Personen erhöhen als auch den organisatorischen Aufwand für die Kontrolle des Bearbeitungsstandes und den Datenexport begrenzen.

Aus praktischen Erwägungen wurde die Befragung unter Verwendung der Anwendung „Google Formular“ umgesetzt. Die Nutzung ist sowohl für den Organisator als auch für die Teilnehmenden ohne Installation zusätzlicher Software möglich. Die intuitive Oberfläche ermöglicht dem Ersteller, in einem überschaubaren zeitlichen Rahmen eine Online-Befragung aufzusetzen. Über den stark formalisierten Erstellungsprozess sind die Gestaltungsmöglichkeiten begrenzt, aber für den Gebrauch zur

Umsetzung des Nachhaltigkeitschecks ausreichend. Die meisten der teilgenommenen Expertinnen und Experten haben die gewählte Umsetzungsoption sehr gut angenommen. Lediglich zwei Teilnehmer berichteten von Schwierigkeiten beim Zugriff auf die Befragung über die bereitgestellten Links – wegen interner Sicherheitsvorkehrungen wurde der Zugriff verwehrt.

Der Rückgriff auf das Google basierte Befragungstool erfolgte primär aus Gründen der Zeitersparnis. Bei künftigen Anwendungen sollte aus Gründen der Nutzerakzeptanz die Möglichkeit geprüft werden, professionelle Software einzusetzen.

## 5 Realisierung des Delphi-basierten Nachhaltigkeitschecks

### 5.1 Methodische Umsetzung des Delphi-Ansatzes

Einen geeigneten Ansatz für die Realisierung des Nachhaltigkeitschecks in den ausgewählten 14 synthetischen Fällen bietet die sog. Delphi-Methode. Die Delphi-Methode wurde in den 1950er Jahren als ein Ansatz zur Vorherbestimmung von potenziellen Angriffszielen im US-Amerikanischen Militär entwickelt (Dalkey und Helmer 1962) und Jahre später als wissenschaftliche Untersuchungsmethode bekannt (Helmer und Rescher 1959). Die Methode hatte zum Gegenstand, undefinierte Objekte und komplexe Fragestellungen zu untersuchen. Ziel ist es unter anderem, die Einschätzungen und Bewertungen über künftige Entwicklungen vor dem Hintergrund unsicherer Annahmen zu ermöglichen, also in Situationen, in denen keine hinreichenden alternativen Informationen vorliegen. Bezogen auf unsere Studie betrifft diese Unsicherheit in Teilen den Untersuchungsgegenstand (z. B. eine nicht bis ins Detail definierte Infrastrukturlösung), die Fragestellungen (z. B. durch Berücksichtigung nicht in der breite etablierter Resilienz-Kriterien) oder die Untersuchungsperspektive (z. B. der Beurteilung künftiger Wirkungen).

Die Delphi-Methode generiert in transparenter Art und Weise Expertenwissen über kurzfristige Trends zur Priorisierung von Problemen oder für die Legitimation von Entscheidungen. Seit der Entwicklung in den 1950er Jahren etablierte sich das Verfahren als Prognose-Tool und wird seither in unterschiedlichen Kontexten angewandt (Helmer und Rescher 1959; Helmer 1966). Insbesondere in der Politikberatung und Entscheidungsfindung, wo keine Experten aber informierte Führsprecher ihre Expertise sowie Perspektiven auf unsichere/komplexe Fragen anwenden können (Turoff 1970, 1975). Oder für Echtzeitanwendungen ohne sequenzielle Iterationen in mehreren Runden (Gordon und Pease 2006).

Eine der Stärken der Delphi-Methode ist das strukturierte Vorgehen zur Herbeiführung eines Konsenses zwischen den beteiligten Expertinnen und Experten, zu denen kein theoretischer Wissenstand oder belastbarere empirische Belege vorliegen (Helmer und Rescher 1959). Das Vorgehen basiert auf einer geleiteten Expertenauswahl, um eine große Bandbreite von potenziell relevanten Expertisen und Perspektiven einzubinden (Page 2008). Darüber hinaus ist darauf zu achten, eine minimale Anzahl von Expertinnen und Experten einzubinden (Schuckmann et al. 2012) und eine für die unterschiedlichen Erfahrungshintergründe geeignete Sprache zu nutzen (Page 2008).

Delphi-Befragungen haben über die vergangenen Jahre in einem breiten Anwendungsfeld durch Akteure aus Wissenschaft, öffentlichen Entscheidungsträgern oder anderen Institutionen zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen. Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten konnte international ein Bedeutungszuwachs der Methode innerhalb unterschiedlicher Disziplinen festgesellt werden (de Loë et al. 2016). Beispielsweise untersuchten frühere Anwendungen die zukünftige dezentrale Produktion von erneuerbaren Energien in Finnland (Varho et al. 2016), Lernmodelle in Hochschulen (McIntyre-Hite 2016), Risikobewertung und -planung in Deutschland und Portugal (Olfert et al. 2006), Untersuchung der Vorteile und Hindernisse im Kurzstreckenseeverkehr in Südostasien (Arof et al. 2016), die Zukunft des Transportinfrastruktursystems (Schuckmann et al. 2012), die soziale Nachhaltigkeit von Infrastrukturprojekten (Sierra et al. 2017) oder die Konsensfindung zwischen beteiligten Akteuren an der Evaluierung in den USA (Geist 2010).

Damit ist die Delphi-Methode eine durch eine hohe Flexibilität in Design, Anwendung und Umsetzung gekennzeichnete Untersuchungsmethode, was zugleich auch teilweise zu einer kritischen Auseinandersetzung mit ihr geführt hat (de Loë et al. 2016). Bereits Linstone und Turoff (1975, p. 3) betonten, dass das Design und die Verwendung der Delphi-Methode „mehr als Kunst denn als Wissenschaft“ angesehen werden kann und dass viele verschiedene Wege existieren, was „das richtige, geeignete, beste oder hilfreiche Vorgehen zur Realisierung der spezifischen Aspekte von Delphi“ anbelangt. Mit

anderen Worten: dem Design und dem Prozess der Untersuchung kommt eine besondere Bedeutung zu, da es sich nicht um eine identisch replizierbare Versuchsanordnung handelt. Sowohl die Zusammensetzung der Panels generell als auch der Wissensstand der Befragten zur jeweiligen Fragestellung können nicht konstant gehalten werden. Vieles hängt darüber hinaus mit der Auswahl der richtigen Expertinnen und Experten, der Art der Ansprache, den mitgeteilten Informationen und vielem mehr zusammen, was die wissenschaftliche Anwendung der Delphi-Methode zu einem gewissen Grad zu Kunst macht.

Klar ist, es gibt Bedingungen, unter denen die Delphi-Methode die geeignete Wahl darstellt. Die Rechtfertigung ist in Fällen gegeben, in denen die Fragestellung mit einem ausgeprägten Problem der Unsicherheit und/oder Komplexität einer Fragestellung adressiert. Diese kann insbesondere für Fragestellungen im Zusammenhang mit zukünftiger, d. h. noch nicht eingetretenen Entwicklungen angenommen werden – wie z. B. die Wirkungen noch nicht umgesetzter Infrastrukturkopplungen. Diese in der Zukunft liegenden Ereignisse können nicht beobachtet oder gemessen werden. Jedoch können unter Berücksichtigung von Wissen und Erfahrung begründete bzw. informierte Vermutungen angestellt werden. Aber auch Faktoren, welche die Wirkungen beeinflussen, unterliegen Veränderungen. Deren Zusammenspiel und deren Gewichtung sind ebenfalls unsicher und können je nach fachlichem Hintergrund, Erfahrung und auch persönlichen Ansichten differieren. Daher kommt der Auswahl geeigneter Expertinnen und Experten für das Einholen der Einschätzungen eine zentrale Rolle zu. Neben der Sicherstellung der Fachkompetenz und Erfahrung im untersuchten Feld ist die Abdeckung der unterschiedlichen Perspektiven der Beteiligten immanent wichtig, um die aus den unterschiedlichen Unsicherheiten resultierenden Verzerrungen der Einschätzungen nach Möglichkeit auszugleichen. In Anbetracht einer gezielten Expertenauswahl, kann die Anzahl von 8 Personen in einer Bewertungsgruppe als ausreichend angesehen werden (Schuckmann et al. 2012). Olfert et al. (2006) haben gezeigt, dass sorgfältige Gruppensammensetzungen im gleichen Untersuchungskontext zu robusten, d. h. von Test-Gruppe zu Test-Gruppe vergleichbaren Ergebnissen führen können. Das heißt, dass das Ergebnis einer solchen Experteneinschätzung nicht ein beliebiges Abbild der zufälligen Gruppensammensetzung ist.

Die Methode kann in unterschiedlichen Rahmen umgesetzt werden. Vollständig anonymisierte Verfahren ohne Austausch zwischen den Expertinnen und Experten sind ebenso denkbar wie gänzlich transparente Anwendungen im Kreis anwesender Panel-Teilnehmerinnen und Teilnehmer, wie auch teil-anonymisierte Vorgehen (mathematical versus behavioral aggregation, Schultze et al. 2012; Bonner und Baumann 2012). Die Vor- und Nachteile des Formats variieren, bezogen auf Ziel, Ressourcenaufwand oder Stellung der PanelistInnen, untereinander. Vereinfachte quantitative Delphis ohne Diskussionsbedarf können effizient in anonymen Runden umgesetzt werden. Eine web-basierte Umsetzung reduziert überdies den Koordinations- und Reiseaufwand erheblich, wenn die Expertinnen und Experten nicht räumlich konzentriert sind.

Qualitative und fallspezifische Einschätzungen können den direkten Austausch nahe legen. Innerhalb von Gruppen ausgehandelte Ergebnisse sind denen aus anonymen Befragungen in ihrer Kreativität überlegen (Bonner und Baumann 2012). Hierarchische und sonstige atmosphärische Ungleichheiten unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmern können eine zumindest Teil-Anonymisierung erfordern. Das Zusammenbringen von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Hierarchieebenen oder die Anwesenheit dominanter Verhaltensweisen können produktive Gruppendynamiken untergraben und den Erfolg maßgeblich beeinflussen (Helmer und Rescher 1959; Wintle et al. 2012).

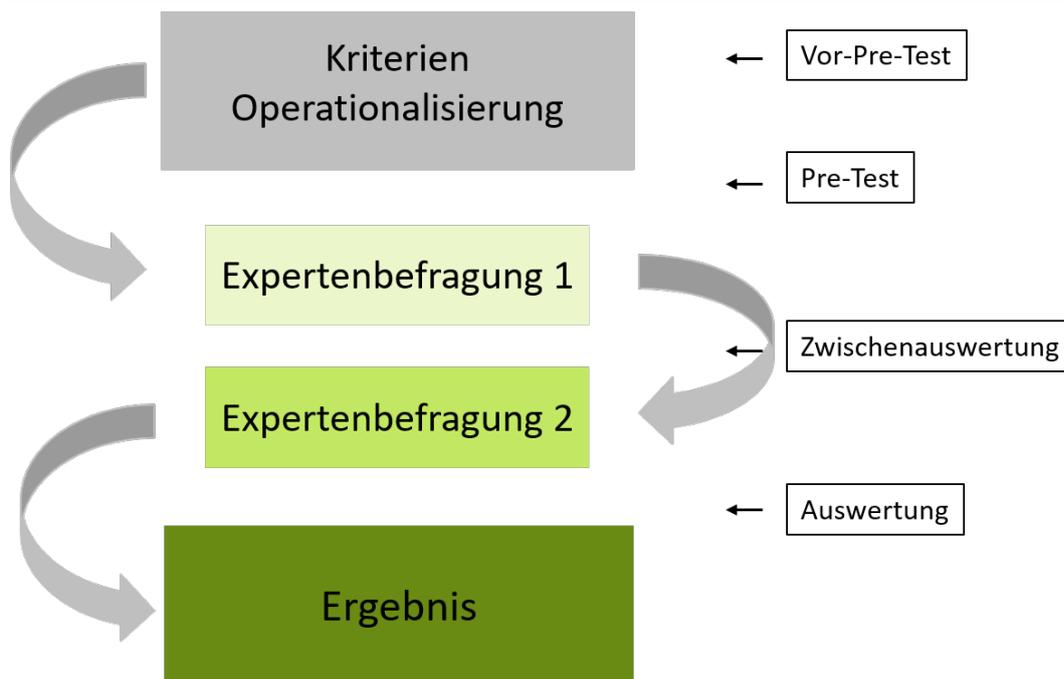
In der vorliegenden Untersuchung wurden das Delphi-basierte Vorgehen und das Nachhaltigkeitskonzept im Rahmen einer anonymisierten web-basierten Befragung angewandt. Die Ergebnisse bilden den Kernteil der Untersuchung (Kapitel 6 und Kapitel 8). Darüber hinaus wurde das Vorgehen

auch in kleinen fallspezifischen Runden persönlicher anwesender Expertinnen und Experten angewandt. Ziel war in erster Linie die weitere Erprobung von Nachhaltigkeitskonzept und Bewertungsprozess mit teilweise über dieses Ziel hinausgehenden Erkenntnissen (Kapitel 7).

Das Vorgehen zur Umsetzung der web-basierten Befragung umfasste die folgenden Schritte:

1. Definition des Untersuchungsgegenstands in Form sog. **synthetischer Fälle** (vgl. Kapitel 5.2).  
Jeweils zwei thematisch zusammenhängende Fälle sind zu einer Gruppe zusammengefasst. Die Fälle in jeder der sieben Gruppen werden durch eine eigens für diese Gruppe akquirierte Expertengruppe (Panel) bewertet.
2. Entwicklung eines Konzepts zur Bewertung der Nachhaltigkeit und Entwicklung geeigneten **Bewertungskriterien** (Kapitel 4).
3. **Operationalisierung der Kriterien** (Kapitel 4.4):  
Die Operationalisierung besteht selbst aus mehreren Schritten: (1) Die Formulierung der Kriterien als fallspezifische Fragestellungen. (2) Die kriterienspezifische Umsetzung einer fünfstufigen numerischen Skala.
4. **Auswahl geeigneter Expertinnen und Experten im deutschsprachigen Raum** (Kapitel 5.3)  
Die umgesetzte Methode umfasst die **strukturierte Befragung** von über 100 Expertinnen und Experten. Auf Grund der Vielzahl und thematischen Breite der Fälle wurden die ausgewählten Personen in thematische „Panels“ für die betrachteten Gruppen zu je ca. 15 Personen aufgeteilt. Ein Panel bewertet jeweils zwei synthetische Fälle in einem kombinierten quantitativen und qualitativen Delphi.
5. **Durchführung der Befragung** in zwei Runden (Kapitel 5.4).  
Der typische Ablauf einer Delphi-Befragung umfasst mehrere Runden. In TRAFIS wurden insgesamt zwei Runden angestrebt (Abbildung 7). In der ersten Runde der Befragung wurden die Expertinnen und Experten gebeten, eine Bewertung der Fallkonstellationen anhand der Nachhaltigkeitskriterien vor dem individuellen Wissens- und Erfahrungshintergrund vorzunehmen. Die Ergebnisse der ersten Runde wurden im ersten Zwischenschritt zusammengeführt und ausgewertet. Die Auswertungsergebnisse wurden transparent aufbereitet, teilweise aggregiert und anonymisiert als Auftakt der zweiten Befragungsrunde an die Beteiligten des jeweiligen Panels zurückgespielt. Die Mitglieder des Panels erhielten in der zweiten Runde die Möglichkeit, die eigenen Bewertungen vor dem Hintergrund der Zwischenergebnisse ggf. zu korrigieren oder/und zu ergänzen. Von qualitativen Fragen wurde in der zweiten Runde abgesehen, um gezielt den Fokus auf die Anpassung der Befragungsergebnisse zu lenken und die Hemmschwelle für die erneute Beteiligung zu senken.
6. **Auswertung der Bewertungen** (Kapitel 6).  
Im Ergebnis der zwei Befragungsrunden liegt ein konsolidiertes Bild über Experteneinschätzungen zum Nachhaltigkeitspotenzial der bewerteten Kopplungen vor.
7. **Praktikabilitäts-Check** von Methode und Vorgehen (Kapitel 7).

Abbildung 7: Schematischer Ablauf einer zweistufigen Delphi-Befragung



Quelle: Eigene Darstellung

## 5.2 Synthetische Fälle

### 5.2.1 Synthetische Fälle gekoppelter Infrastrukturen

**Gegenstand** der Delphi-Befragung sind **konstruierte Fallkonstellationen** für gekoppelte Infrastrukturen, sog. synthetische Fälle. Wir sprechen in diesem Zusammenhang von synthetischen Fällen (Green 2000 nutzen den Begriff der „hypothetischen“ Fälle; Kleidorfer et al. 2009 sprechen von „fiktiven“ oder „virtuellen“ Fällen). Insgesamt sind 14 Infrastruktorkopplungen für den Nachhaltigkeitscheck ausgewählt worden (Tabelle 7). Diese repräsentieren die zuvor durch eine Literaturlauswertung ermittelte Breite von möglichen Kopplungen und stellen zugleich nur einen kleinen Ausschnitt dar. Sie sind thematisch eng mit Fallstudien aus einem anderen Teil des TRAFIS-Vorhabens verbunden, welche reale und weitestgehend abgeschlossene Fälle adressieren, die zur Identifikation hemmender und unterstützenden Einflussfaktoren vertiefend analysiert wurden (Hölscher et al. 2020).

Jede einzelne Fall-Konstruktion muss mit zwei Hauptunsicherheitsquellen umgehen: (1) Die Unsicherheit über den eigentlichen Bewertungsgegenstand – innovative gekoppelte Infrastrukturlösungen, für die keine standardisierten Lösungen entwickelt vorliegen. Auch wenn teilweise Pilotprojekte realisiert wurden, sind die technischen und organisatorischen Aspekte vielfach noch unklar und die praktischen Erfahrungen eher kontextspezifisch. (2) Die Unsicherheit bezüglich der möglichen beabsichtigten und unbeabsichtigten Wirkungen und des Wirkungsspektrums, wie sie mit der Umsetzung der Infrastrukturlösung verbunden wären.

Diesen Unsicherheiten begegnen wir (1) durch den Rückgriff auf konstruierte Fälle (Yin 1999) sowie (2) durch die Operationalisierung der Aufgliederung des Nachhaltigkeitsaspekts in Unterfragen, die direkt mit den untersuchten Fällen in Verbindung gebracht werden können. Die Operationalisierung der synthetischen Fälle besteht in einer knappen Beschreibung des jeweiligen Falles, welcher drei Arten von Informationen transportieren soll (die Fallbeschreibungen sind Teil der Ergebnisdarstellung in Kapitel 8.):

1. Welche Infrastrukturen bzw. Teil-Systeme werden gekoppelt?
2. Welche allgemeine technische Konfiguration der Kopplung liegt vor?
3. Auf welcher Ebene (räumlich/administrativ) findet die Kopplung statt?

Durch die Betrachtung einer Anzahl unterschiedlicher Infrastrukturlösungen mit dem Fokus auf die potenziellen Wirkungen der jeweiligen Konstellationen verfolgen wir eine Reihe explorativer intrinsischer Einzelfallstudien (Stake 1995; Cunningham 1997). Das Ziel besteht darin, Trendaussagen zu unterschiedlichen Typen von Infrastrukturlösungen zu treffen. Durch den Rückgriff auf synthetische Fallstudien werden Detailinformationen zu möglichen Umsetzungsbedingungen unterdrückt. Dies stellt zum Teil eine Einschränkung dar, da die tatsächlichen Herausforderungen immer in den jeweiligen Kontext eingebettet zu betrachten sind (Schiltz 1992). Der Umsetzungs-„Kontext“ einer Kopplung wird damit bewusst verallgemeinert, um die Erwägungen weg von Einzelanwendungen und hin zur Kopplung im Allgemeinen zu lenken. Synthetische Fallstudien sind hierbei zugleich die Lösung, um dem bestehenden Wissensproblem bezogen auf innovative, noch nicht etablierte, Infrastrukturlösungen zu begegnen. Die angewandte De-Kontextualisierung eröffnet die Chance, idealtypische Aussagen über die Potenziale und Grenzen neuer Lösungen zu treffen.

### 5.2.2 Auswahl der Fälle

Die Auswahl möglichst instruktiver Fallbeispiele erfolgt auf Basis von Kriterien, die die Erkenntnisinteressen der Untersuchung bedienen helfen. Diese orientieren sich in erster Linie an Zielen des TRAFIS-Vorhabens sowie an der übergeordneten Anforderung, Bezüge zu politischem Handeln herzustellen:

1. Es muss sich um gekoppelte technische Infrastrukturen zur Erbringung von Daseinsvorsorge handeln. Eine Kopplung liegt dann vor, wenn das Infrastrukturbeispiel mindestens zwei der folgenden technischen Sektoren oder deren abgrenzbaren Teil-Sektoren (siehe TRAFIS-Systematisierung) durch physische und/oder organisatorische Kopplung zusammenbringt: Verkehr, Energie, Wasser, Abwasser, Abfallwirtschaft und IKT.
2. Die Kopplung sollte eine Innovation in der technischen Lösung oder der Organisationsform darstellen.
3. Die Kopplung sollte einen erwartbaren und nennenswerten Einfluss auf Ressourceneffizienz und/oder Klimaresilienz der Leistungserbringung durch die Infrastruktur(en) entfalten. Die Begriffsverständnisse sind in Kapitel 4.2.4 operationalisiert.
4. Es müssen Bezüge zu mindestens einer der relevanten politischen Dimensionen erkennbar werden: Durch die Kopplung sollten die politischen Ziele bzw. Prioritäten der Dekarbonisierung, Kreislaufführung von Ressourcen, Flächenschonung und/oder Digitalisierung unterstützt werden.
5. Es muss eine aus der Kopplung resultierende Veränderung für die Nutzer der Infrastrukturdienstleistungen erkennbar sein. Aus Sicht der Transformationsforschung ist die **Nutzerbetroffenheit** eine der Voraussetzungen für die Berücksichtigung einer Veränderung, z. B. einer identifizierten Kopplung. Im Falle von Infrastrukturen der Daseinsvorsorge gehen wir von einem sozio-technischen Systemverständnis aus und stellen Infrastrukturkopplungen daher in Zusammenhang mit ihrem sozialen Umfeld (siehe Kapitel 2.2.2). Dementsprechend trägt eine Entwicklung oder Innovation nur dann zu einer Transformation bei, wenn sie auch soziale Wirkungen (z. B. auf Nutzer) entfaltet, d. h. wenn u. a. Werte und Leitbilder, Verhalten und Lebensstile, Marktstrukturen oder Institutionen verändert werden (Kallaos et al. 2014). Dies beinhaltet insbesondere gesellschaftliche Aushandlungsprozesse um die Akzeptanz einer Innovation und somit deren Potenzial, Ver-

halten etc. zu verändern. In Infrasytem-Transformationen stellt insbesondere die Nutzerbetroffenheit ein grundlegendes soziales Kriterium dar: inwieweit Nutzer die Kopplung akzeptieren (Loorbach et al. 2010).

**Tabelle 7: Fallauswahl für die Bewertung im Nachhaltigkeitscheck**

Fallbezeichnung	Clusterzugehörigkeit (vgl. Kapitel 2.4)					
	1	2	3	4	5	6
<b>Fälle Gruppe 1 (Wärme aus Abwasser)</b>						
1.1	Zentrale Wärme- und Abwärmegewinnung aus Abwasser	x				
1.2	Dezentrale Wärmegewinnung in Abwassernetzen	x				
<b>Fälle Gruppe 2 (Abwärme/Solare Wärme)</b>						
2.1	(Industrie-)Abwärme in Wärmenetzen	x				
2.2	Einspeisung solarthermischer Energieerzeugung in Wärmenetzen	x				
<b>Fälle Gruppe 3 (Steuerung Energienetze)</b>						
3.1	Steuerung hybrider Energie-Netze im lokalen/regionalen Maßstab			x		
3.2	Virtuelle Kraftwerke - Schwarmgesteuerter Betrieb von Erzeugungsanlagen zur Stromlastregulierung			x		
<b>Fälle Gruppe 4 (Stromnetzstabilisierung)</b>						
4.1	Stromnetzstabilisierung durch Einbindung Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge		x	x		
4.2	Induktions-basiertes Laden von Fahrzeugen in Bereichen des fließenden Verkehrs (z. B. Straßenkreuzungen)		x			
<b>Fälle Gruppe 5 (PtH / PtL)</b>						
5.1	Power to Heat (PtH)- Speicherung von Überschussstrom in Wärmenetzen		x			
5.2	Power to Liquid (PtL) – Elektrolyse von regenerativem Strom in Wasserstoff		x			
<b>Fälle Gruppe 6 (Fuhrpark-Management)</b>						
6.1	App-basiertes Management virtueller Fuhrparks (Zusammenschluss privater Fahrzeuge zum Carsharing-Modell)				x	
6.2	App-gestütztes Fuhrpark-Management im free-floating Carsharing				x	
<b>Fälle Gruppe 7 (Kanalnetz-Bewirtschaftung)</b>						
7.1	Intelligente Niederschlagswasserbewirtschaftung					x
7.2	Kontrollierter Überstau – Management von Überlastungssituationen im Kanalnetz in Kombination mit Multifunktions-Freiflächen im urbanen Raum					x

## 5.3 Experten-Auswahl

### 5.3.1 Zielsetzung der Experten-Auswahl

Neben der inhaltlichen Konzeption einer Befragung ist die Auswahl von Expertinnen und Experten entscheidend für die Qualität der Befragungsergebnisse. Daher ist die gezielte Auswahl geeigneter Personen ein essenzieller Schritt jeder Delphi-basierten Befragung. Ziel war es, insgesamt ca. 100 Expertinnen und Experten in die Befragung zu involvieren. Durch die Besetzung der sieben Befragungspaneln mit jeweils ca. 15 Expertinnen und Experten sollte den Auswirkungen möglicher Ausfälle vorgebeugt und eine stets ausreichende Mindestzahl qualitativ hochwertiger Rückmeldungen gewährleistet werden. Aufgrund der Spezifik der Fälle und Fragestellungen sowie wegen der gegebenen Unsicherheit in Bezug auf die potenziellen Wirkungen wurde darauf geachtet, dass alle auszuwählenden Expertinnen und Experten bestimmte Voraussetzungen erfüllen:

- ▶ **Fach- und Erfahrungshintergrund:** Der persönliche Erfahrungshintergrund der Expertinnen und Experten sollte mit dem inhaltlichen Profil der durch diese bewerteten Fällen weitest möglich korrespondieren. Dies ist eine unabdingbare Basis, um – bei aller Unsicherheit – überhaupt relevante Einschätzungen anbieten zu können. Zugleich ist diese Aufgabe nicht trivial, da es sich bei den untersuchten Fällen um neuartige intersektorale Kopplungen handelt und sektorübergreifendes Wirken nicht zwingend immer vorausgesetzt werden kann. Neben dem fachlichen Hintergrund wurde auf einen darüber hinaus relevanten **Erfahrungshintergrund** geachtet, um insbesondere Fachleute mit einem „Blick über den Tellerrand“ zu identifizieren. Dieses Ziel haben wir verfolgt, indem wir verstärkt Programme relevanter Fachveranstaltungen analysiert haben, um diejenigen Expertinnen und Experten ins Blickfeld zu nehmen, die sich offenkundig für Fragestellungen im Überschneidungsbereich von Themen interessieren.
- ▶ **Tätigkeitsperspektiven:** Aus dem Kontext bzw. den Aufgabenbereichen der Befassung mit gekoppelten Infrastrukturen resultieren unterschiedliche Perspektiven, d. h. Blickwinkel, aus denen eine Person den jeweiligen Sachverhalt sieht und bewertet. Es ist davon auszugehen, dass Wissenschaftler, Planer, ausführende Unternehmen, Betreiber öffentlicher Infrastrukturen oder Beschäftigte von Behörden einen unterschiedlichen Blick auf die möglichen Wirkungen neuartiger Lösungen entwickeln. Diese können in unterschiedlichen Bewertungen münden, deren „Richtigkeit“ oder „nicht-Richtigkeit“ aufgrund der Unsicherheiten nicht bestimmt werden kann. Es ist daher bei solch unsicheren Sachverhalten besonders wichtig, die mögliche fachliche „Bias“ durch ein Einbeziehen unterschiedlicher Perspektiven auszugleichen.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde daher darauf geachtet, fachliche Perspektiven möglichst gleichmäßig in den Paneln abzubilden (Tabelle 8). Grundsätzlich sollten sowohl die eher theoretischen als auch die eher Praxis-orientierten Blickwinkel abgedeckt werden. Damit sollen sowohl die Potenzial-orientierten Perspektiven als auch Erfahrungen und Einschätzungen aus der Umsetzungspraxis einbezogen werden. Die einzelnen Perspektiven können nicht immer trennscharf voneinander separiert werden, was wir aber nicht für entscheidend erachten. Als Vertreter der eher Potenzial-orientierten Hintergründe wurden mit dem jeweiligen Themenbereich befasste Personen aus Forschung und Planung einbezogen. Als Vertreter der Umsetzungspraxis sind Beschäftigte aus öffentlichen Fachverwaltungen und Fachverbänden sowie die Betreiber der Infrastrukturen involviert. Die unterschiedenen Perspektiven werden im Rahmen der Auswertung aufgegriffen, um ggf. divergierende Einschätzungen sichtbar zu machen.

**Tabelle 8: Differenzierung der Tätigkeitsperspektiven von Expertinnen und Experten**

Tätigkeitsperspektive	Abgrenzung der Tätigkeitsperspektiven
Wissenschaft und Forschung	überwiegend theoretisch bzw. Potenzial-orientiert mit Kopplungen befasst
Planung	
öff. Verwaltung und Fachverbände	überwiegend mit Aspekten der praktischen Umsetzung befasst
Betreiber	

### 5.3.2 Expertenakquise

Den beschriebenen Auswahlkriterien folgend, wurden die Expertinnen und Experten für die Besetzung der sieben Panels ausgewählt. Die zwei zentralen Bausteine der Expertenakquise sind zum einen die Identifikation potenziell geeigneter Expertinnen und Experten und zum anderen deren Gewinnung für die Teilnahme an der Delphi-Befragung. Tabelle 9 zeigt, dass i.d.R. nur zwischen 25 % und 45 % der angefragten Expertinnen und Experten zur Teilnahme an der Befragung bereit waren.

Die Identifikation geeigneter Personen erfolgte durch eine Desktoprecherche unter Berücksichtigung von Forschungseinrichtungen, Projekt-Homepages, Betreiberunternehmen, Publikationen, Veranstaltungsprogrammen etc. ergänzt durch die Einbindung unmittelbar im Projektnetzwerk von TRAFIS beteiligter und bekannter Expertinnen und Experten.

Während der Desktoprecherche bestand eine außerordentliche Schwierigkeit darin, Kontaktinformationen zu potenziell geeigneten Personen insbesondere auf Seiten privatwirtschaftlicher Betreiber (und hier besonders bei der Energiewirtschaft), aber auch bei öffentlichen Verwaltungen zu erhalten, da für außenstehende Personen die Organisationsstruktur des Unternehmens oft nicht einsehbar ist.

Die Ansprache der ausgewählten Personen erfolgte im ersten Schritt hauptsächlich per E-Mail. Die Expertinnen und Experten wurden einzeln und namentlich angesprochen, um Verbindlichkeit zu signalisieren und eine persönliche Mitwirkung zu unterstützen. Teilweise haben die angesprochenen Expertinnen und Experten Alternativpersonen aus ihrem Umfeld benannt. Diese wurden vor der Aufnahme in das jeweilige Panel auf ihre fachliche Eignung hin geprüft. In zwei Fällen wurden die vorgeschlagenen Personen nicht aufgenommen. Berücksichtigung fand darüber hinaus die Ausgewogenheit der Tätigkeitsperspektiven innerhalb der Panels wie oben beschrieben, um den „Bias“ einzelner Perspektiven zu vermeiden.

Die Resonanz auf die ersten Beteiligungsanfragen per Email variierte zwischen den Panels teils stark und war insgesamt nicht ausreichend, um die Panels gemäß der gesetzten Zielvorgaben bereits im ersten Anlauf zu besetzen. In einem zweiten Schritt wurden daher die meisten angeschriebenen Personen auch telefonisch kontaktiert, um ggf. Unklarheiten aufzulösen und einen höheren Grad an Verbindlichkeit zu erreichen. Insbesondere in den Sektoren Energie und Verkehr verwiesen angefragte Personen auf die Konjunktur ihrer Themen und der damit verbundenen Vielzahl an Anfragen, die insgesamt zu einer allgemeinen Befragungsmüdigkeit beigetragen. Entsprechend aufwendiger war es in der Folge, sowohl die entsprechenden Panels zu besetzen als auch einen ausreichenden Rücklauf hochwertiger Bearbeitungen sicherzustellen.

Die meisten auf diese Weise kontaktierten Expertinnen und Experten haben die persönliche Kontaktaufnahme wohlwollend aufgenommen. In der Regel signalisierten sie ein ausgesprochenes Interesse und bestätigten die Wichtigkeit des Themas für die Transformation von sozio-technischen Infrastruktursystemen. Entweder erfolgte bereits während des Telefonats eine Zu- oder Absage oder die kontaktierten Personen baten darum, den Befragungsaufwurf erneut zu versenden. Aus dem persönlichen

Telefonat resultierte meist eine gesteigerte Verbindlichkeit, so dass in vielen Fällen tatsächlich eine Rückmeldung erfolgte. Jedoch ist hervorzuheben, dass eine derart intensive persönliche Betreuung des Befragungsprozesses für solch große Stichproben unter Praxisbedingungen eher nicht dauerhaft wirtschaftlich realisiert werden kann.

Durch dieses Vorgehen konnten 35 % der angefragten Personen dafür gewonnen werden, eine Teilnahmeabsicht zu bekunden. Der Akquiseprozess war so gesteuert, dass jedes Panel durch mind. 15 Expertinnen und Experten sowie in einem ausgewogenen Verhältnis der Tätigkeitsperspektiven besetzt wurde. Nicht in allen Panels konnte diese Ausgewogenheit in gleichem Maße sichergestellt werden (vgl. Tabelle 9).

Zur Absicherung der angestrebten ca. 100 auswertbaren Bewertungsergebnisse bedurfte es im Verlauf der Arbeiten einer recherchierten Auswahl von knapp über 500 Expertinnen und Experten, die zur Mitwirkung eingeladen wurden. Von den über 500 eingeladenen Expertinnen und Experten sagten im Ergebnis 185 ihre Teilnahme zu. Diese wurden anschließend in die Delphi-Panels aufgenommen (Tabelle 9).

**Tabelle 9: Zusagen von Expertinnen und Experten nach Tätigkeitsperspektiven**

Gruppen	Kontaktiert	Zugesagt (Anteil)	Zusagen nach Tätigkeitsperspektiven			
			Forschung	Planer	öff. Stellen	Betreiber
1 Wärme aus Abwasser	50	22 (44 %)	5	4	7	6
2 Alternative Wärmequellen	58	24 (41 %)	9	5	4	6
3 Steuerung Energienetze	93	25 (27 %)	10	5	1	9
4 E-Mobilität und Netzstabilisierung	95	25 (26 %)	5	3	9	8
5 Umwandlung von Überschussstrom	80	31 (39 %)	12	2	9	8
6 App-gestütztes Fuhrparkmanagement	82	31 (37 %)	10	4	8	9
7 Kanalnetzentlastung	66	27 (41 %)	7	8	5	7
<b>Summe</b>	<b>524</b>	<b>185 (35 %)</b>				

## 5.4 Durchführung der Befragung

### 5.4.1 Delphi-Befragung Runde 1

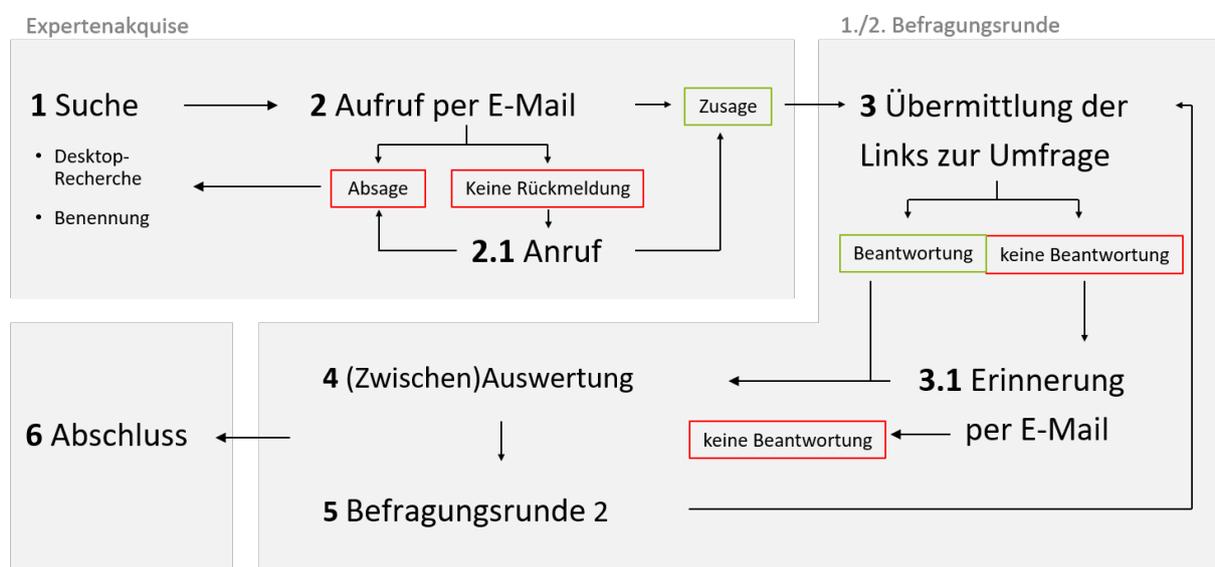
Ähnlich aufwendig wie die Expertenakquise gestaltete sich auch die Durchführung der eigentlichen Befragung. Der ausgearbeitete Fragebogen stellte die Expertinnen und Experten durch das Thematisieren eines unsicheren Inhalts (neuartige Kopplung) in einem komplizierten Kontext (aufgefächerte Nachhaltigkeitsfragestellung) vor Herausforderungen. Die Bereitschaft, sich darauf einzulassen, ist nicht zwingend selbstverständlich. Der Zeitraum, über welchen der Rücklauf realisiert wurde, nahm daher in allen Panels mehrere Wochen in Anspruch. Eine ausreichende Anzahl verwertbarer Rückmeldungen wurde durch Erinnerungen – teils per Email (einmalig) und teils durch Telefonkontakt – realisiert.

Gemäß dem Ablaufschema der Befragung (Abbildung 8) schließt die erste Befragungsrunde an die Expertenakquise direkt an. In der praktischen Durchführung wurden beide Prozesse teilweise parallel

bearbeitet. Sofern eine Person ihre Teilnahmezusage auch nach Erinnerung per Email und einer telefonischen Rückfrage nicht einlösen konnte, wurde eine Ersatzperson recherchiert und in die Befragung eingebunden. Wichtig war es dabei, das als kurz angenommene Aufmerksamkeitsfenster für die Befragung zu nutzen. Daher wurde explizit darauf geachtet, den Expertinnen und Experten die Zugänglichkeit zur Umfrage zeitnah zu ermöglichen.

Die Durchführung der ersten von zwei Befragungsrunden war durch zwei aufeinander ausbauende Schritte gekennzeichnet (Abbildung 8, Schritte 3 bis 4). (1) Zunächst wurde nach Klärung der Bereitschaft der Zugang zum web-basierten Befragungsformular ermöglicht. Dies geschah durch die Übermittlung des Zugangslinks in einer jeweils persönlichen Email. Etwa 14 Tage nach Versand des Befragungszugangs wurde bei Bedarf eine Erinnerungs-E-Mail verschickt. Bei Bedarf erfolgte nach ca. 14 Tagen eine erste Erinnerung per Email. (2) Nach Abschluss der Befragung (Runde 1) wurden die Ergebnisse (zwischen-)ausgewertet und als Impuls für die zweite Runde aufbereitet.

**Abbildung 8: Ablaufschema der Durchführung der Delphi-Befragung**



Quelle: eigene Darstellung

Nach der vollständigen Bearbeitung des Online-Fragebogens wurden die Ergebnisse durch die Befragten online gespeichert und waren für die Organisatoren daraufhin abrufbar. Insgesamt haben geringfügig mehr als 60 % der Expertinnen und Experten, die ihre Teilnahme zugesagt hatten, vollständig ausgefüllte und aussagekräftige Fragebögen gespeichert. Jedoch hat nicht jede beteiligte Person beide Fälle einer Gruppe bearbeitet. Falls keine ausreichende Anzahl vollständig bearbeiteter Befragungsformulare zustande kam, wurde das Panel durch eine weitere Expertenakquise erweitert. Nach dem Erreichen der Zielmarke von 15 Bewertungen für einen Fall sowie einer ausgewogenen Beteiligungsstruktur nach Tätigkeitsperspektiven wurde die Befragungsrunde geschlossen.

**Tabelle 10: Teilnahme von Expertinnen und Experten nach Tätigkeitsperspektiven**

Gruppen	Zugesagt	Teilgenommen (Anteil)	TeilnehmerInnen nach Tätigkeitsperspektiven			
			Forschung	Planer	öff. Stellen	Betreiber
1 Wärme aus Abwasser	22	16 (73 %)	5	4	7	6
2 Alternative Wärmequellen	24	16 (67 %)	9	5	4	6
3 Steuerung Energienetze	25	16 (64 %)	10	5	1	9
4 E-Mobilität und Netzstabilisierung	25	15 (60 %)	5	3	9	8
5 Umwandlung von Überschussstrom	31	19 (61 %)	12	2	9	8
6 App-gestütztes Fuhrparkmanagement	31	16 (51 %)	10	4	8	9
7 Kanalnetzentlastung	27	17 (63 %)	7	8	5	7
<b>Summe</b>	<b>185</b>	<b>115 (62 %)</b>				

#### 5.4.2 Delphi-Befragung – Runde 2

Gerade bei unsicheren Sachverhalten bietet die Delphi-Methode den Vorteil, dass durch die Befragung ausgelöste oder katalysierte Reflexionen zum Thema durch erneute Befragungen ebenfalls berücksichtigt werden können. Als Basis für die weitere Reflexion wurden die Bewertungen der ersten Runde nach einem festgelegten Verfahren zwischen- ausgewertet und den in der ersten Runde beteiligten Expertinnen und Experten als Impuls für die zweite Runde übersandt. Dazu gehörten die folgenden Inhalte:

- desaggregierte fallweise Aufbereitung der Bewertungsergebnisse in Form von gestapelten Balkendiagrammen für jedes der einzelnen Kriterien (vgl. Abbildung 15),
- Gegenüberstellung zur individuellen Bewertung,
- inhaltlich sortierte Aufbereitung der im Rahmen der offenen Fragestellungen gegebenen qualitativen Hinweise und Anmerkungen.

Das Vorgehen in mehreren Runden wird in der Delphi-Methode oft auch eingesetzt, um eine Konsolidierung von Bewertungen und Priorisierungen und damit eine stärkere Legitimierung von Ergebnissen zu erreichen. Im vorliegenden Fall wurde eine zweite Runde angeschlossen, um Korrekturen der Bewertungen aus der ersten Runde zu ermöglichen und damit ein solideres Abbild der Einschätzungen zu generieren. Zusammen mit den Auswertungsergebnissen der ersten Befragungsrunde erhielten die beteiligten Expertinnen und Experten einen Link mit der Einladung zur Teilnahme an der zweiten Runde, um die eigenen Bewertungen aus der ersten Runde anzupassen.

Die Teilnahmeintensität an der zweiten Runde erwies sich als deutlich geringer im Vergleich zur ersten Runde. In knapp 40 % der Fälle haben Panel-Mitglieder das Angebot zur expliziten Überprüfung der eigenen Bewertungen mit folgender Bestätigung oder Korrektur der Bewertungsergebnisse aus der ersten Runde (Tabelle 11) verbunden. Das heißt, ca. 60 % der Panels haben von der Möglichkeit der Überprüfung ihrer Erstbewertung keinen Gebrauch gemacht.

**Tabelle 11: Übersicht bezüglich Anzahl und Art der Rückmeldungen aus der 2. Befragungsrunde**

Gruppen	Anzahl der Bewertungen (Summe aus zwei Fällen)		Änderung in Runde 2	
	1. Runde	2. Runde	Anpassung	keine Anpassung
1 Wärme aus Abwasser	28	15 (54 %)	8	7
2 Alternative Wärmequellen	27	12 (45 %)	8	4
3 Steuerung Energienetze	30	10 (33 %)	6	4
4 E-Mobilität und Netzstabilisierung	22	1 (5 %)	1	-
5 Umwandlung von Überschussstrom	28	16 (57 %)	13	3
6 App-gestütztes Fuhrparkmanagement	23	6 (26 %)	5	1
7 Kanalnetzentlastung	29	9 (47 %)	8	5
<b>Summe</b>	<b>187</b>	<b>69 (37 %)</b>	<b>41</b>	<b>28</b>

## 6 Auswertung der Ergebnisse des Nachhaltigkeitschecks

### 6.1 Ziel und Vorgehen bei der Ergebnisauswertung

Ziel der Auswertung ist es, mithilfe fallspezifischer Nachhaltigkeitsprofile Stärken und Schwächen ausgewählter gekoppelter Infrastrukturlösungen in den Nachhaltigkeitsdimensionen aufzuzeigen. Nachhaltigkeitsprofile ermöglichen differenzierte qualitative Trendaussagen zu den ausgewählten Nachhaltigkeitskriterien (Kapitel 4). Nachhaltigkeitsprofile integrieren die durch Expertinnen und Experten vorgenommenen Bewertungen der ersten und zweiten Runde (Kapitel 5.4). Für Expertinnen und Experten, die sich an beiden Runden der Befragung beteiligt haben, ersetzen die Bewertungen der zweiten Runde diejenigen der ersten Runde. Für alle andere Bewertungen werden die der ersten Runde in den Darstellungen berücksichtigt.

Der folgende Abschnitt stellt ausgewählte Ergebnisse der Bewertungen der Delphi-basierten Befragung am Beispiel von zwei Fällen vor. Grundsätzlich steht jeder einzelne in TRAFIS untersuchte Fall für sich. Ein Vergleich der Fälle ist nicht angestrebt und aufgrund der inhaltlichen Unterschiede zwischen den Fällen nicht sinnvoll. Hierfür bietet das verbindende Element der Fallstudien – innovative Infrastrukturkopplung mit Nachhaltigkeitspotenzial – eine zu geringe inhaltliche Vergleichsbasis. Dennoch lassen sich bei der Querbetrachtung der Fälle Muster erkennen, die sich über die meisten Fälle wiederholen und aus denen übergreifende Aussagen generiert werden können, (vgl. auch Abbildung 14).

Die fallspezifischen Aussagen sind das zentrale Untersuchungsergebnis und Inhalt der Einzelfalldarstellungen in Kapitel 8.

### 6.2 Lesehilfe

Als primäre Form der Ergebnisdarstellung wurde das gestapelte Balkendiagramm ausgewählt, welches für jede bewertete Fragestellung die jeweilige Anzahl der vergebenen Bewertungen sichtbar macht. Diese desaggregierte Ergebnisdarstellung ermöglicht einen guten Überblick über Trends, Unsicherheiten und ggf. Polarisierungen in der Einschätzung auf der Ebene einzelner Kriterien.

Grundsätzliche Anmerkungen:

- ▶ Trends der Aussagen können von Fall zu Fall mehr oder weniger deutlich abgeleitet werden.
- ▶ Bei einigen Fällen zeigen die Bewertungen eine größere Bandbreite, die Unsicherheit bis Polarisierung bei den Einschätzungen erkennen lassen.

#### Abbildung 9: Legende zu Abbildung 10 bis Abbildung 13:

---

-  **(-2)** deutlich negative Bewertung (z. B. nicht geeignet, deutliche Kostensteigerung, deutlich negative Auswirkung, etc.)
-  **(-1)** geringfügig negative Bewertung (z. B. wenig geeignet, geringfügige Kostensteigerung, eher negative Auswirkung)
-  **(0)** keine Veränderung zum bekannten Regime
-  **(+1)** geringfügig positive Bewertung (z. B. gut geeignet, geringfügige Kostensenkung, eher positive Auswirkung)
-  **(+2)** deutlich positive Bewertung (z. B. sehr gut geeignet, deutliche Kostensenkung, deutlich positive Auswirkung)

Quelle:eigene Darstellung

In den farbigen Feldern der gestapelten Balkendiagramme ist jeweils die Anzahl der entsprechenden Bewertungen vermerkt. Die Nutzungshäufigkeit der Antwort-Option „keine Angabe“ ergibt sich aus der Differenz der Summe vermerkter Antworten und der Gesamtzahl der Antworten ( $n = x$ ). Sie wird in den Balkendiagrammen nicht grafisch abgebildet.

Die gestapelten Balkendiagramme enthalten zusätzliche Information in Form von Pfeilen. Diese zeigen die Veränderung der Bewertung von Runde 1 zu Runde 2. Das Ziel der zweifachen Befragung des gleichen Experten-Panels ist es, mögliche Abpassungen der Bewertung eines unsicheren Sachverhalts im Zuge der Beschäftigung damit zu berücksichtigen. Die Pfeile sind folgendermaßen zu lesen:

1. Die Pfeile indizieren schematisch die Richtung der eingetretenen Veränderung und den Ausgangspunkt der Änderung.
2. Die Pfeile indizieren nicht eine Häufigkeit der Veränderung – diese blieb in den meisten Fällen auf nur sehr wenige Änderungen beschränkt.
3. Der Anfang des Pfeils zeigt an, wo die Änderungen ihren Ursprung nahmen. Die Stärke der Änderung lässt sich daraus nicht ablesen.
4. Insgesamt werden drei Arten von Änderungen dargestellt:
  - Veränderung zum positiven, ← Veränderung zum Negativen
  - ↓ Rückzug einer Wertung (nach Wertung in Runde 1, „keine Angabe“ in Runde 2)
  - ↑ Zusätzliche Wertung (nach „keine Angabe“ in Runde 1, Angebot einer Wertung in Runde 2)

Die zusammenfassende Darstellung von Kriterien sowie die Spinnennetzdiagramme unterscheiden die eingesetzten Kriterien in einem **Farbschema**. **Die verwandten Farben symbolisieren die** der Bewertung zugrundeliegenden vier Nachhaltigkeits-Dimensionen:

 (blau) Leistungsfähigkeit/Funktionalität

 (grau) Soziale und ökonomische Verträglichkeit

 (grün) Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

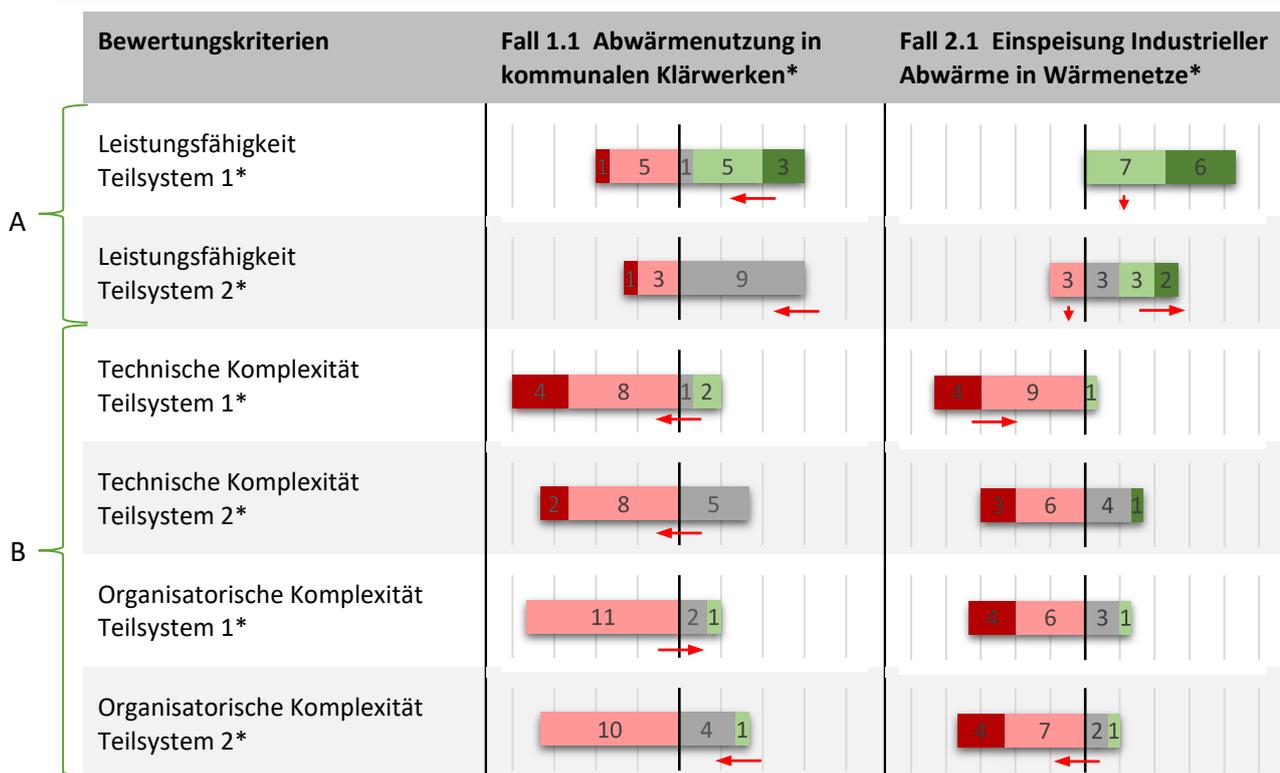
 (orange) Versorgungssicherheit

## 6.3 Desaggregierte Ergebnisdarstellung

### Leistungsfähigkeit

In den meisten Fällen wird den untersuchten Infrastruktorkopplungen grundsätzlich eine gute potenzielle Leistungsfähigkeit bescheinigt (siehe Kriterien Block A). Zugleich wird durch die Infrastruktorkopplungen eine Zunahme der Komplexität der technischen und organisatorischen Komponenten der sozio-technischen Systeme attestiert (Kriterien Block B).

Abbildung 10 Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Leistungsfähigkeit“



Quelle: eigene Darstellung, \* Beschreibung der Fälle und Bedeutung der einzelnen Kriterien siehe Kapitel 8.1 und 8.2

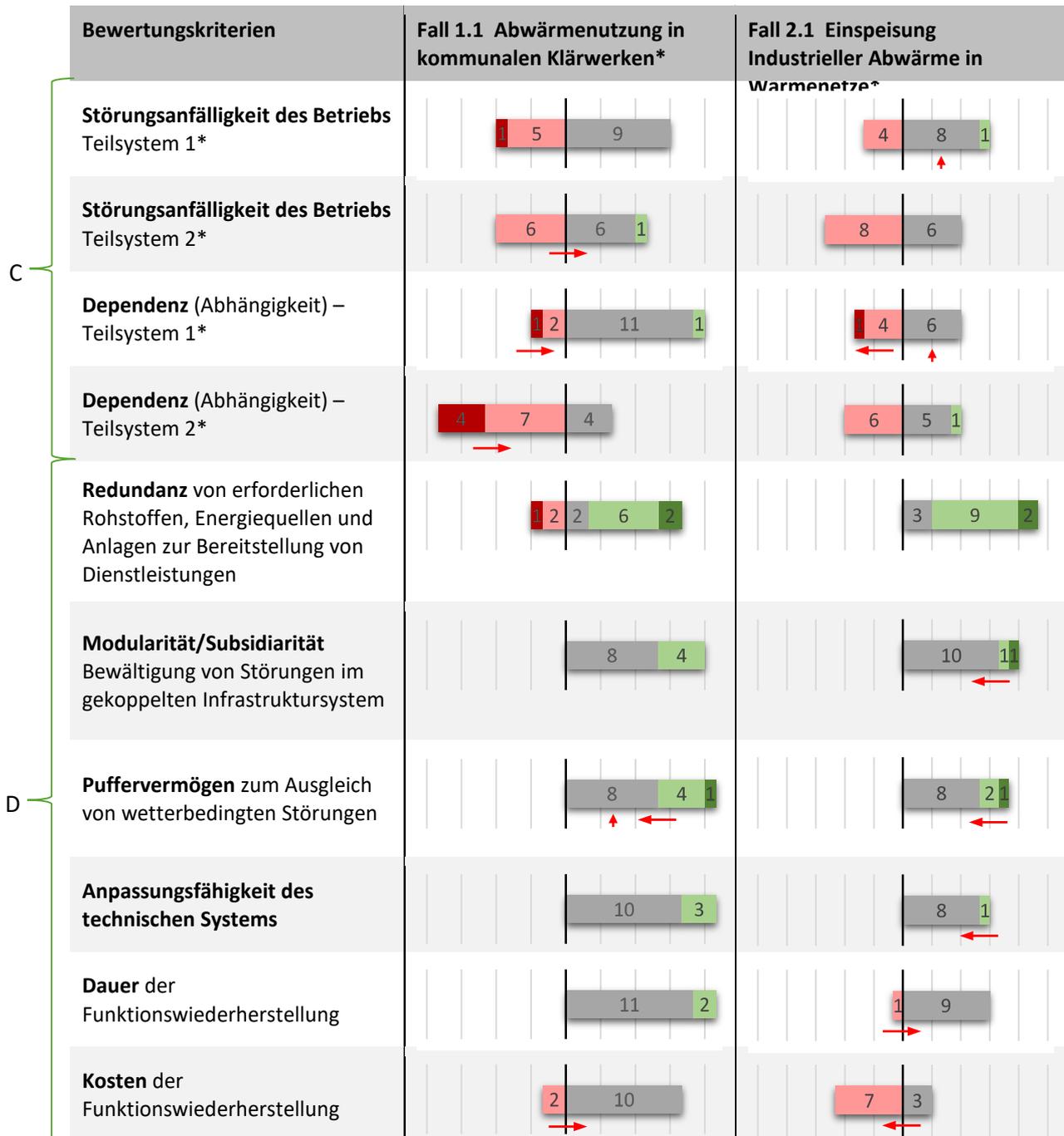
### Fazit

- ▶ Infrastruktorkopplungen verfügen über das Potenzial, die erwartete Leistung zu erbringen und können durch die Hebung bisher ungenutzter Synergien teilweise über höhere Leistungspotenziale verfügen als herkömmliche nicht gekoppelte Systeme.
- ▶ Die innovativen Kopplungen von Infrastrukturen führen in der Regel zu einer deutlich höheren technischen und organisatorischen Komplexität im sozio-technischen System der gekoppelten Infrastrukturlösung.
- ▶ Untersuchte Wirkungen sind in den verschiedenen an einer Kopplung beteiligten Teil-Systemen unterschiedlich ausgeprägt.

## Versorgungssicherheit

Mit den meist gut bewerteten Leistungspotenzialen (Block A) korrespondieren die ebenfalls überwiegend positiv bewerteten Resilienz-erhöhenden Potenziale wie Redundanz, Modularität und Puffervermögen (Kriterien Block D). Zugleich korrespondieren die eher negativ gelagerten Einschätzungen zur technischen und organisatorischen Komplexität (Block B) zu den Resilienz-Kriterien Störanfälligkeit und Dependenz (Block C).

Abbildung 11 Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Versorgungssicherheit“



Quelle: eigene Darstellung, \* Beschreibung der Fälle und Bedeutung der einzelnen Kriterien siehe Kapitel 8.1 und 8.2

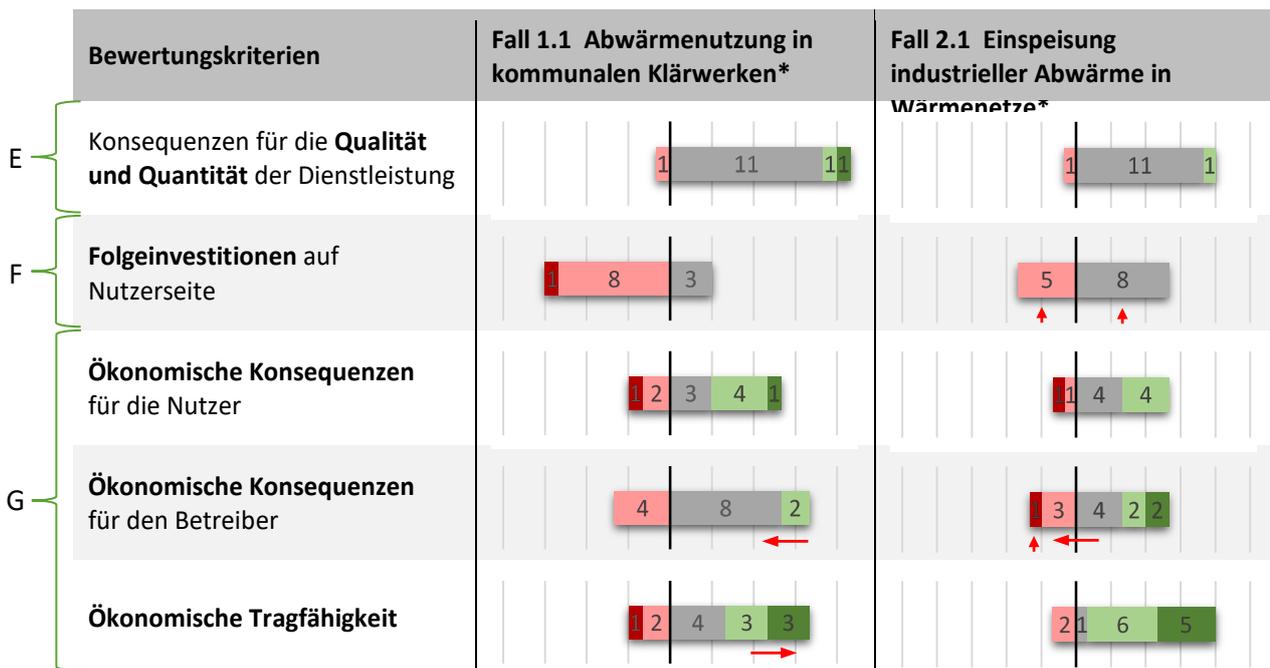
**Fazit**

- ▶ Durch neue Kopplungen von Infrastruktursystemen können neue Abhängigkeiten (Dependenzen) entstehen.
- ▶ Infrastrukturkopplungen können durch Verbesserung von Redundanz, Modularität und Puffervermögen der Systeme die lokale/regionale Versorgungssicherheit stärken.
- ▶ Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Teil-Systemen sind meist einseitig ausgeprägt. Beidseitige Abhängigkeiten sind eher selten.

**Soziale und ökonomische Verträglichkeit**

Für die Quantität und Qualität der Dienstleistung wird auch im Falle eines Wechsels zu den ausgewählten gekoppelten Infrastrukturen grundsätzlich keine nennenswerte bis (in den hier nicht dargestellten Fällen) deutlich positive Veränderung erwartet (Kriterium E). Hingegen werden für die ökonomischen Konsequenzen (Kosten) für Nutzer wie Betreiber und insbesondere die ökonomische Tragfähigkeit der Lösungen eher positive Auswirkungen erwartet (Kostensenkung, Kriterien Block G). Für die Nutzerseite wird mit teilweise deutlichen Investitionsbedarfen gerechnet (Kriterium F), um die Infrastrukturdienstleistungen abrufen zu können.

**Abbildung 12: Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung, \* Beschreibung der Fälle und Bedeutung der einzelnen Kriterien siehe Kapitel 8.1 und 8.2

**Fazit**

- ▶ Die Potenziale der Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit werden in der Regel ohne Einbußen an der von Nutzern wahrgenommenen Qualität der Dienstleistung erzielt.
- ▶ Der Betrieb der Infrastrukturkopplung verfügt über das Potenzial, für die Anbieter und die Nutzer ökonomisch tragfähig zu sein.

- Die nutzerseitige Inanspruchnahme der Infrastrukturdienstleistung kann teilweise spürbare Investitionen erfordern – z. B. wenn die Gebäudetechnik angepasst werden muss, um die Vorteile einer neuen Infrastrukturlösung nutzen zu können.

### Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung

Bemerkenswert ist die Gegenüberstellung der überwiegend positiven Bewertungen der Potenziale für Leistungsfähigkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit mit den Bewertungen im Bereich der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz.

Abbildung 13 Nachhaltigkeitsprofil, Teil „Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung“



Quelle: eigene Darstellung, \* Beschreibung der Fälle und Bedeutung der einzelnen Kriterien siehe Kapitel 8.1 und 8.2

## Fazit

- ▶ Für die Kriterien Primärenergiebedarf, Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen wird eine überwiegend neutrale bis deutlich positive Wirkung erwartet.
- ▶ In Hinblick auf die meisten herangezogenen Ressourcenkriterien dominieren neutrale bis leicht positive Bewertungen – was im Kontext möglicher Leistungssteigerungen positiv zu interpretieren ist.
- ▶ Verstärkt unsicher bis häufig leicht negativ zeigen sind die Einschätzungen in Bezug auf den Bedarf nach Bodenbelastungen, Rohstoffen allgemein sowie nach kritischen Rohstoffen. In den meisten Fällen steigt der Flächenbedarf, teils sehr deutlich.

## 6.4 Gesamtreflexion

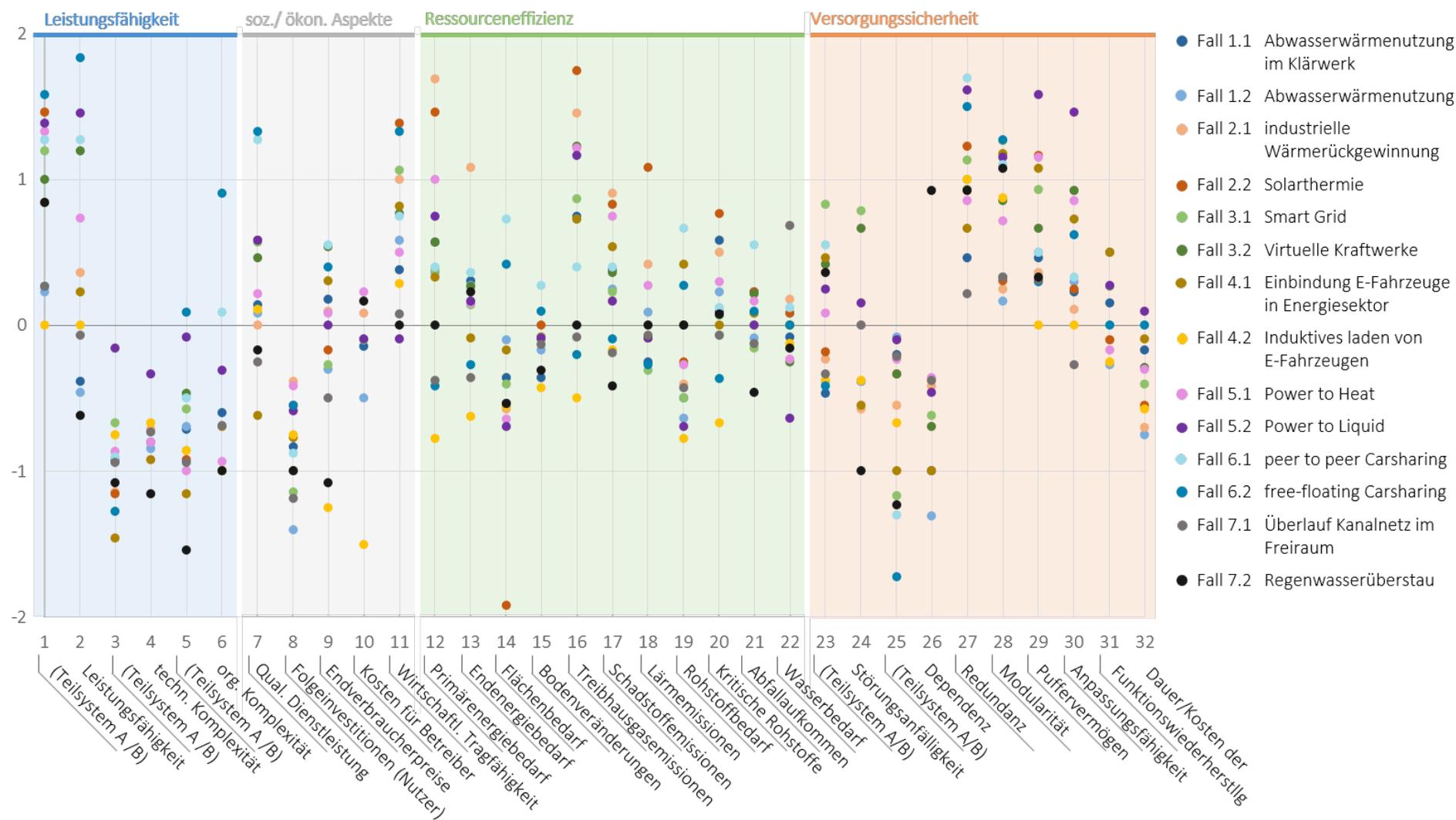
Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse machen deutlich, dass sich die Bewertungen der beiden betrachteten Fälle in vielen Kriterien teilweise deutlich unterscheiden, sich aber teilweise auch ähneln. Diese Beobachtung wollen wir gern anhand der Gesamtergebnisse einordnen.

Einen Überblick über die Bewertungsergebnisse der 14 Fälle gibt Abbildung 14, die für jedes Kriterium das arithmetische Mittel der Bewertungsergebnisse zeigt. Ein Rückgriff auf eine solche Aggregation geht zwangsläufig mit einem Informationsverlust einher. Eine Mittelung der Bewertungen ist in vielen Fällen nicht geeignet, um einen Trend abzuleiten und die Aufmerksamkeit auf bestimmte Potenziale und Herausforderungen im Sinne einer steuernden Wirkung zu lenken. Zugleich zeigt die Darstellung dennoch, dass trotz der Unterschiede der zwei vorgestellten Fälle (vgl. Kapitel 6.3) übergreifende Tendenzen in Hinblick auf die unterschiedlichen Kriterien über alle betrachteten Fälle hinweg abgeleitet werden können.

Für die Bewertung von Änderungen an Infrastruktursystemen ist die Funktionsfähigkeit eine zentrale Kategorie. Wie die Ergebnisübersicht zeigt, sind die Teilsysteme der ausgewählten Infrastrukturlösungen auch im gekoppelten Betrieb fähig, ihre Leistung sicherzustellen und zeigen in einigen Fällen sogar das Potenzial zu einer Leistungssteigerung. Zu bemerken ist hier wie auch bei den weiteren Kriterien, die aus Perspektive der Teilsysteme betrachtet wurden, dass die Auswirkungen einer Kopplung für die jeweils beteiligten Teilsysteme teils deutlich unterschiedlich ausfallen kann und daher separat betrachtet werden sollte. Vor dem Hintergrund der Leistungsfähigkeit sind die weiteren Kriterien zu betrachten.

Die Wirkungen in Bezug auf die Ressourceneffizienz sind durchweg fallspezifisch und teils deutlich negativ auch wenn neutrale bis geringfügig positive Bewertungen überwiegen. Insbesondere die Kriterien Primärenergiebedarf (12) und CO<sub>2</sub>-Emissionen (16) weisen eine neutrale bis positivere Entwicklungstendenz auf. Andere Kriterien wie Lärm- (18) und Abfallentwicklung (21) oder der Bedarf nach kritischen Rohstoffen (20) zeigen sich deutlich differenzierter und deuten immer wieder auf mögliche negative Nebeneffekte hin. Insbesondere für den Flächenbedarf (14) wird in vielen Fällen eine teils deutliche Zunahme erwartet. Zugleich muss berücksichtigt werden, dass die Kriterien ungewichtet nebeneinander stehen. So stehen belastende Einmaleffekte wie ein Anstieg von Rohstoffbedarfen für zusätzliche technische Ausstattungen wie beispielsweise Wärmepumpen oder Wärmetauscher gleichrangig neben positiven und negativen Dauereffekten wie der Reduktion des Energiebedarfes und der Treibhausgasemissionen oder der teils deutlich erhöhten Flächenbedarfen sowie technischen und organisatorischen Komplexitäten.

Abbildung 14: Bewertungsmuster der 14 untersuchten synthetischen Fälle



Quelle: eigene Darstellung

Die Bewertung der Resilienz-Kriterien ist über alle Fälle hinweg zweigeteilt. Deutliche Übereinstimmung besteht einerseits hinsichtlich der positiven Trends für die Resilienz-Kriterien Redundancy (27), Modularity (28) und Buffering capacity (29). Dies liegt nahe, da die betrachteten Fälle zumeist lokal zusätzliche Energiequellen dezentral erschließen oder bereitstellen. Nahezu ebenso deutlich ist die Übereinstimmung auch bei der Dependenz (25, 26) der gekoppelten Teil-Systeme untereinander. Es wird deutlich, dass auch die Dependenz der Teilsysteme nicht symmetrisch ausgeprägt ist. Besonders deutlich steigt die Dependenz unter Nutzung von IKT-Technologien zur Kopplung der Teilsysteme wie in den Fällen Carsharing, Smart Grid oder E-Fahrzeuge im Energiesystem – auch diese Einschätzung liegt nahe, da bei Ausfall der verbindenden IKT-Technologien ein Komplettversagen der jeweiligen Infrastrukturkopplung die Folge ist.

Ein ebenfalls deutlich differenziertes Bild zeigt sich für die Kriterien der sozialen und ökonomischen Verträglichkeit der gekoppelten Infrastrukturlösungen. Während für die ökonomische Tragfähigkeit der Geschäftsmodelle der Infrastrukturanbieter (11) keine großen Änderungen erwartet werden, sind die Auswirkungen auf die Nutzer der Infrastrukturdienstleitungen zum Teil erheblich. Besonders deutlich zeigen sich das beim Blick auf den in vielen Fällen erwarteten nutzerseitigen Investitionsbedarf (9). Für alle Kopplungen dominiert hier mind. die Tendenz, dass Nutzer zusätzliche Investitionen tätigen müssen, um die neuartigen Infrastrukturdienstleistungen nutzen zu können – in Form einer Gebäudesanierung, der Anschaffung von mobilen Kommunikationsgeräten (Internet- und GPS-fähige Endgeräte) oder spezieller Fähigkeiten von Elektrofahrzeugen (induktives Laden).

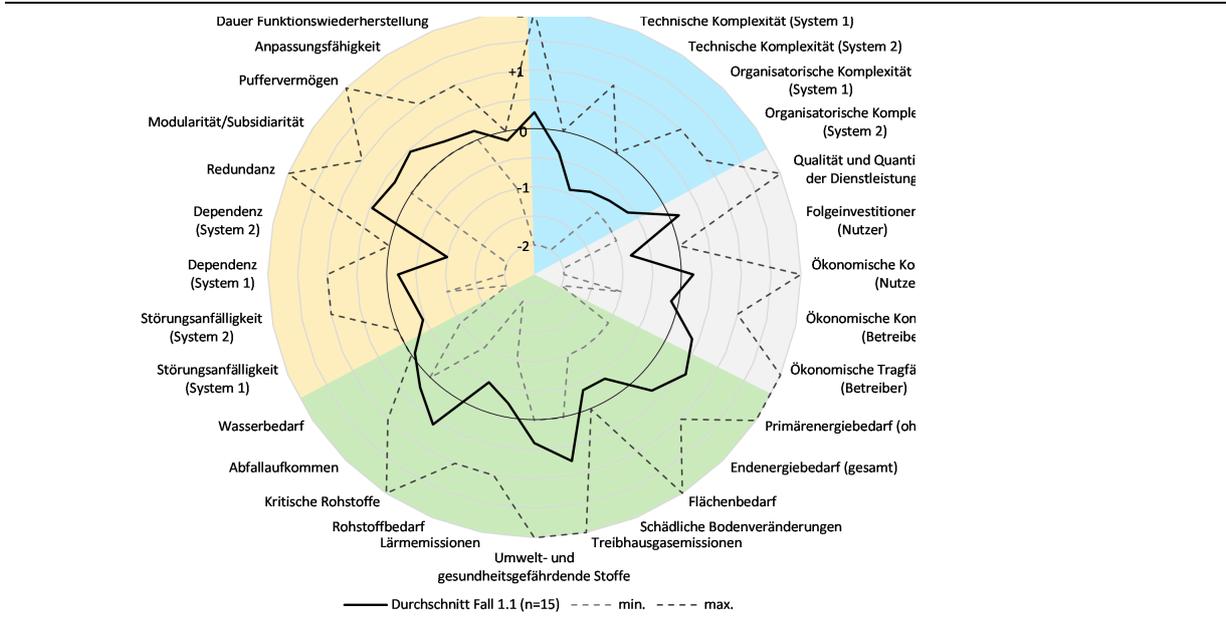
Das über die Dimensionen und Kriterien hinweg differenzierte Bild der Bewertungen unterstreicht, dass sowohl die Kopplungen selbst als auch der angenommene Kontext jeweils einen großen, spezifischen Einfluss auf die Nachhaltigkeitswirkungen haben. Diese Beobachtung wird durch den Blick auf alle 14 betrachteten Fälle unterstrichen. Einige Kriterien sind durch eine ausgeprägte Streuung der Bewertungen über einen weiten Wertebereich hinweg gekennzeichnet. Dies betrifft u. a. die Kriterien Primärenergiebedarf (12), CO<sub>2</sub>-Emissionen (16), Endverbraucherpreise (8) oder Dependenz (25, 26). Darüber hinaus sind auch einige Ausreißer feststellbar, die durch eine besonders deutlich ausgeprägte Bewertungstendenz in einigen Kriterien auffallen. Dies betrifft etwa die Nutzung von Industrieller Abwärme (Fall 2.1) oder der Solarthermie (Fall 2.2) in Bezug auf die Kriterien Primärenergiebedarf (12), CO<sub>2</sub>-Emissionen (16) oder Flächenbedarf (14).

Als eine weitere Form der Auswertung nutzen wir Spinnennetzdiagramme zur Abbildung fallspezifischer Nachhaltigkeitsprofile, welche die zuvor vorgestellten detaillierten Ergebnisse in einer stärker aggregierten Form darstellen. Diese erlauben einen schnellen zusammenfassenden Blick auf die Bewertungsergebnisse eines Falles. Auch wenn hier Detailinformationen durch Verwendung durchschnittlicher Bewertungen eines Kriteriums verloren gehen, erlaubt diese Darstellungsform einen leichteren Gesamtüberblick sowie die direkte Gegenüberstellung der unterschiedlichen Nachhaltigkeitsaspekte. Darüber hinaus wurde insbesondere von Vertretern der Praxis explizit diese Darstellungsform als geeignetes Instrument hervorgehoben, die Komplexität von Nachhaltigkeitsaspekten gut zugänglich transportieren zu können. Dies konnte in weiteren Anwendungen erprobt und so auch bestätigt werden (vgl. Kapitel 7). Ein weiterer Vorteil eines leicht aggregierten Gesamtüberblicks liegt darin, dass dieser den im politischen Raum bekannten Zugang des Energiepolitischen Dreiecks aufgreift, diesen aber deutlich ergänzt und differenziert, und damit ggf. auch einen Beitrag leistet hin zu einer Operationalisierung des politisch relevanten, ansonsten bisher jedoch eher abstrakt scheinenden Nachhaltigkeitsbegriffes.

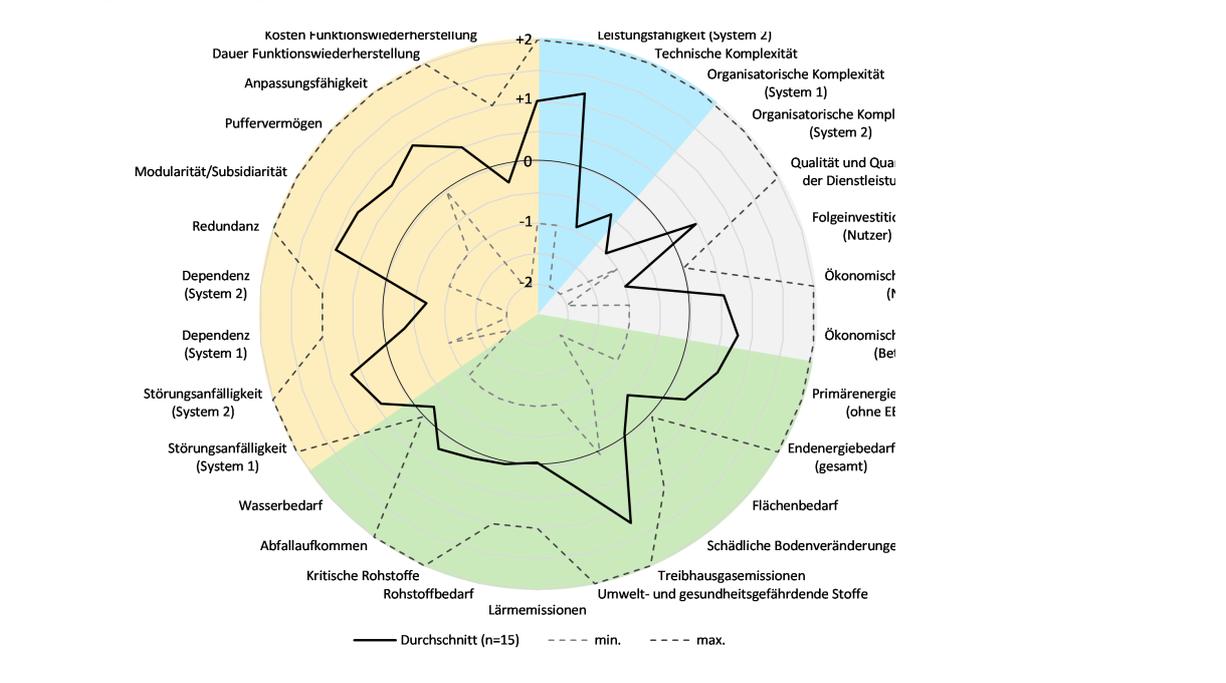
Die Darstellung der Nachhaltigkeitsprofile basiert auf drei Informationen: dem Mittelwert über alle Einzelbewertungen eines Falles sowie ergänzend den jeweiligen Minima und Maxima der Bewertungen zum jeweiligen Kriterium. Ein solcher Überblick ermöglicht eine schnelle und einfache Übersicht über mögliche Trends von Bewertungen sowie, bei Bedarf und Eignung, eine Gegenüberstellung von

Bewertungen (Abbildung 15). Die Darstellung erlaubt jedoch nicht den Einblick in die Varianz der Einzelbewertungen und erlaubt damit keine Aussage darüber, in wie weit ein Durchschnittswert auf einer grundsätzlichen Einigkeit der Bewertungen oder auf einer Verteilung der Einzelbewertungen über ein größeres Spektrum der Bewertungsskala oder etwa auf einer Polarisierung der Bewertungen an den Polen der Skala beruht. Die zusätzliche Abbildung der Extreme ist in diesem Punkt hilfreich (Abbildung 16), ersetzt die Detailergebnisse aber nicht vollständig.

**Abbildung 15: Nachhaltigkeits-Profile unterscheiden sich Fall-spezifisch – Beispielfälle 1.1 und 3.2**

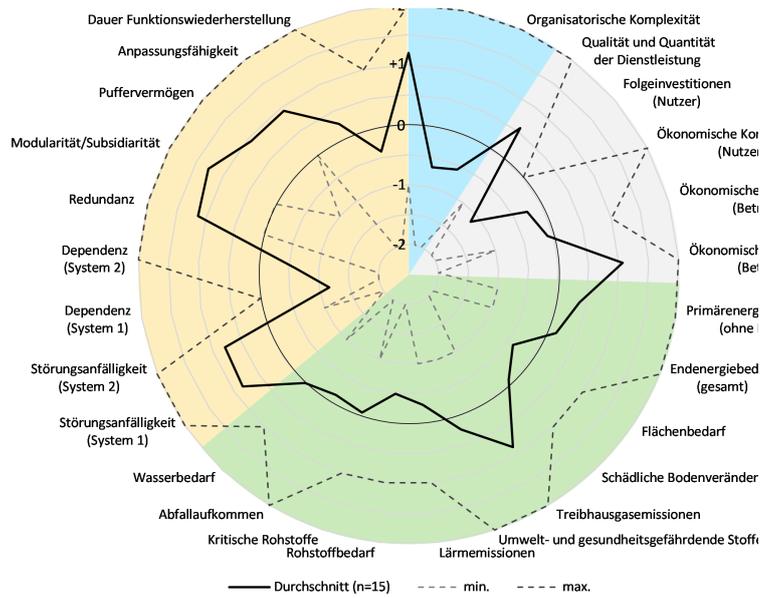


Quelle: eigene Darstellung

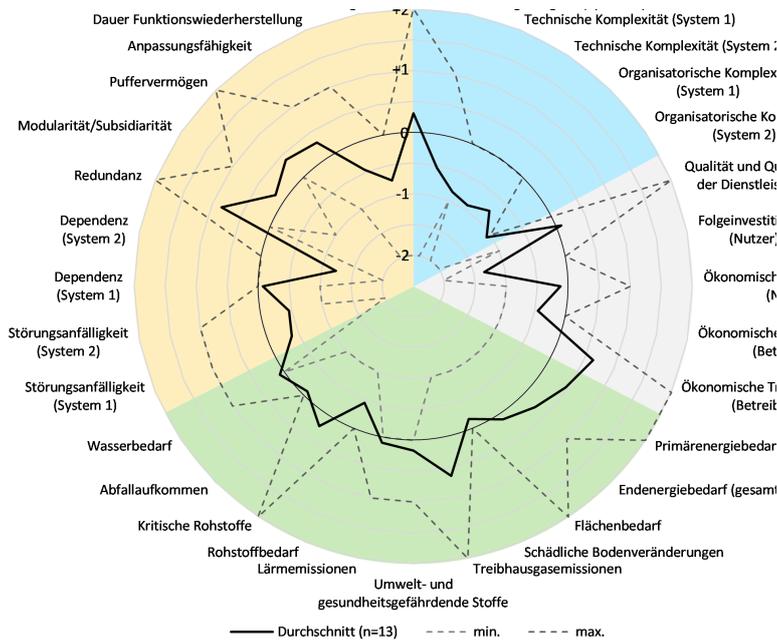


Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 16: Fallspezifisch unterschiedliche Spannweiten der Einschätzungen – am Beispiel der Fälle 3.1 und 5.2



Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung

## 7 Praktikabilität des Nachhaltigkeitschecks

### 7.1 Anwendbarkeit der Delphi-Methode für den Nachhaltigkeitscheck innovativer Infrastrukturlösungen

Die Delphi-Befragung als Methode zur Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte innovativer Infrastrukturlösungen wurde vor allem wegen ihrer besonderen Eignung für die Untersuchung unsicherer Fragestellungen ausgewählt. Letzteres sind Fragestellungen, die nicht oder nicht im gegebenen Rahmen durch empirische Befunde oder andere sicherere Methoden überprüft werden können. Als methodischer Ansatz hat die Delphi-Methode entsprechende Stärken (Kapitel 5), die sie für den Nachhaltigkeitscheck in TRAFIS besonders geeignet machen.

Innovative Kopplungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Praxis noch keine ausreichende Umsetzung gefunden haben, um kontextunabhängige Hinweise auf Potenziale und Risiken zu generieren. Zudem sind die Aspekte der Nachhaltigkeit in ihrer Breite und Komplexität in der Praxis wenig bis gar nicht betrachtet oder untersucht. Die hier vorgenommene Untersuchung der Nachhaltigkeitswirkungen von innovativen Infrastrukturlösungen ist daher in mehrerlei Hinsicht unsicher:

- ▶ erstens, in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand – innovative gekoppelte Lösungen in sozio-technischen Infrastruktursystemen;
- ▶ zweitens, in Bezug auf die Eignung und mögliche Wirkungen der nicht etablierten Kopplungsoptionen in unterschiedlichen Kontexten;
- ▶ und drittens, in Bezug auf das angewandte Nachhaltigkeitskonzept und die es untersetzenden Kriterien.

Während die Leistungsfähigkeit, einzelne Aspekte der Wirtschaftlichkeit oder mögliche Wirkungen für Energiebedarf in der Regel auch in der Praxis Gegenstand der Betrachtung sind – z. B. im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen – werden zahlreiche im hier angewandten Nachhaltigkeitscheck berücksichtigten Faktoren oftmals wenig bis gar nicht berücksichtigt. Dies trifft insbesondere auf Fragestellungen der Versorgungssicherheit zu (vgl. Kapitel 4.2.4).

Ihre Eignung für eine solche Art von Untersuchungen hat die Delphi-Methode bereits in der Vergangenheit bewiesen. Interessant ist vielmehr, inwiefern sich die Delphi-Methode in dieser spezifischen Untersuchung als praktikabel erwiesen hat. Hier sind zwei Aspekte wichtig: einerseits die Akzeptanz der Methode durch die befragten Expertinnen und Experten und andererseits die Belastbarkeit der gewonnenen Aussagen bezogen auf Panelgröße und Perspektive der Befragten.

### 7.2 Akzeptanz des methodischen Zugangs

Grundsätzlich wurde der methodische Zugang zur Untersuchung von Nachhaltigkeitswirkungen gut angenommen. Von den über 500 kontaktierten Expertinnen und Experten hatte ca. ein Drittel ihre Bereitschaft signalisiert, sich an einem der sieben Panels zu beteiligen. Von diesen haben später wiederum ca. zwei Drittel tatsächlich an der Befragung teilgenommen und zumeist sowohl die qualitativ angelegten Bewertungen (Tabelle 12) als auch die offenen Fragestellungen (Tabelle 13) beantwortet.

Die Tatsache, dass eine erwähnenswerte Anzahl der persönlich angesprochenen Expertinnen und Experten ihre Teilnahme einerseits zugesagt hatten, in der praktischen Durchführung der Befragung jedoch andererseits nicht teilgenommen haben, deutet auf Herausforderungen für die Praktikabilität eines breit angelegten, anonymen und mit vielen Unsicherheiten behafteten Vorgehens hin. Es ist

insgesamt zu konstatieren, dass auch die Anwendung dieser vereinfachten Methode für die Teilnehmenden einen erheblichen Aufwand in Bezug auf Zeit und Konzentration bedeutet, der in Folge zu Ausfällen führen kann. Auch wenn dies nicht im Einzelnen nachgefragt wurde, so ist davon auszugehen, dass die Expertinnen und Experten für die vollständige Beantwortung eines Fragebogens mindestens die in Pre-Tests ermittelten 30 Minuten benötigt haben. Eine Diskrepanz zwischen dem angekündigten und dem tatsächlich entstandenen Zeitbedarf für die Bewertung und die Beantwortung der Fragen wurde im Rahmen der Befragung nicht mitgeteilt. Die rege Beteiligung an den offenen Fragestellungen deutet darauf hin, dass die Befragten oftmals einen größeren zeitlichen Aufwand in Kauf genommen haben. Die hohe Rücklaufquote spricht zugleich grundsätzlich für eine gute Akzeptanz der Methode in der Umsetzung.

Ein anderer Aspekt in dieser Hinsicht bildet die „Ausfall-Quote“ innerhalb eines Panels (ein Expertenpanel hatte jeweils zwei Fälle zu bewerten). Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass in keinem Panel beide Fälle gleich häufig bearbeitet worden sind. Beim Durchführen der Befragung hat sich gezeigt, dass der zuerst aufgeführte Fall jeweils häufiger bearbeitet wurde als der zweite. Dies deutet auf eine gewisse Ermüdung der Beteiligten hin.

Noch deutlicher wird diese Ermüdung in Blick auf die Beteiligung der Expertinnen und Experten in Runde 2 der Befragung, bei der die gleichen zwei Fälle auf Basis der Ergebniszusammenfassung aus Runde 1 erneut zu bewerten gestellt wurden. Hier zeigt sich eine deutlich geringere Beteiligung, woraus sich auch die Überlegungen zu möglichen Adaptation dieser Methode in künftigen Anwendungen herleiten.

### 7.3 Mögliche Adaption der Delphi-Methode

Im Rahmen einer Delphi-basierten Befragung werden Expertinnen und Experten in der ersten Runde zunächst mit dem für sie unsicheren und zum Teil überraschenden Sachverhalt konfrontiert. Das Durchführen mehrerer Runden basiert auf der Annahme, dass die inhaltliche Auseinandersetzung mit dem Thema im Verlauf der Befragung den Blick auf die Fragestellungen und auf die eigenen Antwortmöglichkeiten verändert. Dies geschieht einerseits durch persönliche Reflexionsprozesse in Hinblick auf den in Rede stehenden Fall und die damit verbundenen Fragestellungen. Dies resultiert andererseits auch aus der in der Methode vorgesehenen Rückkopplung von Ergebnissen der jeweils vorangegangenen Runde. Bis zu drei Runden sind in der Literatur beschrieben. Die Form der Rückkopplung kann sehr unterschiedlich sein. In dieser Untersuchung wurden die Bewertungen anonymisiert, aber in Gänze zurückgekoppelt, d.h. es wurde drauf verzichtet, Zwischenergebnisse zu aggregieren.

In der speziellen Anwendung der Delphi-Methode in TRAFIS hat sich gezeigt, dass das Bedürfnis bzw. die Bereitschaft der ExpertInnen, die eigenen Einschätzungen in einer zweiten Runde weiterzuentwickeln deutlich eingeschränkt war. Über die Gründe lässt sich mutmaßen:

- ▶ Ermüdung bzw. geringe Motivation – Alle Beteiligten bieten ihre Zeit und Expertise kostenfrei und ohne nähere Bindung an die durchführende Institution oder das Projekt (hier IÖR bzw. TRAFIS) an. Diesen Punkt antizipierend wurde die zweite Runde auf die Reflexion der gebundenen Bewertungen beschränkt.
- ▶ Kein Bedarf, Einschätzungen zu überdenken – eine entsprechende Rückmeldung nannte dies als Grund für die Zurückhaltung in der zweiten Runde.
- ▶ Methodenwahl – Ein möglicher Grund könnte auch sein, dass für das Ausmaß der Unsicherheiten eine andere, weniger anonyme Methode in einem kleineren Panel geeigneter wäre. Dies ist in einer so breiten Untersuchung wie in TRAFIS nicht realisierbar, könnte aber in Einzelfall-Untersuchungen aufgegriffen werden.

- Verbindlichkeit – Schließlich ist auch denkbar, dass Ermüdung, Anonymität und die große fachliche Breite der Untersuchung nicht das erforderliche Maß an Verbindlichkeit schafft, um den großen Aufwand zu rechtfertigen, die eine ernsthafte Befassung in einem solchen – auch experimentellen – Rahmen mit sich bringt. Zu bemerken ist, dass durch die sorgsame Recherche und persönliche Ansprache sowie intensive Begleitung der Befragung dennoch eine engagierte und sorgsame Bearbeitung der Fragestellungen durch die Expertinnen und Experten erreicht werden konnte. Dieses hohe Maß an Qualität erfordert einen hohen Aufwand, auch von den Expertinnen und Experten in den Panels.

Dies alles zusammen führt zur Frage, in wie weit eine Durchführung der Delphi-Methode in mehreren Runden der Fragestellung und dem Rahmen ihrer Anwendung angemessen bzw. unverzichtbar ist. Zweifellos basieren die hier vorgelegten Ergebnisse aus der ersten Runde mehrheitlich auf sorgsam bearbeiteten Bearbeitungen der Fragestellungen. Sowohl für die Bewertungen als auch für mögliche Erklärungsansätze liegt eine große Informationsbasis vor. Diese erlaubt es, bereits auf Basis der Auswertung einer Runde Rückschlüsse über Potenziale und Risiken in Bezug auf verschiedene Sachverhalte zu ziehen:

- Leistungspotenziale für die Erbringung der Dienstleistung.
- Mögliche Konsequenzen für Umsetzung und Betrieb (Komplexität).
- Differenzierte Aspekte der Resilienz (Versorgungssicherheit).
- Akzeptanz und ökonomische Barrierefreiheit für Nutzer.
- Wirtschaftlichkeit für Betreiber.
- Umweltwirkungen im Sinne der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz.

Wie die Beteiligung an der zweiten Runde gezeigt hat, haben sich die Bewertungen auch bei den Teilnehmenden der zweiten Runde nicht radikal verändert. Ggf. kann für eine Fragestellung, wie sie in TRAFIS verfolgt wurde, eine Runde bereits als genügend angesehen werden, um ausreichend belastbare Trend-Aussagen zu generieren.

Ein wichtiger weiterer Aspekt für die Durchführung mehrerer Runden ist das mögliche Ziel der Konvergenz von Bewertungen, wenn die Delphi-Methode als Instrument zur Konsensfindung und Legitimation – z. B. von Priorisierungen oder Gewichtungen – eingesetzt werden soll. Dies ist in TRAFIS jedoch nicht Ziel der Untersuchung. Auch aus dieser Perspektive ist eine Beschränkung auf die Durchführung nur einer Runde begründbar. Für mögliche Wiederholungsanwendungen ist daher zu prüfen, welcher Teil des methodischen Ansatzes unverzichtbar ist.

## 7.4 Anwendbarkeit von Nachhaltigkeitskonzept und Kriterienset

Den befragten Expertinnen und Experten wurden zu jedem Fall 32 Fragestellungen aus einem Set von 26 Nachhaltigkeitskriterien zur Bewertung vorgelegt. Neben der qualifizierten Beantwortung der gestellten Fragen bestand zudem mit der Antwortoption „keine Angabe“ die Möglichkeit der Nicht-Beantwortung. Für die Analyse in Hinblick auf die nichtbeantworteten Fragen ist daher relevant, in wie fern auch die einzelnen Kriterien von den Befragten angenommen wurden.

Tabelle 12 zeigt die Auswertung von „Beantwortung“ und „Nicht-Beantwortung“ über alle Fälle hinweg. Die Maximalzahl der Beantwortungen liegt bei theoretischen 230 Bewertungen pro Kriterium. Dies würde eintreten, wenn alle 115 Expertinnen und Experten jeweils beide Fälle einer Gruppe bearbeitet hätten. Einige ExpertInnen haben jedoch nur einen der beiden Fälle bewertet, wodurch nun insgesamt maximal 187 Bewertungen pro Kriterium vorliegen. Bei manchen Fällen wurden einzelne

Kriterien aus der Befragung herausgenommen, nämlich dann, wenn sie in der Konstellation nicht relevant waren.

Die Ausgangsthese bei der Bestimmung der Reihenfolge der Kriterien war, die Fragestellungen von einer geringeren Komplexität hin zur höheren Komplexität zu staffeln. Dies war der Hauptgrund für das Trennen der technischen und organisatorischen Komplexität von den eher abstrakt scheinenden Kriterien der Resilienz im Abschnitt „Versorgungssicherheit“. Grundsätzlich sehen wir die Annahme steigender Komplexität der Fragestellungen vom Anfang zum Ende aber bestätigt. In der Nutzung der „keine Antwort“-Option ist eine allgemeine Zunahme vom Anfang zum Ende des Fragebogens feststellbar. Dennoch ist die These nicht vollständig bestätigt worden. Die Mehrzahl der Resilienz-Kriterien zeigte teilweise geringere Ausfälle (meist unter 10 %) als einige Kriterien in den Abschnitten „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ und „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ (jeweils bis zu 15 % Nicht-Beantwortung). Nichtsdestoweniger, können die festgestellten Anteile der Nicht-Beantwortung von knapp unter 15 % als eher gering angesehen werden gemessen an der Komplexität und Unsicherheit der Fragestellung.

**Tabelle 12: Antwortverhalten der Expertinnen und Experten in Bezug auf die einzelnen Fragen**

**Leistungsfähigkeit/Funktionalität**

Kriterium	Fragestellung		Nichtbeantwortung	
	Anzahl	Anzahl	in Prozent	
Leistungsfähigkeit A	187	3	1,60	
Leistungsfähigkeit B	159	9	5,66	
techn. Komplexität A	187	3	1,60	
techn. Komplexität B	121	2	1,65	
org. Komplexität A	187	6	3,21	
org. Komplexität B	159	2	1,26	
<b>Durchschnitt</b>			<b>2,49</b>	

**Soziale und ökonomische Verträglichkeit**

Kriterium	Fragestellung		Nichtbeantwortung	
	Anzahl	Anzahl	in Prozent	
Folgeinvestitionen	187	8	4,28	
ökon. Konsequenzen A	187	22	11,76	
ökon. Konsequenzen B	187	28	14,97	
ökon. Tragfähigkeit A	107	15	14,02	
ökon. Tragfähigkeit B	187	25	13,37	
<b>Durchschnitt</b>			<b>11,68</b>	

### Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

Kriterium	Fragestellung		Nichtbeantwortung	
	Anzahl	Anzahl	in Prozent	
Primärenergiebedarf	187	12	6,42	
Endenergiebedarf	187	15	8,02	
Flächenbedarf	187	7	3,47	
Bodenveränderung	187	20	10,70	
Treibhausgase	187	24	12,83	
Umwelt- und gesundheits-schädliche Stoffe	187	23	12,30	
Lärmemissionen	187	22	11,76	
Rohstoffbedarf	187	28	14,97	
kritische Rohstoffe	187	23	12,30	
Abfallaufkommen	187	20	10,70	
Wasserbedarf	187	25	13,37	
<b>Durchschnitt</b>			<b>10,62</b>	

### Versorgungssicherheit

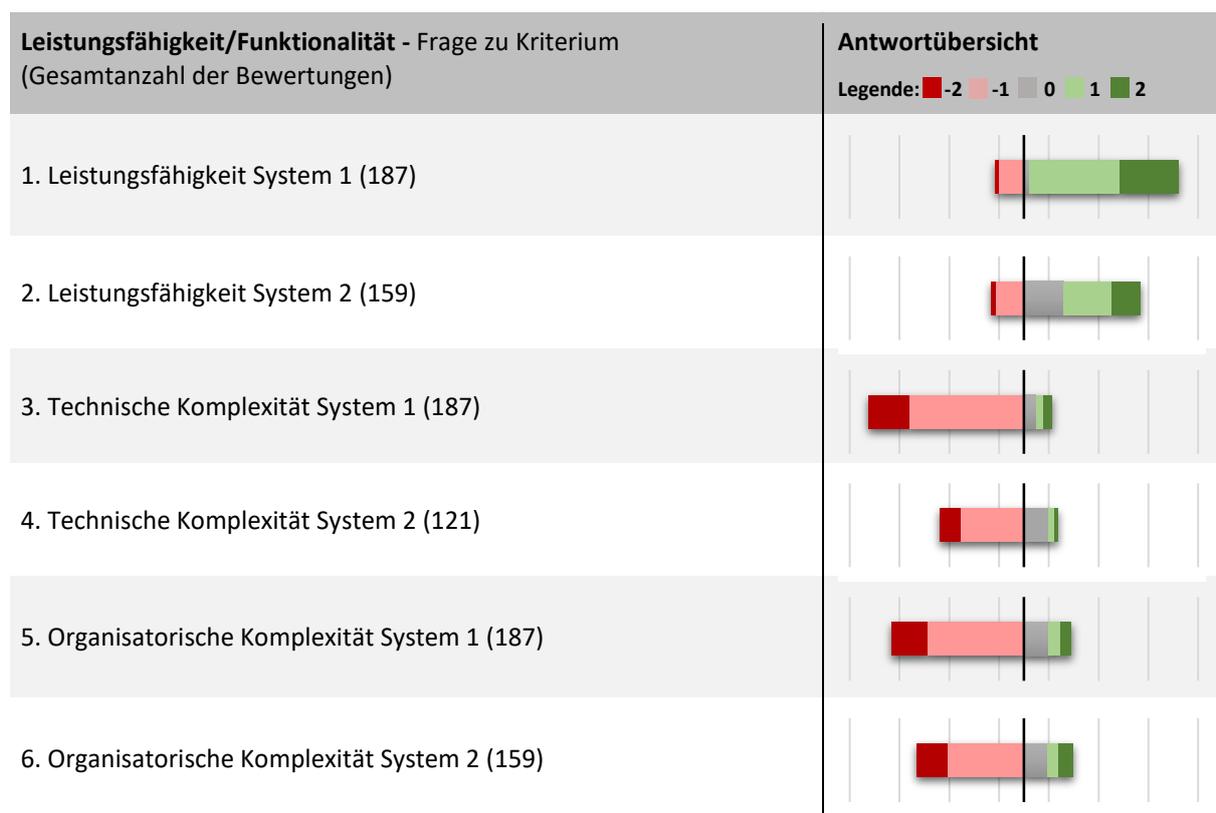
Kriterium	Fragestellung		Nichtbeantwortung	
	Anzahl	Anzahl	in Prozent	
Störungsanfälligkeit A	187	19	10,16	
Störungsanfälligkeit B	151	9	5,96	
Dependenz A	174	22	12,64	
Dependenz B	151	9	5,96	
Redundanz	187	7	3,74	
Modularität/Subsidiarität	174	14	8,05	
Puffervermögen	171	16	9,36	
Anpassungsfähigkeit	187	28	14,97	
Dauer Funktionswiederherstellung	187	28	14,97	
Kosten Funktionswiederherstellung	187	31	16,58	
<b>Durchschnitt</b>			<b>10,23</b>	

Ein weiterer Aspekt ist die Akzeptanz der offenen Fragestellungen, wie sie in der ersten Runde der Befragung angeboten worden sind. Die hatten zum Ziel, mehr über die Erwägungen zu den Bewertungen und mögliche einschränkende Rahmenbedingungen zu erfahren. Insgesamt konstatieren wir, dass die meisten beteiligten Expertinnen und Experten von der Möglichkeit Gebrauch gemacht haben, ihre Bewertungen in den offenen Feldern zu untersetzen (Tabelle 13) – obwohl dies zugleich zu einem höheren Bearbeitungsaufwand geführt hat. Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Einzelergebnissen zusammengefasst und systematisiert. Dies werten wir als einen weiteren Beleg dafür, dass die Befragung insgesamt gut durch die Expertinnen und Experten angenommen worden ist.

**Tabelle 13: Gegenüberstellung der Anzahl der Teilnahmen durch die Expertinnen und Experten an den gebundenen und offenen Fragestellungen**

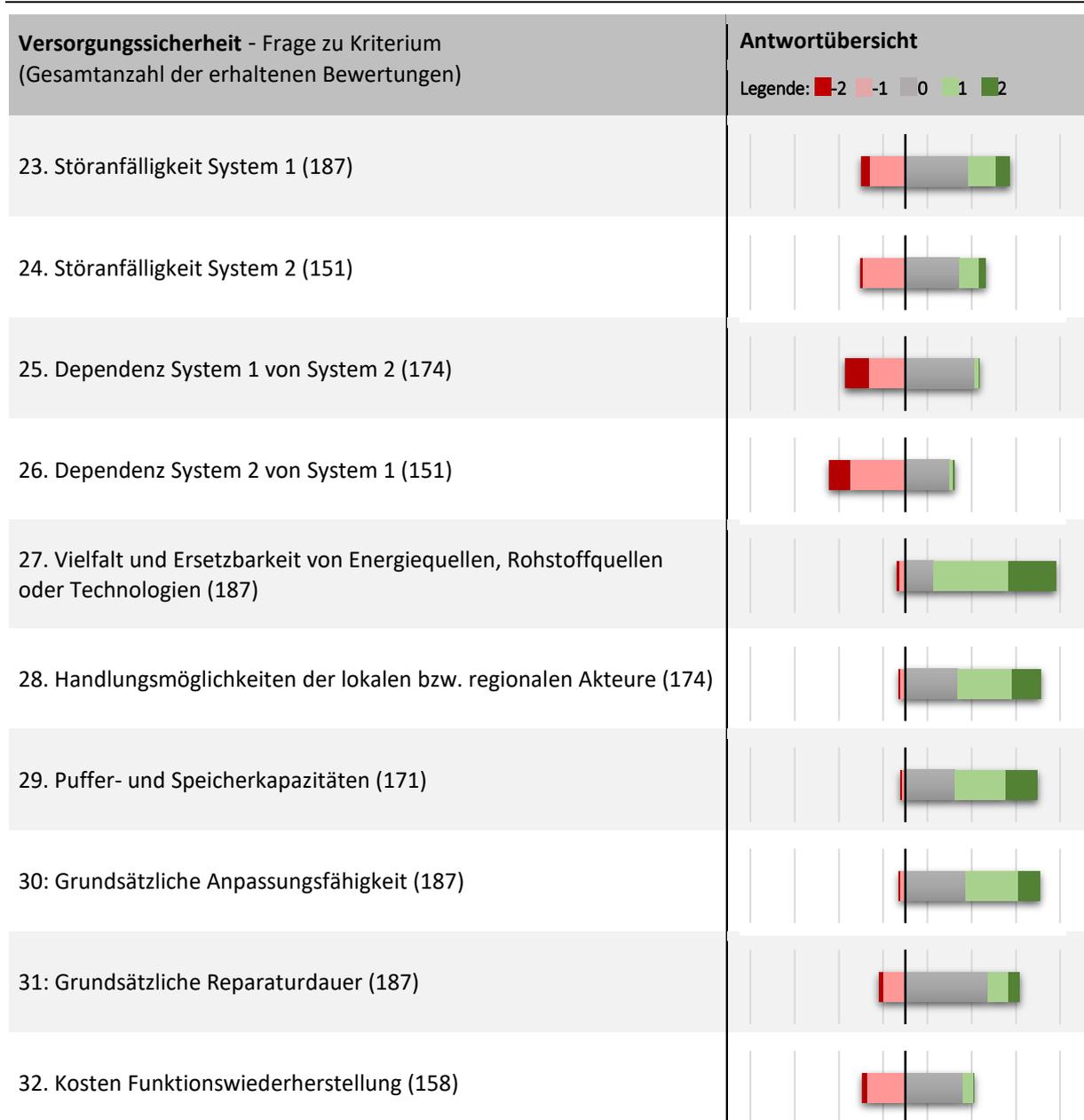
Gruppen	Fall 1		Fall 2	
	Teilnehmer Bewertungen	Teilnehmer offener Fragen	Teilnehmer Bewertungen	Teilnehmer offener Fragen
Gruppe 1	15	14	13	10
Gruppe 2	14	14	13	13
Gruppe 3	15	11	15	11
Gruppe 4	13	11	9	8
Gruppe 5	15	15	13	13
Gruppe 6	11	10	12	11
Gruppe 7	16	12	13	9

**Abbildung 17: Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Leistungsfähigkeit“**



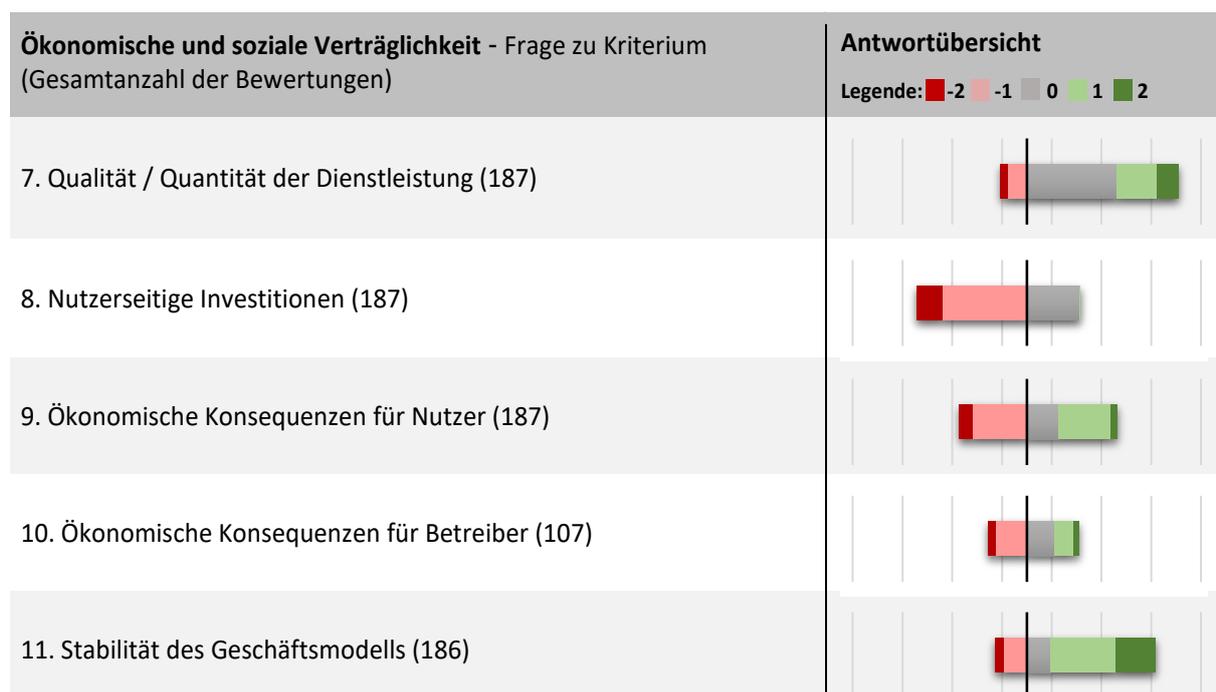
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 18: Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Versorgungssicherheit“**



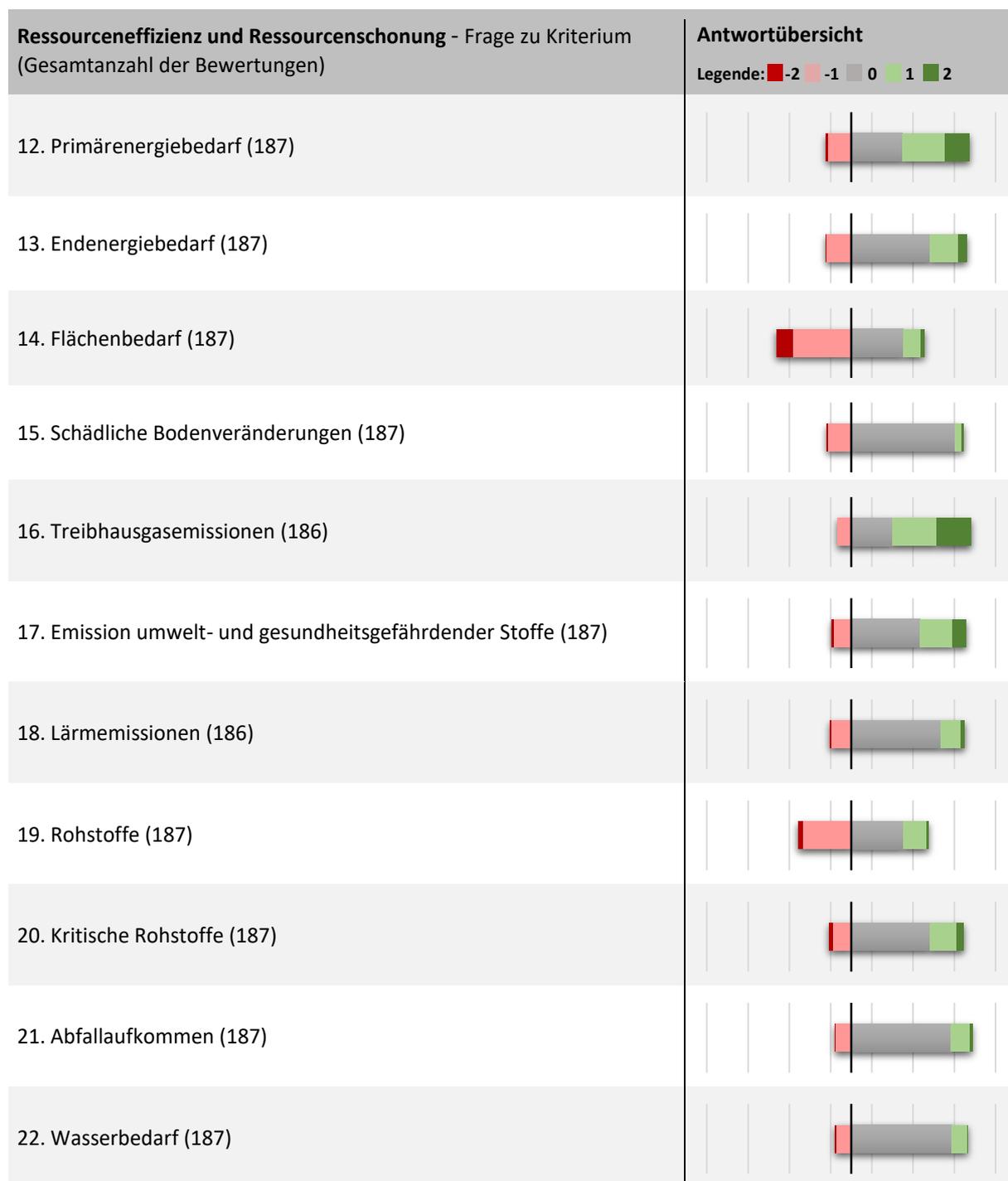
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 19: Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Ökonomische und soziale Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 20: Praktikabilität der Kriterien – Übersicht der Bewertung über alle Fälle, Teil „Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung“**



Quelle: eigene Darstellung

## 7.5 Durchführungsaufwand der Befragung

Grundsätzlich ist ein hoher Durchführungsaufwand der Expertenbefragung im Rahmen des Forschungsvorhabens festzustellen. Die Ursachen dafür liegen in einer Vielzahl von Faktoren begründet. In Tabelle 14 sind mögliche Ursachen diskutiert und einzelne Bearbeitungsschritte gegenübergestellt. Für eine mögliche Wiederholungsanwendung einer solchen Befragung ist jedoch festzustellen, dass nicht zwingend alle dieser Schritte wiederholt werden müssen, weshalb der Durchführungsaufwand reduziert werden kann. Sofern auf Vorarbeiten zurückgegriffen werden kann, ist eine rationale Anwendung in der Praxis ohne Verlust an Qualität in einem zeitlich überschaubaren Rahmen möglich.

**Tabelle 14: Gegenüberstellung des Aufwands der Bewertungsmethode für die Erstanwendung und bei einer möglichen Wiederholungsanwendung in der Praxis.**

Nr.	Erstanwendung im Rahmen von TRAFIS	mögliche Wiederholungsanwendung
1	Entwicklung einer grundsätzlichen Konzeption für das Vorgehen.	Nicht erforderlich.
2	Hoher Recherche- und Analyseaufwand für die Entwicklung eines spezifischen Nachhaltigkeitskonzepts und Ableitung anwendbarer Kriterien.	Nicht erforderlich.
3	Ausarbeitung eines Operationalisierungsrahmens für die Kriterien inklusive Pre-Tests und Tests in einem iterativen Prozess am Beispiel einzelner Fälle.	Operationalisierung in Anlehnung an erfolgreich praktizierte Anwendungen bei Beachtung der Hintergründe der ExpertInnen im Panel (Absichern der „richtigen“ Sprache).
4	Umsetzung des Online-Fragebogens einschl. Auswertungs-Tests.	Für größere oder anonyme Anwendungen hilfreich. Alternativ führen papier- oder tabellenbasierte Befragungen mithilfe geläufiger digitaler Formate (MS Excel, Word) ebenfalls zum Ergebnis.
5	Operationalisierung der Kriterien für thematisch sehr unterschiedlich gelagerte Fälle.	In Fragestellungen der Praxis dürfte die Betrachtung unterschiedlicher Fälle eher die Ausnahme darstellen. Die Anpassung an einen konkreten Fall sollte eine Begrenzung des Aufwands ermöglichen.
6	Recherche und Akquise potenzieller Expertinnen und Experten mit persönlicher Ansprache in einer großen thematischen Breite.	In der Praxis dürfte dieser Aufwand überschaubar sein, da gut auf vorhandene Netzwerke zurückgegriffen werden kann. Auch kann die Experten-Gruppe insgesamt kleiner ausfallen, als dies in unserer Testanwendung der Fall war. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die gezielte Auswahl der richtigen ExpertInnen wichtiger als deren Anzahl.
7	Begleitung der Befragung inkl. teilweise mehrerer Erinnerungen und zahlreichen persönlichen Interaktionen.	Befragungen im Umfeld konkreter Vorhaben bzw. im regionalen Kontext ist es einfacher, die erforderliche Verbindlichkeit aufzubauen. Die Durchführung der Befragung ist damit weniger aufwändig.
8	Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse.	Dieser Schritt bleibt fall- und fragestellungsspezifisch bedeutend. Er erfordert wie auch die Operationalisierung und die Expertenauswahl eine besondere Sorgfalt.

## 7.6 Anwendung des Delphi-basierten Nachhaltigkeitsbewertung in realen Fällen

Basierend auf den Erfahrungen der Anwendung des Bewertungsansatzes mit synthetischen Fällen wurde der Nachhaltigkeitscheck auch an zwei realen Praxisfällen im Rahmen der Aktionsforschung des TRAFIS-Vorhabens erprobt (Hirschnitz-Garbers et al. 2020):

- ▶ Fallbeispiel Rödental – Demand-Side-Management in der kommunalen Kläranlage
- ▶ Fall Stadtwerke Augsburg – Entwicklung und Umsetzung einer Mobilitäts-App zur Bündelung und besseren Zugänglichkeit der Mobilitätsangebote der Stadtwerke Augsburg

Das Bewertungskonzept wurde für diesen Teil – ähnlich wie für die anonyme Delphi-basierte Anwendung auf synthetische Fälle (Kapitel 4.4) – an die Fragestellungen der realen Fallbeispiele angepasst operationalisiert:

1. Klärung des betrachteten Einzelfalls und Auswahl der relevanten Kriterien. Dies erfordert ein genaues Verständnis des Einzelfalls, sodass aus dem Gesamtumfang der Kriterien des Nachhaltigkeitschecks diejenigen herausgefiltert werden können, die im Kontext des jeweiligen Fallbeispiels relevant sind. So wurde sichergestellt, dass die eingebunden Experten nicht mit Fragen konfrontiert wurden, die keinen erkennbaren Bezug zum Fall haben (z. B. Fragen nach dem Wasserverbrauch oder Lärmemissionen bei virtuellen Diensten im Verkehrssektor).
2. Fallspezifische Umsetzung der Kriterien in Fragestellungen. Der im vorgenannten 1. Schritt vorgenommenen Eingrenzung der Kriterien folgt dann in diesem 2. Schritt eine Anpassung in der Fragenformulierung, sodass die Fragen dann sowohl den im Rahmen der Aktionsforschung erarbeiteten Wissensstand zum Kopplungsfall widerspiegeln als auch von den Praxisakteuren aufgrund der konkreten Fallanwendung verstanden und bewertet werden können.
3. Auswahl geeigneter ExpertInnen und Experten unter Beachtung der Punkte: (1) fachliche Kompetenz für die Bewertung aller oder einzelner Aspekte und (2) Varietät der in einem mehr oder weniger komplexen sozio-technischen System betroffenen Perspektiven. Die Auswahl der geeigneten ExpertInnen wurde in enger Abstimmung mit den Praxisakteuren vorgenommen und umfasste in den beiden o.g. Praxisfällen Mitarbeitende aus verschiedenen Bereichen bzw. Ebenen der jeweiligen Stadtwerke. Im Fall Augsburg konnte entgegen der Planungen und Vorabstimmungen kurzfristig nur ein Experte teilnehmen.
4. Einführung in das Vorgehen, Durchführung der Bewertung in einem definierten Setting und Auswertung der Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Erprobung an realen Fällen führt zu drei Schlussfolgerungen, von denen die Dritte so nicht beabsichtigt oder erwartet worden ist, die Einsatzgebiete des Nachhaltigkeitschecks jedoch eher erweitert.

**Schlussfolgerung 1:** Die grundsätzliche Eignung des Bewertungskonzepts und der einzelnen Kriterien hat sich vollumfänglich bestätigt. Auch im Rahmen einer Anwendung im Kreis persönlich anwesender ExpertInnen und auf Basis eines auf Papier ausgedruckten Fragebogens wurde das Konzept der Bewertung, der Bezug auf eine bestimmte Kopplung sowie die einzelnen Kriterien in ihrer Operationalisierung von den beteiligten Expertinnen und Experten schnell und unkompliziert erfasst. Die Durchführung der Bewertung erfolgte in dem dafür avisierten zeitlichen Rahmen von weniger als 30 Minuten. Die Ergebnisse ließen sich mit einem dafür vorbereiteten Excel-basierten Tool leicht auswerten und visualisieren.

**Schlussfolgerung 2:** Bei der Anwendung des Nachhaltigkeitschecks im Fallbeispiel Augsburg wurde deutlich, dass insbesondere die Fragen nach potenziellen Auswirkungen der Infrastrukturkopplung

auf die technische Komplexität und den organisatorischen Aufwand (Dimension „Funktionalität der gekoppelten Infrastruktur“) sowie auf Endverbraucherpreise (Dimension „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“) in kurz- und langfristige Effekte unterschieden werden sollte. Diese Unterscheidung erschien zwar mit Blick auf die geplante Kopplung Mobilitätsapp von besonderer Bedeutung zu sein, da die geplante App kurzfristig Komplexität und Aufwand erhöhen, nach Etablierung aber langfristig zu deutlich geringerer Komplexität und Aufwänden führen dürfte. Nichtsdestotrotz sollte bei einer Weiterentwicklung des Nachhaltigkeitschecks insgesamt überprüft werden, ob eine Unterscheidung in mögliche zeitlich näher und weiter entfernt liegende Zeitpunkte nicht generell sinnvoll sein könnte. Denn dadurch könnten auch im Zeitverlauf eintretende bzw. erwartbare Änderungen berücksichtigt und z. B. hinsichtlich von Argumenten für weitere Kopplungsplanungen oder für Legitimationsbeschaffung der Kopplung genutzt werden.

**Schlussfolgerung 3:** Insbesondere die gemeinsame Diskussion und der Austausch zu möglichen, in ihrer Vielfalt ggf. z. T. nicht berücksichtigten potenziellen Wirkungen der Infrastruktorkopplung hat eine so nicht intendierte, jedoch hochgradig willkommene Wirkung entfaltet. Im Fallbeispiel Rödental hat sich gezeigt, dass das mit dem Nachhaltigkeitscheck angebotene Werkzeug von den beteiligten Personen als Mittel angenommen wurde, zwischen den unterschiedlichen und teils konfliktären Perspektiven der Beteiligten zu vermitteln. Dies wurde möglich, indem die von den beteiligten Personen subjektiv verschieden gewichteten Wirkungs-Aspekte im Nachhaltigkeitscheck ungewichtet nebeneinander gestellt sind. Der Nachhaltigkeitscheck wurde hierdurch überraschenderweise zu einem Kommunikations-erleichternden und auch gegenseitiges Verständnis erzeugenden Instrument, welches die durch Hierarchiestufen und Dominanz bestimmter Perspektiven vordefinierten Kommunikationsschranken abbauen half und eine Grundlage für eine Sachdiskussion schaffte.

Die Ergebnisse der Test-Anwendungen in realen Fällen sind nachfolgend zusammengefasst.

### 7.6.1 Fallbeispiel Rödental – Demand-Side-Management in der kommunalen Kläranlage

Der Nachhaltigkeitscheck wurde im November 2017 von der Geschäftsführung, von der technischen Leitung der Kläranlage sowie vom Klärmeister gemeinsam durchgeführt.

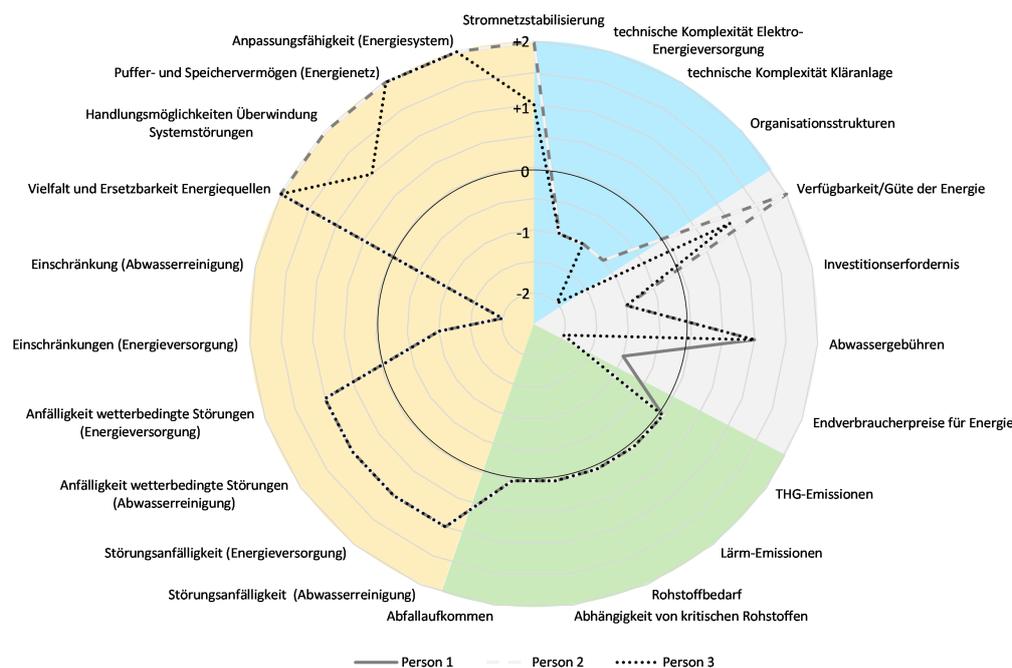
Gegenstand der Bewertung war der folgende Fall:

Bereitstellung negativer Regelleistung über Abschaltung der Mikrogasturbinen, Anfahren der Wärmepumpe oder ggf. Betrieb einer P2H-Anlage als Wärmequelle sowie Bereitstellung positiver Regelleistung über Vorhaltung der Mikrogasturbinen für die Stromerzeugung.

Ziel des Nachhaltigkeitschecks war es, insbesondere die ökonomischen, technischen und ökologischen **Potenziale** sowie die **Handhabbarkeit** eines Demand-Side-Managements in der Kläranlage Rödental abzuschätzen.

Die Zusammenstellung der Experten war besonders relevant, da mit der Geschäftsführung eine übergreifende, visionäre und auch Innovation vorantreibende Perspektive sowie mit der technischen Leitung der Kläranlage und dem Klärmeister insbesondere die Anlagensicherheit und die Sicherstellung der gesetzlich vorgeschriebenen Ablaufparameter eingebracht, gemeinsam diskutiert und gegenübergestellt werden konnten. In diesem Kontext wurde auch die besondere **kommunikationserleichternde und gemeinsames Verständnis schaffende Wirkung des Nachhaltigkeitschecks** deutlich (siehe Schlussfolgerung 3 oben).

Abbildung 21: Ergebnisgrafik – Nachhaltigkeitsprofil DSM Kläranlage Rödental



Quelle: eigene Darstellung

## Ergebnisse

Insgesamt wird deutlich, dass die Einschätzungen der drei beteiligten SWR-Experten nicht nur relativ nah beieinanderliegen, sondern auch in der Tendenz ob positive oder negative Bewertungen für jedes Kriterium übereinstimmen. Unterschiede treten damit ausschließlich in der Einschätzung von deutlich oder geringfügig positiv bzw. negativ Bewertungen auf.

Die Experten bewerteten die folgenden Fragen aus der Dimension „Funktionalität der gekoppelten Infrastruktur“ als geringfügig negativ:

- ▶ Verändert der Betrieb dezentraler Erzeuger in lokalen/regionalen virtuellen Kraftwerken die *technische Komplexität* der lokalen Elektro-Energieversorgung bzw. der Kläranlagen?
- ▶ Erfordert die Einbindung ihrer dezentralen Energieerzeuger in einem virtuellen Kraftwerk *komplexere Organisationsstrukturen* bzw. einen *höheren Organisationsaufwand* für die SWR? – Hier wird zusätzlicher Aufwand gesehen. Da dieser aber durch Glasfaserkabel-Verlegung für einen sicheren Internetanschluss konkret und gut umsetzbar ist (→ siehe aber den Punkt Investitionen unter der Bewertungsdimension „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ unten), wird der zusätzliche Aufwand als gering erachtet.

Die Frage, ob der Betrieb dezentraler Erzeuger in lokalen/regionalen virtuellen Kraftwerken geeignet wäre, einen signifikanten *Beitrag zur Stromnetzstabilisierung* zu leisten, erhielt deutlich positive Einschätzungen.

In der Bewertungsdimension „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ bewerteten die Experten

- ▶ die Frage, ob die Organisation dezentraler Energieerzeuger in virtuellen Kraftwerken Konsequenzen für die *lokale bzw. regionale Verfügbarkeit und Güte der Energie* (z. B. Spannungsstabilität

etc.) habe als deutlich positiv. Hier wurde angeführt, dass bei Etablierung eines vernetzten Systems zur Netzstabilisierung über ein virtuelles Kraftwerk systemstabilisierende Komponenten hinzukommen. Kleinteilig für die Kläranlage Rödental betrachtet könnte eine Beteiligung an der Stromnetzstabilisierung über ein virtuelles Kraftwerk für die Stabilisierung der Stromerfordernisse negativ sein, wenn Komponenten der Kläranlage extern gesteuert werden – aber großräumig betrachtet werden eher positive stromnetzstabilisierende Effekte gesehen.

- ▶ die Frage, ob die Beteiligung der Erzeugungsanlagen der Kläranlage an einem virtuellen Kraftwerk zusätzliche, nicht durch den klassischen Anlagenaufbau der Kläranlage abgedeckte Investitionen der SWR erfordere, als geringfügig negativ. Hier wurde insbesondere der Bedarf an einem sicheren Internet-Anschluss gesehen, der Investitionen für ein eigenes Glasfasernetz erfordert.
- ▶ die Frage, ob die Energieversorgung in einem virtuellen Kraftwerk Auswirkungen auf die *Abwassergebühr* haben könnte als geringfügig positiv, da die Hoffnung besteht, durch geringe Einnahmen aus der Regelennergiebeteiligung die Abwassergebühren ggf. leicht senken zu können.
- ▶ die Frage, ob die Energieversorgung in einem virtuellen Kraftwerk Auswirkungen auf die *Endverbraucherpreise* haben kann, als deutlich negativ, da die Energiewende insgesamt im Vergleich zu billigerer Kohleverstromung zu höheren Endverbraucherpreisen für Energie führen wird. Daher wird im Zusammenhang mit mehr dezentraler Energieerzeugung, die im Rahmen der Energiewende nötig ist und die eben auch die Beteiligung an einer Regelennergievermarktung umfasst, eine Preiserhöhung erwartet.

Mit Blick auf die Bewertungsdimension „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ sehen die Experten zu allen abgefragten Kriterien keine Veränderungen durch die Kopplung, die inhaltlich nicht weiter begründet wurde. Eine Ausnahme bildet die angenommene Nichtveränderung der Menge der *Emissionen von Treibhausgasen* (THG) am Standort der Kläranlage, da

- ▶ das aus den Klärprozessen produzierte Gas verstromt und nicht verbrannt wird, sodass keine zusätzlichen THG-Emissionen resultieren.
- ▶ das neue Notstromaggregat zwar über einen Heizölanschluss für die Testfahrten mit Energie versorgt, aber Testfahrten insgesamt weniger werden, sodass keine Veränderungen in den THG-Emissionen gesehen werden.

Die Bewertungsdimension „Versorgungssicherheit im Kontext wetterbedingter Störungen“ weist die größte Anzahl an Bewertungskriterien auf. Die Experten bewerteten diese Kriterien wie folgt:

- ▶ geringfügig positive Auswirkungen des Betriebs der lokalen Stromerzeugungsanlagen in virtuellen Kraftwerken auf die Störungsanfälligkeit
  - a. der Abwasserreinigung, da durch Beteiligung an virtuellem Kraftwerk auch Energie erzeugt wird und entsprechend das Energieversorgungsnetz für die Kläranlage stabiler wird. Daher wird ein positiver Einfluss im Sinne einer *Reduktion der Störungsanfälligkeit der Abwasserreinigung* gesehen.

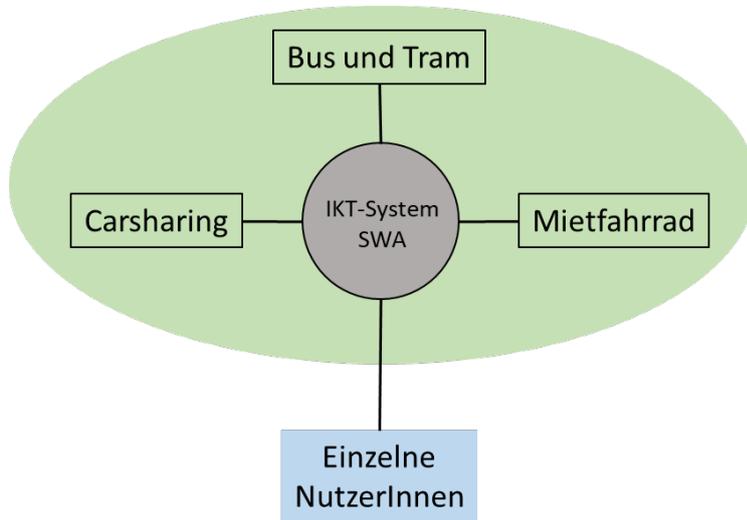
- b. der Stromerzeugungsanlagen in virtuellen Kraftwerken, da der Einfluss auf die *Störungsanfälligkeit der lokalen bzw. regionalen Energieversorgung* generell aus den vorgenannten Gründen resultiert.
- ▶ geringfügig positive Auswirkungen der Organisation der Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken haben Einfluss auf die *Störungsanfälligkeit*
  - a. der *Abwasserreinigung* in Bezug auf wetterbedingte Störungen (wie Hitze, Starkregen, Hagel, Überflutung, Wind), da die Regelungsbedürfnisse der Kläranlage bei wetterbedingten Störungen Vorrang vor Steuerung über den Übertragungsnetzbetreiber haben (keine virtuell gesteuerte Abschaltungen für solche Fälle), sodass sich die Störungsanfälligkeit verringern würde.
  - b. der *Energieversorgung* in Bezug auf wetterbedingte Störungen (wie Hitze, Starkregen, Hagel, Überflutung, Wind), da durch mehr dezentrale Energieerzeugung auch eine Risikostreuung der Anfälligkeit der Anlagen gegenüber wetterbedingten Störungen erfolgt.
- ▶ geringfügig negative Auswirkungen bei zentraler Steuerung eines virtuellen Kraftwerks auf die *lokale bzw. regionale Energieversorgung*, da ein (Funktions-)Ausfall der zentralen Steuerung zugleich zu Einschränkungen in der lokalen bzw. regionalen Energieversorgung führen könnte.
- ▶ deutlich negative Auswirkungen bei zentraler Steuerung eines virtuellen Kraftwerks auf die *Abwasserreinigung* in der Kläranlage führen könnte, da ein (Funktions-)Ausfall der zentralen Steuerung u.U. zu einer Abschaltung relevanter Maschinen in der Kläranlage, die im Regelenergiemarkt beteiligt sind, führen könnte.
- ▶ deutlich positive Auswirkungen der Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken mit Blick auf eine *größere Vielfalt und Ersetzbarkeit von Energiequellen (Redundanz)*, wodurch eine verbesserte Versorgungssicherheit vor Ort und damit erhöhte Sicherheit erreicht werden kann.
- ▶ deutlich positive Auswirkungen einer Beteiligung an virtuellen Kraftwerken, da diese die *lokalen Handlungsmöglichkeiten (Modularität)* erhöht, mögliche Systemstörungen bei den Anlagen lokal zu überwinden. Hier wird im Gegensatz zur rein zentralisierten Energieversorgung mehr Handlungsfreiheit für Eigenversorgung erwartet.
- ▶ deutlich positive Auswirkungen der Energieversorgung durch virtuelle Kraftwerke auf das *Puffer- und Speichervermögen* in lokalen Energienetzen, welche durch mehrere dezentrale Beiträge verbessert wird und damit mögliche wetterbedingte Störungen (z. B. Unterbrechung überregionaler Energieversorgung) besser ausgleichen kann.
- ▶ deutlich positive Auswirkungen der Energieversorgung durch virtuelle Kraftwerke auf die grundsätzliche *Anpassungsfähigkeit* des lokalen bzw. regionalen Energiesystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme.
- ▶ deutlich positive Auswirkungen der Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken in Hinblick auf eine *verkürzte Dauer möglicher Reparaturen bzw. Behebung von Funktionsstörungen* nach Störungen des Kläranlagenbetriebs durch Wetterextreme, da durch die dezentralen Energieerzeuger potenziell schneller Energieversorgung für Reparaturen bereitstehen könnte.

### 7.6.2 Fallbeispiel Stadtwerke Augsburg – Mobilitätsapp

Der Nachhaltigkeitscheck wurde im Fallbeispiel Augsburg im Februar 2019 mit einem Experten der Stadtwerke Augsburg (Verkehrsgesellschaft, Vertrieb und Marketing) durchgeführt.

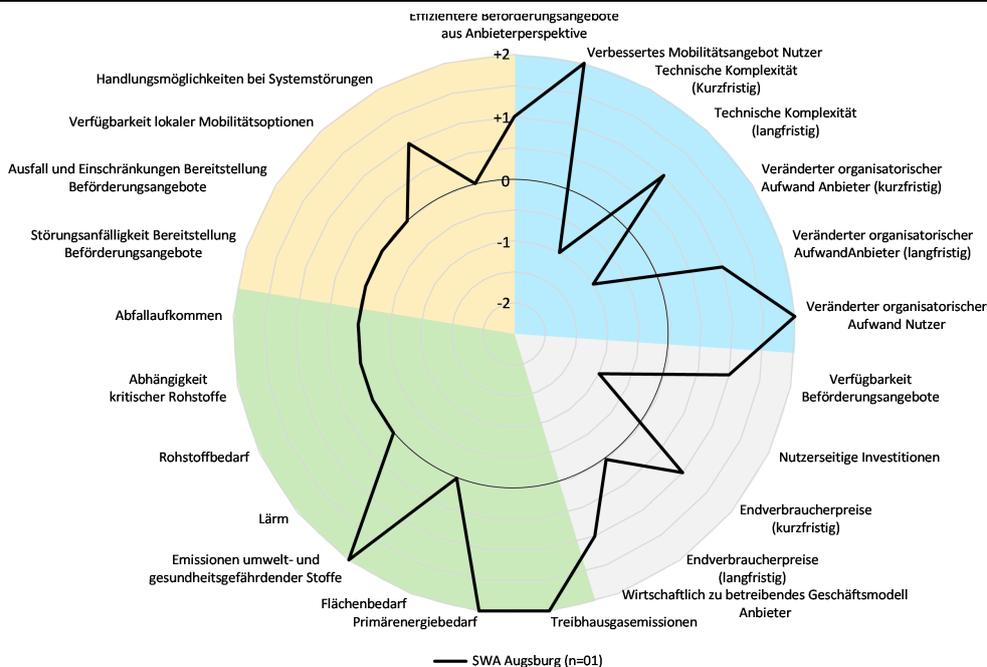
Gegenstand der Bewertung war die in Planung befindliche Mobilitätsapp und die potenzielle Nachhaltigkeitswirkungen der Vernetzung der bisher separat angebotenen Mobilitätsdienste.

**Abbildung 22 Inner-sektorale Kopplung im Systems der Mobility-APP der SWA Augsburg**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 23: Ergebnisgrafik – Nachhaltigkeitsprofil swa Augsburg**



Quelle: eigene Darstellung

## Ergebnisse

Insgesamt wird deutlich, dass die Verknüpfung der Mobilitätsangebote mithilfe der Mobilitätsapp ganz überwiegend geringfügig bis deutlich positive Bewertungen mit Blick auf die unterschiedlichen Kriterien erhält. Als Besonderheit kommt hinzu, dass der bewertende swa-Mitarbeiter den Bedarf sah, in der Bewertung dreier Kriterien zwischen kurz- und langfristigen Effekten zu unterscheiden, da sich aus den zeitlichen Perspektiven unterschiedliche Bewertungen ergeben. Darauf wird in den folgenden textlichen Ausführungen zur Beschreibung der Ergebnisse eingegangen.

Der Experte bewertete die Kriterien der Dimension „Funktionalität der gekoppelten Infrastruktur“ als überwiegend geringfügig bis deutlich positiv. Dabei war es ihm wichtig, für die folgenden zwei Kriterien in der Bewertung zwischen kurz- und langfristigen Effekten zu unterscheiden:

- ▶ *technische Komplexität* im swa-Mobilitätsangebot durch die App: kurzfristig wird die technische Komplexität in der Wahrnehmung des Experten erhöht, aber langfristig durch die Umsetzung der App reduziert, sodass sich kurzfristig geringfügig negative und langfristig geringfügig positive Effekte ergeben dürften.
- ▶ *organisatorischer Aufwand* für den Anbieter: auch hier wird davon ausgegangen, dass der organisatorische Aufwand für die App-Etablierung und –Bereitstellung kurzfristig erhöht (geringfügig negative Bewertung) würde, langfristig aber aufgrund der dann bestehenden IKT-Verknüpfungen organisatorische Erleichterungen auf Anbieterseite (geringfügig positive Bewertung) eintreten dürften.

Die Beförderungsangebote könnten durch die Mobilitätsapp im Sinne einer Datengewinnung und eines trackings von Nutzendenverhalten für die swa effizienter gestaltbar sein, was zu einer geringfügig positiven Bewertung durch den Experten führte. Deutlich positiv bewertete er die *Verbesserung des Mobilitätsangebotes für die Nutzenden* durch die Mobilitätsapp, da darüber multi- und intermodal die verschiedenen Mobilitätsangebote in Kombination angeboten und auch leichter genutzt werden können.

Ebenfalls deutlich positive Effekte sah der Experte mit Blick auf den *organisatorischen Aufwand* für die Nutzenden, da hier insbesondere die in Testphase befindlichen be-in/be-out Systeme, bei denen Nutzende kein Ticket mehr kaufen, sondern dieses online auf ihren mobilen Endgeräten haben und es bei Betreten/Verlassen des Mobilitätsangebots automatisch erfasst wird – ohne der/m Fahrer/in ein Ticket vorzeigen zu müssen.

In der Bewertungsdimension „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“ bewertete der Experte

- ▶ ... mögliche Konsequenzen der Mobilitätsapp für die *Verfügbarkeit von Beförderungsangeboten* geringfügig positiv, da die Beförderungsangebote in ihrer Verfügbarkeit besser sichtbar und über eine automatisierte Best-Price Buchung auch ökonomisch attraktiver wären.
- ▶ ... die Frage danach, ob die Nutzung der Mobilitätsapp und der darin vermittelten Beförderungsangebote *nutzerseitige Investitionen* erfordert, geringfügig negativ, da nach Rückmeldungen an die swa ältere Menschen für Vergünstigung des Angebots der Streifenkarte bei online-Nutzung im Vergleich zu analoger Nutzung schon Smartphones gekauft haben, also Investitionen getätigt haben. Da dafür jedoch keine High-end Geräte erforderlich sind, erscheint der Effekt lediglich geringfügig negativ.

- ▶ ... mögliche Auswirkungen der Einführung und des Betriebs der Mobilitätsapp auf die *Endverbraucherpreise* als kurzfristig geringfügig positiv mit Blick auf Rabatte bei der online-Nutzung der Streifenkarte durch App-Nutzung, während er langfristig keine Änderungen durch die Mobilitätsapp sah.
- ▶ ... das Potenzial der Mobilitätsapp ein *wirtschaftlich zu betreibendes Mobilitäts-Geschäftsmodell* für die swa zu etablieren als geringfügig positiv vor dem Hintergrund, dass die demographische Entwicklung in Augsburg, z. B. durch Zuzug aus München, da dort das Wohnen zu teuer wird, positiv ist. Dadurch steht potenziell mehr Kundschaft zur Verfügung, die gerade durch eine gesteigerte Attraktivität und vereinfachte Nutzbarkeit der swa-Mobilitätsangebote dank der/über die App gewonnen werden sollen und darüber ein wirtschaftlich zu betreibendes Geschäftsmodell ermöglichen helfen dürfte.

Mit Blick auf die Bewertungsdimension „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ sah der Experte aufgrund der angestrebten und erwarteten Effekts, dass durch die Mobilitätsapp mehr Leute vom Auto auf ÖPNV (der sowohl elektrisch – Trams – als auch mit Erdgas – Busse – betrieben wird), Elektro-Carsharing und Fahrräder umsteigen, deutlich positive Effekte auf

- ▶ den *Primärenergiebedarf* der durch die Nutzer realisierten Mobilität,
- ▶ die Menge der mobilitätsbedingten *Emissionen von Treibhausgasen*,
- ▶ die *Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe* (z. B. Feinstäube, ...)

sowie keine Veränderungen im Hinblick auf

- ▶ den *Flächenbedarf*,
- ▶ die *Emissionen von Lärm*,
- ▶ den *Bedarf an Rohstoffen*,
- ▶ die *Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen* (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit) und
- ▶ das *Abfallaufkommen*

in Verbindung mit Bereitstellung und Betrieb der Beförderungsangebote.

Das Thema Elektromobilität war zwar ein potenzielles Thema im Hinblick auf die Abhängigkeit von und Bedarf an auch kritischen Rohstoffen sowie im Hinblick auf etwas reduzierte Lärmemissionen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren, aber die Mobilitätsapp wurde nicht als signifikant für deren Weiterentwicklung und damit nicht als Faktor in der Veränderung der vorgenannten Kriterien gesehen.

Die Kriterien der Bewertungsdimension „Versorgungssicherheit im Kontext wetterbedingter Störungen“ wurden vom Experten als überwiegend keine Veränderungen aufweisend bewertet. Einzig im Hinblick auf die Verfügbarkeit von lokalen Mobilitätsoptionen für den Nutzer sah er einen geringfügig positiven Effekt aufgrund der Korrelation zwischen der Anzahl der Nutzenden, die durch die Mobilitätsapp steigen soll und dürfte, und dem Angebot, was bei mehr Nutzenden entsprechend ausgebaut werden müsste (Taktung, Strecken ...).

## III Ergebnisse aus den Fällen

Kapitel	Fall Nr. und Kurzbezeichnung
8.1	Fall 1.1 Zentrale Wärme- und Abwärmegewinnung aus Abwasser
8.2	Fall 1.2 Dezentrale Wärmegewinnung in Abwassernetzen
8.3	Fall 2.1 Industrie- und Gewerbe-Abwärme in Wärmenetzen
8.4	Fall 2.2 Einspeisung solarthermischer Energieerzeugung in Wärmenetzen
8.5	Fall 3.1 Steuerung hybrider Energie-Netze im lokalen/regionalen Maßstab
8.6	Fall 3.2 Virtuelle Kraftwerke - Schwarmgesteuerter Betrieb von Erzeugungsanlagen zur Stromlastregulierung
8.7	Fall 4.1 Stromnetzstabilisierung durch Einbindung Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge
8.8	Fall 4.2 Induktions-basiertes Laden von Fahrzeugen in Bereichen des fließenden Verkehrs (z. B. Straßenkreuzungen)
8.9	Fall 5.1 Power to Heat (PtH) - Speicherung von Überschussstrom in Wärmenetzen
8.10	Fall 5.2 Power to Liquid (PtL) – Elektrolyse von regenerativem Strom in Wasserstoff
8.11	Fall 6.1 App-basiertes Management virtueller Fuhrparks (Zusammenschluss privater Fahrzeuge zum Carsharing-Modell)
8.12	Fall 6.2 App-gestütztes Fuhrpark-Management im free-floating Carsharing
8.13	Fall 7.1 Intelligente Niederschlagswasserbewirtschaftung
8.14	Fall 7.2 Kontrollierter Überstau-Management von Überlastungssituationen im Kanalnetz in Kombination mit Multifunktions-Freiflächen im urbanen Raum

## 8 Ergebnisse aus den Einzelfällen

Dieses Kapitel stellt die Detailergebnisse der Befragung zu den 14 ausgewählten Fällen dar. Die zentralen Inhalte der Ergebnisdarstellung gliedern sich wie folgt:

1. Beschreibung des synthetischen Falles
2. Zusammensetzung des bewertenden Experten-Panels (anonym)
3. Desaggregierte Bewertungsergebnisse in gestapelten Balkendiagrammen
4. Teil-Aggregierte Nachhaltigkeitsprofile im Spinnendiagramm
5. Hinweise zu möglichen Potenzialen und Hemmnissen, sortiert nach technischen, institutionellen/organisatorischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Aspekten.

### Lesehilfe

Die gestapelten Balkendiagramme geben die Verteilung der Bewertungen wieder. Die Anzahl der Wertungen zu einem Kriterium entspricht der Anzahl der erhaltenen Bewertungen aus einem festgelegten Experten-Panel. Nicht alle Beteiligten haben zu jedem Kriterium eine Wertung abgegeben. Es gab zu jedem Kriterium die Möglichkeit, sich der Wertung zu enthalten („Keine Angabe“-Option).

Die gestapelten Balkendiagramme enthalten zusätzliche Information in Form von Pfeilen. Diese zeigen die Veränderung der Bewertung von Runde 1 zu Runde 2. Das Ziel der zweifachen Befragung des gleichen Experten-Panels ist es, mögliche Abpassungen der Bewertung eines unsicheren Sachverhalts im Zuge der Beschäftigung damit zu berücksichtigen. Die Pfeile sind folgendermaßen zu lesen:

6. Die Pfeile indizieren schematisch die Richtung der eingetretenen Veränderung und den Ausgangspunkt der Änderung.
7. Die Pfeile indizieren nicht eine Häufigkeit der Veränderung – diese blieb in den meisten Fällen auf nur sehr wenige Änderungen beschränkt.
8. Der Anfang des Pfeils zeigt an, wo die Änderungen ihren Ursprung nahmen. Die Stärke der Änderung lässt sich daraus nicht ablesen.
9. Insgesamt werden drei Arten von Änderungen dargestellt:
  - Veränderung zum positiven, ← Veränderung zum Negativen
  - ↓ Rückzug einer Wertung (nach Wertung in Runde 1, „keine Angabe“ in Runde 2)
  - ↑ Zusätzliche Wertung (nach „keine Angabe“ in Runde 1, Angebot einer Wertung in Runde 2)

Die zusammenfassende Darstellung von Kriterien sowie die Spinnennetzdiagramme unterscheiden die eingesetzten Kriterien in einem **Farbschema**. Die **verwandten Farben symbolisieren die** der Bewertung zugrundeliegenden vier Nachhaltigkeits-Dimensionen:

**Abc** (blau) Leistungsfähigkeit/Funktionalität

**Abc** (grau) Soziale und ökonomische Verträglichkeit

**Abc** (grün) Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz

**Abc** (orange) Versorgungssicherheit

### Hinweise zu Potenzialen und Hemmnissen

(\*) Sofern von unterschiedlichen Befragten identische Hinweise gegeben wurden, wurden diese zusammengefasst. Die entsprechenden Aussagen mit einem Stern (\*) versehen und es ist die Anzahl der hinter der Aussage stehenden ExpertInnen angegeben.

## 8.1 Fall 1.1 Zentrale Wärme- und Abwärmegewinnung aus Abwasser

**Fallbeschreibung:** Zentrale Energiegewinnung aus Abwasser in kommunalen Kläranlagen. Nutzung von Faulgasen zur Erzeugung von Strom und Wärme für den Eigenbedarf (Faulprozesse, Pumpen). Betrieb von Wärmepumpen zur weiteren Abwärmenutzung (z. B. am Auslauf der Kläranlage). Einspeisung von Wärme in ein bestehendes (Nah-)Wärmenetz.

**Tabelle 15: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 1.1	3	4	5	3	15

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Die wesentlichen Stärken/Potenziale der zentralen Wärme- und Abwärmegewinnung liegen in der Senkung der *Ressourceninanspruchnahme* (v. a. Primärenergiebedarf, Treibhausgasemissionen, kritische Rohstoffe). Die übrigen Auswirkungen auf Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz werden durchweg neutral bis leicht positiv bewertet (Endenergiebedarf, umwelt-/gesundheitsgefährdende Stoffe, Abfallaufkommen und Wasserbedarf).

Darüber hinaus wird dieser Lösung eine geringfügig gesteigerte *Leistungsfähigkeit* beigemessen, zur Versorgung der lokalen Wärmenetze beizutragen. Die Einschränkung resultiert maßgeblich aus der räumlichen Distanz zwischen potenziellen Nutzern und einem hohen Energieeigenbedarf der Kläranlagen. Insbesondere für Kriterien der *Versorgungssicherheit*, wie Redundanz, Modularität und Subsidiarität, werden neutrale bis deutlich positive Auswirkungen erwartet. Größtenteils neutral bis leicht positiv werden die Auswirkungen für die soziale und ökonomische Verträglichkeit (Qualität, Kosten, Wirtschaftlichkeit) eingeschätzt.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Entwicklung und Konfiguration der Anlagen (z. B. Ausbau von Speicheroptionen); Möglichkeit der energetischen Verwertung des Klärschlammes; Priorität der Energieversorgung der Kläranlage; Nutzung der Überschussenergie auch in Kältenetzen

#### Herausforderungen und Risiken

Die überwiegenden Stärken bzw. Potenziale der Kopplung stehen im Kontext einzelner Herausforderungen, die im Zuge von Umsetzung und Betrieb beachtet bzw. gelöst werden sollten. Diese sind insbesondere die *steigende technische und organisatorische Komplexität* im sozio-technischen Infrastruktursystem und der leicht erhöhte Flächen- und Rohstoffbedarf. Ebenso werden geringfügige nutzerseitige Investitionen erwartet, z. B. zur Anpassung der erforderlichen Temperaturniveaus in den Heizungssystemen angeschlossener Wohn- und Gewerbegebäude.

Korrespondierend mit den erwarteten höheren technischen und organisatorischen Komplexitäten wird eine erhöhte Störungsanfälligkeit der beteiligten technischen Systeme sowie die gegenseitige Abhängigkeit der gekoppelten Teilsysteme negativ bewertet. Die gegenseitige Abhängigkeit ist insbesondere für den Fall einer nicht ausreichenden Bivalenz der Energieversorgung im Wärmenetz relevant.

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

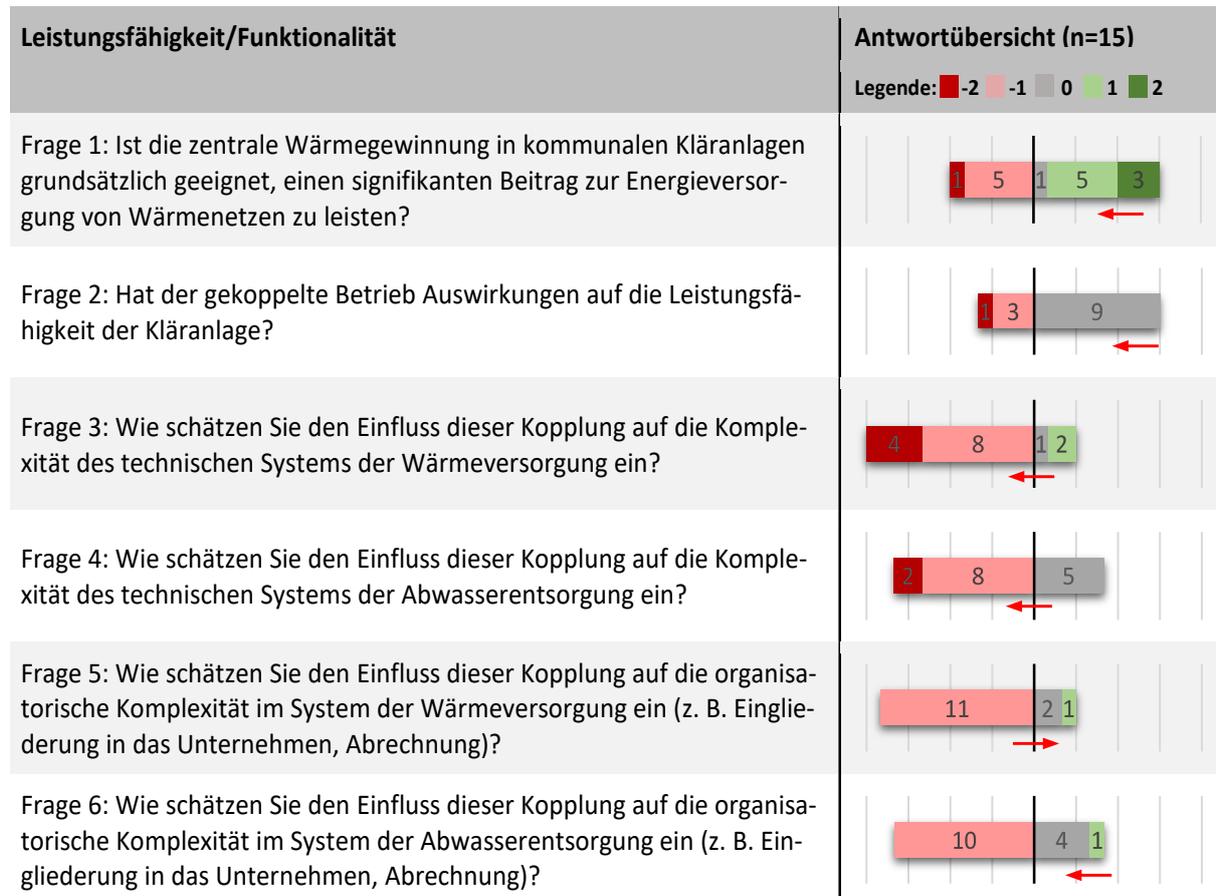
- (technisch) Erforderliche Bivalenz der Energieversorgung; fehlender Wärmeüberschuss der Kläranlage in der Heizperiode; erforderliche Mindestgröße der Kläranlage; Nähe zu potenziellen Verbrauchern erforderlich.
- (institutionell/organisatorisch) Anpassung der Aufgaben/Statute der Abwasserbetriebe; ermöglichen neuer Betriebsformen und Kooperationen; Klären von Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Eigentumsverhältnissen in den Betrieben (Wem gehört die Wärme?); Anpassungen in öffentlichen Verwaltungen u. v. m.
- (regulatorisch) Beseitigen von Unklarheiten; Schaffen eines geeigneten rechtlichen Rahmens in Bezug auf das Abwasser als Ressource; die Aufgaben von z. B. Abwasserbetrieben und deren Investitionsmöglichkeiten (z. B. Vorsteuerabzug) bedürfen einer Anpassung.

**Tabelle 16: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 1.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>Redundanz</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Rohstoffbedarf</li> <li>Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>Puffer- und Speichervermögen</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>
<b>0 (kein Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>Ökonomische Konsequenzen für die Nutzer</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>Schädliche Bodenveränderungen</li> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Wasserbedarf</li> <li>Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 2)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

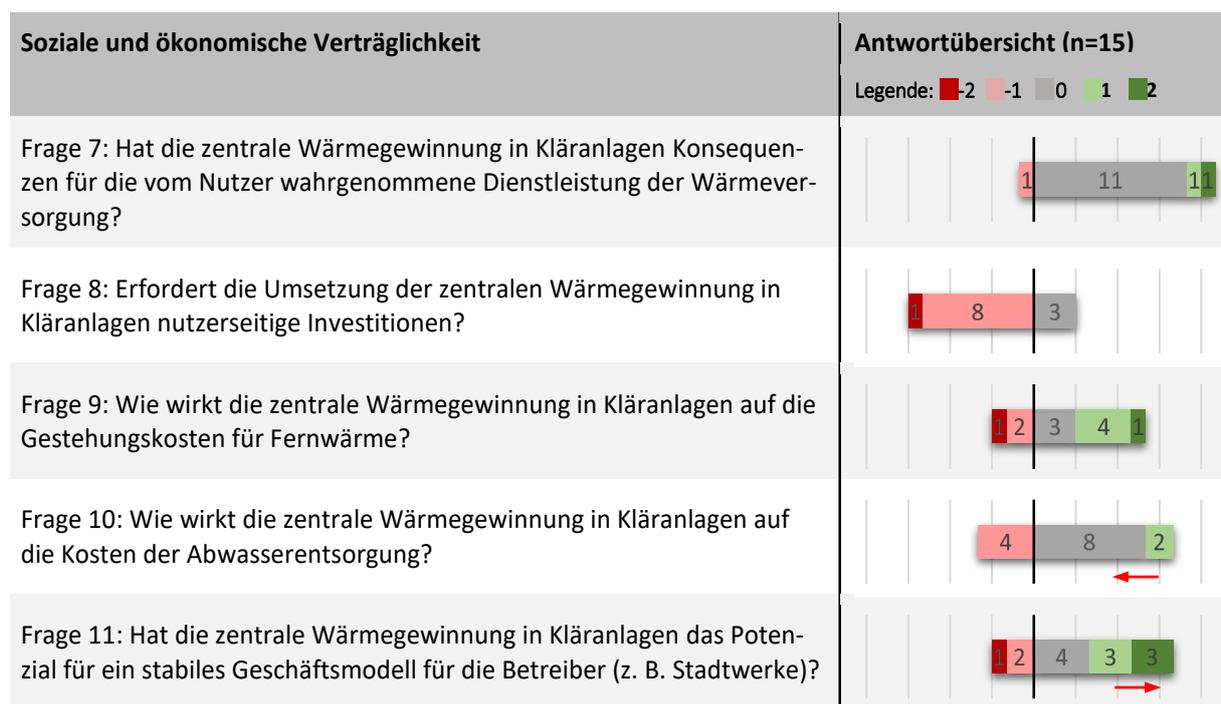
### 8.1.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 24: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Leistungsfähigkeit“



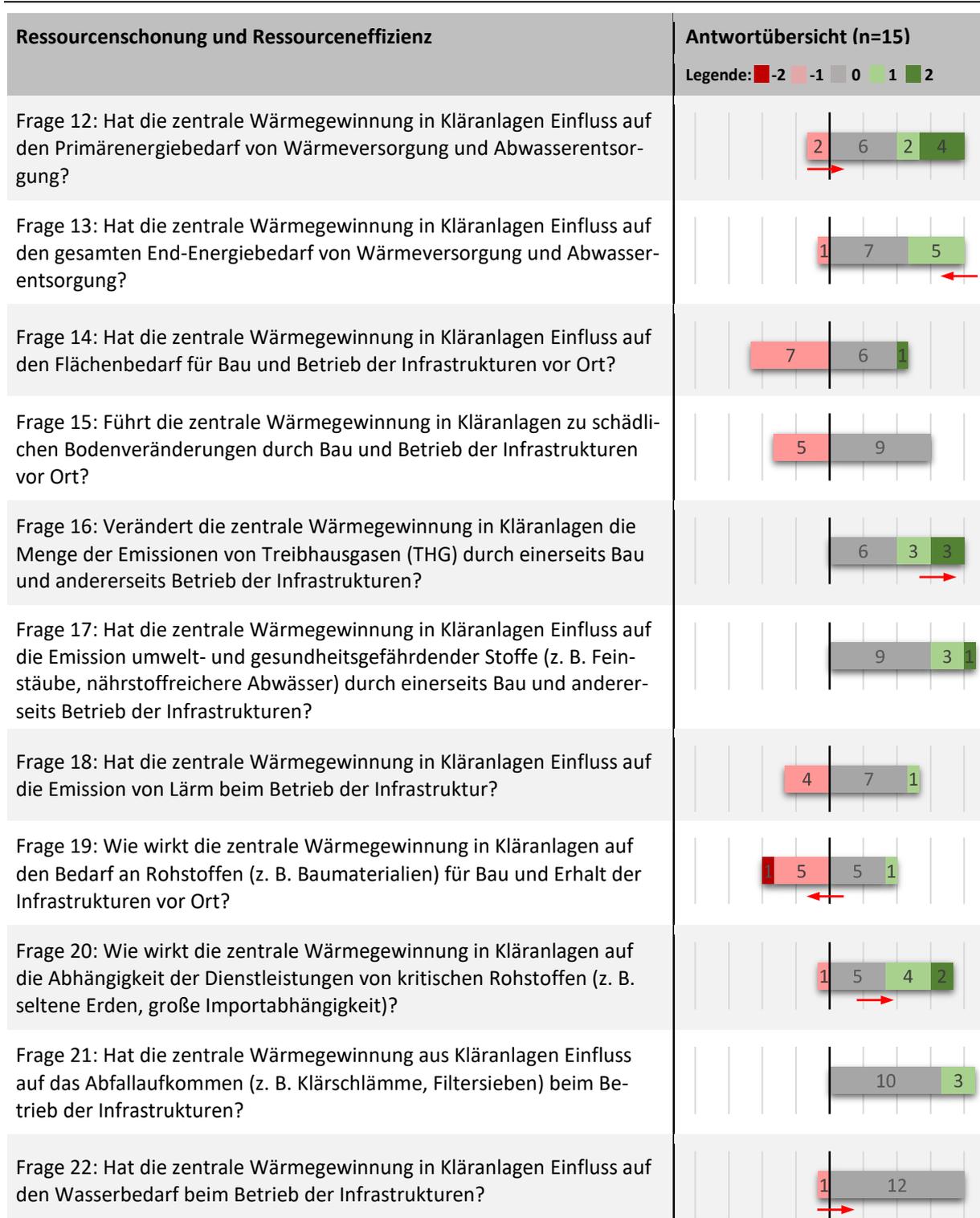
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 25: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



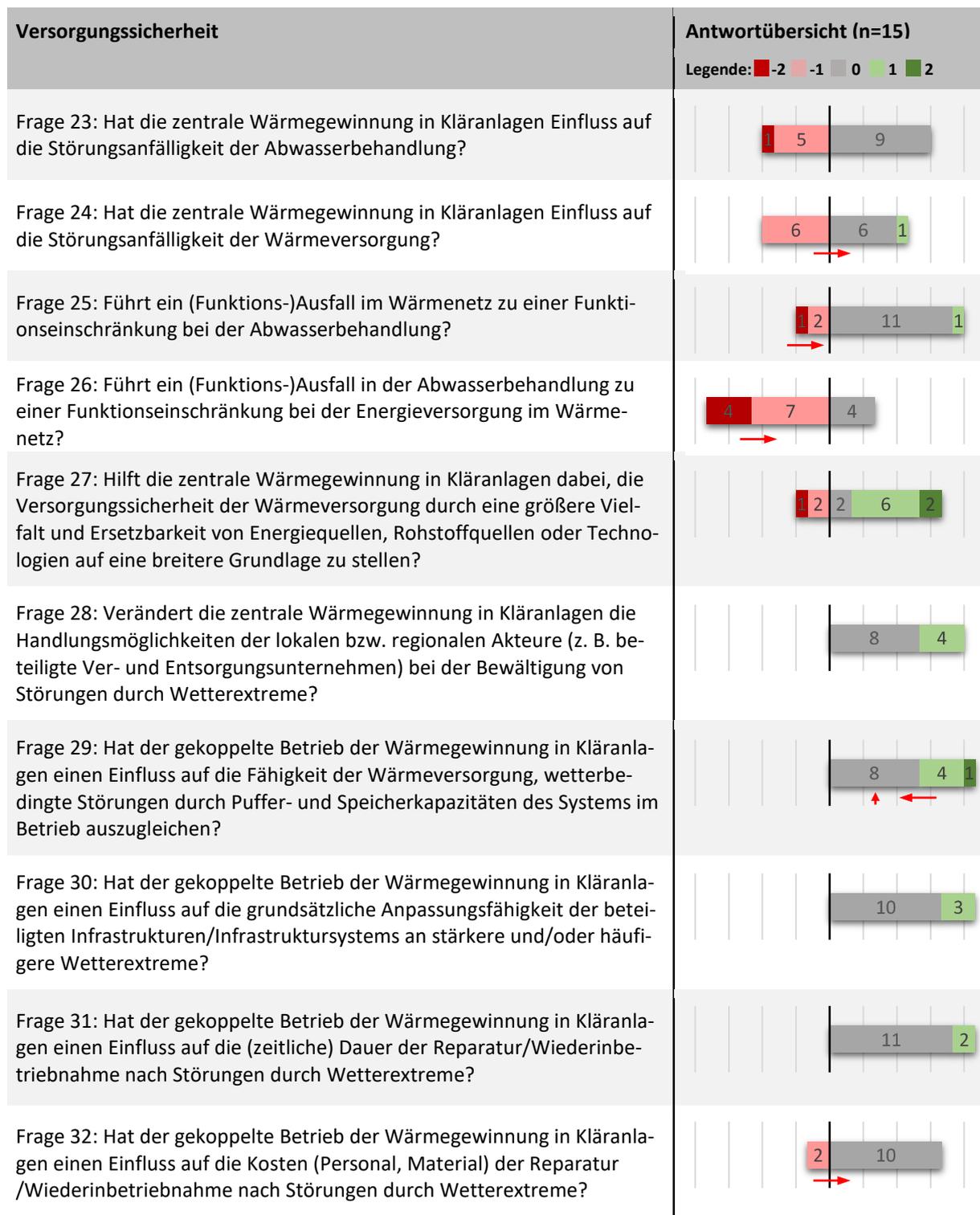
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 26: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**



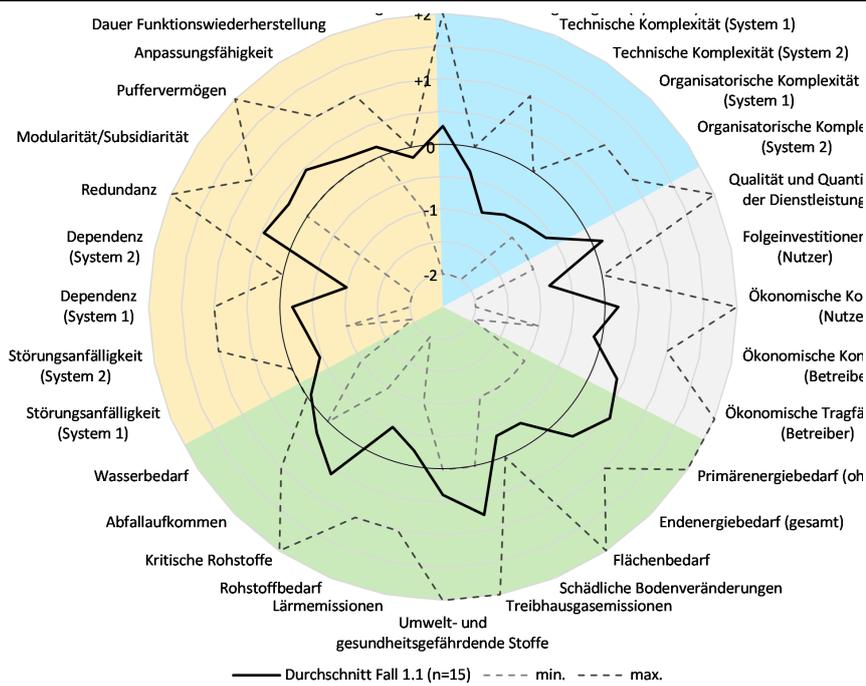
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 27: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.1, Teil „Versorgungssicherheit“**



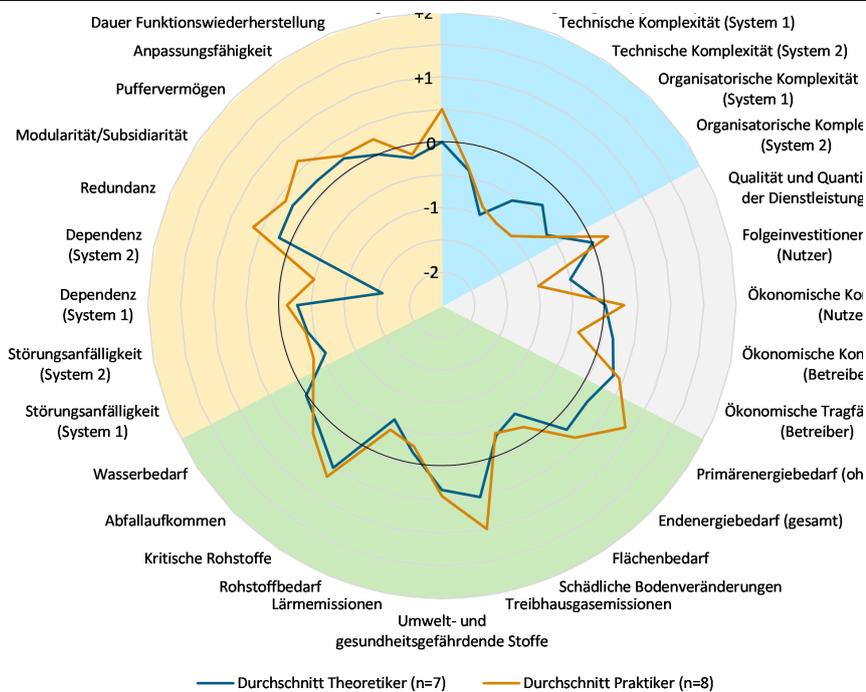
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 28: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 1.1**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 29: Bewertungsprofil „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 1.1**



Quelle: eigene Darstellung

## 8.1.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Technische Möglichkeiten der langfristigen Wärmespeicherung können die Lücke zwischen Bedarf und Nachfrage schließen.
- Neben einer Anbindung an Nahwärmenetze ist auch die Versorgung durch Kältenetze denkbar.
- Die Abwärmegewinnung sollte zusätzlich mit der energetischen Verwertung des Klärschlamm verbunden werden (d. h. weitergehende Kopplung mit dem Sektor der Abfallwirtschaft).
- Die beste Option wäre die Nutzung der Abwärme aus dem Kläranlagenablauf durch Wärmepumpen für die Wärmeversorgung der Faulung. Folglich könnte die Abwärme des mit Faulgas betriebenen BHKWs in Fernwärmenetze eingespeist werden. Falls erforderlich (bei Lastspitzen oder Ausfall der Wärmepumpe), könnte auf einfache Weise auch die Wärme aus dem BHKW klärwerksintern (u. a. zur Faulturmbeheizung, Raumheizung) genutzt werden.

#### Regulatorische Aspekte

- Aufgrund der jeweiligen Projekte aus dem Bereich der Abwasserwärmenutzung sind die rechtlichen Hindernisse zu überwinden.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die Abwasserwärmenutzung erfordert immer eine bivalente Konzeption (z. B. über einen Heizkessel mit alternativen Energiequellen).
- Höchste Priorität gilt der Abwasserreinigung. Die Wärmeversorgung muss daher mindestens bivalent ausgelegt sein.
- Über die Energieautarkie von Klärwerken ist das vorhandene Nutzungspotenzial von Abwärme nahezu nicht vorhanden. Es besteht lediglich das Potenzial der Abwärmenutzung an den Klärwerksausläufen.\*(2)
- Das primäre Ziel sollte darin bestehen, die Abwärme klärwerksintern zu nutzen, um die Kläranlage weitgehend "energieautark" betreiben zu können.\*(2)
- Die Abwärmenutzung kann durch einen diskontinuierlichen Abwasserstrom eingeschränkt werden.
- Kläranlagen haben in der Regel nur im Sommer einen Wärmeüberschuss. Die Wärmenutzung im Sommer ist allerdings kein sehr attraktives Geschäftsmodell.
- Eine Mindestgröße der Anlage ist bedeutend, um eine relevante Wärmedienstleistung zu erbringen.
- Wird im Winter am Kläranlagenablauf zu viel Wärme abgezogen, kann das negative Auswirkungen auf das empfangende Gewässer haben.
- Das Maß der Ressourcenschonung ist immer von dem jeweiligen Setting der technischen Komponenten abhängig.
- Die Nutzung der überschüssigen Dienstleistung von Wärmepumpen im Fernwärmenetz erfordert ggf. Anpassungen im Fernwärmenetz.
- Im Mischsystem, was aus Klimaanpassungsgründen aber ein Ausläufer ist, kann es evtl. bei

Starkregen zu Störungen kommen.

- Ein Risiko für die Funktionsfähigkeit der Kläranlage würde sich ergeben, wenn für die Abwasserbehandlung wichtige thermische Energie abgezogen würde. Die Bedenken bestehen bei einer Abwärmenutzung am Auslauf der Kläranlage nicht.
- Die fehlende räumliche Nähe zu Fern-/Nahwärmenetzen schränkt die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Lösung ein.\*(3)

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Abwasserbetriebe liefern keine Energie, sie ermöglichen Dritten die Nutzung. Die Anpassung der Statute von Betreibern ist erforderlich, um neue Dienstleistungen anbieten zu dürfen.
- Es sollte eine eigene Betriebsform gewählt werden, um eine rechtliche und organisatorische Trennung zu gewährleisten.
- Die Einbindung in kommunale Verwaltungsstrukturen stellt ein Risiko für die notwendige klare Neudefinition von Kompetenzen und Verantwortlichkeiten dar.
- Gesetzliche Änderungen erfolgen häufig mit Fristen, die durch Planungs- und Ausschreibungsfristen bei den beteiligten Systemen nicht eingehalten werden können.
- Betreiber in der Form einer Anstalt des öffentlichen Rechts (AöR) dürfen gemäß kommunaler Satzung solch ein Geschäftsmodell nicht betreiben. Kläranlagenbetreiber unterliegen dem Ausschreibungsrecht und sind daher nicht mit Stadtwerken als Energieversorgungsunternehmen simultan.
- Der Verkauf von Wärme obliegt i. d. R. Stadtwerken, selten ist die Abwasserentsorgung hier angesiedelt. Da die Infrastruktur für diese Art der Wärmegewinnung direkt mit der Technik der Abwasserreinigung verbunden ist, sind Fragen wie Besitz, Verantwortung im Fall einer Havarie, Versicherung, Kosten durch Instandhaltung und Betrieb etc. genauestens zu regeln.
- Der Erfolg hängt im Einzelfall von den Eigentumsverhältnissen der beiden Betriebe und ihren Rechtsformen ab. Entscheidend ist aber, ob das Stadtwerk (o. ä.) überhaupt bereit ist, in Geschäftsmodellen zu denken, und ob die Größenordnung des Wärmebeitrags das überhaupt nahelegt.

#### **Regulatorische Aspekte**

- Abwasser als Energieträger sollte in den geltenden Rechtsinstrumenten wie EnnEnergG, WHG als Ressource aufgenommen werden.
- Betreiber mit hoheitlichen Aufgaben sind im Rahmen der Gesetzgebung oftmals benachteiligt. Zum Beispiel fehlt die Vorsteuerabzugsberechtigung, so dass die Möglichkeit von Investitionen erschwert wird.
- Wem die Energie im Abwasser ab welcher Stelle im Abwassersystem gehört, müsste geklärt werden (Bezug zu Fall 2 – dezentrale Abwasser-Wärmenutzung).

#### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Energie aus Abwasser wird ökonomisch umso attraktiver, je höher das allgemeine Energiepreinsniveau ist.
- Ökonomische Risiken können über Contracting oder Gestattungsverträge ausgeschlossen werden.
- Bedarf nach finanzieller Unterstützung für die anfallenden Stromkosten.

## 8.2 Fall 1.2 Dezentrale Wärmeengewinnung in Abwassernetzen

**Fallbeschreibung:** Dezentrale Gewinnung thermischer Energie aus Abwässern im kommunalen Abwassernetz durch den Einsatz von (internen/externen) Wärmetauschern und Wärmepumpen. Nutzung der Wärme durch Einspeisung in ein Nahwärmenetz.

**Tabelle 17: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 1.2	2	4	4	3	<b>13</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Grundsätzlich messen die Befragten der zentralen Wärmeengewinnung in Abwassernetzen ein Potenzial bei, einen Beitrag zur Energieversorgung eines angeschlossenen Fernwärmenetzes leisten zu können. Die wesentlichen Stärken der Lösung liegen in der Erschließung einer zusätzlichen Energiequelle, dem damit verbundenen Beitrag zur Versorgungssicherheit sowie der Senkung der Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus wird der Kopplung größtenteils eine Wirkungsneutralität bis hin zu leichten Potenzialen in Hinblick auf die soziale und ökonomische Verträglichkeit (Dienstleistungsqualität, Wirtschaftlichkeit) sowie auf die Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz bescheinigt.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Erschließung von Geothermie-Nutzung durch Energienutzung im Abwasserrohr.

#### Herausforderungen und Risiken

Die grundsätzliche Leistungsfähigkeit und die einzelnen Potenziale der Kopplung stehen im Kontext von Herausforderungen in der Praxis. So werden potenziell eher neutrale bis negative Auswirkungen auf den Betrieb der eingebundenen Abwasseranlagen gesehen – dies vor allem im Zusammenhang mit der Temperaturabsenkung im Kanalsystem. Zugleich wird eine geringfügige Zunahme der technischen und organisatorischen Komplexität im gekoppelten System erwartet.

Als eine deutlich negative Konsequenz werden nutzerseitige Investitionen für die Anpassung an die geringeren Systemtemperaturen erwartet. Für die Versorgungssicherheit wird teilweise eine erhöhte Störungsanfälligkeit erwartet, eine verstärkte Abhängigkeit der Energieversorgung vom Funktionieren der Kopplung sowie erhöhte Aufwendungen bei Störungen im gekoppelten System. Zudem deuten die Bewertungen auf einen geringfügigen Anstieg des Rohstoffbedarfs hin.

#### **Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Erforderliche Multivalenz der Energieversorgung im gekoppelten System; ggf. zu geringes Wärmepotenzial in der Heizperiode; Gefahr der Abflussbehinderung; Korrosionsgefahr für Anlagenteile.
- (institutionell/organisatorisch) Beteiligung zahlreicher Akteure mit unklaren Schnittstellen; Be-

hinderung der Abwasserbetriebe durch langjährige Verträge; Komplexität verlangt sektorübergreifende Planung und Begleitung der Vorhaben; Lange Planungszeiträume.

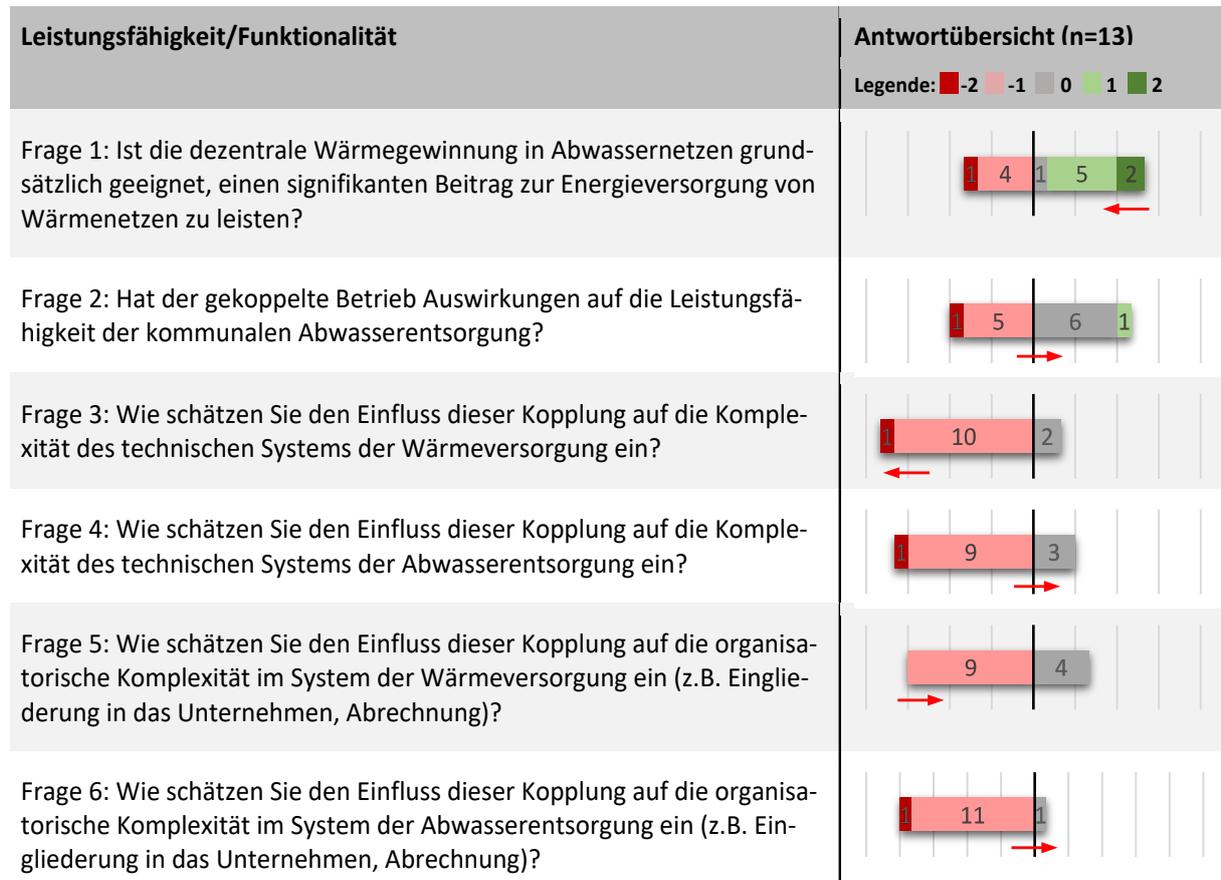
- (regulatorisch) Definieren von Abwasser als Ressource; Ermächtigung kommunaler Betriebe Wärme zu verkaufen; politische Unterstützung und Förderung der technischen Weiterentwicklung; Bedarf nach Deckelung des Preises für abgegebene Wärme.
- (wirtschaftlich) Wirtschaftlichkeit nur bei sehr günstigen Voraussetzungen gegeben.

**Tabelle 18: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 1.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Redundanz</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen für die Nutzer</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Ausmaß der schädlichen Bodenveränderungen</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 2)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>• Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

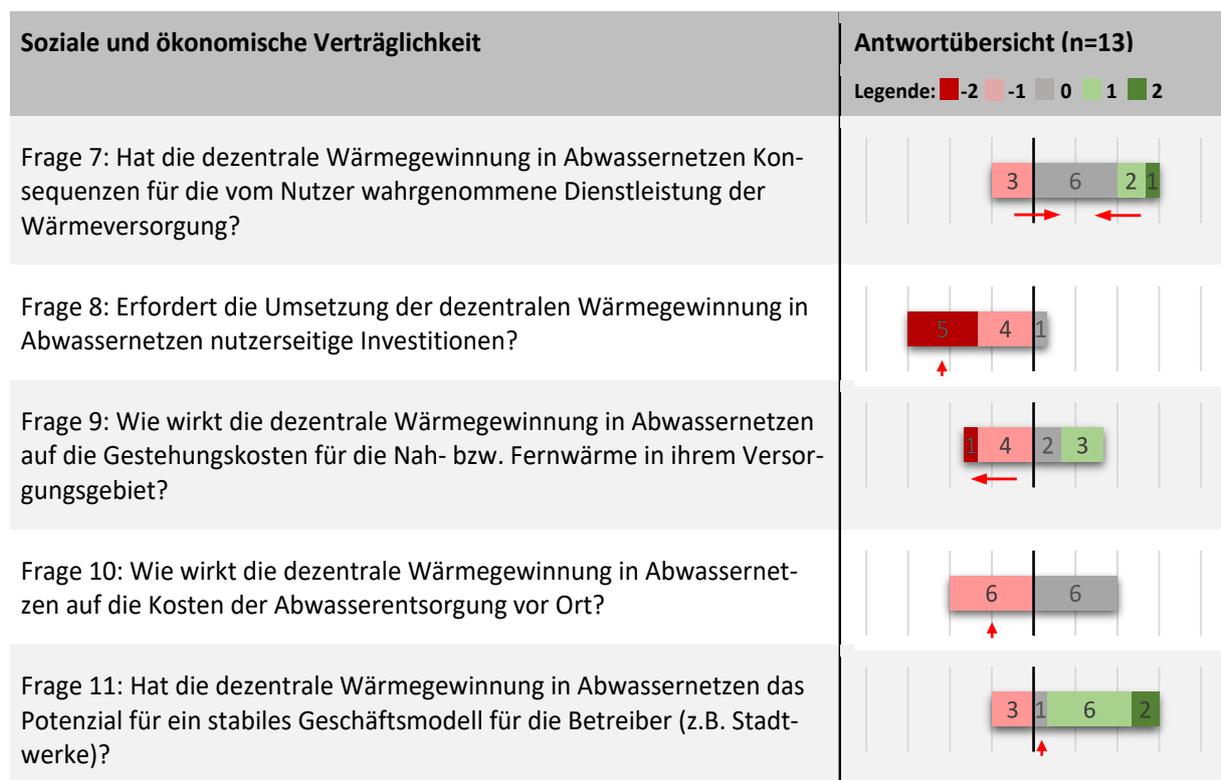
## 8.2.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 30: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Leistungsfähigkeit“



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 31: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



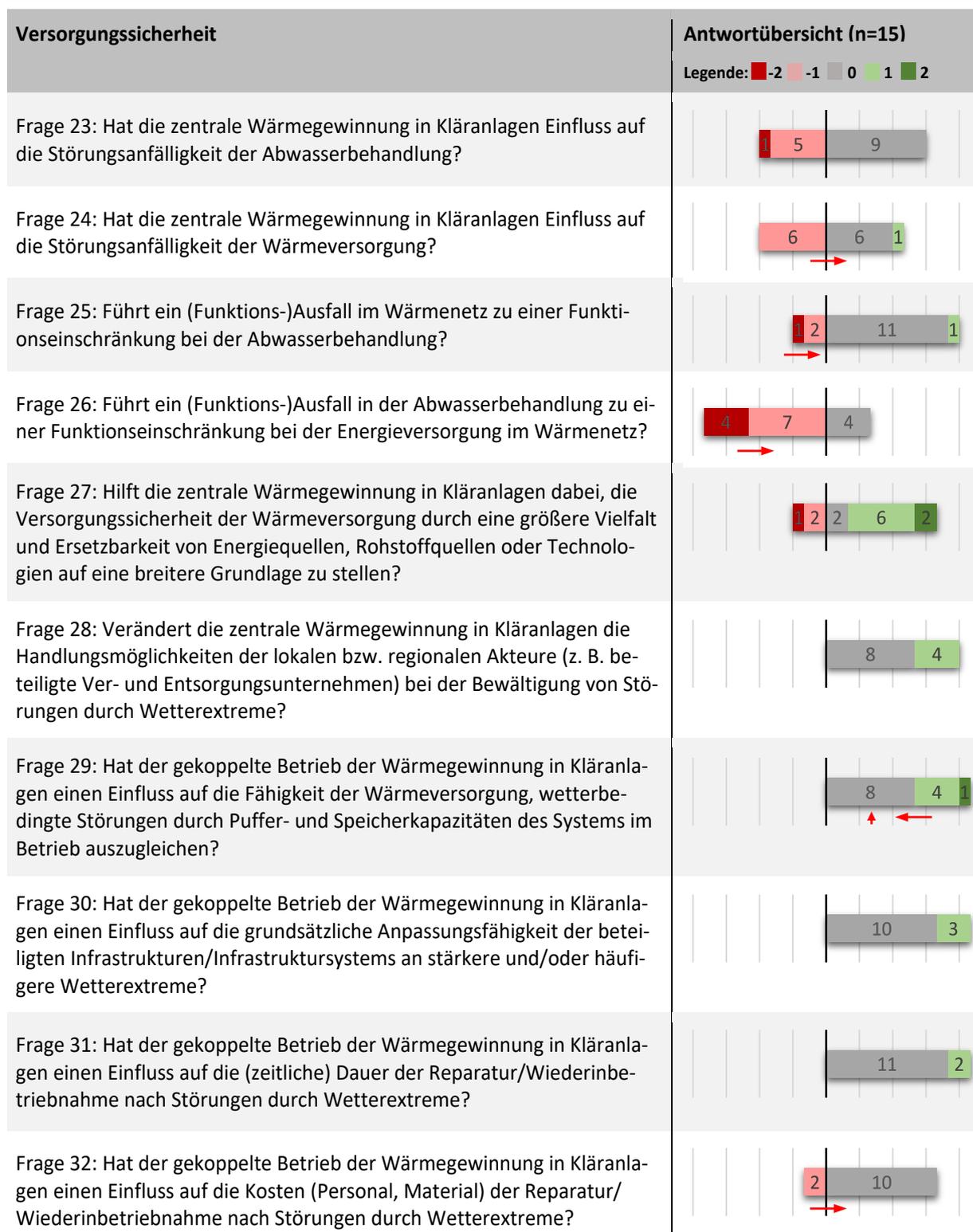
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 32: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 12: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf den Primärenergiebedarf von Wärmeversorgung und Abwas- serentsorgung vor Ort?	
Frage 13: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf den gesamten End-Energiebedarf von Wärmeversorgung und Abwasserentsorgung vor Ort?	
Frage 14: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf den Flächenbedarf für Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 15: Führt die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastruk- turen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einer- seits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 17: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube, nährstoffreichere Abwässer) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastruktur?	
Frage 19: Wie wirkt die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) für Bau und Er- halt der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 20: Wie wirkt die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf das Abfallaufkommen (z. B. Klärschlämme, Filtersiebe) beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat die dezentrale Wärmege- winnung in Abwassernetzen Ein- fluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

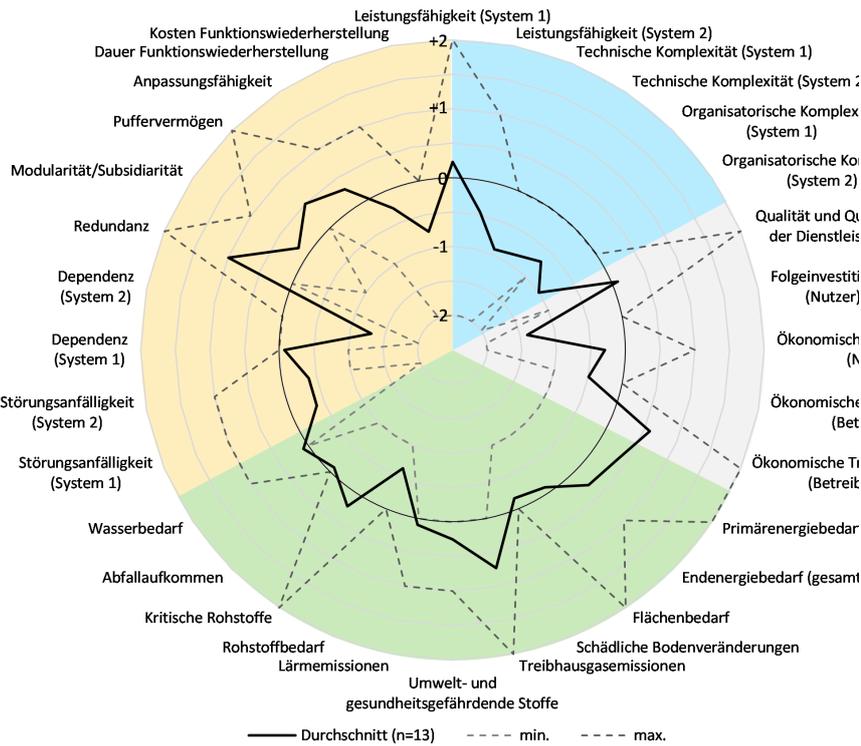
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 33: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 1.2, Teil „Versorgungssicherheit“**



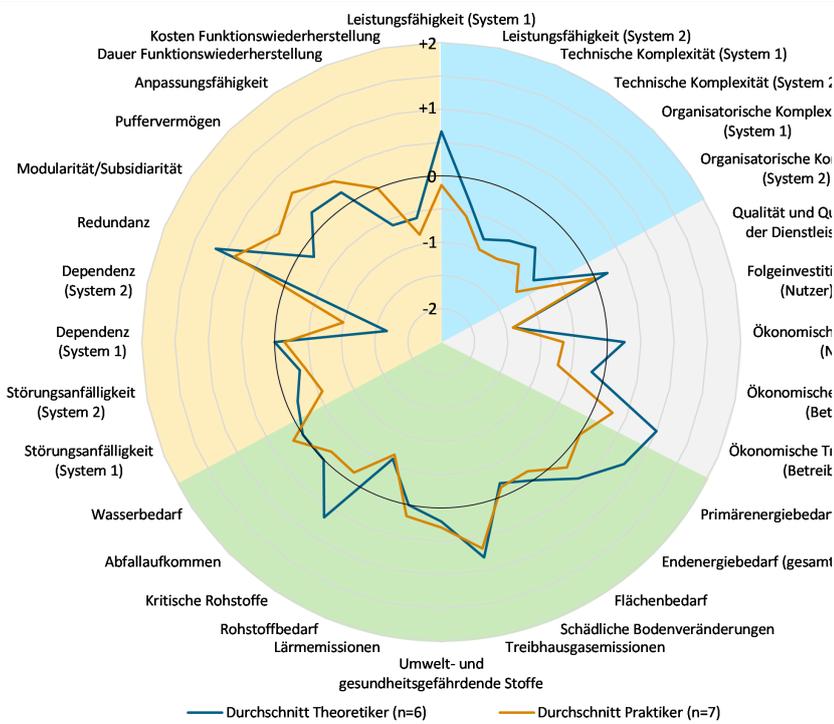
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 34: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 1.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 35: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 1.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.2.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Im beschriebenen Fall wird nur die Wärmeabschöpfung aus dem öffentlichen Abwassernetz betrachtet, die aber auch auf häuslicher Ebene möglich ist und somit miteinander konkurrieren.
- Ist die Nutzung der Wärme in einem einzelnen Gebäude bei niedrigeren Systemtemperaturen möglich, so ist dieser Fall gegenüber dem Wärmeentzug im Kanalnetz zu bevorzugen.
- Mit dem Abwassernetz lässt sich letztlich Geothermie abschöpfen.
- Das Potenzial zur Nutzung industrieller Abwärme ist bedeutend größer (siehe Kühltürme).
- Für die Gewährleistung einer optimalen Versorgungssicherheit sollte das Niederschlagswasser aus der Kanalisation ausgekoppelt werden.
- Es gibt derzeit noch ein hohes Entwicklungspotenzial bei sämtlichen Anlagenkomponenten (z. B. Wärmeüberträger, Wärmepumpe und -verteilung).
- Durch Nutzung von Abwasserwärmepumpen zur Kühlung wird die Abwassertemperatur erhöht. Dies kann positiv für die biologische Klärstufe sein.

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Bei ausreichend großer Gebietsfläche sind Risiken hinsichtlich der sozialen und ökonomischen Verträglichkeit nicht zu erwarten. Für kleine Abwassernetze/Kommunen sind die Risiken noch nicht betrachtet worden.

#### Weitere Anmerkungen

- Es bestehen keine spezifischen Risiken hinsichtlich der Ressourcenschonung und -effizienz, eher Chancen. \*(2)
- Keine spezifischen Risiken. Im Gegenteil steigt die Versorgungssicherheit durch Diversifizierung der Energieträger. Bei einer Störung im Gasnetz liefert die Elektrowärmepumpe mit der Energiequelle Abwasser weiterhin Wärme. Eine reine Kesselanlage - auch mit mehreren Kesseln - fällt dagegen komplett aus.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Eine optimale Leistungsfähigkeit des Systems bedingt eine standortspezifische Betrachtung.
- Die Systemtemperaturen im Nahwärmenetz dürfen nicht zu hoch sein, wenn die thermische Energie eingespeist werden soll.
- Die Abwärmennutzung im Kanalnetz wird nur punktuell Sinn machen, wenn eine ausreichend hohe Abwassertemperatur (z. B. Schwimmbad) gegeben ist und potenzielle Wärmeabnehmer in räumlicher Nähe befinden.
- Für den Fall, dass das Abwärmepotenzial schwankt, beispielsweise während einer Schneeschmelze, muss planerisch im Kontext einer Mischkanalisation vorgesorgt werden.
- Eine redundante Energieversorgung ist im Fernwärmenetz erforderlich.
- Im Sinn einer besseren Redundanz sind Kopplungen mit anderen Infrastruktursystemen (z. B. Fernwärme, Erdgas, Solarzellen in der Gebäudehaut) erforderlich.

- Das Risiko für eine erhöhte Korrosion und Geruchsemission in der Kanalisation ist für jeden Einsatzort zu prüfen.
- Die Umsetzung bedingt einen erhöhten Unterhaltungsaufwand und Störanfälligkeit in den Abwassernetzen.
- Über einen zu hohen Entzug thermischer Energie aus dem Abwasser kann besonders im Winter das Abwasser gefrieren.
- In der Fachwelt wird diskutiert, dass die Wärmeentnahme aus dem Abwasser insbesondere in Wintermonaten den biologischen Klärprozess beeinflusst, da zu kaltes Abwasser die biologische Abwasserreinigung durch Bakterien hemmt. \*(4)
- Die häufig genannte Einschränkung der Leistungsfähigkeit der biologischen Klärstufe trifft nicht zu: a) Bei Abwassertemperaturen oberhalb der Temperaturen des umgebenden Erdreichs würde das Wärmepotenzial ohnehin auf den Weg zur Kläranlage verloren gehen. b) Bei Abkühlung des Abwassers durch Wärmepumpen unterhalb des Temperaturniveaus des umgebenden Erdreichs nimmt das Abwasser auf den Weg zu Kläranlage die Temperatur des umgebenden Erdreichs wieder an.
- Je nach Art der technischen Umsetzung im Kanalnetz könnten Verstopfungen begünstigt werden. Beispielsweise können Wärmetauscher ein Abflusshindernis darstellen bzw. eine Querschnittsverengung bewirken. \*(2)

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Es sind grundsätzlich viele Akteure bei einer solchen Anlage der Abwasserwärmenutzung beteiligt. Dadurch wird der Planungsprozess gefährdet.
- Aufgrund der unterschiedlichen Akteure sollten die Schnittstellen zwischen ihnen klar definiert werden.
- Zwischen Energieunternehmen und Abwasserbetrieben besteht eine große Abhängigkeit. Langjährige Rahmenverträge mit Nutzern könnten den Abwasserbetrieb ebenfalls einschränken (z. B. bei Sanierungsmaßnahmen).
- Weiterbildungsangebote für Entscheider und weitere Akteure (u. a. bis hin zum Hausmeister) sind erforderlich, um solche Konzepte zu realisieren.
- Die Komplexität erfordert eine überschreitende Betrachtung.
- Einsatz von Planungsgrenzüberschreitenden technischen Ausführungs- und Begleitorgane. \*(2)
- Nahwärmenetze sollten so geplant werden, dass potenzielle Abwasserwärmenutzungspunkte in diese integriert werden (evtl. auch Kopplungen mit dem Fernwärmenetz).
- Der kommunale Klimaschutz- und Infrastrukturentwicklungsplan muss integriert aufgestellt werden.
- Die Weichen sollten rechtzeitig gestellt werden (z. B. im Generalentwässerungsplan).

#### **Regulatorische Aspekte**

- Es muss deutlich werden, dass die Kommunen das Abwasser als (u. a. energetische) Ressource zu bewirtschaften und nicht in erster Linie zu beseitigen haben. Rechtliche Anpassungen im WHG (evtl. auch im ErnEnergG) sind erforderlich.
- Ohne die Schaffung entsprechender Rechtsgrundlagen (z. B. Abwasser als Ressource zu verstehen) dürfen bestimmte Rechtsformen u. a. (sehr viele) kommunale Abwasserbetriebe bei der Wärmegewinnung gar nicht tätig werden.

- Klare politische Signale in Form von Projektförderungen und Unterstützung in der technischen Weiterentwicklung der Systeme sind wünschenswert. Dazu gehört auch die rechtzeitige Standorterkundung über die Möglichkeiten der Abwärmenutzung (z. B. durch Potenzialstudien, Atlas, Karten).
- Abwasserentsorgungsunternehmen verlangen teilweise jährliche Gebühren im fünfstelligen Bereich (für die Bereitstellung der Energieressource „Abwasser“). Diesen stehen keinen realen Kosten gegenüber und sie gefährden die Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Die Abwasserentsorgungsunternehmen sollten vom Gesetzgeber verpflichtet werden, Abwasserenergie kostenlos zur Verfügung zu stellen. Selbstverständlich müssen die einmaligen Aufwendungen bei Planung und Bau solcher Anlagen (z. B. durch Datenbereitstellung, Abstimmung und Prüfung der Planung, Bauüberwachung) honoriert werden. Ebenso muss der Wärmenutzer zahlen, wenn auf seinen Wunsch hin eine zusätzliche Reinigung der Abwasserhaltung stattfinden soll. Jährliche Gebühren im vier- bis fünfstelligen Bereich sind jedoch in keiner Weise gerechtfertigt und sollten verhindert werden.

#### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Es besteht die Möglichkeit einer Risikominderung durch Contracting (Systemverkauf). \*(2)
- Die Wirtschaftlichkeit ist derzeit nur an gut geeigneten Standorten gegeben, die es gilt herauszufinden.
- Die Investition zur Abwasserwärmenutzung rechnet sich nur bei sehr günstigen Voraussetzungen.
- Dort, wo Kanalnetzbetreiber dem Abwasser Wärme entnehmen, kann dies zu einem erfolgreichen Geschäftsmodell für den Kanalnetzbetreiber werden. Allerdings wird es dann zu einem Defizitmodell für den Kläranlagenbetreiber.
- Es kann das Problem entstehen, dass Nahwärmenetze - evtl. europaweit - ausgeschrieben werden müssen (z. B. so geschehen in der Jenfelder Au in Hamburg), so dass das Stadtwerk plötzlich mit anderen Anbietern konkurrieren muss und hier evtl. verliert, wenn andere günstigere Konditionen haben.
- Es bestehen keine sozialen und ökonomischen Risiken, wie die 60 deutschlandweit betriebenen Anlagen zeigen.

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Energie aus Abwasser wird ökonomisch umso attraktiver, je höher das allgemeine Energiepreinsniveau ist.
- Eine Unterstützung durch mehr Forschungs- und Entwicklungsvorhaben und mehr Aus- und Weiterbildungsangebote ist erforderlich.

### 8.3 Fall 2.1 Industrie- und Gewerbe-Abwärme in Wärmenetzen

**Fallbeschreibung:** Gewinnung von Abwärme aus industriellen Produktionsprozessen oder Servern (mithilfe von Wärmetauschern oder Wärmepumpen). Einspeisung der gewonnenen Wärmeenergie in bestehende Wärmenetze (Nah- oder Fernwärme).

**Tabelle 19: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 2.1	3	3	4	4	<b>14</b>

#### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

##### Stärken und Potenziale

Die wesentlichen Stärken/Potenziale der Nutzung von Abwärme aus Prozessen von Industrie- und Gewerbebetrieben liegen im Bereich der Wärmebereitstellung selbst sowie Ressourcenschonung durch eine deutliche Senkung des Primärenergiebedarfs sowie Senkung von Treibhausgasemissionen, Endenergie sowie der Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe. Darüber hinaus wird ein geringfügig sinkender Bedarf an kritischen Rohstoffen erwartet. Eine eher geringfügig positive Tendenz zeigen die Einschätzungen zur Leistungsfähigkeit der Kopplung, eine verlässliche Prozesskühlung sicherzustellen sowie in Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit und im Bereich von Redundanz.

Insbesondere für die weiteren Ressourcen-bezogenen Kriterien, die soziale und ökonomische Verträglichkeit aber auch für die weiteren Aspekte der Versorgungssicherheit wird eine Wirkungsneutralität angenommen. Für die Kriterien Modularität sowie Puffer- und Speicher-Vermögen zeigen die Bewertungen eine leicht positive Tendenz.

##### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Je nach Temperaturniveau ist Kaskadennutzung für verschiedene Zwecke möglich.
- (weitere) Reduzierung der thermischen Belastung (Senkenwirkung) von Luft und Wasser durch geringeren Energiebedarf für Kühlung.

##### Herausforderungen und Risiken

Die Potenziale der Kopplung stehen im Kontext von Herausforderungen, die im Zuge von Umsetzung und Betrieb beachtet bzw. gelöst werden müssen. Diese sind insbesondere die hohe technische und organisatorische Komplexität im sozio-technischen Infrastruktursystem und die damit einhergehenden betrieblichen und wirtschaftlichen Unsicherheiten. Korrespondierend dazu wurden eine erhöhte Störungsanfälligkeit und die Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen eher als Risiko für den Nutzer der Dienstleistung bewertet – v. a. für den Fall einer nicht gegebenen Leistungsredundanz sowohl für die Wärmeversorgung als auch für die (Prozess-)Kühlung. Zudem wird

ein in der Tendenz eher leicht ansteigender Bedarf an Flächen und Rohstoffen für die Errichtung und den Betrieb der Anlagen erwartet.

**Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Vollständige Leistungsredundanz bleibt für Wärmebereitstellung und Kühlsysteme weiterhin erforderlich; ggf. nicht gegebene Konstanz der Wärmebereitstellung und Nutzung (z. B. durch Betriebspausen); Nutzung der Abwärme in Wärmenetzen erfordert Anpassung der Temperaturniveaus; primäre Lösung ist die Vermeidung von Abwärme.
- (regulatorisch) Klärung und Aufteilung von Pflichten und Risiken zwischen den Beteiligten; Tätigkeiten außerhalb ihres Kerngeschäfts stellen für Akteure eine hohe Hürde dar; Einspeisevorrang für Abwärme in Wärmenetzen ist erforderlich.
- (wirtschaftlich) Ohne Investitionsförderung kaum umsetzbar; Systemänderungen ziehen ggf. Kosten für das gekoppelte System nach sich.

**Tabelle 20: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 2.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>• Redundanz</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 2)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>• Ausmaß der schädlichen Bodenveränderungen</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>• Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

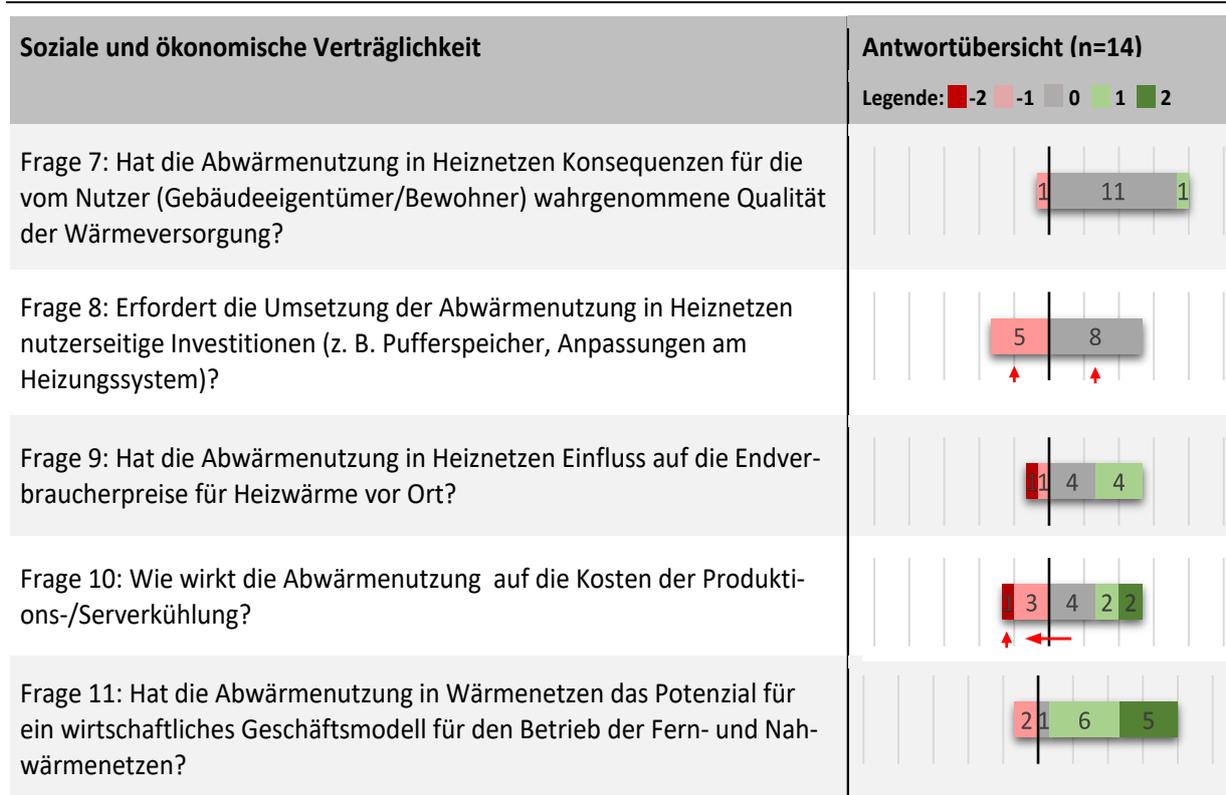
### 8.3.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 36: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=14) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 1: Ist die Einbindung der Produktions-/Serverabwärme in ein lokales Wärmenetz geeignet, einen signifikanten Beitrag zur Wärme-Energieversorgung von Gebäuden bzw. Wärmenetzen zu leisten?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the right of the line, there are two green bars: one labeled '7' extending to the 1 mark, and another labeled '6' extending to the 2 mark. A red arrow points down at the 0 mark.</p>
Frage 2: Ist die Einbindung von Produktions-/Serverabwärme in ein Wärmenetz geeignet, einen signifikanten Beitrag zur Kühlung der Produktions-/Serveranlagen zu leisten?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the left of the line, there is one red bar labeled '3' extending to the -1 mark. To the right of the line, there are three green bars: one labeled '3' extending to the 1 mark, and another labeled '2' extending to the 2 mark. Red arrows point down at the 0 mark and right at the 2 mark.</p>
Frage 3: Verändert die Einbindung der Produktions-/Serverabwärme die technische Komplexität des Wärmeversorgungsystems vor Ort?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the left of the line, there are two red bars: one labeled '4' extending to the -2 mark, and another labeled '9' extending to the -1 mark. To the right of the line, there is one green bar labeled '1' extending to the 0 mark. A red arrow points right at the -1 mark.</p>
Frage 4: Verändert die Einbindung der Produktions-/Serverabwärme die technische Komplexität der Produktionsprozesse bzw. der Serverkühlung ein?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the left of the line, there are two red bars: one labeled '3' extending to the -2 mark, and another labeled '6' extending to the -1 mark. To the right of the line, there are two green bars: one labeled '4' extending to the 0 mark, and another labeled '1' extending to the 1 mark.</p>
Frage 5: Erfordert die Einbindung der Produktions-/Serverabwärme komplexere Organisationsstrukturen bzw. einen höheren Organisationsaufwand im System der Wärmeversorgung von Gebäuden und Wärmenetzen?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the left of the line, there are two red bars: one labeled '4' extending to the -2 mark, and another labeled '6' extending to the -1 mark. To the right of the line, there are two green bars: one labeled '3' extending to the 0 mark, and another labeled '1' extending to the 1 mark.</p>
Frage 6: Erfordert die Einbindung der Produktions-/Serverabwärme komplexere Organisationsstrukturen bzw. einen höheren Organisationsaufwand im System der Produktions-/Serverkühlung?	<p>A horizontal bar chart with a vertical line at 0. To the left of the line, there are two red bars: one labeled '4' extending to the -2 mark, and another labeled '7' extending to the -1 mark. To the right of the line, there are two green bars: one labeled '2' extending to the 0 mark, and another labeled '1' extending to the 1 mark. A red arrow points left at the 0 mark.</p>

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 37: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 38: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=14) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 12: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf den Primärenergiebedarf von Wärmeversorgung und Serverkühlung?	
Frage 13: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf den gesamten Endenergiebedarf von Wärmeversorgung und (z.B. Server-) Kühlung?	
Frage 14: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf den Flächenbedarf für die Erstellung der Anlagen und ihren Betrieb vor Ort?	
Frage 15: Führt die Abwärmenutzung in Wärmenetzen zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die Abwärmenutzung in Wärmenetzen die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb dieser Infrastrukturlösung?	
Frage 17: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf die Emission von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastrukturlösung?	
Frage 19: Wie wirkt die Abwärmenutzung in Heiznetzen auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) für Bau und Erhalt der Infrastrukturlösung vor Ort?	
Frage 20: Verändert die Abwärmenutzung in Wärmenetzen die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf das Abfallaufkommen durch den Betrieb dieser Infrastrukturlösung?	
Frage 22: Hat die Abwärmenutzung in Wärmenetzen Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb dieser Infrastrukturlösung?	

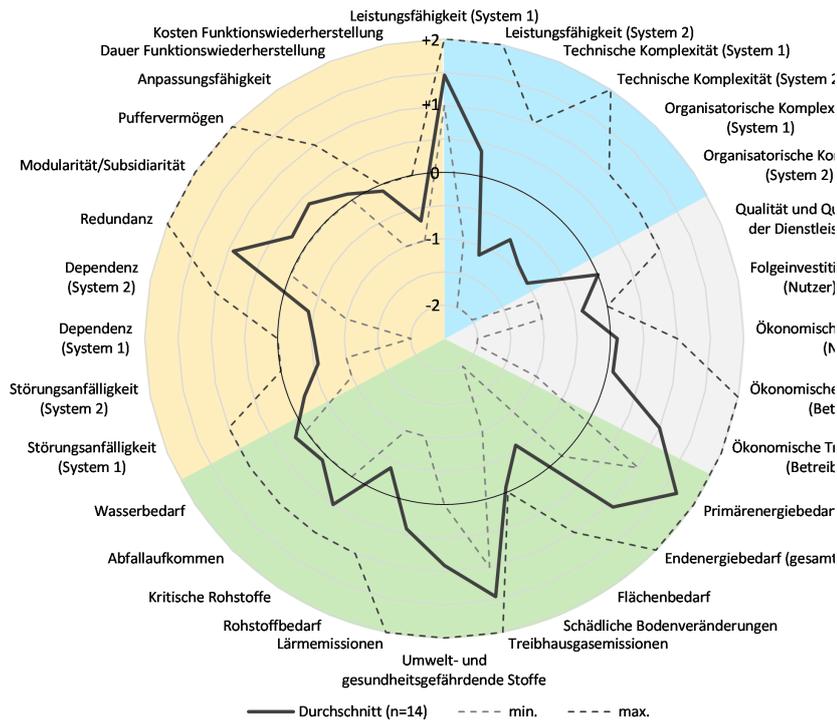
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 39: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.1, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=14) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 23: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Produktions-/Serverkühlung?	
Frage 24: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Wärmeversorgung vor Ort?	
Frage 25: Kann ein Funktionsausfall im lokalen Wärmenetz zu einer Funktionseinschränkung bei der Produktions-/Serverkühlung führen?	
Frage 26: Kann ein Funktionsausfall bei der Produktions-/Serverkühlung zu einer Funktionseinschränkung bei der Wärmeversorgung vor Ort führen?	
Frage 27: Hilft die Kopplung dabei, die Versorgungssicherheit der Wärmeversorgung vor Ort durch eine größere Vielfalt und Ersetzbarkeit von möglichen Quellen auf eine breitere Grundlage zu stellen?	
Frage 28: Verändert diese Art der Kopplung die Handlungsmöglichkeiten der beteiligten Akteure vor Ort bei der Bewältigung möglicher Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 29: Hat der gekoppelte Betrieb einen Einfluss auf die Fähigkeit der beteiligten Systeme, wetterbedingte Störungen durch Puffer- und Speicherkapazitäten des Systems im Betrieb auszugleichen?	
Frage 30: Hat der gekoppelte Betrieb einen Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit der Wärmeversorgung und Produktions-/Serverkühlung an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Dauer möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen (Wetterextreme)?	
Frage 32: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Kosten (Personal, Material) der Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme?	

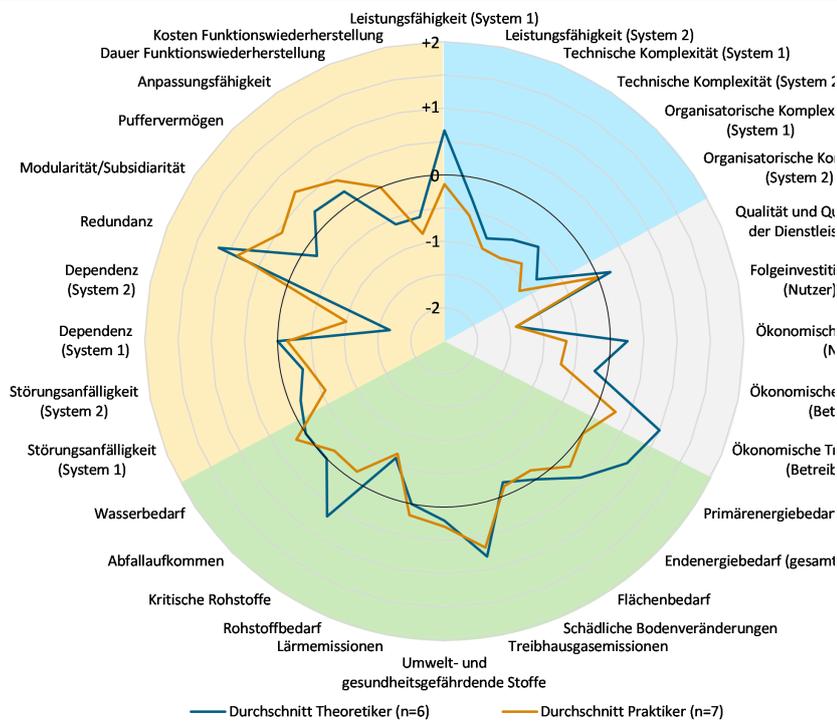
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 40: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 2.1



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 41: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 2.1



Quelle: eigene Darstellung

## 8.3.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Je mehr Wärmequellen eingebunden sind, desto besser. \*(2)
- Liegt eine hohe Abwärmtemperatur vor, so sollte eine Kaskadennutzung oder eine Nutzung der Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau erfolgen, ggf. sogar betriebsextern, anstatt eine Nutzung zu Heizzwecken in Erwägung zu ziehen.
- Eine technische und organisatorische Flexibilisierung von Prozessen könnte förderlich sein (bspw. hinsichtlich der Auslastung von Anlagen).
- Speicher sind zusätzlich zu Redundanzen ein Mittel, Risiken aus der Diskontinuität durch Angebot und Nachfrage von Wärme zu vermindern sowie die Versorgungssicherheit zu steigern.
- Der Zugang zu bestehenden Wärmenetzen kann noch verbessert werden.

#### Institutionelle und organisatorische Aspekte

- Es fehlt an Best-Practice-Fällen, anhand derer beispielhaft vor allem auch die vertragliche Gestaltung der Geschäftsbeziehung aufgezeigt wird.

#### Weitere Aspekte

- Die Nutzung von Abwärme für Heizzwecke ist eine gut geeignete Option, da die Nutzung von fossilen Energieträgern reduziert werden kann. \*(5)
- Umweltbelastungen sinken durch die reduzierte Inanspruchnahme der Senkenwirkung von Luft und Wasser, durch geringeren Energiebedarf für Kühlung und Heizung, insbesondere wenn das System fossile Energieträger substituiert.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die Wärmebereitstellung hängt auf Dauer vom Funktionieren der Wärmebereitstellung ab. Dieses Risiko ist technisch über eine redundante Wärmebereitstellung abzusichern. \*(8)
- Aufgrund der Diskontinuität der Dienstleistung muss ein Back-Up vorhanden sein, um die Lieferbeziehung mit den Nutzern zu gewährleisten. Über das Jahr steht die industrielle Prozesswärme nicht konstant zur Verfügung (z. B. betriebliche Winterpause), es kann zu kurzfristigen Ausfällen kommen oder das Wärmepotenzial kann komplett wegbrechen (z. B. bei Betriebsverlagerungen in schnellleibigen Wirtschaftsbereichen). Andererseits kann das Wärmenetz nicht ganzjährig und im vollen Umfang Wärme abnehmen (z. B. Ferienzeit im Sommer).
- Ein Redundanzanfordernis besteht auch seitens des zu kühlenden Systems. Eine nicht ausreichend große Senke kann sich negativ auf die Kühlleistung der Wärmequelle/des Prozesses auswirken und im schlimmsten Fall einen negativen Einfluss auf die Produktqualität/Prozessstabilität nehmen. Speicher und ggf. Redundanzen sind Mittel, um Risiken zu vermindern.
- Die Abwärmennutzung kann die Versorgungssicherheit nicht steigern, da eine vollständige Leistungsredundanz erforderlich ist. Die Abwärmennutzung verringert die Versorgungssicherheit.
- Die Leistungsfähigkeit des Systems erfordert kompatible Temperaturniveaus zwischen Energie-

quelle und Nutzer. Auf Nutzerseite wäre hilfreich, wenn Niedertemperatursysteme Standard wären, um das Wärmepotenzial nutzen zu können. \*(3)

- Die Industrie ist genauso wie die Fernwärmeversorgung von Brennstoffimporten abhängig. Wenn diesbezüglich Störungen auftreten, sind beide Teilbereiche betroffen.
- Die Prozessanpassung/-optimierung, in der große Potenziale für die Energie-, aber auch Materialeffizienz liegen, können die Produktqualität oder Prozessstabilität gefährden. Die Abwärmennutzung ist ein erster Ansatz, prozessnah Effizienzpotenziale zu heben, allerdings besteht hier die Gefahr, dass sich lokale und keine globalen Effizienzmaxima einstellen. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Industriebereich konzentrieren sich zumeist auf den Bereich der Querschnittstechnologien und Neubeschaffungen, da diese den wertschöpfenden Prozess geringfügig gefährden.
- In erster Linie sollte das Anfallen von Abwärme vermieden werden, bevor diese genutzt wird. Der gängigere Ansatz der Abwärmennutzung ist, dass die für die Abwärmennutzung relevanten Parameter erhoben werden, anstatt dass der Urheber, also der Prozess, genau betrachtet und das Anfallen der Abwärme hinterfragt wird. Bei der Förderung von Maßnahmen zur Abwärmennutzung sollte zumindest eine Grobanalyse der Prozesse vorweggehen, um sehr große Potenziale zur Abwärmevermeidung oder Prozessverbesserung auszuschließen.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Ungünstige Rahmenbedingungen sind oftmals Erwartungen an sehr kurze Amortisationszeiten.
- Zuständigkeiten und betriebliche Risiken sind jeweils zu klären.
- Risikoausgleich: Risiken bezüglich Leistungsfähigkeit müssen zwischen den Akteuren fair geteilt werden.

#### **Regulatorische Aspekte**

- Die Anbieter von Wärme sind in der Regel in einem anderen Geschäftsfeld tätig – für sie sind u. a. die technische Einbindung und der organisatorische Aufwand Tätigkeiten außerhalb ihres Kerngeschäfts und stellen eine hohe Hürde dar.
- Eine Versorgungsverpflichtung sollte gewährleistet werden, weil ein redundantes System Kosten verursacht.
- Bei der Umsetzung bestehen zahlreiche Hemmnisse: Wer betreibt das System? Wer übernimmt Ausfallrisiken? Wer investiert usw.?
- Übernimmt der (Ab-)Wärmelieferant mit der Kopplung eine Lieferverpflichtung?
- Es fehlen beispielsweise Anreize, die organisatorischen Hürden für die vertragliche Regelung zu überwinden.
- Eine Unterstützung ähnlich der Regelungen der regenerativen Stromversorgung ist wünschenswert.
- Es besteht die Notwendigkeit zur Nutzung unterschiedlicher Förderprogramme.
- Die Bereitstellung von Fördermitteln würde die Erschließung gewerblicher Abwärmepotenziale begünstigen.
- Für industrielle/gewerbliche Abwärmennutzungen sollte ein Förderregime ähnlich der KWK-Förderung realisiert werden. \*(2)
- Große Abwärmequellen sollten aus volkswirtschaftlicher Sicht einen gewissen Vorrang oder zumindest eine Gleichberechtigung bei der Einspeisung in Wärmenetze genießen, in die ansonsten

Wärme aus Heizwerken ohne Kraft-Wärme-Kopplung eingespeist wird.

- Energiepreise könnten zum Beispiel durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer gezielt beeinflusst werden.
- Emissionszertifikate könnten Anreize schaffen, um Effizienzverbesserung zu begünstigen bzw. nicht erneuerbare Primärenergieträger zu verteuern.
- Die Wärmerückgewinnung sollte im Rahmen des Emissionshandels berücksichtigt werden.
- Die industrielle Abwärmenutzung sollte in EnEv-Berechnungen berücksichtigt werden.
- Förderobergrenzen für Zuleitungen zu Wärmenetzen stehen einer Einbindung von Wärmequellen mit größeren räumlichen Distanzen entgegen.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Ohne finanzielle Förderung, vor allem für die notwendigen Investitionen, ist eine Abwärmenutzung derzeit nicht wirtschaftlich realisierbar.
- Energie aus Abwärme wird ökonomisch umso attraktiver, je höher das allgemeine Energiepreinsniveau ist. Solange Primärenergie so billig ist wie derzeit, ist die Abwärmenutzung wirtschaftlich bedingt realisierbar. \*(6)
- Aus ökonomischer Sicht ist die Abwärmenutzung oft nicht ausreichend attraktiv. \*(2)
- Man unterscheidet bei Wärmelieferung zwischen "gesicherte Wärme", die garantiert zu den vereinbarten Bedingungen (u. a. Leistung, Temperatur, Zeitpunkt) geliefert wird, und zwischen "ungesicherte Wärme", d. h. kann beispielsweise die Temperatur garantiert, jedoch nicht die Leistung zu jedem Zeitpunkt garantiert werden. Der Preis, den man für ungesicherte Wärme erzielen kann, liegt deutlich niedriger als der für gesicherte Wärme, weil aus Sicht des Käufers das Produkt eine sehr niedrige Qualität hat.
- Durch die Einbindung der Abwärmenutzung sind erhebliche Investitionen nötig, die entweder durch Förderung oder höhere Verbraucherpreise gedeckt werden müssen.
- Eine Produktionsveränderung kann Investitionen in weitere Erzeugungsanlagen notwendig machen und somit die Wirtschaftlichkeit senken sowie Preise erhöhen.
- Die Abwärmenutzung erhöht die Grundkosten (Leistungspreis) und bedarf der Kompensation aufgrund der Langfristigkeit der Refinanzierung von Infrastrukturmaßnahmen.
- Über Prozesswärme bereitgestellte Leistungen müssen redundant vorgehalten werden, damit gehen hohe Investitionskosten einher.
- Die derzeitigen fossilen Energiepreise verhindern die Wirtschaftlichkeit fast sämtlicher Effizienzmaßnahmen. Die Konkurrenzfähigkeit mit alternativen Systemen muss gegeben sein.

### **Weitere Anmerkungen**

- Abwärmenutzung (Bezug von Wärme von Dritten) benötigt Investitionen in die technische Infrastruktur, einen höheren organisatorischen Aufwand und verfügt u. U. geringere Steuerbarkeit.
- Ohne ausreichende Qualität der Dienstleistung, ohne Preisneutralität und bei nicht gegebener Wirtschaftlichkeit werden Projekte dieser Art nicht realisiert. Projekte, die realisiert werden, können die Risiken beherrschen.

## 8.4 Fall 2.2 Einspeisung solarthermischer Energieerzeugung in Wärmenetzen

**Fallbeschreibung:** Einbindung zentraler solarthermischer Anlagen zur multivalenten Energiebereitstellung in bestehenden Wärmenetzen auf kommunaler oder Quartiersebene.

**Tabelle 21: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 2.2	4	2	2	5	<b>13</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Für die Einkopplung solarthermisch gewonnener Energie in Wärmenetze wird eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit angenommen. Weitere wichtige Stärken der Lösung liegen in der deutlichen Absenkung von Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen, der Steigerung der Energieunabhängigkeit, der verbesserten Redundanz von Wärmequellen sowie der Puffer- und Speicherfähigkeit.

Positiv hervorzuheben ist in diesem Kontext, dass auch für die meisten anderen Aspekte von Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz sowie der Versorgungssicherheit (v. a. Modularität und Subsidiarität) kaum negative Auswirkungen erwartet werden.

#### *Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):*

- (technisch) Bis zu 50 % des Wärmebedarfs kann solarthermisch abgedeckt werden; Speichersysteme bieten das Potenzial, Störungen zu überbrücken; es bleibt das Erfordernis einer mind. bivalenten Energieversorgung der Wärmenetze.
- (wirtschaftlich) Langfristige Kostenreduktion ist auch für Verbraucher möglich.

#### Herausforderungen und Risiken

Die überwiegenden Potenziale der Kopplung stehen im Kontext von Herausforderungen, die im Zuge von Umsetzung und Betrieb zu beachten sind. Diese liegen insbesondere in einer höheren technischen und organisatorischen Komplexität, den erwarteten nutzerseitigen Investitionsbedarfen (v. a. zur Anpassung an die im gekoppelten System abgesenkten Temperaturniveaus), ggf. steigende Kosten im Falle von Störungen und langfristig in der möglichen Abhängigkeit von einer fluktuierenden Energiequelle. Darüber hinaus werden für die Umsetzung der Kopplung ein besonders hoher Flächenbedarf sowie ein teilweise geringfügiger Anstieg des Rohstoffbedarfs erwartet. Aus ökonomischer Perspektive stellen der Bedarf an nutzerseitigen Investitionen und geringfügig steigenden Endverbraucherpreise für Heizwärme eine Herausforderung dar.

**Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

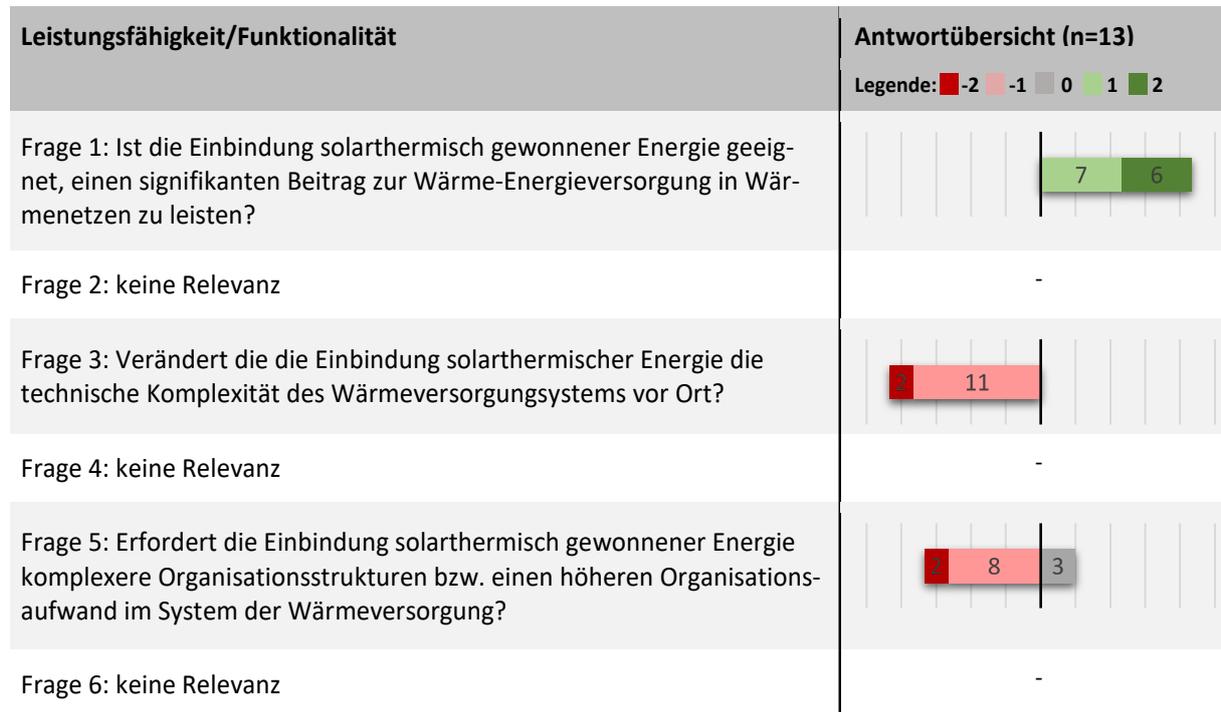
- (technisch) Bedarf nach Anpassung der Temperaturniveaus und damit Folgekosten für die Nutzer; Starke Komplexitätssteigerung bei höheren solaren Deckungsraten; Gefahr deutlich höherer Betriebskosten (Wartung etc.).
- (institutionell/organisatorisch) Das Funktionieren der Lösung stellt höhere Anforderungen an Qualität von Planung und Bau; Bedarf nach Anpassungen der kommunalen Wärmeplanung und Verträgen; Mindestabnahmen o. ä. sollten nicht zu einem Sanierungshindernis werden.
- (regulatorisch) Lösung bedarf erhöhter Rechtssicherheit; Rechtliche Festsetzung von Benutzungsvorgaben (Anschlusszwang); Einbindung von Solarenergie erfordert die Abkehr von dem pauschalen Primärenergiefaktor „0“ für Wärmenetze; Anpassung der Betriebsmodelle für Fernwärme.
- (wirtschaftlich) Solarertragsabschätzung weicht bei Großprojekten oft stark von Erträgen in der Praxis ab, ggf. Wirtschaftlichkeit anderer Wärmeerzeuger (z. B. BHKW) eingeschränkt; hohe Investitionskosten; Effizienzsteigerung birgt das Risiko von Reboundeffekten oder in diesem Fall eines Sanierungshindernisses.

**Tabelle 22: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 2.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<p><b>++ (deutlich positive Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> </ul>	<p><b>-- (deutlich negative Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächenbedarf</li> </ul>
<p><b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>• Redundanz</li> <li>• Puffer- und Speichervermögen</li> </ul>	<p><b>- (geringfügig negative Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen für die Nutzer</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<p><b>0 (keine Änderungstendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Ausmaß der schädlichen Bodenveränderungen</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – Lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

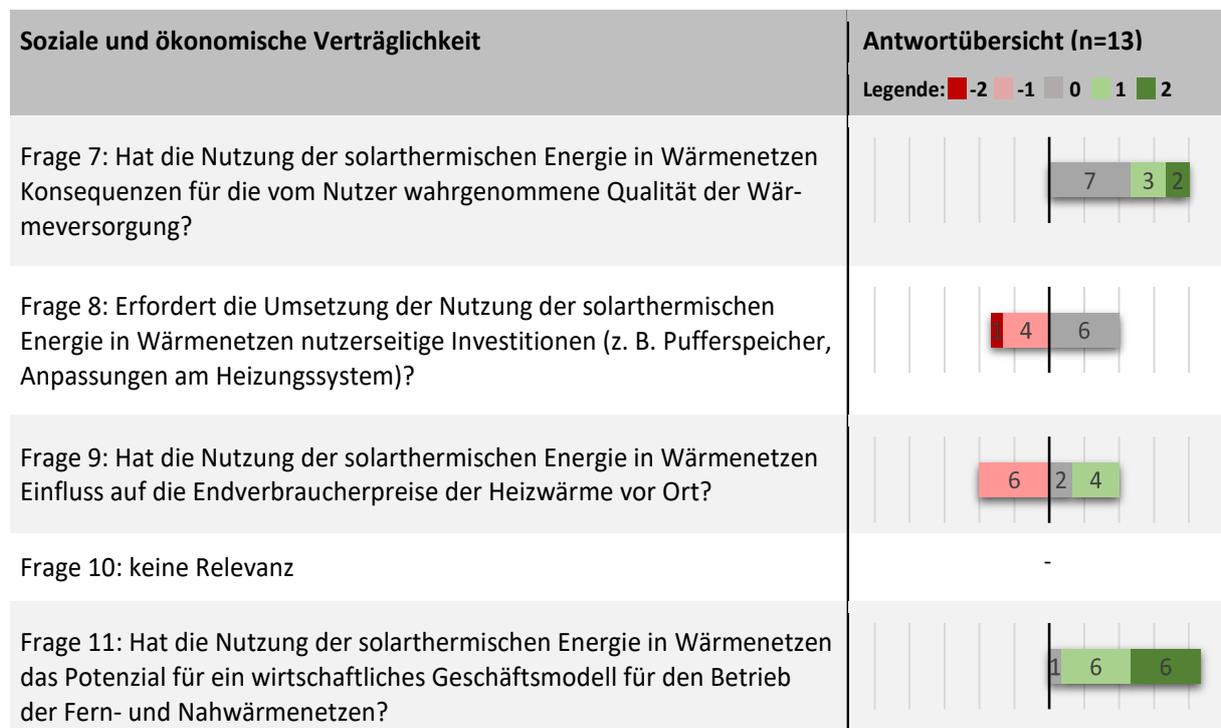
### 8.4.1 Nachhaltigkeitsbewertung

**Abbildung 42: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Leistungsfähigkeit“**



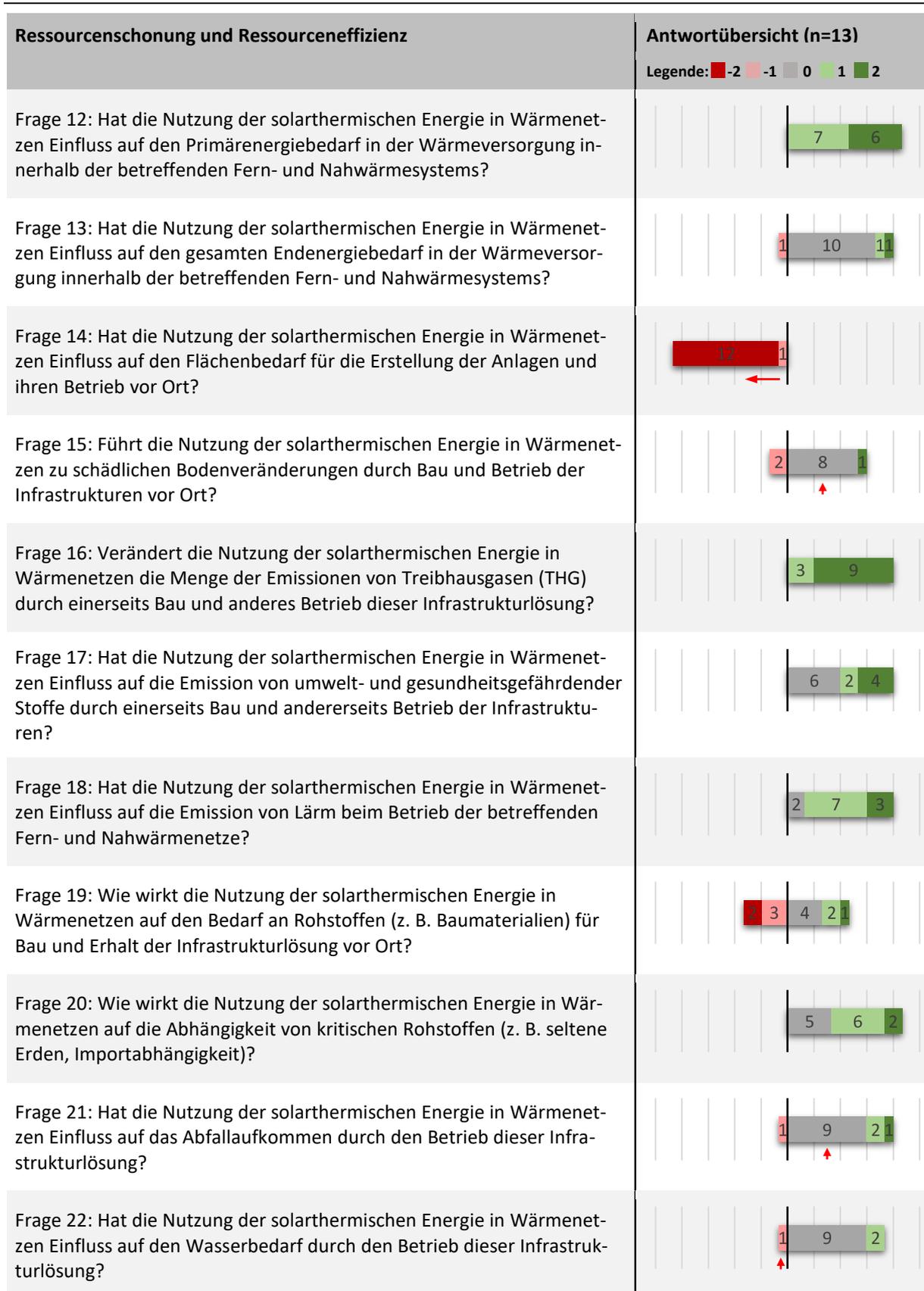
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 43: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



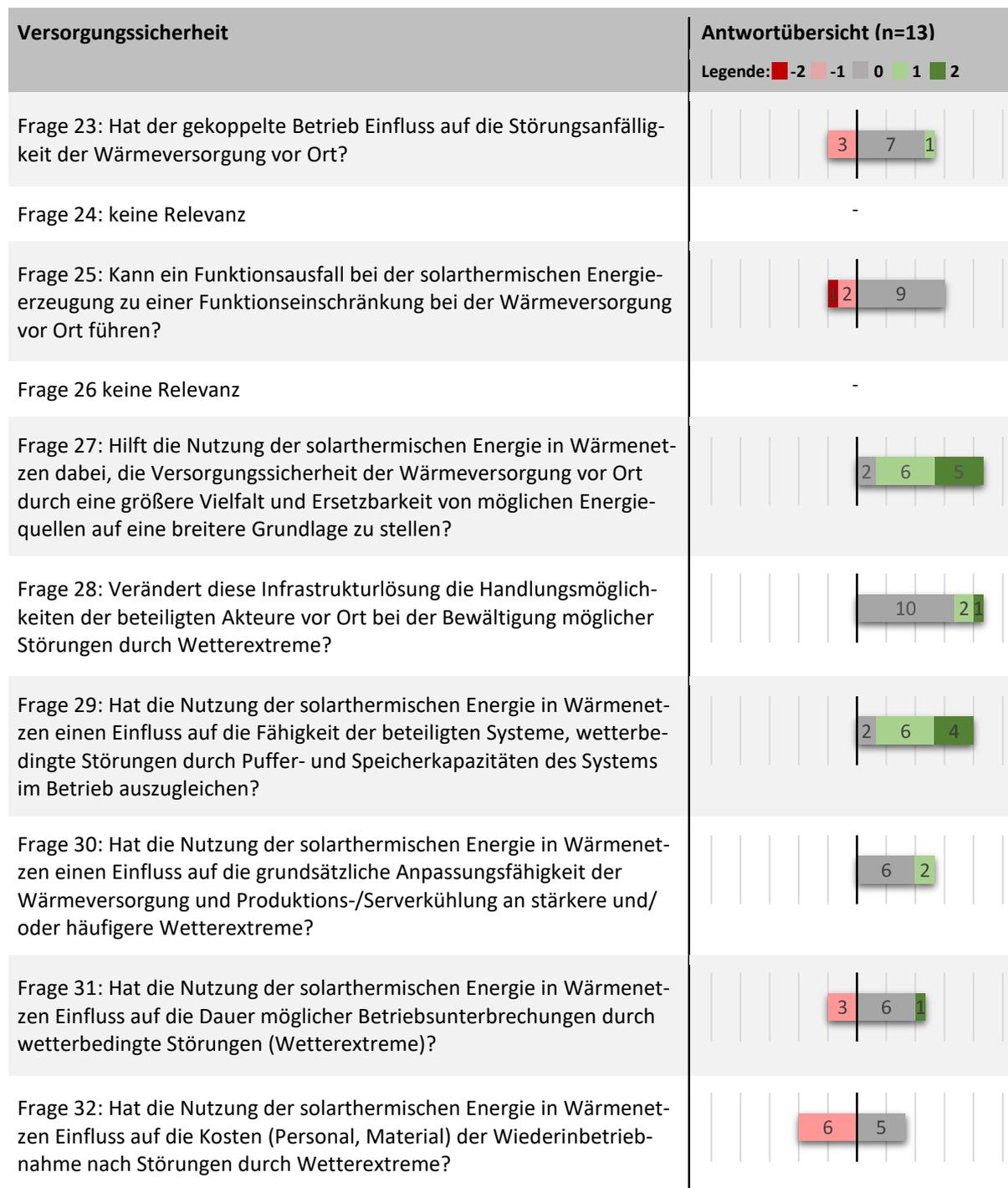
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 44: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**



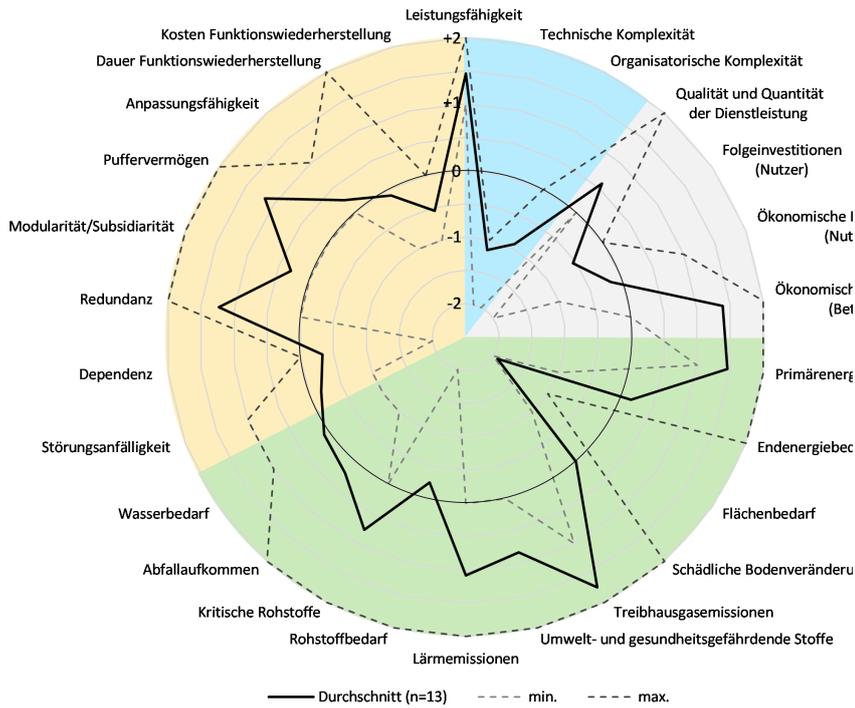
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 45: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 2.2, Teil „Versorgungssicherheit“**



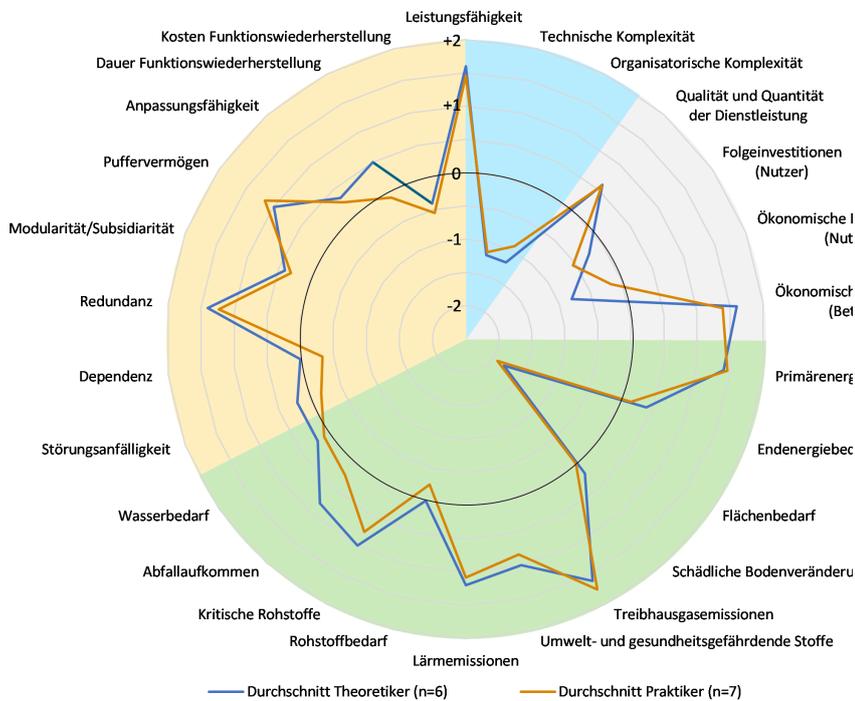
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 46: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 2.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 47: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 2.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.4.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Bis zu 50 % des Wärmebedarfs kann solarthermisch abgedeckt werden. Notfalls ist das System in der Lage, die gesamte Wärmelast zu erbringen.
- Es werden keine Einschränkungen in der Versorgungssicherheit gesehen, da ohnehin ein Redundanzanfordernis besteht. \*(5)
- Soweit Speichersysteme in Kombination mit solarthermischen Erzeugungsanlagen verbaut werden, bietet das System das Potenzial, gewisse Störungen zu überbrücken.
- Das Puffervermögen hängt von der Größe des Solarspeichers ab. Je höher der solare Deckungsanteil desto größer wird auch der Solarspeicher ausgelegt und desto besser ist auch die Pufferwirkung.
- Derzeit sollte die solarthermische Energie lediglich eine Wärmeenergiequelle von mehreren sein, um die Energieversorgung zu sichern. Zukünftig kann sie durch die Möglichkeit von umfangreichen Speichersystemen einen größeren Beitrag zur Stabilisierung leisten. \*(4)

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Es besteht kein Potenzial zur kurzfristigen finanziellen Entlastung, langfristig ist aber eine Kostenreduktion möglich.
- Je nach Primärenergieträger besteht eine Chance, zur Verringerung der Verbraucherpreise bzw. der künftigen Preisstabilisierung. Systeme müssen optimal ausgeführt werden.

#### Weitere Aspekte

- Aufgrund der abnehmenden Abhängigkeit von Brennstoffimporten wird die Versorgungssicherheit ein bisschen zunehmen.
- Die Störungsanfälligkeit ist tendenziell etwas geringer, da der Autarkiegrad der Wärmeversorgung steigt. Etwaig ausbleibende Brennstofflieferungen haben somit eine geringere Auswirkung.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Geringere Vor- und insbesondere Rücklauftemperaturen in den bestehenden Fernwärmenetzen sind für eine Implementierung sehr hilfreich. Daher sind auf Nutzerseite Niedertemperaturheizungsanlagen erforderlich, um die solarthermische Wärmeenergie für Heizzwecke nutzen zu können. \*(2)
- Wenn nur 5 bis 10% des Wärmebedarfs mittels solarthermischer Energie erzeugt würde, wäre die technische Komplexität noch überschaubar. Doch wenn ein deutlich größerer Wärmeanteil solarthermisch bereitgestellt werden soll, nimmt die Komplexität erheblich zu.
- Solarthermische Erzeugungssysteme funktionieren nicht ohne Speichersysteme. Für eine optimale Nutzung der Solarthermie sind somit Wärmespeicher erforderlich. In der Übergangszeit zu Sommer und Winter bietet Solarthermie Möglichkeiten. Aber die (möglichst verlustfreie) Speicherung von Wärme über Monate ist technisch und wirtschaftlich eine Herausforderung. \*(3)
- Risiken bestehen ggf. hinsichtlich der Datenfernübertragung und -verarbeitung.

- Solarthermische Energie steht üblicherweise nur zu Schwachlastzeiten zur Verfügung (Sommerhalbjahr). Sie ersetzt damit nur einen Teil des gesamten Primärenergiebedarfs. Die Leistungsbeurteilung der Erzeugungsanlage muss für den Hochlastfall im Winter ausgelegt werden. \*(3)
- Aufgrund der fluktuierenden Wärmeenergieerzeugung von solarthermischen Energiesystemen und der Lücke zwischen sommerlicher Verfügbarkeit und winterlicher Nachfrage repräsentiert das System eine nicht gesicherte Wärmequelle.
- Mehr Komponenten können zu einem erhöhten Wartungsaufwand, Schäden, technische Defekte und damit zu höheren Preisen führen. Die Handhabung wird aber mit zunehmendem Ausbau solcher Varianten voraussichtlich besser.
- Die Umsetzung der Kopplung erfordert eine komplexere Netzhydraulik.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Nur durch qualitativ hochwertige Planung und Bau ist sichergestellt, dass die neuen Anlagen langfristig und sicher ihren Teil zur Energieversorgung beitragen und nicht durch ständige Ausfälle und Reparaturen/Störfälle Ressourcen "verbrennen".
- Die kommunale Wärmeplanung sollte angepasst werden.
- Es besteht das Erfordernis von Vertragsanpassungen.
- Die Umsetzung bedingt eine ganzheitliche Abstimmung von allen Sanierungsmaßnahmen auch im privaten Bereich, um diese voranzubringen und das Geschäftsmodell weiterhin aus Eigeninteresse des Betreibers nachhaltig zu gestalten/abzusichern.
- Die Abstimmung mit der Nutzerseite ist wichtig.
- Mindestabnahmen o. ä. sollten nicht zu einem Sanierungshindernis werden! \*(2)

#### **Regulatorische Aspekte**

- Rechtliche Festsetzungen von Benutzungsvorgaben bezüglich der Wärmeversorgung durch Wärmenetze (Anschlusszwang) sind möglich.
- Eine gesteigerte Rechtssicherheit ist erforderlich.
- Die derzeit Überförderung von fossilen KWK-Anlagen schmälert das erfolgreiche Betreiben von solarthermischen Erzeugungsanlagen.
- Ein Anschlusszwang im Neubau an Wärmenetzen ist erforderlich, um die Netzverluste zu minimieren und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern (Risikominimierung).
- Für viele deutsche Fernwärmenetze wird ein Primärenergiefaktor von 0 angegeben, weshalb keine Verbesserungen möglich sind. Aber die Stromgutschriftmethode, aus welcher die für die Fernwärme günstigen Ergebnisse in der Vergangenheit resultierten, wird aufgrund eines zunehmenden Anteils erneuerbaren Stroms und eines abnehmenden Anteils von Atom- oder Braunkohlekraftwerken zukünftig schlechtere Primärenergiefaktoren liefern.
- Die in Deutschland bestehenden Rahmenbedingungen sind nicht optimal. Es müsste z. B. das Betriebsmodell für Fernwärme angepasst werden, um günstigere Rahmenbedingungen zu ermöglichen.
- Derzeit bestehen Hemmnisse, die der Nutzung von Freiflächen (Acker, Wiese, Brachland) für eine solarthermische Energieerzeugungsanlage entgegenstehen, die es gilt, zu reduzieren. \*(2)
- Das weitaus größte Hemmnis ist die geeignete Flächenverfügbarkeit, deshalb braucht es eine Verpflichtung der Kommunen, spezifische Wärmepläne mit dem Ziel der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung zu erarbeiten. \*(2)

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Die Wirtschaftlichkeit bzw. die Solarertragsabschätzung kann gerade bei großen Anlagen nur simuliert werden und weicht ggf. von den Erträgen in der Praxis (z. B. durch Witterung) ab, womit wirtschaftliche Risiken verbunden sind. \*(3)
- Unter Umständen wird die Wirtschaftlichkeit anderer Wärmeerzeuger (z. B. BHKW) eingeschränkt. Die Wärmebereitstellung selbst wird weiterhin gewährleistet sein. \*(2)
- Energie aus solarthermischen Erzeugungsanlagen wird ökonomisch umso attraktiver, je höher das allgemeine Energiepreisniveau ist. \*(4)
- Geschwindigkeit des Sanierungsfortschritts, Urbanisierung, demografischer Wandel etc. werden einen Einfluss auf die Verbraucherpreise und die Wirtschaftlichkeit haben.
- Verteuerung von nicht-erneuerbaren Primärenergieträgern und/oder Emissionszertifikaten würden Anreize zur Effizienzverbesserung setzen.
- Je flächendeckender die Solarthermie installiert wird, umso mehr kann dadurch ein Beitrag zur Versorgungs- und Preisstabilität erreicht werden.
- Aufgrund der geringeren Erfahrung in Deutschland als in z. B. Dänemark ist im Bereich der Solarthermie mit höheren Investitionskosten zu rechnen.
- In Dänemark sind die Wärmepreise durch die Installation großer Kollektorfelder meist sogar gesunken. Allerdings ist dort auch der Preis des von der Solaranlage verdrängten Erdgases viel höher. Die deutsche Förderung für große Kollektorfelder kann diesen Unterschied nicht ganz ausgleichen.
- Die Erstinvestitionen sind recht hoch (u. a. für Bau, Einbindung, Regelung/Steuerung, Sanierung). Die Netze müssen ausgebaut und die Anschlussdichte erhöht werden.
- Ohne ausreichende Qualität, Preisneutralität und allgemeine Wirtschaftlichkeit werden solche Projekte nicht realisiert.
- Wenn Maßnahmen zur Absenkung der Vor- und Rücklauftemperaturen ergriffen werden, könnte dies auch Änderungen innerhalb der angeschlossenen Häuser erfordern. In diesem Fall können auch nutzerseitige Investitionen erforderlich sein. Die Absenkung der derzeit hohen Temperaturniveaus in den deutschen Wärmenetzen wäre aber auch ohne Solaranlagen sinnvoll. \*(2)

### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Jegliche Effizienzsteigerung birgt das Risiko eines Reboundeffekts oder in diesem Fall eines Sanierungshindernisses, u. a. aufgrund eines "guten Gewissens".

## 8.5 Fall 3.1 Steuerung hybrider Energie-Netze im lokalen/regionalen Maßstab

**Fallbeschreibung:** Lokaler Zusammenschluss dezentraler regenerativer Energieerzeuger (z. B. PV-Anlagen, Windkraft), Speicheroptionen (z. B. Stromspeicher, Akkumulatoren in E-Fahrzeugen, Wärmespeicher, Umwandlung PtL/PtH) und Verteilnetze (z. B. für Strom, Wärme, Gas) in einem hybriden Netz („smart grid“) zur Deckung der unterschiedlichen Energiebedarfe. Zentrale Steuerung des hybriden Netzes mithilfe moderner Informations- und Kommunikationstechnologien durch Akteure auf lokaler bzw. Quartiersebene.

**Tabelle 23: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 3.1	5	3	1	6	15

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Die Implementierung hybrider Energienetze im lokalen und regionalen Maßstab verfügt insbesondere über das Potenzial, die Versorgungssicherheit zu stärken. Für die meisten diesbezüglichen Kriterien, wie Störungsanfälligkeit der beteiligten Systeme, Redundanz, Anpassungsfähigkeit, Puffer-/Speichervermögen, werden geringfügige bis deutlich positive Wirkungen erwartet. Zugleich wird in einem breiten Konsens eine geringe bis deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit und zugleich die Möglichkeit zu einem stabilen Geschäftsmodell erwartet.

Für Treibhausgasemissionen und den Primärenergiebedarf wird ein geringfügiges Reduktionspotenzial angenommen. Die meisten übrigen Kriterien aus dem Bereich der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz, wie Endenergiebedarf, schädliche Bodenveränderungen, Bedarf an kritischen Rohstoffen, bleiben weitgehend unbeeinflusst.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Potenzial-Synergien zu nutzen; Möglichkeit der Einbettung lokaler/regionaler Energienetze im Gesamtnetz; Freiheitsgrade im System fördern Innovationen; Kopplung unterstützt Versorgungssicherheit.

#### Herausforderungen und Risiken

Neben den positiven Wirkungen der hybriden Energienetze sind zudem Herausforderungen und Risiken zu beachten. Gesondert hervorzuheben ist die mit der Lösung einhergehende, teils deutliche Steigerung der technischen und organisatorischen Komplexität. Zugleich fällt diesbezüglich die Verteilung der Bewertungen über einen weiten Skalenbereich auf.

Aus ökonomischer Perspektive sind geringfügig negative Wirkungen feststellbar. Nahezu Einstimmig erwarten die befragten ExpertInnen einen Bedarf nach nutzerseitigen Investitionen. Bezogen auf die Endverbraucherpreise für elektrische Energie ist ein geringfügiger Anstieg möglich.

Die IKT-basierte Steuerung ist die Voraussetzung zur Realisierung von hybriden Energienetzen. Entsprechend sind deutliche Abhängigkeiten zwischen den Systemen ausgeprägt. Für die ressourcenbezogenen Kriterien Flächenbedarf, Lärmemissionen, Abfallaufkommen sowie Bedarf an Rohstoffen und kritischen Rostoffen dominiert eine im Schnitt neutrale Bewertung, die jedoch aus einer breiten Streuung der Bewertungen von geringfügig positiv bis geringfügig negativ resultiert.

**Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

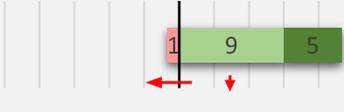
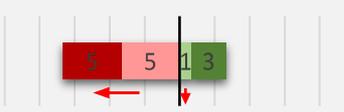
- (technisch) Hoher Anpassungsbedarf der Energienetze; Risiko der Daten- u. Betriebssicherheit; große Abhängigkeit des Ressourcenschonungspotenzials (u. a. von Art der Energiequellen, Betrachtungsebene der Ressourcenschonung, z. B. Lebenszyklus); unkoordinierter Betrieb begünstigt Lastspitzen.
- (institutionell/organisatorisch) Betrieb erfordert Echtzeitmärkte; Organisationsstruktur ist Kontextabhängig; übergeordnete Organisationsstrukturen sind rahmensetzend; hohe Einstieghürden u. Umsetzungseinschränkungen.
- (regulatorisch) Eine Öffnung der Geschäftsmodelle und Gewährleistung ihrer Kompatibilität ist erforderlich; Erfordernis zur Minderung der Entgelte, Umlagen etc.; Bedürfnis nach beständigen Rahmenbedingungen; Anpassung der Vergütung (z. B. dynamische Preisstruktur, Vergütungsrahmen für Systemdienstleistungen wie Lastmanagement).
- (wirtschaftlich) Wirtschaftlich unattraktiv; Kostensteigerungen; Betriebliches Einpreisen von Umweltbelastungen als externe Kosten.
- (gesellschaftlich) Bewusstseinsänderung zum Verbrauch von lokal/regional erzeugten Energien.

**Tabelle 24: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 3.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Emission Treibhausgase</li> <li>Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 2)</li> <li>Redundanz</li> <li>Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Rohstoffbedarf</li> <li>Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>schädlichen Bodenveränderungen</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Wasserbedarf</li> <li>Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

### 8.5.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 48: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=15) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 1: Ist die Umsetzung eines lokalen hybriden Energie-Netzes in einem sog. „smart grid“ geeignet, die Deckung der unterschiedlichen Energiebedarfe mittels regenerativen Energiequellen vor Ort zu sichern?	
Frage 2: keine Relevanz	-
Frage 3: Verändert die Zusammenführung unterschiedlicher Energieerzeuger-, Energiespeicher- und Energieverteilungs-Systeme in einem hybriden Energie-Netz („smart grid“) die technische Komplexität der lokalen Energieversorgung?	
Frage 4: keine Relevanz	-
Frage 5: Erfordert die Zusammenführung unterschiedlicher Energieerzeuger-, Energiespeicher- und Energieverteilungs-Systeme in einem hybriden Energie-Netz („smart grid“) komplexere Organisationsstrukturen bzw. einen höheren Organisationsaufwand auf Seiten der Energie-Infrastruktur?	
Frage 6: keine Relevanz	-

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 49: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=15) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 7: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Konsequenzen für die Verfügbarkeit und Güte der Energiebereitstellung (z. B. Frequenzstabilität etc.) vor Ort?	
Frage 8: Erfordert die Beteiligung an einem lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netz Investitionen seitens der privaten, als Energieverbraucher und -anbieter (prosumer) beteiligten Akteure?	
Frage 9: Kann die Organisation der regenerativen Energieversorgung in einem lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netz Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise für elektrische Energie in dem Verbund haben?	
Frage 10: Kann die Organisation der regenerativen Energieversorgung in einem lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netz Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise für andere bereitgestellten Energiemedien in dem Verbund haben?	
Frage 11: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in einem lokalen hybriden Energie-Netz das Potenzial für ein wirtschaftliches Geschäftsmodell auf Seiten der Betreiber?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 50: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=15) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 12: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Energieversorgung vor Ort?	
Frage 13: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Energieversorgung vor Ort?	
Frage 14: Bedingt die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen einen erhöhten Flächenbedarf vor Ort?	
Frage 15: Führt die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb des Verbundes?	
Frage 17: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube,...) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastruktur?	
Frage 19: Wie wirkt die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen auf den Bedarf an Rohstoffen für Bau und Erhalt der Infrastruktur?	
Frage 20: Verändert die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen die Abhängigkeit der Energieversorgung vor Ort von kritischen Rohstoffen (z.B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf das Abfallaufkommen beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat die Organisation der lokalen bzw. regionalen regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

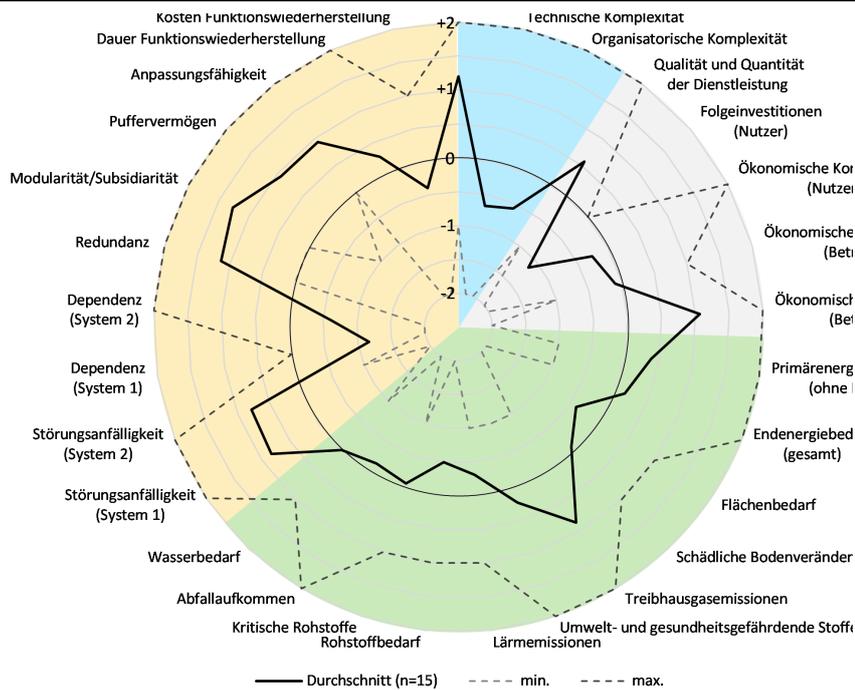
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 51: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.1, Teil „Versorgungssicherheit“

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=15) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 23: Hat die Organisation der regenerativen Energieversorgung in einem lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netz Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Energieversorgung im Verbund?	
Frage 24: Hat die Organisation der regenerativen Energieversorgung in einem lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netz Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Energieversorgung, insbesondere in Bezug auf wetterbedingte Störungen, wie Hitze, Starkregen, Hagel, Überflutung, Wind?	
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall der zentralen Steuerung des lokalen hybriden Energie-Netzes zugleich zu Einschränkungen in der Energieversorgung der im Verbund zusammengeschlossenen Energie-Verbraucher?	
Frage 26: Führt ein (Funktions-)Ausfall des lokalen hybriden Energie-Netzes zugleich zu Einschränkungen in der Energieversorgung bei den privaten Anlagenbetreibern?	
Frage 27: Trägt die Organisation der regenerativen Energieversorgung in lokalen bzw. regionalen hybriden Energie-Netzen generell zu einer größeren Vielfalt und Ersetzbarkeit von Energiequellen bei und damit zu einer verbesserten Versorgungssicherheit vor Ort?	
Frage 28: Verändert die Organisation der regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen die Handlungsmöglichkeiten der Akteure auf lokaler Ebene, mögliche Systemstörungen zu überwinden (Hinweis: z. B. im Gegensatz zur überregionalen Energieversorgung)?	
Frage 29: Kann die Organisation der regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen das Puffer- und Speichervermögen des Energienetzes vor Ort verbessern, um mögliche wetterbedingten Störungen auszugleichen (z. B. Unterbrechung überregionaler Energieversorgung)?	
Frage 30: Hat die Organisation der regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen einen Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit des lokalen bzw. regionalen Energiesystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Wie wirkt die Organisation der regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen in Hinblick auf die Dauer möglicher Reparaturen/Funktionsstörungen nach Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 32: Hat die Organisation der regenerativen Energieversorgung in hybriden Energie-Netzen einen Einfluss auf die Kosten der Reparatur/Wiederinbetriebnahme (Personal, Material, ...) nach Störungen durch Wetterextreme?	

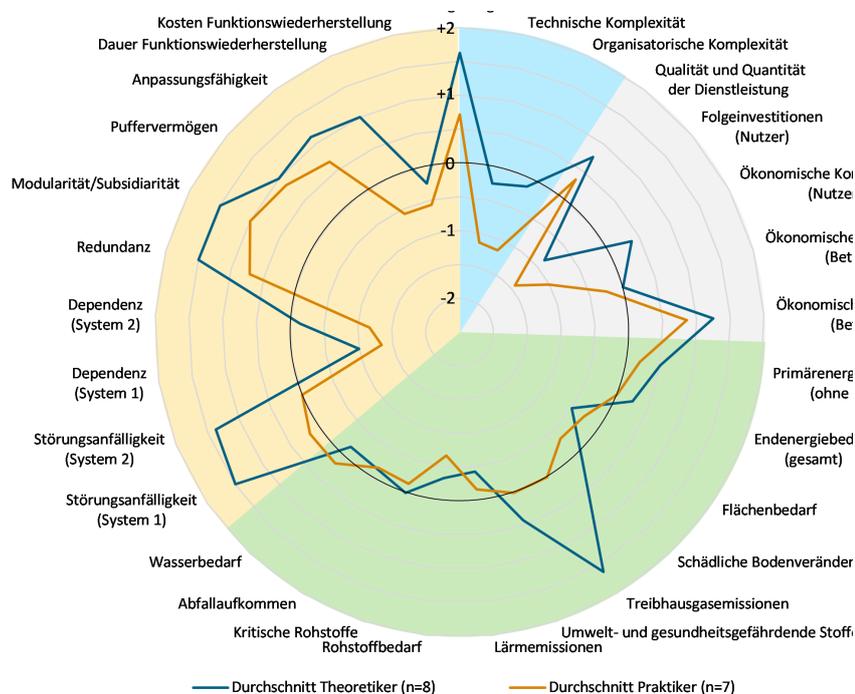
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 52: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 3.1**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 53: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 3.1**



Quelle: eigene Darstellung

## 8.5.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Je mehr Freiheitsgrade ein System bietet, umso besser kann sich dieses der fluktuierenden Erzeugung aus erneuerbaren Energien anpassen.
- Sofern das hybride Netz technisch in der Lage ist, als Insel betrieben zu werden, stellt diese eine gut geeignete Option zur Steigerung der Versorgungssicherheit dar.
- Hybride Energienetze repräsentieren eine gut geeignete Option, um das Versorgungspotenzial aus regenerativen Energiequellen auf lokaler/regionaler Ebene auszuschöpfen.\*(5)
- Ideale Erprobungsplattformen solcher Strukturen sind Inseln (z. B. derzeit allein 2.700 in Europa), die auch ca. 20 Jahre schneller als kontinentale Strukturen die Energiewende schaffen sollten und als Prototyp für "Netzzellen" eines zukünftigen Systems dienen können, weil starke ökonomische (massive Einsparungen) und organisatorische (geringere Komplexität) Gründe dafür sprechen. (Siehe "Wie ein zelluläres Netz gelingen kann" im Downloadbereich von [www.easysg.de](http://www.easysg.de).)
- Es bestehen keine Risiken, sofern das hybride System nicht die reine Autarkie einer bestimmten Region zum Ziel hat, sondern dazu befähigt ist, mit benachbarten Strukturen gekoppelt zu werden und ggfs. durch Overlay-Netze unterstützt wird (zelluläres Netz).
- Sofern ein lokales hybrides Energienetz Teil des Verbundnetzes ist, sind keine zusätzlichen Risiken feststellbar (2).
- Hybride Energienetze stellen insofern eine geeignete Option dar, als das auf kommunaler Ebene über den Zusammenschluss von großflächigen Photovoltaikanlagen und Großspeichern Synergieeffekte erzielt werden können.
- Wenn sich die Erzeugung von erneuerbaren Energien insgesamt an der jeweiligen Eignung der Erzeugungsstandorte orientiert, kann das Konzept durch höhere spezifische Erträge insb. bei Wind und Photovoltaik durchaus sinnvoll sein.
- Ein koordinierter Betrieb der lokalen hybriden Energienetze kann zu Vermeidung von Lastspitzen beitragen und sich damit u. U. positiv auf den Netzausbaubedarf auswirken.
- Über die Sicherheit hinaus, die das Verbundnetz gewährt, könnten lokale Erzeuger viel stärker als bisher zur Versorgungssicherheit beitragen. Insbesondere Möglichkeiten des Inselnetzbetriebs, lokaler Schwarzstart-Szenarien und die Identifikation kritischer Infrastrukturen sind hierbei hervorzuheben.
- Das lokale Energienetz darf nicht "zentral" organisiert sein, was auch nicht nötig ist. Andererseits würde der technische Aufwand für eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit unangemessen ansteigen.
- Die Versorgungssicherheit kann, wie in jedem anderen gesellschaftlichen Bereich auch, über wechselseitige Konkurrenz, Kooperation und Synergien begünstigt werden.
- Die Lösungsstrategie aus Subsidiarität und Dezentralität ist demokratisch und zugleich evolutionär bewährt, die überall erfolgreich eingesetzt wird, außer bisher im Energiebereich.
- Eine Reduktion der klassischen Energieträger hat eine reduzierte Abhängigkeit von diesen Ressourcen zur Folge.

## Herausforderungen und Risiken

### Technische Aspekte

- Die Anpassung der Netzinfrastruktur ist zwingend erforderlich. Die Anpassung schließt neben den Stromverteilnetzen auch die Wärmenetze mit ein.
- Die Koordination solcher Energienetze ist nur über Echtzeitmärkte möglich. Beispielsweise werden beim Prototyp Bornholm Ecogrid alle fünf Minuten die marktgerechten Preise aktualisiert, um unter anderem Schwankungen, ausgelöst über die Erzeugung von Windenergie durch Lastflexibilität, kompensieren zu können. Dadurch entsteht für Verbraucher ein Volatilitätsrisiko, das sich aber genauso versichern lässt wie jedes andere Risiko (Lebensversicherung, Autoversicherung, Haftpflichtversicherung, Unfallversicherung etc.).
- SmartGrid-Technologien machen das Energienetz angreifbarer. Es kommt immer auf die Umsetzung an. Wenn durch SmartGrid-Technologien das Netz höher ausgelastet wird, führt ein Ausfall der Technologie schneller zu einer Versorgungsunterbrechung.
- Die Technologien sind störanfälliger als die bestehenden und tragen folglich zu einer Reduzierung der sehr guten Versorgungssicherheit bei.
- Mittels der digitalen Vernetzung innerhalb der Energieinfrastruktur zu einem hybriden Energienetz entstehen Risiken hinsichtlich der Daten- und Betriebssicherheit.\*<sup>(3)</sup>
- Es bestehen Risiken hinsichtlich des Einsatzes von seltenen Erden und für die Recyclingwirtschaft. Am Nutzungsort der Technologie werden Ressourcen geschont. Speziell in den Herstellungsländern und bei der Ressourcenbereitstellung entsteht eine gesteigerte Ausbeutung von Ressourcen und Mitarbeitern. Die Entsorgung von alten Technologien stellt zusätzlich eine Belastung dar, besonders in Entwicklungsländern.
- Die Bewertung der Ressourcenschonung hängt auch mit der Quelle der eingespeisten regenerativen Energien ab. Die übermäßige Nutzung von Biomasse stellt ein Risiko dar beispielsweise über Vermaisung und einer nicht nachhaltigen Forstwirtschaft. Daher sollte die Nutzung beschränkt werden.
- Die eingesetzte Art der Batterietechnik bedingt je nach Typ besondere Ressourcen, die einen hohen Erzeugungs- und Verarbeitungsaufwand erzeugen. \*<sup>(2)</sup>
- Durch die kurzen Erneuerungsintervalle von Photovoltaik-Anlagen und Energiespeichern steigen die Umweltwirkungen.
- Die Technologie erfordert einen quantitativ gesteigerten Einsatz von technischen Systemen. Ob daraus folglich eine Ressourcenschonung erzeugt werden kann, ist nicht gesichert.
- Über den gesamten Lebenszyklus der Anlagen gesehen, kann nicht von einer Ressourcenschonung durch hybride Netze ausgegangen werden. Nur speziell im Betrieb ist eine gesteigerte Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz gegeben.
- Die Ressourcenschonung und -effizienz von hybriden Energienetzen ist vom Einsatzort abhängig.
- Grundsätzlich bedingen Speicher und Umwandlungsverluste einen leicht erhöhten Primärenergiebedarf.
- Die Ressourcenschonung und -effizienz hängen stark von den eingebundenen Energieträgern ab.
- Die Nutzung der IKT-Infrastruktur bedingt eine hohe Abhängigkeit von diesen Technologien im Betrieb.
- Ein unkoordinierter Betrieb von lokalen bzw. regionalen hybriden Energienetzen ohne Informationsaustausch mit dem Übertragungsnetz kann zur Vergleichzeitigung von Spitzenverbräuchen

führen.

- Mittelfristig wird das bekannte Verteilnetz bestehen bleiben. Mit dessen langfristigem Abbau sinkt die Versorgungssicherheit.
- Es sollte der Ausschluss von fossilen Energieträgern auch in dezentralen Erzeugern angestrebt werden.
- Deutschland ist reich genug, um auch ökonomisch weniger effiziente Lösungen zu nutzen. Das wäre eine politische Entscheidung, die man respektieren muss. Es führt allerdings dazu, dass diese Lösungen nicht unbedingt exportfähig sind. Wenn Deutschland also den Anspruch hat, die Energiewende auch zu exportieren und dadurch zukünftig entfallende Wertschöpfung (z. B. Dieselautos) zu kompensieren, sollte man sich um eine ökonomisch effiziente und damit auch weltweit nutzbare Lösung bemühen. Dies ist auch aus klimapolitischen Erwägungen sinnvoll, weil viele Länder weder über das benötigte Know-how noch die Wirtschaftskraft verfügen, geeignete Lösungen selbst zu entwickeln und umzusetzen.
- Es sollte die Einhaltung von Standards für Energieeffizienz in allen Bereichen der Nutzung gewährleistet sein. Biomassenutzung sollte begrenzt werden.
- In den seltensten Fällen unterstützen Insellösungen die Versorgungssicherheit. In 99,5 % aller Fälle wird kein Unterschied eintreten.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Nicht jede Gemeinde in Deutschland wird sich wirtschaftlich autark versorgen können. Gemeinden, die mehr Energie erzeugen als verbrauchen, sollten den Energieüberschuss Nachbargemeinden abgeben dürfen. Grundsätzlich bedarf es einer lokalen/regionalen Energiespeicherung oder der Angleichung der Energieerzeugung an das Verbrauchsverhalten, um insgesamt den Energietransport zu reduzieren.
- Es wird Veränderungen in der Organisation geben müssen. Wenn diese eingespielt sind, muss die Organisation nicht zwingend aufwändiger sein als jetzt.
- Derzeit können alle Ebenen der Energieverteilung sehr gut durch den Energieversorger überblickt werden. Durch die Entwicklung von Insellösungen kann die Transparenz verringert werden und qualitative Einbußen der Dienstleistungen zur Folge haben.
- Die Organisation hybrider Energienetze ist stark vom jeweiligen Versorgungsgebiet abhängig. Die natürlichen Voraussetzungen für die dezentrale erneuerbare Energieerzeugung sind hierbei ausschlaggebend. In Ballungsräumen gelten spezielle Anforderungen.
- Die lokalen/regionalen Gegebenheiten spielen bei der Bewertung eine Rolle. Ist das Netz autark? Gibt es Großverbraucher?
- Die Bewertung hängt stark vom jeweiligen Referenzzustand ab, beispielsweise, ob der Status quo durch einen geringen Anteil erneuerbarer Energien gekennzeichnet ist oder ein erhöhter Anteil erneuerbarer Energien vorliegt, jedoch mit oder ohne eine hybride Netzstruktur.
- Je nach lokalen Gegebenheiten können verschiedene Orte für den Ausbau dezentraler Lösungen mehr oder weniger geeignet sein.
- Netzbetreiber sind sehr limitiert, was den Einsatz von Batterien anbelangt. Damit können sie Batterien nicht zur Spitzenkappung nutzen.
- Eine Umsetzung auf Ebene von Mehrfamilienhäusern ist durch die aktuellen Rahmenbedingungen nur bedingt möglich.
- Die Einstiegshürden sind auf Nutzer- und Betreiberseite groß.

## Regulatorische Aspekte

- Die Einführung hybrider Netze (disruptive Veränderung) bedarf radikal geänderter regulatorischer Vorgaben, da es sich um ein natürliches Monopol handelt, das in politisch bestimmter Weise bewirtschaftet wird. Als "Blueprint" hierfür kann die Transformation vor ca. 25 Jahren vom (hierarchischen) Telekommunikationsnetz hin zum (peer to peer) Datennetz/Internet gelten: Auch dies verstieß die ersten zehn Jahre gegen die überkommene Regulierung. Die wirtschaftlichen Konsequenzen waren u. a. der Verlust der Weltmachtstellung deutscher Unternehmen (wie Alcatel/SEL, Siemens) und der Aufstieg von Cisco und Google.
- Rahmenbedingungsanpassungen werden benötigt. Zum Beispiel, um im gesamten Meter-to-Cash-Prozess falsche Anreize zu vermeiden, wie bspw. das Kaufen und Speichern von nächtlichen Strom und den Verkauf tagsüber.
- Es müssen planbare Rahmenbedingungen für langfristige Investitionen geschaffen und eingehalten werden.
- Die Betreiber der Einzelkomponenten eines hybriden Energienetzes müssen für einen wirtschaftlichen Betrieb alle möglichen Geschäftsmodelle bedienen dürfen. Hier muss bei den Rahmenbedingungen darauf geachtet werden, dass die Grenze zwischen dem regulierten und marktwirtschaftlichen Bereich kein Hindernis darstellt.
- Die Netznutzungsentgelte für die lokalen hybriden Energienetze – die verbindenden Stromnetze – müssen so gestaltet sein, dass eine faire Kostenverteilung gewährleistet ist (z. B. Verstärkung der Leistungskomponente der Netznutzungsentgelte und Reduzierung der Arbeitskomponente).
- Es bedarf veränderter ökonomischer, rechtlicher und organisatorischer Rahmenbedingungen, um die Versorgungssicherheit durch den Einsatz hybrider Energienetze positiv zu beeinflussen.\*<sup>(3)</sup>
- Der Einsatz von Energiespeichern sollte einem breiten Akteurskreis ermöglicht werden, um netzunterstützend arbeiten zu können.
- Dem Netzbetreiber muss eine netzdienliche Energiespeicherung gestattet sein.
- Es werden Rahmenbedingungen für die regionale Bereitstellung von Systemdienstleistungen, insbesondere Blindleistungs- und Lastmanagement, benötigt. Zum Beispiel ist der Vergütungsrahmen für solche Systemdienstleistungen nicht geklärt.\*<sup>(2)</sup>
- Es bedarf einer Änderung bei der Vergabe von regionalen und kommunalen Konzessionsverträgen.\*<sup>(2)</sup>
- Es werden Rahmenbedingungen zur Ermöglichung dynamischer Energiepreise/Echtzeitpreise für Erzeuger und Verbraucher benötigt.\*<sup>(2)</sup>
- Die Praxis der Umlage von Netzentgelten etc. auf den Leistungspreis muss beendet werden.
- Die Rollen für die Verantwortungsfelder müssen vom Gesetzgeber geklärt werden (z. B. Unbundling). Insbesondere über das praktizierte Unbundling sind die Umsetzungshürden groß.\*<sup>(2)</sup>
- Der wirtschaftliche Betrieb hybrider Netze bedarf zahlreicher Neuregelungen, z. B. in den Bereichen Unbundling, Einspeisung (Wärme, Gas), Umlagen, Steuern und Abgaben.
- Abgaben/Umlagen auf verschiedene Energieträger müssen fairer verteilt werden.
- Die Anpassung der Rahmenbedingungen kann sinnvoll sein, um zu vermeiden, dass falsche Preissignale zu Fehlanreizen führen. Beispielsweise wird (Green-)Power to Heat brennstoffbezogen deutlich stärker besteuert als die Wärmeerzeugung aus z. B. fossilem Gas. Die Praxis stellt eine Benachteiligung von Power to Heat gegenüber konventioneller Wärmeerzeugung dar.

- Der geltende Rechtsrahmen steht einer Implementierung kontraproduktiv entgegen und verhindert z. B. die Schaffung regionaler Kapazitätsmärkte.
- Die Umlagenlast muss gemindert werden - z. B. durch Netzentgeltbefreiung, EEG-Umlagen.
- Derzeit besteht auf lokaler Ebene kein Auftrag und kein Vergütungsansatz, um die Versorgungssicherheit über hybride Energienetze positiv zu beeinflussen.
- Das Geschäftsmodell der Betreiber wird und muss sich verändern hin zu einer (über vom Strompreis entkoppelte und regulatorisch definierte) Vergütung für die Bereitstellung der Netzinfrastuktur sowie einer Stromhandelsplattform, die Endkunden eine direkte Teilnahme am Markt ermöglicht.

#### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Eine erhöhte Komplexität führt zu Kostensteigerungen. Risiken sind grundsätzlich nicht vorhanden.
- Die Technologie bedarf Expertenwissen, welches zu höheren Kosten führt.
- Außerhalb der hybriden Energieverbünde können die Verbraucherpreise ansteigen.
- Fehlende wirtschaftliche Anreize hemmen die Umsetzung hybrider Energienetze.
- Lokal und regional/national/international gekoppelte Systeme, die ökonomisch effizient betrieben werden, sollten Ressourcen schonen bzw. effizient nutzen, wenn diese relevante Kosten verursachen. Dies ist derzeit nicht bei allen Ressourcen gegeben (u. a. für externe Kosten wie CO<sub>2</sub> oder Umweltbelastung).

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Die Vereinbarkeit der nutzerseitigen Wahlfreiheit des Versorgers und des regionalen Anbieters sind ungeklärt. Verbraucherwahlfreiheit muss aufrechterhalten werden. Es besteht die Gefahr der Monopolbildung.
- Die Wirtschaftlichkeit spielt in hybriden Netzen eine untergeordnete Rolle. Es geht vielmehr darum, ein Bewusstsein für den Verbrauch von lokalem erneuerbarem Strom zu erzeugen. Für dieses Ziel sind die Nutzergruppen bereit, einen erheblich höheren Energiepreis zu zahlen.

## 8.6 Fall 3.2 Virtuelle Kraftwerke - Schwarmgesteuerter Betrieb von Erzeugungsanlagen zur Stromlastregulierung

**Fallbeschreibung:** Stromgeführter bzw. netzdienlicher Betrieb dezentraler (auch privater) Elektro-Energie-Erzeuger (z. B. BHKW) bei Bereitstellung positiver Regelenergie für den Ausgleich von Erzeugungs- und Bedarfsschwankungen im Stromnetz durch Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien.

**Tabelle 25: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 3.2	6	3	1	5	15

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Virtuelle Kraftwerke sind dazu befähigt, über alle vier Bewertungsdimensionen hinweg geringfügige bis deutlich positive Wirkungen zu entfalten. Eine signifikante Verbesserung ist laut beteiligten ExpertInnen in der Reduktion von Treibhausgasemissionen, der lokalen/regionalen Handlungsmöglichkeiten zur Bewältigung von Systemstörungen und einer deutlich gesteigerten Redundanz zu sehen.

Im Bereich der Leistungsfähigkeit ist für beide gekoppelten Teilsysteme eine geringfügige leistungssteigernde Wirkung feststellbar mit Tendenz hin zu einer deutlichen Steigerung. Im selben Maß wird auch die ökonomische Tragfähigkeit bewertet, bei einer zugleich neutralen bis geringfügig positiven Wirkung bezogen auf Qualität und Quantität der Dienstleistung. Es werden geringfügig sinkende Endverbraucherpreise erwartet.

Aus Perspektive der Versorgungssicherheit überwiegen geringe bis deutlich positive Wirkungen in Bezug auf Störungsanfälligkeit auf Seiten der Energieversorgung, bei den lokalen Handlungsmöglichkeiten (Modularität), der Dauer der Funktionswiderherstellung im Störfall, dem Puffer-/Speichervermögen sowie bei der generellen Anpassungsfähigkeit.

Der Bereich der Ressourcenschonung und -effizienz ist vornehmlich durch neutrale Wirkungen gekennzeichnet. Einzig dem Primärenergiebedarf wird mehrheitlich ein geringfügiges Reduktionspotenzial attestiert. Der Endenergiebedarf und das Abfallaufkommen folgen dem allgemeinen neutralen Bewertungstrend, zeigen jedoch eine leichte Tendenz zu einer geringfügigen Reduktion. Die Auswirkungen auf die Emission von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen weisen eine ausgeprägte Bewertungsweite auf, die in der Tendenz als geringfügig positiv interpretiert werden kann.

***Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (technisch) Komplexitätsverlagerung auf lokaler/regionaler Ebene; Vorhandene Notlaufeigenschaften steigern Versorgungssicherheit; Reduktion von Funktionsstörungen.
- (institutionell/organisatorisch) Verbesserungen in der Organisationsmöglichkeiten von EE; Reduzierung der Komplexität.
- (regulatorisch) Regulatorische Rahmenbedingungen sind ausreichend.

**Herausforderungen und Risiken**

Gegenüber der Vielzahl an Stärken und Potenzialen sind in einem geringen Umfang Herausforderungen und Risiken zu beachten. Die geringfügige Zunahme der technischen und organisatorischen Komplexität, der nutzerseitigen Investitionen, des Flächenbedarfs und der Abhängigkeiten sind dominierende Herausforderungen virtueller Kraftwerke. Der technischen und insbesondere organisatorischen Komplexität wird teilweise ein deutlicher Anstieg attestiert. Aus Perspektive der Versorgungssicherheit wird zudem die Abhängigkeit von den zentralen Steuerungselementen hervorgehoben

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

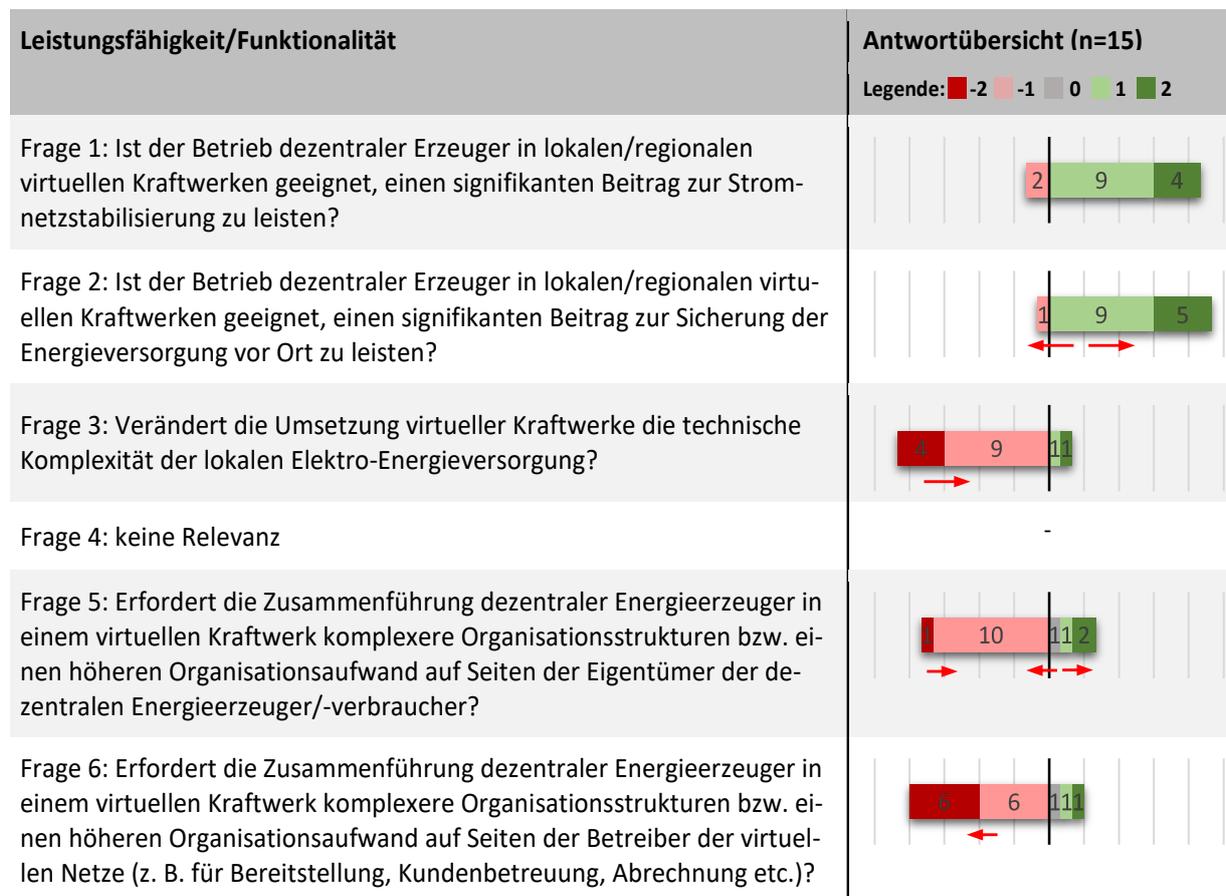
- (technisch) Speicherefordernis zur Pufferung von Störungen; Berücksichtigung des übergeordneten Netzes/Steuerungsaspekten (z. B. Netzkapazität, zentrale Steuerung, Ausfallszenarien); Standortabhängigkeit des Ressourcenschonungspotenzials; Anstieg des Steuerungsaufwandes; Erfordernis nach Daten-/Betriebssicherheit (z. B. positive Regelenergie nicht Netzdienlich); Abhängigkeit der Versorgungssicherheit von Systemparametern (z. B. von der Systemgröße, der räumlichen Verteilung).
- (institutionell/organisatorisch Aspekte) Ausgeprägtes Steuerungserfordernis; hohe Komplexität des Organisationsrahmens; einen verbesserten Informationsaustausches gewährleisten; Aufrechterhaltung von Markttransparenz u. -teilnahme.
- (regulatorisch) Abhängigkeit der Rahmenbedingung von der Betriebsstruktur; Bedarfsgerechte Vergütungsmodelle u. Anpassung der Entgelte, Abgaben usw.; Marktrollen angepasstes Energiewirtschaftsgesetz erforderlich; Realisierung einer Ressourcenfaktoren abhängige Preisbildung; Erfordernis einer Beständigkeit der Rahmenbedingungen.
- (wirtschaftlich) Bestehende Divergenz der Abgaben zwischen den Energieträgern; Erfordernis nach angepassten Betriebsmodelle für langfristige Investitionen und volatilen Preisen; Realisierungsgebote aus Kostenneutralität u. Kontinuität der Dienstleistungsqualität; hohe Abhängigkeit von der Marktintegration EE.

**Tabelle 26: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 3.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redundanz</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Nennungen</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Emission Treibhausgase</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 2)</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>• Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Folgeinvestitionen auf Nutzerseite</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Ausmaß der schädlichen Bodenveränderungen</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störungsanfälligkeit des Betriebs (Teilsystem 1)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> </ul>	

### 8.6.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 54: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Leistungsfähigkeit“



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 55: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=15) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 7: Hat die Organisation dezentraler Energieerzeuger in virtuellen Kraftwerken Konsequenzen für die lokale bzw. regionale Verfügbarkeit und Güte der Energie (z. B. Frequenzstabilität etc.)?	
Frage 8: Erfordert die Beteiligung einzelner Erzeuger an einem hybriden Kraftwerk Investitionen seitens der beteiligten privaten Anlagenbetreiber?	
Frage 9: Kann die Energieversorgung in einem virtuellen Kraftwerk Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise haben?	
Frage 10: keine Relevanz	-
Frage 11: Hat die Energieversorgung in hybriden Kraftwerken das Potenzial für eine dauerhaft kostendeckende Energiebereitstellung durch den Verbund?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 56: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=15) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 12: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Energieversorgung?	
Frage 13: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Energieversorgung?	
Frage 14: Bedingt die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke einen erhöhten Flächenbedarf vor Ort?	
Frage 15: Führt die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch den Energieverbrauch im Verbund?	
Frage 17: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube,...) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastruktur?	
Frage 18: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastruktur?	
Frage 19: Wie wirkt die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke auf den Bedarf an Rohstoffen für Bau und Erhalt der Infrastruktur?	
Frage 20: Verändert die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke die Abhängigkeit der Energieversorgung vor Ort von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf das Abfallaufkommen beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat die Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

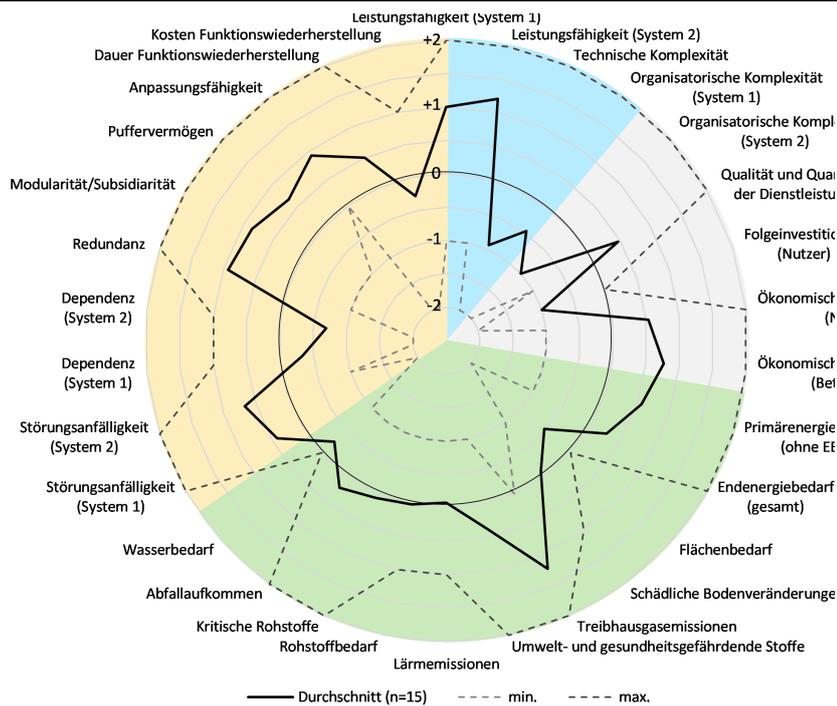
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 57: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 3.2, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=15) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 23: Hat die Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der lokalen bzw. regionalen Energieversorgung generell?	
Frage 24: Hat die Organisation der Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Energieversorgung in Bezug auf wetterbedingte Störungen wie Hitze, Starkregen, Hagel, Überflutung, Wind?	
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall der zentralen Steuerung eines virtuellen Kraftwerks zugleich zu Einschränkungen in der lokalen bzw. regionalen Energieversorgung?	
Frage 26: Führt ein (Funktions-)Ausfall der zentralen Steuerung eines virtuellen Kraftwerks zugleich zu Einschränkungen in der Energieversorgung bei den privaten Anlagenbetreibern?	
Frage 27: Trägt die Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken generell zu einer größeren Vielfalt und Ersetzbarkeit von Energiequellen bei und damit zu einer verbesserten Versorgungssicherheit vor Ort?	
Frage 28: Verändert die Energieversorgung durch virtuelle Kraftwerke die Handlungsmöglichkeiten der Akteure auf lokaler/regionaler Ebene, mögliche Systemstörungen zu überwinden? (Hinweis: z. B. im Gegensatz zur rein zentralisierten Energieversorgung)	
Frage 29: Kann die Energieversorgung durch virtuelle Kraftwerke das Puffer- und Speichervermögen in lokalen Energienetzen verbessern, um mögliche wetterbedingten Störungen (z. B. Unterbrechung überregionaler Energieversorgung) auszugleichen?	
Frage 30: Hat die Energieversorgung durch virtuelle Kraftwerke einen Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit des lokalen bzw. regionalen Energiesystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Wie wirkt die Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken in Hinblick auf die Dauer möglicher Reparaturen/Funktionsstörungen nach Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 32: Hat die Energieversorgung in virtuellen Kraftwerken einen Einfluss auf die Kosten (Personal, Material, ...) der Reparatur/Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme?	

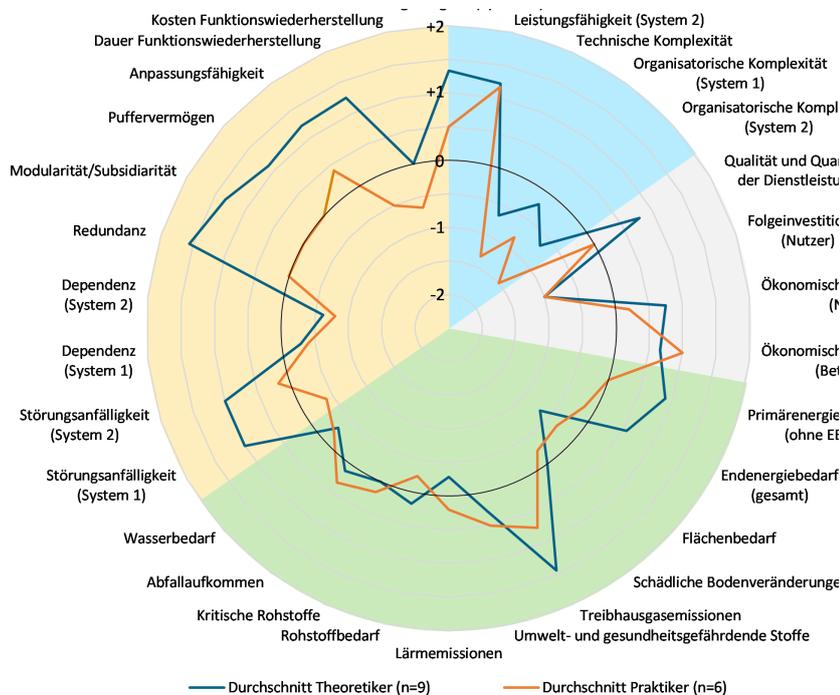
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 58: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 3.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 59: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 3.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.6.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Eine Zunahme beziehungsweise Abnahme der Komplexität sollte nicht ausschließlich auf lokaler Ebene betrachtet werden. Eine Zunahme der Komplexität auf lokaler Ebene kann eine Reduktion der Komplexität im Gesamtsystem zur Folge haben. Die beiden Effekte sind gegeneinander abzuwägen.
- Üblicherweise haben Virtuelle Kraftwerke Notlaufeigenschaften, die die negativen Auswirkungen eines Ausfalls (z. B. einer Komponente) minimieren.
- Wenn schwarzstartfähige Einheiten vorhanden sind, können virtuelle Kraftwerke die Versorgungssicherheit unterstützen. \*(2)
- Unser bisheriges zentrales System wird zunehmend instabil und von Cyberattacken betroffen. Nur ein dezentrales System reduziert die Verwundbarkeit, indem mögliche Störungen isoliert und die Systemfunktion von den nicht betroffenen Regionen her wieder aufgebaut werden kann.
- Es bestehen keine spezifischen Risiken hinsichtlich Versorgungssicherheit im Zusammenhang mit Virtuellen Kraftwerken. \*(2)

#### Institutionelle und organisatorische Aspekte

- Viele bisherige Dienstleistungen, die aus der überkomplexen Organisation des Stromnetzes herühren, werden entfallen. Das ist für die betroffenen Firmen bedauerlich, aber ökonomisch, ökologisch und für die Kunden erfreulich, da diese Dienstleistungen keinen Mehrwert generieren.

#### Regulatorische Aspekte

- Es bedarf keiner Anpassung der Rahmenbedingungen, sondern nur eine konsequente Umsetzung der bereits Bestehenden.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Bei der Bereitstellung von Regelenergie durch Virtuelle Kraftwerke müssen auch die Kapazitätsgrenzen des Verteilnetzes berücksichtigt werden.
- Das System wird auf europäischer Verbundebene stabilisiert. Wenn es darum geht, lokal beispielsweise für die Spannungshaltung Blindleistung bereitzustellen oder am Einspeisemanagement teilzunehmen, dann sind virtuelle Kraftwerke hierfür geeignet, bzw. sollten mit in das Informationssystem eingebunden werden.
- Virtuelle Kraftwerke repräsentieren eine gut geeignete Maßnahme, um zu einer besseren Stabilisierung des Gesamtnetzes beizutragen. Im Fall der Spannungshaltung können virtuelle Kraftwerke zu einer Netzstabilität beitragen, im Fall der Frequenzhaltung nicht.
- Virtuelle Kraftwerke können nur dann eine Netzstabilität erzeugen, wenn sie auch mit der Netzleittechnik verknüpft werden.
- Die Dimensionierung eines Virtuellen Kraftwerks steht in direktem Zusammenhang mit der erzielten Versorgungssicherheit. Anlagen relevanter Größe (z. B. von Stadtwerken) sind geeignet

- die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Kleine Anlagen sind diesbezüglich nicht relevant.
- Virtuelle Kraftwerke können die Versorgungssicherheit nicht fördern, da sie über große Gebiete verteilt sind.
  - Mit der Realisierung virtueller Kraftwerke geht ein gesteigerter Steuerungsaufwand einher.
  - Virtuelle Kraftwerke sind generell eine gute Option, die stets in Betracht gezogen werden sollte. Jedoch muss man im Einzelfall schauen wie die lokale bzw. regionale Netzsituation ist und wie das virtuelle Kraftwerk betrieben werden soll. Soll es z. B. Regelleistung oder Blindleistung für ein überlagertes Netz erbringen, so wird sich das u. U. auf das lokale Stromnetz negativ auswirken.
  - Eine Stabilisierung der Energienetze ist nur dann gegeben, wenn die Steuersignale die Abhängigkeit von der Infrastruktur beinhalten.
  - Eine zentrale Steuerung virtueller Kraftwerke ist weder sinnvoll noch praktikabel. Es bestehen hinreichende Möglichkeiten einer dezentralen Steuerung, bei der ein zentrales System ausschließlich Notfunktionen übernimmt (z. B. Schwarzstarteigenschaften, treten in unter 0,01% der Betriebszeit auf).
  - Die Steuerung von Virtuellen Kraftwerken ist üblicherweise nicht auf einen Inselbetrieb ausgelegt. Folglich bedingt ein Funktionsausfall des übergeordneten Netzes den Ausfall des Virtuellen Kraftwerks.
  - Im lokalen Netzbetrieb kann der extern gesteuerte Betrieb bzw. die automatische Regelung virtueller Kraftwerke ggf. auch negative Einflüsse haben, z. B. eine ungewollte Inselnetzbildung.
  - Viele kleine Anlagen benötigen mehr Ressourcen als wenige große Anlagen. \*(2)
  - Alleine durch die Zusammenschaltung von Erzeugungseinheiten zu einem virtuellen Kraftwerk verändert sich der Primärenergiebedarf nicht, da sich der Anlagenbestand durch diese Maßnahme nicht verändert. Allerdings ist zu postulieren, dass es sich bei dezentralen Erzeugungsanlagen, die in einem virtuellen Kraftwerk zusammengeschaltet werden können, vermehrt um regenerative Erzeugungsanlagen und Speicher handelt, wodurch ein virtuelles Kraftwerk nur aus dieser Tatsache heraus weniger Treibhausemissionen aufweist.
  - Virtuelle Kraftwerke reflektieren die alte Welt. Flexibilität bei Wind und Sonne ist ökonomisch recht teuer, die wesentliche Flexibilität wird von der Verbraucherseite kommen sowie von den (micro-)BHKW. Aber all diese eignen sich hervorragend dafür, Stromnetze zu stabilisieren.
  - Ohne Speicher bieten virtuelle Kraftwerke in ungünstigen Wettersituationen im Vergleich zu einzelnen Anlagen nur wenig Handlungsmöglichkeiten.
  - Virtuelle Kraftwerke sind einer von vielen Bausteinen, um die Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz in der Energieversorgung zu optimieren.
  - Die Bereitstellung positiver Regelenergie ist nicht netzdienlich, sondern eher das Gegenteil.
  - Der Einfluss virtueller Kraftwerke auf die Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz ist standortabhängig.
  - Aufgrund der derzeit ausgezeichneten Versorgungssicherheit in Deutschland ist wenig Potenzial für Verbesserungen durch virtuelle Kraftwerke gegeben.
  - Künftig könnten vermehrt auftretende Netzengpässe auftreten, die einen hohen Netzausbaubedarf im Verteilnetz begründen.
  - Die Daten- und Betriebssicherheit durch digitale Vernetzung stellt ein Risiko für die Versorgungssicherheit dar. Daher besteht ein Bedarf an hoch verfügbarer und sicherer IT zur Steuerung.

- Virtuelle Kraftwerke alleine sind nicht dazu geeignet ein lokales Netz während eines gestörten übergeordneten Netzes zu versorgen. Dazu sind erhebliche technische Weiterentwicklungen erforderlich (z. B. Inselnetzbetrieb) und insbesondere deutlich mehr lokale Speichermöglichkeiten von Nöten, die nicht zwangsweise durch eine Kopplung im Sinne eines virtuellen Kraftwerks gegeben sind.
- Für die technische wie auch betriebswirtschaftliche Umsetzung virtueller Kraftwerke gibt es verschiedene Möglichkeiten, die zu unterschiedlichen Antworten führen können.
- Fossil betriebene BHKW werden durch die Einbindung in virtuelle Kraftwerke verstetigt.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Der Stabilisierungsgrad von Energienetzen hängt von der Verantwortung für die Erbringung der Systemdienstleistung ab. Die Verantwortung liegt derzeit beim Übertragungsnetzbetreiber. Eine lokale Regelung ist auf jeden Fall von Vorteil für das regionale Netzlastmanagement.
- Ziel des Zusammenschlusses ist es, einen Mehrwert für die Anlagenbetreiber zu ermöglichen. Die Koordinierung kann entweder auf Erzeugerseite oder Netzseite geschehen. Wenn es auf Netzseite geschieht, müssen sich die Anlagenbetreiber nicht koordinieren.
- Um die Versorgungssicherheit zu fördern, ist ein besserer Informationsaustausch zwischen den Betreiber des virtuellen Kraftwerks und dem Netzbetreiber notwendig.
- Die Verantwortlichkeiten für die Stabilität von Verteilnetzen muss angepasst werden.
- Der Wettbewerb muss transparent stattfinden, sodass keine Monopolbildung stattfindet.
- Die hinter virtuellen Kraftwerken liegenden Konzepte der Nutzung dezentraler Verbrauchsflexibilität sind gut geeignet, die Versorgungssicherheit zu unterstützen. Der bisherige Organisationsrahmen, über diesen sich Kraftwerke in das System einzubringen, ist nicht geeignet: Viel zu komplex und teuer. Es geht sehr viel einfacher.
- Die Komplexität des alten hierarchischen Stromsystems darf nicht auf lokale Strukturen übertragen werden.
- Die Steuerung von Anlagen im Netz durch verschiedene Akteure ist in Zukunft zunehmend marktgesteuert und daher durch den Netzbetreiber schwer prognostizierbar/nachvollziehbar. Die Steuerung der Anlagen kann negative Rückwirkungen auf das Netz bedingen.
- Die Qualifizierung von virtuellen Kraftwerken für die Teilnahme an Regelenergiemärkten ist kompliziert und uneinheitlich.
- Hauptproblem von Smart Grid 1.0 ist, dass diese nur für sehr wenige handelnde Akteure (z. B. wenige Großkraftwerke) ausgelegt und geeignet sind. Künftig mit Smart Grid 2.0 werden eine Vielzahl von zu koordinierende Akteure eingebunden sein, wofür Marktmechanismen deutlich besser geeignet sind.
- Statt wie bisher einen "einseitigen" Markt zu fordern ("virtuelles Kraftwerk" heißt: Die Flexibilität kommt von der Erzeugungsseite, und wenn es dort keine gibt, holt man sich diese von der Verbrauchsseite), sollte man gleich einen zweiseitigen organisieren, der allen Teilnehmern (Erzeugern, Verbrauchern) diskriminierungsfreien und kostengünstigen Zugang ermöglicht, also z. B. ein Echtzeitmarkt für Strom.

### **Regulatorische Aspekte**

- Virtuelle Kraftwerke können auch für den Verteilnetzbetreiber netzdienlich eingesetzt werden. Hierfür fehlen aktuell aber die Voraussetzungen bei den regulatorischen Rahmenbedingungen.
- Die erforderlichen Rahmenbedingungen hängen davon ab, wie man das virtuelle Kraftwerk betreiben will und wie sich dieses zusammensetzt. Setzt sich ein virtuelles Kraftwerk aus mehreren erneuerbaren Energieanlagen und Batterien zusammen, so ist z. B. eine wöchentliche Ausschreibung und Erbringung von Primärregelleistung problematisch, da die EE-Prognosen für diesen Zeitraum zu ungenau sind. Für einen Beitrag zur Spannungshaltung oder zur Verhinderung eines Netzausbaus gibt es zurzeit keine geeigneten Vergütungsmodelle.
- Alle Akteure haben sich an den rechtlichen Rahmen zu halten. Welche Ziele die Legislative bzw. Exekutive vorgibt und wie diese dann interpretiert werden, ist schwer vorherzusehen. Es kann Anreize für virtuelle Kraftwerke geben. Aber bei der Ausgestaltung wird es Kompromisse geben.
- Es bedarf planbare regulatorische Rahmenbedingungen, die langfristige Investitionen begünstigen und nicht hemmen.
- Je nach Verfügbarkeit und Güte der Energie sind Rahmenbedingungen erforderlich, die einen verteilnetzdienlichen Einsatz virtueller Kraftwerke erlauben.
- Die Bepreisung von Ressourcenfaktoren (u. a. Landverbrauch, Umweltverschmutzung, CO<sub>2</sub>-Emissionen) hat Auswirkungen auf die Ressourcenschonung und -effizienz. Daher kann die Änderung von Abgaben und Umlagen sowie Steuern die Ressourcenschonung und -effizienz direkt beeinflussen. \*(3)
- Es muss eine umfangreiche Änderung der Marktrollen erfolgen wie im Energiewirtschaftsgesetz.
- Die rechtliche Rolle eines Direktvermarkters sollte geklärt werden. Bisher ist dies insbesondere im EEG nicht vorgesehen, dieser hat sich aber mittlerweile in der Branche etabliert hat.
- Derzeit werden Steuern und Abgaben im Bereich der Speicherung von Energie doppelt erhoben, beispielsweise, wenn Strom mit Hilfe von Batterien zwischengespeichert wird. Folglich bedingt die Praxis steuerliche Nachteile. Dies gilt unter anderem auch für Genossenschaftsmodelle.
- Es bedarf einer umfangreichen Anpassung der Rahmenbedingungen, um die Qualität, die Verbraucherpreise und die Wirtschaftlichkeit positiv zu beeinflussen.
- Für eine erhöhte Versorgungssicherheit sind Anpassungen der Rahmenbedingungen vorzunehmen. Das Energiesystem ist über diesen Rahmen regulatorisch determiniert. \*(2)
- Um eine kostendeckende Energiebereitstellung zu ermöglichen, sind Anpassungen auf folgenden Ebene notwendig: Umlagen, Abgaben und der Einordnung elektrischer Speicher.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Neben einem gesteigerten Steuerungsaufwand entstehen gegebenenfalls finanzielle Aufwendungen wie die Nachrüstung entsprechender Komponenten.
- Virtuelle Kraftwerke sind optional. Sie werden nur installiert solange sie die erwarteten Dienstleistungen und Preise halten können. Das wirtschaftliche Risiko ist unter anderem abhängig von dem verfolgten Geschäftsmodell und Kooperationen.
- Die Investitionen und Preise sind stark von den Betriebsmodellen abhängig.
- Risiken bezüglich Dienstleistungsqualität, der Verbraucherpreise und dem wirtschaftlichen Einsatz hängen stark von der zukünftigen Art und Weise der Marktintegration von erneuerbaren

Energien ab. Eine Grundsatzfrage besteht in der Abwägung zwischen Kapazitätsmärkten und anderen Alternativen zur Bereitstellung gesicherter Leistung.

- Die Ziele von Betreiber und Verbrauchern stehen in Konkurrenz. Betreiber wollen ihren Gewinn maximieren und Verbraucher möglichst günstig versorgt werden.
- Es müssen neue Modelle gefunden werden, die die finanziellen Risiken einer langfristigen Investition bei Unsicherheiten in der Preisentwicklung als auch der Volatilität kurzfristiger Preisschwankungen beherrschen. Gegen Volatilität werden Finanzdienstleister versichern.
- Die kostendeckende Energiebereitstellung durch virtuelle Kraftwerke ist belastet durch eine unterschiedliche Abgabenlast für unterschiedliche Energieträger.

### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Der Begriff des virtuellen Kraftwerks transportiert ein zentrales Element des fossilen Zeitalters in die Zukunft, welcher daher die Phantasie und Lösungsansätze beeinträchtigt oder sogar verhindert. Unser langfristiges Ziel ist ein völlig karbonfreies Stromsystem, in dem es dann natürlich auch keine "Kraftwerke" mehr gibt, sondern weitgehend kommerzielle und private "Prosumer", die sowohl erzeugen als auch verbrauchen.
- Bestimmte soziale und wirtschaftliche Gruppen werden subventioniert werden. Dabei ist darauf zu achten, die gewünschten Effekte des Markteinflusses nicht zu gefährden. Dies ist beispielsweise dann möglich, wenn der Strompreis nicht subventioniert wird (= Marktverzerrung), sondern der Zugang zum Stromnetz.

## 8.7 Fall 4.1 Stromnetzstabilisierung durch Einbindung Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge

**Fallbeschreibung:** Virtueller Zusammenschluss dezentraler Stromspeicher durch Einbindung einzelner (auch privater) Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge für die Bereitstellung positiver und/oder negativer Regelenergie (durch zentral geregeltes Laden und teilweise Rück-Einspeisung) zu Zwecken der Stromnetzstabilisierung.

**Tabelle 27: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 4.1	3	2	6	2	<b>13</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Der Einbindung Akkumulator-basierter Elektrofahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung wird ein ausgeprägtes Potenzial zur Leistungssteigerung der Stromnetze beigemessen. Der deutliche Anstieg zur Leistungssteigerung der Stromversorgung resultiert vordergründig aus dem deutlichen Anstieg des zur Verfügung stehenden Puffer- und Speichervermögens. Zudem wird durch das zentral gesteuerte Lademanagement ein optimaler Ladevorgang der Akkumulatoren gewährleistet, wodurch geringfügig die Leistungsfähigkeit der eingebundenen E-Fahrzeuge ansteigen kann.

Gegenüber der leistungssteigernden Wirkung nimmt außerdem geringfügig die Störanfälligkeit der Stromnetze bei einem allgemeinen Anstieg der Verfügbarkeit von elektrischen Strom ab. Bezogen auf die eingebundenen E-Fahrzeuge ist keine Änderung der Störanfälligkeit feststellbar. Es besteht ein geringfügiges bis deutliches Potenzial zur gesteigerten Anpassungsfähigkeit an stärkere und häufigere Wetterextreme. Bezogen auf die Kriterien der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz werden mehrheitlich keine Auswirkungen erwartet. Lediglich für Treibhausgasemissionen, die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe und die Rohstoffe wird eine leichte Abnahme erwartet. Aus ökonomischer Perspektive besteht ein geringfügiges bis deutliches Potenzial zu einem stabilen Geschäftsmodell. Zugleich ist eine Kostenreduktion für die Fahrzeugnutzung denkbar.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Ressourcenschonung durch mehrfachgenutzte Batteriespeicher; Batteriespeicher zur Stromnetzstabilität geeignet; kurz bevorstehende Marktreife.

#### Herausforderungen und Risiken

Herausforderungen und Risiken bestehen hauptsächlich im Bereich der Komplexitätssteigerung, der sozialen und ökonomischen Verträglichkeit seitens der Fahrzeughalter sowie der Abhängigkeiten

(Dependenzen) zwischen den gekoppelten Systemen. Durch Realisierung der Kopplung steigt insbesondere die technische Komplexität für beide gekoppelten Teilsysteme geringfügig bis stark an. Ebenso für die organisatorische Komplexität. Jedoch steigt die organisatorische Komplexität auf Seiten der Stromnetzbetreiber stärker an als für die eingebundenen Fahrzeughalter. Auf Seiten der privaten E-Fahrzeughalter ist ein geringfügiger Investitionsbedarf zu erwarten bei einem gleichzeitigen Potenzial zur Reduktion der Kosten für die Fahrzeugnutzung.

Der Kopplungsnutzen durch die Einbindung Akkumulator-basierter E-Fahrzeuge ist vordergründig einseitig im Bereich der Stromnetzbetreiber verortet. Es besteht eine leichte Tendenz zum Anstieg der Störanfälligkeit in Bezug auf die nutzerzeitige Fahrzeugverfügbarkeit. Demgegenüber steigen die Abhängigkeiten (Dependenzen) geringfügig bis deutlich an. Das heißt, dass der Funktionsausfall eines der gekoppelten Teilsysteme in einer geringfügigen bis deutlichen Funktionseinschränkung des jeweils anderen Teilsystems mündet.

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

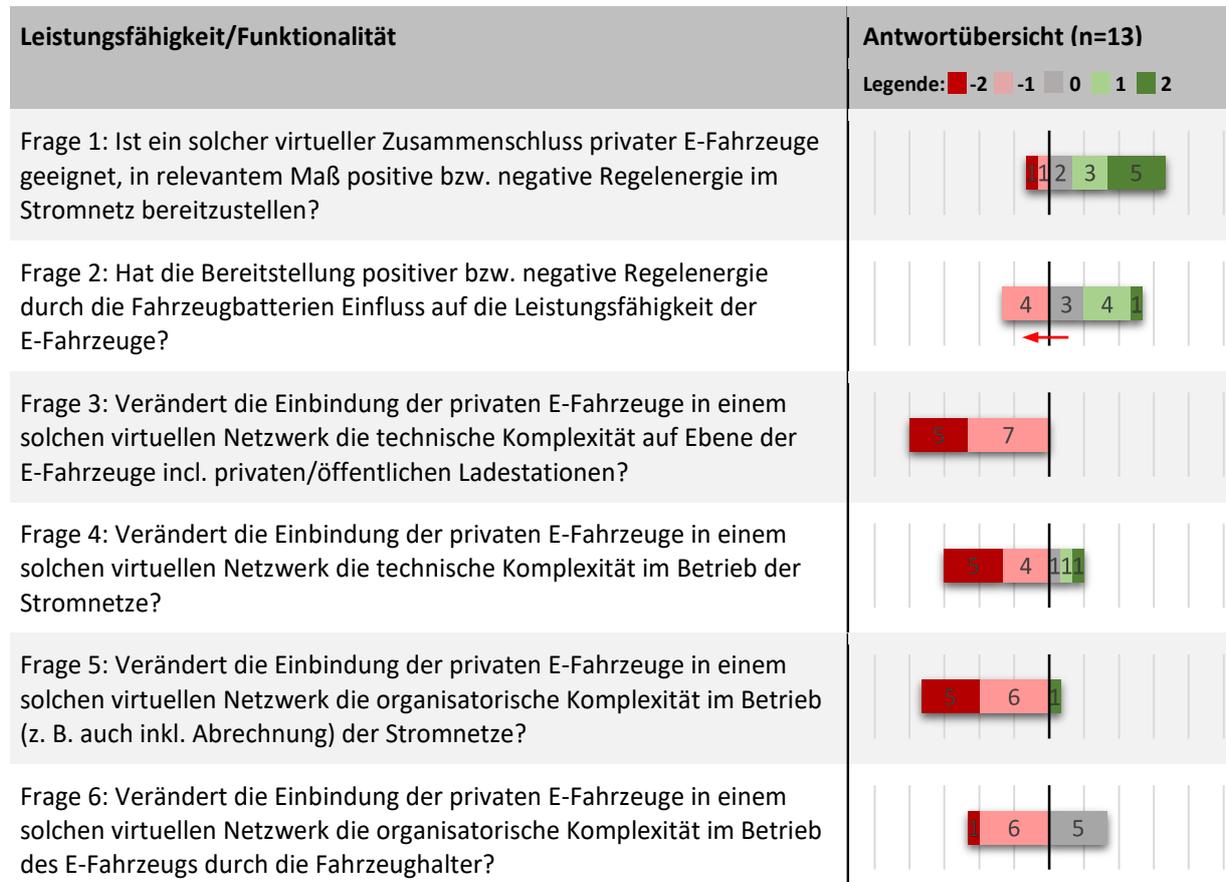
- (technisch) Potenzial zur Überlastung der Stromnetze; Technische Komplexität u. Anpassung der Verteilnetze; Keine gesicherte Regelleitung möglich; Gefahr der Fragmentierung durch Sonderlösungen; Reduzierte Ressourcenschonung durch Einsatz von Akkumulatoren; Weitreichende Vernetzungspotenziale vorhanden, die Grundvoraussetzung für Energiewende sind.
- (institutionell/organisatorisch) Hoher organisatorischer Aufwand; Ausgeprägter Organisatorischer Anpassungsdruck vorhanden; Informationsaustauscherfordernis fahrzeugbezogener Daten.
- (regulatorisch) Bedarf an angepassten Geschäftsmodellen; Minderung der Entgelte, Umlagen etc. erforderlich; Anpassung der Tarifmodelle; Beständige Rahmenbedingungen; Öffnung des Regelenergiemarktes für solche Anwendungen; Datensicherheitslücken bestehen.
- (wirtschaftlich) Fehlende fiskalische Anreize; Kostenneutralitätsversprechen gegenüber Nutzern hemmt die Entwicklung.
- (gesellschaftlich) Potenzielle Nutzereinschränkungen sind möglich; Steigerung der Akzeptanz durch Praktikabilität u. ökonomische Anreize möglich.

**Tabelle 28: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 4.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Puffer- u. Speichervermögen</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 1)</li> <li>• Redundanz</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Quantität und Qualität der Dienstleistung</li> <li>• nutzerseitige Investitionen</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 2)</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Schädliche Bodenveränderung</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

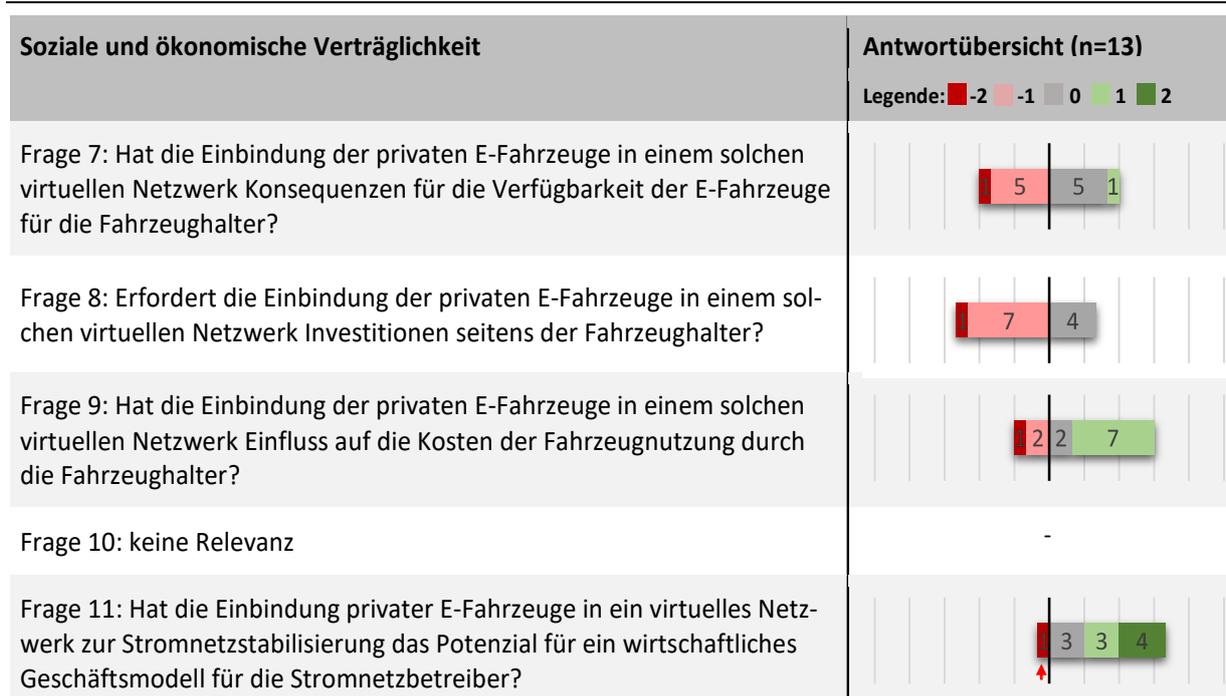
### 8.7.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 60: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Leistungsfähigkeit“



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 61: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 62: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2												
Frage 12: Hat die vernetzte Einbindung von E-Fahrzeugen zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Energiebereitstellung in den betreffenden Stromnetzen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>8</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	0	0	8	1	2	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	0												
0	8												
1	2												
2	0												
Frage 13: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Energiebereitstellung in den betreffenden Stromnetzen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	3	0	6	1	2	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	3												
0	6												
1	2												
2	0												
Frage 14: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf den Flächenbedarf vor Ort?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	3	0	7	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	3												
0	7												
1	1												
2	0												
Frage 15: Führt die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung zu schädlichen Bodenveränderungen vor Ort?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>11</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	1	0	11	1	0	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	1												
0	11												
1	0												
2	0												
Frage 16: Verändert die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG)?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	1	0	3	1	3	2	3
Rating	Count												
-2	0												
-1	1												
0	3												
1	3												
2	3												
Frage 17: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube, Stickoxide)?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	2	0	4	1	3	2	3
Rating	Count												
-2	0												
-1	2												
0	4												
1	3												
2	3												
Frage 18: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Emission von Lärm?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	3	0	7	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	3												
0	7												
1	1												
2	0												
Frage 19: Wie wirkt die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung auf den Bedarf an Rohstoffen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	2	0	3	1	5	2	1
Rating	Count												
-2	0												
-1	2												
0	3												
1	5												
2	1												
Frage 20: Wie wirkt die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	2	0	7	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	2												
0	7												
1	1												
2	0												
Frage 21: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf das Abfallaufkommen vor Ort?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>9</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	1	0	9	1	2	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	1												
0	9												
1	2												
2	0												
Frage 22: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf den Wasserbedarf vor Ort?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>12</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	0	0	12	1	0	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	0												
0	12												
1	0												
2	0												

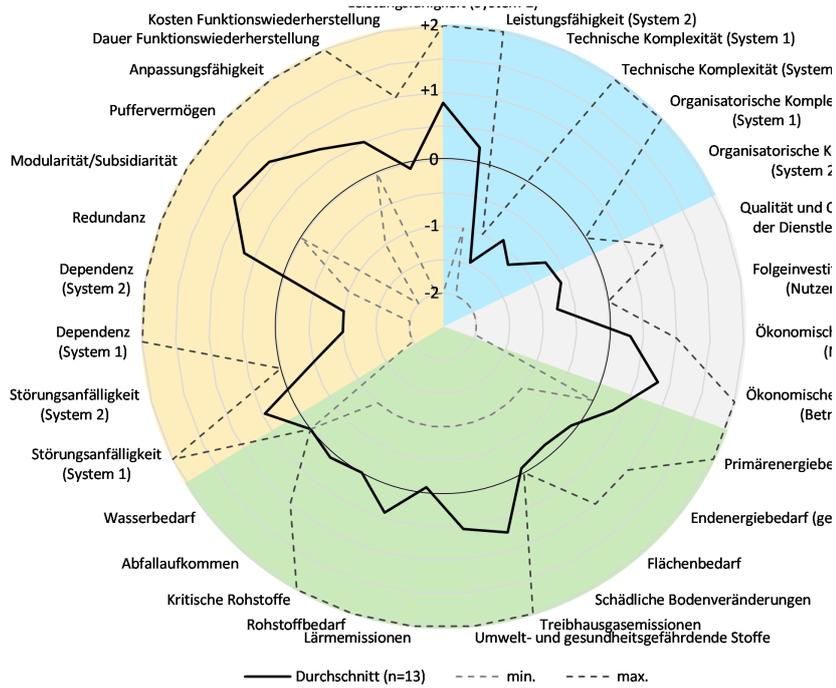
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 63: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.1, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=13) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2												
Frage 23: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Stromnetze?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>2</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	2	2	5	2	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	2	2	5	2	0								
Frage 24: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der eingebundenen Fahrzeuge?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>0</td><td>4</td><td>6</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	0	4	6	0	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	0	4	6	0	0								
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall in den Stromnetzen zugleich zu Einschränkungen im Betrieb der eingebundenen E-Fahrzeuge?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	4	5	2	1	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	4	5	2	1	0								
Frage 26: Führt ein (Funktions-)Ausfall im Bereich des virtuellen Netzwerks (z. B. gestörte Erreichbarkeit im Datennetz) zugleich zu Einschränkungen in der Stromnetzstabilisierung?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>1</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	1	6	1	0	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	1	6	1	0	0								
Frage 27: Trägt die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung grundsätzlich zu einer besseren Verfügbarkeit von elektrischer Energie in den Stromnetzen bei?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	1	4	5	2	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	1	4	5	2	0								
Frage 28: Verändert die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung die Handlungsmöglichkeiten der lokalen Akteure bei der Stromnetzstabilisierung?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>4</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	0	2	5	4	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	0	2	5	4	0								
Frage 29: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung einen Einfluss auf die Fähigkeit der beteiligten Stromnetze, wetterbedingte Störungen durch verbesserte Puffer- und Speicherkapazitäten auszugleichen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>2</td><td>3</td><td>6</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	2	3	6	0	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	2	3	6	0	0								
Frage 30: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung einen Einfluss auf die technische Anpassungsfähigkeit der Stromnetze an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	1	3	3	3	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	1	3	3	3	0								
Frage 31: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Dauer möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>0</td><td>7</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	0	7	2	2	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	0	7	2	2	0								
Frage 32: Hat die vernetzte Einbindung privater E-Fahrzeuge zur Stromnetzstabilisierung Einfluss auf die Kosten (Personal, Material) der Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme im Betrieb der Stromnetze?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><th>Count</th><td>1</td><td>7</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	-2	-1	0	1	2	Count	1	7	2	0	0
Rating	-2	-1	0	1	2								
Count	1	7	2	0	0								

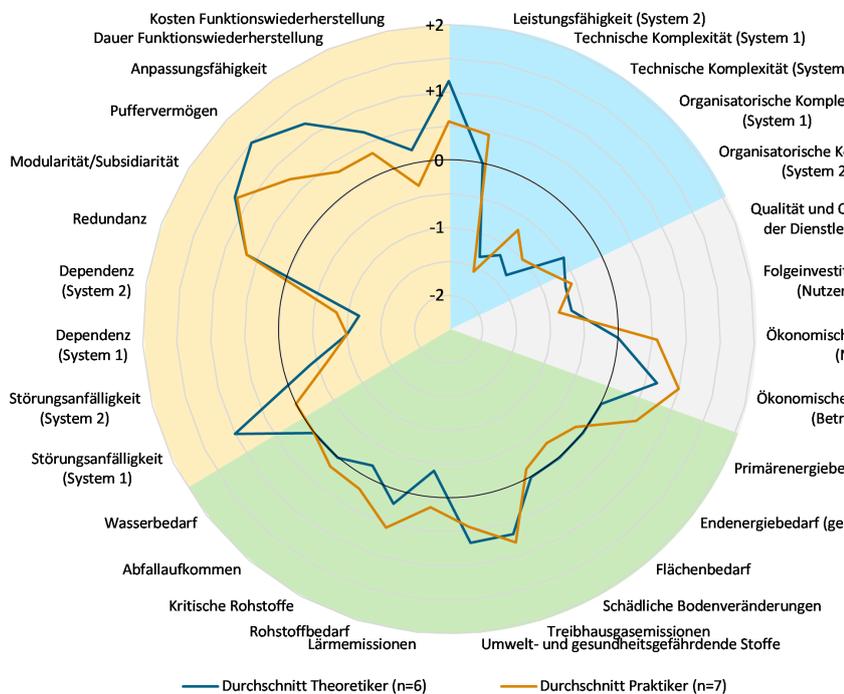
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 64: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 4.1



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 65: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 4.1



Quelle: eigene Darstellung

## 8.7.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Batteriespeicher werden mehrfach und intensiver genutzt, was eine gesteigerte Ressourceneffizienz zur Folge hat. \*(2)
- Autobatterien haben wesentlich höhere Kapazitäten als kleine Heimspeicher und somit auch größere als Regelenergie nutzbare Kapazitäten.
- Die Einbindung von E-Fahrzeugen wirkt dezentral und schnell, wodurch die Stromnetzstabilität unterstützt werden kann.
- Die Einbindung von E-Fahrzeugen zur Stromnetzstabilisierung ist eine geeignete Option insbesondere im Zusammenspiel mit EEG-Anlagen.
- Die Technologie steht kurz vor der Marktreife. \*(4)
- Zunehmende Dezentralisierung und Digitalisierung verringern die von einem Ausfall betroffenen Gebiete.
- Langfristig werden ausgediente Fahrzeugakkumulatoren im Sinne des SecondLife-Ansatzes als stationäre Speicher dienen.
- Die Bereitstellung von Energie kann im Störfall auch unabhängig vom Netzbetrieb (evtl. durch eine Art Notfallmodus/Inselbetrieb) erfolgen.
- Mit zunehmender Digitalisierung, Dezentralisierung und Modernisierung in den Energienetzen könnten Qualität und Wirtschaftlichkeit profitieren.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Bei den Netzen muss gesichert sein, dass die lokal bereitgestellte Regelenergie (Niederspannung) auch am Ort des Bedarfs (ÜNB-Abruf auf HS-Ebene) ankommen kann und keine Netzengpässe dazwischen liegen.
- Die Gesamttopologie der Verteilnetze wird sich erheblich verändern, dadurch verringert sich eher die Wahrscheinlichkeit eines großflächigen Stromausfalls.
- Durch bessere Steuerbarkeit kann die dargebotene regenerative Energie besser genutzt werden, falls ausreichende Trassenleistungen zur Verfügung stehen.
- Bei Rückspeisungen aus den Batterien der E-Fahrzeuge ins Stromnetz steht der Aufwand zur Realisierung nicht im Verhältnis zum Nutzen.
- Die Bereitstellung von Regelenergie durch E-Fahrzeug-Flotten ist ein positiver Beitrag zur Sicherung der Leistungsfähigkeit von Stromnetzen. Es ist zu beachten, dass der Effekt von E-Fahrzeug-Flotten auf die Verteilnetze (also faktisch keine Regelenergie) um ein vielfaches höher ist.
- Der bidirektionale Ansatz mit Bereitstellung positiver Leistung erscheint derzeit eher unwahrscheinlich
- Bei spontanen Störungen unterschiedlicher Dimensionen können Fahrzeugbatterien die Stabilität von Stromnetzen nicht sicherstellen.
- Aufgrund der nötigen Poolgröße ist eine große Anzahl an E-Fahrzeugen für eine Teilnahme am Regelenergiemarkt notwendig.

- Bei nicht mit dem Netzbetreiber abgestimmten Regelleistungsbereitstellungen kann es zur Überlastung der Verteilnetze und damit zu einem höheren Risiko von lokalen Stromausfällen kommen. Die Auswirkungen auf das E-Fahrzeug werden kontrovers diskutiert.
- Bei Nichtbeteiligung der Fahrzeuge an einer Regelung/Steuerung werden die Stromnetze höher belastet oder sogar überlastet. Daher ist das ungesteuerte Laden in der Masse keine Alternative und das gesteuerte Laden langfristig keine Option, sondern ein Muss. Ob die Regelung im Rahmen von Regelenergie oder virtuellem Kraftwerk erfolgt ist unerheblich. Wesentlich ist als Hauptkriterium die Netzdienlichkeit. \*(4)
- Ein nahezu unkontrollierter und stark segmentierter Markt kann zu Verstärkungseffekten führen, die das Stromnetz punktuell an die Belastungsgrenze bringen können.
- Fahrzeugbatterien bieten keine sichere Verfügbarkeit von Regelleistung. Eine solche Lösung stellt ggf. ein Risiko für die Stromnetze dar.
- Der Batterieeinsatz bedingt leicht negative Verluste im Vergleich zu DSM oder Erzeugungsmanagement. Die Verluste müssen ausgeglichen werden. Wenn dies mit erneuerbaren Energien erfolgt, dann ist dies umweltneutral, ansonsten entstehen höhere Emissionen.
- Die Einbindung von Fahrzeugbatterien kann deren Lebensdauer einschränken. \*(3)
- Die Geeignetheit der Option für eine Unterstützung der Leistungsfähigkeit von Stromnetzen wird davon abhängen, ob die E-Fahrzeuge auch ans Stromnetz angeschlossen sind.
- Durch die Komplexität entstehen Risiken, daher sind Sonderlösungen für einzelne technische Dienstleistungen auf ein Minimum zu reduzieren.
- Die Batterieherstellung stellt ein Risiko für die Ressourcenschonung und -effizienz dar.
- Sinnvoll erscheint ein zentrales Lademanagement, sodass nicht zum gleichen Zeitpunkt am selben Strang mehrere Schnellladesäulen die volle Ladeleistung bereitstellen. Daher stellen die Ladesäulen gemeinsam nur so viel Leistung bereit, wie das Netz bereitstellen kann.
- Im Fall von (wetterbedingten) Störungen kann ein leichterer Netzwiederaufbau mit erhöhtem Aufwand zur Sicherstellung von Spannungslosigkeit in fehlerbehafteten Netzgebieten durch Rückspeisung der Batterien (Regelungsfrage) die Folge sein.
- Die Menge der Energie, die durch ein Netzwerk von Elektroautos bereitgestellt werden könnte, ist zu gering, um einen signifikanten Einfluss auf die Stabilisierung des Netzes zu haben.
- Die Geeignetheit der Einbindung von E-Fahrzeugen zur Stromnetzstabilisierung wird sich erst in den nächsten Jahrzehnten zeigen. \*(2)
- Das Einbinden von Elektrofahrzeugen im Stromnetz ist Grundvoraussetzung für das Gelingen der Energiewende und somit unausweichlich. Der Ausbau volatiler regenerativer Energien hängt stark von der vorhandenen Speicherleistung ab. \*(2)
- Neben Wärmepumpen sind E-Ladestationen bzw. die damit verbundene Elektromobilität die einzigen nennenswerten Verbraucher auf privater Ebene. Dem gegenüber stehen private PV-Anlagen.
- Die geringe Fortschrittsgeschwindigkeit vor dem Hintergrund der Herausforderungen verwundert.
- Die Auswirkungen wetterbedingter Störungen auf die Stromversorgung sind vermutlich nicht größer als bisher.

### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Sowohl auf der Netz- als auch auf der Marktseite inklusive der eingebunden E-Fahrzeuge ist von einem erhöhten Koordinierungs- und Prozessaufwand auszugehen.
- Es sind eine Vielzahl neuer Prozesse zwischen den Markttrollen zu implementieren (z. B. Abrechnungsprozesse, Informationsaustausch, Prognoseprozesse).
- Die für eine netzdienliche Steuerung notwendigen Daten zum Fahrzeug (wie z. B. Akkukapazität und Ladezustand) sollten zwingend vom Fahrzeug bereitgestellt werden.
- Das Verhalten der Fahrzeuge ist ohne Implementierung entsprechender Informationsaustauschsysteme nicht vorhersehbar und stellt somit ein Risiko dar.
- Eine aufwendige Prozessimplementierung behindert die Umsetzung.
- Es bedarf der Anpassung von Standards, Techniken und Geschäftsmodellen.
- Stromnetzbetreiber sind regulierte Unternehmen. Regelleistung wird diskriminierungsfrei beschafft.
- Die Sicherung der Versorgungssicherheit erfordert kostensteigerndes Expertenwissen vor Ort.
- Soweit Regelstrategien die Besonderheiten beider Seiten unterstützen, gibt es eher Chancen als Risiken für die Leistungsfähigkeit.
- Es ist schwer, selbst im Forschungsbereich, Ausnahmegenehmigungen zu erreichen (siehe Projekt SINTEG), und es besteht eine Lücke bei der Überführung von Forschungsergebnissen in markttaugliche Produkte.
- Es sollte geprüft werden, ob andere Alternativen ggf. eine bessere Eignung oder ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen (z. B. stationäre PtX-Anlagen).
- Eine unterschiedlich ausgeprägte Ladensäuleninfrastruktur sollte an unterschiedliche Nutzungsfälle angeglichen werden: Schnelles DC-Laden (> 100 kW) an Bereichen mit kurzen Standzeiten (z. B. Autobahnen) und parallel gesteuertes Laden (0 - 22 kW) in Bereichen mit langen Standzeiten (z. B. Firmen und Wohnhausparkplätzen).

### **Regulatorische Aspekte**

- Es sind erhebliche regulatorische Anpassungen notwendig.
- Die Bereitstellung von Regelleistung durch E-Fahrzeug-Flotten ist im Sinne einer gesteigerten Flexibilität eine geeignete Option, um die Leistungsfähigkeit von Stromnetzen zu unterstützen, aber nicht im Korsett der aktuellen Regelleistung mit Präqualifikation und sehr hohem IT-Aufwand.
- Für einen möglichen lokalen netzdienlichen Flexibilitätseinsatz bedarf es noch regulatorischer Anpassungen (siehe auch BDEW Positionspapier zum Ampelkonzept).
- Die derzeitige Regulierung der Strompreise und das aktuelle EEG verhindern jegliche Innovation und Geschäftsmodellentwicklung in diesem Bereich. \*(2)
- Zur Nutzung von Anbieterflexibilität (u. a. Erzeugung und Rückspeisung) als auch der Nachfrage auf lokaler Ebene (Verteilnetze) erfordert eine regulatorische Anpassung, um den Nutzer angemessener als über pauschale Entgeltanpassung in den Prozess mit einzubeziehen.
- Die Umsetzung bedarf der Realisierung von variablen Tarifmodellen, die noch nicht in Sicht sind.
- Lastvariable Tarife sind derzeit verfügbar. Der nicht flexible Anteil für Letztverbraucher ist aktuell zu hoch, um Smart Demand umsetzen zu können.
- Unbundling zwischen Netz und Vertrieb erschwert die Gesamtoptimierung.
- Auf regulatorischer Ebene stellt sich unter anderem die Frage: Was ist EEG-Umlagepflichtig?

- Es bedarf einer lokalen Ausschreibung von Regelenergie.
- Eine Flexibilität ohne die für Großkraftwerke gedachten IT-Sicherheitsauflagen und Fernwirkungsanforderungen ist zu bevorzugen.
- Der Smart Meter-Roll-Out verläuft gebremst, mit immer wieder veränderten Rahmenbedingungen.
- Der Marktzugang für Regelenergie muss gesichert werden - Anpassung der Präqualifikationskriterien des Regelenergiemarktes.

#### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Es bedarf ökonomischer Anreize beispielsweise über eine Flexibilisierung der EEG-Umlage.
- Es bedarf Anreize (z. B. steuerliche Entlastung oder ähnliches), wenn Verbraucher mit ihrem Fahrzeug das Stromnetz entlasten sollen.
- Wenn der beschriebene Fall Realität würde, dann dürften damit keine Kosten für den Verbraucher verbunden sein. Die Kosten müsste der Stromnetzbetreiber im Rahmen seines Geschäftsmodells tragen.
- Ein größerer Markt reduziert die Kosten, wodurch Netznutzungsentgelte für die Kunden sinken.
- Die optimale Umsetzung sollte aus einer technischen und volkswirtschaftlichen optimalen Lösung resultieren.
- Der netzdienliche Effekt durch Verschiebung von Ladeleistung ist wirtschaftlich höher zu bewerten als der verlustbehaftete Einsatz der Batterie.

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Der mögliche finanzielle Anreiz für den Fahrzeugbesitzer kann die befürchteten Einschränkungen (z. B. Reichweite, Lebensdauer) nicht aufwiegen.
- Die Einbindung von E-Fahrzeugen in Stromnetzen kann mit einem Komfortverlust auf Nutzerseite einhergehen.
- Der Erfolg und die Akzeptanz einer solchen Lösung auf der Anbieterseite stehen und fallen mit der Einfachheit und der ökonomischen Attraktivität der Lösung.
- Aus Kundensicht muss das Angebot überzeugend sein.
- Die Einbindung von Fahrzeugbatterien in den Regelenergiemarkt schränkt ggf. die Fahrzeugverfügbarkeit ein, da unerwartete Fahrten erschwert werden.
- Da der Fahrzeugnutzer das Auto nicht in erster Linie als Teil der Stromversorgung sieht, stellt er möglicherweise zur Aufrechterhaltung der persönlichen Mobilität gerade in kritischen Situationen sein Fahrzeug nicht zur Verfügung, was ein Risiko für die Versorgungssicherheit darstellt.

## 8.8 Fall 4.2 Induktions-basiertes Laden von Fahrzeugen in Bereichen des fließenden Verkehrs (z. B. Straßenkreuzungen)

**Fallbeschreibung:** Betrieb induktionsbasierter Schnell-Lade-Bereiche für Elektro-Fahrzeuge (z. B. Busse, LKW, PKW) in Bereichen des fließenden Verkehrs (in Straßenabschnitten, Staubereichen, an Ampelkreuzungen etc.) inkl. der individuellen Abrechnung mit modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (z. B. Blockchain-basierte Lösungen).

**Tabelle 29: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 4.2	4	2	2	1	9

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Neben der Vielzahl an Herausforderungen und Risiken, die es zu bewältigen gilt, sind in einem geringen Umfang positive Wirkungen zu erwarten. Hauptsächlich besteht Potenzial zu geringfügigen Verbesserungen in der Versorgung von E-Fahrzeugen mit elektrischer Energie und den Handlungsmöglichkeiten von lokalen Akteuren (Modularität) in einem etwaigen Störfall.

#### *Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):*

- (weiteres) Ausgeprägte Eignung der Lösung für Busse.

#### Herausforderungen und Risiken

Die Bewertungsergebnisse weisen nahezu über alle Kriterien hinweg eine große Bewertungsweite auf. Ein eindeutiger Trend der Bewertungen lässt sich daher oft nicht erkennen. Eine Polarisierung ist auch über die Bewertungshinweise hinweg feststellbar. Dennoch können grobe Entwicklungstendenzen herausgearbeitet werden.

Im Bereich der technischen und organisatorischen Komplexität ist beidseits der Teilsysteme ein geringfügiger bis deutlicher Komplexitätsanstieg feststellbar. Die technische Implementierung der induktionsbasierten Ladezonen innerhalb der Straßeninfrastruktur hat keine Änderung der wahrgenommenen Qualität der Straßeninfrastruktur zur Folge.

Es wird im geringfügigen Maß der Bedarf nach nutzerseitigen Investitionen erwartet. Darüber hinaus besteht das Potenzial zu einer deutlichen Preissteigerung des geladenen Stroms. Auch aus der Betreiberperspektive ist von einem deutlichen Anstieg der Investitions- und Betriebskosten auszugehen. Im Bereich der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz schwanken die Bewertungen zwischen negativen bis neutralen Wertungen. In einer leicht negativen Tendenz steigen geringfügig der Primärenergiebedarf, die Treibhausgasemissionen, der Flächenbedarf, der Endenergie- und

Rohstoffbedarf sowie die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen. Im Bereich des Abfallaufkommens, der Lärmemissionen, der umwelt-/ gesundheitsgefährdenden Stoffe und des Wasserbedarfs gehen die Befragten von einer Wirkungsneutralität aus, ebenso im Bereich der Versorgungssicherheit.

**Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Verringerte Ressourcenschonung durch Akkumulatoren und Anpassungsbedarfe; Setzt herstellerübergreifende Systemkompatibilität voraus; Hoher Aufwand bei geringen Wirkungsgraden.
- (institutionell/organisatorisch) Klärung der Zuständigkeiten zu Bau und Betrieb; Hohe Organisation in der Abrechnung des geladenen Stroms; Zusätzliche Ladeinfrastruktur zu bestehenden Systemen.
- (regulatorisch) Anpassung von Grenzwerte für elektromagnetische Felder.
- (wirtschaftlich) Hoher Investitions- u. Betriebsaufwand; Anstieg der Verbraucherpreise.
- (gesellschaftlich) Erfordernis der Akzeptanz von elektromagnetischen Feldern; Förderung von Rebound-Effekten.

**Tabelle 30: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 4.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 1)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 2)</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Redundanz</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• nutzerseitige Investitionen</li> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>• Quantität u. Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Schädliche Bodenveränderung</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 1)</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>• Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>• Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

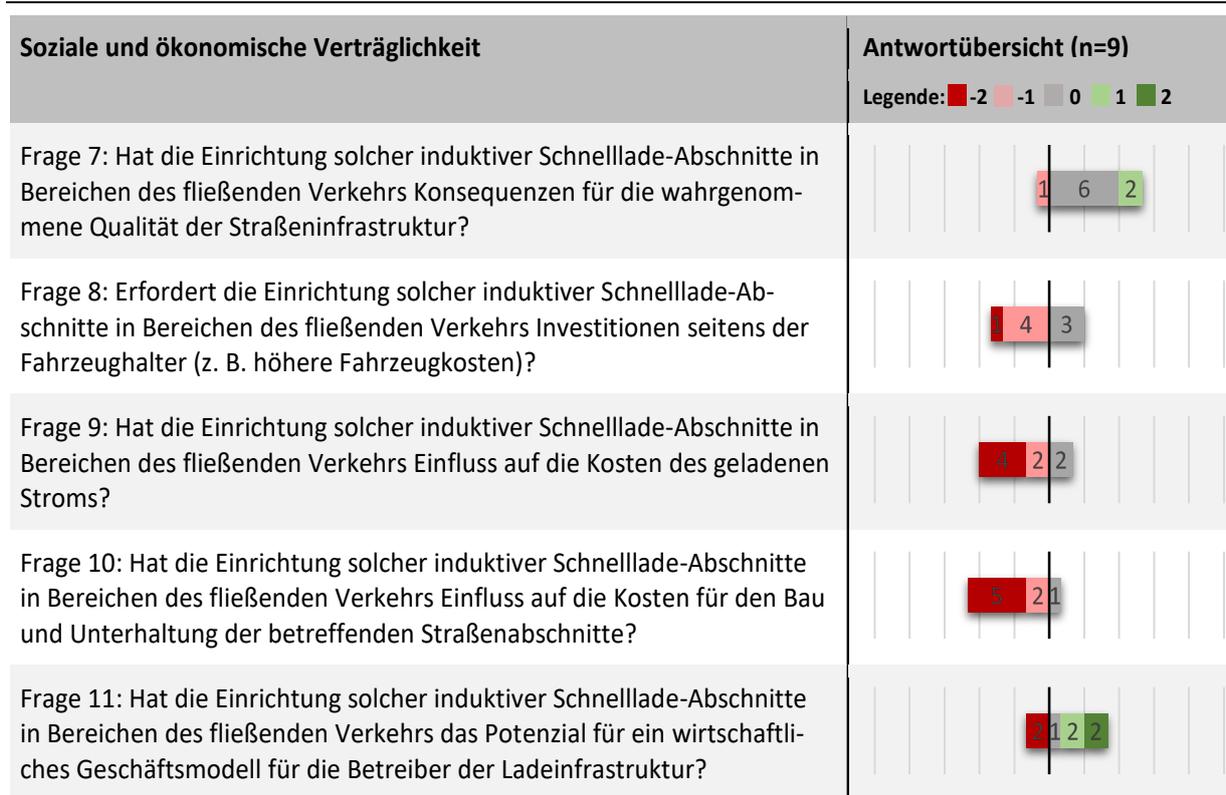
### 8.8.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 66 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=9) Legende: -2 -1 0 1 2												
Frage 1: Sind solche Schnelllade-Bereiche in Abschnitten des fließenden Verkehrs geeignet, die Energieverfügbarkeit für E-Fahrzeugen in relevantem Maß zu unterstützen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>4</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	4	0	0	1	4	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	4												
0	0												
1	4												
2	0												
Frage 2: Hat die Aufladung von Fahrzeugbatterien in Abschnitten des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Straßennetzes in den betreffenden Abschnitten?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	0	-1	2	0	5	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	0												
-1	2												
0	5												
1	1												
2	0												
Frage 3: Erfordert die Einrichtung solcher induktiver Schnelllade-Bereiche eine höhere technische Komplexität auf der Seite von Bau und Unterhalt der Straßen?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	1	-1	3	0	0	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	1												
-1	3												
0	0												
1	1												
2	0												
Frage 4: Führt die Einrichtung solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs zu einer höheren technischen Komplexität auf der Seite der Ladeinfrastruktur?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>4</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	1	-1	4	0	0	1	1	2	1
Rating	Count												
-2	1												
-1	4												
0	0												
1	1												
2	1												
Frage 5: Verändert die Einrichtung solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs den organisatorischen Aufwand im Betrieb der Straßennetze?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	1	-1	3	0	0	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	1												
-1	3												
0	0												
1	1												
2	0												
Frage 6: Verändert die Einrichtung solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs den organisatorischen Aufwand im Betrieb der Ladeinfrastruktur?	<table border="1"> <tr><th>Rating</th><th>Count</th></tr> <tr><td>-2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> </table>	Rating	Count	-2	1	-1	3	0	0	1	1	2	0
Rating	Count												
-2	1												
-1	3												
0	0												
1	1												
2	0												

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 67 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 68 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=9) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 12: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Strombereitstellung für E-Fahrzeugen?	
Frage 13: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Strombereitstellung für E-Fahrzeuge?	
Frage 14: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf den Flächenbedarf vor Ort?	
Frage 15: Führt die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs zu schädlichen Bodenveränderungen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG)?	
Frage 17: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube, Stickoxide)?	
Frage 18: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Emission von Lärm?	
Frage 19: Wie wirken die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs auf den Bedarf an Rohstoffen?	
Frage 20: Wie wirken die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf das Abfallaufkommen vor Ort?	
Frage 22: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf den Wasserbedarf vor Ort?	

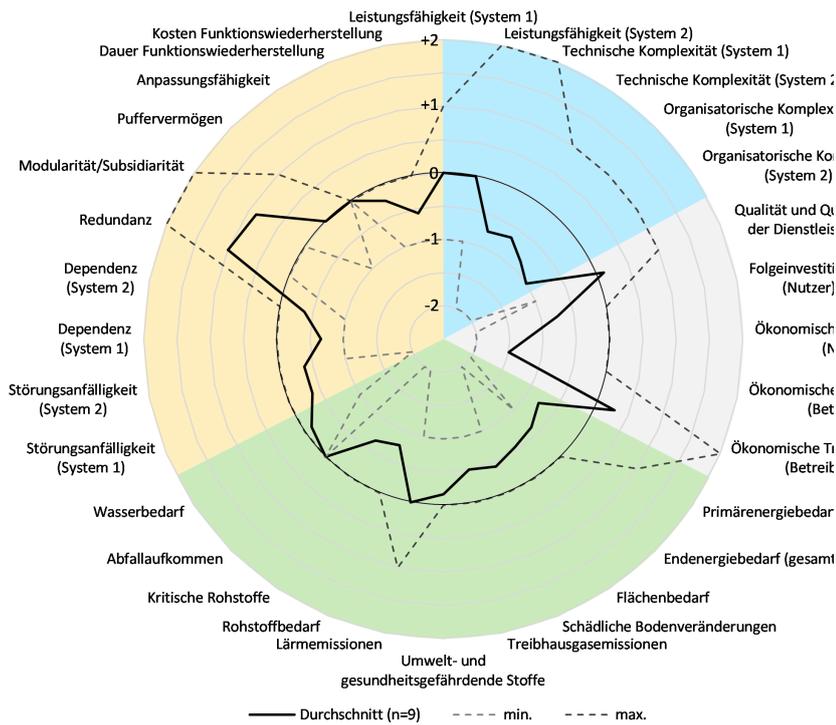
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 69 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 4.2, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=9) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 23: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der betreffenden Straßenabschnitte?	
Frage 24: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiven Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Ladeinfrastruktur?	
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall in den betreffenden Straßenabschnitten zugleich zu Einschränkungen im Betrieb der Ladeinfrastruktur?	
Frage 26: Führt ein (Funktions-)Ausfall im Bereich der Ladeinfrastruktur zugleich zu Einschränkungen im betreffenden Straßennetz?	
Frage 27: Trägt die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs grundsätzlich zu einer besseren Stromversorgung von E-Fahrzeugen?	
Frage 28: Verändert die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs die Handlungsmöglichkeiten der lokalen Akteure bei der Sicherstellung der Ladeinfrastruktur?	
Frage 29: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs einen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Mobilität im Fall wetterbedingter Störungen?	
Frage 30: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs einen Einfluss auf die technische Anpassungsfähigkeit der Ladeinfrastruktur an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Dauer möglicher Betriebsunterbrechungen (Straßen/Ladeinfrastruktur) durch wetterbedingte Störungen?	
Frage 32: Hat die Einrichtung und der Betrieb solcher induktiver Schnelllade-Abschnitte in Bereichen des fließenden Verkehrs Einfluss auf die Kosten (Personal, Material) der Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme im Betrieb von Straßen und Ladeinfrastrukturen?	

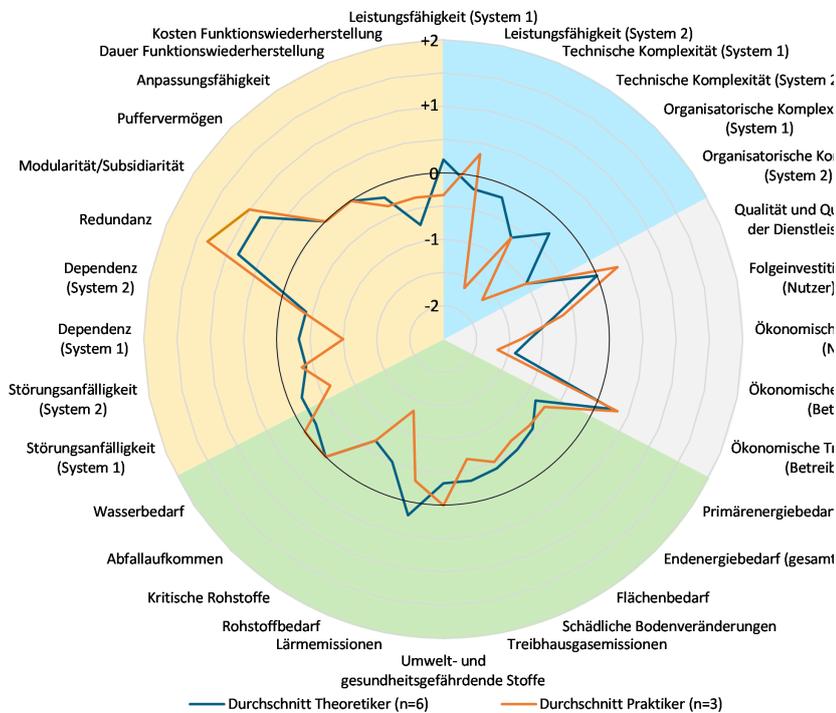
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 70: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 4.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 71: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 4.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.8.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Weitere Anmerkungen

- Das Konzept ist für Busse insbesondere an Haltestellen sehr sinnvoll.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Das Verschleißverhalten der Straßen ändert sich.
- Durch die Heterogenität von Fahrzeugen und Straßen muss ein leistungsstarkes Angebot (systemische Ladeleistung und Anzahl der Ladeabschnitte) vorhanden sein, um Fahrzeuge zu laden.
- Die Nutzungsdauer und die zu erreichenden Wirkungsgrade benötigen sehr hohe Leistungen, um einen wahrnehmbaren Effekt und eine gute Effizienz beim Ladevorgang zu bewirken. Daher resultieren aus der Technologie große Herausforderungen, welchen nur geringe positive Wirkungen gegenüberstehen. \*(2)
- Der infrastrukturelle Aufwand für ein reines Unterstützungsladen ist zu hoch und repräsentiert daher keine geeignete Option.
- Der Nutzen ist aufgrund der kurzen Verweilzeit begrenzt.
- Der Ladevorgang bzw. die Leistung ist von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig oder könnte sogar durch Wiedereinflüsse beeinträchtigt werden. \*(2)
- Die erforderliche Positionierungsgenauigkeit der Fahrzeuge schränkt die Nutzbarkeit ggf. ein.
- Die höheren Stromleistungen bedingen Auswirkungen auf Lebensdauer von Batterien.
- Ob die übertragbare Leistung ausreichend sein wird, um das konduktive Laden bei gleicher Effizienz/Wirkungsgrad zu ersetzen, ist offen.
- Hohen Investitionen auf stationärer Seite steht die Gefahr von Inkompatibilität bei Systemweiterentwicklungen gegenüber.
- Das induktive Laden besitzt einen geringeren Wirkungsgrad als per Kabel. Die Verluste müssen zusätzlich erzeugt werden. Wenn dies mit Erneuerbaren Energien erfolgt, dann ist das umweltneutral, ansonsten sind höhere Emissionen die Folge.
- Da Fahrzeuge deutlich länger auf Parkplätzen stehen, als auf Straßen unterwegs sind, sollte die induktive Ladelösung auf Parkzonen oder auch Haltestellen konzentriert werden.
- Prinzipiell ist das induktive Laden von E-Fahrzeugen in Bereichen des fließenden Verkehrs eine geeignete Ladeoption, aber sollte aufgrund von Lade- und Transportverlusten nur als Ergänzung betrachtet werden.
- In Staubereichen sollte eher investiert werden, um durch intelligente Verkehrssteuerung (z. B. grüne Welle) Staus zu vermeiden und Stehzeiten zu reduzieren. Verbleibende Ampelkreuzungen könnten mit induktiven Ladeabschnitten ausgestattet werden.
- Es existieren vernachlässigbare Risiken hinsichtlich der Leistungsfähigkeit (z. B. Baumaßnahmen und selten auftretenden Reparaturen).
- Mit einem zunehmenden Einsatz automatisierter und autonomer Fahrzeuge sollte die Anzahl der beschriebenen Verkehrsbereiche zum induzierten Laden abnehmen, was wiederum Ressourcenschonung und -effizienz zunehmend negativ beeinflusst.

- Es bestehen Risiken bezüglich Ressourcenschonung und -effizienz durch die notwendigen Anpassungen der Infrastruktur und der Fahrzeuge sowie durch eventuelle Fehlplanungen des Bedarfs.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Es bestehen Risiken hinsichtlich der Kombination von Tiefbau und E-Technik.
- Es stellt sich die Betreiberfrage im öffentlichen Straßenland. Staatlich? Kommunal? Privat?
- Aufgrund der vergleichsweise aufwendigen Abrechnungsprozesse usw. bestehen Zweifel, ob ein tragfähiges Geschäftsmodell möglich ist.
- Der Neuaufbau einer zusätzlichen Ladeinfrastruktur neben der konduktiven Ladeinfrastruktur bedeutet einen höheren Ressourcenaufwand.
- Bereiche des fließenden Verkehrs sind weniger geeignet als Bereiche des ruhenden Verkehrs, wie Bushaltestellen, Taxistreifen, Supermarktparkplätze, Autoreinigungsstationen, Drive-Through an Schnellrestaurants.

#### **Regulatorische Aspekte**

- Es bedarf wahrscheinlich einer Anpassung im rechtlichen Bereich wie beispielsweise von Sicherheitsanforderungen aufgrund der hohen Ladeleistungen.
- Eventuell besteht die Notwendigkeit, die Grenzwerte für magnetische Felder zu überprüfen, sowie die Anpassung des Normenentwurfs.

#### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Durch die Ungleichheit der Nutzungsdauern von Straßen und der Induktionstechnologie kann der Unterhaltsaufwand steigen.
- Es sind zusätzliche Stromkosten zu erwarten, wenn erhebliche Teile der Fahrzeugflotte im nachmittäglichen Pendlerverkehr geladen werden und zudem mit Verbrauchspeaks zusammenfallen.

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Es müssen die Grenzwerte für magnetische Felder im fahrzeughnahen Bereich eingehalten werden. Eventuell ist eine Anpassung des Normenentwurfs nötig, dem ein gesellschaftlicher Aushandlungsprozess vorgelagert ist.
- Hinsichtlich der entstehenden elektrischen Felder werden Risiken in der Akzeptanz gesehen, die auf die E-Mobilität ausstrahlen könnten.
- Das Signal „Laden beim Fahren“ führt eher zu mehr Fahrten, um Strom zu sammeln und setzt so ein falsches Signal.

## 8.9 Fall 5.1 Power to Heat (PtH) - Speicherung von Überschussstrom in Wärmenetzen

**Fallbeschreibung:** Gesteuerte Umwandlung von Überschussstrom aus regenerativen Energiequellen (z. B. Wind, Solar) in thermische Energie sowie Einspeisung in bestehenden Wärmenetzen bei gleichzeitiger Bereitstellung negativer Regelleistung zur Stromnetzstabilisierung (z. B. durch Einsatz von Heizpatronen oder Wärmepumpen).

**Tabelle 31: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 5.1	6	-	6	3	<b>15</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Power to Heat besitzt das Potenzial, in einem geringfügigen bis deutlichen Maß zur Stabilisierung der Stromnetze beizutragen. Über die durch Wandlung von elektrischer Energie bereitgestellte thermische Energie resultiert eine leicht positive Wirkung für die Sicherung bzw. Steigerung der lokalen Wärmeenergieversorgung. Ferner entfaltet die Wandlung von Überschussstrom vornehmlich innerhalb des angekoppelten Wärmeenergiesektors eine deutlich positive Wirkung. Die positive Wirkung bezogen auf die Leistungsfähigkeit spiegelt sich auch im Bereich der Versorgungssicherheit wieder.

Über alle Kriterien der Versorgungssicherheit hinweg ist eine neutrale bis geringfügig positive Tendenz feststellbar. Besonders die Kriterien Redundanz, Puffer- und Speicherfähigkeit sowie lokale/regionale Anpassungsfähigkeit im Kontext wetterbedingter Störungen sind durch einen leicht positiven Trend bestimmt. Veränderungen in der Störanfälligkeit können aus dem gekoppelten Betrieb nicht kontrastiert werden. Gleiches gilt für die Dependenz. Es besteht lediglich eine negative Subtendenz in der Störanfälligkeit des angekoppelten Wärmesektors. Selbiges gilt für die Abhängigkeit (Dependenz) der Stromnetze von den Wärmenetzen (z. B. im Fall einer geringen Nachfrage nach thermischer Energie trotz vorhandener Stromüberschüsse).

Für die Nutzer resultiert keine Änderung in der wahrgenommenen Energie- und Wärmeversorgung. Nutzerseitige Investitionen werden nicht erwartet. Für Endverbraucherpreise insbesondere für thermische Energie besteht das Potenzial zu einer geringfügigen Preisreduktion. Die Endverbraucherpreise für elektrische Energie sind dahingehend durch eine nahezu ausgeglichene Verteilung von positiven sowie negativen Wertungen gekennzeichnet. Für Betreiber der gekoppelten Systeme besteht ein geringfügig positiv bewertetes Potenzial zu einem stabilen Geschäftsmodell.

Neben den deutlich positiven Wirkungen im Bereich der Leistungsfähigkeit, der Versorgungssicherheit und der sozialen sowie ökonomischen Verträglichkeit bewerten die ExpertInnen den allgemeinen Entwicklungstrend der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz neutral bis geringfügig positiv. Gesondert hervorzuheben sind hierbei die nahezu übereinstimmend positiv bewerteten

Kriterien Primärenergiebedarf, Treibhausgasemissionen und Emission von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen. Daneben wird die Entwicklung des Endenergiebedarfs als neutral bis geringfügig positiv gewertet, ähnlich dem Bedarfs an kritischen Rohstoffen und der emittierten Lärmemissionen. Zudem wird keine Auswirkung auf schädliche Bodenveränderung, das Abfallaufkommen und den Wasserbedarf erwartet. Diese Wirkungsneutralität auf Seiten des Ressourcenaufwands ist im Verhältnis zur geringfügigen bis deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit als positiv zu bewerten.

***Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (institutionell/organisatorisch) relativ geringer Organisationsaufwand durch intrasektorale Kopplung.
- (wirtschaftlich) Minderungspotenzial von Netzentgelten möglich.

**Herausforderungen und Risiken**

Im Allgemeinen bestehen nahezu keine tiefgreifenden Herausforderungen, die aus der Kopplung selbst resultieren. Insbesondere der geringfügige Anstieg der technischen und organisatorischen Komplexität ist zu erwähnen. Darüber hinaus ist im Bereich der Ressourcenschonung und der Ressourceneffizienz von einem geringfügigen Anstieg des Flächen- und Rohstoffbedarfs auszugehen. Risiken resultieren vornehmlich aus den geltenden Rahmenbedingungen, die aus den Befragungshinweisen hervorgingen.

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

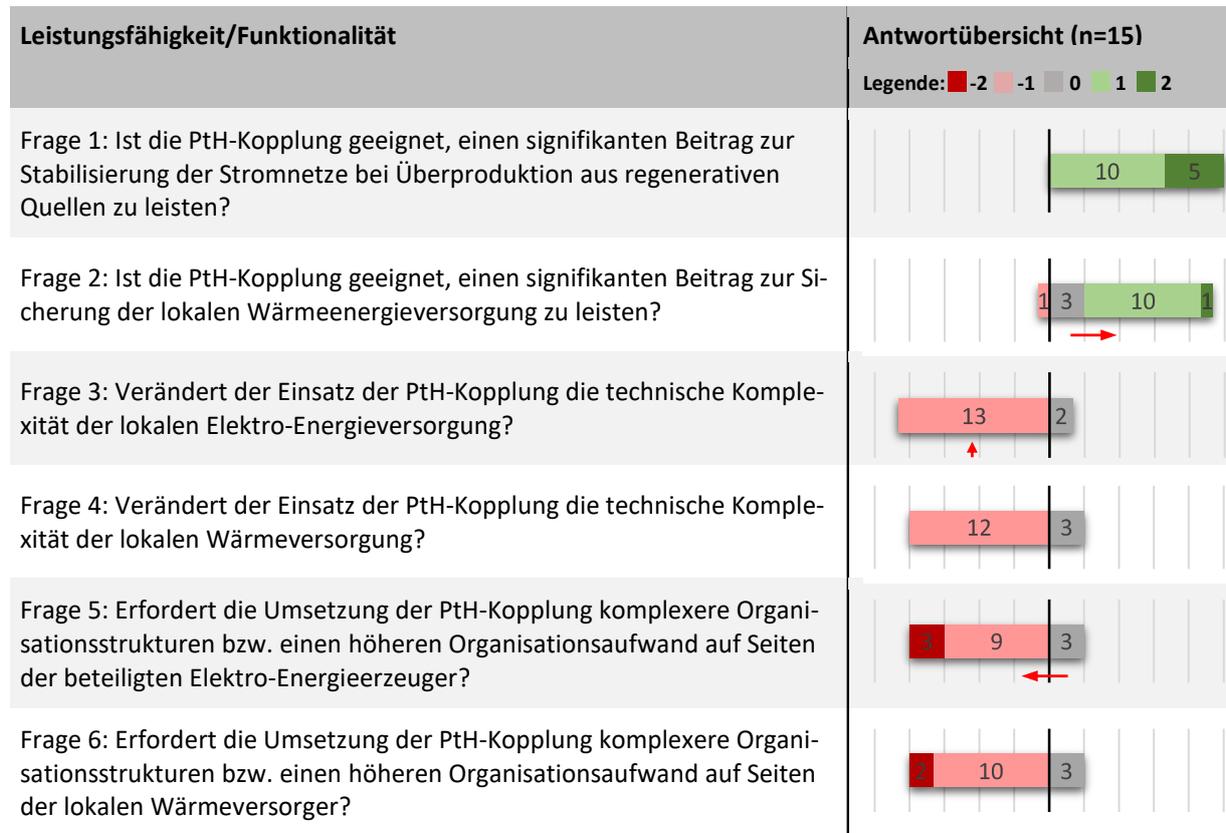
- (technisch) Redundanzanfordernis/Speicherlösungen werden benötigt; hohe Steuerungskomplexität; Nutzung von PtH sollte nur im Fall fehlender Netzkapazität genutzt werden; andere Nutzungsalternativen von Überschussstrom mit höheren Wirkungsgraden sind zu bevorzugen (z. B. Wärmepumpen); Ressourceneffizienz ist ausführungsabhängig.
- (institutionell/organisatorisch) Organisationsbedarf zwischen verfügbaren Stromüberschüssen und nachgefragtem Wärmebedarf.
- (regulatorisch) Bedarf an Stromtarifmodellangleichung; Anpassungsbedarf des Marktdesigns; Anpassung Abgaben, Umlagen und Steuern erforderlich; Anpassung des Primärenergiefaktors und Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer wünschenswert; Realisierung ist abhängig vom Ausbau der EE.
- (wirtschaftlich) derzeit besteht ein Wirtschaftlichkeitsrisiko durch u. a. Abgaben; Unklare Entwicklung der Verbraucherpreise hemmen Investitionsentscheidungen.

**Tabelle 32: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 5.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 1)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 2)</li> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Redundanz</li> <li>Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>Puffer- u. Speichervermögen</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Rohstoffbedarf</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Quantität u. Qualität der Dienstleistung</li> <li>Nutzerseitige Investitionen</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>Schädliche Bodenveränderung</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Wasserbedarf</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 1)</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

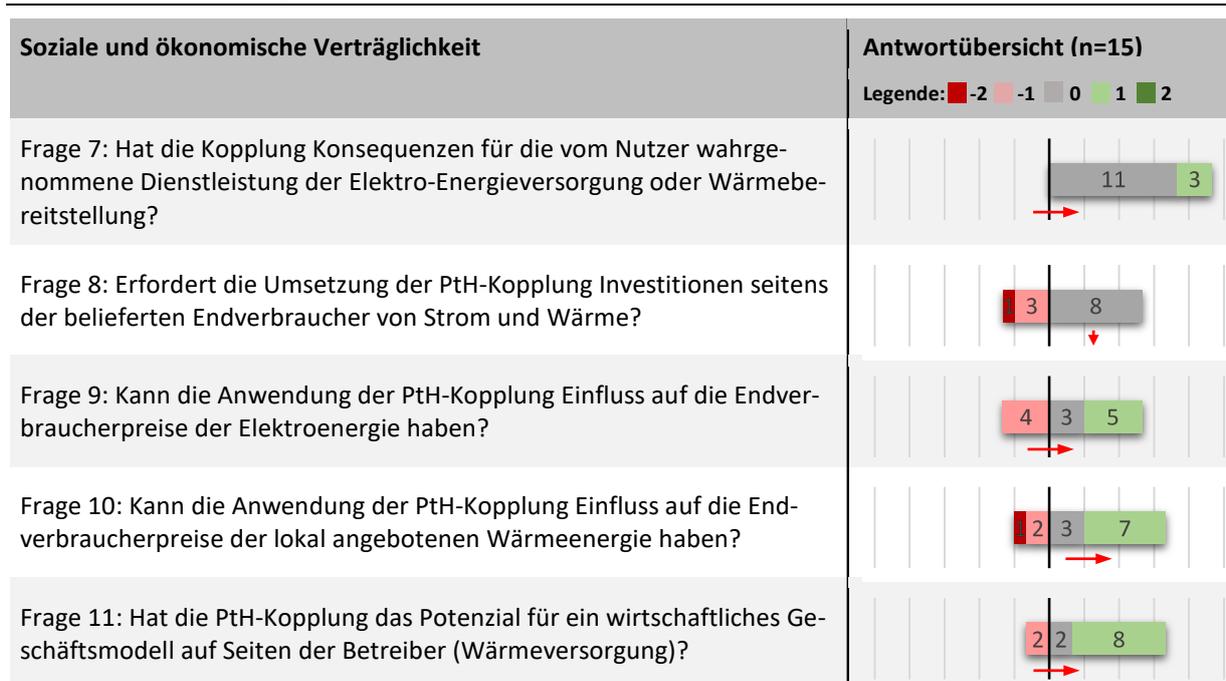
### 8.9.1 Nachhaltigkeitsbewertung

**Abbildung 72 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Leistungsfähigkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 73 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 74 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=15) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 12: Hat die PtH-Kopplung Einfluss auf den Primärenergiebedarf der lokalen Elektro-Energie- und Wärmeenergieversorgung?	
Frage 13: Hat die PtH-Kopplung Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der lokale Elektro-Energie- und Wärmeenergieversorgung?	
Frage 14: Bedingt der Bau und der Betrieb der PtH-Kopplung einen erhöhten Flächenbedarf vor Ort (z. B. Anlagenflächen, Verkehrsflächen)?	
Frage 15: Führen der Bau und der Betrieb der PtH-Kopplung zu schädlichen Bodenveränderungen vor Ort?	
Frage 16: Verändern der Bau und der Betrieb der PtH-Kopplung die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch die lokale Elektro-Energie- und Wärmeenergieversorgung?	
Frage 17: Hat die PtH-Kopplung vor Ort Einfluss auf die Emission von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen (z. B. Feinstäube etc.) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Führt der Betrieb der PtH-Kopplung zu einer erhöhten Emission von Lärm?	
Frage 19: Wie wirken der Bau und der Betrieb der PtH-Kopplung auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) vor Ort?	
Frage 20: Verändern der Bau und der Betrieb der PtH-Kopplung die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat der Betrieb der PtH-Kopplung Einfluss auf das Abfallaufkommen im Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat der Betrieb der PtH-Kopplung einen Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

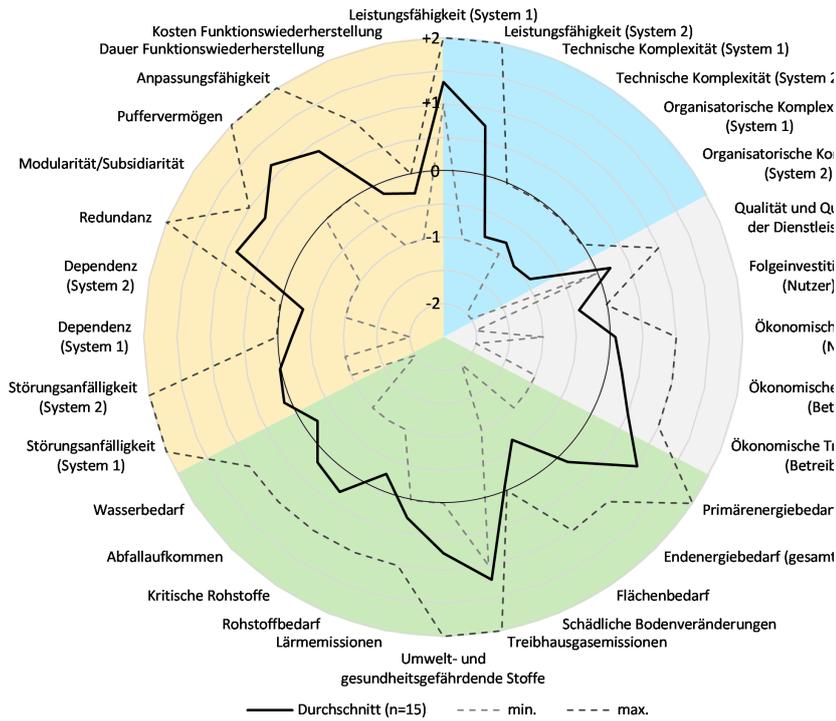
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 75 Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.1, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=15) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 23: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der regionalen Elektro-Energieversorgung?	
Frage 24: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der regionalen Wärmeenergieversorgung?	
Frage 25: Führt ein zeitweiliges Fehlen von Überschussstrom zu Engpässen in der Bereitstellung von thermischer Energie in Wärmenetzen?	
Frage 26: Kann eine zu geringe Abnahme von thermischer Energie zu Beeinträchtigungen in der Stromnetzstabilität führen?	
Frage 27: Trägt die Kopplung generell zu einer größeren Vielfalt und Ersetzbarkeit von Energiequellen, Rohstoffquellen oder Technologien bei und damit zu einer verbesserten Versorgungssicherheit vor Ort?	
Frage 28: Verändert die Kopplung die lokalen bzw. regionalen Handlungsmöglichkeiten bei der Bewältigung möglicher großräumiger Störungen der Energieversorgung durch Wetterextreme?	
Frage 29: Kann der Betrieb der PtH-Kopplung das Puffer- und Speichervermögen der Energienetze vor Ort verbessern, um mögliche wetterbedingte Störungen auszugleichen (z. B. Unterbrechung überregionaler Energieversorgung)?	
Frage 30: Hat der Betrieb der PtH-Kopplung einen Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit des lokalen bzw. regionalen Energiesystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Wie wirkt der Betrieb der PtH-Kopplung in Hinblick auf die Dauer möglicher Reparaturen/Funktionsstörungen nach Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 32: Hat der Betrieb der PtH-Kopplung einen Einfluss auf die Kosten (Personal, Material etc.) der Reparatur/Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme?	

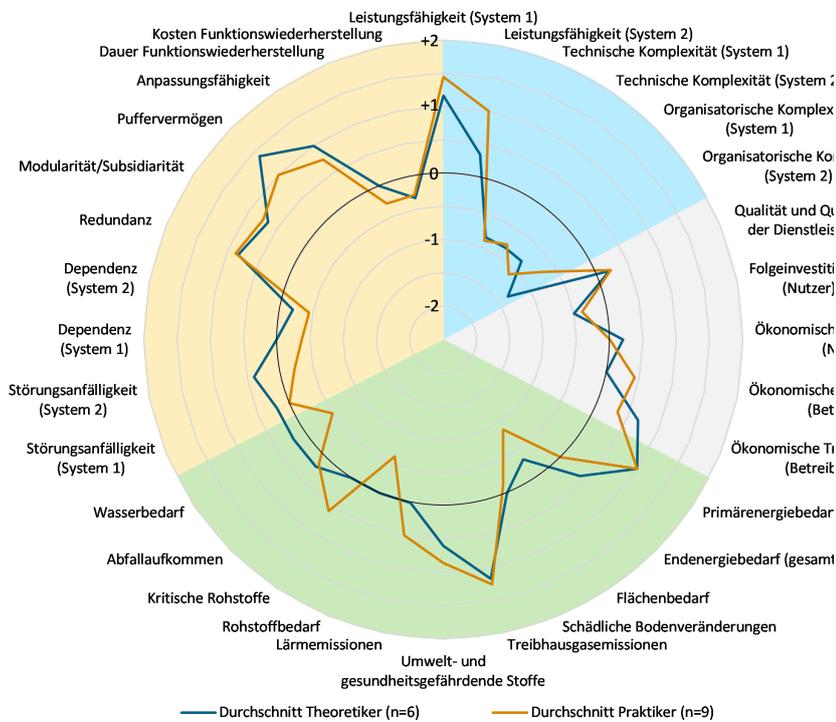
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 76: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 5.1



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 77: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 5.1



Quelle: eigene Darstellung

## 8.9.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Zur Netzengpassbeseitigung ist PtH eine gute Option. Die Abregelung von erneuerbaren Energien hat jedoch denselben Effekt auf die Netzstabilität.
- Die Umwandlung von Überschussstrom in Wärme repräsentiert eine gut geeignete Option, da PtH-Anlagen sehr flexibel betrieben werden können. Beispielsweise treten in Mittelspannungsnetzen hohe Leistungsgradienten von ca. 10 MW/Minute auf.
- Die Technologie kann die Versorgungssicherheit unterstützen, da diese bereits erprobt und im Einsatz bewährt ist.
- Es sind keine spezifischen Risiken vorhanden, weil in einem ausreichenden Umfang Redundanzen erforderlich sind.

#### Regulatorische Aspekte

- Eine begrenzte Anerkennung von Aufwendung aus einer PtH-Anlage ist besser als Abregelung.
- In einem überschaubaren Umfang kann die Option eine Reduktion von fossilen Rohstoffen sowie die Importabhängigkeit ermöglichen und zur Ressourcenschonung und -effizienz beitragen.
- Die Auswirkungen auf die Importabhängigkeit sind abhängig von der Dimensionierung der PtH-Anlage und dem vorhanden Stromüberschuss.

#### Institutionelle und organisatorische Aspekte

- Die Rahmenbedingungen müssen nur in einem geringen Umfang angepasst werden, da die Wärme- und Energieversorgung in einer Hand angesiedelt sind.

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Die Nutzung von PtH-Anlagen könnte über deren netzstabilisierenden Wirkung in einem gewissen Maß den Netzausbaubedarf mindern, was die Netznutzungsgebühren potenziell senkt.
- Durch eine Abnahme von Redispatch und Einspeisemanagementmaßnahmen durch PtH-Kopplung können die hierfür erforderlichen Entschädigungszahlungen reduziert werden, was auch zu geringeren Netzentgelten führt.
- Es handelt sich um eine kostengünstige und damit auch volkswirtschaftlich sinnvolle Option, um die Kosten von Redispatch und Einspeisemanagementmaßnahmen zu reduzieren und somit auch erste Schritte in eine effiziente Sektorkopplung voranzugehen.
- Die Auswirkungen auf die Strompreise der Endkunden können aus geringeren Netzentgelten bestehen.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die Steuerung dezentraler PtH-Anlagen kann sehr komplex sein.
- Die Kopplung steigert die Komplexität und führt zu mehr Risiken bzw. der Möglichkeit von Hackerangriffen.
- Zu Beginn sollten vorhandene Demand-Side-Management-Potenziale insbesondere industrieller Anlagen genutzt werden.

- Um Power to Heat effektiv nutzen zu können, muss über thermische Speicher eine zeitliche Entkopplung zwischen Stromüberschuss und Wärmebedarf erfolgen. Die Wärmespeicherung in Wasser ist beispielsweise eine relativ einfache Technologie.
- Über den Einsatz von Wärmespeichern können Risiken minimiert werden insbesondere zur Absicherung der Wärmedienstleistung an kühleren Tagen und bei einer geringeren Stromerzeugung.  
\*(2)
- Aus der energetischen Perspektive sollte elektrische Energie möglichst optimal genutzt werden – z. B. über Wärmepumpen statt Stromheizungen.
- PtH als alleinige Wärmeversorgung ist unter den Extremwittersituationen auch eine Möglichkeit, zum Beispiel in Schwachwindjahren Engpässe zu vermeiden.
- Überschüsse sind nur lokal vorhanden. Abgeregelt wird i.d.R., weil wir den Strom nicht transportieren können.
- Ob PtH gut geeignet ist, um auch bilanziellen Überschussstrom nutzbar zu machen oder nicht, dürfte sich zum einen am Wärmeabsatz (Wie viel Überschussstrom steht zur Verfügung und wie viel Wärme wird benötigt?) und am Energiemarktdesign (Einsatzhäufigkeit und Preis) entscheiden: Gibt es bei der Sektorkopplung einen Leitmarkt? Wird Strom anderen Sektoren nur dann zur Verfügung gestellt, wenn wir ein Überangebot (lokal und/oder zentral) an Strom haben? Soll PtH immer dann einsetzen, wenn Strom im Wärmesektor günstiger ist als andere Energieträger im Wärmesektor?
- PtH ist keine effektive Option zur Steigerung der Versorgungssicherheit.
- Ein zu starker Ausbau von PtH könnte die Versorgungssicherheit negativ beeinflussen. Daher ist das Verhältnis entscheidend.
- Die Umwandlung von Überproduktionen elektrischer Energie in Wärme kommt einer Exergievernichtung gleich, aber ist immer noch besser, als diese ungenutzt zu lassen.
- Die Umwandlung von Überschussstrom in Wärme führt ggf. lokal zu einem Anstieg der Stromnetzbelastung.
- Power to Heat ist eine von mehreren Möglichkeiten zur Stabilisierung der Stromnetze bei hohen Anteilen von elektrischer Energie aus fluktuierenden, erneuerbaren Energien.
- Die Umwandlung von Strom in Niedertemperaturwärme sollte die letzte Option sein, da Strom reine Exergie darstellt.
- Die Umwandlung von Strom in Wärme ist immer ein "Down-Grade". Andererseits könnte PtH in einem überschaubaren Umfang zur Reduktion der Nutzung fossiler Brennstoffe beitragen.
- Die Umwandlung von Überschussstrom in Wärme repräsentiert keine gut geeignete Option, weil häufig in strukturschwachen, peripheren, ländlichen Regionen Stromüberschüsse vorhanden sind, wo der Wärmebedarf häufig gering ist.
- Die Ressourceneffizienz hängt stark von der Ausführung von PtH ab. Sie ist aber sicherlich effizienter als die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme. Wenn mit Hilfe von PtH ungenutzte Stromüberschüsse aus erneuerbaren Energien genutzt werden, nimmt die Ressourceneffizienz zu.
- Power to Heat sollte immer erst dem Ausbau von erneuerbaren Energien und anderen Alternativen folgen.

### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Bei Netzengpässen bedarf es der Klärung, welche Dienstleistung (z. B. Strom oder Wärme) Vorrang genießt. Dadurch wird die Wärmeversorgung nochmals deutlich abhängiger von einem sicheren und stabilen Stromnetz.
- Bevor Sektoren überhaupt marktdienlich gekoppelt werden können, müssen ihre Märkte zunächst angeglichen werden.
- Bezüglich der Leistungsfähigkeit bestehen Risiken aufgrund des gleichzeitigen Ausbaus der Elektromobilität.

### **Regulatorische Aspekte**

- Die geltenden Regelungen durch das EnWG hindert die Netzbetreiber eine solche Sektorkopplung umzusetzen (insb. Unbundling). Bei einem derzeit hohen Einspeisevolumen haben potenzielle Betreiber von PtH-Anlagen keine Anreize, eine solche Anlage zu realisieren.
- Es bedarf der Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen beispielsweise der Netzentgeltsystematik, der Umlagen etc., wovon die Kosten für den Verbraucher abhängig sind.
- Es bedarf der Anpassung von Abgaben, Umlagen und Steuern im Stromsektor (z. B. Stromsteuer, Anteilige EEG-Umlage, Netzentgeltsystematik, ca. 100€/MWh für Netzstrom), da sonst kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. \*(4)
- Abgaben, Umlagen, Steuerbelastungen bei Nutzung von nicht in das Stromnetz integrierbaren Energiemengen müssen angepasst werden.
- Die zu leistenden Abgaben sowohl auf Eigenstrom aber insbesondere auf Netzstrom sind signifikante Hemmnisse für den Einsatz von PtH-Anlagen.
- Die Rahmenbedingungen sollten hinsichtlich eines marktbasiereten Systems zur Vergabe von ansonsten abgeregeltem Strom etabliert werden. Diesbezüglich sollten die erhobenen Umlagen und Steuern bzw. Entgelte überdacht und ggf. ausgesetzt werden.
- Es bedarf der Anpassung von rechtlichen/regulatorischen Rahmenbedingungen, um ein optimales Marktdesign zu ermöglichen. Beispielsweise können die Netznutzungsgebühren oder die Abgaben angepasst werden, um den systemdienlichen Einsatz von Power to Heat zu fördern. (2)
- Es müssen Strom-Tarifmodelle geschaffen werden, die auch kleineren Wärmeverbrauchern erlauben von Überschussstrom zu profitieren (Strompreisvorteile). Momentan ist dies nur bei Zugang zu den Strombörsen möglich. Bei zentraler Steuerung muss der Nutzer zu Hause schwankende Raumtemperaturen in Kauf nehmen.
- Die Anpassung der Rahmenbedingungen ist abhängig vom tatsächlichen Ausbau der erneuerbaren Energien, der Strompreisentwicklung und anderen Alternativen wie Lastmanagement und Speichern.
- Zur Unterstützung der Ressourcenschonung und -effizienz bedarf es einer Besteuerung von CO<sub>2</sub>. Für sektorgekoppelten Strom aus erneuerbaren Energiequellen sollten die wärmeseitigen Bestimmungen des Primärenergiefaktors angepasst werden.
- Energiewirtschaftliche Regelungen können ein Hindernis darstellen. Hier wären entsprechende Regelungen für die Inbetriebnahme von PtH-Anlagen denkbar wie im Fall des zeitweisen Abschaltens von Wärmepumpen.
- Es bedarf einer steuerlichen Gleichstellung mit anderen Wärmeträgern.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Es bestehen ökonomische Risiken in der Zukunft durch unsichere Rahmenbedingungen wie Steuern, Abgaben etc.
- Derzeit ist kein wirtschaftlicher Betrieb von PtH-Anlagen realisierbar.
- Die Wirtschaftlichkeit von bestehenden Anlagen zur Wärmebereitstellung könnte abnehmen.
- Es wird höchstwahrscheinlich eine Veränderung der Preise geben, jedoch in welche Richtung, ist offen.
- Die Verbraucherpreise könnten über die Nutzung von Power to Heat außerhalb des Regelenergiemarkts steigen und bei Teilnahme am Regelenergiemarkt sinken (z. B. durch günstigere Regelenergie).
- Für die Realisierung von PtH-Anlagen sind Investitionen vom Netzbetreiber und Wärmeversorger erforderlich, die zu einer finanziellen Mehrbelastung der Kunden führen.
- Die Gewinnmarge nimmt mit zunehmender Anzahl an Marktakteuren ab.
- Eine wirtschaftlichere Option zur Stabilisierung der Stromnetze ist die Lastverschiebung auf der Stromverbrauchsseite.
- Die Rahmenbedingungen müssen angepasst werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.
- Es müssen finanzielle Anreize bestehen, um die PtH-Kopplung attraktiv zu machen.

### **Weitere Anmerkungen**

- Damit Kopplungen als zukunftsfähig gelten, sollte die Energieversorgung – gleich, in welchem Sektor der Energieverwendung – die Ansprüche des energiewirtschaftlichen Zieldreiecks aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit erfüllen. Entsprechend müssen externe Effekte auch in allen Sektoren zur Energieverwendung internalisiert werden. Dies dürfte einer Mammutaufgabe gleichkommen, zu deren Erfüllung noch nicht einmal der allererste Schritt gegangen wurde.
- Nur wenn ein beidseitiger Vorteil für Stromlieferant und Wärmeverbraucher resultiert, wird die Kopplung umgesetzt.

## 8.10 Fall 5.2 Power to Liquid (PtL) – Elektrolyse von regenerativem Strom in Wasserstoff

**Fallbeschreibung:** Gesteuerte Umwandlung von Überschussstrom aus regenerativen Energiequellen (z. B. Wind, Solar) zur Erzeugung von speicherfähigen Energieträger wie Wasserstoff (H<sub>2</sub>) durch Elektrolyse bei gleichzeitiger Bereitstellung negativer Regelleistung. Speicherung des H<sub>2</sub> in bestehenden Gasnetzen oder Bereitstellung für andere Anwendungen (z. B. Betankung, Rückverstromung in Brennstoffzellen).

**Tabelle 33: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 5.2	7	-	3	3	<b>13</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Der Infrastrukturkopplung Power to Liquid wird ein deutliches Potenzial zur Unterstützung der Stromnetzstabilität attestiert. Sie vermag zudem einen geringfügigen bis deutlichen Beitrag zur Sicherung des lokalen bzw. regionalen Bedarfs an Wasserstoff zu leisten, bei einer Aufrechterhaltung von Qualität und Quantität der Strom- und Wasserstoffversorgung. Insgesamt sind die Stärken und Potenziale der Infrastrukturkopplung primär durch eine gesteigerte Leistungsfähigkeit der gekoppelten Infrastrukturen und der lokalen Versorgungssicherheit – insbesondere bezogen auf Redundanz und Puffer-/Speichervermögen, Modularität sowie Anpassungsfähigkeit. In Hinblick auf Ressourcenschonung und -effizienz herrschen neutrale Wirkungen vor. Lediglich der Primärenergiebedarf weist ein geringfügiges und die Treibhausgasemissionen ein deutliches Potenzial zur Reduktion auf.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Ressourceneffizienz durch Stromüberschussnutzung; Steigerung der Versorgungssicherheit durch dezentrale EE-Versorgung.

#### Herausforderungen und Risiken

Die Spannweite der Bewertungen zahlreicher Kriterien reicht oft über die gesamte Bewertungsskala und zeigt damit eine ausgeprägte Uneinheitlichkeit der Wertungen. Dies gilt besonders im Bereich der technischen und organisatorischen Komplexität sowie der ökonomischen Verträglichkeit ist diese Tendenz ausgeprägt. Die technische Komplexität auf Seiten der Elektro-Energieversorgung steigt dennoch geringfügig an für die lokale Wasserstoffversorgung eine geringfügige bis deutliche Zunahme der Komplexität erwartet wird. Diese Tendenz ist in ähnlicher Weise auch im Kontext der organisatorische Komplexität feststellbar – bei einem deutlichen Anstieg der organisatorischen Komplexität auf Seiten der Wasserstoffbereitstellung. Die Störanfälligkeit ist beidseits

der gekoppelten Systeme durch eine neutrale Wirkung bestimmt. Jedoch besteht die Tendenz zu geringfügigen Einschränkungen innerhalb des Stromnetzes bei einem Ausfall der Elektrolyse.

Aus ökonomischer Perspektive besteht das Potenzial für leicht sinkende Endenergiepreise für Wasserstoff. Parallel wird ein geringfügiger Anstieg der nutzerseitigen Investitionen erwartet. Im Bereich der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz wird den Kriterien aus Flächen-, Rohstoff- und Wasserbedarf eine geringfügige Zunahme attestiert.

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (technisch) Vorhandensein von Speichermöglichkeiten erforderlich; Steigerung der Störanfälligkeit ist möglich (z. B. durch unausgereifte Systemkomponenten, Verfehlen der benötigten Qualitätsanforderungen); Beeinflussung Umweltwirkungen (z. B. kritischer Rohstoffe, Ersatz von fossilem Gas); alternative Nutzungsmöglichkeiten von Überschussstrom sollten geprüft werden (z. B. durch Direktnutzung der Energie, Demand-Side-Management).
- (institutionell/organisatorisch) Unterstützung der Betriebssicherheit durch Wissenstransfer von Optimierungspotenzialen.
- (regulatorisch) Anerkennung von PtL als erneuerbare Energie; Anpassung des energiewirtschaftlichen Rahmens an das Geschäftsmodell (z. B. in der betrieblichen Zulassung); Belastung mit Steuern, Umlagen und Abgaben anpassen; unterstützende Förderstruktur implementieren.
- (wirtschaftlich) Hohes Investitionsvolumen zur Realisierung erforderlich; geringer Nutzungsgrad durch ausschließliche Nutzung von volatil auftretenden Überschussstrom; Status als Letztverbraucher führt zu einer doppelten Abgabenlast.
- (gesellschaftlich) Derzeit geringer Nutzerkreis für Wasserstoff.

**Tabelle 34: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 5.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Redundanz</li> <li>Puffer- u. Speichervermögen</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 2)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 1)</li> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Nutzerseitige Investitionen</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Teilsystem 2)</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Rohstoffbedarf</li> <li>Wasserbedarf</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Quantität u. Qualität der Dienstleistung</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>Schädliche Bodenveränderung</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 1)</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

### 8.10.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 78: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 1: Ist die PtL-Kopplung geeignet, einen signifikanten Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze bei Überproduktion aus regenerativen Quellen zu leisten?	
Frage 2: Ist die PtL-Kopplung geeignet, einen signifikanten Beitrag zur Sicherung des lokalen/regionalen Wasserstoffbedarfs zu leisten?	
Frage 3: Verändert der Einsatz der PtL-Kopplung die technische Komplexität der lokalen Elektro-Energieversorgung?	
Frage 4: Verändert der Einsatz der PtL-Kopplung die technische Komplexität der lokalen Wasserstoffversorgung?	
Frage 5: Erfordert die Umsetzung der PtL-Kopplung komplexere Organisationsstrukturen bzw. einen höheren Organisationsaufwand auf Seiten der beteiligten Elektro-Energieerzeuger?	
Frage 6: Erfordert die Umsetzung der PtL-Kopplung komplexere Organisationsstrukturen bzw. einen höheren Organisationsaufwand auf Seiten der H2-Bereitstellung und/oder Speicherung in Gasnetzen?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 79: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 7: Hat die Kopplung Konsequenzen für die vom Nutzer wahrgenommene Dienstleistung der Elektro-Energieversorgung oder Bereitstellung von Wasserstoff?	
Frage 8: Erfordert die Umsetzung der PtL-Kopplung Investitionen seitens der belieferten Endverbraucher (Nutzer) von Strom oder Wasserstoff?	
Frage 9: Kann die Anwendung der PtL-Kopplung Einfluss auf die Endverbraucherpreise der Elektroenergie haben?	
Frage 10: Kann die Erzeugung von Wasserstoff mithilfe der PtL-Kopplung Einfluss auf die Endverbraucherpreise für Wasserstoff haben?	
Frage 11: Hat die PtL-Kopplung das Potenzial für ein wirtschaftliches Geschäftsmodell auf Seiten der Betreiber (Stromerzeugung, Wasserstoffbereitstellung)?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 80: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=13) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 12: Hat die PtL-Kopplung Einfluss auf den Primärenergiebedarf der beteiligten Elektro-Energie- und Wasserstoff-Versorgung?	
Frage 13: Hat die PtL-Kopplung Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der beteiligten Elektro-Energie- und Wasserstoff-Versorgung?	
Frage 14: Bedingt der Bau und der Betrieb der PtL-Kopplung einen erhöhten Flächenbedarf vor Ort (z. B. Anlagenflächen, Verkehrsflächen)?	
Frage 15: Führen der Bau und der Betrieb der PtL-Kopplung zu schädlichen Bodenveränderungen am Ort ihres Einsatzes?	
Frage 16: Verändern der Bau und der Betrieb der PtL-Kopplung die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch die beteiligte Elektro-Energie- und Wasserstoff-Versorgung?	
Frage 17: Hat die PtL-Kopplung vor Ort Einfluss auf die Emission von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen (z. B. Feinstäube etc.) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Führt der Betrieb der PtL-Kopplung zu einer erhöhten Emission von Lärm?	
Frage 19: Wie wirken der Bau und der Betrieb der PtL-Kopplung auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) vor Ort?	
Frage 20: Verändern der Bau und der Betrieb der PtL-Kopplung die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat der Betrieb der PtL-Kopplung Einfluss auf das Abfallaufkommen im Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat der Betrieb der PtL-Kopplung einen Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

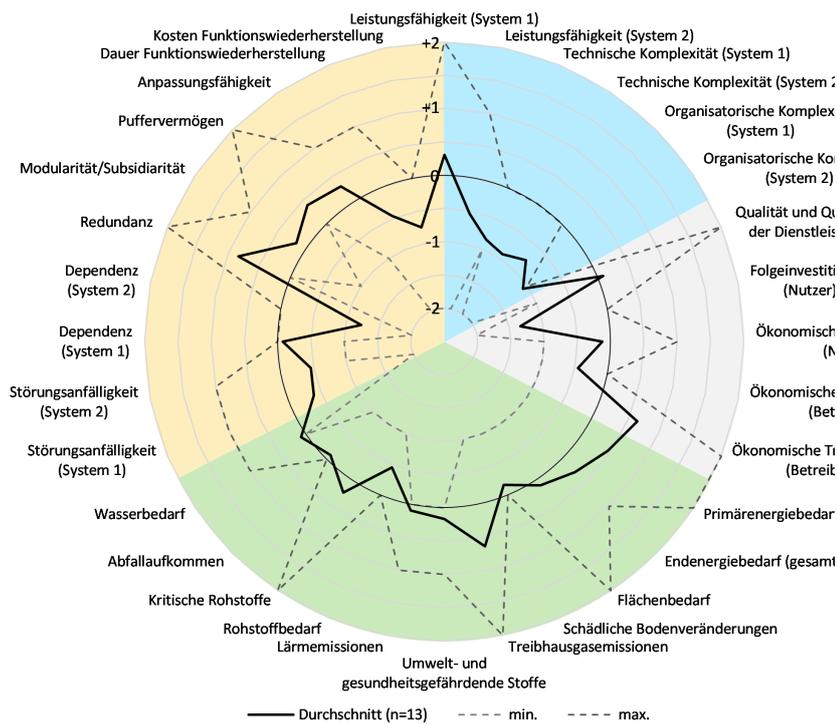
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 81: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 5.2, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 23: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der regionalen Elektro-Energieversorgung?	
Frage 24: Hat der gekoppelte Betrieb Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Wasserstoff-Versorgung?	
Frage 25: Führt ein zeitweiliges Fehlen von Überschussstrom zu Engpässen bei der Wasserstoff-Versorgung in den beteiligten Regionen?	
Frage 26: Können Ausfälle bei den beteiligten Elektrolyse-Anlagen (= Ausfall und Stromabnahme) zu Ausfällen im Stromnetz führen?	
Frage 27: Trägt die Kopplung generell zu einer größeren Vielfalt und Ersetzbarkeit von Energiequellen, Rohstoffquellen oder Technologien bei und damit zu einer verbesserten Versorgungssicherheit vor Ort?	
Frage 28: Verändert die Kopplung die lokalen bzw. regionalen Handlungsmöglichkeiten bei der Bewältigung möglicher großräumiger Störungen der Energieversorgung durch Wetterextreme?	
Frage 29: Kann der Betrieb der PtL-Kopplung das Puffer- und Speichervermögen der Energienetze vor Ort verbessern, um mögliche wetterbedingten Störungen auszugleichen (z. B. Unterbrechung überregionaler Energieversorgung)?	
Frage 30: Hat der Betrieb der PtL-Kopplung einen Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit des lokalen bzw. regionalen Energiesystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Wie wirkt der Betrieb der PtL-Kopplung in Hinblick auf die Dauer möglicher Reparaturen/Funktionsstörungen nach Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 32: Hat der Betrieb der PtL-Kopplung einen Einfluss auf die Kosten (Personal, Material, ...) der Reparatur/Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme?	

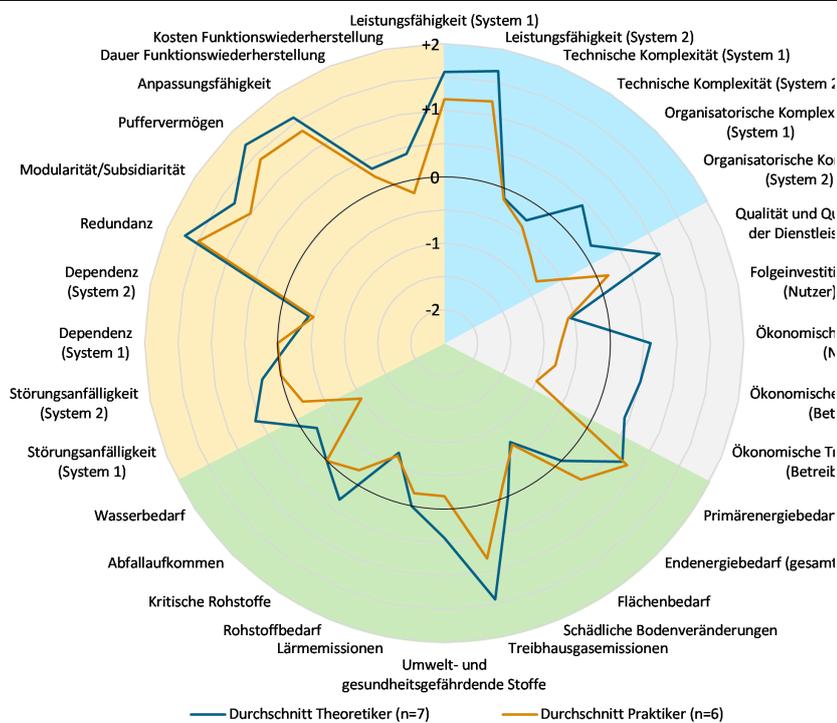
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 82: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 5.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 83: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ - Fall 5.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.10.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- PtL steigert die Ressourceneffizienz, wenn sonst ungenutzte Stromüberschüsse genutzt werden.
- Die derzeit noch verbesserungsbedürftige Zuverlässigkeit der EE-Versorgung muss durch Dezentralität (z. B. Aufbau von Netzstrukturen) aufgefangen werden.

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Power to Liquid ist als industriepolitische Chance zu werten.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Das Puffer- und Speichervermögen ist stark abhängig u. a. von der Umsetzungsart der lokalen Speicher.
- Eine Voraussetzung für eine bessere Versorgungssicherheit sind Untergrundgasspeicher für Wasserstoff.
- Es besteht ein erhöhtes technisches Ausfallrisiko, da Systemkomponenten der PtL-Technologie noch unausgereift sind.
- Hinsichtlich der qualitätsgerechten Bereitstellung von Wasserstoff für die stoffliche Nutzung ist eine Reinheit des erzeugten Gases von 99,999 % üblich und bedingt ein Risiko für die Leistungsfähigkeit.
- Die Störanfälligkeit der regionalen Elektro-Energieversorgung sinkt nur mit Rückverstromungsmöglichkeit.
- Die Versorgungssicherheit kann über Rückverstromung gesteigert werden. Dies führt aber zu hohen Wandlungsverlusten und sollte damit nicht favorisiert werden.
- Die Versorgung mit Platinmetallen (z. B. Iridium) für die Elektroden im Elektrolyseur ist ein Risiko in Bezug auf Ressourcenschonung und -effizienz. \*(2)
- Gegenüber PtH hat PtL dynamische Nachteile, sodass bei einer PtL-Anlage ggf. Speicher vorgeschaltet werden müssten.
- Die PtL-Kopplung kann nur eine zusätzliche Option zur allgemeinen Energieerzeugung und/oder Wasserstoffherstellung sein.
- PtL-erzeugtes Gas, welches herkömmliches ersetzt, hat eine Veränderung der Treibhausgasemissionen zur Folge.
- Die Technologie ist alternativlos.
- Die direkte stoffliche Nutzung des Wasserstoffs ohne Einspeisung ins Erdgasnetz ist die beste Option.
- Power to Liquid kann in Kombination mit der Nutzung von (Ab-)Wärme optimiert werden.
- Die Kopplung kann ihren Beitrag leisten, aber zuerst sollten vorhandene Demand-Side-Management-Potenziale insbesondere industrieller Anlagen, genutzt werden.
- Grundsätzlich ist vorstellbar, dass derzeit mit fossilen Brennstoffen betriebene Gaskraftwerke zunehmenden mit einem regenerativen Wasserstoffanteil gespeist werden könnten.

### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Es bestehen Flächennutzungskonkurrenzen.
- Es bedarf der Sammlung von Erfahrung und Optimierungspotenzialen von Anlagen, um sie zuverlässiger betreiben zu können.
- Nach weiteren mind. 15 technologischen Entwicklungsjahre kann PtL eine gut geeignete Option sein, das Stromnetz zu stabilisieren und das Potenzial von Überproduktion elektrischer Energie nutzbar zu machen.

### **Regulatorische Aspekte**

- Die PtL-Technologie sollte im rechtlichen Instrument „Nutzen statt Abregeln“ zugelassen werden (§13 Abs. 6a EnWG).
- Es bedarf der Anpassung des Marktdesigns und des gesetzlichen Rahmens, u. a. Ausräumen von gesetzlichen Interpretationsspielräumen.
- Netzbetreiber (Strom und/oder Gas) müssen die Erlaubnis erhalten, Umwandlungsanlagen (wie PtG) betreiben zu dürfen und ggf. als Regelenergie wieder abzurufen zu können. Der rechtliche Rahmen für solche Geschäftsmodelle muss entwickelt werden.
- Ein technologieoffener Wettbewerb der Flexibilitätsoptionen sollte gegeben sein, der z. B. PtH oder PtL nicht begünstigt.
- Pioniere, die Anlagen realisieren, müssen gefördert werden (z. B. durch Risikosharing).
- Aus erneuerbaren Energien erzeugter Wasserstoff sollte als „biogene Komponente“ in Raffinerien anerkannt werden.
- Die ungleiche Belastung mit Abgaben und Umlagen der Sektoren Wärme und Verkehr gegenüber dem Sektor Strom ist hinderlich.
- Es bedarf einer Förderungsstruktur, die eine CO<sub>2</sub>-Reduktion und die Verwendung von erneuerbaren Energien unterstützt.
- PtL braucht keine Sondertatbestände. Es bedarf einer technologieneutralen CO<sub>2</sub> orientierten Ausgestaltung von Abgaben und Umlagen im Energiesektor.
- Grüner Wasserstoff muss als erneuerbarer Energieträger frei nutzbar und anrechenbar sein, unabhängig von der Nutzungstechnologie.
- Die EEG-Umlage sollte abgeschafft werden. Stattdessen sollte eine CO<sub>2</sub>-Steuer eingeführt werden, was den Strompreis gerechter gestalten würde.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Seltene Regelenergiefälle bedingen eine geringe Anzahl an Betriebsstunden und dadurch eine wirtschaftliche Ineffizienz der PtL-Kopplung. Daher sollte das Ziel darin bestehen, hohe Nutzungsgrade zu erreichen und folglich nicht nur Überschussstrom zu nutzen. \*(2)
- PtL ist heutzutage eine kostenintensive Option und kann nur in einem überschaubaren Maß genutzt werden. \*(2)
- PtL ist technisch eine gut geeignete Option, aber ökonomisch nicht.
- Hohe Investitionskosten stehen einem erfolgreichen Geschäftsmodell entgegen.
- Unter den momentanen Gegebenheiten ist keine wirtschaftliche Umsetzung möglich. Die Komponenten und Anlagen sind zu teuer, sowohl CAPEX als auch OPEX. Beispielsweise müssen Elektrolyseure günstiger werden.
- Bei einer falsch gesetzten Anreizstruktur könnten steigende Verbraucherpreise für Strom und

Gas die Folge sein.

- Der wirtschaftliche Betrieb der PtL-Technologie ist aufgrund der Behandlung als Endverbraucher (Erhebung sämtlicher Steuern und Umlagen) schwierig. Der Status als Letztverbraucher und die damit verbundenen Abgaben sollten wegfallen (z. B. Befreiung der Umwandlung von Letztverbraucherabgaben im EEG). \*(5)
- Je nach Anwendungsszenario stehen doppelte Abgaben auf Strom und Gas einem erfolgreichen Geschäftsmodell entgegen. Der rechtliche Rahmen der Netzentgelte und Umlagen beeinflusst sehr stark die Wirtschaftlichkeit. \*(3)
- Die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind derzeit noch ungünstig. Die Gestehungskosten der Energiespeicherung mittels PtL sind derzeit noch zu hoch.
- Die derzeitigen Strompreise (je nach Befreiung von Abgaben) stehen einem erfolgreichen Geschäftsmodell entgegen.
- Die Wirtschaftlichkeit ist abhängig von den Strompreisen und der Regelleistung.
- Durch hohe Anteile von PtL würden die Preise für Gas, Strom und H<sub>2</sub> steigen, da PtL noch sehr teuer ist.

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Derzeit gibt es noch keinen ausreichenden Nutzerkreis für Wasserstoff – teilweise in der Industrie.

## 8.11 Fall 6.1 App-basiertes Management virtueller Fuhrparks (Zusammenchluss privater Fahrzeuge zum Carsharing-Modell)

**Fallbeschreibung:** Bereitstellung privat genutzter Fahrzeuge innerhalb eines privaten Carsharing-Modells durch App-basiertes Management der privaten Einzelfahrzeuge in einem virtuellen Fuhrpark.

**Tabelle 35: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 6.1	5	1	3	2	<b>11</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Dem App-basierten Management von virtuellen Fuhrparks werden über alle Bewertungsdimensionen hinweg zahlreiche positive Wirkungen bescheinigt. Gerade durch die App-basierte Fahrzeugvermittlung steigt das Potenzial an, privat genutzte Fahrzeuge in einem Carsharing-Modell bereitzustellen. Respektive kann auch die Verfügbarkeit von Fahrzeugen für die potenziellen NutzerInnen im gleichen Maß gesteigert werden.

Aus der Befähigung zur Leistungssteigerung resultieren zudem geringfügige bis deutliche Steigerungspotenziale im Bereich der Versorgungssicherheit, insbesondere durch den deutlichen Anstieg der allgemeinen Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen und der geringfügigen Steigerung der Handlungsmöglichkeiten lokaler Akteure. Für Kriterien wie allgemeine Anpassungsfähigkeit sowie Dauer und Kosten zur Funktionswiederherstellung im Fall wetterbedingter Störungen werden keine Auswirkungen erwartet. Aus ökonomischer Perspektive werden überwiegend positive Wirkungen in Bezug auf sinkende Endverbraucherpreise und ein Potenzial für ein stabiles Geschäftsmodell konstatiert. Im Bereich der Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz dominieren neutrale bis geringfügig positive Bewertungen. Geringfügig positive Wirkungen werden für die Kriterien Primärenergie-, Endenergie-, Flächen- und Rohstoffbedarf sowie das Abfallaufkommen erwartet. Die Bewertungen bezogen auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen sowie die Emission sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe zeigen ein heterogenes Bewertungsmuster. Den übrigen Kriterien wird eine Nichtveränderung bescheinigt.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Potenzial, zur Ressourcenschonung beizutragen.
- (wirtschaftlich) Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch künftige Verführbarkeit von autonomen Fahrzeugen.
- (gesellschaftlich) Hohe Akzeptanz von jüngeren Nutzergruppen; Etablierung/Einführung von E-Fahrzeugen kann unterstützt werden; Ergänzung des ÖPNV-Angebots im ländlichen Raum.

### **Herausforderungen und Risiken**

Den erwarteten überwiegend positiven Wirkungen stehen negative Bewertungen in Bezug auf die technische und organisatorische Komplexität, die nutzerseitigen Investitionen und die Dependenz gegenüber. Insbesondere der mögliche Ausfall der App-basierten Lösung wird als herausragendes Risiko angesehen. Ein potenzieller Ausfall führt zu deutlichen Einschränkungen bis hin zum vollständigen Erliegen auch der Fahrzeugbereitstellung und Fahrzeugverfügbarkeit. In Bezug auf die nutzerseitigen organisatorische Komplexität dominieren uneinheitliche Bewertungen – diese sind auf positiver wie negativer Seite gleich stark ausgeprägt. Beispielsweise müssen Fahrzeuganbieter berücksichtigen, ihr eigenes Fahrzeug für den persönlichen Gebrauch selbst zu reservieren, was ein verändertes Nutzungsverhalten erfordert. Um überhaupt am Carsharing-Modell teilnehmen zu können, wird der Bedarf nach geringfügigen nutzerseitigen Investitionen gesehen.

#### ***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (technisch) App-Anwendung ist essenziell für reibungslose und schnelle Fahrzeugvermittlung; Ressourcenschonung/-effizienz hängt u. a. von Art der Fahrzeuge ab; eventuell müssen technische Untersuchungen der privaten Fahrzeuge in kürzeren Intervallen vollzogen werden als im Taxi-/Mietwagengewerbe gesetzlich vorgeschrieben; Beitrag zur Versorgungssicherheit ist abhängig von u. a. Anbieterdichte, Kapazität der Verkehrsinfrastruktur.
- (institutionell/organisatorisch) Anpassung von Rahmenbedingungen erforderlich; ausgeprägte Qualitätsunterschiede der Fahrzeuge möglich; Verfügbarkeitsunterschiede zwischen Stadt und Land vorhanden.
- (regulatorisch) Versicherungs- u. Haftungsaspekte sind zu klären; Anreize durch Push- und Pull-Faktoren parallel realisieren (z. B. durch Parkraumbewirtschaftung, Steuerliche Vorteile für private Fahrzeugbereitstellung); Gewährleistung der nutzerbezogenen Datensicherheit; steigende Konkurrenz zwischen den Mobilitätsarten insbesondere zum ÖPNV.
- (wirtschaftlich) Geringe Wirtschaftlichkeit für private Fahrzeuganbieter gegeben; derzeitige Vorbehalte gegenüber dem Wirtschaftlichkeitspotenzial für den Betreiber; Pflicht zur Versteuerung der Einnahmen für den privaten Fahrzeuganbieter schmälert die Wirtschaftlichkeit.
- (gesellschaftlich) Einschränkungen in der privaten PKW-Nutzung für den Anbieter können resultieren; derzeit besteht eine geringe Nutzerakzeptanz; Vorbehalte gegenüber dem Potenzial zur Ressourcenschonung bestehen.

**Tabelle 36: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 6.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redundanz</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependenz</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Leistungsfähigkeit ( Teilsystem 2)</li> <li>• Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Nutzerseitige Investitionen</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Schädliche Bodenveränderung</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes</li> <li>• Puffervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

### 8.11.1 Nachhaltigkeitsbewertung

**Abbildung 84: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Leistungsfähigkeit“**

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=11) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 1: Ist eine solche App-basierte Fahrzeugvermittlung geeignet, privat genutzte Fahrzeuge in dieser neuen Form des Carsharings und in einem relevanten Maß bereitzustellen?	
Frage 2: Ist eine solche App-basierte Fahrzeugvermittlung geeignet, die Verfügbarkeit von Fahrzeugungen für die Fahrzeugnutzer in einem relevanten Maß zu erhöhen?	
Frage 3: Führt die App-basierte Vermittlung von Fahrzeugen zu einer erhöhten technischen Komplexität im System der Fahrzeugvermittlung?	
Frage 4: keine Relevanz	-
Frage 5: Verändert die App-basierte Fahrzeugvermittlung die organisatorische Komplexität für die Fahrzeuganbieter?	
Frage 6: Verändert die App-basierte Fahrzeugvermittlung die organisatorische Komplexität für die Fahrzeugnutzer?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 85: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=11) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 7: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Konsequenzen für die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen für Fahrzeugnutzer?	
Frage 8: Erfordert die Umsetzung der Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Investitionen seitens der Fahrzeugnutzer?	
Frage 9: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen Einfluss auf die Endverbraucherpreise in dieser Form des Carsharings?	
Frage 10: keine Relevanz	-
Frage 11: Hat die Nutzung privater Fahrzeuge im Carsharing das Potenzial für ein wirtschaftliches Geschäftsmodell für die Fahrzeuganbieter?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 86: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=11) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 12: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Einfluss auf den Primärenergiebedarf der durch die Nutzer der realisierten Mobilität?	
Frage 13: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der durch die Nutzer realisierten Mobilität?	
Frage 14: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen in einem solchem Carsharing-Modell Einfluss auf den Flächenbedarf vor Ort?	
Frage 15: Führt die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing zu schädlichen Bodenveränderungen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einerseits Herstellung und andererseits Betrieb der Fahrzeuge?	
Frage 17: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube, Stickoxide)?	
Frage 18: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing Einfluss auf die Emission von Lärm?	
Frage 19: Wie wirkt die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing auf den Bedarf an Rohstoffen?	
Frage 20: Wie wirkt die Nutzung App-basierter Lösungen im privaten Carsharing auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen in einem solchem Carsharing-Modell Einfluss auf das Abfallaufkommen beim Betrieb der Mobilitätsform?	
Frage 22: Hat die Nutzung App-basierter Lösungen in einem solchem Carsharing-Modell Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Mobilitätsform?	

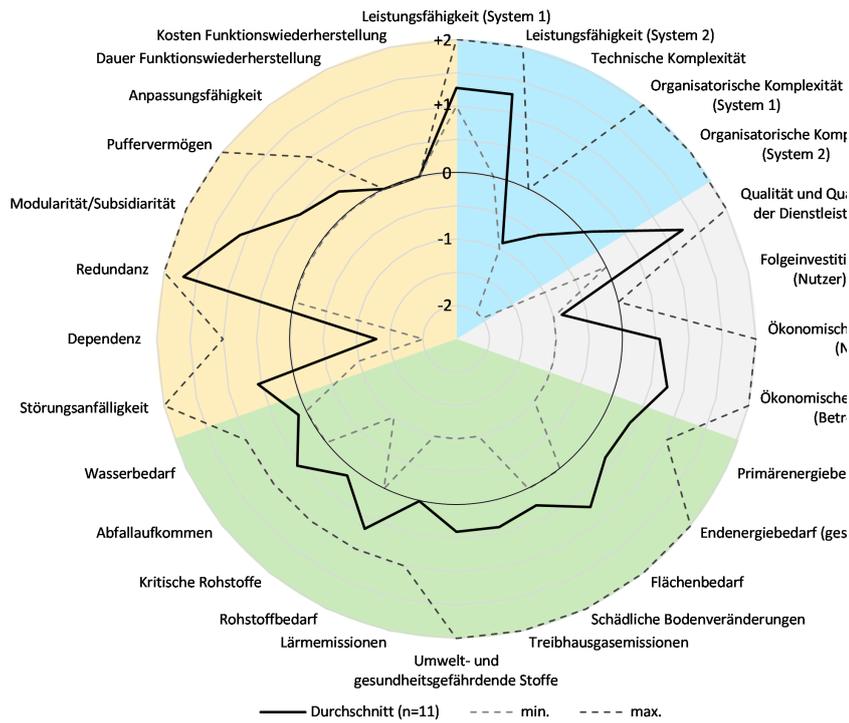
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 87: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.1, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=11) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 23: Hat die App-basierte Fahrzeugvermittlung Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Fahrzeugvermittlung im Carsharing?	
Frage 24: keine Relevanz	-
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall bei der App zugleich zu Einschränkungen bei der Vermittlung privater Carsharing Fahrzeuge?	
Frage 26: keine Relevanz	-
Frage 27: Trägt die App-basierte Vermittlung von privaten Fahrzeugen im Carsharing grundsätzlich zu einer besseren Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen für den Nutzer bei?	
Frage 28: Verändert die App-basierte Vermittlung von privaten Fahrzeugen im Carsharing die Handlungsmöglichkeiten der lokalen Akteure bei der Sicherstellung der Fahrzeugvermittlung?	
Frage 29: Hat die App-basierte Fahrzeugvermittlung von privaten Fahrzeugen im Carsharing Einfluss auf die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen im Fall wetterbedingter Störungen?	
Frage 30: Hat die App-basierte Organisation der privaten Fahrzeugvermittlung in diesem Carsharing-Modell einen Einfluss auf die Anpassungsfähigkeit des Mobilitätssektors an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31: Hat die App-basierte Organisation der privaten Fahrzeugvermittlung in diesem Carsharing-Modell einen Einfluss auf die Dauer möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen?	
Frage 32: Hat die App-basierte Organisation der privaten Fahrzeugvermittlung in diesem Carsharing-Modell einen Einfluss auf die Kosten möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen?	

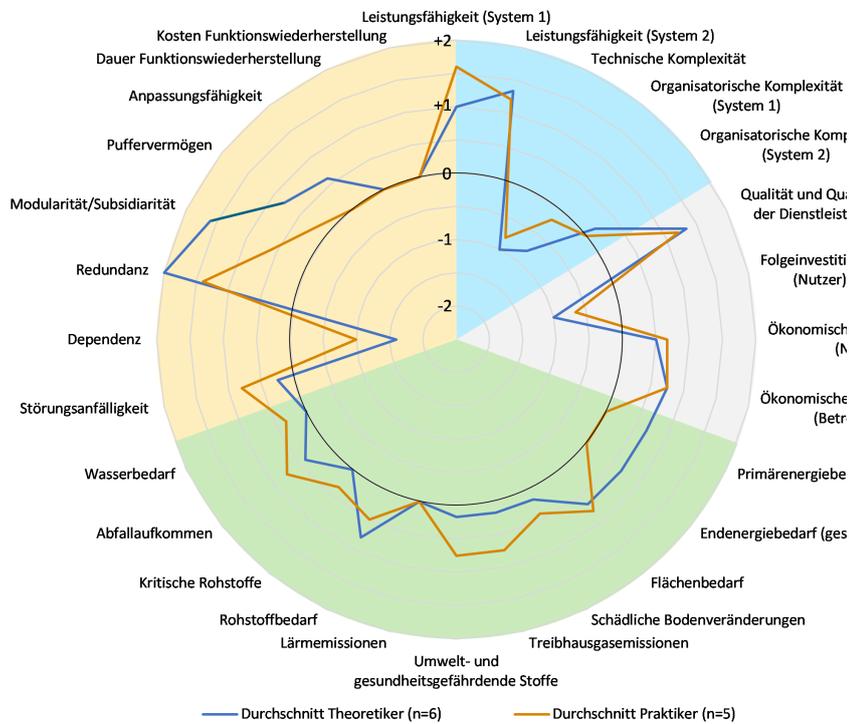
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 88: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 6.1**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 89: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 6.1**



Quelle: eigene Darstellung

## 8.11.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- Speziell in dünn besiedelten, ländlichen Räumen mit unzureichenden ÖPNV-Angeboten kann das Angebot zur Ressourcenschonung und -effizienz führen.
- Mittels Carsharing kann die Nutzungsdauer von Fahrzeugen ausgedehnt werden.

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Künftige vollautonome Fahrzeuge, die selbständig zum Nutzer fahren könnten, werden die Qualität und Wirtschaftlichkeit der Dienstleistung deutlich erhöhen.

#### Gesellschaftliche Aspekte

- Die junge Generation wird sich an die Komplexität schnell gewöhnen.
- Mittel- bis langfristig kann das private Carsharing den Effekt haben, dass sich die Elektromobilität schneller verbreitet. Damit würden positive Auswirkungen auf den Energiebedarf entstehen.

#### Weitere Anmerkungen

- Sofern eine gute und ausgereifte technische Lösung zur Verfügung steht, dürften keine spezifischen Risiken die Leistungsfähigkeit einschränken.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die Einbindung des privaten Fahrzeugs in das Carsharing-Modell und der Datenabruf für die Nutzer müssen in Echtzeit und sehr unkompliziert möglich sein - sonst scheitert es an der Praktikabilität für beide Seiten.
- Fahrzeuge, wenn nicht Neuwagen, bedürfen einer häufigeren technischen Überprüfung, also Hauptuntersuchung nach jeweils 12 statt nach 24 Monaten.
- Die Möglichkeiten zur Ressourcenschonung und -effizienz können nur unter Einbindung der E-Mobilität vollständig genutzt werden.
- Die App-basierte Fahrzeugvermittlung sorgt überhaupt erst für eine reibungslose, einfache und schnelle Vermittlung, sie verringert also die Störungsanfälligkeit im Vergleich mit jeder anderen (analogen) Form der Vermittlung. Sollte die App doch einmal ausfallen, weil beispielsweise der Handy-Akku leer ist (wahrscheinlicher Fall) oder ein Unwetter für einen Ausfall des mobilen Internet gesorgt hat (extrem unwahrscheinlicher Fall), dann steht in der Regel immer noch eine webbasierte Plattform zur Verfügung.
- Die App-basierte Vermittlung ist die Grundvoraussetzung, um private Fahrzeuge im Carsharing nutzen zu können. Andere Systeme könne nicht dieselbe Flexibilität gewährleisten. Ohne App geht heute nichts mehr. \*(2)
- Die Ressourceneffizienz steigt. Es werden aber nicht weniger Ressourcen gebraucht.
- In einem gewissen Maß kann das Carsharing-Modell bei wetterbedingten Störungen eine gesteigerte Versorgungssicherheit unterstützen (z. B. beim Ausfall von Teilen des ÖPNV-Angebots wie S-Bahnen oder Regionalbahnen), aber nur bis zu dem Grad, ab dem das Straßennetz überlastet ist.

- Inwieweit das Carsharing die Versorgungssicherheit bei wetterbedingten Störungen beeinflussen kann, hängt von den Zahl der Anbieter und Nutzer ab.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Organisatorische und nutzerseitige Rahmenbedingungen müssen angepasst werden. Wie privat ist das eigene Auto?
- Die Qualität der Fahrzeuge ist anbieterabhängig und daher unterschiedlich.
- Die Bereitstellungsichte und Erreichbarkeit von privaten Fahrzeugen ist in Großstädten nutzerfreundlicher ausgeprägt. Im ländlichen Raum sind diese Voraussetzungen geringer ausgeprägt. Dies wird sich erst dann ändern, wenn autonome Fahrzeuge zugelassen sind, die selbstständig zum Nutzer fahren können.

#### **Regulatorische Aspekte**

- Die Haftungsfrage stellt ein Risiko dar.
- Versicherungsfragen müssen geklärt werden. Das Auto und nicht der Fahrer bedarf einer Versicherung. \*(2)
- Die Institutionalisierung des Vertrauens zwischen Anbietern und Nutzern wird nur über gute Versicherungsmodelle gewährleistet werden können.
- Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind zu klären. \*(2)
- Gegebenenfalls muss der lokale rechtliche Rahmen angepasst werden.
- Die Rahmenbedingungen sind derzeit ungeeignet und schränken die Leistungsfähigkeit ein.
- Es bedarf veränderter Rahmenbedingungen, die das Konzept positiv beeinflussen (z. B. anderer Umgang mit (öffentlichem) Parkraum innerorts und den privaten Fahrzeugbesitz maßgeblich beeinflusst; steuerrechtliche Vorteile, bei Nachweis über die Einbindung des privaten Fahrzeuges in ein Carsharing-Modell – das ist aber ggf. kaum umsetzbar).
- Der Datenschutz und die Datensicherheit müssen gewährleistet sein.
- Wenn Rahmenbedingungen falsch gesetzt werden, kann das private Carsharing-Modell den motorisierten Individualverkehr noch attraktiver machen und führt zu einem Verkehrsanstieg einschließlich der Zunahme von Staus, des Energieverbrauchs und der emittierten Abgase.
- Die Preisstruktur im privaten Carsharing steht im Widerspruch zu den ÖPNV-Kosten. Insbesondere Kurzstrecken dürften im Carsharing nicht günstiger sein als mit dem ÖPNV, was wiederum schwierig zu steuern ist.
- Die Rahmenbedingungen müssen Push- und Pull- Pakete zur De-Attraktivierung des Individualverkehrs beinhalten. Die Umsetzung des privaten Carsharings ohne gezielte Steuerung auch durch restriktive Rahmenbedingungen (Push und Pull-Pakete) erzeugt eher ökologische Risiken durch einen Anstieg an Verkehr, Zersiedlung und Abgasen.
- Die Bereitstellung von Fahrzeugen durch private Organisationen (z. B. Unternehmen) zur Erhöhung des Angebots vor allem im ländlichen Raum sollte gefördert werden.
- Es braucht deutlichere Anreizprinzipien: Wer sein Fahrzeug mit anderen Nutzern teilt, muss davon einen klaren wirtschaftlichen Vorteil haben, was einer politischen Förderung bedarf.
- Es bedarf ökonomischer Anreize für die Nutzung von sparsamen Elektrofahrzeugen für das private Carsharing.
- Höhere Abstellkosten und damit folglich der Zwang, Fahrzeuge effektiver einzusetzen, könnten eine Chance sein.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Für den Fahrzeughalter können die Einnahmen allenfalls zur Deckung von Teilkosten für die Anschaffung und den Unterhalt des Fahrzeuges dienen. Zu einer Gesamtkostendeckung oder gar zu einer Gewinnerzielung ist das Modell nicht befähigt.
- Eine Peer-to-Peer-Carsharing-Plattform mit Gewinnabsichten wäre vom Geschäftsmodell her nahe an der Autovermietung und zu den Kosten des P2P-Carsharings vermutlich wenig bis kaum rentabel.
- Anbieter müssten regelmäßige Einnahmen entsprechend anzeigen und versteuern, was ein Hemmnis darstellen könnte.
- Ein erfolgreiches Geschäftsmodell für einen Plattformbetreiber ist sehr wohl gegeben– vorausgesetzt, es finden sich genügend Fahrzeuganbieter und es kommt zu einer (zumindest lokalen) Konsolidierung der Anbieterstruktur, d. h., vier oder mehr konkurrierende Plattformen machen wenig Sinn und nehmen sich gegenseitig das Nutzerpotenzial weg.
- Die derzeitige Relevanz von Carsharing ist sehr gering. Das Peer-to-Peer-Modell ist nochmals kleiner, womit die Auswirkungen auf die Ressourcenschonung und -effizienz als gering einzustufen sind.

### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Alte und/oder beschädigte private Fahrzeuge sorgen für Verunsicherung bei Nutzern. \*(2)
- Es besteht nur eine Ressourceneinsparung, wenn Nutzer ihr eigenes Fahrzeug abschaffen. Falls sie zuvor ÖPNV-Nutzer waren, werden keine Ressourcen eingespart.
- Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass das Peer-to-Peer-Carsharing nur für eine bestimmte Zielgruppe akzeptabel ist. Das eigene private Fahrzeug repräsentiert für jeden Besitzer einen gewissen symbolischen Wert. Daher unterliegt die anonyme (oder auch nicht) Fahrzeugvermietung emotionalen und sozialen Hemmnissen (z. B. Wem vertraue ich mein Fahrzeug an?).
- Die Nutzerakzeptanz muss erst noch erreicht werden.
- Schwachstelle Mensch: Der private PKW-Besitzer muss daran denken, sein eigenes Fahrzeug zu buchen.
- Durch das Peer-to-Peer-Carsharing wird zwar die Anzahl zugelassener privater Fahrzeuge sinken, die Fahrleistung mit dem Kfz jedoch tendenziell leicht steigen, weil Nutzer häufiger auf diesem Weg individuelle Verkehrsmittel verwenden, anstatt den ÖPNV zu nutzen. \*(3)
- Effekte für die Ressourcenschonung sind dann vorhanden, wenn die Lebensqualität der Menschen in ihrem Wohnumfeld berücksichtigt wird. Durch weniger Fahrzeuge und verbesserte Mobilitätsangebote steigt die Lebensqualität. Dies umfasst auch immaterielle Ressourcen. Der Flächenverbrauch ist dabei nur ein vergleichsweise kleiner Aspekt.

## 8.12 Fall 6.2 App-gestütztes Fuhrpark-Management im free-floating Carsharing

**Fallbeschreibung:** Bereitstellung von Mietfahrzeugen ohne Bindung an feste Stationen im sogenannten free-floating Carsharing. App-gestütztes Fuhrpark-Management, inkl. Ortung der Fahrzeuge mithilfe von GPS und deren Bereitstellung (Zugangscodes etc.) mithilfe einer App.

**Tabelle 37: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 6.2	5	2	4	1	<b>12</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Dem untersuchten free-floating Carsharing-Modell werden überwiegend positive Wirkungen bescheinigt. Insbesondere für Kriterien wie die Leistungsfähigkeit, die organisatorische Komplexität auf Nutzerseite sowie die Modularität/Subsidiarität werden deutlich positive Wirkungen erwartet.

Über die Organisation des free-floating Carsharings mittels eines App-gestützten Fuhrparkmanagementsystems kann eine deutliche Steigerung in der nutzerseitigen Fahrzeugvermittlung und betrieblichen Fahrzeugorganisation erreicht werden. Ohne ein Software-gestütztes Fuhrparkmanagementsystem wäre dessen Realisierung kaum praktikabel. Besonders für die Nutzer kann die organisatorische Komplexität deutlich reduziert werden. Durch Redundanz von Mobilitätsoptionen wird die allgemeine Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen positiv beeinflusst. Eine neutral bis leicht positive Wirkung attestieren die ExpertInnen dem Carsharing-Modell für den Fall von wetterbedingten Störungen bezogen auf die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen und der grundsätzlichen Anpassungsfähigkeit. Auf den Einfluss von Dauer und Kosten der Systemwiederherstellung im Fall von wetterbedingten Störungen werden keine Änderungen erwartet.

Über die Versorgungssicherheit hinaus hat die Kopplung einen geringfügig positiven Einfluss auf die Endverbraucherpreise. Für den Betreiber besteht ein geringfügiges bis deutliches Potenzial zu einem stabilen Geschäftsmodell. Für den Nutzer wird teils mit einem geringfügigen Investitionsbedarf gerechnet. Die Bewertungen im Bereich der Ressourcenschonung und -effizienz weisen überwiegend eine neutrale Entwicklung auf mit einer teilweise geringfügig positiven Tendenz. Insbesondere besteht das Potenzial zur Reduktion des mobilitätsbezogenen Flächenbedarfs, der aus der Möglichkeit zur Reduktion des privaten Fahrzeugbestandes resultiert. Über diese hinaus resultieren geringfügig positive Wirkungen auf den allgemeinen Rohstoffbedarf.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (technisch) Hohe Praktikabilität für Nutzer und Betreiber; Integrationspotenzial von E-Fahrzeugen; Ressourcenschonung durch Steigerung der Fahrzeugauslastung; Unterstützung der Versorgungssicherheit.

### **Herausforderungen und Risiken**

Gegenüber der Vielzahl an positiven Wirkungen des App-gestützten Fuhrparkmanagements weisen lediglich wenige Kriterien wie die Komplexität, die Störanfälligkeit, die Dependenz, die Treibhausgasemissionen und der Endenergiebedarf eine negative Tendenz auf.

Besonders die ausgeprägte Abhängigkeit des Carsharing-Modells von der ihr zugrundeliegenden IKT-Lösung führt im Fall eines Ausfalls der Technologie zu deutlichen Einschränkungen bis hin zum Totalausfall der Mobilitätsdienstleitung. Jedoch werden für die Störanfälligkeit lediglich geringfügig negative Folgen erwartet. Die technische Komplexität steigt geringfügig bis deutlich an. Bezogen auf die organisatorische Komplexität, fällt die große Spannweite der Bewertungen auf.

Einzelne Experten unterstreichen das Potenzial der Kopplung, im Bereich der Ressourcenschonung und -effizienz zu deutlich unerwünschten Folgen zu führen – nämlich dann, wenn das zusätzliche Mobilitätsangebot nicht durch gezielte Einschränkungen des Individualverkehrs begleitet ist (Push-(Pull-Pakete).

#### ***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (technisch) stabil zu betreibende technische Nutzungsoberfläche ist zwingend erforderlich; Ausgrenzung von Nutzern über die Wahl der bereitgestellten Bedienoberfläche; Ressourcenschonung ist stark abhängig vom künftigen Mobilitätsverhalten bedingt durch die Anwendung.
- (institutionell/organisatorisch) Förderung von Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Carsharing-Anbietern u. gegenüber bestehenden ÖPNV-Angeboten; Einbindung der Dienstleistung im gesamtstädtischen Mobilitätsangebot; hohes Organisationserfordernis des Fahrzeugbestandes durch den Flottenbetreiber (u. a. durch Verteilung des Bestandes im Marktgebiet, der Eignung des Geschäftsmodells nur für große Fahrzeugflotten); derzeit ist die Nutzungsdauer im Carsharing kurz; Umsetzung des Carsharing-Modells im ländlichen Raum schwierig zu realisieren.
- (regulatorisch) Anpassung der Stellplatzverordnung/des Parkraummanagements zur Förderung von Carsharing; Gewährleistung einer Sicherheit der persönlichen Nutzerdaten ist erforderlich; Bedarf zur Anpassung der Tarifmodelle insbesondere bei Nutzung auf kurzen Distanzen, zur Vermeidung von Konkurrenzsituation zum ÖPNV; Unterstützung der Einbindung nachhaltiger Mobilitätsoptionen, wie E-Fahrzeugen.
- (gesellschaftlich) Rebound-Effekte werden unterstützt, da der Individualverkehr attraktiver und zugänglicher wird.

**Tabelle 38: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 6.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<p><b>++ (deutlich positive Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>• Leistungsfähigkeit ( Teilsystem 2)</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>• Redundanz</li> <li>• Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> </ul>	<p><b>-- (deutlich negative Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependenz</li> </ul>
<p><b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantität und Qualität der Dienstleistung</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Betreiber)</li> <li>• Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>• Flächenbedarf</li> <li>• Rohstoffbedarf</li> </ul>	<p><b>- (geringfügig negative Tendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Komplexität</li> <li>• Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>• Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>• Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>• Emissionen Treibhausgase</li> <li>• Störanfälligkeit des Betriebes</li> </ul>
<p><b>0 (keine Änderungstendenz)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>• Schädliche Bodenveränderung</li> <li>• Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>• Lärmemissionen</li> <li>• Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>• Abfallaufkommen</li> <li>• Wasserbedarf</li> <li>• Puffervermögen</li> <li>• Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>• Dauer der Funktionswiederherstellung</li> <li>• Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

### 8.12.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 90: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=12) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 1: Sind solche App- und GPS-gestützten Systeme geeignet, das Fahrzeugmanagement im nicht standortgebundenen (free-floating) Carsharing für Fahrzeuganbieter und Fahrzeugnutzer in einem relevanten Maß effizienter zu organisieren?	
Frage 2: Führen solche App- und GPS-gestützten Systeme zu einer verbesserten Nutzbarkeit des Carsharing?	
Frage 3: Führt das free-floating Carsharing-Modell zu einer erhöhten technischen Komplexität im System der Fahrzeugvermittlung?	
Frage 4: keine Relevanz	-
Frage 5: Verändert die App- und GPS-gestützte Fahrzeugbereitstellung den organisatorischen Aufwand für die Fahrzeuganbieter?	
Frage 6: Verändert ein solche App- und GPS-gestützte Fahrzeugbereitstellung den organisatorischen Aufwand für die Fahrzeugnutzer?	

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 91: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=12) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 7: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Konsequenzen für die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen für Fahrzeugnutzer?	
Frage 8: Erfordert die Nutzung der App- und GPS-gestützten standortungebundenen Fahrzeugbereitstellung nutzerseitige Investitionen?	
Frage 9: Hat die Nutzung der App- und GPS-gestützten standortungebundenen Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die Endverbraucherpreise im Carsharing?	
Frage 10: keine Relevanz	-
Frage 11: Hat die Nutzung der App- und GPS-gestützten standortungebundenen Fahrzeugbereitstellung das Potenzial für ein wirtschaftliches Geschäftsmodell für die Carsharingbetreiber?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 92: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=12) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 12: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf den Primärenergiebedarf der durch die Nutzer realisierten Mobilität?	
Frage 13: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der durch die Nutzer realisierten Mobilität?	
Frage 14: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf den Flächenbedarf vor Ort?	
Frage 15: Führt die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung zu schädlichen Bodenveränderungen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung im Carsharing die Menge der Treibhausgasemissionen?	
Frage 17: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die Emission umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe (z. B. Feinstäube, Stickoxide)?	
Frage 18: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die Emission von Lärm?	
Frage 19: Wie wirkt die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung auf den Bedarf an Rohstoffen?	
Frage 20: Wie wirkt die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung auf die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf das Abfallaufkommen beim Betrieb der Mobilitätsform?	
Frage 22: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Mobilitätsform?	

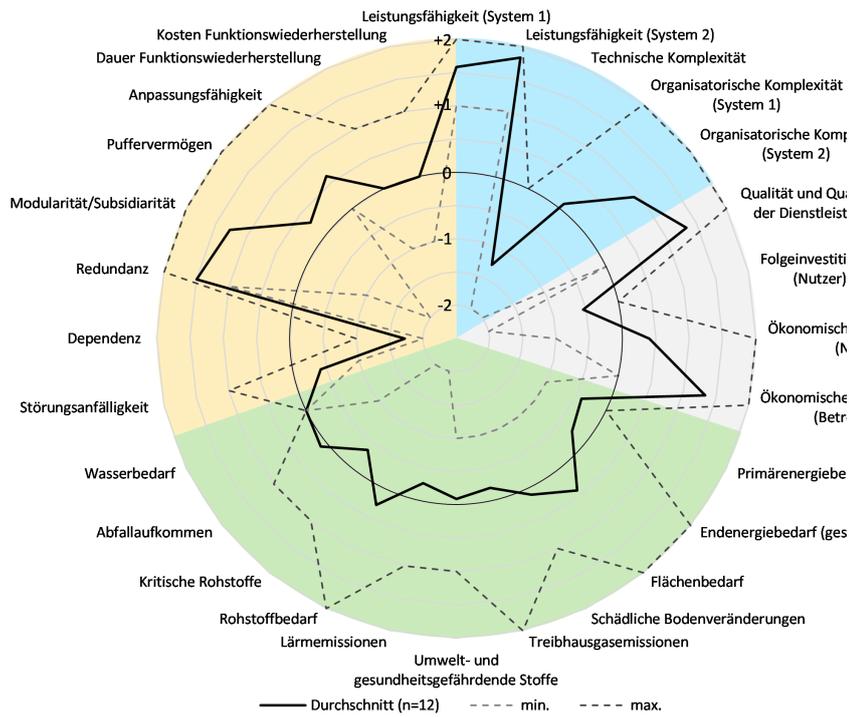
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 93: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 6.2, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=12) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 23: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die Störunganfälligkeit der Fahrzeugvermittlung im Carsharing?	<p>7 votes for -1, 3 votes for 2</p>
Frage 24: keine Relevanz	-
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall bei der App zugleich zu Einschränkungen bei der Bereitstellung/Nutzung der Carsharing-Fahrzeuge?	<p>8 votes for -2, 3 votes for -1</p>
Frage 26: keine Relevanz	-
Frage 27: Trägt die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung im Carsharing grundsätzlich zu einer besseren Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen für den Nutzer bei?	<p>6 votes for 1, 6 votes for 2</p>
Frage 28: Verändert die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung die Handlungsmöglichkeiten der lokalen Akteure bei der Sicherstellung der Fahrzeugvermittlung?	<p>11 votes for 0, 3 votes for 1, 6 votes for 2</p>
Frage 29: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen im Fall wetterbedingter Störungen?	<p>5 votes for 0, 3 votes for 1, 1 vote for 2</p>
Frage 30: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit des Infrastruktursystems an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	<p>4 votes for 0, 3 votes for 1, 1 vote for 2</p>
Frage 31: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung einen Einfluss auf die Dauer möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen?	<p>1 vote for -1, 8 votes for 0, 1 vote for 1</p>
Frage 32: Hat die App- und GPS-gestützte standortungebundene Fahrzeugbereitstellung einen Einfluss auf die Kosten möglicher Betriebsunterbrechungen durch wetterbedingte Störungen?	<p>1 vote for -1, 7 votes for 0, 1 vote for 1</p>

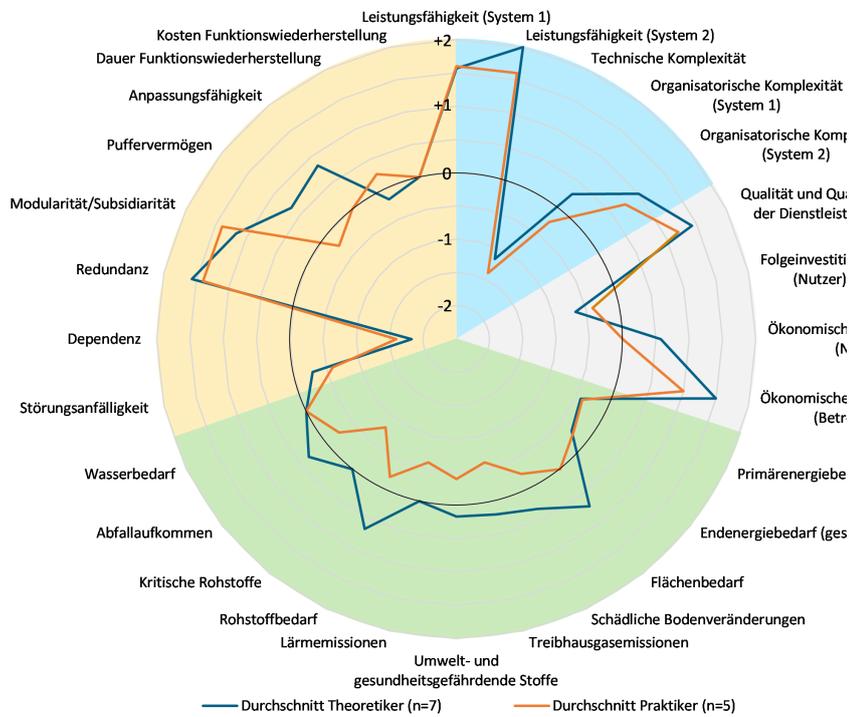
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 94: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 6.2**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 95: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 6.2**



Quelle: eigene Darstellung

## 8.12.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Technische Aspekte

- In Extremsituationen sind dezentrale Systeme, sofern diese funktionieren, zentralen Systemen durch eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit überlegen.
- Die App-basierte Fahrzeugvermittlung ist eine gute Organisationsform des Carsharings, da eine hohe Flexibilität in Echtzeit von Angebot und Nachfrage erreicht wird.
- Für den Nutzer ist die App-basierte Fahrzeugbereitstellung eine gut geeignete Option.
- Carsharing bedeutet, weniger Fahrzeuge müssen produziert und entsorgt werden müssen. Bestehende Fahrzeuge werden besser ausgelastet. Dies vermindert den Ressourcenbedarf rund um das Fahrzeug selbst. Zudem wird die Autonutzung vereinfacht, was mit Folgen für die Kraftstoffnutzung und die damit verbundenen Emissionen einhergeht.
- Die App-basierte Fahrzeugvermittlung steigert die Auslastung der Carsharing -Fahrzeuge und damit eine Verminderung der Saisonabhängigkeit des Carsharing-Betriebs.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die nutzerseitige Technik sollte nicht nur an ein System gebunden sein.
- Die Nutzungsmöglichkeit steigt und fällt mit der Stabilität von Mobilfunknetzen und GPS-Signalen. Fallen diese aus, ist die Nutzung eingeschränkt bis nicht gegeben.
- Risiken können durch Verbindungsprobleme/Funklöcher im Mobilfunknetz entstehen.
- Risiken können in einer mangelnden Konnektivität des Mobilfunknetzes, mangelnder Interoperabilität der Betriebssysteme, Software und Data Mining durch Wettbewerber liegen.
- Ausfallszenarien der Apps und Datennetze müssten getestet werden. Ein "Offline-Modus" des Systems für Notfallsituationen wäre evtl. sinnvoll.
- Wetterextreme sind nur eine von vielen Bedrohungen. Wichtig wäre auch die Sicherheit App-gestützter CS-Systeme, z. B. gegen Hacker, Diebstahl und Sabotage.
- Über die technische Funktionsfähigkeit könnten eventuell bestimmte Nutzergruppen ausgegrenzt werden (z. B. Ältere ohne Smartphone).
- Eine Ressourcenschonung und -effizienz wird nur dann unterstützt, wenn die Anzahl von Individualfahrzeugen zugleich reduziert werden kann und wenn daraus keine Konkurrenz zu bestehenden ÖPNV-Angeboten resultiert. Insofern sind ggf. Regelungen erforderlich, an welchen Orten die Fahrzeuge genutzt und geparkt werden dürfen.
- Bei der heutigen Marktrelevanz hat die Ressourcenschonung und -effizienz keine bis eine nur geringe Bedeutung. \*(2)

#### Institutionelle und organisatorische Aspekte

- Eine große Flotte kann heutzutage nur in einem free-floating-Carsharingmodell betrieben werden.
- In einem geringen Maße können Nutzungskonkurrenzen zwischen der kommerziellen und privaten Nutzung entstehen. Über verschiedene Nutzungszeiten dürfte sich dies jedoch sehr in Grenzen halten.

- Es besteht das Risiko des Abstellens von Fahrzeugen in schwach genutzten Räumen. \*(2)
- Flottenbetreiber brauchen eine Garantie der Verfügbarkeit von Carsharing-Fahrzeugen. Dies muss organisatorisch gewährleistet werden.
- Die Nutzung der App- und GPS-gestützten standortungebundenen Fahrzeugbereitstellung kann zu einer erheblichen Verkehrszunahme führen und in Konkurrenz zu den Angebot des ÖPNV treten sowie eine Verschiebung des Modal Split zu Lasten des ÖPNV führen. Das Nachhaltigkeitspotenzial von Carsharing könnte so gefährdet werden. \*(2)
- Wegen der relativ kurzen Nutzungsdauer von Fahrzeugen im Carsharing sind Regelungen zur weiteren Verwendung der Fahrzeuge nötig.
- In Städten mit geringer Nutzungsdichte und einem schlechtem ÖPNV-Angebot könnte die Attraktivität gering sein, wenn die Wege zum Fahrzeug zu lang werden.
- Eine Integration in das bestehende ÖPNV-Angebot sollte angestrebt werden.
- Durch Skaleneffekte (mehr Nutzer) mit zeitlich unterschiedlichen Nutzungsprofilen bietet das free-floating Carsharing große Chancen für einen wirtschaftlicheren Betrieb und somit auch für Zusatzeffekte für Bestandskunden (z. B. mehr Fahrzeuge, günstigere Tarife). Voraussetzung ist allerdings, dass die Carsharing-Anbieter diese Effizienzgewinne auch an die Kunden weitergeben.
- Mit der Einbettung des free-floating Carsharing in ein Gesamtkonzept für eine umweltfreundliche Mobilitätsentwicklung (z. B. Strategic Urban Mobility Plan - SUMP) und einem hohen Anteil von sparsamen Elektrofahrzeugen wäre das Modell eine geeignete Option zur Ressourcenschonung und -effizienz.

### **Regulatorische Aspekte**

- Auf rechtlicher Seite besteht das Problem der Stellflächen im Straßenraum.
- Die Stellplatzverordnung ist ein kritischer Faktor. Diesbezüglich könnte die Zahl der Stellplätze reduziert werden, wenn das Carsharing dabei berücksichtigt würde.
- Die Parkraummanagement bzw. Stellplatzvermarktung in den Gemeinden sollt für ein erfolgreiches Geschäftsmodell angepasst werden.
- Fragen des Datenschutzes werden wichtiger, weil Bewegungsprofile der Nutzerinnen erstellt und verkauft werden könnten.
- Es bedarf der Anpassung der Rahmenbedingungen, um den Rechtsgrundsatzes für einen diskriminierungsfreien Zugang (Straßenrecht) zu erfüllen.
- Um Elektrofahrzeuge einbinden zu können, bedarf es generell verbesserte Rahmenbedingungen für die E-Mobilität.
- Der Rechtsrahmen muss angepasst werden insbesondere das Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharing (CsgG), das Elektromobilitätsgesetz (EmoG) und das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG).
- Es bedarf unter anderem der Anpassung von rechtlichen Anforderungen bei Zeit- und Kilometerbasierten Tarifen.
- Ähnlich der Durchleitungsgebühren und den Energie- und Telekommunikationsnetzen müsste die Tarifbildung der Carsharing-Anbieter gewissen Transparenzkriterien genügen. Eventuell wäre dies ein weiterer Fall für die BNetzA.
- Die Nutzung des Carsharings auf kurzen Distanzen, die mit ÖPNV und Rad besser zu bewältigen wären, sollte verteuert werden.

- Der Anpassungsbedarf der Rahmenbedingungen wird durch die allgemeine Etablierung von Carsharing-Modellen ausgelöst, nicht speziell durch das Anforderungsprofil des dem Fall zugrundeliegenden Carsharing-Modells.
- Die stationsgebundenen Angebote mit planvollerer Nutzung sollten bevorzugt werden.

#### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Das Free-floating Carsharing ersetzt das eigene Fahrzeug, aber macht auch diejenigen Automobile, die sonst keines nutzen würden oder es sich nicht leisten könnten. Insgesamt ist daher der positive ökologische Aspekt des Carsharings gering.

## 8.13 Fall 7.1 Intelligente Niederschlagswasserbewirtschaftung

**Fallbeschreibung:** Sicherstellung der Spülwirkung eines „ersten“ Schwalles von Niederschlagswasser in Kanalsystemen durch gesteuerte temporäre Einleitung von Niederschlagswasser in Schmutzwasserkanalisationen aus Niederschlagswassersammelnetzen.

**Tabelle 39: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 7.1	3	2	4	7	16

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Die untersuchte Kopplung entfaltet insbesondere im Bereich der Ressourcenschonung und -effizienz sowie der Versorgungssicherheit neutrale bis geringfügig positive Wirkungen. Ein geringfügiges Potenzial zur Leistungssteigerung in der Bewirtschaftung wird lediglich dem Teilsystem der Schmutzwasserentsorgung attestiert, bei einer zugleich Nicht-Beeinflussung der Leistungsfähigkeit und gleichbleibender Störanfälligkeit im Teilsystem der Niederschlagsbewirtschaftung. Dennoch ist zu bemerken, dass etwa ein Viertel der eingebundenen ExpertInnen eher von einer geringfügigen Reduktion der Leistungsfähigkeit ausgehen.

Dennoch wird die Versorgungssicherheit geringfügig positiv gesehen – etwa in Bezug auf die Störanfälligkeit, Modularität/Subsidiarität auf lokaler bzw. regionaler Ebene oder die allgemeine Anpassungsfähigkeit. Weitgehend neutral bewertet werden die Abhängigkeiten der gekoppelten Teilsysteme sowie die Quantität und Qualität in der Schmutzwasserentsorgung. In Bezug auf Ressourcenschonung und -effizienz dominieren ebenfalls neutrale Wertungen. Lediglich dem Wasserbedarf wird ein geringfügiges Potenzial zur Abnahme attestiert, da die Anzahl der üblicherweise durchgeführten Spülungen des Schmutzwassernetzes verringert werden kann.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- Keine Nennung.

#### Herausforderungen und Risiken

Eine besondere Herausforderung stellt der durch die Kopplung bedingte Störanfälligkeitsanstieg im Teilsystem der Abwasserentsorgung bei Steuerungsverlust der ins Kanalnetz eingeleiteten Niederschlagsmengen. Für nahezu alle Kriterien der Versorgungssicherheit fällt die starke Uneinheitlichkeit der Bewertungen auf. Meist liegen bipolare Bewertungen zwischen negativen und positiven Wertungen vor (z. B. Redundanz, lokale Handlungsmöglichkeiten, allgemeine Anpassungsfähigkeit). Für die Abhängigkeiten werden neutrale Wirkungen mit leicht negativer Subtendenz erwartet.

Im Hinblick auf die technische und organisatorische Komplexität ist für die beteiligten Teilsysteme von einem geringfügigen Anstieg auszugehen.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit des auf der Kopplung beruhenden Geschäftsmodells fallen die Bewertungen überwiegend indifferent aus. Für Betreiber und Nutzer wird ein geringer Investitionsbedarf erwartet. Die Wirkungen auf die Bedarfe nach Primärenergie, Endenergie, Flächen und Rohstoffen neutral bis geringfügig negativ bewertet.

***Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):***

- (technisch) Überlastung der Schmutzwasserkanalisation (u. a. durch Fehlfunktionen, Variation der Niederschlags- u. Schmutzwasserbelastung); Erfordernis von Rückstausicherung und einer dynamischen Systemüberwachung; Standort- /Umsetzungsabhängige Realisierungsherausforderungen (z. B. begrenzte Flächenverfügbarkeit, hohe Komplexität); Verdünnung des Schmutzwassers; Alternative Optionen sind zu prüfen (z. B. Anschluss Falleleitungen, Anschluss von anderen belasteten Abwässern, Umsetzung eines verzögerten Spülstoßes).
- (institutionell/organisatorisch) Bedarf zur Verbindung des Niederschlags- u. Abwassermanagements; das Organisationserfordernis steigt an.
- (regulatorisch) Klärung von haftungs- und versicherungstechnischen Problemen; Aufnahme der Lösung in technische Regelwerke und im Rechtsrahmen; Anpassung der Gebührenordnung.
- (wirtschaftlich) Ausgeprägte Standortabhängigkeit; Finanzieller Mehraufwand durch die Lösung.

**Tabelle 40: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 7.1**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Wasserbedarf</li> <li>Redundanz</li> <li>Modularität/Subsidiarität – lokale bzw. regionale Handlungsmöglichkeiten</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 1)</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit ( Teilsystem 2)</li> <li>Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Schädliche Bodenveränderung</li> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Rohstoffbedarf</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 1)</li> <li>Dependenz (Teilsystem 2)</li> <li>Dauer/Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	

### 8.13.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 96: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Leistungsfähigkeit“

Leistungsfähigkeit/Funktionalität	Antwortübersicht (n=16) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 1: Ist die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser in Schmutzwasserkanalisationen grundsätzlich geeignet, einen signifikanten Beitrag zum Unterhalt von Schmutzwassernetzen zu leisten?	
Frage 2: Führt die Teileinkopplung von Niederschlagswasser zu Einschränkungen in der Niederschlagswasserbewirtschaftung?	
Frage 3: Wie schätzen Sie den Einfluss dieser Kopplung auf die Komplexität des technischen Systems der Schmutzwasserentsorgung ein?	
Frage 4: Wie schätzen Sie den Einfluss dieser Kopplung auf die Komplexität des technischen Systems der Niederschlagswasserentsorgung ein?	
Frage 5: Wie schätzen Sie den Einfluss dieser Kopplung auf die organisatorische Komplexität im System der Schmutzwasserentsorgung ein?	
Frage 6: Wie schätzen Sie den Einfluss dieser Kopplung auf die organisatorische Komplexität im System der Niederschlagswasserentsorgung ein?	

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 97: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“

Soziale und ökonomische Verträglichkeit	Antwortübersicht (n=16) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 7: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Konsequenzen für die vom Nutzer wahrgenommene Dienstleistung der Abwasserentsorgung?	
Frage 8: Erfordert die Umsetzung der „innovativen“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser in Abwassernetzen Investitionen in den angeschlossenen Objekten?	
Frage 9: Wie wirkt die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser auf die Kosten der Abwasserentsorgung vor Ort?	
Frage 10: keine Relevanz	-
Frage 11: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser das Potenzial für eine dauerhaft kostendeckende Bewirtschaftung der Kanalnetze vor Ort?	

Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 98: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=16) Legende: ■ -2 ■ -1 ■ 0 ■ 1 ■ 2
Frage 12: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Schmutz- und Niederschlagswasserentsorgung vor Ort?	
Frage 13: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Schmutz- und Niederschlagswasserentsorgung vor Ort?	
Frage 14: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf den Flächenbedarf für Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 15: Führt die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 16: Verändert die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 17: Verändert die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser die Menge der Emissionen von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastruktur?	
Frage 19: Wie wirkt die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) für Bau und Erhalt der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 20: Wie wirkt die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf das Abfallaufkommen (z. B. Schlämme etc.) beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

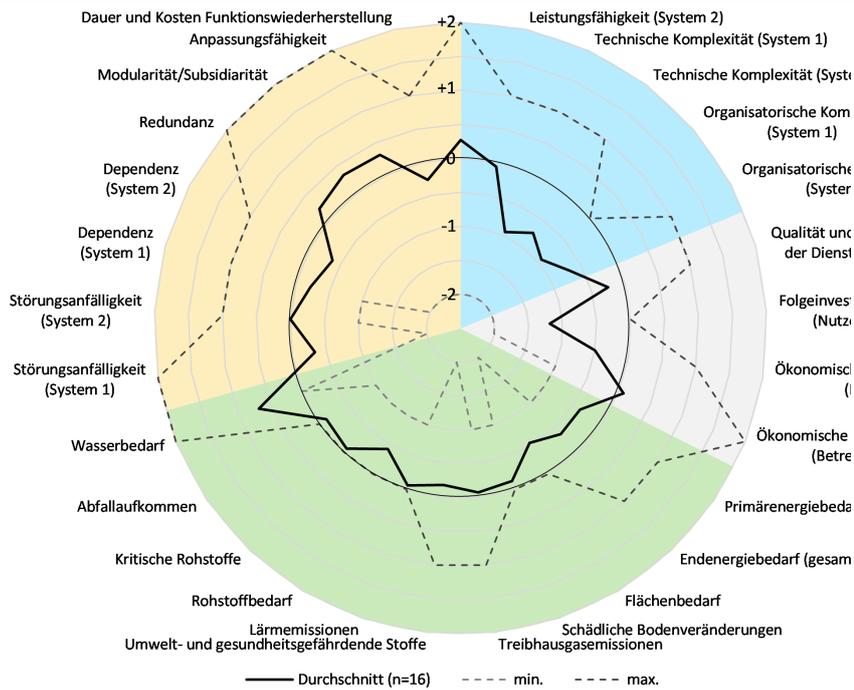
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 99: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.1, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=16) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 23: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Schmutzwasserentsorgung?	
Frage 24: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Niederschlagswasserentsorgung?	
Frage 25: Führt ein (Funktions-)Ausfall im Niederschlagswassernetz zu einer Funktionseinschränkung bei der Schmutzwasserentsorgung?	
Frage 26: Führt ein (Funktions-)Ausfall im Schmutzwassernetz zu einer Funktionseinschränkung bei der Niederschlagswasserentsorgung?	
Frage 27: Hilft die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser dabei, die Funktionssicherheit der Schmutzwasserentsorgung zu stärken?	
Frage 28: Verändert die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser die Handlungsmöglichkeiten der lokalen bzw. regionalen Akteure (beteiligte Ver- und Entsorgungsunternehmen) bei der Bewältigung von Störungen durch Wetterextreme?	
Frage 29: keine Relevanz	-
Frage 30: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit der beteiligten Infrastruktursysteme an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31/32: Hat die „innovative“ Teileinkopplung von Niederschlagswasser Einfluss auf die Dauer oder die Kosten der Reparatur/Wiederinbetriebnahme nach Störungen durch Wetterextreme?	

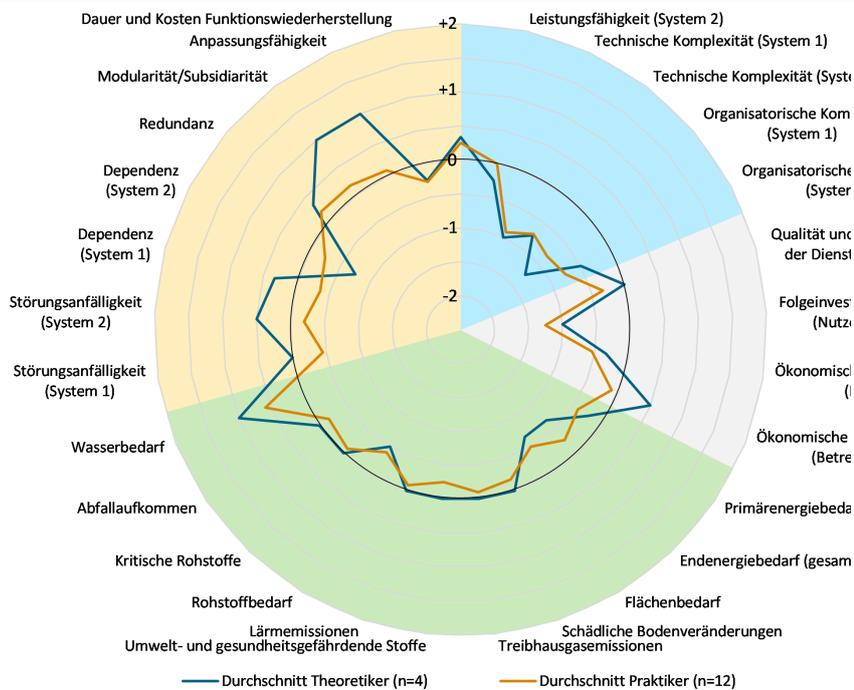
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 100: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung - Fall 7.1



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 101: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 7.1



Quelle: eigene Darstellung

## 8.13.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

- keine Nennungen

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Die potenzielle Überlastung des SW-Netzes bei Regen ist ein Risiko.
- Es besteht das Problem der meist fehlenden Rückstausicherungen im Schmutzwassernetz. Mögliche Überflutungsfälle sind bei Niederschlägen zu vermeiden! \*(2)
- Technisch ist die Kopplung möglich. Dennoch kann es zu Fehlfunktionen durch eine fehlende Überwachung kommen.
- Bei der Verbindung der Netze ist die Rückstaprobematik und damit einhergehend auch das Erfordernis der Überwachung zu betrachten.
- Eine Überlastung der Schmutzwasserkanalisation muss ausgeschlossen werden. Daher muss der Zufluss von Niederschlagswasser über die angeschlossenen Flächen bzw. einer technischen Weiche sichergestellt sein. Technisches Versagen kann zum vollständigen Abfluss des Niederschlagswassers in die Schmutzwasserkanalisation führen, dadurch erhöht sich die Störanfälligkeit des Systems durch Versagen der Steuerung. \*(4)
- Es findet eine Verlagerung der Ablagerungen von „oben“ nach „unten“ statt. Zudem findet eine verstärkte Ablagerung vor den Schmutzwasserpumpen statt, was zu Betriebsproblemen führt.
- Die Kopplung stellt nicht die bestmögliche Option dar, weil diese baulich und auch betrieblich sehr komplex ist.
- Der technische Aufwand wird als sehr hoch eingeschätzt. Daher wird sich auch keine Ressourcenschonung einstellen, da die Bauwerke der Kopplung nicht trivial zu gestalten sind. \*(3)
- Kurzfristig bestehen keine größeren Risiken. Langfristig (Veränderungen der Schmutzwasserbelastung über Jahrzehnte) wird es schwierig, Überlastungen durch solche Maßnahmen frühzeitig zu erkennen und zu verhindern.
- Ob die Kopplung die bestmögliche Option darstellt, ist abhängig von der Realisierung (z. B. Speicher füllen und Wasser nutzen).
- Die Leistungsfähigkeit von Schwallwellen bzw. der Kopplung ist sehr stark standortabhängig und kann nicht pauschal beantwortet werden. \*(2)
- Die Verdünnung von Schmutzwasser durch Niederschlagswasser ist immer mit vielen Nachteilen verbunden (z. B. durch Verschlechterung des Reinigungspotenzials in der Kläranlage, erhöhte Überstaugefahr, energetischer Mehraufwand durch Pumpen). Deshalb sollte die Verwendung von Niederschlagswasser zu Spülzwecken immer genau bedacht und auf ein Minimum beschränkt werden. Bei einem gesteuerten Anschluss z. B. über ein Ventil kann der Wassereintrag minimiert werden, was mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden ist.
- Die hydraulische Kapazität der Schmutzentwässerung ist in der Regel nicht auf die Übernahme größerer Regenwassermengen ausgelegt.
- Es braucht eine dynamische Bewirtschaftung der Kanalisationen, um limitierte Kanäle zu erkennen und hydraulische Überlastungen durch die Spülung zu verhindern.
- Oft sind Schmutzwasserkanalisationen und nachgeschaltete Pumpwerke oder Kläranlagen bei

Niederschlägen ohnehin zu stark belastet. Ferner sind Spülstöße zu Niederschlagsbeginn meist kontraproduktiv.

- Die beschriebene Technologie ist seit mind. 2 Jahrzehnten verfügbar, hat sich aber bei uns nicht durchgesetzt.
- Die Niederschlagsmuster verändern sich von Jahr zu Jahr. Eine dezentrale Niederschlagspeicherung im Stadtgebiet ist limitiert und teuer.
- Hinsichtlich der Ressourcenschonung stellt ein etwaiger Austritt von Schmutzwasser bei hydraulischer Überlastung der Schmutzwasserkanalisation ein Risiko dar.
- Die Kopplung funktioniert insgesamt nicht.
- Diese Kopplung bildet keine geeignete Option, um die periodische Spülung von Schmutzwassernetzen sicherzustellen.
- Wenn durch den Einsatz von Technik die wasserwirtschaftlichen Nachteile minimiert werden, entstehen technische und betriebswirtschaftliche Risiken.
- Um den Fremdwassereintrag zu minimieren, ist es ggf. ausreichend, eine Falleitung eines Gebäudes an die Schmutzwasserkanalisation anzuschließen. Die beste Maßnahme wäre der Anschluss des Niederschlagsabflusses einer Hauptverkehrsstraße, da somit eine Spülwirkung erzeugt wird und zeitgleich belastetes Wasser abgeleitet wird.
- Die Schwallspülung stellt die wirksamste Art der Spülung von Schmutzwassernetzen dar.
- Ein verzögerter Spülstoß zu Trockenzeiten könnte erfolgversprechend sein.
- Dieses Konzept ist in der Entwässerungspraxis bekannt und wird (illegaler Weise) wohl auch schon seit langem im Einzelfall angewendet, um eine Ablagerungsprävention in flachen Kanalabschnitten zu gewährleisten. Oftmals wird der "oberste" Entwässerungsanschluss (u. a. der private Hofablauf, der Straßeneinlauf) als bewusster Fehlanschluss ans Schmutzwassernetz vorgenommen. \*(2)
- Dort, wo eine regelmäßige Spülung der Schmutzwasserkanalisation erforderlich und mit technischen Geräten zu aufwändig ist, repräsentiert der beschriebene Fall eine gut geeignete Option.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Eine stärkere Kopplung von Niederschlagswasser- und Abwassermanagement auf einem allgemeineren Niveau ist nötig. Es macht wenig Sinn, Anlagen zu errichten, um damit einzig die Schmutzwasserkanalisationen spülen zu können. Allerdings kann es Sinn machen, Niederschlagswasserspeicher zu errichten, um erstens die Entwässerung zu entlasten, zweitens Überschwemmungen zu vermindern bzw. verhindern und drittens für die Verbesserung des Stadtklimas zu nutzen (u. a. durch Grünflächenbewässerung oder Speisen von Brunnen). Diese Becken können dann gezielt -aufgrund der Regenvorhersage - in die Schmutzwasserkanalisation entleert werden, um potenzielle Niederschläge aufnehmen zu können und um die Kanäle zu spülen.
- Der organisatorische Aufwand wird als hoch eingeschätzt.
- Die Option hat technische, betriebswirtschaftliche und wasserwirtschaftliche Nachteile und sollte eine generelle Ausnahme bleiben. Im täglichen Betrieb unserer Großstädte wird verzweifelt versucht, den umgekehrten Weg zu gehen: Fehlanlüsse aufzudecken und normgerecht umzubauen, Niederschlags- und andere Fremdwässer (z. B. Grund- und Drainagewasser) vom Schmutz- und Mischkanal fernzuhalten, damit genügend Raum im Kanal für belastete Abwässer besteht und keine Gefährdung durch einen Überstau entsteht.

### **Regulatorische Aspekte**

- Ein selbst erzeugtes erhöhtes Risiko von Rück- oder Überstau ist rechtlich und versicherungstechnisch problematisch.
- Für ein erfolgreiches Geschäftsmodell sollte die überwiegend getrennte Gebührenordnung für Schmutzwasser und Niederschlagswasser aufgelöst werden.
- Das technische Regelwerk sollte eine solche Option benennen und als Möglichkeit der Kanalspülung zulassen.
- Der Ansatz ist wasserrechtlich nicht zulässig gemäß §55 Abs. 2: "Fehlanschlüsse" verstoßen auch gegen kommunale Entwässerungssatzungen.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Die Wirtschaftlichkeit ist entsprechend stark standortabhängig. Sowohl die Investitionskosten für den Umbau der Infrastruktur als auch die erhöhten Kosten der Aufbereitung zusätzlichen Spülwassers müssten derzeit durch den Betreiber getragen werden. Kompensiert könnten die Kosten durch Einsparungen in der Kanalreinigung und zukünftig geringerer Kanalsanierungskosten. Ob sich die finanziellen Aufwendungen und Einsparungen ausgleichen, ist standortabhängig. \*(2)
- Es bestehen ökonomische Risiken bzgl. des technischen Mehraufwandes, insbesondere der Rückstausicherung.

## 8.14 Fall 7.2 Kontrollierter Überstau – Management von Überlastungssituationen im Kanalnetz in Kombination mit Multifunktions-Freiflächen im urbanen Raum

**Fallbeschreibung:** Entlastung von Mischkanalisationen bei Starkregenereignissen durch kontrollierten Überstau im Kanalnetz an dafür vorgesehenen und gezielt ausgebauten „Überstauunkten.“ Ableitung und Versickerung der aus dem Kanalnetz kontrolliert austretenden, stark verdünnten Abwässer auf dafür vorgesehene öffentliche Freiflächen.

**Tabelle 41: Zusammensetzung Experten-Panel**

Befragung	Forschung und Planung		Praxis		Summe
	Forscher	Planer	öffentl. Stellen, Fachverbände	Betreiber	
Fall 7.2	3	1	3	6	<b>13</b>

### Ergebniszusammenfassung aus strukturierter Bewertung und weiteren Hinweisen

#### Stärken und Potenziale

Die Kopplung des kontrollierten Überstaumanagements entfaltet insbesondere in der Schmutzwasserentsorgung auf Ebene der Leistungsfähigkeit und in Teilen der Versorgungssicherheit geringfügig positive Wirkungen. Für die Störanfälligkeit, die Puffer- und Speicherkapazität, die allgemeine Anpassungsfähigkeit, die Dauer und die Kosten der Wiederherstellung werden geringfügig positive Wirkungen erwartet. Für die Ressourcenschonung und -effizienz sind keine Änderungstendenzen feststellbar.

Es besteht ein geringfügiges Potenzial zu positiven ökonomischen Konsequenzen und ein stabiles Geschäftsmodell für den Betreiber, was jedoch nicht von allen befragten ExpertInnen geteilt wird.

#### **Als weitere Potenziale wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

- (institutionell/organisatorisch) Potenzial zur Neugestaltung der angeschlossenen öffentlichen Flächen.
- (wirtschaftlich) Kostenvorteil gegenüber z. B. Regenrückhaltebecken.

#### Herausforderungen und Risiken

Die Kopplung geht mit einer geringfügigen Nutzungseinschränkung der angeschlossenen Multifunktionsfreiflächen einher. Als zentrale Herausforderung wird vordergründig der geringfügige bis deutliche Anstieg der organisatorischen Komplexität gesehen.

Für die technische Komplexität wird einhellig eine geringfügige Steigerung erwartet. Im Bereich der Ressourcenschonung und -effizienz entstehen in einem geringen Maß negative Auswirkungen.

Im Allgemeinen steigt geringfügig der Flächenbedarf durch die räumliche Versickerung im Stadtgebiet an. Für die meisten Ressourcen-orientierten Kriterien inkl. dem Abfallaufkommen werden neutrale Wirkungen erwartet.

**Als weitere Herausforderungen wurden hervorgehoben (Hinweise der Befragten):**

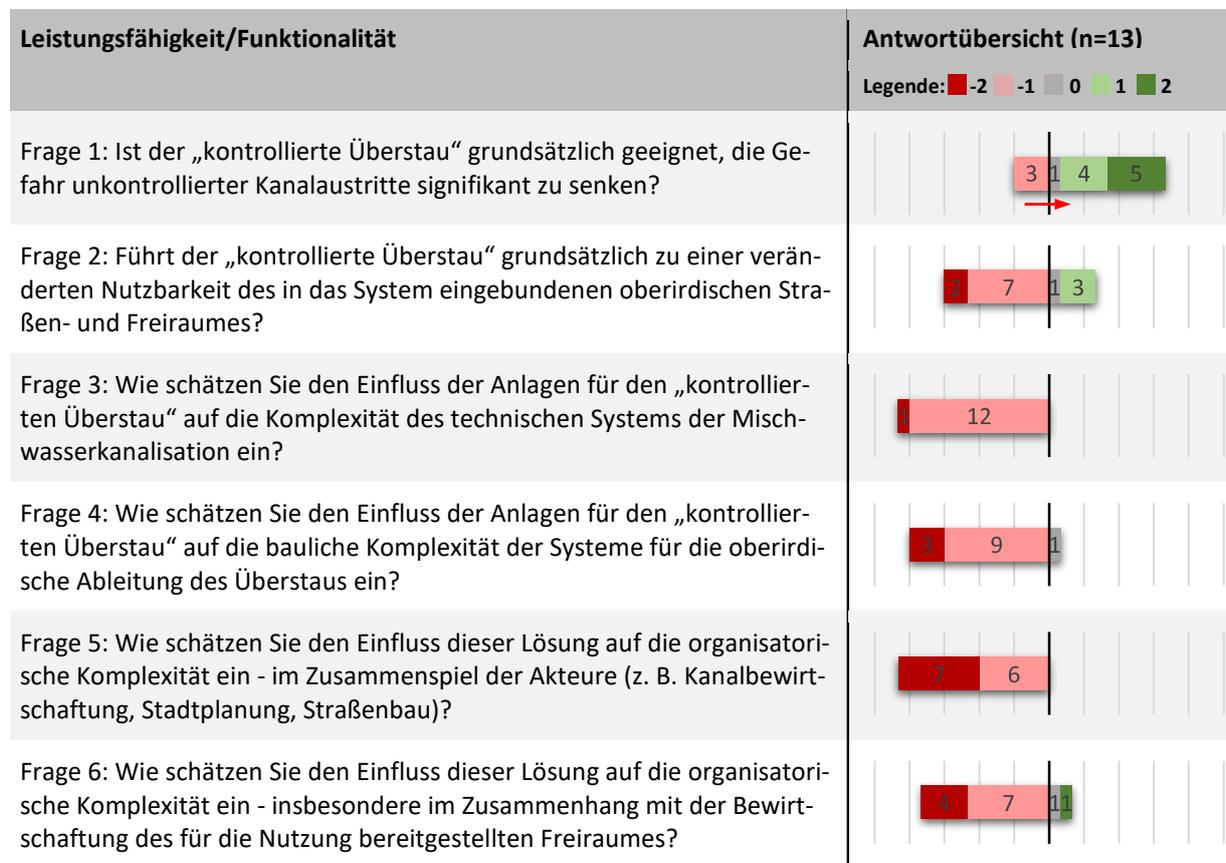
- (technisch) Hygienische Einschränkungen und stoffliche Belastungen sowie Reinigungsbedarf; Nutzungseinschränkungen der angeschlossenen Flächen; Reduzierung der Versorgungssicherheit (z. B. durch eingeschränkte Steuerbarkeit des kontrollierten Überstaus); Realisierungshemmnisse (z. B. Standortabhängigkeit, veränderte Planungspraxis, Flächenverfügbarkeit); Anpassungsoptionen der Kopplungsoption (z. B. Auskopplung unbelasteter Niederschlagsabwässern aus dem Mischwasserkanalnetz).
- (institutionell/organisatorisch) Zuständigkeiten für Bau und Betrieb sind zu klären; Haftungsfragen im Fall eines unkontrollierten Abwasseraustritts sind abzustimmen; Anwendung sollte nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen; Kommunikative/rechtliche Risiken behindern die Realisierung.
- (regulatorisch) Klärung der Zuständigkeiten von Multifunktionsräumen; Möglichkeit der Gestaltung von öffentlichen Freiflächen durch Abwassergebühren besteht; Abstimmung der Regelwerke aufeinander und Anpassung des Genehmigungsverfahrens bezüglich der Kopplung sowie des Wasserrechts sind erforderlich.
- (wirtschaftlich) Eventuell entstehen Kosten durch die Flächenmitbenutzung; Abstimmungs-/ Aufteilungsaufwand der finanziellen Aufwendungen.
- (gesellschaftlich) Die Kopplung bedingt Umweltrisiken (z. B. durch Grundwasserbelastung, Häufung von Krankheitsfällen); Gesellschaftliche Akzeptanzfrage gegenüber der Kopplung ist zu klären.

**Tabelle 42: Stärken und Herausforderungen – Analyse der Bewertungsergebnisse Fall 7.2**

Stärken/Potenziale	Herausforderungen/Risiken
<b>++ (deutlich positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Nennung</li> </ul>	<b>-- (deutlich negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 1)</li> </ul>
<b>+ (geringfügig positive Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit (Teilsystem 1)</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsysteme 1)</li> <li>Redundanz</li> <li>Puffer- und Speicherkapazität</li> <li>Anpassungsfähigkeit des technischen Systems</li> <li>Dauer/Kosten der Funktionswiederherstellung</li> </ul>	<b>- (geringfügig negative Tendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsfähigkeit ( Teilsystem 2)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 1)</li> <li>Technische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Organisatorische Komplexität (Teilsystem 2)</li> <li>Qualität und Quantität der Dienstleistung</li> <li>Qualität des beanspruchten Freiraums</li> <li>Ökonomische Konsequenzen (Nutzer)</li> <li>Ökonomische Konsequenzen für den Betreiber</li> <li>Flächenbedarf</li> <li>Störanfälligkeit des Betriebes (Teilsystem 2)</li> <li>Dependenz</li> </ul>
<b>0 (keine Änderungstendenz)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ökonomische Tragfähigkeit</li> <li>Primärenergiebedarf (ohne EE)</li> <li>Endenergiebedarf (gesamt)</li> <li>Schädliche Bodenveränderung (neutral bis geringfügig negativ)</li> <li>Emissionen Treibhausgase</li> <li>Emissionen sonstiger umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe</li> <li>Lärmemissionen</li> <li>Rohstoffbedarf</li> <li>Abhängigkeit von kritischen Rostoffen</li> <li>Abfallaufkommen</li> <li>Wasserbedarf</li> </ul>	

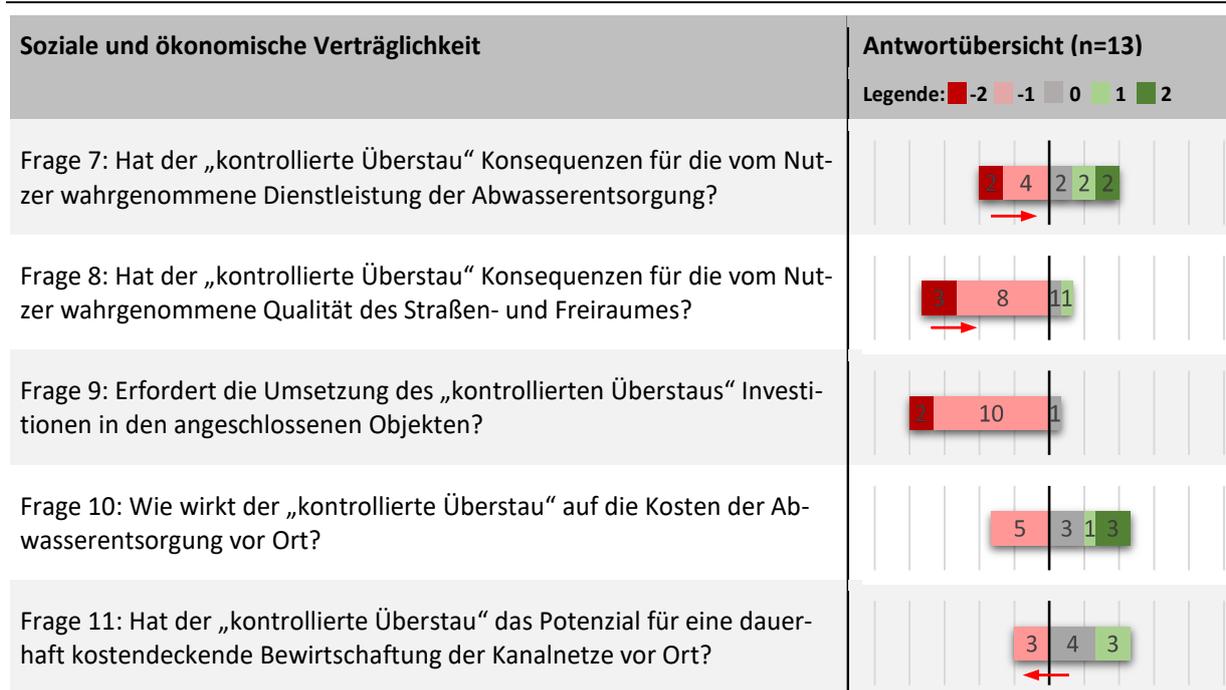
### 8.14.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Abbildung 102: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Leistungsfähigkeit“



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 103: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Soziale und ökonomische Verträglichkeit“**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 104: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“**

Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz	Antwortübersicht (n=13) Legende: -2 -1 0 1 2
Frage 12: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Abwasserentsorgung vor Ort?	
Frage 13: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf den gesamten End-Energiebedarf der Abwasserentsorgung vor Ort?	
Frage 14: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf den Flächenbedarf für Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 15: Führt der „kontrollierte Überstau“ zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bau und Betrieb der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 16: Verändert der „kontrollierte Überstau“ die Menge der Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 17: Verändert der „kontrollierte Überstau“ die Menge der Emissionen von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen durch einerseits Bau und andererseits Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 18: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf die Emission von Lärm beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 19: Wie wirkt der „kontrollierte Überstau“ auf den Bedarf an Rohstoffen (z. B. Baumaterialien) für Bau und Erhalt der Infrastrukturen vor Ort?	
Frage 20: Wie wirkt der „kontrollierte Überstau“ auf die Abhängigkeit der Dienstleistungen von kritischen Rohstoffen (z. B. seltene Erden, große Importabhängigkeit)?	
Frage 21: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf das Abfallaufkommen (z. B. Schlämme etc.) beim Betrieb der Infrastrukturen?	
Frage 22: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf den Wasserbedarf beim Betrieb der Infrastrukturen?	

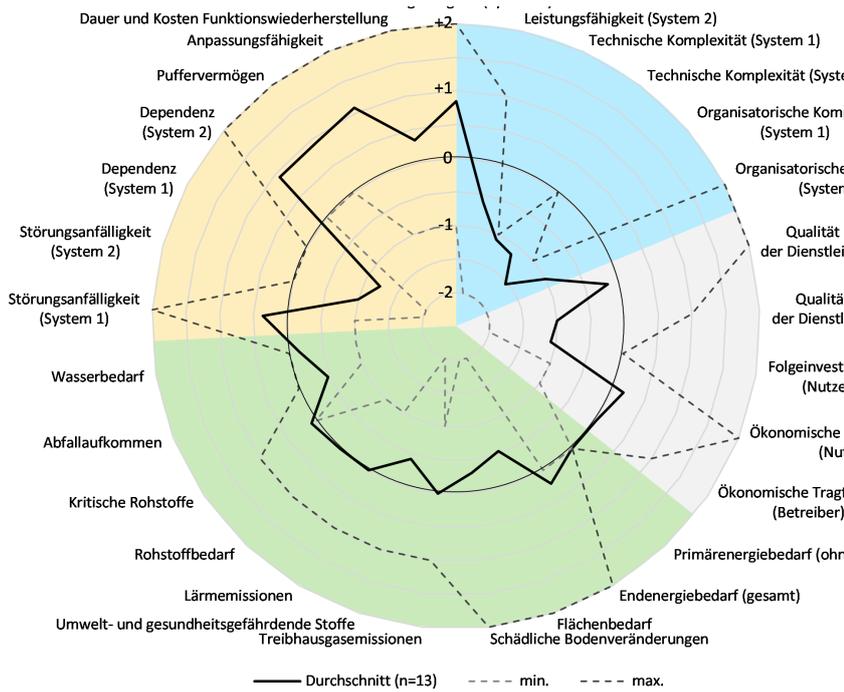
Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 105: Desaggregierte Nachhaltigkeitsbewertung Fall 7.2, Teil „Versorgungssicherheit“**

Versorgungssicherheit	Antwortübersicht (n=13) Legende: <span style="color:red">■</span> -2 <span style="color:lightcoral">■</span> -1 <span style="color:gray">■</span> 0 <span style="color:lightgreen">■</span> 1 <span style="color:green">■</span> 2
Frage 23: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Abwasserentsorgung?	
Frage 24: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf die Störungsanfälligkeit (z. B. physische Schäden, Nutzungsunterbrechungen etc.) des in das System eingebundenen Straßen- und Freiraumes?	
Frage 25: keine Relevanz	-
Frage 26: Können Funktionseinschränkungen der Anlagen für den "kontrollierten Überstau" zu Einschränkungen im Straßen- und Freiraum führen?	
Frage 27: Hilft der „kontrollierte Überstau“ dabei, die Funktionssicherheit der Abwasserentsorgung zu stärken?	
Frage 28: keine Relevanz	-
Frage 29: Verändert die Option des „kontrollierten Überstaus“ die Fähigkeit des Gesamtsystems, Störungen durch erhöhte Puffer- und Speicherkapazität zu vermeiden?	
Frage 30: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf die grundsätzliche Anpassungsfähigkeit der beteiligten Infrastruktursysteme an stärkere und/oder häufigere Wetterextreme?	
Frage 31/32: Hat der „kontrollierte Überstau“ Einfluss auf die Dauer oder die Kosten der Reparatur/Wiederinbetriebnahme des Kanalnetzes nach Störungen durch Wetterextreme?	

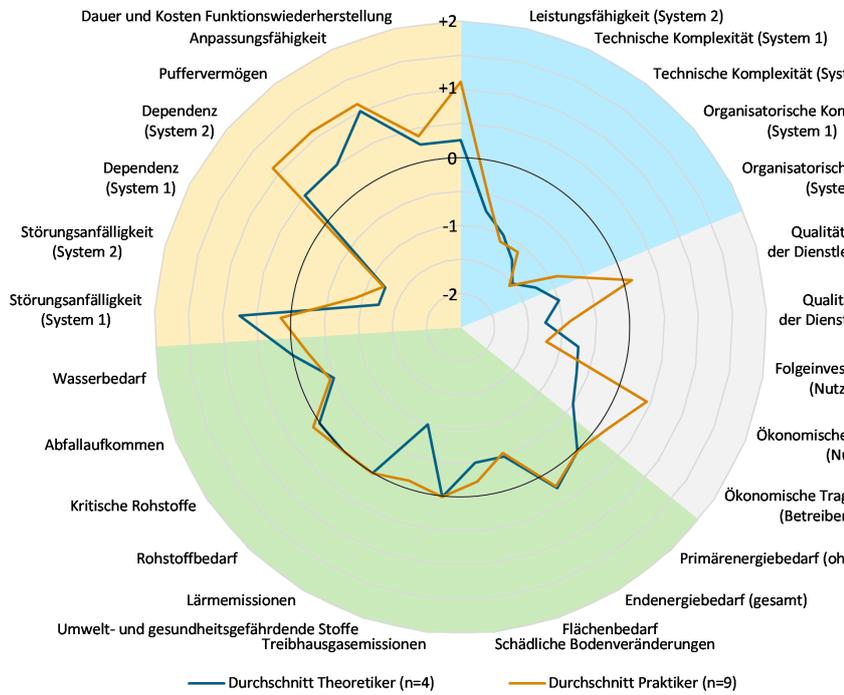
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 106: Nachhaltigkeitsprofil Gesamtauswertung – Fall 7.2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 107: Bewertungsprofile „Theoretiker“ und „Praktiker“ – Fall 7.2



Quelle: eigene Darstellung

## 8.14.2 Weitere Hinweise und Anmerkungen

### Stärken und Potenziale

#### Institutionelle und organisatorische Aspekte

- Durch eine bewusste und planvolle Gestaltung des Systems (z. B. Grünfläche, Platz) besteht zudem die Chance, die angeschlossene Fläche auch gestalterisch oder ökologisch aufzuwerten.

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Die gezielt seltene Nutzung nicht-wasserwirtschaftlicher Systeme (z. B. Straßen, Plätze, Grünflächen) als (Not-)Retentionsraum für Mischwasser/Oberflächenwasser bietet allerdings mehr Chancen bzw. Vorteile als Risiken. Dies gilt insbesondere in ökonomischer Hinsicht. Ein gezielter MW-Überlauf alle 10 Jahre in eine Grünfläche inkl. nachfolgender Reinigung/Wiederherstellung ist allemal wirtschaftlicher als der Bau eines unterirdischen Rückhaltebeckens, das fast nie in Anspruch genommen wird.
- Allen beteiligten Akteuren muss klar sein, dass solche Lösungen effizient und kostengünstig sind. Alternativen hierzu (z. B. unterirdische Speicherbecken, größere Kanäle) sind sehr teuer und unwirtschaftlich. Es ist die Aufgabe, hier ein Sinneswandel herbeizuführen. Erfolgreiche Schritte zur Umsetzung wurden beispielsweise in Hamburg oder im Emschergebiet bereits getätigt.

### Herausforderungen und Risiken

#### Technische Aspekte

- Der gezielte Überstau von Mischwasser auf dafür vorgesehenen Flächen ist aus hygienischen Gründen sehr problematisch. Es findet eine einseitige Einschränkung der mitbenutzen Freiflächen statt, durch Verunreinigung und dem einschließenden Reinigungsbedarf der Freiflächen. Wer versetzt diese hinterher wieder in einen einwandfreien Zustand? \*(3)
- Des Weiteren bestehen Restriktionen bzw. Planungsanforderungen, beispielsweise was die hygienische oder sonstige stoffliche Belastung oder auch die Einstautiefe anbelangt. Hierzu zählt z. B. eine ggf. erforderliche Absperrmöglichkeit einer (Frei-)Fläche.
- Der Überstau hat eine Nutzungseinschränkung der oberirdischen Anlagen/Straßenraum/Freiflächen im Überstaufall durch einen erhöhten Wasserstand zur Folge, auch über längere Zeit nach Starkregen. \*(3)
- In der Regel kann ein unkontrollierter Austritt mit dieser Option nur in einem begrenzten Umfang, und dort ggf. auch nur teilweise, verhindert werden.
- In Anbetracht von Überlastungssituationen im Sinne von unkontrollierten Überflutungen erscheint die Option durchaus sinnvoll. Dennoch werden dadurch Überlastungssituationen nicht verhindert werden können.
- Einer Umsetzung stehen technische Einwände entgegen.
- Chronische Schwachstellen der Kanalnetze lassen sich mit Hilfe des kontrollierten Überstaus nur begrenzt und in Ausnahmefällen verbessern.
- Lokal sinkt die Versorgungssicherheit durch Überstau von Abwässern im Siedlungsraum.
- Die Maßnahmenwahl erfolgt anhand einer Bestandsaufnahme vor Ort. Gegebenenfalls sind andere Lösungen mit mehr Vor- als Nachteilen zu realisieren (z. B. MV-RB, Bypass, SRK). Belastbare

Aussagen sind nur fallspezifisch zu treffen. Alle Einschätzungen sind stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig (z. B. Bemessung des bestehenden Kanalnetzes, Vorhandensein von Risikobereichen an den Überstauungen – u. a. Kita, Bahnunterführung - Landnutzung der Überstaufläche, Baufreiheit, Eigentumsverhältnisse, bestehender Auslassungsgrad der KA usw. \*(3)

- Ein kontrollierter Überstau in bestehenden, verdichteten großstädtischen Systemen ist nur schwer zu realisieren.
- Abgesehen von der standortspezifischen Untersuchung stehen grundsätzlich "Überflutungsflächen", die bei Extremregen gezielt genutzt werden, im Fokus. Es zeigt sich allerdings, dass im Bestandsnetz nur begrenzte Möglichkeiten bestehen.
- Viel sinnvoller als der Überstau ist die Abkopplung von unbelastetem bis gering belastetem Niederschlagswasser (z. B. von Dachflächen) aus den Mischwasserkanälen. Bereits ein Gründach vermindert den Niederschlagsabfluss um rund die Hälfte, hilft gegen Klimastress im Sommer und erhöht die biologische Artenvielfalt. Gekoppelt mit einer kleinen Versickerungsmulde wird oft kein Kanalanschluss mehr benötigt. \*(2)
- Die Lösung ist dann die bestmögliche Option, wenn hierdurch gefährdete Bereiche bzw. sensible Infrastrukturen besser geschützt werden können.
- Die Kopplung repräsentiert nicht die bestmögliche Lösungsoption für Kanalüberlastungen. Für den Überstaufall verfügen alle Mischentwässerungssysteme seit Lindley's Zeiten über definierte Mischwasserüberläufe in die Gewässer, gegebenenfalls mit entsprechender Behandlung.
- Es kann angezweifelt werden, ob durch die gezielte Überstauentlastung an Stelle A des Kanalnetzes eine signifikante Verbesserung an Stelle B erzielt werden kann. Generell sind die Überlastungen der Netze im Sinne der DIN EN 752 bzw. des DWA-A 118 i.V.m. DWA-M 119 stärker risikoorientiert zu bewerten.

#### **Institutionelle und organisatorische Aspekte**

- Insbesondere die Rahmenbedingungen zur Mitnutzung von Privateigentum im Falle von Extremereignissen müssen geklärt werden. Zur Lösung sind alle Akteure aufgerufen, mitzuwirken. \*(2)
- Der Betrieb und insbesondere Haftungsfragen sind zu klären.
- Wer übernimmt welche Betriebsaufgaben, vom regulären Betrieb bis hin zum Reinigungs-/Wiederherstellungsaufwand nach einem Überstau? Wer beteiligt sich in welcher Form an welchen Kosten?
- Die Anwendung des kontrollierten Überstaus sollte unter der klaren Vorgabe des sehr seltenen Eintritts bzw. als letzte Behelfsoption erfolgen. Daher sollte die Kopplung auf seltene Wetterextreme gemäß Begriffsdefinition und Anforderungen zugeschnitten werden. \*(2)
- Potenzielle Betreiber einer solchen Kopplung werden mit kaum absehbaren kommunikativen und rechtlichen Risiken konfrontiert.
- Organisatorische Risiken liegen in der Überschneidung von Verantwortlichkeiten.
- Die Zuständigkeiten für Bau und Betrieb inkl. der Kostenübernahmen müssen vorab klar geregelt werden. In wessen Hauptzuständigkeit liegt die Anlage beispielsweise Stadtentwässerung, Tiefbauamt oder Grünflächenamt?
- Die Verschiebung der Entlastung vom Gewässer in die Siedlung ist fragwürdig. Die Maßnahme erhöht das allgemeine Risiko.
- Die hygienischen Probleme lassen einen solchen gezielten Überstau nicht zu.

- Auch unter der Prämisse des Überlaufs stark verdünnter Abwässer ist eine kritische Bewertung erforderlich (Stichwort: first flush bzw. Spülstöße bei Entlastung).

### **Regulatorische Aspekte**

- Hinsichtlich der Umsetzung bestehen rechtliche Unsicherheiten: Handelt es sich bei den Überstauplächen um Grünflächen oder Abwasseranlagen?
- Ein netzbezogener "Überstau" wirkt sich ggf. über mehrere Kilometer aus und betrifft mehrere Regenbecken. Aktuelle Genehmigungen werden nur für einzelnen Bauwerke erteilt, dies muss auf zusammenhängende Funktionsabschnitte erweitert werden.
- Insgesamt sollten die betreffenden Regelwerke einzelner Fachsparten (z. B. DWA, fgsV) besser aufeinander abgestimmt werden. Einer Umsetzung stehen (wasser-)rechtliche Einwände entgegen. Sowohl die rechtlichen Grundlagen als auch die technischen Regelwerke sind bislang so ausgerichtet, dass sie sehr seltene und nach anderen Maßstäben zu bewertende Situationen/Planungsfälle schlichtweg nicht vorsehen. Nach WHG sind z. B. alle Anlagen, die der gezielten Speicherung von Abwasser dienen, "Abwasseranlagen" - auch wenn dies nur einmal in 50 Jahren der Fall ist. Hierfür gibt es bislang auch kein Regelwerk, weder im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft noch anderen Fachbereichen, zum Beispiel dem Straßenbau. Ähnlich verhält es sich mit der Bewertung/Genehmigung bzgl. Natur-, Boden- und Grundwasserschutz. Recht und Regelwerk kennen hier keine extrem seltenen (z. B. stofflichen) Belastungen, die genehmigungsrechtlich genauso zu behandeln wären wie regelmäßige Belastungen (wie z. B. bei einer konventionellen Versickerungsanlage). Die Praxis stellt ein Hemmnis dar und ist im Vergleich zu regelmäßigen Mischwasserentlastungen in die Gewässer unverhältnismäßig. \*(2)
- Der Tatbestand einer gezielten Herbeiführung von Kanalüberstau mit anschließender Versickerung des austretenden Mischwassers bedarf der wasserrechtlichen Genehmigung. Nur NRW kennt diesen Sondertatbestand als "Mischwasser-Notüberlauf", jedoch nachgewiesenermaßen seltener als 1x in 5 Jahren. Es besteht eine unsichere Rechtslage (Finanzierung, Anforderungen), die zum Beispiel den Gebührenhaushalt theoretisch gefährden kann.
- Im Hinblick auf die Finanzierung bzw. Co-Finanzierung von Anlagen (z. B. der Neugestaltung einer Grünfläche) durch Abwassergebühren (z. B. für Mehrkosten zur Erzielung einer wasserwirtschaftlichen Zusatzfunktion) sind noch viele Rechts-/Verwaltungsfragen offen. Dies führt momentan zu Unsicherheit und zu Zurückhaltung bei den Kommunen. Die kommunalen Verwaltungsstrukturen sind sehr auf Einzelaufgaben und Einzelzuständigkeiten ausgelegt. Dies führt in der Praxis zu erheblichen Schwierigkeiten bei kooperativ zu bearbeitenden Fragestellungen und Planungsaufgaben. Die Verwaltungsstrukturen (inklusive Finanzierungsoptionen) müssen besser auf Querschnittsaufgaben ausgerichtet werden. Bislang sind Anlagen, die z. B. der Anpassung an den Klimawandel dienen, auch nicht als Ausgleichsmaßnahmen anrechenbar (Eingriffs-Ausgleichs-Bilanz). Hier könnten und sollten Anreize geschaffen werden, denn die Kommune "tut hier etwas Gutes".

### **Wirtschaftliche Aspekte**

- Regelungen der Finanzierung sind zu treffen.
- Die Umsetzung führt zu Landkosten und privatrechtlichen Problemen.

### **Gesellschaftliche Aspekte**

- Durch den Überstau innerhalb einer Siedlung kommt es zu einer Häufung von Krankheitsfällen durch den direkten Kontakt mit Abwässern.
- Die Versickerung von Abwässern stellt mindestens eine Gefahr für das Grundwasser dar.
- Die Akzeptanzfrage ist nicht geklärt und zumindest bei vergleichsweise häufigen/regelmäßigen Ereignissen vermutlich zu verneinen. \*(2)

## 9 Quellenverzeichnis

Allen K (2002) Messung ökologischer Effizienz mittels Data Envelopment Analysis. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden

Arof AM, Hanafiah RM, Ooi IUJ (2016) A Delphi Study on the Potential Benefits and Obstacles of Interstate Short Sea Shipping in Archipelagic Southeast Asia. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 5:97–110. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.12.008>

Bartelmus P (2008) *Quantitative eco-nomics: how sustainable are our economies?* Springer, Dordrecht

BBSR (2018) *Stresstest Stadt – wie resilient sind unsere Städte? Unsicherheiten der Stadtentwicklung identifizieren, analysieren und bewerten.* Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR), Bonn

Becker J (2016) IAA Nutzfahrzeuge Hannover: Die Lieferdrohne fährt mit. [sueddeutsche.de](http://sueddeutsche.de)

Bendel S (2018) *Disruptive Technologien.* In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer

Berger M, Finkbeiner M (2017) VERUM - Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM 2.0). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

BMUB (2016) *Verordnung zur Umsetzung der novellierten abfallrechtlichen Gefährlichkeitskriterien - (Novelle AVV).* <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/gefaehrliche-abfaelle/>. Accessed 18 Mai 2016

BMUB (2017) *Bioabfälle.* <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/bioabfaelle/>. Accessed 18 Mai 2016

BMVI, BMUB (2016) *Projektübersicht 2015/16 Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland.* Berlin

BMW (2016) *Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende vom 29. August 2016.* Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016:2034–2064

BMW, BMU (2010) *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.* BMW, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin

Bonner BL, Baumann MR (2012) Leveraging member expertise to improve knowledge transfer and demonstrability in groups. *Journal of Personality and Social Psychology* 102:337–350. <https://doi.org/10.1037/a0025566>

Brand K-W, Jochum G (2000) *Der deutsche Diskurs zu nachhaltiger Entwicklung. Abschlussbericht eines DFG-Projekts zum Thema „Sustainable Development/Nachhaltige Entwicklung – Zur sozialen Konstruktion globaler Handlungskonzepte im Umweltdiskurs“.* Münchner Projektgruppe für Sozialforschung e.V., München

Brand U, Giese B, Gleich A von, et al (2016) *RESYSTRA - ZUSammenfassung der Projektergebnisse.* Universität Bremen, Bremen

Brand U, von Gleich A (2015) Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience—Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. *Energies* 8:6995–7019. <https://doi.org/10.3390/en8076995>

Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, et al (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra* 19:733–752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>

Bruneau M, Reinhorn A (2007) Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra* 23:41–62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>

Cantner U, Krüger J, Hanusch H (2007) *Produktivitäts- und Effizienzanalyse.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

City of Sidney (2014) *Sustainable Sydney 2030. Community Strategic Plan 2014.* City of Sidney, Sidney

- Cooper WW, Seiford LM, Tone K (2006) *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses*. Kluwer Academic Publishers, Boston
- Cunningham JB (1997) Case study principles for different types of cases. *Quality and Quantity* 31:401–423. <https://doi.org/10.1023/A:1004254420302>
- Dalkey N, Helmer O (1962) *An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts*. The RAND Corporation, Santa Monica, California
- de Loë RC, Melnychuk N, Murray D, Plummer R (2016) Advancing the State of Policy Delphi Practice: A Systematic Review Evaluating Methodological Evolution, Innovation, and Opportunities. *Technological Forecasting and Social Change* 104:78–88. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.009>
- DGNB 2013-2015 (nicht veröffentlicht) DGNB Zertifizierungskriterien 2013-2015. DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Berlin
- Diaz-Sarachaga JM, Jato-Espino D, Alsulami B, Castro-Fresno D (2016) Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in developing countries. *Ecological Indicators* 71:491–502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.033>
- Die Bundesregierung (2016) *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Neuauflage 2016. Bundeskanzleramt, AG für nachhaltige Entwicklung, Berlin
- DIHK (2016) *Sektorkopplung: Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende?* Thema der Woche. DIHL, Deutscher Industrie- und Handelskammertag, Berlin
- Dresner S (2008) *The principles of sustainability*. Earthscan, London; Sterling, VA
- Dudenhoefter DD, Permann MR, Manic M (2006) CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. *IEEE*, S 478–485
- Erdmann L, Behrendt S (2012) Kritische Rohstoffe aus Sicht deutscher Unternehmen. *Recycling und Rohstoffe* 5:323–334
- European Commission (2014) *The European Critical Raw Materials review - MEMO/14/377*. European Commission, Brussels
- European Commission (2016) *Communication on the next steps for a sustainable European Future*. European Commission, Strassbourg
- Feess E (2018) Komplexität. In: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Springer
- Fernández-Sánchez G, Rodríguez-López F (2010) A methodology to identify sustainability indicators in construction project management—Application to infrastructure projects in Spain. *Ecological Indicators* 10:1193–1201. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.04.009>
- Franz T (2005) *Gewinnerzielung durch kommunale Daseinsvorsorge: zugleich eine Untersuchung zu den Zwecken und Formen der kommunalen wirtschaftlichen Betätigung*. Mohr Siebeck, Tübingen
- Frey R (2005) Infrastruktur. In: *Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg) Handwörterbuch der Raumordnung*. Hannover, S 469–475
- Geist MR (2010) Using the Delphi method to engage stakeholders: A comparison of two studies. *Evaluation and Program Planning* 33:147–154. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2009.06.006>
- Gordon T, Pease A (2006) RT Delphi: An efficient, “round-less” almost real time Delphi method. *Technological Forecasting and Social Change* 73:321–333. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.09.005>
- Green BA (2000) There But For Fortune: Real-Life Vs. Fictional “Case Studies” in Legal Ethics. *Fordham Law Review* 69:977–996

- Groß M (2010) Ignorance and surprise: science, society, and ecological design. MIT Press, Cambridge, Mass
- Grösser S (2018) Geschäftsmodell. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer
- Günther E (2005) Öko-Effizienz-Der Versuch einer Konsolidierung der Begriffsvielfalt. Technische Universität Dresden, Dresden
- Haas H-D (2018) Invention. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer
- Haas H-D, Neumair S-M, Wübberhorst K, Kamps U (2018) Cluster. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer
- Handelsblatt (2016) Strompreise steigen: Tennet erhöht Netzentgelte um 80 Prozent. <http://www.handelsblatt.com/my/politik/international/strompreise-steigen-tennet-erhoeht-netzentgelte-um-80-prozent/14589324.html>. Accessed 12 Okt 2016
- Hauff M von, Kleine A (2014) Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung. OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG, München
- Helmer O (1966) Social Technology. Basic Books
- Helmer O, Rescher N (1959) On the Epistemology of the Inexact Sciences. *Management Science* 6:25–52
- Hirschnitz-Garbers M, Hinzmann M, Langsdorf S, et al (2020) Erfolgsbedingungen und Prozessgestaltung/-begleitung für eine nachhaltige Umgestaltung von Infrastrukturkopplungen Infrastrukturen – Teilbericht des Vorhabens: „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“. Umweltbundesamt, Dessau
- Holling CS (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics* 1–23
- Holling CS (1996) Engineering resilience versus ecological resilience. In: Schulze PC (Hrsg) *Engineering within ecological constraints*. The National Academies Press, Washington D.C., S 31–44
- Hölscher K, Wittmayer J, Olfert A, et al (2020) Infrastrukturkopplungen als Beiträge zur Nachhaltigkeitstransformation: Einflussfaktoren und Handlungsmöglichkeiten. Teilbericht des Vorhabens: „Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen“. Umweltbundesamt, Dessau
- Jacucci E, Hanseth O, Lyytinen K (2006) Introduction: Taking complexity seriously in IS research. *Information Technology & People* 19:5–11. <https://doi.org/10.1108/09593840610649943>
- Kallaos J, Mainguy G, Wyckmans A (2014) Considering Resilience: Steps Towards an Assessment Framework. *Tema Journal of Land Use, Mobility and Environment* 7:5–28. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2290>
- Kirchner A, Hecking H, Lutz C (2016a) Black Swans (Risiken) in der Energiewende Risikomanagement für die Energiewende. Endbericht. PROGNOSE, EWI-Energy Research & Scenarios GmbH, GWS-The Institute for Economic Structures Research, Berlin
- Kirchner A, Koziel S, Mayer N, Kunz C (2016b) AEE\_Metaanalyse\_Flexibilitaet\_Sektorkopplung\_apr16\_fixed.pdf. Agentur für Erneuerbare Energien
- Kleidorfer M, Möderl M, Sitzenfrei R, et al (2009) A case independent approach on the impact of climate change effects on combined sewer system performance. *Water Science & Technology* 60:1555. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.520>
- Kleine A (2002) DEA -Effizienz—Entscheidungs und produktionstheoretische Grundlagen der Data Envelopment Analysis. Wiesbaden
- Kositzki A (2004) Das öffentlich-rechtliche Kreditgewerbe. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden
- Kreis Schweinfurt (2016) Die Steinfurter Flexkraftwerke. Positionspapier der regionalen Akteure aus dem Kreis Steinfur. Schweinfurt

- Kübler K (2016) Digitalisierung der Stromversorgung: Erfahrungen aus der Praxis. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 66:42–46
- Lamming R, Faruk A, Cousins P (1999) Environmental soundness: a pragmatic alternative to expectations of sustainable development in business strategy. *Business Strategy and the Environment* 8:177–188. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0836\(199905/06\)8:3<177::AID-BSE196>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0836(199905/06)8:3<177::AID-BSE196>3.0.CO;2-1)
- Lhomme S, Serre D, Diab Y, Laganier R (2013) Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities. *Natural Hazards and Earth System Science* 13:221–230. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013>
- Libbe J, Petschow U (2015) Infrastrukturen und grüne Transformation. *Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift* 30:34. <https://doi.org/10.14512/OEW300134>
- Libbe J, Petschow U, Trapp J, et al (2018) Diskurse und Leitbilder zur zukunftsfähigen Ausgestaltung von Infrastrukturen. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Linstone HA, Turoff M (Hrsg) (1975) *The Delphi Method. Techniques and applications* 53:616
- Linz M (2006) Was wird dann aus der Wirtschaft? Über Suffizienz, Wirtschaftswachstum und Arbeitslosigkeit. Wuppertal institute, Wuppertal
- Litman T, Burwell D (2006) Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues* 6:331. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2006.010889>
- Loorbach D, Frantzeskaki N, Thissen W (2010) Introduction to the special section: Infrastructures and transitions. *Technological Forecasting and Social Change* 77:1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.001>
- McDaniels T, Chang S, Cole D, et al (2008) Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change* 18:310–318. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.03.001>
- McIntyre-Hite L (2016) A Delphi study of effective practices for developing competency-based learning models in higher education. *The Journal of Competency-Based Education* 1:157–166. <https://doi.org/10.1002/cbe2.1029>
- Neutens T (2015) Accessibility, equity and health care: review and research directions for transport geographers. *Journal of Transport Geography* 43:14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.12.006>
- Olfert A, Greiving S, Batista MJ (2006) Regional multi-risk review, hazard weighting and spatial planning response to risk - results from European case studies. In: Schmidt-Thomé P (Hrsg) *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions*. Geological Survey of Finland, S 125–151
- Olfert A, Schiller G, Brunnow B, et al (2020) Prozessbegleitende Nachhaltigkeitsbewertung als Werkzeug für ein Nachhaltigkeitsorientiertes Infrastrukturmanagement. IR 17–20
- Osranek R (2017) Der Begriff Nachhaltigkeit und zugrundeliegende Motivationen. In: *Nachhaltigkeit in Unternehmen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S 23–76
- Page SE (2008) *The difference: how the power of diversity creates better groups, firms, schools, and societies*, 3. printing, 1. pbk. printing. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ
- Petschow U (2016) KLARIS - Literatur- und Diskursanalyse zu klimaresilienten und zukunftsfähigen Infrastrukturen Bericht zu AP 1.2 und AP 2. Deutsches Institut für Urbanistik (Difu), Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin
- Pope J, Annandale D, Morrison-Saunders A (2004) Conceptualising sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 24:595–616. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.03.001>

Quasching V (2016) Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Regio Energie Solothurn (2016) Hybridwerk Aarmatt. Von der Vision zur Inbetriebnahme. [http://www.hybridwerk.ch/fileadmin/regioenergie/Hybridwerk/Dokumente/Factsheet\\_Hybridwerk\\_deutsch.pdf](http://www.hybridwerk.ch/fileadmin/regioenergie/Hybridwerk/Dokumente/Factsheet_Hybridwerk_deutsch.pdf). Accessed 30 Sep 2016

Rennings K (2000) Redefining innovation — eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics* 32:319–332. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00112-3)

Reutter O (2007) Vorwort. Ressourceneffizienz als eine Leitlinie zur zukunftsfähigen Stadtentwicklung. In: Reutter O (Hrsg) *Ressourceneffizienz - der neue Reichtum der Städte: Impulse für eine zukunftsfähige Kommune*. oekom-Verl, München, S 9–11

Rinaldi SM, Peerenboom JP, Kelly TK (2001) Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems* 21:11–25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>

Rogall H (2008) *Ökologische Ökonomie. Eine Einführung*, 2. edn. Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden

Rogall H, Weizsäcker EU von (2012) *Nachhaltige Ökonomie: ökonomische Theorie und Praxis einer Nachhaltigen Entwicklung*, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Metropolis-Verlag, Marburg

Schiller G, Blum A, Behnisch M (2012) Resource Efficiency of Settlement Structures: Terms, Conceptual Implications and Connecting Factors to the Resilience Debate. *Raumforschung und Raumordnung* 70:377–386. <https://doi.org/10.1007/s13147-012-0168-9>

Schiltz ME (1992) Three fictional case studies for discussion. *New Directions for Institutional Research* 1992:67–74. <https://doi.org/10.1002/ir.37019927308>

Schlender M (2009) Gesundheitsökonomie: Der Effizienz auf der Spur. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen* 103:117–125. <https://doi.org/10.1016/j.zefq.2008.12.016>

Scholl G, Clausen J (1999) Öko-Effizienz-mehr Fragen als Antworten? *Ökologisches Wirtschaften* 3:10–11

Scholz R, Gläser N, Paluch D, Schmidt T (2016) Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr. Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland. Ernst & Young GmbH

Schuckmann SW, Gnatzy T, Darkow I-L, von der Gracht HA (2012) Analysis of factors influencing the development of transport infrastructure until the year 2030 — A Delphi based scenario study. *Technological Forecasting and Social Change* 79:1373–1387. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.05.008>

Schultz MT, McKay K, Hales LZ (2012) The Quantification and Evolution of Resilience in Integrated Coastal Systems. *US Army Corps of Engineers, Washington*

Schultz MT, Smith ER (2016) Assessing the Resilience of Coastal Systems: A Probabilistic Approach. *Journal of Coastal Research* 321:1032–1050. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00170.1>

Schultze T, Mojzisch A, Schulz-Hardt S (2012) Why groups perform better than individuals at quantitative judgment tasks: Group-to-individual transfer as an alternative to differential weighting. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 118:24–36. <https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2011.12.006>

Schütz H, Bringezu S (2008) *Ressourcenverbrauch von Deutschland - aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Siebert H (1983) *Ökonomische Theorie natürlicher Ressourcen*. Tübingen

Sierra LA, Pellicer E, Yepes V (2017) Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review* 65:41–53. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.004>

- Specht D, Möhrle MG (2018) Innovation. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer
- Spiller M (2016) Adaptive capacity indicators to assess sustainability of urban water systems – Current application. *Science of The Total Environment* 569–570:751–761. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.088>
- SRU (2016) Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. SRU, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin
- Stake RE (1995) *The art of case study research*, Nachdr. Sage Publ, Thousand Oaks, Calif.
- Star SL, Griesemer JR (1989) Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. *Social Studies of Science* 19:387–420. <https://doi.org/10.1177/030631289019003001>
- Streit ME (1991) *Theorie der Wirtschaftspolitik*. Düsseldorf
- Süddeutsche Zeitung (2016a) Premiere auf der Innotrans: Alstom stellt Wasserstoffzug vor. [sueddeutsche.de](http://sueddeutsche.de)
- Süddeutsche Zeitung (2016b) Elektroflieger Hy4: Erstes Passagierflugzeug mit Wasserstoffantrieb gestartet. [sueddeutsche.de](http://sueddeutsche.de)
- Technology Review (2015) Mit Notstrom zum Energieanbieter? In: *Technology Review*. <http://www.heise.de/tr/artikel/Mit-Notstrom-zum-Energieanbieter-2557736.html>. Accessed 14 Okt 2016
- The City of New York (2011) *PlaNYC: A Greener, Greater New York*. New York City
- Thommen J-P (2018) Effektivität. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Springer
- Trapp JH, Arndt W-H, Libbe J, et al (2017) Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Turoff M (1970) The design of a policy Delphi. *Technological Forecasting and Social Change* 2:149–171. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(70\)90161-7](https://doi.org/10.1016/0040-1625(70)90161-7)
- Turoff M (1975) The Policy Delphi. *Techniques and applications* 53:80–96
- Ugwu OO, Haupt TC (2007) Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability—a South African construction industry perspective. *Building and Environment* 42:665–680. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.018>
- Ugwu OO, Kumaraswamy MM, Wong A, Ng ST (2006) Sustainability appraisal in infrastructure projects (SU-SAIP). *Automation in Construction* 15:239–251. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.05.006>
- United Nations (2015) *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations, Geneva
- United Nations (2000) *United Nations Millennium Declaration*. United Nations
- UNWCED (1987) *Our Common Future (Brundtland Report)*. United Nations, World Commission on Environment and Development, Geneva
- Varho V, Rikkinen P, Rasi S (2016) Futures of distributed small-scale renewable energy in Finland — A Delphi study of the opportunities and obstacles up to 2025. *Technological Forecasting and Social Change* 104:30–37. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.001>
- Verbio AG Biomethan aus Stroh < verbiogas < Produkte | VERBIO AG - Biofuel and Technology. <http://www.verbio.de/produkte/verbiogas/biomethan-aus-stroh/>. Accessed 23 Sep 2016
- Verkasalo H, López-Nicolás C, Molina-Castillo FJ, Bouwman H (2010) Analysis of users and non-users of smartphone applications. *Telematics and Informatics* 27:242–255. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2009.11.001>

Walker B, Gunderson L, Kinzig A, et al (2006) A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. *Ecology and society* 11:13

Weiss D, Tappeser V, Frohneberg J, et al (2017) Nachhaltigkeit 2.0 – Modernisierungsansätze zum Leitbild der nachhaltigen Entwicklung. Dessau-Roßlau

Wilson K, Rosenberg MW (2004) Accessibility and the Canadian health care system: squaring perceptions and realities. *Health Policy* 67:137–148. [https://doi.org/10.1016/S0168-8510\(03\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0168-8510(03)00101-5)

Wintle B, Mascaro S, Fidler F, et al (2012) The intelligence game: Assessing Delphi groups and structured question formats

Witt A (2015) Interview: Andreas Kuhlmann (dena) – Sektorkopplung erleichtern! In: Solarthemen \* Infodienst für regenerative Energien. <http://www.solarthemen.de/index.php/2016/03/10/interview-andreas-kuhlmann-dena-sektorkopplung-erleichtern/>. Accessed 14 Okt 2016

Wöhe G (2002) Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München

Wolff S (2010) Soziale personenbezogene Dienstleistungsorganisationen als lose gekoppelte Systeme und organisierte Anarchien. In: Klatetzki T (Hrsg) Soziale personenbezogene Dienstleistungsorganisationen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S 285–335

Yin RK (1999) Enhancing the quality of case studies in health services research. *Health Services Research* 34:1209–1224

## A Anhang

### Anhang 1: Überblick über relevante Sektoren und Teil-Sektoren

Sektoren		Teilsysteme	räumliche Ebene				In TRAFIS betrachtet	Aufgaben"typ" der Daseinsvorsorge (DV)	Verantwortliche Akteure
			Objekt	Quartier	Kommune / Verband	Regional / Sonstig zentral			
Teil-Sektoren / Domänen									
<b>Trinkwasserversorgung</b>									
		Gewinnung	x		x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Aufbereitung			x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Verteilung			x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
<b>Abwasserentsorgung</b>									
	<b>Schmutzwasser</b>	Ableitung			x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Behandlung	x	x	x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Einleitung	x		x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
	<b>Niederschlagswasser</b>	Ableitung		x	x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Behandlung	x	x	x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
		Einleitung	x	x	x		x	Kommunale DV	Kommune/privat/Zweckverband
<b>Energieversorgung</b>									
	<b>Wärme</b>	Erzeugung		x	x		x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
		Speicherung		x	x		x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
		Verteilung		x	x		x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
	<b>Kraft (Elektrizität)</b>	Erzeugung	x	x	x		x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
		Speicherung	x	x			x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
		Verteilung		x		x	x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
	<b>Gas</b>	Erzeugung	x	x	x	x	x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat

Sektoren	Teilsysteme	räumliche Ebene				In TRAFIS betrachtet	Aufgaben"typ" der Daseinsvorsorge (DV)	Verantwortliche Akteure
		Objekt	Quartier	Kommune / Verband	Regional / Sonstig zentral			
<b>Teil-Sektoren / Domänen</b>								
	Speicherung		x	x	x	x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
	Verteilung		x	x	x	x	Kommunale DV	Energieversorger / Stadtwerke/privat
<b>Transport und Verkehr</b>								
<b>Verkehrerschließung</b>	Anlagen des Straßen- und Schienenverkehrs			x	x	x	je nach Funktion	je nach Widmung
	Schienen			x	x	x	Bund / Land, Kommunal	Bund / Land, Kommune bei Straßenbahn
<b>Fahrzeuge</b>	Fahrzeuge/Fahrzeugflotten öffentlicher (Nah-, Fern-) Verkehr Straße			x	x	x	Kommunal / privat	Zumeist kommunale und privatwirtschaftliche Unternehmen
	Fahrzeuge öffentlicher (Nah-, Fern-) Verkehr Schiene			x	x	x	Kommunal / Bund	Zumeist privatwirtschaftliche (inkl. Deutsche Bahn) und kommunale Unternehmen
	Fahrzeugbestand / private u. öffentliche Halter	x			x	x	privat	jeweilige Fahrzeughalter (öffentliche Einrichtungen, Unternehmen, Privatpersonen)
<b>Abfallwirtschaft</b>								
<b>Biomüll</b>	Sammeln			x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband/privat
	Behandeln			x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband/privat
	Verwerten/Beseitigen			x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband/privat
<b>Wertstoffe</b>	Sammeln	x		x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband
	Behandeln	x		x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband
	Verwerten/Beseitigen	x		x		x	Kommunale DV	Kommune/Zweckverband
<b>Restmüll</b>	Sammeln			x		x	Kommunale DV	Kommune/Landkreis
	Behandeln			x		x	Kommunale DV	Kommune/Landkreis

Sektoren	Teilsysteme	räumliche Ebene				In TRAFIS betrachtet	Aufgaben"typ" der Daseinsvorsorge (DV)	Verantwortliche Akteure
		Objekt	Quartier	Kommune / Verband	Regional / Sonstig zentral			
<i>Teil-Sektoren / Domänen</i>	Verwerten/Beseitigen			x		x	Kommunale DV	Kommune/Landkreis
<b>Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)</b>								
<i>öffentliche Telekommunikationsnetze</i>	Öffentliche Funk- und Kabelnetze		x	x	x	x	Öffentliche DV	Bund, privatwirtschaftliche Unternehmen (inkl. Telekom)
<i>Erfassung und Regelung</i>	Erfassen durch Sensoren	x			x	x	ungeklärt, je nach Funktion	ungeklärt, je nach Funktion
	Regeln durch Aktoren	x			x	x	ungeklärt, je nach Funktion	ungeklärt, je nach Funktion
<i>Datenverarbeitung und Steuerung</i>	Datenverarbeitung / Big Data Analyse				x	x	ungeklärt, je nach Funktion	ungeklärt, je nach Funktion
	Steuerung durch Algorithmik				x	x	ungeklärt, je nach Funktion	ungeklärt, je nach Funktion

## Anhang 2: Überblick über innovative Infrastrukturkopplungen

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1)	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumfang			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster					
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	Intersektoral	Innerssektoral 1 – (Teilsysteme)	Innerssektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige
<b>Trinkwasserversorgung</b>																				
Trinkwasser-Gewinnung (TWG)	TWG + ELV	Strombedarf für Betrieb von Förder-Pumpen	0	x				x												
	TWG + IKT	Steuerung und Monitoring der Trinkwasserförderung in Brunnenverbänden mittels IKT-Techniken	0	x				x					4							
Trinkwasser-Aufbereitung (TWA)	TWA + ELE	Trinkwasseraufbereitung mittels Elektrizität aus regenerativen Energien (Solar, Wasserkraft, etc.), z. B. Solare Membrandestillation (PV-Basierte Meerwasserentsalzung), Osmose (z. B. für Flusswasser)	1		x			x			x	x			x					
	TWV+ ELV	Strombedarf im Betrieb Trinkwasseraufbereitungsanlagen-Anlagen	0	x				x			x									
Trinkwasser-Verteilung (TWV)	TWV + ELE	Klein-/Mikro-Wasserkraft im Trinkwassernetz – Nutzung der Gefälleunterschiede incl. Wasserkraft Zu-/Ableitungen der Speicher (Hochbehälter, Wassertürme)	1		x			x			x				x					
	TWV + ELV	Strombedarf für Betrieb von Pumpen in Trinkwassernetzen	0	x							x									

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumfang			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster							
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige		
	TWV + IKT	Steuerung und Monitoring der Trinkwasserverteilung mittels IKT-Techniken	1	x								x			4							
	TWV + VST	Trinkwassernetz unter Straßen - räumliche Kopplung	0				x															
<b>Schmutzwasserentsorgung</b>																						
Schmutzwasser-Ableitung (SchWA)	SchWA - SchWA + SchWB + TWA	Entkopplung Grauwasser/Schwarzwasser für NASS-Anwendungen incl. Grauwasserrecycling, z. B.zur Substitution von TW (aktuell v.a. dezentral, konventionell oder als Vakuumanlage)	1		x				x				x									x
	SchWA - NieWA	Entkopplung Mischkanäle zur Effizienzsteigerung der Kläranlage und Nutzung und Substitution TW in NieWa-unterstützten Brauchwassernetzen	0		x				x				x									x
	SchWA + WEE	Abwärmegewinnung aus Abwasser (dezentral/zentral in Objekten und Sammelleitungen) für Nahwärme oder objektbezogene Wärmenutzung	1		x				x				x							x		
	SchWA + ELE	Kleinwasserkraft im Kanalnetz (Nutzung von Potenzialunterschieden im Gelände)	1		x				x				x							x		
	SchWA + IKT + ELV	Steuerung Abwassernetze (z. B.Retention im Kanalnetz)	1	x					x			0	0	0	x							
	TWV + SchWA	Spülung von Schmutzwasserkanälen mit Trinkwasser	0	x					x			0	0	0	0							

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumfang			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster					
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige
	SchWA + ELV	Strombedarf im Betrieb elektrischer Pumpen im Kanalnetz	0	x				x			0	0	0	0						
	SchWA + VST	Entsorgungsleitungen unter Straßen	0																	
Schmutzwasser-Behandlung (SchWB)	SchWB + SchWB	Organisatorischer Zusammenschluss von Kläranlagen zur Entsorgung von Klärrückständen	1			x				x		x								x
	SchWB + GE + WEE / ELE	Biogasgewinnung und -verwertung (KWK, Wärme, Strom) in Kläranlagen	1	x				x			x				x					
	SchWB + ELV	Strombedarf im Betrieb von Kläranlagen	0	x				x												
	SchWB + IKT	Steuerung des Betriebs von Kläranlagen	0	x				x												
	SchWB + BMV + ELE/GE	Separation von Stoffströmen in Kläranlagen (NASS), Recycling von Wertstoffen, Abscheidung von Düngemitteln	1		x			x				x								x
	SchWB + ELE	Stromgewinnung aus Schmutzwasser mittels mikrobieller Brennstoffzelle (bei gleichzeitiger Abwasserreinigung, dezentral/zentral?) (Forschung)	1		x			x			x				x					
Schmutzwasser-Einleitung (SchWE)	SchWE + ELV + WEE (+IKT)	Abwärmegewinnung Ausgang Kläranlage (mittels WP)	1		x			x			x				x					
	SchWE + ELE	Stromgewinnung Ausgang Kläranlage (Kleinwasserkraft	1		x			x			x				x					

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster					
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige
<b>Niederschlagswasser</b>																				
Niederschlagswasser-Ableitung (NieWA)	NieWA + TWB/TWV	Niederschlagswasserbewirtschaftung zur Substitution TW (NASS) in Brauchwassernetzen	1		x				x				x							x
Niederschlagswasser-Behandlung (NieWB)			1																	
Niederschlagswasser-Einleitung (NieWE)	NieWE + VST	Versickerung oder Zwischenspeicherung von Niederschlagswasser entlang straßenbegleitender (Frei-)Räume oder unterhalb von Fußwegen	1	x				x				x								x
<b>Energieversorgung</b>																				
<b>Wärmeenergie</b>																				
Wärmeenergie-Erzeugung (WEE)	WEE + WES/WEV	Einkopplung Erneuerbarer Energien (zentral/dezentral) in etablierte Nah- und Fernwärme-Systeme	1		x				x	x		x				x				
	WEE + WEV	Einkopplung Abwärme aus den Produktionsprozessen (inkl. Abwärme von Servern) in Nah- und Fernwärmenetzen	1		x				x	x		x				x				
	WEE + ELV + ELS	Stromgeführter Betrieb von Wärmepumpen im Schwarm (negative Regelenergie)	0	x		x			x	x		x			x			x		

Teilsektor Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster				
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren
	WEE + ELE + IKT	Stromoptimierter/Stromgeführter Betrieb von KWK im Schwarm (konventionell, Brennstoffzelle) (positive Regelenergie)	1	x	x			x				x				x			
	WEE + ELE + GV	Heizung und Stromerzeugung durch Brennstoffzellen-KWK für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Brennstoffzellen-KWK-Richtlinie)	1	x				x				x				x			
	WEE + WES + ELV	Kombination Wärmepumpen mit Solarer Vorlaufanhebung (solar erwärmte Quelle) zur Effizienzsteigerung	1	x				x	x			x			x	x			
Wärmeenergie-Speicher (WES)	WEE + WES + WEV	Wärmespeicher / Multifunktionsspeicher in Wärmenetzen (ggf. auch in Verbindung mit WP und PtH)	1		x			x	x			x				x	x		
	WEE + ELE	Abwärmenutzung (Industrie) zur Stromgewinnung mittels OCR-Turbine (Organic Rankine Cycle) bzw. thermoelektrischen Generatoren	1		x			x				x				x			
	WEE + WES + WEV + VSt	Abwärmenutzung mittels mobiler Energiespeicher	1		x			x				x				x			
Wärmeenergie-Verteilung (WEV)	WEV + VSt	Fernwärmenetz unter Straßen	0				x	x											
<b>Elektrizität</b>																			

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1)	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumfang			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster						
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	Intersektoral	Innersektoral 1 – (Teilsysteme)	Innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige	
Elektrizität-Erzeugung (ELE)	ELE + WEE (+IKT)	Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat nach Prinzip "Tauchsieder"	1	x	x			x				x			x	x					
	ELE + WEE	"veredelte" Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat - Veredlung mittels Wärmepumpe	1	x	x			x				x			x	x					
	ELE + GE (+ ELS/GS)	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-Gas	1	x				x				x			x	x	x				
	ELE + ELV	Dezentrale Erzeugung und Einspeisung von (Überschuss-)Strom über öffentliche Netze (EEG)	0		x				x			x			x						
	ELE + ELV + IKT (+ WEE)	Netzsteuerung durch Schwarmsteuerung virtueller Kraftwerke zur Stromerzeugung (positive Regelenergie) bzw. Wärmeerzeugung (negative Regelenergie)	1	x				x	x			x			x						
Elektrizität-Speicher (ELS)	ELE + ELV + IKT + ELS	Zentrale/dezentrale Speicherung Überschussstrom / Netzsteuerung in elektr. Batterien, Pumpspeicherkraftwerken, Druckluftkavernen	1	x					x			x				x	x				
Elektrizitäts-Verteilung (ELV)	ELV + FSt/FSi + IKT + ELS	Netzstabilisierung durch Einbindung der Speicher von E-Fahrzeugen in den Angebots-Nachfrageausgleich Strom (V2G, Vehicle to Grid)	1	x				x				x			x	x					
	ELE + ELV + IKT	Steuerung der Energieerzeugung und Energieverteilung	0																		
<b>Gas</b>																					

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumfang			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster							
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	Intersektoral	Innersektoral 1 – (Teilsysteme)	Innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige		
Gas-Erzeugung (GE)	ELE + GE + GS	Windgas + PtG, PtL - siehe elektrische Energie	1	x				x				x				x	x	x				
Gas-Speicherung (GS)																						
Gas-Verteilung (GV)	GV + ELE	Stromerzeugung aus Gas mittels Brennstoffzelle oder Motor	1	x				x				x				x						
	GV + StrN	Gasnetz unter Straßen, Gasbeleuchtung an Straßen	0				x	x														
	GV + WEE	Wärmeerzeugung Gas - Konv. / Gas-WP	0	x				x														
	GV + WEE + ELE	Wärme aus Brennstoffzelle-KWK	1	x				x			x					x						
	GV + ELE + WEE	Kraft-Wärme-Kopplung	0	x				x														
<b>Transport und Verkehr</b>																						
<b>Verkehrerschließung (VSt)</b>																						
Verkehr-Erschließung Straßen (VSt)	VSt + ELE	Energiegewinnung von Straßenflächen / Solar - Solarzellen statt Asphalt / Solar Roadway / Solarer Radweg	1		x			x				x		x		x						
	VSt + ELE	Stromerzeugung durch Straßen / Vibration - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen	1		x			x				x				x						

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster				
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren
	VSt + ELE + IKT (+ DL)	Intelligente Laterne/Strommast: Licht-WLAN, Licht-WLAN-Ladestation-E-Auto, Licht-Verkehr-Lichtstärkesteuerung		x				x				x					x		
	VSt + ELV + FST (+ELS) + IKT	Aufladen von E-Fahrzeugen im Straßenraum	1	x	x			x	x			x				x			
	VSt + ELV + FST (+ IKT)	Energieversorgung von nicht oder teilweise leitungsgebundenen E-Fahrzeugen über das Straßennetz	1	x				x	x			x					x		
	VSt + ELV	Stromnetz unter/entlang Straßen, Straße/Beleuchtung	0				x												
	VSt + VDG + BMS/WSS/RSS	Sammeln von Abfallstoffen über das Straßennetz	0				x												
Verkehr-Erschließung Schiene (VSi)	VSi + ELE	Stromerzeugung durch Schienenwege / Vibrationen - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen	1		x			x				x				x			
	VSi + GV	Brennstoffzellen-Elektrische Züge	1		x			x				x				x			
	VSi + ELV	Elektrifizierung Schiene		x															
<b>Verkehrsdienstleistungen</b>																			
Personenverkehr		siehe IKT																	
Güterverkehr		siehe IKT																	
Fahrzeugflotten																			

Teilsektor Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster			
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik
Fahrzeuge Straßenverkehr		siehe IKT																
Fahrzeuge Schienenverkehr		siehe IKT																
<b>Abfall-entsorgung</b>																		
Biomüll																		
Biomüll - Sammeln																		
Biomüll – Verwerten (BMV)	BMV (+ SchWB) + GE + ELE	Biogas aus Biomüll (mit und ohne Einbindung von Klärrückständen)	1		x			x			x				x	x		
Biomüll - Entsorgen																		
Wertstoffe																		
Wertstoffe - Sammeln																		
Wertstoffe - Verwerten																		
Wertstoffe - Entsorgen			1															

Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster				
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	intersektoral	innersektoral 1 – (Teilsysteme)	innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren
Restmüll																			
Restmüll - Sammeln																			
Restmüll-Verwerten /Behandeln (RMV)	RMV + WEE	Müllverbrennung mit Abwärmenutzung	1																
	RMV + WEE + ELE	Müllverbrennung mit Kraft-Wärme-Kopplung																	
Restmüll entsorgen																			
IKT																			
Kommunikationsnetze	KN - VDP	W-LAN Service Deutsche Bahn	1		x		x	x							x				x
	KN + ELV	Strom für Betrieb Kommunikationsnetze	0																
Vernetzte Anwendungen (VNA)	VNA + OKN + VSt/I + FST/I	Steuerung Verkehrsleitsysteme/Navigation / V2X	1	x			x	x							x				x
	VNA + ...	Steuerung von Hybridnetzen (Strom, Gas, Wärme, E-Mobility, IKT als Bindeglied)	1	x				x				x			x				x

Teilsektor Teilsystem	Beteiligte gekoppelte Sektoren (Abkürzungen der Sektoren aus Spalte 1 )	Kurzbeschreibung	Etabliertheit (0=etabliert, 1 = innovativ)	Art der Kopplung				Sektorumgriff			Politische Dimensionen				Funktionale Cluster					
				funktionale Dependenz	funktionale Interaktion	organisatorische Dependenz	räumliche Interaktion	Intersektoral	Innersektoral 1 – (Teilsysteme)	Innersektoral 2 – (Teil-Sektoren)	Dekarbonisierung (Energie)	Kreislaufführung (Stoffe)	Flächenschonung	Digitalisierung	Alternative und regen. Energien	Umwandlung und Speicherung	Intelligente Netze	Intelligente Logistik	Autonomes Fahren	Sonstige
	VNA + VDP	Verzahnung von Verkehrsträgern, enge DL-Ketten, Information über OTP-Dienste	1	x	X			X			X			X				x		
	VNA + VDG	Logistik-Ketten - Betriebssysteme für Lieferketten	1	x				x						x				X		
	VNA + FSt	Autonomes Fahren im Straßenverkehr	1	x				x						x				x		
	VNA + FSi	Autonomes Fahren im Schienenverkehr	1	x				x						x				x		
	VNA + social services	CityOS - Betriebssysteme für Städte	1	x				x						x						

**Anhang 3: Zuordnung von Kopplungen zu den Clustern nach „politischen Dimensionen“**

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
	<b>Dekarbonisierung</b>						
1021	Trinkwasseraufbereitung mittels Elektrizität aus regenerativen Energien (Solar, Wasserkraft, etc.), z. B. Solare Membrandestillation (PV-basierte Meerwasserentsalzung), Osmose (z. B. für Flusswasser)	x		x			
1022	Strombedarf im Betrieb Trinkwasseraufbereitungsanlagen-Anlagen	x		x			
1031	Klein-/Mikro-Wasserkraft im Trinkwassernetz – Nutzung der Gefälleunterschiede incl. Wasserkraft Zu-/Ableitungen der Speicher (Hochbehälter, Wassertürme)	x		x			
1032	Strombedarf für Betrieb von Pumpen in Trinkwassernetzen	x		x			
1033	Steuerung und Monitoring der Trinkwasserverteilung mittels IKT-Techniken	x					x
2113	Abwärmegewinnung aus Abwasser (dezentral/zentral in Objekten und Sammelleitungen) für Nahwärme oder Objektbezogene Wärmenutzung		x	x			
2114	Kleinwasserkraft im Kanalnetz (Nutzung von Potenzialunterschieden im Gelände)		x	x			
2122	Biogasgewinnung und -verwertung (KWK, Wärme, Strom) in Kläranlagen		x	x			
2126	Stromgewinnung aus Schmutzwasser mittels mikrobieller Brennstoffzelle (bei gleichzeitiger Abwasserreinigung, dezentral/zentral?) (Forschung)		x	x			
2131	Abwärmegewinnung Ausgang Kläranlage (mittels WP)		x	x			x
2132	Stromgewinnung Ausgang Kläranlage (Kleinwasserkraft)		x	x			
3111	Einkopplung Erneuerbarer Energien (zentral/dezentral) in etablierte Nah- und Fernwärme-Systeme			x			
3112	Einkopplung Abwärme aus den Produktionsprozessen (inkl. Abwärme von Servern) in Nah- und Fernwärmenetzen			x			
3113	Stromgeführter Betrieb von Wärmepumpen im Schwarm (negative Regelenergie)			x			
3114	Stromoptimierter/Stromgeführter Betrieb von KWK im Schwarm (konventionell, Brennstoffzelle) (positive Regelenergie)			x			x
3115	Heizung und Stromerzeugung durch Brennstoffzellen-KWK für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen			x			

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
	(Brennstoffzellen-KWK-Richtlinie)						
3116	Kombination Wärmepumpen mit solarer Vorlaufanhebung (solar erwärmte Quelle) zur Effizienzsteigerung			x			
3121	Wärmespeicher / Multifunktionspeicher in Wärmenetzen (ggf. auch in Verbindung mit WP und PtH)			x			
3122	Abwärmenutzung (Industrie) zur Stromgewinnung mittels ORC-Turbine (Organic Rankine Cycle) bzw. thermoelektrischen Generatoren			x			
3123	Abwärmenutzung mittels mobiler Energiespeicher			x	x		
3211	Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat nach Prinzip "Tauchsieder"			x			x
3212	"veredelte" Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat - Veredlung mittels Wärmepumpe			x			
3213	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-Gas			x			
3214	Dezentrale Erzeugung und Einspeisung von (Überschuss-)Strom über öffentliche Netze (EEG)			x			
3215	Netzsteuerung durch Schwarmsteuerung virtueller Kraftwerke zur Stromerzeugung (positive Regelenergie) bzw. Wärmeerzeugung (negative Regelenergie)			x			x
3221	Zentrale/dezentrale Speicherung Überschussstrom / Netzsteuerung in elektr. Batterien, Pumpspeicherkraftwerken, Druckluftkavernen			x			x
3231	Netzstabilisierung durch Einbindung der Speicher von E-Fahrzeugen in den Angebots-Nachfrageausgleich von Strom (V2G, Vehicle to Grid)			x		x	x
3311	Windgas + PtG, PtL - siehe elektrische Energie			x			
3331	Stromerzeugung aus Gas mittels Brennstoffzelle oder Motor			x			
3334	Wärme aus Brennstoffzelle-KWK - siehe Wärmeenergieerzeugung			x			
4111	Energiegewinnung von Straßenflächen / Solar - Solarzellen statt Asphalt / Solar Roadway / Solarer Radweg			x	x		
4112	Stromerzeugung durch Straßen / Vibration - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen			x	x		
4114	Aufladen von E-Fahrzeugen im Straßenraum			x	x		x
4115	Energieversorgung von nicht oder teilweise leitungsgebundenen E-Fahrzeugen über das Straßennetz			x	x		x
4121	Stromerzeugung durch Schienenwege / Vibrationen - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen			x	x		

Cluster  Kopplung Code	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
4122	Brennstoffzellen-elektrische Züge			x	x		
5121	Biogas aus Biomüll (mit und ohne Einbindung von Klär- rückständen)		x	x		x	
6022	Steuerung von Hybridnetzen (Strom, Gas, Wärme, E-Mo- bilität, IKT als Bindeglied)	x	x	x	x		x
6023	Verzahnung von Verkehrsträgern, enge Dienstleistungs- Ketten, Information über OTP (Over The Top)-Dienste				x		x
	<b>Kreislaufführung</b>						
2111	Entkopplung Grauwasser/Schwarzwasser für NASS (Neu- Artige Sanitär Systeme)-Anwendungen incl. Grauwasser- recycling, z. B.zur Substitution von TW (aktuell v.a. de- zentral, konventionell oder als Vakuumanlage)	x	x				
2112	Entkopplung Mischkanäle zur Effizienzsteigerung der Klär- anlage und Nutzung und Substitution TW in Nieder- schlagswasser -unterstützten Brauchwassernetzen	x	x				
1021	Trinkwasseraufbereitung mittels Elektrizität aus regenera- tiven Energien (Solar, Wasserkraft, etc.), z. B.Solare Mem- brandestillation (PV-basierte Meerwasserentsalzung), Os- mose (z. B.für Flusswasser)	x		x			
2121	Organisatorischer Zusammenschluss von Kläranlagen zur Entsorgung von Klärrückständen		x				
2125	Separation von Stoffströmen in Kläranlagen (NASS), Re- cycling von Wertstoffen, Abscheidung von Düngemitteln		x	x		x	
2211	Niederschlagswasserbewirtschaftung zur Substitution TW (NASS) in Brauchwassernetzen	x	x				
2231	Versickerung oder Zwischenspeicherung von Nieder- schlagswasser entlang straßenbegleitender (Frei-) Räume oder unterhalb von Fußwegen	x	x				
	<b>Flächenschonung</b>						
4111	Energiegewinnung von Straßenflächen / Solar - Solarzel- len statt Asphalt / Solar Roadway / Solarer Radweg			x	x		
	<b>Digitalisierung</b>						
1012	Steuerung und Monitoring der Trinkwasserförderung in Brunnenverbänden mittels IKT-Techniken	x		x			x
1033	Steuerung und Monitoring der Trinkwasserverteilung mit- tels IKT-Techniken	x					x
2115	Steuerung Abwassernetze (z. B.Retention im Kanalnetz)		x	x			x
3113	Stromgeführter Betrieb von Wärmepumpen im Schwarm (negative Regelenergie)			x			
3114	Stromoptimierter/Stromgeführter Betrieb von KWK im			x			x

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
	Schwarm (konventionell, Brennstoffzelle) (positive Regelenergie)						
3211	Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat nach Prinzip "Tauchsieder"			x			x
3212	"veredelte" Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat - Veredlung mittels Wärmepumpe			x			
3213	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-Gas			x			
3215	Netzsteuerung durch Schwarmsteuerung virtueller Kraftwerke zur Stromerzeugung (positive Regelenergie) bzw. Wärmeerzeugung (negative Regelenergie)			x			x
3231	Netzstabilisierung durch Einbindung der Speicher von E-Fahrzeugen in den Angebots-Nachfrageausgleich von Strom (V2G, Vehicle to Grid)			x		x	x
4113	Intelligente Laterne/Strommast: Licht-WLAN, Licht-WLAN-Ladestation-E-Auto, Licht-Verkehr-Lichtstärkesteuerung			x	x		x
4114	Aufladen von E-Fahrzeugen im Straßenraum			x	x		x
6021	Steuerung Verkehrsleitsysteme/Navigation / V2X					x	x
6022	Steuerung von Hybridnetzen (Strom, Gas, Wärme, E-Mobilität, IKT als Bindeglied)	x	x	x	x		x
6023	Verzahnung von Verkehrsträgern, enge DL-Ketten, Information über OTP-Dienste				x		x
6024	Logistik-Ketten - Betriebssysteme für Lieferketten				x		x
6025	Autonomes Fahren im Straßenverkehr				x		x
6026	Autonomes Fahren im Schienenverkehr				x		x
6027	CityOS - Betriebssysteme für Städte						x

#### Anhang 4: Zuordnung von Kopplungen zu den Clustern nach „funktionaler Zusammengehörigkeit“

Cluster  Kopplung Code	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
<b>Alternative und regenerative Energien</b>							
1021	Trinkwasseraufbereitung mittels Elektrizität aus regenerativen Energien (Solar, Wasserkraft, etc.), z. B. Solare Membrandestillation (PV-basierte Meerwasserentsalzung), Osmose (z. B. für Flusswasser)	x		x			
1031	Klein-/Mikro-Wasserkraft im Trinkwassernetz – Nutzung der Gefälleunterschiede inkl. Wasserkraft Zu-/Ableitungen der Speicher (Hochbehälter, Wassertürme)	x		x			
2113	Abwärmegewinnung aus Abwasser (dezentral/zentral in Objekten und Sammelleitungen) für Nahwärme oder objektbezogene Wärmenutzung		x	x			
2114	Kleinwasserkraft im Kanalnetz (Nutzung von Potenzialunterschieden im Gelände)		x	x			
2122	Biogasgewinnung und -verwertung (KWK, Wärme, Strom) in Kläranlagen		x	x			
2126	Stromgewinnung aus Schmutzwasser mittels mikrobieller Brennstoffzelle (Forschung)		x	x			
2131	Abwärmegewinnung Ausgang Kläranlage (mittels WP)		x	x			x
2132	Stromgewinnung Ausgang Kläranlage (Kleinwasserkraft)		x	x			
3111	Einkopplung Erneuerbarer Energien (zentral/dezentral) in etablierte Nah- und Fernwärme-Systeme			x			
3112	Einkopplung Abwärme aus den Produktionsprozessen (inkl. Abwärme von Servern) in Nah- und Fernwärmenetzen			x			
3115	Heizung und Stromerzeugung durch Brennstoffzellen-KWK für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Brennstoffzellen-KWK-Richtlinie)			x			
3116	Kombination Wärmepumpen mit solarer Vorlaufanhebung (solar erwärmte Quelle) zur Effizienzsteigerung			x			
3122	Abwärmennutzung (Industrie) zur Stromgewinnung mittels ORC-Turbine (Organic Rankine Cycle) bzw. thermoelektrischen Generatoren			x			
3123	Abwärmennutzung mittels mobiler Energiespeicher			x	x		
3211	Wärmennutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat nach Prinzip "Tauchsieder"			x			x
3212	"veredelte" Wärmennutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat - Veredlung mittels Wärmepumpe			x			
3213	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-			x			

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
	Gas						
3214	Dezentrale Erzeugung und Einspeisung von (Überschuss-) Strom über öffentliche Netze (EEG)			x			
3311	Windgas + PtG, PtL - siehe elektrische Energie			x			
3331	Stromerzeugung aus Gas mittels Brennstoffzelle oder Motor			x			
3334	Wärme aus Brennstoffzelle-KWK - siehe Wärmeenergieerzeugung			x			
4111	Energiegewinnung von Straßenflächen / Solar - Solarzellen statt Asphalt / Solar Roadway / Solarer Radweg			x	x		
4112	Stromerzeugung durch Straßen / Vibration - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen			x	x		
4121	Stromerzeugung durch Schienenwege / Vibrationen - Piezoelektrische Stromerzeugung aus Vibrationen			x	x		
4122	Brennstoffzellen-Elektrische Züge			x	x		
5121	Biogas aus Biomüll (mit und ohne Einbindung von Klärrückständen)		x	x		x	
<b>Umwandlung und Speicherung von Energien</b>							
3116	Kombination Wärmepumpen mit Solarer Vorlaufanhebung (solar erwärmte Quelle) zur Effizienzsteigerung			x			
3121	Wärmespeicher / Multifunktionspeicher in Wärmenetzen (ggf. auch in Verbindung mit WP und PtH)			x			
3213	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-Gas			x			
3221	Zentrale/dezentrale Speicherung Überschussstrom / Netzsteuerung in elektr. Batterien, Pumpspeicherkraftwerken, Druckluftkavernen			x			x
3231	Netzstabilisierung durch Einbindung der Speicher von E-Fahrzeugen in den Angebots-Nachfrageausgleich Strom (V2G, Vehicle to Grid)			x		x	x
3311	Windgas + PtG, PtL - siehe elektrische Energie			x			
4114	Aufladen von E-Fahrzeugen im Straßenraum			x	x		x
4115	Energieversorgung von nicht oder teilweise leitungsgebundenen E-Fahrzeugen über das Straßennetz			x	x		x
5121	Biogas aus Biomüll (mit und ohne Einbindung von Klärrückständen)		x	x		x	
<b>Intelligente Netze</b>							
3113	Stromgeführter Betrieb von Wärmepumpen im Schwarm (negative Regelenergie)			x			
3114	Stromoptimierter/stromgeführter Betrieb von KWK im			x			x

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
	Schwarm (konventionell, Brennstoffzelle) (positive Regelenergie)						
3121	Wärmespeicher / Multifunktionsspeicher in Wärmenetzen (ggf. auch in Verbindung mit WP und PtH)			x			
3211	Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat nach Prinzip "Tauchsieder"			x			x
3212	"veredelte" Wärmenutzung von (Überschuss-)Strom - Power-to-Heat - Veredlung mittels Wärmepumpe			x			
3213	Speicherung & Nutzung Überschussstrom als Gas - Power-to-Gas			x			
3215	Netzsteuerung durch Schwarmsteuerung virtueller Kraftwerke zur Stromerzeugung (positive Regelenergie) bzw. Wärmeerzeugung (negative Regelenergie)			x			x
3221	Zentrale/dezentrale Speicherung Überschussstrom / Netzsteuerung in elektr. Batterien, Pumpspeicherkraftwerken, Druckluftkavernen			x			x
3231	Netzstabilisierung durch Einbindung der Speicher von E-Fahrzeugen in den Angebots-Nachfrageausgleich Strom (V2G, Vehicle to Grid)			x		x	x
3311	Windgas + PtG, PtL - siehe elektrische Energie			x			
6022	Steuerung von Hybridnetzen (Strom, Gas, Wärme, E-Mobilität, IKT als Bindeglied)	x	x	x	x		x
<b>Intelligente Flottenmanagementsysteme + autonomes fahren</b>							
4113	Intelligente Laterne/Strommast: Licht-WLAN, Licht-WLAN-Ladestation-E-Auto, Licht-Verkehr-Lichtstärkesteuerung			x	x		x
4114	Aufladen von E-Fahrzeugen im Straßenraum			x	x		x
4115	Energieversorgung von nicht oder teilweise leitungsgebundenen E-Fahrzeugen über das Straßennetz			x	x		x
6021	Steuerung Verkehrsleitsysteme/Navigation / V2X					x	x
6023	Verzahnung von Verkehrsträgern, enge DL-Ketten, Information über OTP-Dienste				x		x
6024	Logistik-Ketten - Betriebssysteme für Lieferketten				x		x
6025	Autonomes Fahren im Straßenverkehr				x		x
6026	Autonomes Fahren im Schienenverkehr				x		x
<b>Sonstige</b>							
2111	Entkopplung Grauwasser/Schwarzwasser für NASS-Anwendungen inkl. Grauwasserrecycling, z. B.zur Substitution von TW (aktuell v.a. dezentral, konventionell oder als Vakuumanlage)	x	x				

Cluster	Kopplung	Beteiligte Sektoren					
		Trinkwasser	Abwasser	Energie	Verkehr	Abfall	IKT
Kopplung Code							
2112	Entkopplung Mischkanäle zur Effizienzsteigerung der Kläranlage und Nutzung und Substitution TW in NieWa-unterstützten Brauchwassernetzen	x	x				
2121	Organisatorischer Zusammenschluss von Kläranlagen zur Entsorgung von Klärrückständen		x				
2125	Separation von Stoffströmen in Kläranlagen (NASS), Recycling von Wertstoffen, Abscheidung von Düngemitteln		x	x		x	
2211	Niederschlagswasserbewirtschaftung zur Substitution TW (NASS) in Brauchwassernetzen	x	x				
2231	Versickerung oder Zwischenspeicherung von NieWa entlang straßenbegleitender (Frei-)Räume oder unterhalb von Fußwegen	x	x				