

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

COOPERATIVE
Infrastruktur und Umwelt



Optionen kommunaler Sektorenkopplungen Band I – Überblick

Handlungsoptionen zur nachhaltigen Transformation sowie sektorenübergreifenden Vernetzung und Optimierung von Infrastruktursystemen in urbanen Räumen

Handreichung für Kommunen und kommunale Betriebe

Impressum

Herausgeber

Cornelia Siebke, Stefan Simonides-Noack (BTU),
Luise Schmidt, Dr.-Ing. Jörg Felmeden (CIU), 2020

BTU – Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
CIU – COOPERATIVE Infrastruktur und Umwelt

Bestellungen

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Fachgebiet Stadttechnik
Konrad-Wachsmann-Allee 4
03046 Cottbus
Oder per
Tel: +49 (0)355 / 69 2500
Fax: +49 (0)355 / 69 2190
E-Mail: bestellung@stadttechnik.de
Internet: www.stadttechnik.de

Stand

06, 2020

Druck

Druckzone GmbH Co. KG

Gestaltung

re.do graphic and design

Text

Cornelia Siebke, Stefan Simonides-Noack, Luise Schmidt, Dr.-Ing. Jörg Felmeden,
Dr.-Ing. Bernhard Michel, Prof. Dr.-Ing. Matthias Koziol, Pauline Richter, Niels Bieschke, Frank Springer, Matthias Fink
Cottbus, Kassel, Berlin, Erfurt, Giessen

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben INFRA-URBAN wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Förderschwerpunkt Sozial-ökologische Forschung zur „Nachhaltigen Transformation urbaner Räume“ unter dem Förderkennzeichen 01UR1617 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
1. Einleitung.....	6
2. Stand und Potentiale der Sektorenkopplung.....	8
2.1. Aktueller Stand.....	8
2.2. Potentiale.....	9
2.2.1. Beispiel Power-to-X.....	10
2.2.2. Beispiel Niederschlagswasser und Grün – Blaue Infrastruktur.....	11
2.3. Institutionelle Herausforderungen bei der Realisierung von Potentialen der Sektorenkopplung.....	12
3. Systematischer Ansatz.....	13
3.1. Definition der Sektoren.....	13
3.2. Definition von Sektorenkopplung.....	16
3.3. Struktur von Sektorenkopplungen.....	17
3.3.1. Inter-/ Intrasektoral, Technikausprägungen.....	17
3.3.2. Kopplungstyp.....	19
4. Etablierung und Bewertung von Sektorenkopplungen.....	22
4.1. Vorgehen zur Mobilisierung der Potentiale.....	22
4.2. Bewertungsrahmen.....	22
4.3. Bewertungsprozess.....	22
5. Beispiele der Sektorenkopplung.....	27
5.1. Übersicht.....	27
5.2. Kurzbeschreibungen.....	27
5.2.1. Sektor Strom.....	29
5.2.2. Sektor Wärme.....	32
5.2.3. Sektor Abwasser.....	33
5.2.4. Sektor Abfall.....	36
5.2.5. Sektor Verkehr.....	37
5.2.6. Sektor Grüne Infrastruktur.....	38
5.2.7. Sektor Blaue Infrastruktur.....	39
5.3. Abschätzung der Potentiale.....	40
5.3.1. Transformation.....	40
6. Anwendungsbeispiele und Szenarien.....	44
6.1. Fallbeispiel Erfurt – Äußere Oststadt.....	44
6.1.1. Beschreibung des Modellgebietes.....	44
6.1.2. Modellgebietsbezogene Sektorenkopplungen.....	46
6.1.3. Übertragbarkeit in andere städtebauliche Strukturen.....	54
6.2. Fallbeispiel Region Mittelhessen.....	56
6.2.1. Beschreibung des Modellgebietes.....	56
6.2.2. Wasserwirtschaftliche Randbedingungen.....	56
6.2.3. Modellgebietsbezogene Sektorenkopplungen.....	58
6.2.4. Weitere Kopplungsmöglichkeiten.....	59
6.2.5. Übertragbarkeit in andere regionale Strukturen.....	60
7. Fazit.....	62
8. Literaturverzeichnis.....	64
Autoren und Beteiligte.....	72

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft	PEF	Primärenergiefaktor
BHKW	Blockheizkraftwerk	PEM	Protonen-Austausch-Membran
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	Pkw	Personenkraftwagen
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	PtC	Power-to-Cold
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	PtH	Power-to-Heat
CH₄	Methan	PtG	Power-to-Gas
CO₂	Kohlenstoffdioxid	PtL	Power-to-Liquid
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung	PtX	Power-to-X
GuD	Gas- und Dampfturbine	PV	Photovoltaik
H₂	Wasserstoff	SINTEG	Schaufenster intelligente Energiewende
E-	Elektro-	SKM	Sorptionskältemaschine
EE	Erneuerbare Energien	SPNV	Schienenpersonennahverkehr
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese	THG	Treibhausgas
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	UBA	Umweltbundesamt
KKM	Kompressionskältemaschine	VtG	Vehicle-to-Grid
KS	Klärschlamm	WP	Wärmepumpe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	WRG	Wärmerückgewinnung
JAZ	Jahresarbeitszahl	η_{el} / η_{th}	elektrischer bzw. thermischer Wirkungsgrad
MAP	Marktanreizprogramm	ω	Brennstoffausnutzungsgrad
MIV	Motorisierter Individualverkehr		

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sektorenkopplung von Power-to-X; eigene Darstellung	10	Abb. 16: Matrix zur Übersicht über die betrachteten Sektorenkopplungen; eigene Darstellung.....	28
Abb. 2: Niederschlagswasser und Grün – Blaue Infrastruktur; eigene Darstellung auf Basis von Coutts 2013	11	Abb. 17: Funktionsweise einer Power-To-Heat-Anlage; Lehrstuhl Stadttechnik	29
Abb. 3: Übersicht der Infrastrukturbereiche und Sektoren; eigene Darstellung.....	14	Abb. 18: Hochleistungs-Eisspeicher im Container, mit Kapillarrohrrmatte; BEKA Heiz- und Kühlmatten GmbH 2020	29
Abb. 4: Erläuterung der Definition Sektorenkopplung am Bsp. Strom, Kälte und Wärme; eigene Darstellung.....	16	Abb. 19: Funktionsweise einer Kraft-Wärme-Kopplungs- anlage; Lehrstuhl Stadttechnik	30
Abb. 5: Intrasektorale Kopplung, Wärmerückgewinnung; eigene Darstellung.....	17	Abb. 20: E-Auto mit Ladesäule; Foto: Stadtwerke Emden GmbH.....	30
Abb. 6: Intrasektorale Kopplung, Mobilstation; eigene Darstellung.....	17	Abb. 21: Elektrolyseanlage in Falkenhagen; Foto: Uniper	31
Abb. 7: Intersektorale Kopplung, Power-to-Heat; eigene Darstellung.....	18	Abb. 22: Power-to-Gas-Anlage mit Biologischer Methanisierung, Anlage Allendorf (Eder); Viessmann Werke	31
Abb. 8: Technikausprägungen am Beispiel der Sektorenkopplung Power-to-Heat; eigene Darstellung.....	18	Abb. 23: Versuchsanlage zur Synthese von Kraftstoffen aus dem CO ₂ der Luft; Langer 2019.....	32
Abb. 9: Primärkopplung, Kraft-Wärme-Kopplung; eigene Darstellung.....	19	Abb. 24: Energieflussbild: Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung; Hirzel 2013.....	32
Abb. 10: Tertiärkopplung – Retention, Bewässerung und Verdunstungskühlung; eigene Darstellung.....	19	Abb. 25: Absorptionskältemaschine; RÜTGERS GmbH & Co. KG Kälte 2019	33
Abb. 11: Unterschiedliche Typen von Sektorenkopplungen; eigene Darstellung.....	20	Abb. 26: Grasmulde und Retentionsbecken; Schöne Aussichten Landschaftsarchitektur	33
Abb. 12: Zusätzliche Effekte möglicher Sektorenkopplungen; eigene Darstellung.....	21	Abb. 27: Anlagen der sozialen Infrastruktur wie „Skate- bowls“ können zur Retention genutzt werden; pixabay	34
Abb. 13: Sektorenkopplungsmöglichkeiten im Planungs- prozess erkennen und entwickeln; eigene Darstellung auf Basis von DWA 2014	23	Abb. 28: Gewässer, wie der hier abgebildete Teich können der Retention von Niederschlagswasser dienen; pixabay	34
Abb. 14: Bewertungsrahmen der Sektorenkopplung; eigene Darstellung.....	24	Abb. 29: Mögliche Quelle für Grauwasser ist das Wasser aus Handwaschbecken; pixabay	35
Abb. 15: Ablauf des Delphi-Verfahrens; eigene Darstellung auf Grundlage von Häder 2014.....	25	Abb. 30: Funktionsweise eines Kreuzstromwärmetauschers; eigene Darstellung.....	35

Abb. 31: Schema eines Kanalwärmetauschers, www.kasag.com.....	36
Abb. 32: Falltürme dienen der Faulgasgewinnung und Stabilisierung des Klärschlamm; pixabay.....	36
Abb. 33: Ausgestaltung einer Mobilstation als Modulsystem; Zukunftsnetz Mobilität NRW 2017.....	37
Abb. 34: Funktionsweise Vehicle-to-Grid; Lehrstuhl Stadttechnik.....	37
Abb. 35: Stadtbäume tragen zur Verdunstungskühlung durch Transpiration bei; pixabay.....	38
Abb. 36: Sukkulenten dienen der extensiven Begrünung von Gründächern; pixabay.....	38
Abb. 37: Künstliche Becken im urbanen Umfeld verbessern das Mikroklima durch Verdunstungskühlung; pixabay.....	39
Abb. 38: Sprinklerbewässerung; pixabay.....	39
Abb. 39: Das Planungsgebiet Äußere Oststadt in der Landeshauptstadt Erfurt, westlich angrenzend die Altstadt, südlich davon der Erfurter Hauptbahnhof; Landeshauptstadt Erfurt 2015.....	44
Abb. 40A: Teilquartiere des integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015.....	45
Abb. 40B: Städtebauliches Strukturkonzept des Integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015.....	45
Abb. 41: Energieflussbild der Wärmeversorgung bei der Kopplung der Sektoren Abwasser und Wärme. Weitere Bestandteile sind solarthermische Anlagen und das Bestandgasnetz; eigene Darstellung.....	48
Abb. 42: Städtebauliches Strukturkonzept Äußere Oststadt, Quartier Blumenschmidtstraße mit einer möglichen Anordnung der Retentionsflächen (rot, grün); eigene Darstellung auf Basis von Georg und Teichmann 2015.....	50

Abb. 43A: Städtebauliche Strukturen im Vergleich: Referenzquartier in der Inneren Krämpfervorstadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015.....	54
Abb. 43B: Aktuelle Planungen der Äußeren Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015.....	54
Abb. 44: Region Mittelhessen mit Landkreisen; Trepte 2006.....	56
Abb. 45: Lage der kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen in der Region Mittelhessen; HMUKLV 2019.....	57
Abb. 46: Besiedlungsdichte in Hessen nach Landkreisen; HSL 2019.....	59
Abb. 47: Kommunale Kläranlage in Mittelhessen (RP Gießen) und in Südhessen (RP Darmstadt); HMUKLV 2019.....	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potentialmatrix möglicher Sektorenkopplungen; eigene Darstellung.....	42
Tabelle 2: Erforderliche Speichervolumina und verfügbare Grün- und Freiflächen für die Anordnung von Retentionsflächen; eigene Darstellung.....	49
Tabelle 3: Kühlpotential durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser; eigene Darstellung.....	53
Tabelle 4: Gegenüberstellung von Kühlpotential und -bedarf durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser; eigene Darstellung.....	53
Tabelle 5: CO ₂ -Einsparpotential der adiabaten Kühlung gegenüber konventionellen Kühlanlagen; eigene Darstellung.....	53
Tabelle 6: Klärschlammanfall der Kläranlagen mit einem P-Gehalt im Klärschlamm von mindestens 2%, Region Mittelhessen, 2012-2014; eigene Darstellung auf Basis von HMWEVW 2019.....	58
Tabelle 7: Bevölkerungsentwicklung in Hessen und den Regierungsbezirken von 2017 bis 2035 (Projektion) bzw. bis 2050 (Trend); eigene Darstellung auf Basis von HMWEVW 2019.....	61

1. Einleitung

Die Betreiber von kommunalen Infrastruktursystemen wie z. B. der Energie- und Wasserversorgung sowie der Abwasserentsorgung stehen infolge des Klimawandels, steigender Energiekosten und des demographischen Wandels vor großen sektoralen Herausforderungen. Gleichzeitig erhöht sich im Kontext der Energiewende der Druck zur Einsparung von Ressourcen sowie der Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Aufgrund neuer technischer Optionen für integrierte Ver- und Entsorgungssysteme erhöhen sich die Potentiale, die sich aus einer übergreifenden Optimierung kommunaler Infrastruktursysteme ergeben. Die Integration erneuerbarer Energieträger in die vorhandenen Systeme der leitungsgebundenen Energieinfrastruktur erfordert einen gesamtsystemischen Ansatz. Der Erhalt der Rentabilität unter einer weitgehenden Preisstabilität für die Verbraucher ist Grundvoraussetzung der Akzeptanz von Maßnahmen. Eventuell auftretende zusätzliche Aufwendungen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit (Grundlastfähigkeit) sowie mögliche Absatzeinbußen sollten finanziell über Fördermittel o. Ä. abgedeckt werden.

Die Umsetzung einer energie- und ressourceneffizienten Stadtentwicklung sowie einer den klimatischen Herausforderungen gerecht werdenden Stadttechnik erfordern vermehrt die integrative Betrachtung bisher getrennter Ver- und Entsorgungsbereiche. Dies kann z. B. im Sinne einer stärkeren Verzahnung von Energie-, Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft erreicht werden (Felmeden et al. 2016, Kluge und Libbe 2010).

Die Energieversorgung in Deutschland ist durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger wie Windenergie, Sonneneinstrahlung, Geothermie, Biomasse und Wasserkraft geprägt. Aufgrund technologischer Innovationen wird die Energiewirtschaft zunehmend dezentraler und damit auch regionaler. Gleichzeitig wächst der Bedarf an negativer oder positiver Regelleistung zum Ausgleich der Leistungsbilanz. Dies beinhaltet Möglichkeiten zur flexiblen Stromerzeugung sowie eines Lastmanagements unter Einbindung sogenannter virtueller Kraftwerke. Diesbezüglich können sich z. B. Kläranlagen mit Schlammfäulung aufgrund der vorhandenen Gasspeicher und der KWK-Anlagen anbieten, um bedarfsorientiert als Energiespeicher oder als Produzent von Strom und Wärme zu dienen.

Zur Nutzung technisch-wirtschaftlicher Potentiale ist langfristig orientiertes Denken und Kooperationsbereitschaft der relevanten Akteure erforderlich, um Investitionen in der erforderlichen Weise auszurichten und sektorenübergreifend zu koordinieren. Die frühzeitige Einbindung der relevanten Akteure im Planungsprozess und die Identifikation integrierter technischer Umsetzungsmöglichkeiten ist ebenso entscheidend, wie die Einbindung der betrieblichen Akteure.

Zielstellung

Eine sektorenübergreifende Vernetzung und Optimierung kommunaler Infrastruktursysteme bietet die Möglichkeit, einen effizienten und langfristig nachhaltigen Ressourceneinsatz und Systemresilienz zu ermöglichen. Gleichzeitig sind die finanziellen Belastungen von Konsumenten zu begrenzen und sozial-ökologische Ziele zu realisieren.

Zielstellung dieser Handreichung ist es, die zuvor dargestellten Aspekte aufzugreifen und einen Überblick über Zusammenhänge zu verdeutlichen, die für Akteure in der Praxis verwendbar sind. Die Ausführungen und „Best-Practice“-Beispiele sollen Akteure auf dezentraler bzw. kommunaler Ebene befähigen, Sektorenkopplungen und ihre Potentiale nachzuvollziehen. Die praktische Umsetzung nachhaltiger Konzepte der Kopplung kommunaler Infrastrukturen kann durch die hier gegebenen Hinweise im Rahmen der Stadtentwicklung forciert werden.

Zielgruppen bzw. AdressatInnen dieser Handreichung sind die Kommunen mit ihren verschiedenen Fachverwaltungen wie z. B. Stadtplanung, Umwelt- und Gartenämter, Tiefbauämter etc. und die in den verschiedenen Sektoren tätigen kommunalen Unternehmen sowie PlanerInnen, InvestorInnen und Behörden.

Förderung und Projektpartner

Die vorliegende Handreichung (Band I und II) wurde im Rahmen des Forschungsprojektes INFRA-URBAN - Handlungsoptionen zur nachhaltigen Transformation sowie sektorenübergreifenden Vernetzung und Optimierung von Infrastruktursystemen in urbanen Räumen – erarbeitet. INFRA-URBAN wurde im Rahmen der Fördermaßnahme „Nachhaltige Transformation urbaner Räume“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen: 01UR1617) gefördert. Die Leitung und Koordination des Forschungsverbundes erfolgte durch die Technische Universität Berlin – Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP), Prof. Dr. Thorsten Beckers.

Die Verbundpartner setzen sich aus den folgenden Institutionen zusammen:



2. Stand und Potentiale der Sektorenkopplung

2.1. Aktueller Stand

Die traditionellen Strukturen der kommunalen Infrastruktur sind sektoral geprägt. „Der Strom kommt aus der Steckdose“, dafür sorgt der Stromversorger. „Das Wasser fließt aus dem Wasserhahn“, das sichert das Wasserversorgungsunternehmen. Der Abfall wird von der Abfallbeseitigung entsorgt. Die Anlage und Unterhaltung von städtischen Grün- und Freiflächen ist Aufgabe der Stadtplanung und entsprechender Garten-/Umweltämter.

Sektorale Entwicklungen haben in der Regel das Ziel, bestimmte aktuelle technische Anforderungen (bestmöglich) zu erfüllen. Sie konzentrieren sich dabei für gewöhnlich auf den Einsatz einer Technologie, die imstande ist, diese Anforderungen wirtschaftlich zu erfüllen. Beispiele hierfür finden sich in der Entwicklung von Kraftwerken zur Stromerzeugung. Die bei diesen Prozessen „anfallende“ Abwärme wurde zunächst als Problem des zur Dampfproduktion notwendigen Kühlkreislaufes gesehen und in diesem Sinne durch die Installation von Kühltürmen sektoral gelöst. Eine mögliche Nutzung der Abwärme zur Bereitstellung von Fernwärme und die damit verbundene Reduktion des Primärenergieverbrauches bzw. die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades über gekoppelte Prozesse blieb lange Zeit unbeachtet.

Einzelne frühe Beispiele hocheffizienter Sektorenkopplungen zeigen, dass der Ansatz nicht neu ist. Im Jahr 1902 wurde im brandenburgischen Beelitz-Heilstätten mit der ersten kombinierten Strom- und Wärmeversorgung, die erste Kraft-Wärme-Kopplungsanlage in Deutschland eingeweiht. Die Kombination aus Fernheizwerk und Elektrizitätswerk erzeugte in einem Zweiflammrohrkessel Wärme als Nass-Dampf. Damit wurden Anlagen zur Stromerzeugung und Dampfpumpen zur Wasserförderung betrieben, gleichzeitig wurde der Dampf zur Sterilisierung von medizinischen Geräten und zur Gebäudeheizung genutzt.

Das wesentliche Defizit der sektoralen Entwicklung besteht in der „Nichtbetrachtung“ örtlich naher Prozesse, die in ein Gesamtkonzept einbezogen werden könnten. Zweifelsfrei basiert die erste Kraft-Wärme-Kopplungsanlage in Beelitz-Heilstätten auf der

einzigartigen „Insellage“ eines Gebäudegroßensembles mit komplexen Infrastrukturanforderungen. Randbedingungen dieser Art sind eher selten anzutreffen, dennoch ergeben sich heute gerade in verdichteten Siedlungsgebieten und den verschiedenen (Netz-)Infrastrukturen erhebliche Potentiale für Sektorenkopplungen.

Die heutige Sektorenkopplung findet vor allem im Energiebereich (Strom, Wärme, Kälte) und der Verknüpfung mit dem Verkehr statt. Anlass ist die Energiewende. Zunehmend kommen erneuerbare Energieträger wie Windenergie, Sonneneinstrahlung, Geothermie, Biomasse und Wasserkraft zum Einsatz. Technologische Innovationen ermöglichen es, diese Energieträger auch dezentral zu nutzen. So wird die Energiewirtschaft regionaler und variabler. Um Schwankungen in der elektrischen Leistungsbilanz auszugleichen, sind flexible Energieverbraucher, -speicher und -quellen erforderlich. Die Sektorenkopplung gilt hier als Schlüsselkonzept. Kopplungen zwischen Strom-, Wärme-, Kälte- und Verkehrssektor ermöglichen den erforderlichen Ausgleich. Beim Vehicle-to-Grid-Konzept beispielsweise werden rückspeisefähige E-Autos während des Parkens geladen und stellen den Strom dem Stromnetz bei Bedarf wieder zur Verfügung (Kempton und Tomić 2005, S. 2). Ziel der Energiewende ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen. In der Energiewirtschaft ist hier oft die Rede von „Dekarbonisierung“. Gemeint ist damit die Reduktion von Emissionen des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid bis hin zur CO₂-Neutralität.

In anderen Bereichen der kommunalen Infrastruktur beschränkt sich die Sektorenkopplung bisher auf einzelne Pilotprojekte, beispielsweise zur Abwasserwärmerückgewinnung oder zur Betriebswasserbereitstellung aus behandeltem Grauwasser. Ein systematischer Ansatz existiert nicht.

Die vorwiegend sektorale Prägung der kommunalen Infrastruktur ist auch den nahezu ausschließlich sektorspezifischen Regelungen des institutionellen Rahmens geschuldet. Seit Ende der 1990er Jahre wurden die Regulierungen in den kommunalen Infrastruktursektoren Energie (Strom, Gas, Wärme), Wasser (Trinkwasser, Abwasser) und Abfall umfangreich reformiert, wobei das formulierte Ziel dieser Reformen häufig eine Kostenreduktion und eine Erhöhung der Effizienz im jeweiligen

Sektor war. Dabei wurden vorwiegend Regulierungsansätze entwickelt und implementiert, die häufig im Rahmen bundeseinheitlicher Lösungen umfangreiche und „harte“ Effizienzvorgaben für die Unternehmen etablieren sollten. Als Beispiele können hier die Anreizregulierung im Strom- und Gassektor, die verstärkte Kartellrechtsdurchsetzung im Energie- und Wassersektor und Wettbewerbsmodelle bei der Verpackungsentsorgung genannt werden. Sektorenübergreifende Überlegungen haben in den erfolgten Reformen keine Rolle gespielt oder waren nur am Rande relevant. Parallel zu diesen Änderungen des institutionellen Rahmens wurden insbesondere in den 1990er und 2000er Jahren viele kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen (teil- oder voll-)privatisiert und sind damit von auf Gewinnerzielung ausgerichteten Investoren übernommen worden. In der Zwischenzeit hat sich gezeigt, dass neu etablierte Regulierungsverfahren und das Agieren gewinnorientierter Eigentümer teilweise dazu führen, dass Infrastrukturen kurzfristig optimiert werden und „auf Verschleiß gefahren“ werden. Instandhaltungsmaßnahmen werden beispielsweise verschoben oder unterlassen. Infolgedessen ist bei einem langfristigen Betrachtungshorizont eher mit Kostensteigerungen für die Konsumenten zu rechnen. Ferner reduzieren die etablierten Anreize innerhalb von Sektoren bei gewinnorientierten Unternehmen die Bereitschaft und die Möglichkeit, mit langfristigem Horizont zu agieren. Sektorenübergreifende Vernetzungs- und Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren und umzusetzen ist selten Ziel.

Die Randbedingungen der heutigen Zeit bieten neue technische Optionen für integrierte Infrastruktursysteme und die zugehörige Erzeugungs- und Nachfrageseite. Durch die anstehenden Herausforderungen bei der Umstellung des Energiesystems zur Erreichung der vereinbarten Klimaziele sind in den letzten Jahren sektorenübergreifende Ansätze vermehrt in den Mittelpunkt gerückt. So wird seit einiger Zeit unter dem Begriff der sogenannten Sektorenkopplung diskutiert, welche technisch-systemischen Ansätze zu einer Reduktion von Treibhausgasen und somit zu einer Transformation des Energiesystems bis 2050 beitragen können. Im Kontext dieser Diskussionen wird deutlich, dass der bisher sektoral geprägte institutionelle Rahmen nicht dazu beiträgt, die technisch-systemischen Potentiale der Sektorenkopplung zu heben. Die Transformation des Energiesystems auf eine

effektive und effiziente Art und Weise wird durch die herrschenden Randbedingungen nicht gefördert.

2.2. Potentiale

Aus den Defiziten, welche bei traditionellen sektoralen Strukturen bestehen, können Potentiale für die Sektorenkopplung abgeleitet werden. Die Sektorenkopplung bietet die Möglichkeit, Prozesse zu optimieren und ihre Effizienz zu steigern. Darüber hinaus kann die Sektorenkopplung einen wesentlichen Beitrag zu Klimaschutz und Klimaanpassung leisten.

Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris steht die Zielmarke für den internationalen Klimaschutz völkerrechtlich verbindlich fest: Die Erderwärmung soll auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, begrenzt werden. Dafür ist es nötig, dass die Wirtschaft und Gesellschaft ihre Emissionen um mindestens 95 Prozent im Vergleich zu 1990 reduzieren. Das Ziel von Paris kann nur durch einen beschleunigten Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger erreicht werden. Maßnahmenprogramme, zum Beispiel der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (BMWi 2014) oder das Aktionsprogramm Klimaschutz (BMU 2020), sollen Emissionsminderungen bewirken. Im Klimaschutzgesetz der Bundesregierung ist das nationale Klimaschutzziel verbindlich festgeschrieben. Es sieht vor, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 schrittweise zu mindern, dabei um mindestens 55 Prozent bis zum Zieljahr 2030. Langfristig verfolgt die Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 (Bundesregierung 2020).

Der urbane Kontext bietet Möglichkeiten zur Nutzung Erneuerbarer Energien (inklusive Abwärmepotentiale) im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor. Die bestehenden Infrastrukturen (Gasnetze/Fernwärmenetze) und städtebaulichen Entwicklungen können genutzt werden, um vorhandene Potentiale zu heben. Die Sektorenkopplung leistet so einen Beitrag zur Reduktion von Emissionen, der Versorgungssicherheit (Technologiemix) und der Systemstabilität (Speichertechnologien).

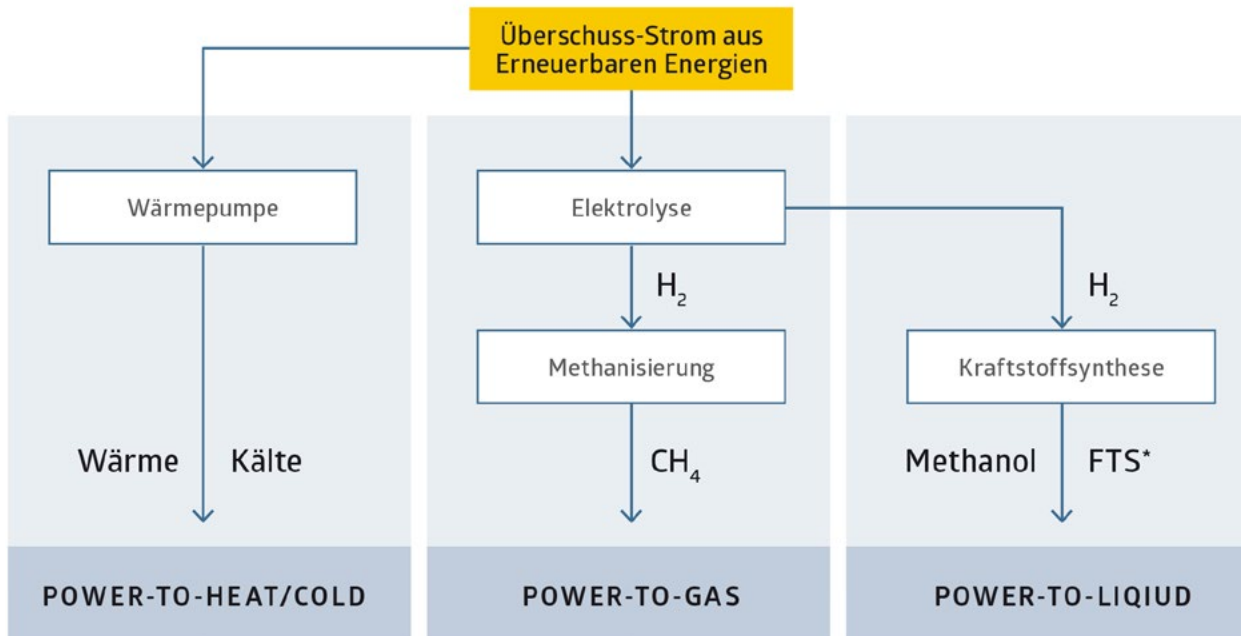


Abb. 1: Sektorenkopplung von Power-to-X; eigene Darstellung *Fischer-Tropsch-Synthese-Kraftstoff

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels sind vielerorts bereits jetzt deutlich spürbar. Hitzewellen, Überschwemmungen und Extremwetterereignisse nehmen in Ausmaß und Häufigkeit schon jetzt zu. Auch langanhaltende Hitzeperioden und die dadurch hervorgerufene Belastung der Bevölkerung stellen Kommunen zunehmend vor die Herausforderung und Aufgabe, präventive Maßnahmen zu ergreifen. Dabei kommt neben dem Klimaschutz auch der Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Kommunen eine immer wichtigere Bedeutung zu. Beim Klimaschutz (Mitigation) stehen Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung des Ausstoßes der klimarelevanten Treibhausgase im Vordergrund. Maßnahmen zur Klimaanpassung (Adaption) dienen dazu, die unvermeidbaren und bereits eingetretenen Folgen des Klimawandels abzumildern und Schäden abzuwenden. Sektorenkopplungen zwischen Blauer und Grüner Infrastruktur und der grauen Infrastruktur, beispielsweise Wasser und Abwasser, ermöglichen urbane Klimaanpassungen.

Exemplarisch werden nachfolgend zwei Kopplungen hinsichtlich Optimierungs- und Effizienzsteigerungspotentialen und ihre Bedeutung für Klimaschutz und Klimaanpassung beschrieben.

2.2.1. Beispiel Power-to-X

Bei Power-to-X wird Überschuss-Strom aus Erneuerbaren Energien in verschiedenen Technologien genutzt, um Energie zu speichern oder für den Wärme- oder Verkehrssektor verfügbar zu machen. Das X steht als Platzhalter für die verschiedenen Nutz- und Speicherformen wie Wärme und Kälte, Liquid (Methanol, Fischer-Tropsch-Synthese-Kraftstoffe) oder Gas (H_2 , CH_4), siehe Abbildung 1. Überschuss-Strom, der über chemische Energiespeicher (H_2 , Methanol, etc.) oder direkt in Wärme umgewandelt wird, kann über das örtliche Fernwärmenetz zur Verfügung gestellt werden. Wird Überschuss-Strom zu synthetischem Methanol umgewandelt, kann dieses in das Gasnetz eingespeist werden. Synthetische Kraftstoffe oder Wasserstoff können im Verkehrssektor genutzt werden.

Die Energiewende stellt einen wichtigen Baustein für den Klimaschutz dar. Um den flächendeckenden Einsatz erneuerbarer Energien zu ermöglichen, müssen Systemstabilität und Versorgungssicherheit gewährleistet werden. Dabei können die Technologien der Sektorenkopplung Power-to-X einen wichtigen Beitrag leisten.

2.2.2. Beispiel Niederschlagswasser und Grün – Blaue Infrastruktur

Die Kopplung von Niederschlagswasser und Grüner oder Blauer Infrastruktur stellt einen neuartigen, naturnahen Ansatz im Regenwassermanagement dar. Die Maßnahmen sind angesichts von Hitzewellen, Überschwemmungen und Extremwetterereignissen infolge des Klimawandels von großer Bedeutung für die Klimaanpassung. Abbildung 2 zeigt verschiedene Bereiche der Grünen und Blauen Infrastruktur und ihre Bedeutung für die Regenwasserbewirtschaftung.

Im Angesicht einer zunehmenden Verdichtung der Städte, verbunden mit einer steigenden Zahl an Hitzewellen infolge des Klimawandels, steigt die Temperatur im urbanen Raum. Es entstehen sogenannte urbane Hitzeinseln. Mehr und mehr stellt das Stadtklima eine gesundheitliche Belastung für die Bevölkerung dar. Die Kopplung von Niederschlagswasser und Grüner oder Blauer Infrastruktur kann einen Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas leisten. Verschiedene Formen von Begrünung und Gewässern

tragen durch Verschattung und Verdunstungskühlung zur Abkühlung des Außenraums bei. Freiflächen und Grünachsen schaffen Frisch- und Kaltluftschneisen, die die Zirkulation der Luft ermöglichen.

Infolge des Klimawandels treten Starkregenereignisse von erhöhter Intensität und Häufigkeit auf. Die steigende Bodenversiegelung im urbanen Raum verringert die Versickerung des Niederschlags. Überflutungen und Hochwasser sind die Folge und gefährden die Sicherheit der Bevölkerung. Mithilfe Grüner und Blauer Infrastrukturen ist eine Annäherung an den natürlichen Wasserkreislauf und damit eine Verbesserung des effektiven Schutzes vor Überflutung und Hochwasser möglich.

Grüne und Blaue Infrastrukturen stellen funktionierende Ökosysteme dar, welche die Biodiversität in den Städten steigern und zur Lärm- und Feinstaubreduktion beitragen können.

In einigen Fällen können die genannten Maßnahmen in Konkurrenz zu anderen Maßnahmen stehen, beispielsweise zur Mobilisierung von Erneuerbaren Energien

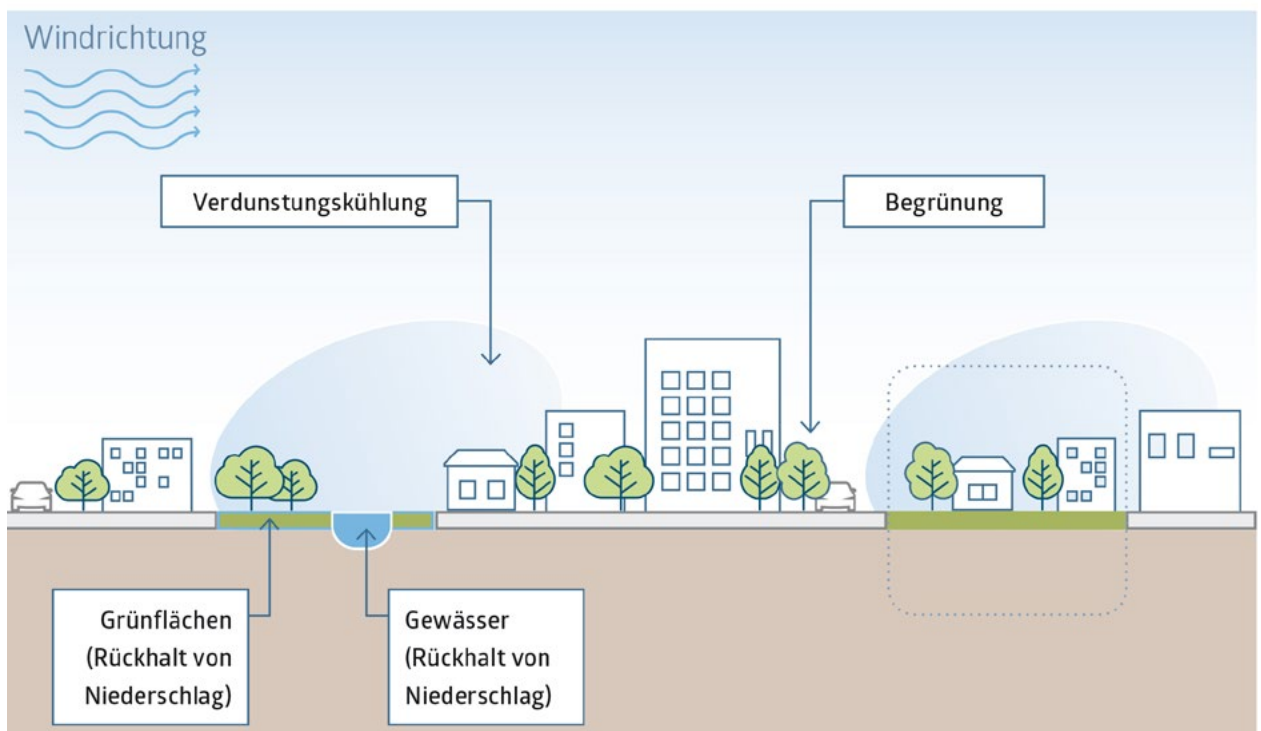


Abb. 2: Niederschlagswasser und Grün – Blaue Infrastruktur; eigene Darstellung auf Basis von Coutts 2013

(z. B. PV-Anlagen), die mit einer Flächenversiegelung verbunden sind. Ziel ist, sämtliche Maßnahmen aufeinander abzustimmen und die Synergien der verschiedenen Handlungsfelder für eine zukunftsfähige Stadtentwicklung zu nutzen. Eine Begrünung von Dächern und Fassaden vermindert zum Beispiel die Gebäudeaufwärmung im Sommer und wirkt sich wärmedämmend im Winter aus, dient als Puffer für Niederschlagswasser und verbessert die Luftthygiene (Sempergreen 2020).

2.3. Institutionelle Herausforderungen bei der Realisierung von Potentialen der Sektorenkopplung

Für die Erreichung der von Deutschland zugesagten Klimaziele bis 2050 ist ein umfassender Umbau des Energiesystems notwendig. In den vergangenen Jahren wurden in Studien unterschiedliche Szenarien entwickelt und analysiert, mit denen eine Reduktion von Klimagasemissionen für Deutschland um 95 % im Vergleich zu 1990 erreichbar wäre (Kirchner et al. 2018). In diesen Studien stand dabei vorwiegend die Betrachtung von Energiemengen im Fokus. Die zugehörige Infrastruktur wurde regelmäßig entweder für die Untersuchungen ausgeklammert oder nur am Rande betrachtet.

Für die Transformation des Energiesystems ist es unstrittig, dass auf kommunaler Ebene ein umfassender Umbau der (Energie-)Infrastrukturen notwendig ist. Aktuell ist zu beobachten, dass auf kommunaler Ebene von diversen Gemeinden bereits Konzepte erstellt werden, wie die Energieversorgung im eigenen Gemeindegebiet umgebaut und eine Klimaneutralität erreicht werden kann. Aufgrund der Heterogenität der Gemeindegebiete können sich die Lösungsansätze dabei erheblich unterscheiden. Das effektive Erreichen der Klimaziele in Deutschland ist allerdings nur bei einer Gesamtbetrachtung über alle Gebietskörperschaften hinweg möglich. Durch diese neue Art der Gesamtbetrachtung ergeben sich Herausforderungen bei der Gestaltung des zukünftigen institutionellen Rahmens im Zusammenspiel der verschiedenen föderalen Ebenen. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Transformationsstrategie auf zentraler Ebene mit den Aktivitäten auf

Ebene der Kommunen abgestimmt ist. Aus dieser Herangehensweise ergeben sich eine Reihe von Fragen. Wie können die durch die gewählte Transformationsstrategie auf zentraler Ebene einhergehenden Energiemengen auf die einzelnen Gebietskörperschaften auf der kommunalen Ebene verteilt werden? Daran anschließend ergeben sich Fragen der Anpassung und damit des Aus-, Um- und Rückbaus von verschiedenen Infrastruktursystemen in den einzelnen Gemeinden. Diese hier nur kurz skizzierte Herausforderung kann aus (institutionen-) ökonomischer Sicht als eine Frage der vertikalen Koordination im Mehrebenensystem (d. h. unter Berücksichtigung von föderalen Strukturen) eingeordnet werden. Die für eine effiziente und effektive Transformation des Gesamtsystems erforderliche vertikale Koordination im föderalen System kann grundsätzlich über verschiedene institutionelle Gestaltungsoptionen oder -ansätze adressiert werden.

Neben der Frage der Koordination über dezentrale Gebietskörperschaften hinweg, ist für die Realisierung von Potentialen der Sektorenkopplung ferner zu beachten, welche Herausforderungen bei der Umsetzung der Sektorenkopplung in den dezentralen Gebietskörperschaften bestehen. Über die dezentralen Gebietskörperschaften hinweg können die Konstellationen dabei sehr heterogen sein, weshalb es kaum möglich sein dürfte, adäquate zentrale Anreizmechanismen zu designen. Vielmehr ist es geboten, dezentrales „vor-Ort“-Wissen einzubeziehen und Entscheidungsrechte zur zukünftigen Bereitstellung von Infrastrukturen auf kommunaler Ebene zu verorten. Bei der Etablierung und Organisation dieser „integrierten Planungsgebiete“ für die (Energie-)Infrastruktur-Systeme existieren eine Vielzahl institutioneller Ausgestaltungsfragen und es besteht umfassender Forschungsbedarf (für weiterführende Ideen und mögliche Lösungsansätze siehe (Beckers und Bieschke 2019) sowie zu rechtlichen Fragestellungen (Weiß 2019)).

3. Systematischer Ansatz

Verschiedene Bezugsrahmen bilden die Grundlage für das Verständnis des Begriffs Sektor. Entsprechend vielseitig sind die Definitionen in der Literatur. In der Energiewirtschaft beispielsweise werden die Sektoren anhand der Verbraucher in Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr abgegrenzt (Wietschel et al. 2018). Im Klimaschutzplan der Bundesregierung wiederum werden die Sektoren anhand von Handlungsfeldern in Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft unterschieden (BMU 2016). In der vorliegenden Handreichung bilden der städtische Raum und die kommunalen Infrastrukturen den Bezugsrahmen. Eine entsprechende Definition des Sektor Begriffs wird in Kapitel 3.1 formuliert.

Wie Kapitel 2 gezeigt hat, beschränkt sich der Ansatz der Sektorenkopplung bisher in der Regel auf die Sektoren der Energiewirtschaft. Im Rahmen dieser Handreichung soll diese Sichtweise erweitert und zu einem ganzheitlichen, systematischen Ansatz entwickelt werden. Zu diesem Zweck erfolgt nachfolgend eine allgemeingültige Definition (Kapitel 3.2) und Strukturierung (Kapitel 3.3) von Sektorenkopplungen.

3.1. Definition der Sektoren

Urbane Räume bestehen aus einem komplexen System öffentlicher und privater Infrastrukturen, die alle technischen und sozialen Einrichtungen sowie natürlichen Ressourcen umfassen, die für die Ver- und Entsorgung einer Stadt erforderlich sind. Infrastrukturen und deren Sektoren können in die folgenden drei Bereiche unterschieden werden (in Klammern sind farbliche Definitionen/Zuordnungen ergänzt):

- 1. technische Infrastrukturen (grau) mit den Sektoren Strom, Wärme, Kälte, Verkehr, Wasser, Abwasser, Abfall**
- 2. natürliche, naturnahe Infrastrukturen (grün-blau) mit den Sektoren Grüne und Blaue Infrastruktur**
- 3. soziale Infrastrukturen (rot) mit den Sektoren Bildung, Fürsorge, Gesundheit, Kultur, Sport, Freizeit etc. (im Rahmen dieser Handreichung wird diesbezüglich auf die Flächen und Gebäude dieser Einrichtungen sozialer Infrastrukturen fokussiert)**

In Abbildung 3 sind die drei Infrastrukturbereiche und ihre Sektoren im Überblick dargestellt und mit entsprechenden Symbolen versehen. Diese Struktur wird den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt.

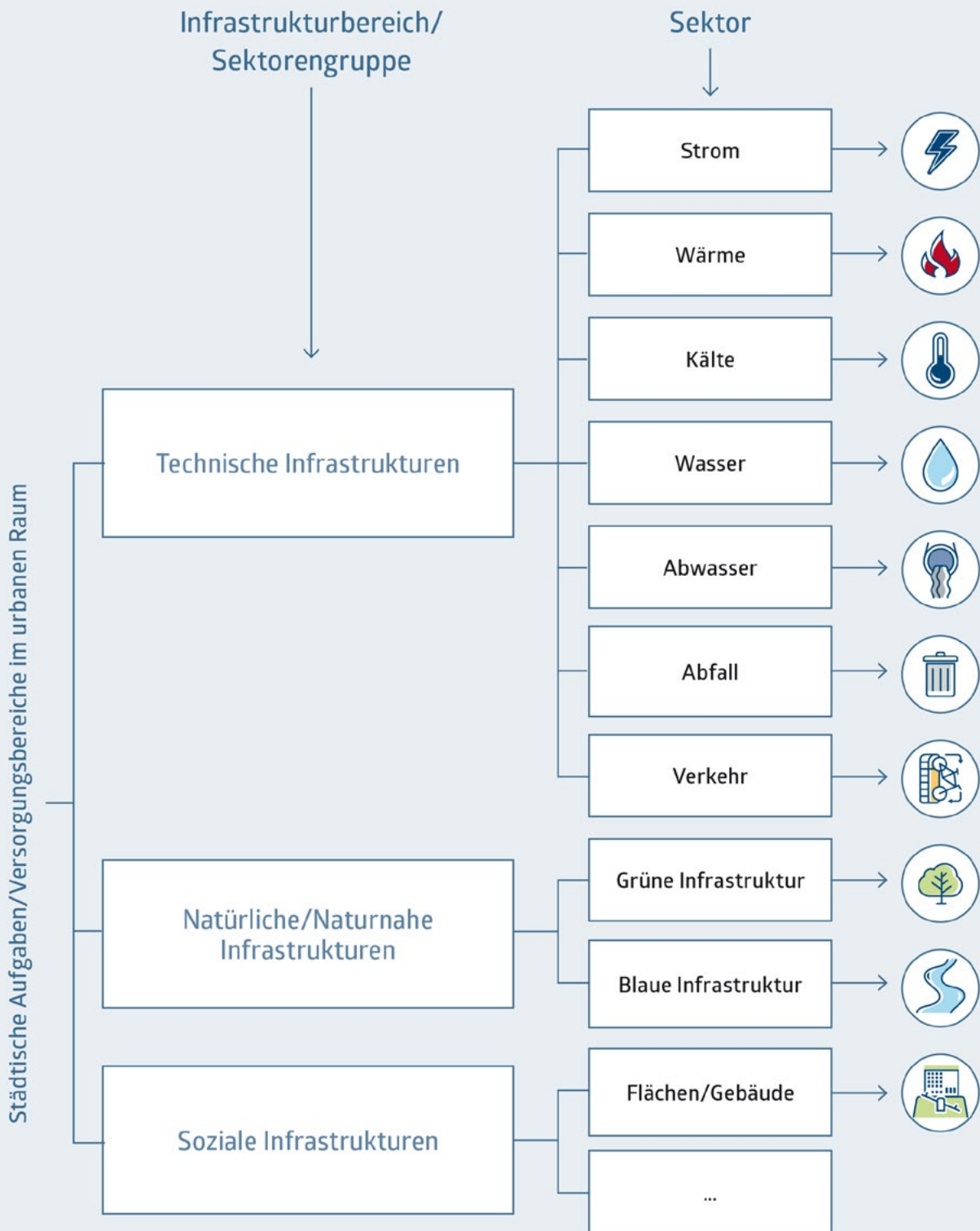


Abb. 3: Übersicht der Infrastrukturbereiche und Sektoren; eigene Darstellung

Die in Abbildung 3 dargestellten Sektoren werden im Folgenden kurz beschrieben, um Inhalt und Umfang des Sektors zu definieren:



Sektor Strom

umfasst alle Einrichtungen und Tätigkeiten, die für die Belieferung der Verbraucher mit elektrischer Energie (umgangssprachlich Strom oder Elektrizität) erforderlich sind. Die Elektrizitätsversorgung ist innerhalb der Energiewirtschaft Teil der Energieversorgung und beinhaltet die Erzeugung, den Transport und den Handel.



Sektor Wärme

umfasst alle Einrichtungen und Tätigkeiten, die für die Belieferung der Verbraucher mit thermischer Energie (umgangssprachlich Wärme oder Kälte) erforderlich sind, mit Schwerpunkt auf leitungsgebundenen Versorgungssystemen.



Sektor Kälte

umfasst alle Einrichtungen und Tätigkeiten, die für die Belieferung der Verbraucher mit thermischer Energie (umgangssprachlich Wärme oder Kälte) erforderlich sind, mit Schwerpunkt auf leitungsgebundenen Versorgungssystemen.



Sektor Verkehr

umfasst alle Arten zur Beförderung von Menschen und Waren. Jede Mobilitätsart verfügt dabei über unterschiedliche Infrastrukturen. Subsektoren wären in diesem Zusammenhang beispielsweise die Infrastrukturen im Flug-, Bahn-, S- & U-Bahn-, Straßenbahn- und Busverkehr. Ein weiterer Subsektor wäre der Straßenverkehr auf dem sich sowohl der individuelle als auch der öffentliche und der gewerbliche straßengebundene Nah- und Fernverkehr vollzieht.



Sektor Wasser

umfasst die öffentliche und nichtöffentliche Wasserversorgung (Gewinnung, Aufbereitung, Transport und Lieferung) von Trink- und Betriebswasser für die Bevölkerung und gewerblichen sowie sonstigen Einrichtungen.



Sektor Abwasser

umfasst die Ableitung, Behandlung und Bewirtschaftung von häuslichem und gewerblich/industriellem Schmutzwasser sowie von Niederschlagswasser.



Sektor Abfall

umfasst die Tätigkeiten und Aufgaben der Abfallwirtschaft, die mit dem Vermeiden, Verringern, Verwerten und Beseitigen von Abfällen zusammenhängen. Schwerpunktmäßig werden hier biologisch abbaubare Abfälle, im Wesentlichen aus der Biotonne, Garten- und Parkabfälle sowie der Klärschlamm aus der Abwasserbeseitigung betrachtet.



Sektor Grüne Infrastruktur

ist ein strategisch geplantes Netzwerk aus wertvollen natürlichen, naturnahen und gestalteten Flächen sowie weiteren Umweltelementen, die wichtige Ökosystemleistungen gewährleisten und zum Schutz der biologischen Vielfalt beitragen. Im städtischen Kontext können alle Arten von vegetationsgeprägten Flächen und Einzelelementen (urbane) grüne Infrastruktur sein oder werden, unabhängig von ihrer Nutzung und Entstehungsgeschichte oder von Eigentumsverhältnissen.



Sektor Blaue Infrastruktur

ist ein strategisch geplantes Netzwerk natürlicher und künstlicher Gewässer, das mit Blick auf die Bereitstellung eines breiten Spektrums an Ökosystemdienstleistungen angelegt und dementsprechend bewirtschaftet wird. Sie umfasst aquatische Ökosysteme (Flüsse, Seen etc.) und befindet sich sowohl in urbanen als auch in ländlichen Räumen.



Sektor Soziale Infrastruktur

umfasst im Rahmen dieser Handreichung die Flächen und Gebäude der Einrichtungen sozialer Infrastrukturen, die im Rahmen einer multifunktionalen Nutzung mit anderen Sektoren gekoppelt werden können. Als Beispiele können hier Spielplätze oder Stadtplätze genannt werden, die als temporäre Retentionsflächen dienen, um Starkregenereignisse puffern zu können.

3.2. Definition von Sektorenkopplung

Die verschiedenen Sektoren und ihre möglichen Kopplungen stehen in vielseitiger Wechselwirkung mit der Umwelt. Rohstoffe werden z. B. für die Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte genutzt. Flächen werden für den Bau von Anlagen, soziale Zwecke o. Ä. in Anspruch genommen. Ökosysteme oder andere natürliche Systeme, wie die Atmosphäre dienen der Aufnahme und dem Abbau entstandener Rest- und Schadstoffe. Die entstehenden Wechselwirkungen haben qualitative und quantitative Veränderung dieser sogenannten Naturvermögen zur Folge (Destatis 2019). Ziel der Sektorenkopplung sollte es sein, den Umweltnutzen zu steigern und Umweltbelastungen über die Dekarbonisierung hinaus zu reduzieren.

Der Begriff Sektorenkopplung ist ebenso wie der Begriff Sektor nicht klar definiert und findet dementsprechend unterschiedlich Anwendung. Laut Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung geht es um die Kopplung von (Teil-) Energiesystemen bzw. einen Übergang zwischen Energieformen mit dem Ziel der Dekarbonisierung (BMU 2016).

Analog zur zuvor beschriebenen Ergänzung der bisherigen Sektoren ist auch die Definition einer Sektorenkopplung entsprechend der Prozesse und Ressourcen neuer Sektoren zu erweitern. Die Kopplung verschiedener Sektoren ist über den Sektor Energie und das Ziel der Dekarbonisierung hinaus durch einen ganzheitlichen, systematischen Ansatz zu beschreiben. Im Rahmen dieser Handreichung wird die Sektorenkopplung wie folgt allgemeingültig definiert:

Definition Sektorenkopplung:
 Verknüpfung von Prozessen und Ressourcen zwischen zwei Sektoren oder innerhalb eines Sektors der technischen, natürlichen/naturnahen oder sozialen Infrastruktur mit dem Ziel der Effizienzsteigerung und Ressourceneinsparung

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, stellt dabei ein Sektor definitionsgemäß den **abgebenden bzw. anbietenden** Sektor und der zweite Sektor den **aufnehmenden bzw. nachfragenden** Sektor dar. Die folgende Grafik zeigt beispielhaft das Verständnis von anbietendem und aufnehmenden Sektor. Der anbietende Sektor Strom bietet elektrische Energie an, die der nachfragende Sektor Kälte dazu nutzt entsprechende thermische Energie bereitzustellen.

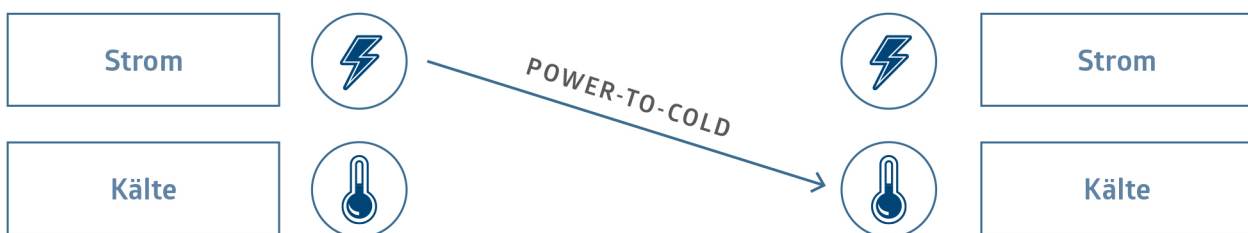


Abb. 4: Erläuterung der Definition Sektorenkopplung am Bsp. Strom, Kälte und Wärme; eigene Darstellung

Die abgegebenen bzw. angebotenen **Ressourcen** können beispielsweise

- Überschüsse (zum Beispiel Überschuss-Strom aus Erneuerbaren Energien) oder
- Nebenprodukte (zum Beispiel Abwärme aus industriellen Prozessen)

sein. Einige Sektoren (z. B. Abwasser, Abfall) dienen dem Erfassen, Ableiten und Entsorgen unerwünschter Stoffe. Ihr Nutzen besteht nicht in der Produktion eines Stoffes, sondern in dessen Entsorgung. Die Entsorgung kann im Rahmen einer Sektorenkopplung stattfinden oder durch diese obsolet werden. Entsprechend handelt es sich bei diesen Ressourcen weder um Überschüsse noch um Nebenprodukte.

3.3. Struktur von Sektorenkopplungen

3.3.1. Inter-/ Intra-sektoral, Technikausprägungen

Die Kopplung von Sektoren kann zwischen Prozessen desselben Sektors oder unterschiedlicher Sektoren erfolgen. Kopplungen zwischen Prozessen desselben Sektors werden als intrasektorale Kopplungen bezeichnet. Kopplungen zwischen Prozessen unterschiedlicher Sektoren sind intersektorale Kopplungen. Als Beispiel für eine intrasektorale Kopplung innerhalb des Sektors Wärme kann die Wärmerückgewinnung (WRG) genannt werden. Hier ist in einem Wärmeprozess, z. B. einer Trocknungsanlage für die Industrie noch viel, für den Industrieprozess nicht mehr nutzbare Wärme vorhanden, die für die Wärmeversorgung im Quartier genutzt wird. (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Intrasektorale Kopplung, Wärmerückgewinnung; eigene Darstellung



Abbildung 6: Intrasektorale Kopplung, Mobilstation; eigene Darstellung

Eine weitere intrasektorale Kopplung ist in der Abbildung 6 zu sehen. Die Mobilstation verbindet verschiedene Optionen der Fortbewegung. Beispielsweise kommt man mit dem Fahrrad zur Mobilstation und leiht sich hier ein Carsharing-Auto oder ein Lastenrad aus (vgl. Steckbrief Mobilstation in Band II).

Als Beispiel für eine intersektorale Kopplung kann die in der Abbildung 7 gezeigte Kopplung Power-to-Heat dienen. Überschüssiger Strom wird für die Erzeugung von Wärme genutzt (vgl. Steckbrief Power-to-Heat in Band II).

Eine Sektorenkopplung kann für gewöhnlich mithilfe unterschiedlicher Technologien realisiert werden. Diese stellen verschiedene Technikausprägungen einer Sektorenkopplung dar. Beispielsweise kann überschüssiger Strom aus Erneuerbaren Energien, der andernfalls abgeregelt werden müsste, nach dem Power-to-Heat Prinzip in Wärme umgewandelt werden. Die Umwandlung kann technologisch gesehen z. B. mit Heizstäben, Wärmepumpe oder Elektrodenkessel erreicht werden (TÜV Süd 2020).

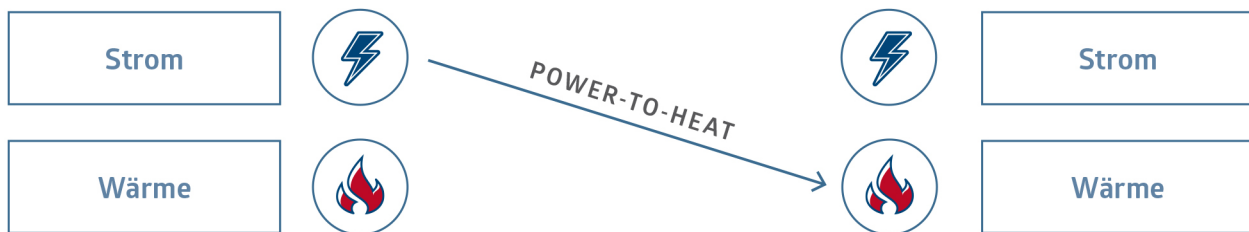


Abb. 7: Intersektorale Kopplung, Power-to-Heat; eigene Darstellung

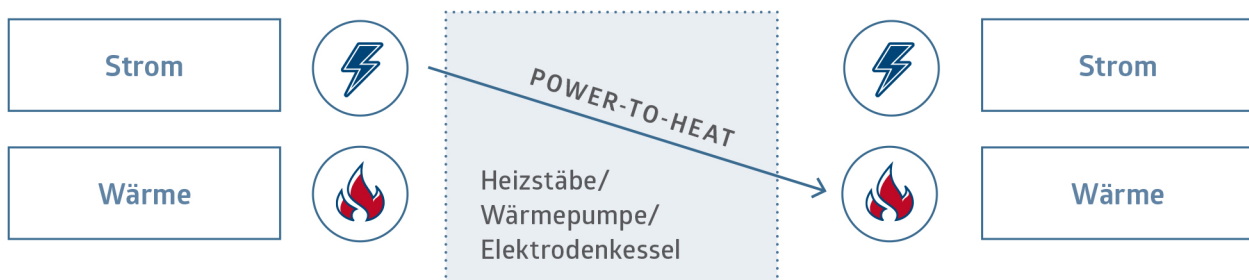


Abb. 8: Technikausprägungen am Beispiel der Sektorenkopplung Power-to-Heat; eigene Darstellung

3.3.2. Kopplungstyp

Primär

Sektorenkopplungen können sehr vielfältige Ausprägungen haben. Die direkteste Art sind primäre Kopplungen, in denen z. B. ein bisher ungenutztes Nebenprodukt eines Prozesses als Ressource für einen zweiten Prozess eingesetzt wird. Als Beispiel kann hier die Kraft-Wärme-Kopplung genannt werden, siehe Abbildung 9.

Sekundär und Tertiär

In einer sekundären Kopplung wird aufbauend auf der Funktion der Primärkopplung eine Ressource/Produkt in einem zweiten Prozess genutzt. Diese zweite Kopplung kann wiederum für einen dritten Prozess als Grundlage dienen. Beispiele hierfür sind Power-to-Gas,

Power-to-Liquid oder die in der Abbildung 10 gezeigte Tertiärkopplung. Hier wird das behandelte Grauwasser der blauen Infrastruktur zugeführt und zwischengespeichert (Retention). Durch das zusätzlich vorhandene Wasser können städtische Anlagen der grünen Infrastruktur bewässert werden. Hierdurch kann die Funktion der grünen Infrastruktur z. B. in Trockenphasen gewährleistet und eine erhöhte Verdunstungskühlung im Quartier erreicht werden.

Einen Überblick auf die verschiedenen Sektorenkopplungen gibt die Abbildung 11. Hier sind verschiedene Sektorenkopplungen bezugnehmend auf die Einordnung nach Primär-, Sekundär- oder Tertiärkopplung eingetragen. Es gilt: jeweils ein bisher nicht genutztes Nebenprodukt, dient als Angebot/Ressource für einen weiteren Nachfragesektor.



Abb. 9: Primärkopplung, Kraft-Wärme-Kopplung; eigene Darstellung

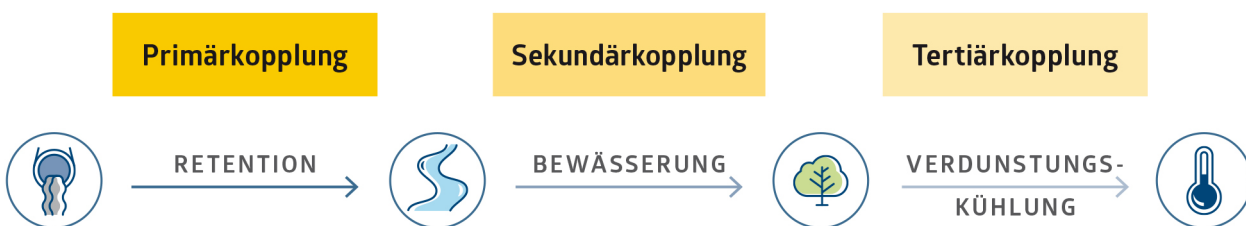


Abb. 10: Tertiärkopplung – Retention, Bewässerung und Verdunstungskühlung; eigene Darstellung

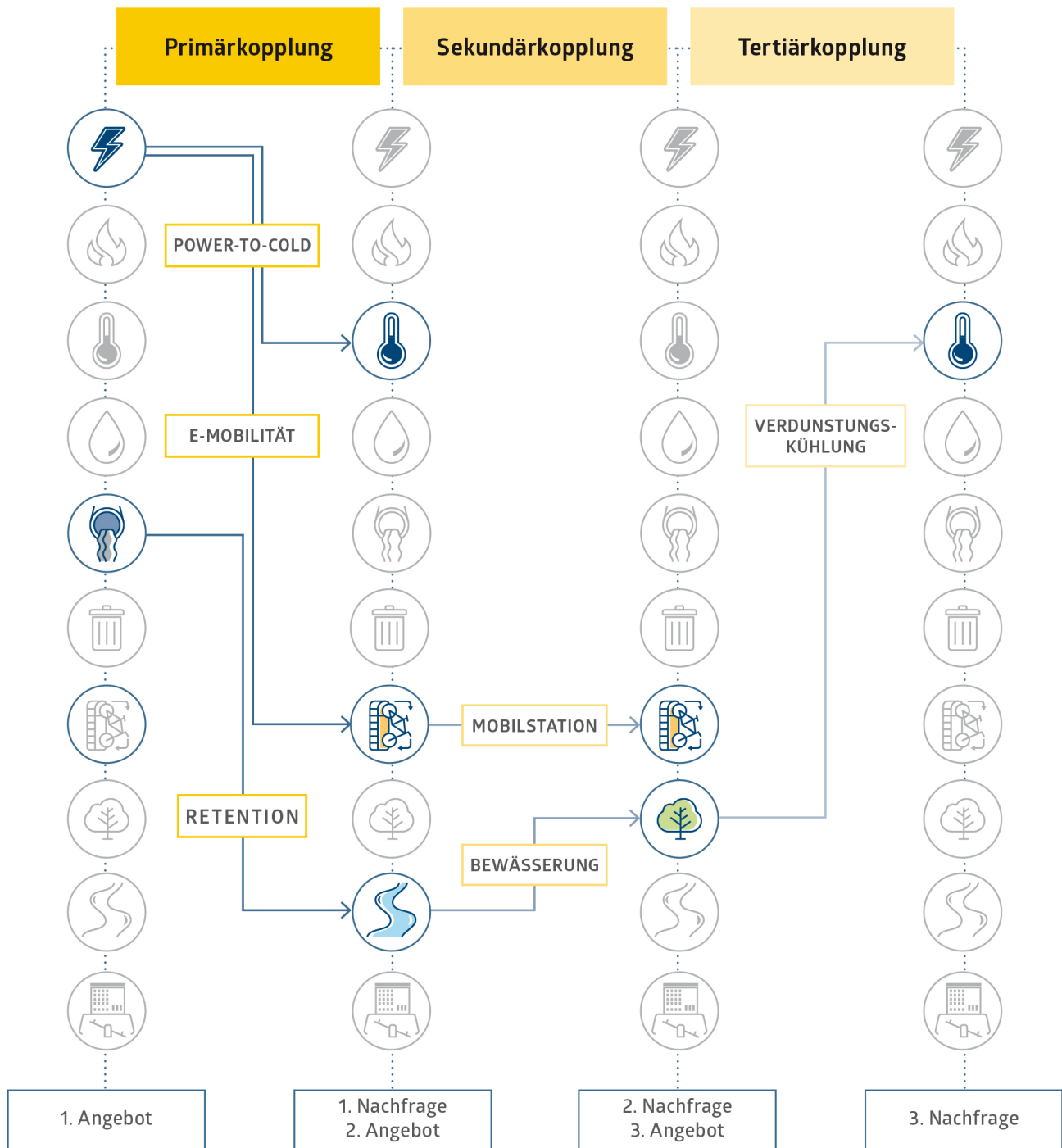


Abb. 11: Unterschiedliche Typen von Sektorenkopplungen; eigene Darstellung

Zusätzliche Effekte

Der Grundgedanke Sektorenkopplungen vorzunehmen besteht darin, Energie aus fossilen Energieträgern zu substituieren (Dekarbonisierung) und Ressourcen einzusparen. Die meisten Sektorenkopplungen haben darüber hinaus zusätzliche Effekte. Die Kraft-Wärme-Kopplung nutzt die bei der Stromerzeugung entstehende überschüssige Wärme für die Wärmeversorgung von Gebäuden. Die Nutzung der Abwärme ersetzt andere Energieträger, die nur der Wärmeerzeugung dienen. Bei der Betrachtung der in Abbildung 10 genannten Tertiärkopplung: Retention > Bewässerung > Verdunstungskühlung sind weitere Effekte ableitbar, die für die Bewertung der Sektorenkopplung von Bedeutung sind.

Das Wachstum der Pflanzen bewirkt den Entzug von CO₂ aus der Umgebungsluft und eine Speicherung in den Pflanzen. Die Pflanzen haben zudem Einfluss auf die Luftqualität, indem sie Feinstaub binden und durch ihre optischen und psychologischen Effekte wohltuend auf den Menschen wirken. Diese Effekte werden nicht als weitere Sektorenkopplungen eingestuft, weil sie nicht auf zuvor definierte Sektoren und Infrastruktursysteme wirken.



Abb. 12: Zusätzliche Effekte möglicher Sektorenkopplungen; eigene Darstellung

4. Etablierung und Bewertung von Sektorenkopplungen

4.1. Vorgehen zur Mobilisierung der Potentiale

Projekte unterschiedlicher Art können als Anlass für die Umsetzung einer Sektorenkopplung dienen. Um Sektorenkopplungsmöglichkeiten im Planungsprozess erkennen und entwickeln zu können, müssen Sektorenkopplungsoptionen neben herkömmlichen Lösungen von Beginn an in Betracht gezogen und diskutiert werden. Die Mobilisierung der Potentiale der Sektorenkopplung erfordert daher eine offene und aufmerksame Gestaltung des Planungsprozesses (vgl. Abb. 13). Mehr noch als herkömmliche Projekte involvieren Sektorenkopplungsprojekte Akteure verschiedener Fachrichtungen. Das Expertenwissen jeder Akteursgruppe kann dazu beitragen, Sektorenkopplungsmöglichkeiten zu identifizieren und kritisch zu hinterfragen. Sektorenkopplungsprojekte müssen daher im ständigen Austausch der Fachgruppen entwickelt werden. Ein iterativer Prozess kann erforderlich werden, wenn sich die gewählte Option im weiteren Planungsverlauf als ungeeignet erweist.

Das in Abbildung 13 gezeigte Ablaufschema in Anlehnung an DWA-A 100 (DWA 2006) bzw. DWA-A 272 (DWA 2014) beschreibt die Stufen des Planungsprozesses, gibt Hinweise zur Mobilisierung der Potentiale von Sektorenkopplungen und verweist auf jene Kapitel dieses Handbuchs, die beim jeweiligen Planungsschritt unterstützen können.

Ein entscheidender Schritt vor der Umsetzung ist die ganzheitliche, integrierte Bewertung sämtlicher Vor- und Nachteile, die durch die potentielle Sektorenkopplung auftreten können. In den Steckbriefen in Band II ist an verschiedenen Stellen ersichtlich, dass die Etablierung einer Sektorenkopplung nicht zwangsläufig zur Verbesserung bezüglich der CO₂-Bilanz, der Wirtschaftlichkeit und anderer Kriterien führt. Teilweise stellt sich sogar das Gegenteil ein (siehe Band II, Kapitel 2.1.1). Aus diesem Grund ist vor der Etablierung einer Sektorenkopplung dringend eine integrierte Bewertung in jedem Einzelfall durchzuführen.

4.2. Bewertungsrahmen

Die vergleichende Bewertung von Varianten der Sektorenkopplung erfordert einen identischen Bewertungsrahmen. Er umfasst den Bezugsraum, z. B.

- Stadtteil
- Stadt
- Region

und die „Externen Effekte“, in Form von externen Rahmenbedingungen wie z. B.

- Energiepreise
- verfügbare Technik
- institutionelle Einbindung
- Auswirkungen auf Dritte

Vor dem eigentlichen Bewertungsprozess müssen der Bezugsraum und die relevanten „Externen Effekte“ beschrieben werden.

Die Merkmale des Bezugsraums sowie die externen Rahmenbedingungen und die Bereiche hinsichtlich der Auswirkungen müssen in allen Varianten identisch sein, ansonsten sind die Ergebnisse der Bewertung nicht vergleichbar.

4.3. Bewertungsprozess

Eine „Integrierte Bewertung“ bezeichnet die sektorenübergreifende Vorgehensweise zur Bewertung von Handlungsalternativen. Die integrierte Bewertung von Sektorenkopplungen wird in 3 Phasen durchgeführt:

- **Phase 1: Identifikation** von relevanten Sektorenkopplungen durch ausgewählte Vertreter der relevanten Sektoren (Sektor-Experten)
- **Phase 2: Bewertung der Auswirkungen** der ausgewählten Sektorenkopplungen durch die „Sektor-Experten“ (1. Bewertungsrunde)
- **Phase 3: Konsensfindung** der Bewertung durch Rückkopplung (2. Bewertungsrunde)

Sektorenkopplungsmöglichkeiten im Planungsprozess erkennen und entwickeln	
Veranlassung	Verschiedene Veranlassungen möglich, z. B. Städtebauliches Rahmenkonzept oder Anpassungsmaßnahme innerhalb eines Infrastruktursektors (Energiekonzept, Anpassung des Überflutungsschutzes, Erneuerung der Abwasserinfrastruktur).
Aufgabenstellung formulieren	Aufgabenstellung möglichst offen und abstrakt formulieren. Entstehen Überschüsse, Abfallprodukte oder ist eine Mehrfachnutzung möglich?
Planungsraum abgrenzen	Dimensionen des Planungsraums erweitern. Gibt es andere kommunale Infrastrukturen oder private Einrichtungen, die über Bedarfe oder Angebote verfügen?
Grundlagen ermitteln	Welche Rahmenbedingungen bestehen im Planungsraum? Wo bestehen über den Sektor hinaus Bedarfe und Angebote? Hinweise können die Steckbriefe in Band II geben.
Bestand bewerten	Wie ist der Bestand wirtschaftlich und funktional zu bewerten? Wo können Strukturen so modifiziert werden, dass eine Sektorenkopplung möglich wird?
Bewertungsprozess	
(1) Identifikation	Bei welchen Maßnahmen findet eine Sektorenkopplung statt? Lösungsvarianten, die eine Sektorenkopplung beinhalten, können anhand der Steckbriefe in Band II ermittelt werden.
(2) (3) Bewertung Auswirkungen	Bewertung der Lösungsvarianten mithilfe des Delphi Verfahrens, um die Expertise aller Akteure mit einzubeziehen. Die Planung eines Sektorenkopplungsprojektes ist ein iterativer Prozess. Ergebnis des Bewertungsverfahrens kann sein, dass einer oder mehrere der vorangegangenen Schritte noch nicht ausreichend betrachtet wurden. Dann wird eine erneute Betrachtung der Planungsschritte erforderlich.
Vorzugsvariante auswählen	Auswahl der Vorzugsvariante auf Grundlage der Ergebnisse des Bewertungsprozesses
Vorplanung	
Anlagen bezogene Planung	
Bau und Betrieb	
Erfolgskontrolle	
 Austausch und Abstimmung der Akteure erforderlich	

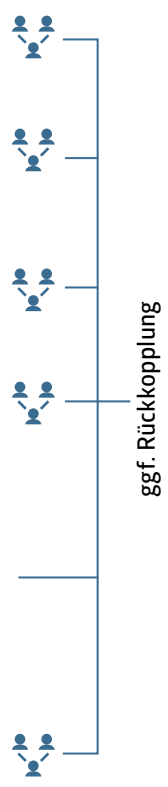


Abb. 13: Sektorenkopplungsmöglichkeiten im Planungsprozess erkennen und entwickeln; eigene Darstellung auf Basis von DWA 2014

Von entscheidender Bedeutung für einen erfolgreichen integrierten Bewertungsprozess sind

- eine sektorenübergreifend verständliche Aufbereitung der Informationen;
- die fokussierte Vorbereitung, Strukturierung und Durchführung des Bewertungsprozesses;
- eine sachgerechte Auswertung und Dokumentation von Zwischenergebnissen;
- die Darstellung und Begründung der Ergebnisse sowie intersektoraler Widersprüche und Konflikte.

Falls die integrierte Bewertung zu keinen eindeutigen oder widersprüchlichen Ergebnissen führt, muss ggf. eine weitere Bewertungsrunde angeschlossen werden. Möglicherweise erfordern immanente Widersprüche und Konflikte aber einen politischen Entscheidungsprozess. Insbesondere technische, wirtschaftliche, umweltseitige und qualitativ-städtebauliche Aspekte führen häufig zu formal nicht lösbaren Bewertungskonflikten.

Auf Grund der Komplexität und Interdisziplinarität des Themas empfiehlt es sich ein Delphi – Verfahren für die integrierte Bewertung von Sektorenkopplungen anzuwenden. Bei der Delphi-Methode handelt es sich um eine ExpertInnenbefragung in einem mehrstufigen qualitativen Bewertungsverfahren. Ziel der Delphi-Methode ist es, das Wissen mehrerer ExpertInnen zusammenzuführen und zu integrierten Aussagen zu kommen. Dies beruht zum Einen auf der Annahme, dass Fachleute für ihr Gebiet besonders fundierte Aussagen über die

Wirkungen möglicher Maßnahmen geben können. Zum Anderen wird vermutet, dass mehrere ExpertInnen/ Institutionen/Sektoren eine bessere Wirkungsprognose abgeben können als einzelne ExpertInnen/Institutionen/Sektoren (Häder 2014).

Der Vergleich verschiedener Alternativen kann in Form einer Nutzwert-Analyse (NWA) erfolgen, um die relative Qualität der Auswirkungen verschiedener Sektorenkopplungen zu bewerten.

Der Ablauf des Delphi-Verfahrens wird nachfolgend dargestellt (Abbildung 15) und beschrieben.

Ein ausgewählter Kreis von ExpertInnen (bzw. Institutionen oder Sektoren) erhält zunächst eine schriftliche Befragung. Im ersten Schritt gibt jeder Experte seine eigene Einschätzung ab. Wenn sich die Aussagen der ExpertInnen voneinander unterscheiden, werden die gesammelten Rückmeldungen allen ExpertInnen zur Verfügung gestellt, woraufhin sie ihre Aussagen möglicherweise anpassen können. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis das zuvor definierte Abbruchkriterium erreicht wird. Dies könnte sein, einen gemeinsamen Konsens zu finden oder eine gewisse Stabilität der ExpertInnenmeinungen zu erreichen (Häder 2014).

Für den Erfolg der Methode ist es entscheidend, dass die richtigen ExpertInnen/Institutionen/Sektoren ausgewählt werden. Die ExpertInnen/Institutionen/Sektoren sollten möglichst differenzierte Blickrichtungen auf die Fragestellungen abdecken.

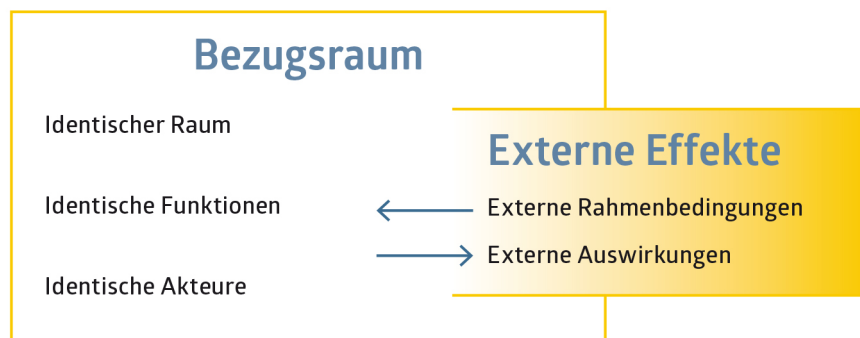


Abb. 14: Bewertungsrahmen der Sektorenkopplung; eigene Darstellung

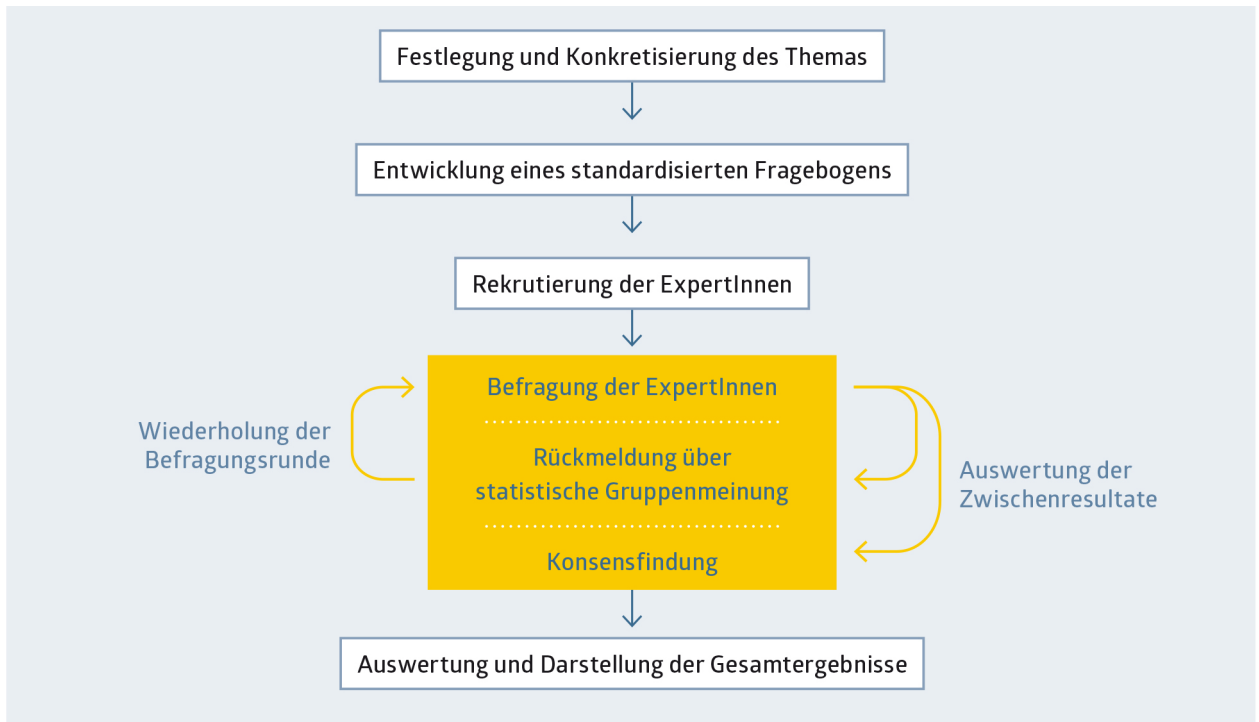


Abb. 15: Ablauf des Delphi-Verfahrens; eigene Darstellung auf Grundlage von Häder 2014

Bewertungskriterien

Im Folgenden werden mögliche Kategorien und die dazugehörigen Kriterien einer integrierten Bewertung beschrieben. Die aufgeführten Kriterien stellen eine Auswahl möglicher Aspekte dar, die für eine Bewertung herangezogen werden können.

Je nach Sektorenkopplung und Randbedingungen können diese Kriterien gekürzt oder erweitert werden.

In der **Kategorie Ökologie** werden die zwei Kriterien CO₂-Einsparpotential sowie Umweltwirkungen betrachtet.

– Das CO₂-Einsparpotential ist im Hintergrund der bis 2050 geforderten CO₂-Neutralität ein wichtiger Bewertungsaspekt. Die Emissionseinsparung der Sektorenkopplung kann anhand von in der Praxis gängigen Referenzprozessen abgeschätzt werden. Grundsätzlich gilt, dass die Minderung von Energie- und Ressourcenverbräuchen meist auch in einer Reduktion von Emissionen resultiert. Das

Einsparpotential hängt jedoch von vielen Faktoren ab (Wirkungsgrad, Referenzprozess) und ist anhand einer genau definierten Sektorenkopplung wesentlich exakter abzuschätzen, als für die allgemeine Sektorenkopplung. Um die Vergleichbarkeit der Prozesse zu wahren, sollte ein einheitlicher Bilanzierungsrahmen gewählt werden, der möglichst alle anfallenden Emissionen berücksichtigt. Bei den strombasierten Sektorenkopplungen betrifft dies vor allem die Herkunft des genutzten Stroms: Die Verwendung des Deutschen Strommixes kann zu erhöhten Emissionen im Vergleich zum Referenzprozess führen. Zusätzlich sollte die Einheit der CO₂-Emissionen einheitlich sein und nicht reine CO₂-Emissionen mit CO₂-Äquivalenten verglichen werden.

– Die **Umweltwirkungen** einer Sektorenkopplung können sowohl negative als auch positive Auswirkungen umfassen. Sofern zutreffend, werden ökologische und soziale Aspekte erfasst. Zu den ökologischen Umweltwirkungen zählen beispielsweise Abhängigkeiten von Seltenen Erden, Auswirkungen auf die Boden- und Wasserqualität

sowie die Biodiversität, aber auch der Einfluss auf die Luftqualität. Soziale Aspekte beinhalten zum Beispiel die Schaffung eines Mehrwertes für die Bevölkerung durch die Anlage einer Grünfläche.

Die **Kategorie Wirtschaft** umfasst die Wirtschaftlichkeit und Förderungsmöglichkeiten.

- Die **Wirtschaftlichkeit** einer Sektorenkopplung ist einerseits von den Investitions- und Betriebskosten und andererseits von den Erlösen bzw. Einsparungen, die generiert werden können, abhängig. Bei technischen Komponenten spielt ebenfalls die Nutzungsdauer eine Rolle, ab der ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. In diese Kategorie fallen auch Kosten, die aufgrund der Sektorenkopplung an anderer Stelle vermieden werden können. Zum Beispiel kann bei Realisierung eines Retentionsraumes auf die bauliche Erweiterung von Kanalabschnitten verzichtet werden oder die Gesundheitskosten können durch die Abschwächung von Hitzewellen durch Verdunstungskühlung sinken (Brasseur et al. 2017, S. 260–261).
- Das Kriterium **Förderungsmöglichkeiten** dient dazu, die momentane Förderlandschaft abzubilden. Während es für manche Sektorenkopplungen eine Vielzahl an konkreten Förderprogrammen gibt, existieren für andere nur Möglichkeiten über kommunale Träger eine Förderung zu erhalten. Eine Bewertung dieser Kategorie setzt eine Recherche nach aktuellen Förderprogrammen voraus. Auf Grund der relativen Schnelllebigkeit der Förderlandschaft tendiert dieses Kriterium zu einer hohen Ungenauigkeit.

In der **Kategorie Umsetzung** werden die technische Umsetzbarkeit sowie der planerische Aufwand berücksichtigt.

Anhand der beiden Kriterien kann der Aufwand bewertet werden, den die Umsetzung der Sektorenkopplung mit sich bringt. Auch hier können sich Unterschiede zur Bewertung einer realen Sektorenkopplung ergeben – vor allem, wenn bspw. Unternehmen und Planungsbüros mit Erfahrungen in den jeweiligen Bereichen akquiriert werden können.

- Die **technische Umsetzbarkeit** soll vor allem den Aufwand bewerten, der für die Sektorenkopplung betrieben werden muss. Sind beispielsweise viele Komponenten, die mit einer aufwendigen Steuerung bedient werden müssen, notwendig und ist die Sektorenkopplung aufgrund ihrer Komplexität fehleranfällig, so wird die Umsetzbarkeit als negativ (schwierig, aufwendig, kompliziert) bewertet. Dem gegenüber steht eine positive Bewertung, in der die Sektorenkopplung als anwenderfreundlich und einfach in der Umsetzung beschrieben wird.
- Der **planerische Aufwand** ist teilweise mit der technischen Umsetzbarkeit gekoppelt. Je komplizierter die Sektorenkopplung ist, desto höher ist meist auch der planerische Aufwand. Einerseits müssen viele Informationen eingeholt werden, um die Ausgangslage zu analysieren, und andererseits müssen bspw. viele Komponenten definiert und dimensioniert werden.

Die Bewertung der **Marktreife eines Konzeptes** kann sowohl der Kategorie Wirtschaft als auch der Kategorie Umsetzung zugeordnet werden. Sie wird einerseits durch die Anzahl an Umsetzungen (Beispielen) möglich und andererseits durch eine Analyse des Marktes. Neben einer seriellen Fertigung sind auch die angebotenen Leistungen eines Ingenieurbüros Indizien dafür, dass ein Konzept die Marktreife erlangt hat. Werden hingegen erst Pilotprojekte umgesetzt, kann mit einem erhöhten finanziellen und planerischen Aufwand gerechnet werden.

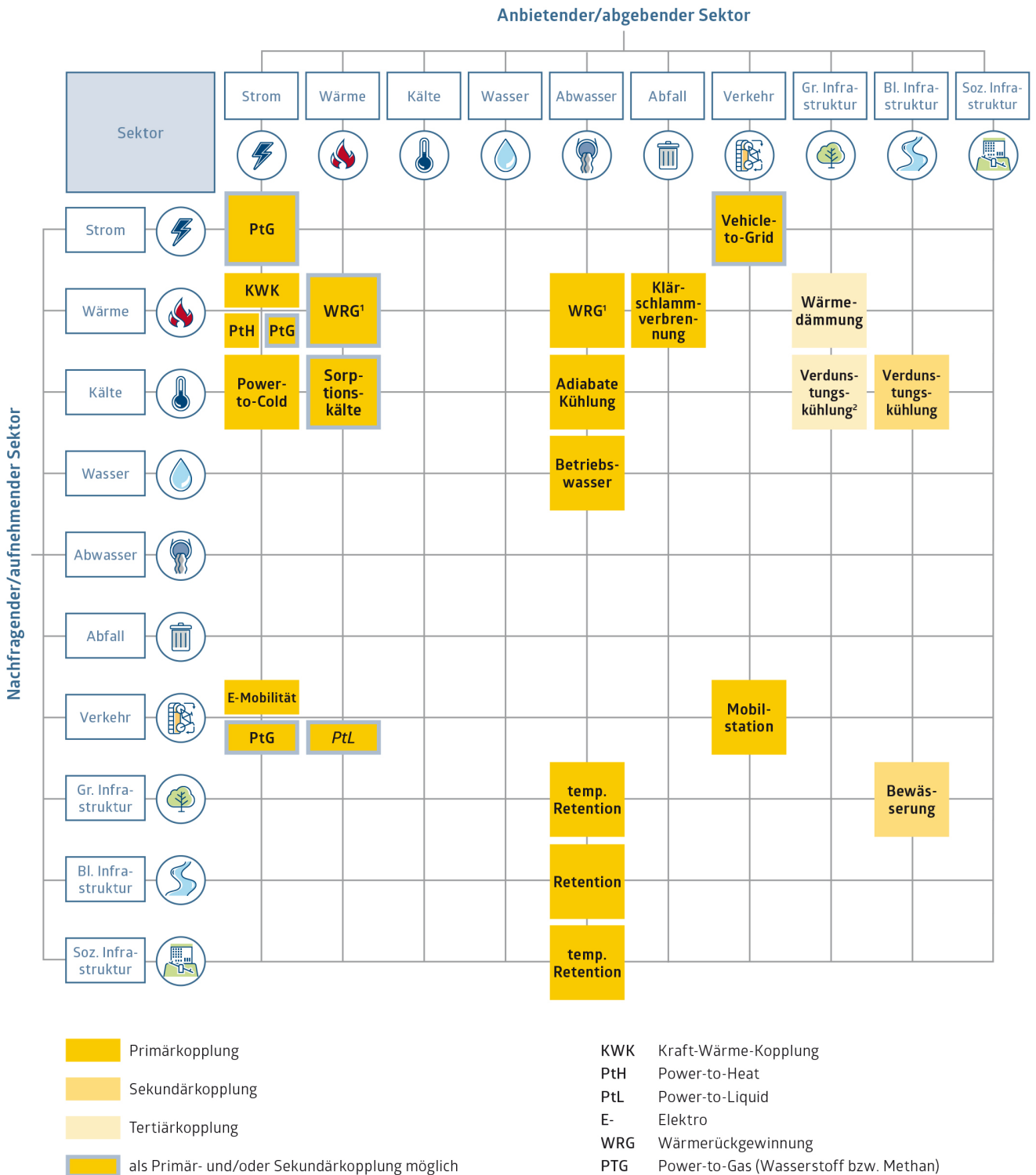
5. Beispiele der Sektorenkopplung

5.1. Übersicht

Die folgende Matrix zeigt mögliche Sektorenkopplungen auf Quartiersebene. Kopplungsprozesse innerhalb eines Hauses, wie bspw. Wärmerückgewinnung (WRG) in kleinem Maßstab sind nicht Bestandteil dieser Betrachtung. Die Matrix zeigt, welche Sektorenkopplungen zwischen anbietenden (bzw. abgebenden) und nachfragenden (bzw. aufnehmenden) Sektoren bestehen. Ob es sich dabei um eine Primär-, Sekundär- oder Tertiärkopplung handelt, wird anhand des Farbtons (dunkel-, mittel- oder hellgelb) verdeutlicht. Wenn die Sektorenkopplung sowohl als Primär-, als auch als Sekundärkopplung betrachtet werden kann, ist dies mit einem grauen Rahmen gekennzeichnet.

5.2. Kurzbeschreibungen

Für alle in der Matrix genannten Sektorenkopplungen folgen Kurzsteckbriefe. Die Sortierung erfolgt anhand der anbietenden/abgebenden Sektoren. Die unterschiedlichen Sektorenkopplungen werden jeweils in Kürze beschrieben und deren wesentlichen Potentiale dargestellt. Die ausführliche Beschreibung und Bewertung entsprechend der im Kapitel 4.2 Bewertungsrahmen genannten Kriterien finden Sie in Band II Steckbriefsammlung.



1 WRG aus Kanalnetz, häuslichem Grauwasser oder Industrie-/Gewerbebetrieb

2 Verdunstungskühlung permanent oder temporär

kursiv Technologie vorhanden, aber im kommunalen Bereich irrelevant

Abb. 16: Matrix zur Übersicht über die betrachteten Sektorenkopplungen; eigene Darstellung

5.2.1. Sektor Strom

Power-to-Heat

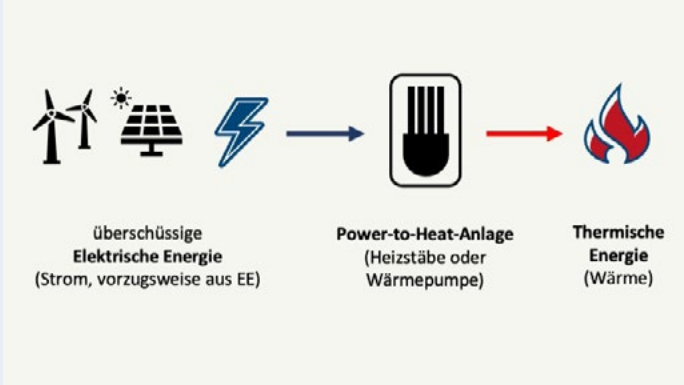


Abb. 17: Funktionsweise einer Power-To-Heat-Anlage; Lehrstuhl Stadttechnik

Mit Hilfe von Power-to-Heat (PtH) wird (regenerativer) Strom unter Nutzung von zum Beispiel Heizstäben oder Wärmepumpen in Wärme umgewandelt (Wietschel et al. 2019). Bei PtH-Anlagen handelt es sich idealerweise um einen Überschuss-Stromverbraucher, der ein flexibles Wärmeerzeugungssystem ergänzt (Agora Energiewende 2014) und somit angebotsorientiert genutzt werden kann. Die Wärmeerzeugung durch

Strom aus EE dient der Substitution fossiler Brennstoffe im Wärmesektor und reduziert somit die THG-Emissionen. Aufgrund der Wärmespeicher sowie der guten Regelbarkeit der Anlagen kann flexibel auf schwankende Strommengen im Stromnetz reagiert werden.

Sektorenkopplung	→	Strom – Wärme
Kopplungstyp	→	Primär

Power-to-Cold



Abb. 18: Hochleistungs-Eisspeicher im Container, mit Kapillarrohrmatte; BEKA Heiz- und Kühlmatten GmbH 2020

Mit Hilfe von Power-to-Cold (PtC) wird Strom direkt für die Kälteerzeugung genutzt, z. B. mittels Kompressionskältemaschinen (KKM). Bei PtC-Anlagen handelt es sich idealerweise um einen Überschuss-Stromverbraucher, der ein flexibles Kälteerzeugungssystem inkl. Kältespeicher ergänzt und somit angebotsorientiert genutzt werden kann. Diese Technologie stellt im Wesentlichen

keine Neuerung dar – Kälte wird in der Regel mit KKM erzeugt. Das Besondere daran ist die Kombination aus Lastmanagement, KKM und Kältespeicher, durch die eine Entkopplung von Kälteangebot und Kältenachfrage möglich ist. Die Technologie wird flexibel nutzbar und somit netzdienlich. Der Einsatz von Kältespeichern ermöglicht eine Flexibilisierung der Stromnachfrage und die Verlagerung der Kälteerzeugung in Zeiten, zu denen besonders viel (EE-) Strom erzeugt wird (Urbanek 2012). Kommt zudem vermehrt EE-Strom zum Einsatz, werden die THG-Emissionen im Kältesektor reduziert.

Sektorenkopplung	→	Strom – Kälte
Kopplungstyp	→	Primär

Kraft-Wärme-Kopplung

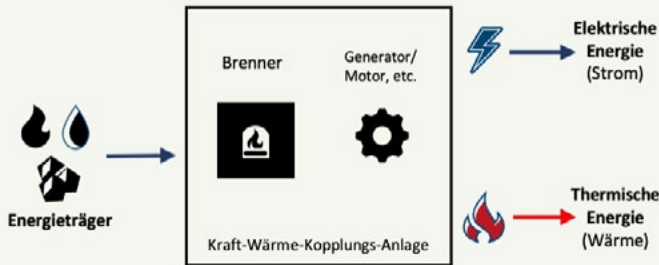


Abb. 19: Funktionsweise einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage; Lehrstuhl Stadttechnik

Mit Hilfe der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden elektrische (oder mechanische) und thermische Energie gleichzeitig erzeugt. Dies kann wärme- oder stromgeführt erfolgen. Während eine stromgeführte Betriebsweise auf eine bedarfsgerechte Stromerzeugung ausgelegt ist (Nebenprodukt: Wärme), ist die wärmegeführte Betriebsweise bezüglich des Wärmebedarfs optimiert (Nebenprodukt: Strom, derzeit übliche Betriebsweise)

(Wietschel et al. 2019). In Anbetracht des verstärkten Anteils EE an der Stromerzeugung, sollten KWK-Anlagen entsprechend einer am Strommarkt orientierten Betriebsweise ausgelegt und gefahren werden, damit der KWK-Strom nicht mit Strom aus EE-Anlagen konkurriert (Agora Energiewende 2019). Wärmespeicher können die zeitlichen Diskontinuitäten von Strom- und Wärmebedarfen regulieren. Die Verdrängung nicht gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung durch KWK-Anlagen führt zur Reduktion von THG-Emissionen sowie zu einer effizienten Nutzung von Primärenergieträgern. Die am Strommarkt orientierte Betriebsweise ermöglicht ein optimiertes Reagieren auf schwankende Stromeinspeisungen durch EE und erleichtert somit deren Integration in das Energiesystem.

Sektorenkopplung	→	Strom – Wärme
Kopplungstyp	→	Primär

E-Mobilität



Abb. 20: E-Auto mit Ladesäule; Foto: Stadtwerke Emden GmbH

Die hier betrachtete E-Mobilität umfasst elektrisch betriebene Batterie- und von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge, bei deren Nutzung es einer Strominfrastruktur bedarf. Eine Sektorenkopplung kommt zu Stande, wenn die Autos netzdienlich geladen werden können. Die Ladung der Fahrzeuge kann über eine externe Einzelsteuerung oder über einen Aggregator erfolgen, der mehrere Fahrzeuge steuert (Blasius 2016). Ladestationen

sind beispielsweise an Arbeits- oder Parkplätzen sinnvoll, da die Fahrzeuge tagsüber mit PV-Strom aufgeladen werden können. Der Einsatz von E-Autos verringert innerstädtische CO₂- und Schadstoffemissionen und führt somit zu einer besseren Luftqualität. Durch das intelligente Laden kann der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert und Netzengpässen entgegengewirkt werden. Besonders sinnvoll ist die Verwendung von E-Autos innerhalb moderner Mobilitätskonzepte, da so ihre Nutzung intensiviert wird und Stückzahlen reduziert werden können (siehe Mobilstation).

Sektorenkopplung	→	Strom – Verkehr
Kopplungstyp	→	Primär

Power-to-Gas (Wasserstoff)



Abb. 21: Elektrolyseanlage in Falkenhagen, Foto: Uniper

Power-to-Gas (PtG) wird als chemisches Energiespeichersystem beschrieben, das eine verlustarme Langzeitspeicherung von EE in Form von Gas (in diesem Steckbrief Wasserstoff (H₂)) darstellt (Sterner und Stadler 2017). Der Strom wird genutzt, um mittels Elektrolyse Wasser in H₂ und Sauerstoff zu spalten. H₂ kann gespeichert und anschließend bspw. über eine Brennstoffzelle in reiner Form genutzt oder als Beimischung in geringen Mengen

in das Erdgasnetz eingespeist werden. Die Langzeitspeicherung von Strom in Form von H₂ ermöglicht einen Ausgleich der saisonal und räumlich schwankenden Erzeugung aus EE. Der Strommarkt wird flexibilisiert. Zusätzlich ermöglicht die Technologie, dass Strom aus EE als Kraft- und Brennstoff in den Sektoren Wärme, Strom und Verkehr dienen kann. Bei Verwendung regenerativ erzeugten Stroms führt dies zu sinkenden THG-Emissionen sowie zu einer Einsparung von Primärenergieträgern.

Sektorenkopplung	→	Strom – Strom // Strom – Wärme // Strom – Verkehr
Kopplungstyp	→	Primär

Power-to-Gas (Methan)



Abb. 22: Power-to-Gas-Anlage mit Biologischer Methanisierung, Anlage Allendorf (Eder); Viessmann Werke

Power-to-Gas (PtG) wird als chemisches Energiespeichersystem beschrieben, das eine Langzeitspeicherung von EE in Form von Gas (in diesem Steckbrief Methan (CH₄)) darstellt (Sterner und Stadler 2017). Für die Herstellung synthetischen Methangases wird Wasserstoff (H₂) benötigt. Dieser kann durch Elektrolyse hergestellt (Primärkopplung, siehe Steckbrief PtG H₂) oder direkt als H₂ aus regenerativen Quellen bezogen werden

(Sekundärkopplung). Synthetisches Methan ist äquivalent zu fossilem Erdgas und kann als Austauschgas mit entsprechender Qualität ohne Beschränkungen in das Gasnetz eingespeist und in bestehenden Anlagen genutzt werden (Schenuit et al. 2016). Die Umwandlung von Strom aus EE in synthetisches Erdgas ermöglicht die Nutzung des Gasnetzes als Speicher, wodurch die Stromnetze entlastet werden können. Ein Ausgleich der saisonal und räumlich schwankenden Energieerzeugung aus EE ist möglich. Die Nutzung von regenerativ erzeugtem Erdgas in den Sektoren Wärme, Verkehr und Strom führt zu einer Substitution fossiler Energieträger und mindert die THG-Emissionen.

Sektorenkopplung	→	Strom – Strom // Strom – Wärme // Strom – Verkehr
Kopplungstyp	→	Primär und/oder sekundär

Power-to-Liquid



Abb. 23: Versuchsanlage zur Synthese von Kraftstoffen aus dem CO₂ der Luft; Langer 2019

Power-to-Liquid (PtL) wird als chemisches Energiespeichersystem beschrieben, das eine Langzeitspeicherung von EE in Form von flüssigen Energieträgern mit hoher Energiedichte (langkettige Kohlenwasserstoffe) darstellt. Zielprodukte von PtL können Methanol und Fischer-Tropsch-Synthese-Kraftstoffe (FTS; Benzin, Diesel u. a.) sein (Sternier und Stadler 2017). Für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe wird Wasserstoff (H₂)

benötigt. Dieser kann durch Elektrolyse hergestellt (Primärkopplung) oder direkt aus regenerativen Quellen bezogen werden (Sekundärkopplung). PtL wird vor allem für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt. Aufgrund der geringen Wirkungsgrade sowie der Existenz wesentlich effizienterer Möglichkeiten zur Emissionsminderung im Verkehrssektor auf kommunaler Ebene (Elektro- oder Wasserstoffmobilität, Mobilstationen), wird auf diese Technologie nur oberflächlich eingegangen.

Sektorenkopplung	→	Strom – Strom // Strom – Wärme // Strom – Verkehr
Kopplungstyp	→	Primär und/oder sekundär

5.2.2. Sektor Wärme

Wärmerückgewinnung

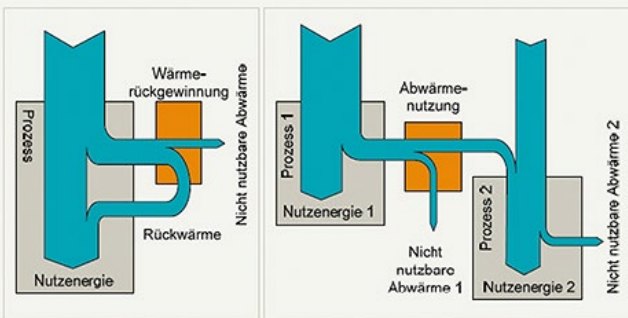


Abb. 24: Energieflussbild: Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung; Hirzel 2013

Bei der Produktion in der Industrie oder in Betrieben des GHD-Sektors fällt Wärme als Nebenprodukt an, die derzeit in vielen Fällen an die Umgebung abgegeben wird. Beispielsweise sind hier Fertigungsprozesse (BMWi 2019a), Kühlwasser aus Kälteanlagen und Kühlsystemen (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH 2019) sowie Rechenzentren (Pehnt et al. 2017) zu nennen. Je nach Temperaturniveau kann die abgeführte Wärme innerbetrieblich

zur Brauch- und Trinkwarmwassererwärmung verwendet; als Abwärme an benachbarte Abnehmer geliefert; oder in den Vor- oder Rücklauf eines Wärmenetzes eingespeist werden. Durch die Rückgewinnung von Wärme aus Prozessen können deren Wirkungsgrade erhöht werden. Die eingesetzten Energieträger werden effizienter eingesetzt und somit Ressourcen und CO₂-Emissionen eingespart.

Sektorenkopplung	→	Strom – Wärme // Kälte – Wärme // Abwasser – Wärme
Kopplungstyp	→	Primär und/oder sekundär

Sorptionskälte



Abb. 25: Absorptionskältemaschine;
RÜTGERS GmbH & Co. KG Kälte 2019

Durch den Prozess der Sorption kann mit Hilfe einer Sorptionskältemaschine (SKM) aus Wärme Kälte gewonnen werden (Henning 2015). Da Wärme als Antriebsenergie dient, wird weniger elektrische Energie für die Kälteerzeugung verwendet (Henning 2015). Als Wärmequelle kann das Fernwärmenetz oder andere Abwärmequellen mit einem Temperaturniveau von ca. 55-140 °C genutzt werden. Die Kälteerzeugung mittels SKM erlaubt

die Nutzung einer Antriebsenergie mit geringem Exergiegehalt – der wertvollere Strom (da in alle Energieformen umwandelbar) kann für andere Anwendungen verwendet werden. Hieraus resultiert ebenfalls eine Entlastung der Stromnetze, da die Kältelast von der Stromlast entkoppelt wird.

Sektorenkopplung	→	Wärme – Kälte
Kopplungstyp	→	Primär und/oder sekundär

5.2.3. Sektor Abwasser

Temporäre Retention von Niederschlagswasser auf Flächen der Grünen Infrastruktur



Abb. 26: Grasmulde und Retentionsbecken; Schöne Aussichten
Landschaftsarchitektur

Bei Starkregenereignissen treten in kurzer Zeit große Niederschlagsmengen auf (vgl. DWD 2019). Vor allem im urbanen Raum, in dem der Boden weitgehend versiegelt ist, reichen die Kanalisation und die verbleibende unversiegelte Fläche meist nicht aus, um das Regenwasser zeitnah vollständig aufzunehmen. Die Folgen sind Hochwasser und Überflutungen. Tiefliegende öffentliche Grünflächen, die im Alltag als Parkflächen oder Grünstreifen

dienen, können die anfallenden Wassermengen temporär aufnehmen und gedrosselt an die Kanalisation oder den Vorfluter abgeben (vgl. DWA 2013a). So bieten sie den Gebäuden, Infrastrukturen und Bewohnern Schutz vor Schäden durch Überflutungen und Hochwasser. Durch die Reduktion von Spitzenabflüssen schützen sie die Gewässer vor stofflichen und hydraulischen Stoßbelastungen und die Kläranlage vor Überlastung (vgl. DWA 2013a).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – Grüne Infrastruktur
Kopplungstyp	→	Primär

Temporäre Retention von Niederschlagswasser auf Flächen der Sozialen Infrastruktur



Abb. 27: Anlagen der sozialen Infrastruktur wie „Skatebowls“ können zur Retention genutzt werden; pixabay

Städtische Räume weisen eine hohe Dichte an Einwohnern, Funktionen und Infrastrukturen auf (Bläser et al. 2012, S. 14). Zahlreiche Nutzungen konkurrieren um die verfügbaren Flächen (BMUB 2017). Gleichzeitig muss gemäß § 1 Abs. 5 BauGB der Innenentwicklung Vorrang vor der Außenentwicklung eingeräumt werden. Für die Reduktion der Flächenkonkurrenz im urbanen Raum ist daher

eine Bündelung der Nutzungen sinnvoll (Benden et al. 2017, S. 19). Viele Flächen des öffentlichen Freiraums wie Spiel- oder Sportplätze sind Teil der sozialen Infrastruktur. Wenn diese Anlagen als tieferliegende Becken ausgebildet werden, können sie genutzt werden, um die im Rahmen von Starkregenereignissen anfallenden Wassermengen temporär aufzunehmen und das Niederschlagswasser gedrosselt an die Kanalisation oder den Vorfluter abzugeben (Benden et al. 2017, S. 19f.).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – Soziale Infrastruktur
Kopplungstyp	→	Primär

Retention von Niederschlagswasser auf Flächen der Blauen Infrastruktur



Abb. 28: Gewässer, wie der hier abgebildete Teich können der Retention von Niederschlagswasser dienen; pixabay

Öffentliche Wasserflächen besitzen einen hohen Erholungswert und können zur Aufwertung des öffentlichen Raums beitragen (Stiftung Die Grüne Stadt 2013). Daneben können naturnah oder künstlich gestaltete Wasserflächen im Falle eines Starkregenereignisses anfallende Wassermengen aufnehmen, speichern und für eine Folgenutzung verfügbar machen (DWA 2013a). Der Oberflächenabfluss umliegender Flächen wird zentral in einem

Gewässer gesammelt. Der Rückhalt des Oberflächenabflusses im Speicherbecken erlaubt die Schadstoffabscheidung durch Prozesse wie die Sedimentation und den biologischen Abbau der Verunreinigungen (OIEau 2015).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – Blaue Infrastruktur
Kopplungstyp	→	Primär

Betriebswasserbereitstellung



Abb. 29: Mögliche Quelle für Grauwasser ist das Wasser aus Handwaschbecken; pixabay

Für den Betrieb vieler wasserverbrauchender Einrichtungen in Haushalt, Industrie und Gewerbe ist keine Trinkwasserqualität erforderlich. Geringfügig verschmutztes Abwasser aus Badewanne und Dusche, Handwaschbecken und Waschmaschine, sogenanntes Grauwasser, kann als Betriebswasser für privat, öffentlich oder gewerblich genutzte Gebäude aufbereitet werden (DWA 2017). Dafür ist die Erfassung von Grauwasser in einem separaten Fassungs- und Ablaufsystem und die dezentrale mechanische, biologische und hygienische Aufbereitung erforderlich.

Während Trinkwasser energie- und ressourcenintensiv aufbereitet werden muss, benötigen Anlagen zur Grauwasseraufbereitung nur einen geringen Energieeinsatz von 1 bis 2 kWh pro m³ (FBR 2015/2016). Die Trinkwassereinsparung ermöglicht Kosteneinsparungen. In einem durchschnittlichen Vier-Personen-Haushalt können die Wasser- und Abwasserkosten nahezu halbiert werden (FBR 2009).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – Wasser
Kopplungstyp	→	Primär

Adiabate Kühlung mit Niederschlagswasser

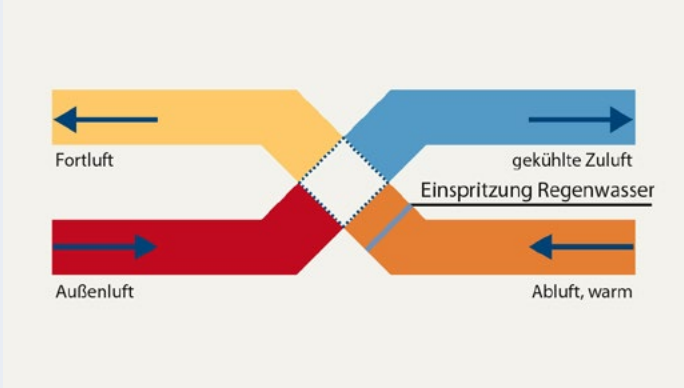


Abb. 30: Funktionsweise eines Kreuzstromwärmetauschers; eigene Darstellung

Wasser, das in einem abgeschlossenen System verdunstet, entzieht diesem System sensible (fühlbare) Wärme, sogenannte Verdunstungsenergie. Dadurch nimmt die Systemtemperatur ab. Anlagen zur adiabaten Kühlung machen sich dieses Prinzip zunutze. Bei der adiabaten Kühlung wird Wasser kontinuierlich in die Abluft gespritzt, welches verdunstet und der Abluft Wärme entzieht. Über einen Wärmeübertrager kann diese Kühlenergie

auf die Zuluft übertragen werden. Das Kühlpotential hängt von der Luftfeuchte der Abluft ab (Kerschberger 2012). Als Befeuchtungswasser kann alternativ zu Trinkwasser Regenwasser verwendet werden (Kerschberger 2012). Dieses besitzt nur eine geringe Leitfähigkeit (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010) und muss daher nicht für den Betrieb der Anlage entsalzt oder entkalkt werden. Dadurch wird im Vergleich zur adiabaten Kühlung mit Trinkwasser nur etwa halb so viel Wasser benötigt und kein Abwasser erzeugt (König 2017).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – Kälte
Kopplungstyp	→	Primär

Abwasserwärmerückgewinnung

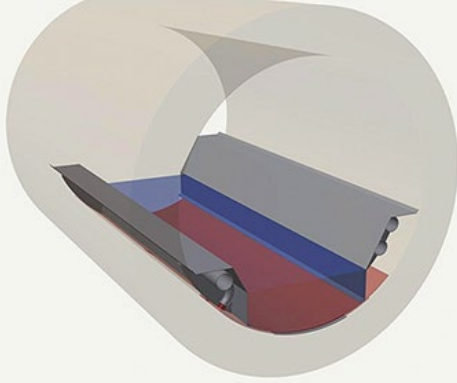


Abb. 31 Schema eines Kanalwärmetauschers; www.kasag.com

Fast ein Drittel des Gesamtenergiebedarfs in Deutschland werden für Warmwasser und Raumwärme benötigt (Stand 2017) (BMWi 2019b). Das verbrauchte Warmwasser verlässt das Gebäude mit einer Temperatur von ca. 23 °C (Wanner 2009) und weist in der Kanalisation selbst im Winter ein Temperaturniveau von mindestens 10 °C auf (DWA 2018, S.5). Die thermische Energie des Abwassers kann mithilfe von Wärmepumpen für den Wärmebedarf angrenzender Abnehmer verfügbar gemacht werden (DWA 2018, S. 20). Schätzungen zufolge würde das Angebot an Abwasserwärme ausreichen, um etwa 10 % aller Gebäude in Deutschland zu beheizen (DWA 2013b). Auf diese Weise könnte der Anteil fossiler Energieträger an der Wärmeerzeugung und damit einhergehende CO₂-Emissionen reduziert werden (Hamann 2015). Auf lokaler Ebene könnte die Emissionen von Schadstoffen aus Heizungsanlagen vermindert (DWA 2018, S. 59) und die thermische Gewässerbelastung durch erwärmtes Abwasser gesenkt werden (DWA 2013b).

Sektorkopplung	————>	Abwasser – Wärme
Kopplungstyp	————>	Primär

5.2.4. Sektor Abfall

Wärme aus Klärschlammmonoverbrennung



Abb. 32: Falltürme dienen der Faulgasgewinnung und Stabilisierung des Klärschlamm; pixabay

In Deutschland fallen im Jahr (Stand 2016) fast 1,8 Millionen Tonnen Klärschlamm an (Roskosch und Heidecke 2018). Der größte Teil wird über Klärschlammverbrennungsanlagen entsorgt (eurostat 2015). Der Klärschlamm kann in bestehenden Kraftwerken mitverbrannt oder selbstgängig in Monoverbrennungsanlagen verbrannt werden. Heutzutage richtet sich der Fokus dabei auf die energetischen und stofflichen Potentiale

des Klärschlamm. Der Heizwert von getrockneten Klärschlamm ist mit 10.000 bis 12.000 kJ/kg vergleichbar mit dem Heizwert von Braunkohle (Roskosch und Heidecke 2018). Wenn der Klärschlamm zuvor mit Abwärme, beispielsweise aus Industrieprozessen, getrocknet wurde, kann die Wärme, die im Verbrennungsprozess erzeugt wird, unter geeigneten Rahmenbedingungen in das örtliche Fernwärmenetz eingespeist werden.

Sektorkopplung	————>	Abfall – Wärme
Kopplungstyp	————>	Primär

5.2.5. Sektor Verkehr

Mobilstation

Abb. 33: Ausgestaltung einer Mobilstation als Modulsystem; Zukunftsnetz Mobilität NRW 2017

Eine Mobilstation ist die „sichtbare Ausprägung eines multimodalen Mobilitätskonzeptes“ (BBSR 2015). Verschiedene Verkehrsmittel werden an einem Ort konzentriert und der Wechsel zwischen ihnen vereinfacht. „Neben [Car-] Sharing-Angeboten [werden] auch ein qualitativ hochwertige[r] ÖPNV [...] und gute Netzwerke für Fußgänger und Radfahrer“ geboten (Pfertner 2017). Der Umsteigeknoten stellt einen Treffpunkt und Wartebereich dar, sowie verschiedene Informations- und Serviceleistungen zur Verfügung (Pfertner 2017). Eine effiziente Verknüpfung der Komponenten verbessert die Attraktivität und somit die Auslastung des verkehrlichen Gesamtsystems (Jansen et al. 2015). Durch gute Anbindung und Platzierung kann die Mobilstation den Umweltverbund stärken und zu einem Modal Shift führen. Neben der Substitution privater Pkw-Fahrten, können Flächen für soziale Funktionen gewonnen und die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum somit gesteigert werden.

Sektorenkopplung	→	Verkehr – Verkehr
Kopplungstyp	→	Primär

Vehicle-to-Grid

Abb. 34: Funktionsweise Vehicle-to-Grid; Lehrstuhl Stadttechnik

Private Autos werden im Durchschnitt täglich ca. 9 % der Zeit genutzt – daraus resultiert eine Stillstandszeit von ca. 22 Stunden pro Tag (Blasius 2016). Vehicle-to-Grid (VtG) ist ein Konzept, das sich diesen Umstand zu Nutze macht. Während des Parkens werden E-Autos geladen. Bei Strombedarf jedoch stellen die rückspeisefähigen E-Autos dem Stromnetz Strom zur Verfügung (Kempton und Tomić 2005) und gleichen die schwankende Einspeisung der EE aus. VtG stellt eine Erweiterung der E-Mobilität mit intelligentem Lastmanagement dar, denn beim bidirektionalen Laden fungiert das Fahrzeug zusätzlich als Stromspeicher. Momentan wird dieses Konzept erforscht und erprobt. Fahrzeughersteller verweigern das bidirektionale Laden bzw. den dafür notwendigen Zugriff auf die fahrzeuginterne Batterie, um einer frühzeitigen Alterung vorzubeugen (Sternner und Stadler 2017), da sich Gewährleistungsfragen ergeben würden. Durch VtG könnte eine netzverträgliche Integration von EE durch mobile Speicherkapazitäten erfolgen.

Sektorenkopplung	→	Strom – Verkehr – Strom
Kopplungstyp	→	Primär/Sekundär

5.2.6. Sektor Grüne Infrastruktur

Verdunstungskühlung durch Vegetation



Abb. 35: Stadtbäume tragen zur Verdunstungskühlung durch Transpiration bei; pixabay

Die Flächenversiegelung und der Rückgang der Vegetation im urbanen Raum bewirken aufgrund der Reduktion von Evapotranspiration und Boden-albedo einen lokalen Temperaturanstieg. Die Temperatur kann zeitweise bis zu 15 °C höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten liegen (Urbane Hitzeinsel – Effekt) (Santamouris 2013). Dies erhöht den Kühlungsbedarfs durch Klimaanlageanlagen und stellt eine Belastung für die Gesundheit und

das Wohlbefinden der Stadtbewohner dar (WHO Regional Office for Europe 2013). Grüne Infrastrukturen können durch die Verdunstung und die Verschattung von Pflanzenoberflächen eine Absenkung der Temperatur im Außenraum bewirken. Verschiedene, standortspezifische Studien zeigen, dass die Außenraumtemperatur um bis zu 8 °C reduziert werden kann (vgl. Lai et al. 2019). So sinkt auch der Kühlungsbedarf im Innenraum. Darüber hinaus können die Systeme zur Reduktion von Schadstoffen und Lärm beitragen (vgl. Menke et al. 2013).

Sektorenkopplung	→	Grüne Infrastruktur – Kälte
Kopplungstyp	→	Sekundär

Wärmedämmung von Gebäuden durch Bauwerksbegrünung



Abb. 36: Sukkulente dienen der extensiven Begrünung von Gründächern; pixabay

Der gebäuderelevante Endenergieverbrauch für Raumwärme und Raumkühlung entspricht in Deutschland etwa einem Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs (Umweltbundesamt 2019). Der Energiebedarf für die Gebäudekühlung wird zukünftig vor allem aufgrund zunehmender Durchdringungsraten weiter ansteigen (Bettgenhäuser et al. 2011). Dach- und Fassadenbegrünungen können durch die Verdunstung, die Verschattung und

die Wärmekapazität von Vegetation und Substrat das Klima im Gebäudeinneren beeinflussen und so helfen, den gebäuderelevanten Endenergieverbrauch für Raumwärme und Raumkühlung zu reduzieren. Sie können sich im Sommer kühlend und im Winter isolierend auf das Gebäudeinnere auswirken und Temperaturschwankungen dämpfen.

Sektorenkopplung	→	Grüne Infrastruktur – Wärme/Kälte
Kopplungstyp	→	Sekundär

5.2.7. Sektor Blaue Infrastruktur

Verdunstungskühlung durch offene Wasserflächen



Abb. 37: Künstliche Becken im urbanen Umfeld verbessern das Mikroklima durch Verdunstungskühlung; pixabay

Die Flächenversiegelung und der Rückgang der Vegetation im urbanen Raum bewirken aufgrund der Reduktion von Evapotranspiration und Bodenalbedo einen lokalen Temperaturanstieg. Die Temperatur kann zeitweise bis zu 15 °C höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten liegen (Urbane Hitzeinsel – Effekt) (Santamouris 2013). Dies stellt eine Belastung für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Stadtbewohner dar (WHO Regional

Office for Europe 2013). Verschiedene, standortspezifische Studien zeigen, dass die Außenraumtemperatur um bis zu 8 °C reduziert werden kann (Lai et al. 2019). Darüber hinaus können die Systeme zur Reduktion von Schadstoffen und Lärm beitragen (Menke et al. 2013).

Sektorenkopplung	→	Blaue Infrastruktur – Kälte
Kopplungstyp	→	Sekundär

Bewässerung öffentlicher Grünflächen mit Niederschlagswasser



Abb. 38: Sprinklerbewässerung; pixabay

In niederschlagsarmen Monaten kann eine ergänzende, künstliche Bewässerung öffentlicher Grünanlagen erforderlich werden. Die Anforderungen an die Wasserqualität zur Bewässerung von Grünanlagen unterscheiden sich von den Anforderungen, die in vielen Bereichen des häuslichen Gebrauchs gestellt werden (DIN 19650). Anstatt das ressourcen- und energieintensiv aufbereitete Trinkwasser zu verwenden, kann der Bewässerungsbedarf durch Niederschlagswasser aus niederschlagsreichen Zeiten gedeckt werden. Eine rein mechanische Aufbereitung, ggf. gekoppelt mit naturnahen Aufbereitungsprozessen innerhalb eines Speicherbeckens (auszubilden z. B. als Gewässer innerhalb der Blauen Infrastruktur) reicht in der Regel aus, um den Anforderungen zur Bewässerung zu genügen. Substituiert die Bewässerung mit Regenwasser die Bewässerung mit Trinkwasser, wird eine entsprechende Trinkwassereinsparung erreicht. Da Regenwasser in der Regel weicher als Trinkwasser ist, ist es darüber hinaus besser für die Bewässerung geeignet (Umweltbundesamt 2016).

Sektorenkopplung	→	Abwasser – (Blaue Infrastruktur) – Grüne Infrastruktur
Kopplungstyp	→	Sekundär

5.3. Abschätzung der Potentiale

Auf Grundlage der allgemeinen Steckbriefe (siehe Band II) wurde eine Abschätzung der generellen Potentiale von Sektorkopplungen vorgenommen. Hierbei wurden die in Kapitel 4.3. beschriebenen Kategorien und entsprechenden Kriterien CO₂-Einsparpotential, Wirtschaftlichkeit, technische Umsetzung, planerischer Aufwand, Marktreife des Konzeptes, Umweltwirkungen und Förderungsmöglichkeiten berücksichtigt. Die Bewertung erfolgt in Form von Ampelfarben (siehe Legende) und kann anhand der Nummern, die auf die zugeordneten Steckbriefkategorien verweisen, nachvollzogen werden.

Bei einer konkreten, anwendungsbezogenen Sektorkopplung können sich andere Einstufungen ergeben, da die Kriterien stark von den jeweilig real existierenden Randbedingungen abhängen. Können beispielsweise vorhandene Gebäudestrukturen zur Unterbringung von Speichern genutzt werden, kann die Wirtschaftlichkeit der Sektorkopplung Power-to-Heat steigen.

Zusätzlich unterliegen die Kriterien dem Einfluss der Zeit. Eine heutige Einschätzung zur Marktreife einer Sektorkopplung kann sich innerhalb eines kurzen Zeitraumes ändern. Die Potentialmatrix ist daher nicht in allen Aspekten als eine allgemeingültige zu verstehen, sondern kann vielfach nur eine Momentaufnahme darstellen und zur generellen Orientierung dienen.

5.3.1. Transformation

Die kommunalen Infrastrukturen befinden sich im Wandel. Auslöser des Umbruchs sind die altersbedingte Notwendigkeit zur Erneuerung bestehender Infrastruktursysteme, die Verfügbarkeit neuer Technologien und der demografische Wandel. Zudem erfordern der vielerorts resultierende Kostendruck aufgrund hoher Fixkosten und schließlich der Klimawandel und seine Konsequenzen für den urbanen Raum sowie die zunehmende Verknappung von Ressourcen entsprechende Veränderungen. Bei der Transformation der kommunalen Infrastrukturen handelt es sich um einen langwierigen Prozess, mit dem Unsicherheiten und Instabilität einhergehen. Welche Systemstrukturen sich am Ende dieses Prozesses etablieren werden, ist noch unklar.

Durch Sektorkopplungen kann der Transformationsprozess gestaltet und zu einer Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz beigetragen werden. Unter bestimmten Umständen können Sektorkopplungen jedoch bestehende Strukturen festigen und die Transformation behindern. Das hängt davon ab, zu welchem Zeitpunkt die Sektorkopplung umgesetzt wird, und welche Entwicklungen sich parallel vollziehen. Werden im Rahmen der Sektorkopplung bereits vorhandene Ressourcen und Strukturen genutzt, steigert dies die Nachfrage nach eben diesen. Ist die Umstellung auf neue Ressourcen oder Strukturen noch nicht erfolgt, werden stattdessen bestehende Systeme gefestigt.

Das Ergebnis der Potentialanalyse einer Sektorkopplung hängt daher maßgeblich davon ab, in welchem Stadium der Transformation sich die betroffenen Sektoren befinden. Um dies zu verdeutlichen, werden die Herausforderungen bei der Transformation von Strukturen und Ressourcen nachfolgend beispielhaft für den Abwasser- und den Stromsektor beschrieben.

Transformation im Abwassersektor

Die Nutzung von Abwärme stellt, neben der Nutzung erneuerbarer Energien, einen wichtigen Beitrag der Sektorkopplung zum Klimaschutz dar. Im urbanen Raum ist das Abwasser mit ganzjährig hohen Temperaturen (das häusliche Abwasser verlässt das Gebäude mit ca. 23 °C) eine wertvolle Abwärmequelle (Wanner 2009). Die Rückgewinnung der Wärme aus Abwasser ist an verschiedenen Punkten möglich. Sie kann bereits im Gebäude, innerhalb des Kanalnetzes oder in der Kläranlage erfolgen. Findet die Abwasserwärmrückgewinnung im Kanal statt, können Wärmetauscher im Bypass zum Kanal gebaut oder in den Kanal integriert werden. Die Investitionskosten für die Anlagen zur Wärmerückgewinnung sind hoch. Damit sich die Abwasserwärmenutzung gegenüber fossilen Heizungssystemen als lohnenswert erweist, ist eine lange Nutzungsdauer erforderlich. Das bedeutet, dass nicht nur der Wärmetauscher, sondern auch der Kanal, in dem dieser installiert wurde, entsprechend lange weiter genutzt werden muss. Damit handelt es sich auch um eine Investition in die bestehende Infrastruktur. Die Umstellung auf ein neues Entwässerungssystem ist erschwert.

Transformation im Stromsektor

Strombasierte Sektorenkopplungen sind für die Realisierung einer vollständig regenerativen Energie- und Rohstoffversorgung notwendig (Purr et al. 2016, S. 8). Durch die Umwandlung elektrischer Energie in bspw. thermische Energie oder Wasserstoff können auch die Sektoren Wärme und Verkehr CO₂-arm versorgt werden. Damit Emissions- und Ressourceneinsparpotentiale gehoben werden können, müssen die Anlagen der Sektorenkopplung allerdings mit CO₂-armem Strom aus erneuerbaren Energien (EE) betrieben werden.

Mit jeder Umwandlung und Speicherung von Strom gehen Verluste einher, die bei einer direkten elektrischen Nutzung vermieden werden. Daher sollte nur Strom umgewandelt werden, der nicht direkt genutzt werden kann, aber trotzdem durch EE-Anlagen zur Verfügung gestellt wird, so genannter Überschuss-Strom.

Die ausschließliche Nutzung von EE-Stromüberschüssen für Anwendungen der Sektorenkopplung steht in der Kritik. Die benötigten Anlagen sind meist kapitalintensiv und könnten „eine Nutzung auch fossilen Stroms wirtschaftlich notwendig machen, da Überschuss-Strom aus Wind- und PV-Anlagen zu geringe Nutzungsstunden aufweisen würde“ (Wietschel et al. 2019, S. 50). Dem stimmt auch das Umweltbundesamt (UBA) zu und befürchtet: „Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen würde der Betrieb „großtechnischer Anlagen [...] zu einer höheren Auslastung der konventionellen Stromerzeugung und zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit fossiler Kraftwerke führen“ (Purr et al. 2016, S. 4). Die aus Strom erzeugten Brenn-, Roh- und Kraftstoffe wären in erheblichem Maße mit CO₂ belastet (Purr et al. 2016, S. 4).

Das UBA vertritt die Position, ein Umbau von der fossilen zu einer regenerativen Energieversorgung über alle Sektoren hinweg mache strombasierte Sektorenkopplungstechnologien notwendig (Purr et al. 2016, S. 8).

Überschuss-Strom

Der Anteil EE an der Stromerzeugung betrug im Jahr 2017 33 % (Icha 2019, S. 19). Einen tatsächlichen EE-Stromüberschuss gibt es also nicht, denn dafür wäre ein Anteil der EE von über 100 % nötig. Jedoch kann EE-Strom zeitweise nicht zu den direkten Verbrauchern transportiert werden, da die Stromnetzkapazität nicht ausreicht. Um die Netzstabilität zu gewährleisten muss dieser EE-Strom lokal abgeregelt werden. Die Überschuss-Strommenge ist in Deutschland jedoch derzeit gering (Purr et al. 2016, S. 49) und beschränkt sich vor allem auf Regionen in Nord- und Ostdeutschland. Mit fortschreitendem Netzausbau werden die EE-Überschüsse weiter sinken (Blockheizkraftwerks-Träger und Betreibergesellschaft mbH Berlin 2018, S. 13).

Sie werden in Zukunft dabei helfen, die Sektoren zu verzahnen und schwankende Energiemengen auszugleichen, ohne dass auf fossile Energieträger zurückgegriffen werden muss. Daher ist es sinnvoll, zum jetzigen Zeitpunkt eine Infrastruktur aufzubauen, die erneuerbare Energien integriert. Um einen Betrieb mit regenerativem Strom zu gewährleisten, empfiehlt das UBA bei strombasierten Sektorenkopplungen einen parallelen Ausbau der EE-Kapazitäten umzusetzen (Purr et al. 2016, S. 15). Eine vollumfängliche Dekarbonisierung der Sektoren mit Hilfe synthetischer Brennstoffe kann „nur im Zusammenhang mit zusätzlichen Investitionen in EE-Anlagen gedacht werden“ (Agora Energiewende 2018, S. 18).

Die Verwendung lokal überschüssigen Stroms wird derzeit im Rahmen des Förderprogramms SINTEG (Schau-fenster intelligente Energie) des BMWI in verschiedenen Projekten erforscht (WindNODE, NEW 4.0).

In Band II wird durch die Bezeichnung Überschuss-Strom aus EE auf diese momentane Problematik im Transformationsprozess des Energiesystems verwiesen.

Bewertungsgegenstand		Bewertungskriterium							
Anbietender/ abgebender Sektor	Sektorekopplung	CO ₂ -Einspar- potential	Wirtschaftlichkeit	Technische Umsetzung	Planerischer Aufwand	Marktreife des Konzeptes	Umwelt- wirkungen	Förderungs- möglichkeiten	
Strom									
	Power-to-Heat	0	+	+	0	+		+	
		10	11; 15	6	7; 15	13; 15		12	
	Power-to-Cold	0	+	+	-	0		0	
		4; 10	11	6	7	13		12	
	Kraft-Wärme-Kopplung	+	+	+	0	+	0	+	
		10; 15	10	6	9	13	15	12	
	E-Mobilität	+	0	0		0	0	+	
		9; 10	11	5; 7		13	8; 10	12	
	Power-to-Gas (Wasserstoff)	0	-	0		0	0	0	
		10	11	6; 7		13	8; 17	9; 12	
	Power-to-Gas (Methan)	0	-	-	-	0	0	0	
		10	11	5	6; 7	13	8; 17	9; 12	
	Wärme								
		Wärmerückgewinnung	+	0	+	0	+		+
11			11; 15	6; 7	7; 15	13		12	
Sorptionskälte		0	0	0	0	+	+	0	
	10	11	6; 7	7	13	8	12		
Abwasser									
	Temporäre Retention (Grüne Infrastruktur)	0	+	+	0	+	0	0	
		10	4;11;12	7	9	6	7; 16	12	
	Temporäre Retention (Soziale Infrastruktur)		+	+	0	+	+	0	
			4;10-12	13	9	13	4	12	
	Retention (Blaue Infrastruktur)	0	+	0	0	+	+	+	
		10	4; 11	7	9	13	16	12	
	Betriebswasserbereitstellung		+	+	+	+	+	-	
			10; 11	13	0	0; 13	4	12	
	Adiabate Kühlung	+	+	+	0	+	+	+	
		4	10	6	6; 7; 8	13	10	12	
	Abwasserwärme- Rückgewinnung	+	0	0	0	+	0	+	
		4; 10	11	7	6; 7	13	4; 7	12	
Abfall									
	Klärschlammverwertung	+	0	0	0	+	0	-	
		10	4;11	0;7	5;7;9	0;6	14	12	

Bewertungsgegenstand		Bewertungskriterium						
Anbietender/ abgebender Sektor	Sektorenkopplung	CO ₂ -Einspar- potential	Wirtschaftlichkeit	Technische Umsetzung	Planerischer Aufwand	Marktreife des Konzeptes	Umwelt- wirkungen	Förderungs- möglichkeiten
Verkehr								
	Mobilstation	+ 10	+ 11	+ 6	- 5; 6; 7	0 13	+ 0; 4	+ 12
	Vehicle-to-Grid	+ 11	+ 6	- 6	- 7	- 6; 7		
Grüne Infrastruktur								
	Verdunstungskühlung	0 10		0 6; 7	0 6; 7	- 9; 13	+ 4; 15	0 12
	Wärmedämmung	0 11; 12	0 10; 11	+ 6; 7	0 6; 7	+ 7; 14	+ 15	0 12
Blaue Infrastruktur								
	Verdunstungskühlung			0 6; 7	0 6; 7	0 9	+ 4; 15	0 12
	Bewässerung	+ 4	0 4; 11; 12	0 6; 7	0 6; 7	0 16	+ 15	0 12

Tabelle 1: Potentialmatrix möglicher Sektorenkopplungen; eigene Darstellung

- Die Sektorenkopplung besitzt einen positiven Effekt bezüglich des Bewertungskriteriums. Beispiele sind: hohe Einsparpotentiale, leichte und unkomplizierte technische Umsetzung, ein geringer planerischer Aufwand etc.
- Es ist unter Umständen möglich, dass die Sektorenkopplung positive Effekte bezüglich des Bewertungskriteriums aufweist. Die Voraussetzungen dafür sind jedoch essenziell, so dass keine allgemeine Aussage möglich ist.
- Es sind keine positiven Effekte bezüglich des Bewertungskriteriums zu erwarten. Es ist sogar möglich, dass zum Beispiel mehr CO₂ emittiert wird als durch Nutzung eines Referenzprozesses.
- Der Einsatz der Sektorenkopplung hat keinen Einfluss auf das Bewertungskriterium.
- Derzeit stehen keine ausreichenden Informationen zur Verfügung, um eine Abschätzung hinsichtlich des Kriteriums durchzuführen. Es besteht Forschungsbedarf.

Hintergrund der Einstufung, Referenz zum jeweiligen Steckbriefabschnitt:

- | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------|
| 0 Beschreibung | 4 Ziele | 9 Effizienz (Mobilstation: Organisation) | 13 Beispiele |
| 1 Kopplungstyp | 5 Voraussetzungen im urbanen Kontext | 10 Einsparpotentiale (Emissionen und Primärenergie) | 14 Weitere Kopplungsoptionen |
| 2 Sektoren | 6 Komponenten | 11 Kosten | 15 Ergänzende Hinweise |
| 3 Eingesetzte Ressourcen | 7 Technische Voraussetzungen | 12 Förderungsmöglichkeiten | 16 Hinweise in Kästen |
| | 8 Voraussetzungen für Nachhaltigkeit | | |

6. Anwendungsbeispiele und Szenarien



Abb. 39: Das Planungsgebiet Äußere Oststadt in der Landeshauptstadt Erfurt, westlich angrenzend die Altstadt, südlich davon der Erfurter Hauptbahnhof; Landeshauptstadt Erfurt 2015

Im Folgenden werden einige Anwendungsbeispiele der zuvor beschriebenen Sektorenkopplungen für zwei Modellgebiete unterschiedlicher Beschaffenheit vorgestellt. Beim ersten Fallbeispiel (Kapitel 6.1) handelt es sich um die Äußere Oststadt, ein städtisches Entwicklungsgebiet im Osten Erfurts. Ausgangspunkt für die Entwicklung der Sektorenkopplungen bilden Energiekonzept und städtebauliches Rahmenkonzept der Äußeren Oststadt. Das zweite Fallbeispiel (Kapitel 6.2) behandelt die Region Mittelhessen, eine von drei Planungsregionen Hessens bestehend aus fünf Landkreisen. Motivation für die Entwicklung von Sektorenkopplungen ist hier die Verwertung des Klärschlammes in Folge veränderter regulatorischer Rahmenbedingungen.

6.1. Fallbeispiel Erfurt – Äußere Oststadt

6.1.1. Beschreibung des Modellgebietes

Das Modellgebiet in Erfurt ist das städtebauliche Entwicklungsareal „Äußere Oststadt“, ein Teilgebiet der sog. Erfurter „Krämpfervorstadt“. Es handelt sich um die letzte große zusammenhängende Fläche die es erlaubt, innenstadtnah eine umfassende städtebauliche Neuordnung und eine bauliche Entwicklung in der Größenordnung eines Stadtteiles mit ca. 2.000 WE zu vollziehen.

Aus diesem Grund wird dem Gebiet eine große Bedeutung für die Entwicklung der Landeshauptstadt Thüringens beigemessen.

Das Gebiet wird derzeit gewerblich-industriell genutzt und ist von Brachflächen geprägt. Im integrierten städtebaulichen Rahmenkonzept Äußere Oststadt (Landeshauptstadt Erfurt 2015) werden Wege und Maßnahmen aufgezeigt, wie in den kommenden 10 bis 15 Jahren ein Innenstadtquartier mit vielfältigen Funktionen und Nutzungsstrukturen entstehen soll. Mit der Konversion des Gebietes bietet sich die Chance, technische Ver- und Entsorgungssysteme mit dem Gebäudeneubau aufeinander abgestimmt zu entwickeln. Aufgrund der Größe des Areals ist eine schrittweise Umsetzung vorgesehen. Es sind insgesamt 5 Teilquartiere (siehe Abbildung 40) mit zeitlich unterschiedlichen Umsetzungsperspektiven vorgesehen. In der ICE-City (Süden) entlang der Gleisanlagen überwiegen Gewerbe- und Büronutzungen.

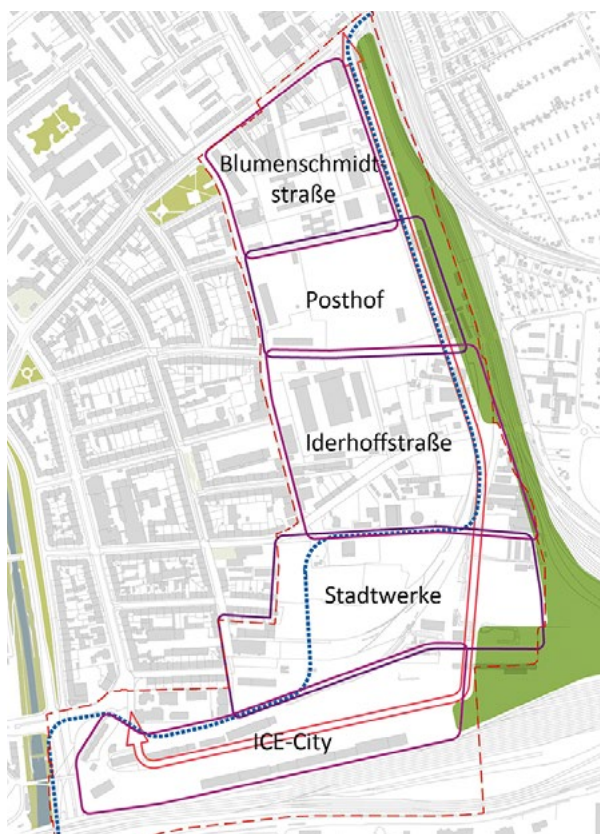


Abb. 40A: Teilquartiere des integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015

Ein großflächiges Parkhaus ist geplant. In den übrigen Teilquartieren sollen im Schwerpunkt Wohnnutzungen, öffentliche Gebäude und kleinere Gewerbeeinheiten entstehen. Die Rahmenplanung sieht eine städtebauliche Neustrukturierung mit erheblichen Neubaumassen sowie umfangreiche verkehrliche und infrastrukturelle Erschließungsplanungen vor. Vorhandene Bestandsbauten wurden in der Konzeption berücksichtigt und stärken den Charakter des Gebietes.

Die langfristige, in Teilabschnitten ausgerichtete Rahmenplanung stellt an die Versorgungsinfrastruktur gleichsam die Herausforderung, bestehende sowie neue Versorgungsnetze und Anlagen zu integrieren. Der Ausbau ist an den Baufortschritt und somit der wachsenden Nachfrage in den einzelnen Quartieren anzupassen. Die Integration erneuerbarer Energiequellen in das Erschließungskonzept ist obligatorisch.



Abb. 40B: Städtebauliches Strukturkonzept des Integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015

Förderliche Ausgangsbedingungen hierfür finden sich im sogenannten „Erfurter Energiemodell“ wieder. Das strategische Versorgungskonzept der Stadtwerke Erfurt Energie GmbH sorgt für Wärme und Strom im Stadtgebiet Erfurt. Integriert sind neben einer Gas- und Dampfturbinenanlage bereits mehrere Komponenten zur regenerativen Erzeugung von Wärme und Strom sowie zur temporären Speicherung und Regulierung von Versorgungsspitzen. Das Grundgerüst zur Verteilung der Wärme bildet ein Fernwärmenetz, welches bereits heute Teile des Untersuchungsgebietes in der Oststadt versorgt.

6.1.2. Modellgebietsbezogene Sektorenkopplungen

Sektorenkopplung Abwasser/Wärme



Für die durch die städtebaulichen Rahmenplanung Äußere Oststadt vorgegebenen Entwicklungen sind zunächst die Bedarfe für die Strom- und Wärmeversorgung ermittelt worden. In einem zweiten Schritt wurden die vorhandenen Infrastrukturen und energetische Potentiale am Standort identifiziert.

Zur wärmeseitigen Versorgung kann dabei auf die im Modellgebiet vorhandenen Infrastrukturen Fernwärme (KWK auf Erdgasbasis) und ein Erdgasnetz zurückgegriffen werden. Die Untersuchungen ergaben veritable, bisher ungenutzte Energiepotentiale, z. B. in Form von ganzjährig verfügbarer gewerblicher Abwärme in einem Großwäschereibetrieb im Quartier. Das Abwasser des Betriebes muss vor der Einleitung in die öffentliche Kanalisation zwingend abgekühlt werden. Das jährliche Energiepotential wurde mit ca. 1.125 MWh bilanziert und

zur Wärmeversorgung des zukünftigen Quartiers herangezogen. Sektorenkopplungen sind kein „Allheilmittel“ und lassen sich sehr gut mit Anlagen zur Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen ergänzen. Oft entsteht ein effektives Versorgungskonzept erst in Kombination von Sektorenkopplung mit Anlagen zur erneuerbaren Energiegewinnung. Im Beispiel Erfurt wird das Wärmepotential der Wäscherei durch großflächige Solarthermie-Module auf den nicht zur Bebauung geeigneten Freiflächen (Randflächen zu Bahnanlagen) ergänzt. Letztere können in Verbindung mit einem Speichermedium, saisonal vor allem die Warmwasserbedarfe abdecken.

Modellhafte Berechnungen ergaben Effizienzvorteile durch die Kopplung der im Gebiet vorhandenen Sektoren Abwasser und Wärme. Die notwendige technische Umsetzung der Nutzung dieser Potentiale wurde in Szenarien untersucht und bewertet. Im Ergebnis der Erprobung mehrerer Versorgungsszenarien konnte der Energiebedarf (Heizwärme und Trinkwassererwärmung) im Modellgebiet bis zu 17% (knapp 4.000 MWh/a) aus Abwärme und bis zu 33% aus Sonneneinstrahlung gedeckt werden.

Technisches Konzept:

Die Wärmeversorgung erfolgt auf Niedertemperaturniveau. Die ganzjährigen Abwärmepotentiale der Großwäscherei werden durch Wärmetauscher, die im Abkühlbecken installiert werden, entnommen und über eine gasbetriebene Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau gehoben. Ergänzt wird das Wärmepotential durch die saisonal erzielbaren Erträge der solarthermischen Großanlage. Ein Pufferspeicher dient der Regulierung der Versorgungs- und Nachfragespitzen.

Durch das Kopplungskonzept und den Einsatz erneuerbarer Energien können in der Summe ca. 50% der herkömmlichen Fernwärmeversorgung, die auch weiterhin das Grundgerüst der Wärmeversorgung darstellt, kompensiert werden. Die Gesamteinsparung an CO₂ gegenüber einer Versorgung mit ausschließlich ortsüblicher Fernwärme beträgt bis zu 1.173 Tonnen pro Jahr (Gesamtpotential inkl. der damit einhergehenden Einsparungen im Stromsektor). Allein durch die Sektorenkopplung von Fernwärme mit der Abwärme der Wäscherei (Abbildung 41) können für das Entwicklungsquartier „Äußere Oststadt“ in Erfurt folgende Einsparungen erzielt werden:

- Reduktion Brennstoffeinsatz: -3.975 MWh/a
- Reduktion der CO₂-Emission: -336 t/a

Die wirtschaftliche Tragfähigkeit dieses Konzeptes ist durch die benötigten technischen Mehraufwendungen allerdings an eine Förderung des Gesamtprojektes (Unrentierlichkeit ca. 40%) gekoppelt. Grundvoraussetzung für die Finanzierung ist, dass die Wäscherei langfristig durchgehend Abwärme am Standort liefert.

Der Anteil der durch Sektorenkopplung eingesparten Ressourcen beträgt knapp 4.000 MWh/a Brennstoffeinsatz und ca. 340 Tonnen CO₂-Emissionen.

Die kommunalen Stadtwerke Erfurt streben mit der Stadtverwaltung die Umsetzung der aus dem Forschungsvorhaben hervorgegangenen technischen Handlungsoptionen zur sektorengekoppelten Wärme- und Stromversorgung im Modellgebiet „Äußere Oststadt“ an. Um die Effizienzvorteile weit möglichst auszuschöpfen, ist die konsequente Mitwirkung der zukünftigen InvestorInnen und NutzerInnen im Quartier erforderlich. Das Projekt stellt entsprechende technisch-bauliche Anforderungen an Gebäude, welche rechtzeitig potentiellen BauherrInnen benannt werden müssen. Dies erfordert, dass entsprechende bau- und planungsrechtliche Vorgaben vor dem Verkauf der Flächen in der Bauleitplanung und ggf. Regelungen in Form von städtebaurechtlichen Verträgen verankert werden. Bezüglich der Wärmeversorgung sind Modifikationen in der Fernwärmesatzung auf Basis einer Niedertemperatur Fernwärme Versorgung festzuschreiben. Diese institutionell und fachlich übergreifenden komplexen Herausforderungen bedürfen einer strukturierten Abstimmung und Koordinierung. In einem Anschlussvorhaben werden diese Vorgänge wissenschaftlich begleitet und eine sektorengekoppelte Versorgungsstrategie bis zur Umsetzungsreife weiterentwickelt. Durch den ganzheitlichen Betrachtungsansatz wird gewährleistet, dass konkrete, praxisrelevante Erkenntnisse für alle Beteiligten gewonnen werden.

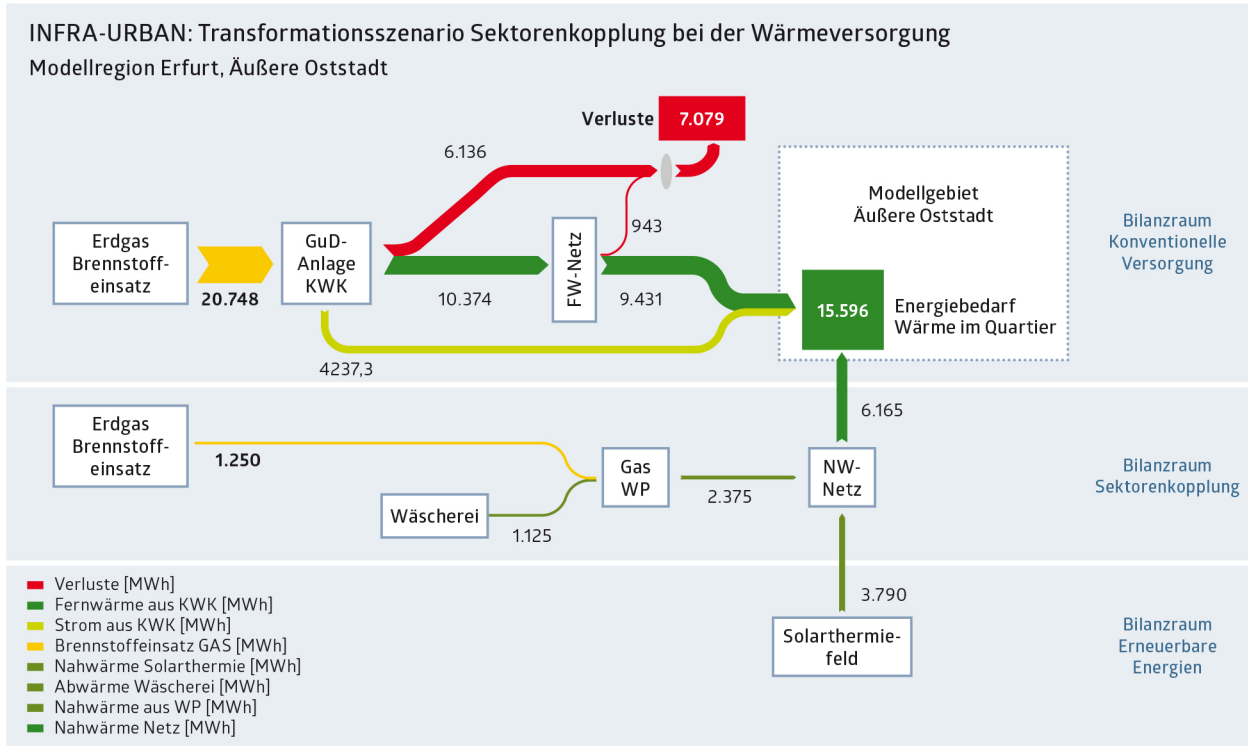


Abb. 41: Energieflussbild der Wärmeversorgung bei der Kopplung der Sektoren Abwasser und Wärme. Weitere Bestandteile sind solarthermische Anlagen und das Bestandsgasnetz; eigene Darstellung

Sektorenkopplung Abwasser/ Grüne und Blaue Infrastruktur



Die Stadt Erfurt verfügt über einen Generalentwässerungsplan, der eine höchstmögliche Entlastung für die Gewässer der Stadt anstrebt. Ziel ist es, die Gewässer vor Verschmutzung zu schützen und in ihrem Zustand zu verbessern (Lindner et al. 2006). Zu diesem Zweck wurden im Stadtgebiet in den letzten Jahren zahlreiche Regenrückhaltebecken und -kanäle gebaut. Diese Anlagen halten das Regenwasser zurück und geben es gedrosselt an den Vorfluter ab. Damit unterstützen sie neben dem qualitativen Schutz der Gewässer den Schutz vor Hochwasser und Überflutung infolge von Starkregenereignissen. Die verheerenden Folgen von Unwettern wie am 17. Mai 2013, das bis zu sechs Stunden dauerte, Niederschlagshöhen von bis zu 47 mm erreichte und von einem 18-tägigen Hochwasser mit

einem Pegel von 1,82 m gefolgt wurde, können so reduziert werden (Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, 2020).

In den dicht besiedelten Innenstadtgebieten ist der Platz für diese technischen Anlagen knapp bemessen. Die Retention seltener, extremer Starkregenereignisse auf den Flächen der Grünen, Blauen und Sozialen Infrastruktur ermöglicht es, Flächen, die als Grünanlage, Spielplatz o. Ä. genutzt werden, um eine Nutzung zu erweitern. Die Flächenkonkurrenz im Stadtgebiet wird dadurch reduziert. Naturnahe Infrastrukturen haben zahlreiche positive Effekte auf den urbanen Raum. Luftschadstoffe und Lärm werden verringert, die Biodiversität gesteigert.

Der Niederschlag kann dauerhaft in den Gewässern der Blauen Infrastruktur gespeichert werden und steht anschließend für Folgenutzungen zur Verfügung. Flächen der Grünen und Sozialen Infrastruktur können den Niederschlag temporär aufnehmen und geben ihn im Anschluss gedrosselt an den nächstgelegenen Vorfluter

oder die Kanalisation ab. Im kompakten Stadtgebiet Erfurts ist die Gera der Hauptvorfluter. Sie spaltet sich in der Innenstadt in mehrere Wasserläufe auf. Westlich der Äußeren Oststadt liegt mit dem Flutgraben der bedeutendste dieser Wasserläufe (Lindner et al. 2006).

Das erforderliche Retentionsvolumen im Modellgebiet kann nach dem einfachen Verfahren zur Bemessung von Regenrückhalteräumen nach DWA – A 117 ermittelt werden. Das erforderliche Speichervolumen für die Quartiere der Äußeren Oststadt beträgt zwischen 1.089 m³ (ICE – City) und 1.790 m³ (Stadtwerke) für ein Regenereignis, das in dieser Intensität etwa alle 10 Jahre auftritt (vgl. Tabelle 2).¹ Bei einer einheitlichen Beckentiefe von einem Meter wird eine Fläche

¹ Das maximale spezifische Speichervolumens bezogen auf die abflusswirksame Fläche ergibt sich zu 219 m³/ha bei einer Dauerstufe von 20 min und einer Wiederkehrhäufigkeit von 0,1 1/a.

von 1.089 m² (ICE – City) bis 1.790 m² (Stadtwerke) erforderlich. Tiefe Becken und Schwankungen des Wasserspiegels legen Sicherheitsmaßnahmen wie geringe Böschungsneigungen oder die Terrassierung der Böschung nahe. Der abflusswirksame Niederschlag kann den beiden Retentionsbecken über offene Kanäle und Gerinne im freien Gefälle, wo erforderlich auch unterirdisch zugeleitet werden. Offene Zuleitungswege können gestalterisch ansprechend in das Stadtentwicklungskonzept integriert werden. Die Retentionsflächen können auf die öffentlichen Grün- und Freiflächen verteilt werden. Für eine kombinierte Retention auf den Flächen der grünen, blauen und sozialen Infrastruktur stehen Quartiersmitten, Freiflächen (z. B. Plätze), ein Freiraumband und ein Park zur Verfügung. Daneben ist auch die Retention auf Grünstreifen entlang der Straßen denkbar.

Quartier	Absolutes Speichervolumen [m ³]	Verfügbare Freifläche [m ²]			
		Quartiersmitte	Freifläche ¹ (anteilig)	Freiraumband	Park ¹ (anteilig)
Blumenschmidstr.	1.411	1.457	7.620	19.531	5.281
Posthof	1.263	1.607	7.620	0	5.281
Iderhoffstraße	1.710	1.505	7.620	0	5.281
Stadtwerke	1.790	1.700	7.620	0	5.281
ICE – City	1.089 ³	0	7.620	32.236	5.281

Tabelle 2: Erforderliche Speichervolumina und verfügbare Grün- und Freiflächen für die Anordnung von Retentionsflächen; eigene Darstellung

¹ Die genaue Verteilung von Park- und Freiflächen über die einzelnen Quartiere ist nicht bekannt, daher werden diese Flächen anteilig auf die fünf Quartiere verteilt.

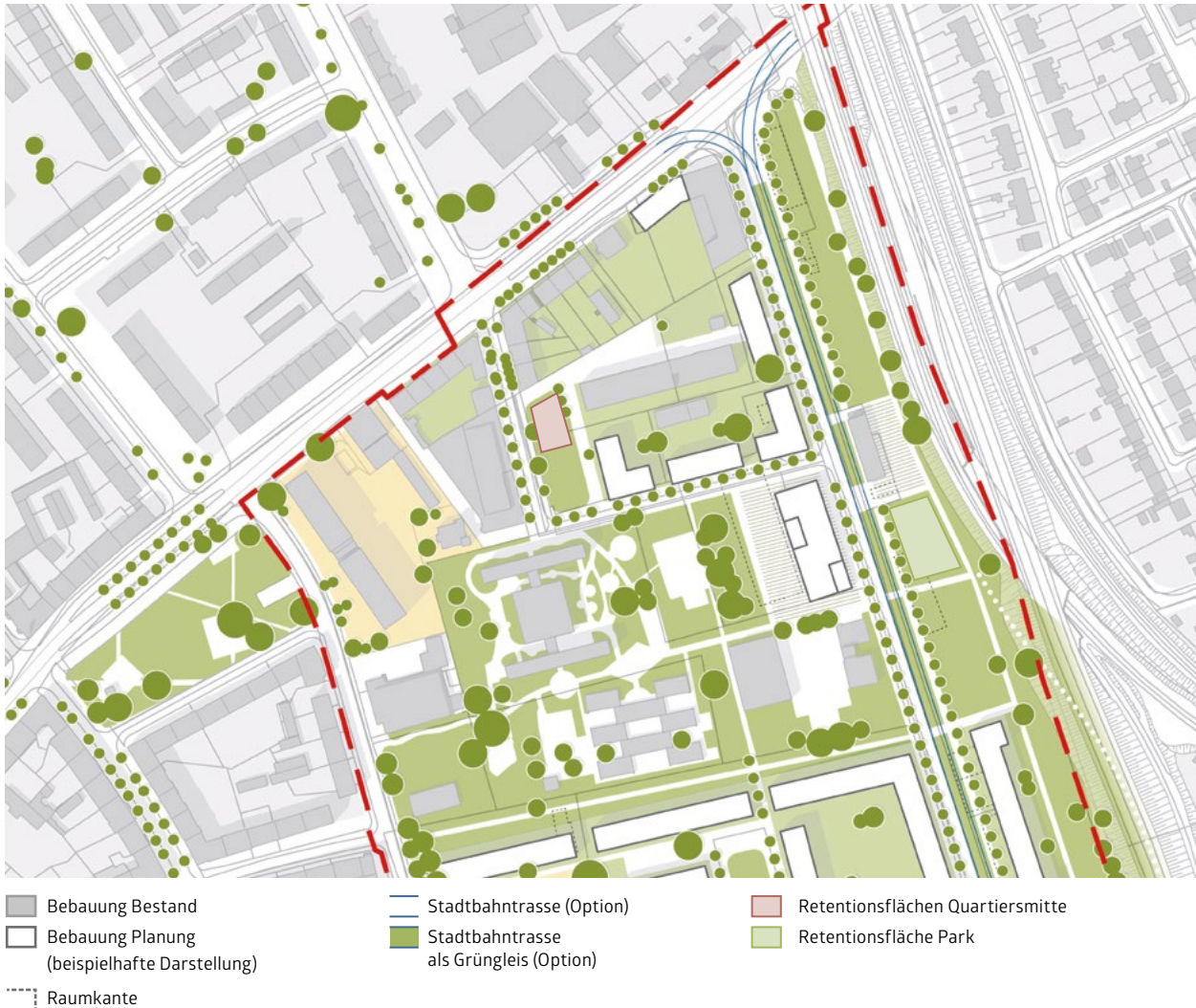


Abb. 42: Städtebauliches Strukturkonzept Äußere Oststadt, Quartier Blumenschmidtstraße mit einer möglichen Anordnung der Retentionsflächen (rot, grün); eigene Darstellung auf Basis von Georg und Teichmann 2015

Unterschiedliche Anordnungen der Retentionsfläche auf den verschiedenen Grün- und Freiflächen der Quartiere sind möglich. Die Anordnung ist neben gestalterischen Anforderungen von der Topologie des Geländes abhängig. Um den Transport des Niederschlags im freien Gefälle zu ermöglichen, sollten die Retentionsbecken an den Tiefpunkten des Geländes positioniert werden. Dies muss im Rahmen einer detaillierteren Planung geprüft werden. Eine mögliche Anordnung ist im Anschluss für das Quartier Blumenschmidtstraße dargestellt (vgl.). In der Quartiersmitte wird eine Retentionsfläche von ca. 200 m² (rot) vorgesehen. Hier ist eine Hauptnutzung als Spielplatz denkbar. Im Park östlich des Quartiers wird eine weitere Retentionsfläche von ca. 800 m² (grün)

vorgesehen. Diese kann als abgesenkte Grünfläche in die Parklandschaft integriert werden oder auch als Rasensportplatz umgesetzt werden.

Anlagen der Blauen Infrastruktur sind im integrierten städtebaulichen Rahmenkonzept der Äußeren Oststadt bisher nicht vorgesehen. Gerade die Gewässer als dauerhafte Speicher des Niederschlagswassers bieten aber die Möglichkeit vielversprechender Folgekopplungen. Niederschlag, der in den Gewässern der Blauen Infrastruktur gespeichert wird, kann anschließend zur Bewässerung von Grünanlagen genutzt werden. Die Zwischenspeicherung und Bewässerung wiederum verstärkt den Effekt der Verdunstungskühlung.

Sektorenkopplung Blaue und Grüne Infrastruktur/Kälte



Zurzeit fungiert die Äußere Oststadt mit den vorhandenen Brach- und Grünflächen als lokaler Ausgleichsraum mit hoher bioklimatischer Wirkung. Die Flächengrößen erlauben die lokale Kaltluftbildung und Frischluftzufuhr (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. 2020). Um die Innere Oststadt auch nach dem Bau der Äußeren Oststadt mit kühler Frischluft zu versorgen sieht das städtebauliche Rahmenkonzept ein Freiraumband zwischen den Quartieren Stadtwerke und ICE – City vor. Dieser Grünraum bildet eine Ventilationsbahn entlang der Gleisanlagen, der „frische und kühle Luft, die südöstlich der Stadt entsteht, durch den Grünraum in die Innenstadt hinein“ leitet (Georg und Teichmann 2015, S. 54). Es gilt zu prüfen, inwieweit die Kaltluftbildung mit zunehmender Bebauung auch in der Äußeren Oststadt abnehmen wird, und zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssen. Eine Möglichkeit um die reduzierte Kaltluftbildung durch Bebauung auszugleichen, ist die Verdunstungskühlung durch Anlagen der Grünen und Blauen Infrastruktur.

Während Gründächer und -fassaden vor allem zur Temperaturregulation im Gebäudeinneren beitragen, unterstützen weitläufigere Grün- und Wasserflächen durch Evapotranspiration und Evaporation die Kühlung des Außenraums. Diese Kopplung von Grüner und Blauer

Infrastruktur und Kälte kann als ergänzende Kopplung oder Sekundärkopplung umgesetzt werden. Die Retentionsflächen dienen dann neben der Starkregenretention der Temperaturregulation des Außenraums.

Sektorenkopplung Abwasser/Kälte



Steigende Komfortansprüche und eine zunehmende Zahl an Hitzetagen in der Stadt haben zur Folge, dass mehr und mehr Gebäude mit Kühlanlagen ausgestattet werden. Diese Entwicklung steht im Widerspruch zum politischen Ziel, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor zu reduzieren (Bettgenhäuser et al. 2011, XII). Eine wertvolle Alternative zur konventionellen Gebäudekühlung stellt daher die Adiabate Kühlung dar. Der Energiebedarf dieser Anlagen liegt bis zu 80 % unter dem Energieverbrauch konventioneller Anlagen. Kältemittel mit hohem Treibhauspotential wie teilfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) entfallen (Richter et al. 2014). Wird darüber hinaus Regenwasser anstelle von Trinkwasser verdunstet, ergibt sich zusätzlich eine Reduktion von Trink- und Abwasser von ca. 50 % (König 2017). Die Anlagen lassen sich gut in Neubaugebäude integrieren. Große Klimalanlagen sind durch alle namhaften Hersteller am Markt verfügbar und auch in kleineren Gebäuden können die Anlagen realisiert werden.

Im Modellgebiet Äußere Oststadt ist bis zum Jahr 2030 der Bau zahlreicher Gebäude für Wohnen und Gewerbe geplant. Im Folgenden wird dargestellt, wie hoch der maximale theoretische Kühlbedarf sein wird, inwieweit dieser durch die Adiabate Kühlung gedeckt werden könnte und welche Einsparung von Energie und CO₂-Emissionen bei einer vollständigen Ausstattung der Neubaugebäude mit Kühlanlagen durch den Einsatz Adiabater Kühlung erreicht werden könnten. Potentielle Änderungen des Kühlbedarfs und -potentials aufgrund des Klimawandels und einhergehender Änderungen von Temperatur- und Niederschlagsverteilung werden in dieser Abschätzung zunächst nicht berücksichtigt.

Die Kälteentzugsleistung Adiabater Kühlung liegt bei 680 kWh/m³ (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin o. J.). Das bedeutet, dass ein Kubikmeter Regenwasser 680 kWh Verdunstungskälte erzeugen kann. Als Betriebswasserquelle kann das Niederschlagswasser von den Dachflächen der Neubauten genutzt werden. Verkehrs- und Freiflächen werden aufgrund der hohen Verschmutzung des Oberflächenabflusses nicht herangezogen. Auch die Dachflächen der Bestandsbauten bleiben unberücksichtigt, da hier eine aufwändige Änderung des derzeitigen Kanalanschlussnetzes erforderlich werden würde.

Der Kühlwirkungsgrad von Klimageräten mit Adiabater Kühlung liegt zwischen 70 und 90 % (Lackmann 2019). Unter Berücksichtigung von Kälteentzugsleistung, verfügbarem Niederschlag und Kühlwirkungsgrad lässt sich das Kühlpotential für die einzelnen Quartiere bestimmen (vgl. Tabelle 3). Das minimale Kühlpotential besteht im Februar, das maximale im Juli.

Zur Bestimmung des monatlichen Kühlenergiebedarfs werden die zu kühlende Gebäudenutzfläche der Neubaugebäude und die jährlichen Kühlgradtage² in Erfurt betrachtet.

Stellt man das Kühlpotential dem Kühlenergiebedarf gegenüber, wird deutlich, dass das monatliche Kühlpotential des Regenwassers in allen Quartieren deutlich größer als der Kühlenergiebedarf der Neubaugebäude ist. Die Kühlperiode erstreckt sich von April bis Oktober, der höchste Kühlbedarf besteht zwischen Mai und September. In diesem Zeitraum fällt auch die größte Niederschlagsmenge, was die Gebäudekühlung mit Regenwasser begünstigt (vgl. Tabelle 4).

Um das Regenwasser für die Kühlung bereitzuhalten, kann in jedem Quartier ein eigener Regenwasserspeicher vorgesehen werden, der alle Gebäude im Quartier zentral versorgt. Die Regenwasserspeicher benötigen einen Überlauf, Pumpvorrichtungen sowie eine Vorfiltrierung durch Regenwasserfilter und Entkeimung. Es sind Speichermengen von 3,4 m³ (Blumenschmidtstraße) bis 65 m³ (ICE-City) erforderlich, um den maximalen Monatsbedarf im Monat Juli bei durchschnittlichem Kühlbedarf zu decken. Die Kühlung erfolgt auf Gebäudeebene, jedes Gebäude erhält eine eigene Kühlanlage. Die Ermittlung des Kühlenergiebedarfs je Gebäude ergibt Anlagengrößen mit Leistungen zwischen 2 kW und 300 kW.

Die Adiabate Abluftkühlung kann Energieersparnisse von bis zu 80 % gegenüber konventionellen Anlagen erreichen (VDI 2009-2020), wobei die erforderliche Pumpenergie zur Verteilung des Regenwassers aus den zentralen Speichern hier noch nicht berücksichtigt ist. Als konservative Annahme wird hier mit einer Ersparnis von 67 % gerechnet. Bei einem CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 523 g CO₂ je kWh Strom für das Jahr 2016 (Icha 2019) ergibt sich daraus ein jährliches CO₂-Einsparpotential von 6,19 t/a (Posthof) bis 11,17 t/a (ICE-City).

² Kühlgradtage errechnen sich aus der täglichen Differenz von Außentemperatur und Kühlgrenztemperatur von 18,3 °C, multipliziert mit der Summe der Kühltag über 18,3 °C. Für Erfurt ergibt sich ein Wert von 91,22 K·d Kühlgradtagen pro Jahr.

Quartier	Kühlpotential [MWh/a]
Blumenschmidtstraße	5.235
Posthof	4.608
Iderhoffstraße	5.699
Stadtwerke	10.250
ICE-City	5.704

Tabelle 3: Kühlpotential durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser; eigene Darstellung

Quartier	CO ₂ -Einsparung [t/a]
Blumenschmidtstraße	10,35
Posthof	6,19
Iderhoffstraße	8,62
Stadtwerke	8,31
ICE-City	11,17

Tabelle 5: CO₂-Einsparpotential der adiabaten Kühlung gegenüber konventionellen Kühlanlagen; eigene Darstellung

Quartier	Kühlpotential [MWh/Monat]		Kühlbedarf [MWh/Monat]	
	Minimum (Februar)	Maximum (Juli)	Minimum (Oktober)	Maximum (Juli)
Blumenschmidtstr.	46,49	143,61	0,03	7,60
Posthof	178,12	550,25	0,06	18,46
Iderhoffstraße	194,90	602,07	0,10	30,20
Stadtwerke	401,80	1.241,21	0,09	25,46
ICE-City	201,12	621,28	0,12	34,55

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Kühlpotential und -bedarf durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser; eigene Darstellung

6.1.3. Übertragbarkeit in andere städtebauliche Strukturen

Beim Modellgebiet Äußere Oststadt handelt es sich um ein Konversionsgebiet, welches überwiegend durch Neubau und einige Bestandsbebauungen geprägt ist. Die Planungen zur Bebauung erfolgten sowohl nach den aktuell gültigen Vorschriften als auch städtebaulich sowie stadtplanerischen Entwicklungsidealen und Bedürfnissen. Historisch gewachsene Bestandsquartiere sind in der Regel kompakter gebaut und durch eine höhere Einwohnerdichte gekennzeichnet. Eine direkte Übertragbarkeit der Modellberechnungen und Voraussetzungen der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Sektorenkopplung auf andere Stadtgebiete ist nicht möglich.

Um dennoch Hinweise zur Übertragbarkeit zu geben, wird ein in vielen Städten vorhandenes gründerzeitliches Quartier gegenübergestellt. Als direktes Referenzbeispiel in Erfurt wurde das typische, kompakte Gründerzeitquartier (Innere Krämpfervorstadt, Zeitfenster der Entstehung ca. 1890 bis in die 1930er Jahre) herangezogen. Die Bebauungsstruktur ist durch eine weitgehend geschlossene, mehrgeschossige Blockrandbebauung mit eingestreuten gewerblichen Nutzungen in großzügig dimensionierten Höfen gekennzeichnet.



Abb. 43A: Städtebauliche Strukturen im Vergleich: Referenzquartier in der Inneren Krämpfervorstadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015

Das kompakte Referenzquartier zeichnet sich durch

- eine höhere Bebauungsdichte (Verhältnis Nettowohnbauland zu bebauter Grundfläche),
- eine größere Gesamtgeschossfläche (Verhältnis Nettowohnbauland zu Bruttogrundfläche)
- i.d.R. kleinere Wohnungszuschnitte,
- einen geringeren Grünanteil sowie einen höheren Versiegelungsgrad und
- eine Bausubstanz mit deutlich höherem relativen (je m² beheizter Fläche) und absolutem Energieverbrauch (je ha oder km²), da diese mit einem sehr viel geringeren energetischen Standard errichtet wurden

Übertragbarkeit der Sektorenkopplung Wärme/Abwasser



Sowohl bei teil- als auch vollmodernisierter Bausubstanz fällt der Gesamtwärmebedarf höher aus als im Modellgebiet. Unterstellt man eine gleichbleibende Menge gewerblicher Abwärme (z. B. Großwäscherei im Quartier) so würde der Deckungsanteil aufgrund des höheren Gesamtbedarfes geringer ausfallen. Zudem muss die Vorlauftemperatur in den Bestandsgebäuden



Abb. 43B: Aktuelle Planungen der Äußeren Oststadt; Landeshauptstadt Erfurt 2015

deutlich höher sein, da die Gebäudeheizflächen für Radiatoren ausgelegt sind. Resultierend ist die Temperaturdifferenz zwischen Abwärme und benötigter Heizwärme größer. Für die Versorgung der Bestandsgebäude müsste die Leistung der benötigten Wärmepumpen erhöht werden. Im Vergleich: die Neubauten werden über Flächenheizungen versorgt, was eine Reduktion der Vorlauftemperatur ermöglicht.

Auch die Verbesserung der Effizienz durch die Unterstützung der Wärmeversorgung mit solarthermischen Erträgen, wie im Beispiel des Konzepts „Äußere Oststadt“ ist nicht ohne Weiteres umsetzbar. Voraussetzung wäre eine geeignete große Freifläche für die Installation von großflächigen Kollektoranlagen sowie eines Pufferspeichers. Dies wird jedoch in den seltensten Fällen in innerstädtischen und für Wohnungsbau hochattraktiven (preisintensiveren) Lagen möglich sein.

Damit sinkt die Gesamteffizienz der Sektorenkopplung von Abwärme (Abwasser) und vorhandener Fernwärme (Wärme) in einem Gründerzeit Bestandsquartier im Vergleich zu einem innerstädtischen Neubauquartier.

Übertragbarkeit der Sektorenkopplung Abwasser/Grüne und Blaue Infrastruktur



In dicht bebauten Stadtstrukturen wie im Referenzquartier ist die Verfügbarkeit unbebauter Freiflächen begrenzt. Die Anforderungen an die Umsetzung dezentraler Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung sind daher hoch. Anstelle von Freiflächen müssen Gebäudeoberflächen verstärkt für die Regenwasserretention genutzt werden (Sieker et al. 2019). Denkbar ist beispielsweise der Einsatz grün – blauer Retentionsdächer. Regenwasser zur Bewässerung muss platzsparend, beispielsweise in Zisternen, gespeichert werden. In Bestandsgebäuden sind sämtliche Maßnahmen, die einen Eingriff in die Gebäudesubstanz nehmen, egal ob Dach oder Keller, kritisch zu betrachten. Die Eigentümerstrukturen sind zumeist sehr heterogen, sodass semizentrale Lösungen nur schwer umzusetzen sind. Um Lösung im Quartiersmaßstab umsetzen zu können, müssen viele Akteure überzeugt werden. In solchen

Fällen eignen sich eher kleine dezentrale Maßnahmen auf Gebäude-, bzw. Grundstücksebene.

Übertragbarkeit der Sektorenkopplung Grüne und Blaue Infrastruktur/Kälte



Das Referenzquartier weist aufgrund von Versiegelung, Verdichtung und Geschlossenheit der Bebauung thermische Defizite auf. Die Temperaturen innerhalb der Kernstadt und der gründerzeitlichen Vorstädte Erfurts können sich gegenüber der ländlichen Umgebung um bis zu 10 °C unterscheiden (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. 2020). Gleichzeitig sind die Möglichkeiten, Grüne und Blaue Infrastruktur zu etablieren, beschränkt. Wie bei der Retention muss der Schwerpunkt hier auf Gebäudeoberflächen und Fassaden liegen, wo Gründächer und -fassaden einen Beitrag zur Verdunstungskühlung im Außenraum leisten. Aufgrund von Verdichtung und Geschlossenheit der Bebauung kann sich die Verdunstungskälte durch Vegetation und Wasserflächen jedoch nur begrenzt im Stadtraum verteilen (Spohr und Riediger 2018).

Übertragbarkeit der Sektorenkopplung Abwasser/Kälte



Die hohe Gesamtgeschosßfläche im Referenzquartier erhöht den Kühlbedarf gegenüber dem Kühlpotential durch das Regenwasser von Dachflächen. Gleichzeitig bewirkt die typische Bauweise aus massivem Mauerwerk, dass sich die Wohnungen, von den Dachgeschosswohnungen abgesehen, weniger stark aufheizen. Es ist daher zu prüfen, ob der Kühlbedarf durch den abflusswirksamen Niederschlag der Dachflächen gedeckt werden kann. Falls dies nicht der Fall ist, muss gegebenenfalls Leitungswasser zur Kühlung genutzt werden. In jedem Fall ist die Umsetzung eines Auffang- bzw. Kühlsystems in der bestehenden Bebauung kostenintensiver, als dieses direkt in den Neubau zu integrieren. Eine geeignetere Sektorenkopplung zur Gebäudekühlung könnte hier die Begrünung von Fassaden und Dächern darstellen.



Abb. 44: Region Mittelhessen mit Landkreisen; Trepte 2006

6.2. Fallbeispiel Region Mittelhessen

6.2.1. Beschreibung des Modellgebietes

Das Modellgebiet umfasst die Region Mittelhessen, welche neben Nord- und Südhessen eine von drei Planungsregionen in Hessen darstellt. Ihr Gebiet ist identisch mit dem Regierungsbezirk Gießen und setzt sich aus den fünf Landkreisen Limburg-Weilburg, Lahn-Dill, Gießen, Marburg-Biedenkopf und Vogelsberg zusammen (vgl. Abbildung 44).

In der Region Mittelhessen leben derzeit in 101 Kommunen ca. 1,05 Mio. Menschen auf einer Fläche von ca. 5.381 km² (HSL 2019). Bei regionaler Betrachtung wird sich die Bevölkerung in den hessischen Regierungsbezirken in den kommenden Jahren sehr unterschiedlich entwickeln: So ist im Regierungsbezirk Darmstadt mit einer weiteren deutlichen Zunahme der Bevölkerung zu rechnen. In den Regierungsbezirken Gießen

und insbesondere Kassel zeichnen sich hingegen auch kurz- bis mittelfristig wieder die regionalen demografischen Entwicklungsmuster der vergangenen Jahre mit rückläufigen Einwohnerzahlen vor allem im peripheren ländlichen Raum ab. Bis zum Ende 2035 wird für Mittelhessen ein Rückgang der Bevölkerung in Höhe von -1,6 % und bis zum Ende des Jahres 2050 ein weiterer Rückgang von -5,0 % erwartet. In absoluten Größen beziffert sich der Rückgang auf 68.300 Personen und die Gesamteinwohnerzahl des Regierungsbezirks Gießen fällt leicht unter eine Million (HMWEVW 2019).

6.2.2. Wasserwirtschaftliche Randbedingungen

Schwerpunkt bei der Betrachtung des Fallbeispiels Mittelhessen ist der regional anfallende Klärschlamm und damit verbundene Sektorenkopplungsoptionen. Bevor die Sektorenkopplungen in Kapitel 6.2.3 beschrieben werden, werden hier die Grundlagen von Abwasserbehandlung und Klärschlamm Entsorgung im Modellgebiet dargestellt.

In der Region Mittelhessen wird das Abwasser in insgesamt 215 kommunalen Kläranlagen behandelt, an die ca. 1,9 Mio. Einwohnerwerte³ angeschlossen sind. Von besonderer Bedeutung sind die Kläranlagen der Größenklassen⁴ (GK) 4 und 5. Nur 34 der Kläranlagen sind diesen Größenklassen zuzuordnen, das entspricht ca. 16 % aller Kläranlagen in der Region Mittelhessen. Diese aber behandeln das Abwasser von ca. 1,5 Mio. Einwohnerwerten und decken somit ca. 80 % der angeschlossenen Einwohnerwerte in der Region ab. Die Lage der Abwasserbehandlungsanlagen (ABA) nach Größenklassen ist in Abbildung 45 dargestellt.

³ Einwohnerwerte: Anzahl der angeschlossenen Einwohner plus Einwohnergleichwerte (einwohnerspezifische Äquivalenzwerte des Verschmutzungsgrades von nicht häuslichem Abwasser)

⁴ Größenklassen (GK): GK1 <1.000 EW, 1.000 ≤ GK2 ≤ 5.000 EW, 5.000 < GK3 ≤ 10.000 EW, 10.000 < GK4 ≤ 100.000 EW, GK5 > 100.000 EW

In den 215 Kläranlagen der Region Mittelhessen fallen jährlich ca. 24.300 tTS Klärschlamm (Trockensubstanz) an, die entsprechend der aktuellen gesetzlichen Vorgaben zu entsorgen sind.

Die Entsorgung von Klärschlamm in der Landwirtschaft, im Garten- und Landschaftsbau war in Deutschland lange Zeit verbreitet. Doch Verschärfungen im Düngerecht und die Konkurrenz mit Wirtschaftsdüngern schränken die bodenbezogene Klärschlammverwertung zunehmend ein. Entsprechend ist ein starker Rückgang der in der Landwirtschaft und im Garten-/Landschaftsbau zu Dünge Zwecken eingesetzten Klärschlämme zu verzeichnen. Im Jahr 2017 wurden 38 % und im Jahr 2018 nur noch 22 % des gesamten Klärschlammes in diesen Bereichen stofflich verwertet (HMUKLV 2019). Stattdessen nimmt die thermische Verwertung von Klärschlamm stetig zu. Während vor 2015 ungefähr die Hälfte des zu entsorgenden Klärschlammes thermisch behandelt wurde, sind es im Jahr 2018 bereits ca. 78 %.

Die im Jahr 2017 in Kraft getretene neue Abfallklärschlammverordnung (AbfKlärV) in Verbindung mit der Düngemittel- und der Düngeverordnung wirkt sich nochmals gravierender sowohl auf die zukünftige

Verwertung des Klärschlammes generell als auch auf die vor der Entsorgung erforderlichen Behandlungsverfahren aus. Zentrales Element der novellierten Klärschlammverordnung sind umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm bzw. aus Klärschlammverbrennungssaschen.

Enthält Klärschlamm von ABA der Größenklasse 4 und 5 ≥ 20 g/kg Trockenmasse (TM) bzw. ≥ 2 % Phosphor muss dieser zurückgewonnen werden. In der Region Mittelhessen beträgt die Klärschlammmenge mit einem Phosphorgehalt $> 2\%$ für das Mittel der Jahre 2012 bis 2014 ca. 16.700 tTS/a. Davon entfallen auf die Größenklassen 4 und 5 ca. 14.500 tTS/a (vgl.). Die für eine P-Rückgewinnung zur Verfügung stehende Phosphorfracht dieses Klärschlammes (GK 4 + 5) beläuft sich auf ca. 470 t P/a.

Mit den Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung einhergehend entfällt nach und nach die Möglichkeit der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm für die Größenklassen 5 (ab 1.1.2029) und 4 (ab 1.1.2032). Die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm ist bei ABA kleiner 50.000 Einwohner weiterhin erlaubt, unterliegt aber verschärften Anforderungen (z. B. keine Aufbringung in Gebieten der Wasserschutzzone III).

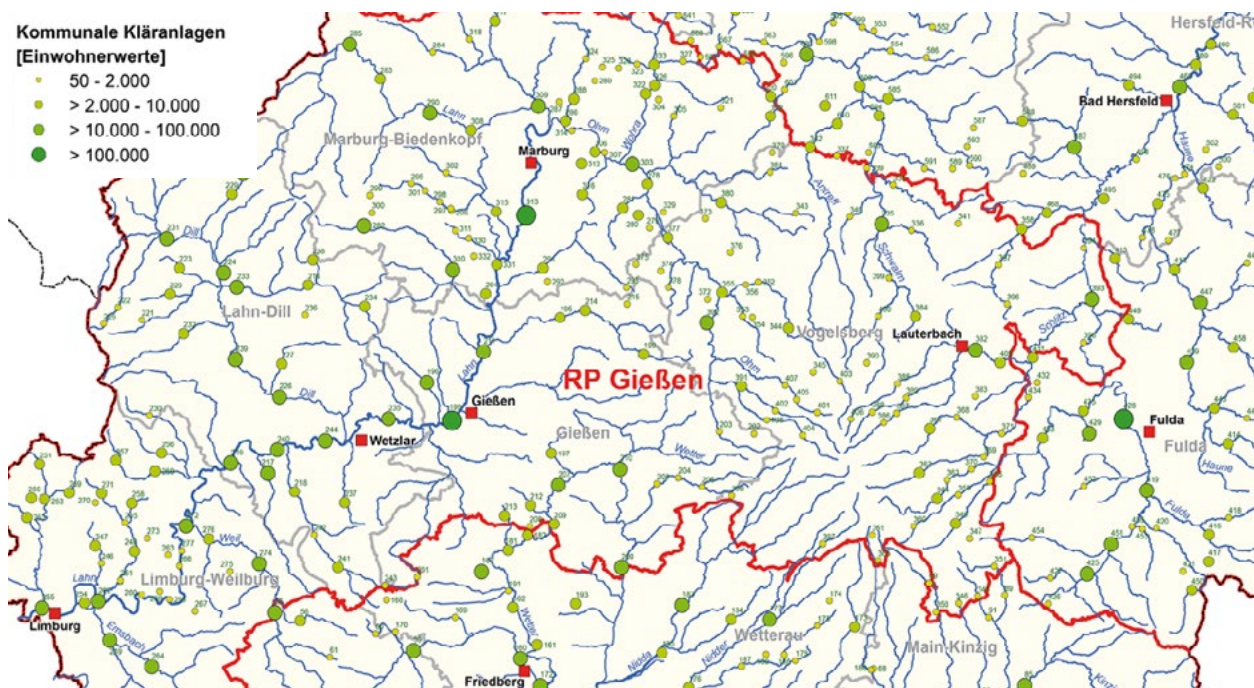


Abb. 45: Lage der kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen in der Region Mittelhessen; HMUKLV 2019

Landkreise	Klärschlammanfall (Mg ⁵ TS/a, Mittelwert 2012 – 2014)					
	GK 1-5	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5
Gießen	6.142	15	118	281	2.554	3.174
Lahn-Dill	2.928		75	363	2.490	
Limburg-Weilburg	1.171		96		1.075	
Marburg-Biedenkopf	5.396	48	459	530	2.480	1.879
Vogelsberg	1.023	16	141		866	
Summe	16.660	79	889	1.174	9.465	5.053

Tabelle 6: Klärschlammanfall der Kläranlagen mit einem P-Gehalt im Klärschlamm von mindestens 2%, Region Mittelhessen, 2012-2014; eigene Darstellung auf Basis von HMWEVW 2019

5 Mg TS/a = Megagramm Trockensubstanz pro Jahr, GK = Größenklasse, P-Gehalt = Phosphorgehalt

6.2.3. Modellgebietsbezogene Sektorenkopplungen

Sektorenkopplung Abfall/Wärme



Wie Kapitel 6.1.5. zeigt, steigt der Anteil des thermisch behandelten Klärschlammes an den verschiedenen Entsorgungswegen. Diese Entwicklungen sind auf die erhöhten Anforderungen durch die Novellierungen der Abfallklärschlammverordnung und der Dünge- und Düngemittelverordnung in den letzten Jahren zurückzuführen. Vor dem Hintergrund möglicher weiterer Verschärfungen dieser Anforderungen und der zunehmenden Konkurrenz mit Wirtschaftsdüngern in Landwirtschaft, Garten- und Landschaftsbau ist anzunehmen, dass der Anteil thermische Behandlung an den Klärschlamm Entsorgungswegen weiter steigen wird. In der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass 100 % der anfallenden Klärschlämme der Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 5 einer thermischen Behandlung zugeführt werden.

Eine Möglichkeit zur Sektorenkopplung besteht hier in der Nutzung der Abwärme, die bei der thermischen

Verwertung des Klärschlammes frei wird. Die Entsorgung von Klärschlamm unterliegt nach Verlassen der Kläranlage nicht mehr dem Wasser-, sondern dem Abfallrecht. Damit kann die Nutzung überschüssiger thermischer Energie aus der Klärschlammverbrennung in Wärmeversorgungssystemen einer Kopplung der Sektoren Abfall und Wärme zugeordnet werden.

Exemplarisch werden nachfolgend die Potentiale einer semizentralen Abwärmennutzung von Gewerbe- bzw. Industriebetrieben zur Klärschlammvorbehandlung beschrieben. Hierbei werden die Nassschlämme am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TS (entspricht 75 % Wassergehalt bzw. ca. 97.200 t Klärschlamm/a) entwässert. Anschließend werden die entwässerten Klärschlämme der verschiedenen Kläranlagen zu semizentralen Trocknungsstandorten transportiert und dort unter Einsatz von Abwärme auf ca. 45 % TS (entspricht 55 % Wassergehalt bzw. ca. 54.000 t Klärschlamm/a) getrocknet, um Kosten und Energie bezüglich des Transports des vorbehandelten Klärschlammes zur zentralen Monoverbrennungsanlage zu verringern. Die dabei an den semizentralen

Trocknungsstandorten anfallenden Brüdenkondensate⁶ sind hinsichtlich ihrer stofflichen Rückbelastungen in den ortsnahen Kläranlagen zu berücksichtigen. Der getrocknete Klärschlamm kann anschließend zentral verbrannt werden. Die Abwärme aus dem Verbrennungsprozess kann beispielsweise in das Fernwärmenetz eingespeist werden.

Ob diese Kopplung im konkreten Fall sinnvoll ist und welche Effizienzpotentiale daraus resultieren, ist im Wesentlichen von der Vorbehandlung der Klärschlämme abhängig. Der Heizwert von Klärschlamm hängt vom Wassergehalt und der organischen Restmasse ab. Eine selbstgängige Verbrennung (ohne Zusatzfeuerung) ist ab einem Heizwert von ca. 4.500 kJ/kg möglich. Bei den meisten entwässerten Klärschlämmen reicht der Heizwert nicht für eine selbstgängige Verbrennung aus. In diesem Fall ist die vorherige Trocknung des Klärschlammes erforderlich. Dafür kommen unterschiedliche Wärmemedien in Frage.

Um eine positive Energiebilanz zu erreichen und Überschusswärme an das Fernwärmenetz abgeben zu können, ist die Klärschlamm-trocknung mit Abwärme erforderlich. Die Sektorenkopplung Abfall/Wärme ist für gewöhnlich also nur sinnvoll, wenn ihr die Kopplung der Sektoren Abwärme und Abfall (Klärschlamm) vorausgeht. Die Sektorenkopplung Abwärme/Abfall stellt demnach die Primärkopplung zur Sektorenkopplung Abfall/Abwärme dar. Diese und weitere zusätzliche Kopplungsmöglichkeiten sind im folgenden Kapitel kurz beschrieben.

6.2.4. Weitere Kopplungsmöglichkeiten

Die Trocknung des Klärschlammes mit Abwärme stellt eine weitere mögliche Sektorenkopplung dar. Für die Trocknung der entwässerten Klärschlämme der Kläranlagen in der Region Mittelhessen ist ein erheblicher Wärmebedarf erforderlich. Es wird angenommen, dass diese Abwärme an den semizentralen Trocknungsstandorten zu 100 % bereitgestellt werden kann und die anschließende Monoverbrennung mittels Wirbelschichtverfahren inklusive Abzug von anlagenbezogenen

⁶ Brüdenkondensate = kondensierte, mit Wasserdampf gesättigte, schadstoffbelastete Abluft, die bei der Trocknung von Klärschlamm entsteht

Wärmeverlusten (ca. 20 %) erfolgt. Unter diesen Bedingungen ergibt sich ein Überschuss an thermischer Energie von ca. 54.000 MWh/a, der durch Kopplung der Sektoren Abfall und Wärme in die Wärmeversorgung eingespeist werden könnte.



Land Hessen am 31. Dezember 2017

21 Landkreise
426 Städte und Gemeinden
davon 5 kreisfreie Städte
Landeshauptstadt: Wiesbaden



Bevölkerung: 6,24 Mill.
Einwohnerinnen und Einwohner je km²: 296
Fläche: 21 115,7 km²
Landwirtschaftsfläche: 41,8 %
Waldfläche: 39,8 %

Abb. 46: Besiedlungsdichte in Hessen nach Landkreisen; HSL 2019

Von den verschiedenen Abwärmequellen hängt der Ort der Trocknung ab. Kann Abwärme aus faulgasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) bereits auf der Kläranlage genutzt werden, findet die Trocknung dezentral statt. Eine semizentrale Abwärmenutzung aus Gewerbe-/Industriebetrieben ist ebenfalls denkbar. Wird der Klärschlamm aller Kläranlagen am Ort der Verbrennungsanlage, beispielsweise mit Wärme aus dem Fernwärmenetz, getrocknet, findet eine zentrale Trocknung statt. Generell weisen eine dezentrale Klärschlamm-trocknung und damit Gewichts- und Volumenreduktion des Klärschlammes noch vor dem Transport zur Verbrennungsanlage und eine geringe Entfernung zwischen den Kläranlagen und der Verbrennungsanlage positive Auswirkungen auf mögliche Effizienzpotentiale auf.

Die Verwendung des aus Klärschlämmen gewonnenen Phosphors bietet die Möglichkeit weiterer Sektorkopplungen, wenn die in diesem Band beschriebenen Sektoren (siehe Kapitel 3.1) um die Sektoren Industrie und Landwirtschaft erweitert werden. Wird der aus

Klärschlamm gewonnene Phosphor (Sektor Abfall) als Düngemittel in der Landwirtschaft oder als Produktionsmittel in der Industrie eingesetzt, kommt es zu einer Kopplung zwischen den Sektoren Abfall und Landwirtschaft bzw. Industrie.

6.2.5. Übertragbarkeit in andere regionale Strukturen

Das Modellgebiet Mittelhessen ist eine relativ dünn besiedelte Region mit Besiedlungsdichten von weniger als 250 Einwohner/km²; lediglich im Landkreis Gießen mit der Stadt Gießen beträgt die Besiedlungsdichte mehr als 250 Einwohner/km² (vgl. Abbildung 46).

Lediglich die Städte Gießen und Marburg haben Kläranlagen von mehr als 100.000 Einwohnerwerten (EW). Der Klärschlamm in dieser Region fällt dezentral in einer Vielzahl von Kläranlagen der Größenklasse 1 bis 3 mit weniger als 10.000 EW an.

Der größte Teil der Kläranlagen der Größenklasse 5 (> 100.000 Einwohnerwerte) in Hessen befindet sich in der dicht besiedelten Region Südhessen mit den Großstädten Frankfurt am Main, Wiesbaden, Darmstadt und Offenbach (s. Abbildung 47).

Mittelhessen (RP Gießen) hat derzeit insgesamt rund 1,0 Mio. Einwohner. Es ist damit zu rechnen, dass die Zahl der Einwohner bis 2050 tendenziell rückläufig ist. Südhessen hat insgesamt rund 4,0 Mio. Einwohner, die Einwohnerzahl wird voraussichtlich bis 2050 weiter steigen (vgl. Tabelle 7). Daraus ergeben sich für die Klärschlammverwertung und wirtschaftlich mobilisierbaren Potentiale der Phosphorrückgewinnung erhebliche Unterschiede.

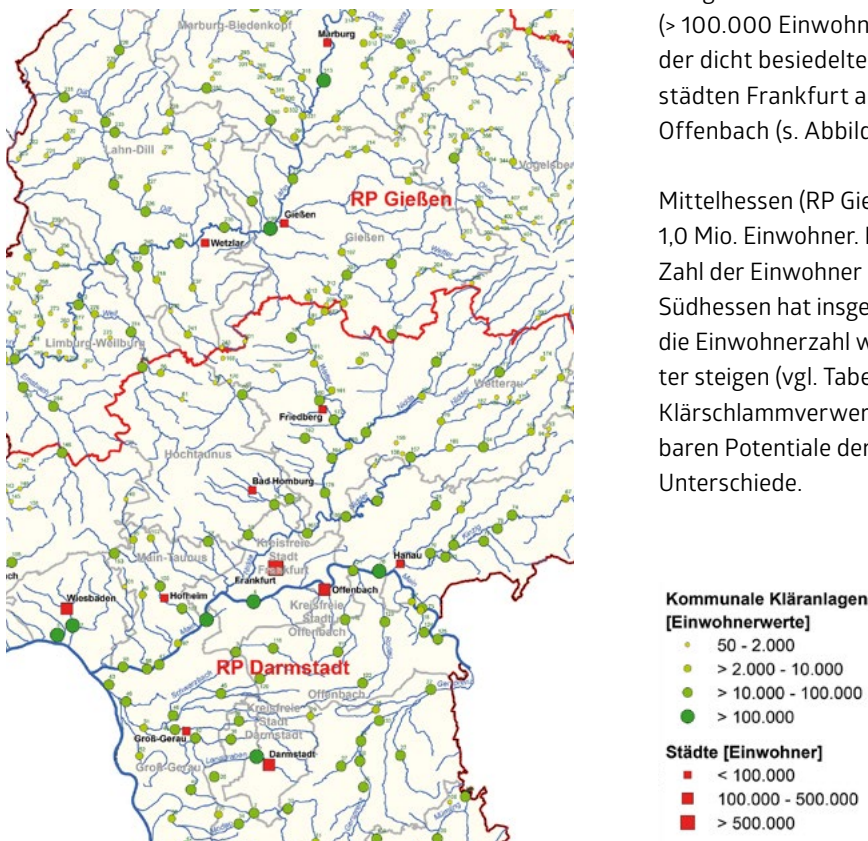


Abb. 47: Kommunale Kläranlage in Mittelhessen (RP Gießen) und in Südhessen (RP Darmstadt); HUKLV 2019

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der dezentralen thermischen Trocknung ist davon auszugehen, dass der größte Teil des anfallenden Klärschlammes in den Kläranlagen thermisch getrocknet wird. Die erforderliche Energie wird in der Regel durch die Nutzung des Faulgases in Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW-Anlagen) der Kläranlagen erzeugt.

Große Kläranlagen sind bezüglich der dezentralen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm wirtschaftlicher als kleine Anlagen in Mittelhessen.

Die Größenordnung des extrahierten Phosphors in Südhessen erleichtert den Aufbau eines regionalen Vermarktungskonzepts. Das erscheint aufgrund des geringen Phosphoranfalls in Mittelhessen eher in einer regionsübergreifenden Struktur organisatorisch und wirtschaftlich möglich.

	Hessen	RB Darmstadt	RB Gießen
Amtliches Ist (alle Angaben in 1.000)			
31.12.2017	6.243	3.978	1.046
Projektion			
31.12.2025	6.341	4.091	1.045
31.12.2035	6.353	4.151	1.029
Trend			
31.12.2050	6274	4.189	978
Veränderung (absolut) alle folgenden Angaben in %			
2017-2025	97,6	113,4	-1,3
2025-2035	12,1	59,5	-15,7
2017-2035	109,7	172,9	-17,0
2035-2050	-78,7	37,7	-51,3
2017-2050	31,0	210,6	-68,3
Veränderung (relativ) alle folgenden Angaben in %			
2017-2025	1,6	2,9	-0,1
2025-2035	0,2	1,5	-1,5
2017-2035	1,8	4,3	-1,6
2035-2050	-1,2	0,9	-5,0
2017-2050	0,5	5,3	-6,5

Tabelle 7: Bevölkerungsentwicklung in Hessen und den Regierungsbezirken von 2017 bis 2035 (Projektion) bzw. bis 2050 (Trend); eigene Darstellung auf Basis von HMWEVW 2019

7. Fazit

Grundgedanke der vorliegenden Handreichung zur Sektorenkopplung ist es, die Potentiale der Kopplungen kommunaler und regionaler Infrastruktursysteme aufzuzeigen. AdressatInnen sind die kommunalen und regionalen Entscheidungs- und MaßnahmenträgerInnen. Anhand von Kurzbeschreibungen und Steckbriefen (Band II) werden die Ansätze und Potentiale von Sektorenkopplungen vorgestellt. EntscheidungsträgerInnen sollen damit in die Lage versetzt werden, spezifische Ansätze für Sektorenkopplungen in ihrem Bereich identifizieren und in einem integrierten Prozess bewerten zu können.

Schwerpunkte der identifizierten Optionen der Sektorenkopplung liegen in den folgenden, stichwortartig benannten Bereichen. Sie sind in der Vergangenheit vor allem in Projekten zur Transformation der Wärme- und Stromerzeugung umgesetzt worden. Hier bestehen weiterhin erhebliche Potentiale.

Transformation der Wärme-/Kälte- und Stromerzeugung

- Integration der Erneuerbaren Energien in den Strom- und Wärme-/Kältesektor
- Nutzung bestehender Infrastrukturen (Gasnetze/ Fernwärmenetze)
- Beitrag zur Versorgungssicherheit (Technologiemix)
- Beitrag zur Systemstabilität (Speichertechnologien)

Transformation der Abwasserinfrastruktur

- Nutzung von Wärme aus Abwasser zur Raumheizung und Warmwasserbereitung
- Thermische Verwertung des Klärschlammes zur Wärme- und Stromerzeugung
- Substitution von Trink- durch Betriebswasser (z. B. aus Grau- oder Niederschlagswasser)
- Rückgewinnung organischer Stoffe aus dem Klärschlamm z. B. Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Anpassung an den urbanen Klimawandel

- Verknüpfung von Grüner Infrastruktur und den Sektoren der Grauen Infrastrukturen zur Entlastung der Abwasserinfrastruktur, Reduktion von Feinstaub, Verbesserung des Mikroklimas, Verdunstungskühlung und Wärmedämmung
- Verknüpfung von Blauen und Grauer Infrastruktur zur Entlastung der Abwasserinfrastruktur

Technologie

Potentiale zur Verbreitung von Sektorenkopplungen liegen in der Weiterentwicklung von Technologien, der Nutzung von Automatisierungseffekten und Prozessoptimierungen zur Senkung von Betriebskosten. Durch sinnvolle und „gerechte“ Zuordnung von „Geschäftsfeldern“ können zusätzlich Synergien entstehen. Dies betrifft beispielsweise Energiedienstleistungen für Gebäude und Industrieprozesse, den Peer-to-Peer-Handel, Mieterstrommodell und Ähnliches. Einige Technologien befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Die Verbesserung der technisch-systemischen Schnittstellen und die Entwicklung erster Standards sollten stärker in den Fokus genommen werden, um die Verbreitung von Sektorenkopplungstechnologien zeitlich und bezüglich des Umfangs zu beeinflussen.

Sektorenkopplungsprojekte brauchen einen integrierten und langfristigen Planungshorizont. Nur durch auf Dauer stabile Rahmenbedingungen können technische Lösungen umgesetzt werden, um die Finanzierung der entstandenen Kosten gewährleisten zu können.

Wirtschaftlichkeit und integrierte Bewertung

Die Bewertung von Sektorenkopplungen muss in integrierter und ganzheitlicher Form erfolgen. Relevant sind technische, wirtschaftliche und Umwelt beeinflussende Aspekte. Über einen geeigneten Bilanzrahmen und die Beachtung der regionalen Rahmenbedingungen und Auswirkungen wird sichergestellt, dass die Bewertung ganzheitlich erfolgt. Erheblichen Einfluss haben die vorhandenen Governancestrukturen und Regularien innerhalb der Betrachtungsräume.

Umwelteffizienz

Die zentrale Zielsetzung der Sektorenkopplung ist die Verbesserung der Umwelteffizienz der gekoppelten Infrastrukturbereiche. Dazu gehören die Vermeidung von Energieverlusten z. B. bei der Stromerzeugung oder die Erschließung von erneuerbaren Energiequellen in Verbindung mit innovativen Ansätzen der Energiespeicherung (Power-to-Liquid; Power-to-Gas etc.). Durch die vorgestellten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (Grüne und Blaue Infrastruktur) können bisher übliche sektorale Ansätze ergänzt und verbessert werden.

Governancestrukturen und institutioneller Rahmen

Voraussetzung für die Mobilisierung der bestehenden Potentiale der Sektorenkopplung sind zunächst integrierte Planungs- und Governancestrukturen auf kommunaler Ebene. So ist durch eine Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens sicherzustellen, dass in den dezentralen (Planungs-)gebieten (z. B. Gemeinden oder Kommunen) eine sektorenübergreifende Bereitstellung von Infrastrukturen ermöglicht wird. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass bei Entscheidungen in Kommunen und Gemeinden stets die Wirkungen auf das Gesamtsystem in Deutschland mitgedacht werden, stellen sich bei der Sektorenkopplung auch Fragen der vertikalen Koordination im Mehrebenensystem (von der Kommunalen bis zur Bundesebene). Hierbei ist durch eine geeignete Gestaltung des institutionellen Rahmens

zu ermöglichen, dass die Aktivitäten auf Ebene der Gemeinden und Kommunen mit der Gesamttransformationsstrategie (auf zentraler Ebene) abgestimmt ist.

Ausblick

Gesamtperspektivisch betrachtet bestehen bei der Realisierung der Potentiale der Sektorenkopplung diverse Herausforderungen. Diese betreffen sowohl technisch-systemische Fragestellungen als auch Gestaltungsfragen des institutionellen Rahmens. Auf der Basis dieser Handreichung sind daher weitere Pilotprojekte und Forschungen anzustreben.

8. Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende (Hg.) (2014): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/power-to-heat-zur-integration-von-ansonsten-abgeregeltem-strom-aus-erneuerbaren-energien-1/>, zuletzt aktualisiert am Juni 2014, zuletzt geprüft am 08.05.2019.
- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende (Hg.) (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe/>, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 18.12.2019.
- Agora Energiewende (Hg.) (2019): Wie werden Wärmenetze grün? Dokumentation zur Diskussionsveranstaltung am 21. Mai 2019 auf den Berliner Energietagen 2019. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Waermenetze/155_Waermenetze_WEB.pdf, zuletzt aktualisiert am Mai 2019, zuletzt geprüft am 23.05.2019.
- Beckers, Thorsten; Bieschke, Nils (2019): Gestaltungsoptionen für die Koordination im Mehrebenen-System und die Organisation der kommunalen (Energie-)Infrastruktur-Systeme im Kontext der Sektorkopplung. Eine (institutionen-)ökonomische Analyse. Tagung Kommunale Sektorkopplung. Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP) der TU Berlin. Berlin, 06.12.2019.
- Benden, J.; Broesi, R.; Illgen, M. (2017): Multifunktionale Retentionsflächen. Teil 1. Wissenschaftliche Grundlagen. Hg. v. MURIEL Publikation.
- Bettgenhäuser, Kjell; Boermans, Thomas; Offermann, Markus; Krechting, Anja; Becker, Daniel (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Climate Change, 10). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3979.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2020.
- DIN 19650, 1999: Bewässerung.
- Bläser, Kerstin; Fox-Kämper, Runrid; Rawak, Myriam; Danielzyk, Rainer; Funke, Linda; Sondermann, Martin (2012): Urbanes Grün in der integrierten Stadtentwicklung. Strategien, Projekte, Instrumente. Forschungsbericht. Hg. v. Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MBWSV NRW). Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.ils-forschung.de/files/publikationen/pdfs/Urbanes_Gruen.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2020.
- Blasius, Erik (2016): Ein Beitrag zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen als steuerbare Lasten und mobile Speicher durch einen Aggregator. A contribution to the grid integration of electric vehicles as flexible loads and mobile storages through an aggregator, 2016. Online verfügbar unter https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/3859/blasius_erik.pdf.
- Bundesministerium für Umwelt, Natur und nukleare Sicherheit, BMU (Hg.): Aktionsprogramm Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/aktionsprogramm-klimaschutz/>, zuletzt geprüft am 16.04.2020.
- Bundesministerium für Umwelt, Natur und nukleare Sicherheit, BMU (Hg.) (2016): Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>, zuletzt aktualisiert am 26.02.2019, zuletzt geprüft am 26.02.2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bauen und Reaktorsicherheit, BMUB (Hg.) (2017): Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi (Hg.) (2014): Der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE): Mehr aus Energie machen. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/nape-mehr-aus-energie-machen.html>, zuletzt geprüft am 16.04.2020.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi (Hg.) (2019a): Energieeffizienz in Unternehmen. Das rechnet sich: Mehr aus Energie machen und Kosten senken. Online verfügbar unter <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEFF/Redaktion/DE/Publikation/das-rechnet-sich-energieeffizienz-in-unternehmen.html>, zuletzt aktualisiert am Mai 2019, zuletzt geprüft am 29.07.2019.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi (2019b): Energiedaten und -szenarien. Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, zuletzt geprüft am 16.12.2019.
- Brasseur, Guy P.; Jacob, Daniela; Schuck-Zöllner, Susanne (2017): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR (2015): Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt. Kommunale Handlungsansätze zur Unterstützung neuer Mobilitätsformen durch die Berücksichtigung gestalterischer Aspekte: ein Projekt des Forschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt)“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), betreut vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und

Raumordnung (BBR). Unter Mitarbeit von Christian Schlump, Thomas Wehmeier und Brigitte Helff. Stand März 2015. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

Bundesregierung (Hg.) (2020): Bundesregierung will CO₂-Ausstoß senken. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/kimaschutzgesetz-beschlossen-1679886>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Coutts, Andrew M.; Tapper, Nigel J.; Beringer, Jason; Loughnan, Margaret; Demuzere, Matthias (2013): Watering our cities. The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 37 (1), S. 2–28. DOI: 10.1177/0309133312461032.

Destatis (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen Waldgesamtrechnung. Berichtszeitraum 2014 - 2017. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Publikationen/Querschnitt-Sonstiges/waldgesamtrechnung-tabelleband-pdf-5852102.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.01.2020.

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2006): Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE). Dezember 2006. Hennef (Sieg) (DWA-Regelwerk Arbeitsblatt, A 100).

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2013a): Arbeitsblatt. Bemessung von Regenrückhalteräumen. Dezember 2013. Hennef (DWA-Regelwerk, A 117).

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2013b): Merkblatt. Energie aus Abwasser. Wärme- und Lageenergie. June 2009 [corrected version: January 2011]. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 114).

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2014): Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Juni 2014. Hennef (Sieg) (DWA-Regelwerk, A 272).

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2017): Merkblatt. Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 277).

Deutscher Verein für. Wasserwirtschaft (DWA) (2018): Merkblatt. Abwasserwärmenutzung. Entwurf September 2018. Hennef (DWA-Regelwerk, M 114).

Deutscher Wetterdienst, DWD (2019): Starkregen. Offenbach (Wetterlexikon). Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>, zuletzt geprüft am 28.10.2019.

eurostat (Hg.) (2015): Sewage sludge disposal from urban wastewater treatment, by type of treatment, 2015 (% of total mass). Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment_by_type_of_treatment_2015_\(%25_of_total_mass\)_V2.png&oldid=349285](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment_by_type_of_treatment_2015_(%25_of_total_mass)_V2.png&oldid=349285), zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 29.01.2020.

Fachvereinigung FBR (2009): Grauwasser-Recycling. Wasser zweimal nutzen. Darmstadt (Schriftenreihe fbr,12)..

Fachvereinigung FBR (2015/2016): Grauwasser-Recycling: fbr Dialog GmbH (Marktübersicht).

Felmeden, Jörg; Michel, Bernhard; Zimmermann, Martin (2016): Integrierte Bewertung neuartiger Wasserinfrastruktursystem. Vom städtischen Quartier über die Gesamtstadt bis zur regionalen Perspektive. Hg. v. Forschungsverbund netWORKS. Berlin (netWORKS-Papers, 32).

Georg, Wolfram; Teichmann, Björn (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept. Äußere Oststadt. Abschlussbericht. Amt für Stadtentwicklung und Stadtplanung Erfurt. Leipzig.

Häder, Michael (2014): Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer VS.

Hamann, Achim. (2015): Grundlagen der Abwasserwärmenutzung. Leitfaden für Architekten, Ingenieure und Stadtplaner. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Henning, Hans-Martin (2015): Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. 2., erw. und vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (BINE-Fachbuch).

HMUKLV (Hg.) (2019): Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen. Lagebericht 2018. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Wiesbaden.

HMWEVW (Hg.) (2019): Ergebnisse der Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlagen der Landesentwicklungsplanung. Projektion bis zum Jahr 2035 und Trendfortschreibung bis 2050. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. Wiesbaden.

HSL (Hg.) (2019): Die Bevölkerung der hessischen Gemeinden am 31. Dezember 2018. Fortschreibungsergebnisse Basis Zensus 09. Mai 2011. Statistische Berichte. Kennziffer: A I 2 mit A II, A III, A V - hj 2/18. Unter Mitarbeit von Hessisches Statistisches Landesamt. Wiesbaden.

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH: Urbane Sturzfluten (URBAS) (2020). Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten. Ereignisdatenbank. Aachen. Online verfügbar unter http://www.urbanesturzfluten.de/ereignisdb/ereignisse/ereignisse_view?&b_size=int=1000, zuletzt geprüft am 20.01.2020.

Hüser, Tobias (2017): Ein Beweis für die Wirtschaftlichkeit von Power-to-Gas-Anlagen. Online verfügbar unter <https://www.process.vogel.de/ein-beweis-fuer-die-wirtschaftlichkeit-von-power-to-gas-anlagen-a-629252/>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Icha, Petra (2019): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 12.11.2019.

Jansen, H.; Garde, J.; Bläser, D.; Frensemeier, E. (2015): Städtische Mobilstationen. In: Heike Proff (Hg.): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 515–532. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-658-09577-2_33.

Kempton, Willett; Tomić, Jasna (2005): Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. In: Journal of Power Sources 144 (1), S. 268–279. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.

Kerschberger, Alfred (2012): Energieeffizientes Bauen im Bestand. Konzepte, Methoden, Umsetzungen Mit Beiträgen von Markus Binder, Martin Brillinger, Gerhard Boeddinghaus, Friedrich Sick und Bodo Weidlich. Neuerscheinung. s.l.: VDE Verlag. Online verfügbar unter http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783800738342.

Kirchner, Almut; Kemmler, Andreas; Wünsch, Marco; Maur, Alex auf der; Ess, Florian; Koziel, Sylvie et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI. Hg. v. Prognos AG und The Boston Consultin Group (BGC). Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI). Online verfügbar unter https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/20180118_BDI_Studie_Klimapfade_fuer_Deutschland_01.pdf, zuletzt geprüft am 06.05.2020.

Kluge, Thomas; Libbe, Jens (Hg.) (2010): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Handreichung zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Ergebnisse des Forschungsverbunds netWORKS. Deutsches Institut für Urbanistik. Berlin: Difü (SÖF - sozial-ökologische Forschung).

König, Klaus W. (2017): Starkregen in Deutschland. In: Moderne Gebäudetechnik (Sonderausgabe), S. 30–32. Online verfügbar unter https://www.tga-praxis.de/sites/default/files/obge2017/MGT1317_030-032.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2019.

Lackmann, Tobias (2019): Adiabate Verdunstungskühlung in der Lüftungstechnik. Hg. v. Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V. (BTGA). Bonn (Almanach). Online verfügbar unter <http://www.btga.de/files/Almanach/2019/048-055.pdf>, zuletzt geprüft am 08.01.2020.

Lai, Dayi; Liu, Wenyu; Gan, Tingting; Liu, Kuixing; Chen, Qingyan (2019): A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. In: The Science of the total environment 661, S. 337–353. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.062.

Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (Hg.) (2020): HeatResilientCity. Hitzeresiliente Stadt- und Quartierentwicklung in Großstädten. Beispielquartier Erfurter Oststadt. Online verfügbar unter <http://heatresilientcity.de/projekt/beispielquartier-erfurt-oststadt/>, zuletzt geprüft am 22.01.2020.

Lindner, Stephanie; Riese, Albert; Amberg, Christine; Mantel, Christoph; Geyer, Cornelia (2006): Flächennutzungsplan der Landeshauptstadt Erfurt. Erläuterungsbericht. Hg. v. Stadtentwicklungsamt Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/fnp/fnp_erlaeuterungsbericht.pdf, zuletzt geprüft am 20.01.2020.

Menke, Peter; Thönessen, Manfred; Beckröge, Wolfgang; Bauer, Joachim (2013): Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen. Schwerpunkt Feinstaub. Hg. v. Stiftung Die Grüne Stadt. Berlin.

OIEau (2015): Retention ponds. Hg. v. Office International de l'Eau (Individual Natural Water Retention Measures). Online verfügbar unter http://nwrn.eu/sites/default/files/nwrn_ressources/u11_-_retention_ponds.pdf, zuletzt geprüft am 28.10.2019.

Paschotta, Rüdiger (2020): Kraft-Wärme-Kopplung. RP Photonics Consulting GmbH. Online verfügbar unter https://www.energie-lexikon.info/kraft_waerme_kopplung.html, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Pehnt, Martin et al. (2017): Wärmenetze 4.0 - Endbericht: Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturnetzen“. Hg. v. ifeu GmbH, adelphi consult GmbH, PricewaterhouseCoopers GmbH, Ecofys Germany GmbH, Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Gebaeude/Rahmenvertrag_BMWi/Studie_Umsetzung_Modellvorhaben_erneuerbare_Energien_hocheffiziente_saisonalspeichergestuetzte_Niedertemperaturwaermenetze.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2019.

- Pfertner, Maximilian (2017): Evaluation der Mobilstationen in Würzburg – Wahrnehmungen, Aufmerksamkeit und Effekte auf das Mobilitätsverhalten, Pkw-Besitz und CO₂ Emissionen. Masterarbeit. Technische Universität München, München. Institut für Verkehr. Online verfügbar unter https://www.wuerzburg.de/media/www.wuerzburg.de/org/med_19983/551227_abschlussbericht_mobilstationen_wuerzburg_180108.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2019.
- Purr, Katja; Oslek, Dirk, Lange, Martin; Adlunger, Kirsten (2016): Position. Integration von Power to Gas und Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Hg. v. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf, zuletzt aktualisiert am März 2016, zuletzt geprüft am 13.01.2020.
- Richter, Myrea; Safarik, Mathias; Heinrich, Carsten (2014): Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung. Ein Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer. Fachbroschüre. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/klimafreundliche_gebaeudeklimatisierung.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2020.
- Roskosch, Andrea; Heidecke, Patric (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Santamouris, M. (2013): Energy and Climate in the Urban Built Environment: Routledge.
- Schenuit, Carolin; Heuke, Reemt; Paschke, Jan (2016): Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Online verfügbar unter https://www.powertogas.info/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf, zuletzt aktualisiert am Juni 2016, zuletzt geprüft am 12.11.2019.
- Sempergreen (2020): Vorteile einer Grünfassade. Online verfügbar unter <https://www.sempergreen.com/de/loesungen/Gruenfassade/vorteile-gruenfassade>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Kommunikation (Berlin Bauen) (2010): Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Gebäudebegrünung. Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung (2010).
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Kommunikation (Berlin Bauen) (Hg.) (o. J.): Institut für Physik in Berlin-Adlershof. Stadtökologisches Modellvorhaben. Berlin. Online verfügbar unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/modellvorhaben/faltblatt_institut_physik.pdf, zuletzt geprüft am 14.01.2020.
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin SenUVK (2019): Stadtbäume für Berlin - Kampagne. Presse und Fotos 2019. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/stadtgruen/stadtbaeume/kampagne/de/presse/2019.shtml>, zuletzt geprüft am 07.02.2020.
- Sieker, Heiko; Steyer, Ruth; Büter, Björn; Leßmann, Dominika; von Tils, Robert; Becker, Carlo; Hübner, Sven (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (TEXTE, 111). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-16_texte_111-2019_verdunstungskuehlung.pdf, zuletzt geprüft am 28.10.2019.
- Spohr, Guido; Riediger, Ulf (2018): Stadtklima und Hitze. Kommunale Herausforderungen und Aktivitäten zur Klimaanpassung am Beispiel der Landeshauptstadt Erfurt. Schwerpunktbeitrag. In: UVP-report 32 (4), S. 160–167. Online verfügbar unter http://heatresilientcity.de/fileadmin/user_upload/heatresilientcity/files/publikationen/160_Spohr_Riediger.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2020.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hg.) (2017): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. 2. korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5>.
- Stiftung Die Grüne Stadt (Hg.) (2013): Nachhaltige Infrastruktur. Schwerpunkt: Wasser in der Stadt. Berlin.
- TÜV Süd (Hg.) (2020): Power-to-X (PtX / P2X). Online verfügbar unter <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>, zuletzt geprüft am 06.02.2020.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2016): Regenwassernutzung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelt-tipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/regenwassernutzung#-textpart-2>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2019): Indikator: Energieverbrauch für Gebäude (Umweltindikatoren). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#textpart-1>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2019, zuletzt geprüft am 28.10.2019.
- Urbaneck, Thorsten (2012): Kältespeicher. Grundlagen, Technik, Anwendung. Munich, Germany: Oldenburg Verlag. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=758267>.
- VDI (2009-2020): Adiabate Abluftkühlung. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. Berlin, zuletzt aktualisiert am <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/ressourcenschonendes-gebaeude/adiabate-abluftkuehlung/>, zuletzt geprüft am 07.01.2020.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (Hg.) (2019): Vernetzung von Wärme. Einsparpotential durch Abwärmenutzung. Online verfügbar unter <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/vernetzung-von-waerme/>, zuletzt geprüft am 11.11.2019.

Wanner, Oskar (2009): Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Untersuchung zu den Möglichkeiten und Grenzen der Abwasserenergienutzung, insbesondere der Wärmetauschverschmutzung, ihrer Auswirkung und möglichen Gegenmassnahmen in der Praxis. Dübendorf: Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG (Schriftenreihe der Eawag, 19).

Weiß, Holger (2019): Europa- und verfassungsrechtliche Rahmenbedingungen möglicher Reformoptionen. Tagung Kommunale Sektorkopplung. Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP) der TU Berlin. Berlin, 06.12.2019.

WHO Regional Office for Europe (Hg.) (2013): Review of evidence on health aspects of air pollution. REVIHAAP Project. Technical Report. Kopenhagen.

Wietschel, Martin et al. (2019): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Hg. v. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau (Climate Change, 03/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-erneuerbarer-energien-durch-0>, zuletzt aktualisiert am März 2019, zuletzt geprüft am 02.05.2019.

Wietschel, Martin; Plötz, Patrick; Klobasa, Marian; Müller-Kirchenbauer, Joachim; Kochems, Johannes; Hermann, Lisa et al. (2018): Sektorkopplung – Was ist darunter zu verstehen? Springer. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-018-0241-3>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Zukunftsnetz Mobilität NRW (Hg.) (2017): Handbuch Mobilstationen NRW. Online verfügbar unter https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/sites/default/files/handbuch_mobilstationen_2._auflage1.pdf, zuletzt aktualisiert am Juni 2017, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

Vollständiger Quellenachweis zu den Abbildungen

Abb. 1: Sektorenkopplung von Power-to-X, S. 10. eigene Darstellung.

Abb. 2: Niederschlagswasser und Grün – Blaue Infrastruktur, S. 11. eigene Darstellung auf Basis von Coutts, Andrew M.; Tapper, Nigel J.; Beringer, Jason; Loughnan, Margaret; Demuzere, Matthias (2013): Watering our cities. The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. In: Progress in Physical Geography: Earth and Environment 37 (1), S. 2–28. DOI: 10.1177/0309133312461032.

Abb. 3: Übersicht der Infrastrukturbereiche und Sektoren, S. 14. eigene Darstellung.

Abb. 4: Erläuterung der Definition Sektorenkopplung am Bsp. Strom, Kälte und Wärme, S. 16. eigene Darstellung.

Abb. 5: Intrasektorale Kopplung, Wärmerückgewinnung, S. 17. eigene Darstellung.

Abb. 6: Intrasektorale Kopplung, Mobilstation, S. 17. eigene Darstellung.

Abb. 7: Intersektorale Kopplung, Power-to-Heat, S. 18. eigene Darstellung.

Abb. 8: Technikausprägungen am Beispiel der Sektorenkopplung Power-to-Heat, S. 18. eigene Darstellung.

Abb. 9: Primärkopplung, Kraft-Wärme-Kopplung, S. 19. eigene Darstellung.

Abb. 10: Tertiärkopplung – Retention, Bewässerung und Verdunstungskühlung, S. 19. eigene Darstellung.

Abb. 11: Unterschiedliche Typen von Sektorenkopplungen, S. 20. eigene Darstellung.

Abb. 12: Zusätzliche Effekte möglicher Sektorenkopplung, S. 21. eigene Darstellung.

Abb. 13: Sektorenkopplungsmöglichkeiten im Planungsprozess erkennen und entwickeln, S. 23. eigene Darstellung auf Basis von DWA (2014): Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Juni 2014. Hennef (Sieg) (DWA-Regelwerk, A 272).

Abb. 14: Bewertungsrahmen der Sektorenkopplung, S. 24. eigene Darstellung.

Abb. 15: Ablauf des Delphi-Verfahrens, S. 25. Häder, Michael (2014): Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer VS.

Abb. 16: Matrix zur Übersicht über die betrachteten Sektorenkopplungen, S. 28. eigene Darstellung.

Abb. 17: Funktionsweise einer Power-To-Heat-Anlage, S. 29. eigene Darstellung.

Abb. 18: Hochleistungs-Eisspeicher im Container, mit Kapillarrohrrmatte, S. 29. BEKA Heiz- und Kühlmatten GmbH (Hg.) (2020): Eisspeicher-Kühlung für Gebäude und Industrieanlagen | BEKA. Online verfügbar unter <https://www.beka-klima.de/eis-speicher-kuehlung/>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Abb. 19: Funktionsweise einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage, S.30. eigene Darstellung.

Abb. 20: E-Auto mit Ladesäule; Foto: Stadtwerke Emden GmbH, S. 30. www.stadtwerke-emden.de.

Abb. 21: Elektrolyseanlage in Falkenhagen, S. 31. Schoof, René; Dupont, Maike (2018): Inbetriebnahme einer Methanisierungsanlage in Falkenhagen. Hg. v. DVGW energie| wasser-praxis. Online verfügbar unter <https://www.energie-wasser-praxis.de/technik/artikel/inbetriebnahme-einer-methanisierungsanlage-in-falkenhagen>, zuletzt aktualisiert am 04.08.2020, zuletzt geprüft am 04.08.2020.

Abb. 22: Power-to-Gas-Anlage mit Biologischer Methanisierung, Anlage Allendorf (Eder); Viessmann Werke, <http://www.micro-benergy.com>.

Abb. 23: Versuchsanlage zur Synthese von Kraftstoffen aus dem CO₂ der Luft, S. 32. Karlsruher Institut fuer Technologie (2019): KIT – Das KIT - Medien - Presseinformationen - PI Archiv – PI 2019 - Kohlendioxidneutrale Kraftstoffe aus Luft und Strom. Online verfügbar unter https://www.kit.edu/kit/pi_2019_107_kohlendioxidneutrale-kraftstoffe-aus-luft-und-strom.php, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Abb. 24: Energieflussbild: Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung, S. 32. Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin (2013): Industrielle Abwärmennutzung. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Kurzstudie_Abwaermenutzung.pdf, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Abb. 25: Absorptionskältemaschine, S. 33. RÜTGERS GmbH & Co. KG KÄLTE : KLIMA (Hg.) (2019): Absorptionskältemaschinen auf Lithium-Bromid-Basis - Rütgers. Online verfügbar unter <https://www.ruetgers.com/produkte/absorptions-kaeltemaschinen-waermepumpen/>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2020, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

Abb. 26: Grasmulde und Retentionsbecken; Schöne Aussichten Landschaftsarchitektur, S. 33, Schöne Aussichten Landschaftsarchitektur, Hamburg, Kassel. Online verfügbar unter <https://schoe-neaussichten.net/portfolio/003/>, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Abb. 27: Anlagen der sozialen Infrastruktur wie „Skatebowls“ können zur Retention genutzt werden, S. 34. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/skateboard-mann-spass-freizeit-1741223/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 28: Gewässer wie der hier abgebildete Teich können der Retention von Niederschlagswasser dienen, S. 34. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/b%C3%A4ume-garten-green-baum-2085598/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 29: Mögliche Quelle für Grauwasser ist das Wasser aus Handwaschbecken, S. 35. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/h%C3%A4nde-waschen-waschen-sie-ihre-h%C3%A4nde-4940239/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 30: Funktionsweise eines Kreuzstromwärmetauschers, S. 3. eigene Darstellung.

Abb. 31: Schema eines Kanalwärmetauschers, S. 36. KASAG (Hg.) (o. J.): Heat transmission solutions for wastewater heat recovery in the wastewater canal, sewer. Sewer heat exchangers, patented solution KASAG Plate. Online verfügbar unter <https://www.kasag.com/en/product/renewable-energies-systems-plants-heat-exchanger-heat-from-wastewater-heat-exchanger-solutions-wastewater-canal/>, zuletzt geprüft am 07.02.2020.

Abb. 32: Falltürme dienen der Faulgasgewinnung und Stabilisierung des Klärschlammes, S. 36. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/hamburg-altona-hafen-ei-kl%C3%A4ranlage-889657/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 33: Ausgestaltung einer Mobilstation als Modulsystem, S. 37. Zukunftsnetz Mobilität NRW (Hg.) (2017): Handbuch Mobilstationen NRW. Online verfügbar unter https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/sites/default/files/handbuch_mobilstationen_2_auflage1.pdf, zuletzt aktualisiert am Juni 2017, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

Abb. 34: Funktionsweise Vehicle-to-Grid, S. 37. eigene Darstellung

Abb. 35: Stadtbäume tragen zur Verdunstungskühlung durch Transpiration bei, S. 38. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/szene-park-bank-b%C3%A4ume-ansichten-968375/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 36: Sukkulente dienen der extensiven Begrünung von Gründächern, S. 38. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/sukkulente-pflanze-gartenarbeit-847652/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 37: Künstliche Becken im urbanen Umfeld verbessern das Mikroklima durch Verdunstungskühlung, S. 39. Online verfügbar unter <https://pixabay.com/de/photos/architektur-geb%C3%A4ude-stadt-modern-4418026/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 38: Sprinklerbewässerung, S.39, Online verfügbar unter <https://pixabay.com/photos/water-watering-garden-summer-1544808/>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Abb. 39: Das Planungsgebiet Äußere Oststadt in der Landeshauptstadt Erfurt, westlich angrenzend die Altstadt, südlich davon der Erfurter Hauptbahnhof, S. 44. Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Abb. 40A: Teilquartiere des integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt, S. 45. Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Abb. 40B: Städtebauliches Strukturkonzept des Integrierten städtebaulichen Rahmenkonzeptes Äußere Oststadt, S. 45. Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Abb. 41: Energieflussbild der Wärmeversorgung bei der Kopplung der Sektoren Abwasser und Wärme. Weitere Bestandteile sind solarthermische Anlagen und das Bestandsgasnetz, S. 48. eigene Darstellung

Abb. 42: Städtebauliches Strukturkonzept Äußere Oststadt, Quartier Blumenschmidtstraße mit einer möglichen Anordnung der Retentionsflächen (rot, grün), S. 50. eigene Darstellung auf Basis von Georg, Wolfram; Teichmann, Björn (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept. Äußere Oststadt. Abschlussbericht. Amt für Stadtentwicklung und Stadtplanung Erfurt. Leipzig.

Abb. 43A: Städtebauliche Strukturen im Vergleich: Referenzquartier in der Inneren Krämpfervorstadt, S. 54. Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Abb. 43B: Aktuelle Planungen der Äußeren Oststadt, S. 54. Landeshauptstadt Erfurt (Hg.) (2015): Integriertes städtebauliches Rahmenkonzept Äußere Oststadt. Unter Mitarbeit von Büro für urbane Projekte. Erfurt. Online verfügbar unter https://www.erfurt.de/mam/ef/leben/stadtplanung/ip_tk/aeussere-oststadt/rahmenkonzept_09-2015.pdf.

Abb. 44: Region Mittelhessen mit Landkreisen, S. 56. Trepte, Andreas (2006): Mittelhessen. Kreise im Regierungsbezirk Gießen. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Mittelhessen_districts.png, zuletzt geprüft am 10.02.2020.

Abb. 45: Lage der kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen in der Region Mittelhessen, S. 57. HMUKLV (Hg.) (2019):

Vollständiger Tabellennachweis

Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen. Lagebericht 2018. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Wiesbaden.

Abb. 46: Besiedlungsdichte in Hessen nach Landkreisen, S. 59. HSL (Hg.) (2019): Die Bevölkerung der hessischen Gemeinden am 31. Dezember 2018. Fortschreibungsergebnisse Basis Zensus 09. Mai 2011. Statistische Berichte. Kennziffer: A I 2 mit A II, A III, A V - hj 2/18. Unter Mitarbeit von Hessisches Statistisches Landesamt. Wiesbaden.

Abb. 47: Kommunale Kläranlage in Mittelhessen (RP Gießen) und in Südhessen (RP Darmstadt), S. 60 HMUKLV (Hg.) (2019): Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen. Lagebericht 2018. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Wiesbaden.

Tabelle 1: Potentialmatrix möglicher Sektorenkopplungen, S. 42. eigene Darstellung.

Tabelle 2: Erforderliche Speichervolumina und verfügbare Grün- und Freiflächen für die Anordnung von Retentionsflächen, S. 49. eigene Darstellung.

Tabelle 3: Kühlpotential durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser, S. 53. eigene Darstellung.

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Kühlpotential und -bedarf durch die adiabate Kühlung mit Regenwasser, S. 53. eigene Darstellung.

Tabelle 5: CO₂-Einsparpotential der adiabaten Kühlung gegenüber konventionellen Kühlanlagen, S. 53. eigene Darstellung.

Tabelle 6: Klärschlammanfall der Kläranlagen mit einem P-Gehalt im Klärschlamm von mindestens 2%, Region Mittelhessen, 2012-2014, S. 58. HMWEVW (Hg.) (2019): Ergebnisse der Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlagen der Landesentwicklungsplanung. Projektion bis zum Jahr 2035 und Trendfortschreibung bis 2050. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. Wiesbaden.

Tabelle 7: Bevölkerungsentwicklung in Hessen und den Regierungsbezirken von 2017 bis 2035 (Projektion) bzw. bis 2050 (Trend), S. 61. HMWEVW (Hg.) (2019): Ergebnisse der Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlagen der Landesentwicklungsplanung. Projektion bis zum Jahr 2035 und Trendfortschreibung bis 2050. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. Wiesbaden.

Autoren und Beteiligte

Lehrstuhl Stadttechnik der BTU

Das Fachgebiet Stadttechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Senftenberg verfügt über ein profundes ingenieurtechnisches Fachwissen in den Themenbereichen Stadtentwicklung, Stadtumbau, Energie und Klimaschutz sowie der kommunalen Ver- und Entsorgungssysteme, welches in Forschung und Lehre zur Anwendung kommt. Schwerpunktthemen des Fachgebietes sind seit Jahren die Zusammenhänge zwischen Stadtentwicklungsprozessen und technischen Infrastruktursystemen der Ver- und Entsorgung, hier im Besonderen Demografie, der Stadtumbau und die energetische Stadterneuerung, die Transformation der Versorgungssysteme und Einbindung erneuerbarer Energieträger sowie Anpassungsbedarfe infolge von Veränderungen der Wettercharakteristik.

Forschungsarbeiten des Lehrstuhles zeigen systematisch die direkten und indirekten Abhängigkeiten von Infrastruktursystemen in wachsenden und schrumpfenden Städten auf. Im Fokus liegen die Auswirkungen auf Funktion, Kosten und Umweltbedingungen dieser Systeme. Dabei sind insbesondere in den zurückliegenden Jahren Themen der Energiewende, des Klimawandels und der Daseinsvorsorge im Zusammenspiel zwischen besiedelten Räumen und einer nachhaltigen Weiterentwicklung technischer Infrastrukturen sowie die Implementierung von Systemalternativen als Forschungsfelder hinzugekommen.

Das Forschungsvorhaben INFRA-URBAN wurde durch Prof. Dr.-Ing. Matthias Koziol (Teilprojektleitung), Dipl.-Ing. Cornelia Siebke, Dipl.-Ing. Stefan Simonides-Noack und Pauline Richter bearbeitet.

COOPERATIVE Infrastruktur und Umwelt (CIU)

Das Ingenieurbüro COOPERATIVE Infrastruktur und Umwelt mit Sitz in Kassel und Reinheim ist in den Bereichen Kommunale Infrastruktur und Technischer Umweltschutz tätig. Entsprechend der komplexen Aufgaben ist es interdisziplinär mit technisch-wirtschaftlichen Schwerpunkten zusammengesetzt. Es besteht seit 1978 und ist im Auftrag von Kommunen, Behörden und kommunalen Unternehmen sowie von Verbänden und Industriebetrieben tätig.

Ausgehend von den klassischen Infrastrukturbereichen Verkehr, Wasser, Energie und Abfall werden im Rahmen von Forschungsprojekten und wissenschaftlichen Studien, gutachterlichen Stellungnahmen, Ingenieurberatungen und Konzeptstellungen sowie Fachplanungen folgende Fachgebiete abgedeckt:

- Ressourcenmanagement
- Klimaschutz/Klimaanpassung
- Umweltökonomie/Kommunalwirtschaft
- Infrastruktur
- Verkehr und Mobilität

Hierbei steht die Integration von Forschung und Umsetzung in der Praxis im Vordergrund. Das Forschungsvorhaben INFRA-URBAN wurde im Wesentlichen durch Dr.-Ing. Bernhard Michel, Luise Schmidt und Dr.-Ing. Jörg Felmeden (Teilprojektleitung) bearbeitet.

Stadtwerke Erfurt Energie GmbH (SWE)

Die SWE Energie GmbH sind lokaler systemübergreifender Energiedienstleister und Hauptakteur der technischen Entwicklungen im Modellgebiet Erfurt Äußere Oststadt. Die SWE Energie GmbH ist ein Tochterunternehmen der SWE Stadtwerke Erfurt GmbH. Hauptansprechpartner und Bearbeiter im Projekt INFRA-URBAN war Herr Frank Springer. Die SWE Energie GmbH beschäftigt sich aktiv damit, wie der Anteil der emissionsfreien Wärme im Fernwärmenetz erhöht werden kann. Einen deutlichen Anteil daran sieht das Unternehmen in der Sektorenkopplung. Das Projekt INFRA-URBAN brachte hierbei konkrete Erkenntnisse für die praktische Umsetzung vor Ort, aber auch für künftige Überlegungen der Netzgestaltung.

Stadtwerke Gießen (SWG)

Die Stadtwerke Gießen AG (SWG) sind der regionale Energieversorger der Stadt Gießen und der Region Mittelhessen. Die Stadtwerke versorgen die Region mit Strom, Erdgas und Wärme, liefern Trinkwasser an verschiedene Städte und Gemeinden und sind darüber hinaus der Konzessionsinhaber der Stadtbuslinien in Gießen. Die SWG ist wichtiger Akteur im Modellgebiet Mittelhessen und befasst sich dort mit der Sektorenkopplung von Abfall (Klärschlamm) und Wärme. Hauptansprechpartner und Bearbeiter im Projekt INFRA-URBAN war Herr Matthias Fink.

