

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.....	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1. Einführung	6
1.1. Aufbau der Steckbriefe	8
1.1.1. Kopfzeile.....	8
1.1.2. Steckbriefabschnitte.....	9
1.1.3. Bedeutung der verwendeten Icons	12
1.2. Abschätzung der Emissionen und Einsparpotentiale.....	14
1.3. Potentialmatrix	15
2. Steckbriefe.....	18
2.1. Sektor Strom.....	18
2.1.1. Power-to-Heat.....	20
2.1.2. Power-to-Cold	25
2.1.3. Kraft-Wärme-Kopplung	29
2.1.4. E-Mobilität.....	34
2.1.5. Power-to-Gas (Wasserstoff).....	38
2.1.6. Power-to-Gas (Methan).....	43
2.1.7. Power-to-Liquid.....	48
2.2. Sektor Wärme	51
2.2.1. Wärmerückgewinnung.....	52
2.2.2. Sorptionskälte.....	57
2.3. Sektor Abwasser	61
2.3.1. Temporäre Retention (Grüne Infrastruktur).....	62
2.3.2. Temporäre Retention (Soziale Infrastruktur)	66
2.3.3. Retention (Blaue Infrastruktur).....	69
2.3.4. Betriebswasserbereitstellung aus Grauwasser	72
2.3.5. Adiabate Kühlung mit Regenwasser	75
2.3.6. Abwasserwärmerückgewinnung.....	78
2.4. Sektor Abfall	83
2.4.1. Wärme aus Klärschlammmonverbrennung	84
2.5. Sektor Verkehr	89
2.5.1. Mobilstation	90
2.5.2. Vehicle-to-Grid (VtG).....	95
2.6. Sektor Grüne Infrastruktur	98
2.6.1. Verdunstungskühlung auf Flächen der Grünen Infrastruktur	99
2.6.2. Wärmedämmung von Gebäuden durch Bauwerksbegrünung.....	102
2.7. Sektor Blaue Infrastruktur	106
2.7.1. Verdunstungskühlung durch offene Wasserflächen	107
2.7.2. Bewässerung aus Gewässern der Blauen Infrastruktur	110
Glossar	115
Literatur	116
Querverweise.....	129
Autoren und Beteiligte	130

Abkürzungsverzeichnis

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

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sektorenmatrix; eigene Darstellung	7
Abb. 2: Steckbriefe: Aufbau der Kopfzeile; eigene Darstellung	8
Abb. 3: PtH: CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	23
Abb. 4: PtC: CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49	27
Abb. 5: KWK: Primärenergieeinsatz im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 101.....	31
Abb. 6: KWK: CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 17 und Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 101	32
Abb. 7: PtG (Wasserstoff): CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49	41
Abb. 8: PtG (Methan): CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49	46
Abb. 9: Sorptionskälte: Primärenergie im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis der DIN V 18599	59
Abb. 10: Sorptionskälte: CO ₂ -Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10, Lauf et al. 2019: S. 49 und Fritsche et al. 2008: S. 14	60
Abb. 11: Abwasserwärmerückgewinnung: CO ₂ -Emissionen im Vergleich; DWA 2013.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potentialmatrix der allgemein beschriebenen Sektorenkopplungen; eigene Darstellung.....	16
Tabelle 2: Substitution von Erdgas durch PtH; Purr et al. 2016;	22
Tabelle 3: Substitution von Primärenergie durch KWK; Schmitz 2005: S. 18 und Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 105f.....	31
Tabelle 4: E-Mobilität: Emissionsverminderung; Agora Verkehrswende 2019.....	36
Tabelle 5: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Stromsektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	41
Tabelle 6: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Wärmesektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	41
Tabelle 7: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Verkehrssektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	41
Tabelle 8: PtG (Methan): Einsparungen im Stromsektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	46
Tabelle 9: PtG (Methan): Einsparungen im Wärmesektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49.....	46
Tabelle 10: Leistungszahlen und Effizienz von Kompressionskälteanlagen im Vergleich zu adiabaten Systemen; VDI 2020	77
Tabelle 11: Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Verbrennungsanlagen für Klärschlamm; Tsybina et al. 2018	87

1. Einführung

Im Band II der Handreichung zur Sektorenkopplung werden die im Band I kurz vorgestellten Sektorenkopplungen (Beispiele der Sektorenkopplung, Kapitel 5, Band I) anhand von Steckbriefen detailliert beschrieben. Kommunen und Unternehmen können in den Steckbriefen erfahren, welche Potentiale in verschiedenen Sektoren zu heben sind. Es wird darauf eingegangen, unter welchen Voraussetzungen eine Umsetzung gelingen kann, bzw. worauf bei der Umsetzung zu achten ist.

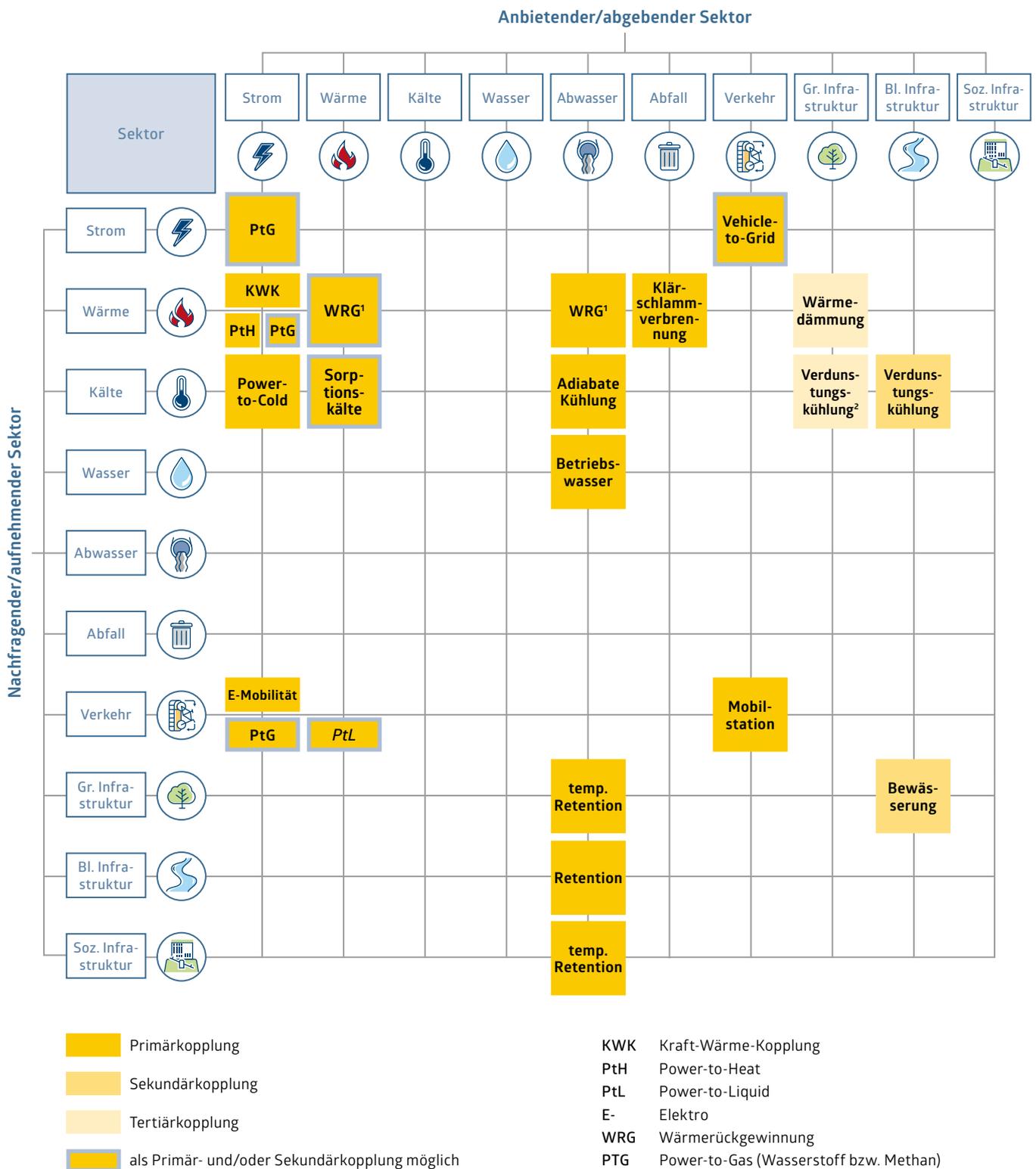
Die betrachteten Sektorenkopplungen können der folgenden Sektorenmatrix (Abbildung 1) entnommen werden.

Mit zunehmendem Bekanntheits- und Anwendungsgrad der Sektorenkopplung können sich weitere, neue Möglichkeiten der Sektorenkopplung ergeben, die hier noch keine Beachtung finden. Die vorgestellten Kopplungen sind im Rahmen von Forschungsprojekten oder Reallaboren bereits umgesetzt worden, so dass in den Steckbriefen teilweise auf Erfahrungen zurückgegriffen wurde.

Zu Beginn einiger Kapitel wird auf Besonderheiten eingegangen, die für alle im jeweiligen Sektor möglichen Kopplungstechnologien Gültigkeit besitzen, sofern allgemeine Hinweise notwendig sind.

Die einzelnen Sektorenkopplungen werden in Form von einheitlich gegliederten Steckbriefen vorgestellt.

Die Reihenfolge der Steckbriefe gliedert sich nach dem Angebotssektor der Kopplung gemäß Abfolge in Abbildung 1.



1 WRG aus Kanalnetz, häuslichem Grauwasser oder Industrie-/Gewerbebetrieb
 2 Verdunstungskühlung permanent oder temporär
kursiv Technologie vorhanden, aber im kommunalen Bereich irrelevant

Abb. 1: Sektorenmatrix; eigene Darstellung

1.1. Aufbau der Steckbriefe

1.1.1. Kopfzeile

Jeder Steckbrief enthält eine Kopfzeile, die dreiteilig aufgebaut ist. Zentral befindet sich der Name der jeweiligen Sektorenkopplung. Links daneben ist ein Piktogramm, das den Bezug zur oben gezeigten Sektorenmatrix im Kleinformat darstellt. Farbig markiert ist diejenige Stelle, an welcher die Technologie steht (es können ggf. auch mehrere Stellen markiert sein). Rechtsbündig ist eine Darstellung der gekoppelten Sektoren anhand eines Piktogramms zu finden.

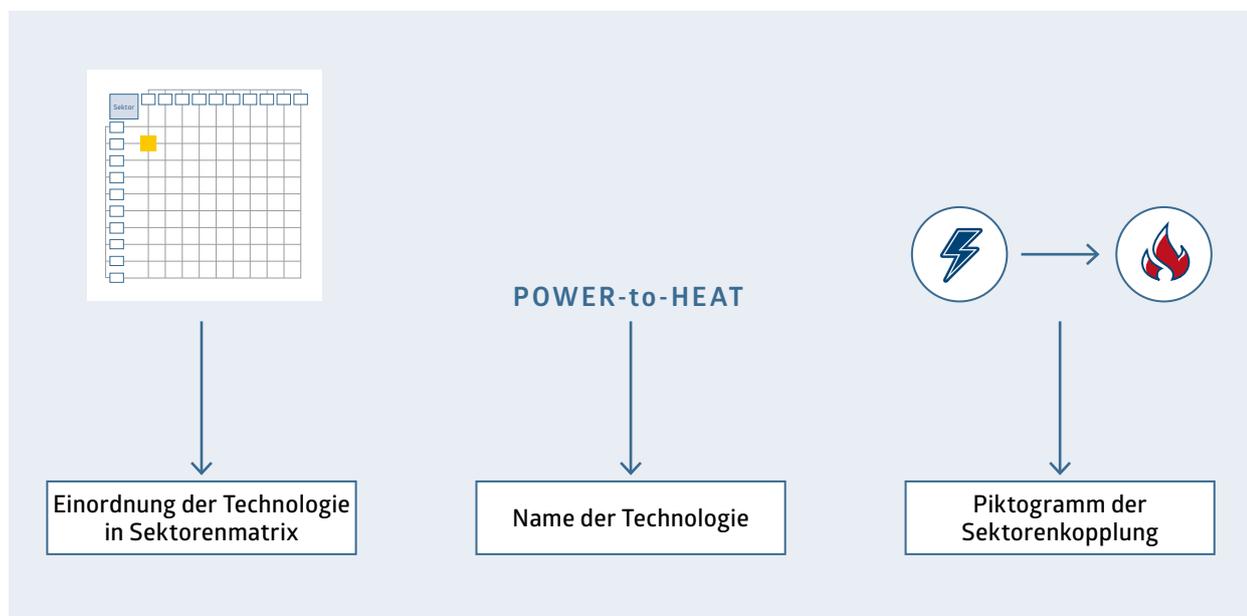
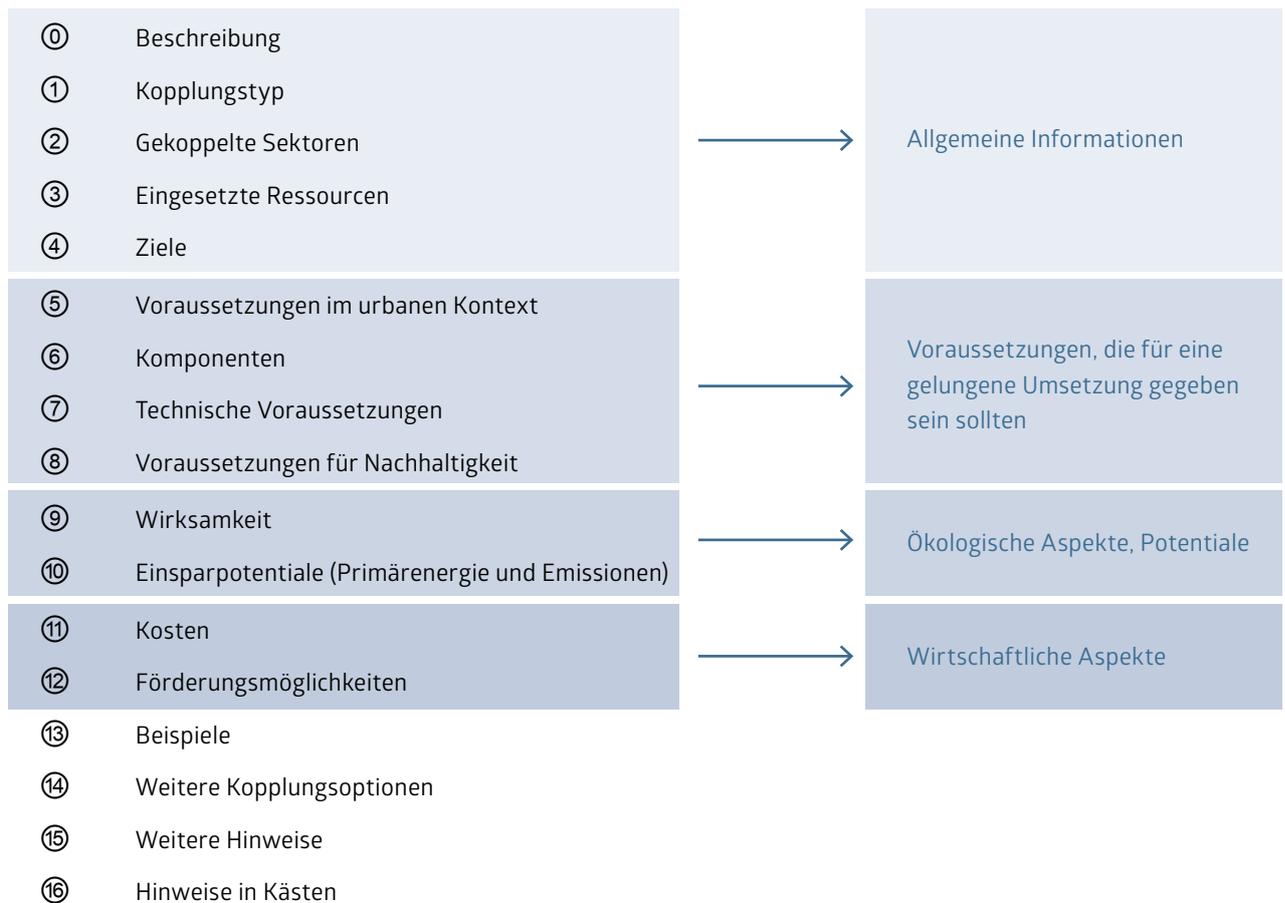


Abb. 2: Steckbriefe: Aufbau der Kopfzeile; eigene Darstellung

1.1.2. Steckbriefabschnitte

In den Steckbriefen werden jeweils folgende Aspekte beschrieben:



Die Aspekte sind nummeriert, um einen Bezug zur Potentialmatrix herzustellen.

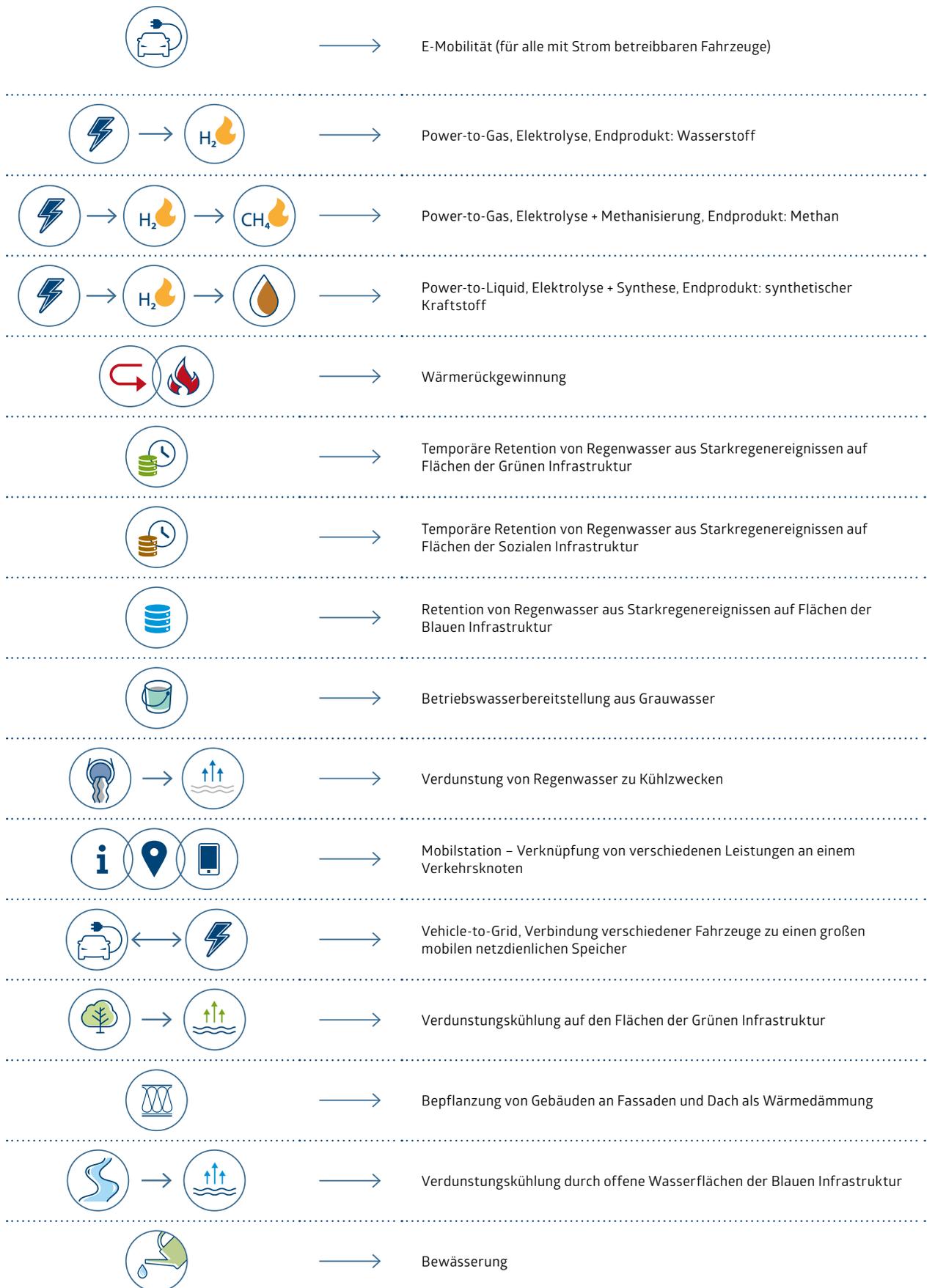
Im Folgenden wird vorgestellt, welche Informationen unter den einzelnen Aspekten zu finden sind.

① Beschreibung	Beschreibung des allgemeinen Kontextes rund um die Technologie der Sektorenkopplung sowie der Motivation für deren Einsatz und ggf. kurze Erläuterung der Funktionsweise
① Kopplungstyp	Einordnung der Sektorenkopplung in die jeweilige Kopplungsstufe: Primär-, Sekundär-, Tertiär- und/oder Quartiärkopplung. Grundsätzliches zur Methodik der Einordnung wird in Band I der Handreichung in Struktur von Sektorenkopplungen, Kapitel 3.3 erläutert.
② Sektoren	
③ Eingesetzte Ressourcen	Aufzählung der Stoffströme, die der anbietende bzw. abgebende Sektor zur Verfügung stellt und weiterer, die ggf. genutzt werden müssen, um die Kopplung durchzuführen. Für die Durchführung der Sektorenkopplung Power-to-Gas (PtG) wird für die Methanisierung beispielsweise neben elektrischer Energie zusätzlich Kohlenstoffdioxid (CO ₂) benötigt. Hilfsenergien werden in der Regel nicht genannt.
④ Ziele	Nennung von Zielen, die durch den Einsatz der Sektorenkopplung verfolgt werden, sowie Potentialen, die sich aus ihr ergeben.
⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext	Charakterisierung der Siedlungsstruktur, die für eine erfolgreiche Umsetzung notwendig ist. Zusätzlich können Informationen zum Platzbedarf im öffentlichen Raum (ober- oder unterirdisch) und zur Versorgungsstruktur gegeben werden.
⑥ Komponenten	Aufzählung von Komponenten, die für die Umsetzung der Sektorenkopplung gebraucht werden. Die Aufzählungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, je nach Anwendungsfall können weitere Komponenten zum Einsatz kommen.
⑦ Technische Voraussetzungen	Nennung technischer Voraussetzungen. „Technisch“ wird in dieser Kategorie sehr weit gefasst. Im Allgemeinen handelt es sich um technische, für die Planung und/oder Umsetzung der Sektorenkopplung relevante Angaben.
⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit	Nennung von Aspekten der ökologischen (Dauerhaftigkeit, Emissionsminderung) und sozialen Nachhaltigkeit (Gesundheit, Lärmschutz) sowie von Hinweisen zum Einsatz von Stoffen oder Produkten und ihrer Wirkung auf die Umwelt.

⑨ Wirksamkeit	Nennung von Wirkungsgraden, Jahresarbeits- oder Leistungszahlen sowie Energieverbräuchen, bzw. Effekten, die durch die Sektorenkopplung oder ihrer jeweiligen Komponenten erreicht werden können. Es können auch Maßnahmen aufgezählt werden, die zu einer Effizienzsteigerung führen.
⑩ Einsparpotentiale	Abschätzung der Einsparungen einer Sektorenkopplung gegenüber herkömmlichen Verfahren anhand von Berechnungen, Studien und/oder Beispielen. Die Einsparungen beziehen sich je nach Sektorenkopplung auf verschiedene In- und Outputs, zum Beispiel Primärenergie, CO ₂ -Emissionen, Trinkwasser, monetäre Einsparungen. Das Berechnungsverfahren und die verwendeten Daten werden im Anschluss an diesen Steckbrief in Kapitel 1.2 Abschätzung der Emissionen und Einsparpotentiale aufgezeigt.
⑪ Kosten	Abschätzung von Investitions- und Betriebskosten anhand von Beispielen und/oder Studien, sofern verfügbar, und ggf. Nennung von Einflussfaktoren, die sich auf die Wirtschaftlichkeit der Sektorenkopplung auswirken. Die Kosten sind stark von den jeweiligen Gegebenheiten und von der Durchdringung der für die Sektorenkopplung benötigten Komponenten am Markt abhängig. Manche Sektorenkopplungen wurden erst im Rahmen von Reallaboren umgesetzt, wodurch realistische Kostenschätzungen nicht möglich sind, jedoch können Größenordnungen festgehalten werden. Die genannten Kosten beziehen sich lediglich auf die Investition in einzelne Komponenten der Sektorenkopplung. Es fallen ggf. weitere Kosten für zum Beispiel Planungsaufgaben, Lieferung, Installation, Inbetriebnahme (Anmeldung, Genehmigung) etc. an.
⑫ Förderungsmöglichkeiten	Nennung von Förderprogrammen, die für die Umsetzung der Sektorenkopplung genutzt werden können. Detaillierte Informationen sind den angegebenen Quellen zu entnehmen.
⑬ Beispiele	Auswahl von realisierten Sektorenkopplungen mit Quellverweisen.
⑭ Weitere Kopplungsoptionen	Nennung nachfolgender Kopplungsmöglichkeiten. Wie im Kapitel: Struktur von Sektorenkopplungen (Kapitel 3.3, Band I) erläutert, können Kopplungsprodukte wieder ein Angebot für einen anderen Sektor darstellen. Es werden mögliche Sekundär- und Tertiärkopplungen aufgezählt.
⑮ Weitere Hinweise	Ggf. Aufführung relevanter Informationen, die keinem der zuvor genannten Aspekte entsprechen, sowie von Literaturhinweisen.
⑯ Hinweise in Kästen	Angabe von Zusatzinformationen, die terminologische Erläuterungen, über den Steckbrief hinausgehende Gedanken o. ä. enthalten können.

1.1.3. Bedeutung der verwendeten Icons

	→	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.
	→	Kraft-Wärme-Kopplung



1.2. Abschätzung der Emissionen und Einsparpotentiale

Die CO₂-Emissionen einiger Sektorenkopplungen und ihre damit einhergehenden Einsparpotentiale wurden anhand von Berechnungen abgeschätzt. Dies betrifft vor allem die strombasierten Kopplungen (Power-to-X (PtX), Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)), aber auch die Sorptionskältemaschine. Im Folgenden werden schrittweise die Methodik mit einem Beispiel sowie die notwendigen Annahmen aufgezeigt.

1. Bestimmung der eingesetzten Ressourcen (Ausgangsenergie) sowie der Zielenergie, die durch die Sektorenkopplung bereitgestellt wird. Durch Power-to-Heat (PtH) wird Strom (Ausgangsenergie) in Wärme (Zielenergie) umgewandelt. Weitere Zielenergien anderer Sektorenkopplungen können Strom, Kälte, eine Fahrdienstleistung etc. sein.
2. Betrachtung des Wirkungsgrades. Anhand des Wirkungsgrades des Prozesses (bei mehreren Schritten: der Prozesskette) kann ermittelt werden, wie viele Einheiten der Ausgangsenergie für eine Einheit der Zielenergie benötigt werden. Bei PtH kann die Wärme durch eine Wärmepumpe erzeugt werden, die neben der Umweltenergie auch Strom benötigt. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe beträgt im Beispiel 3,3. Mit 1 kWh Strom können also $3,3 \text{ kWh}_{\text{Wärme}}$ erzeugt werden. Für $1 \text{ kWh}_{\text{Wärme}}$ werden 0,3 kWh Strom benötigt.
3. Bestimmung der spezifischen CO₂-Emissionen der Sektorenkopplung. Die Ausgangsenergie besitzt einen spezifischen Emissionsfaktor, der zur Ermittlung der Emissionen herangezogen wird. Diese Faktoren sind für jeden Energieträger bzw. jede Ausgangsenergie verschieden. Es werden folgende Emissionsfaktoren verwendet:
 - Erdgas mit 201 g CO₂/kWh ([1] S. 17);
 - Braunkohle mit 407 g CO₂/kWh ([1] S. 17);
 - Diesel mit 266 g CO₂/kWh ([2] S. 466).

Strom kann aus verschiedenen Quellen bezogen werden, die eine unterschiedliche CO₂-Belastung hervorrufen.

- „Strommix 2016“
Hiermit ist der deutsche Strommix im Jahr 2016 gemeint, den das Umweltbundesamt mit 523 g CO₂/kWh berechnet hat (UBA) ([1] S. 10).
- „Windstrom“
Strom aus erneuerbaren Energien kann unterschiedlichen Quellen entstammen. Die verschiedenen Erzeugungsarten wie beispielsweise Photovoltaik oder Windenergie weisen unterschiedliche CO₂-Emissionsfaktoren auf [3] und zudem schwanken deren jeweilige Anteile, so dass es keinen gemeinsamen Emissionsfaktor gibt, der lediglich alle erneuerbaren Energien berücksichtigt. Der Anteil der Windenergie an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien betrug im Jahr 2018 40 %, womit die Windenergie den „größten Beitrag zur Stromerzeugung aus EE“ leistete [4]. Für die Abschätzung der Emissionen wird daher der spezifische Emissionsfaktor der Windenergie von 10 g CO₂/kWh ([3] S. 50) genutzt.

Fernwärmenetze weisen sehr unterschiedliche spezifische Emissionsfaktoren auf, vor allem da es noch keine einheitlichen Bilanzierungsverfahren gibt und die Emissionen entweder größtenteils der Wärme oder aber dem Strom zugeschrieben werden können. Für die Berechnung der Emissionen werden die folgende Werte verwendet.

- Erzeugungsmix Fernwärme
Das UBA berechnet die THG-Emissionen von Fernwärme im Jahr 2005 zu 222 g CO₂/kWh ([5] S. 14), wobei dieser Wert die THG-Emissionen von verschiedenen Fernwärmerzeugungsarten zu einem „Erzeugungsmix für Fernwärme kombiniert und dabei auch die Verluste des Wärmenetzes“ ([5] S. 14) berücksichtigt werden.
- Fernwärme mit niedriger CO₂-Belastung
Als Fernwärmenetz mit einem niedrigen CO₂-Emissionsfaktor wird beispielhaft das Netz der Blockheizkraftwerks-, Träger- und Betreiber-gesellschaft mbH Berlin (BTB) in Adlershof gewählt. Die BTB gibt einen Primärenergiefaktor

von 0,25 und einen spezifischen Emissionswert der Fernwärme von 63 g CO₂/kWh ([6]) an. Es ist zu beachten, dass das Bilanzierungsverfahren zu Lasten der Stromerzeugung gewählt worden sein könnte. Die niedrigen Zahlen sollen jedoch die Vorteilhaftigkeit von Wärmenetzen mit einer geringen fossilen Belastung darstellen, wie sie durch die Einbindung regenerativer Energien oder Energieträger möglich sind.

Wie in Schritt 2 ermittelt, benötigt die Wärmepumpe für 1 kWh_{Wärme} 0,3 kWh Strom. Dieser Strom steht entweder als Windstrom oder als deutscher Strommix zur Verfügung. Bei Nutzung des Windstroms belaufen sich die CO₂-Emissionen auf 3 g CO₂/kWh_{Wärme}, während bei Verwendung des deutschen Strommix 158 g CO₂/kWh_{Wärme} emittiert werden.

4. Festlegung eines Referenzprozesses mit Angabe des Wirkungsgrades und Bestimmung der spezifischen Emissionen je Einheit Zielenergie. Zur Ermittlung des Einsparpotentials wird ein Referenzprozess für die gleiche Zielenergie (Wärme, Strom, Fahrdienstleistung etc.), die durch die Sektorenkopplung bereitgestellt wird, festgelegt sowie dessen CO₂-Emissionen beschrieben. Der jeweilige Referenzprozess wird durch eine gängige Technologie zur Bereitstellung der Zielenergie bestimmt. Eine gängige Technologie für die Wärmeerzeugung stellt der erdgasbetriebene Brennwertkessel dar. Im Beispiel besitzt er einen Wirkungsgrad von 105 %. Er emittiert somit 191 g CO₂/kWh_{Wärme}.

Die Ergebnisse werden teilweise in Diagrammen dargestellt, so dass eine visuelle Bewertung der Emissionen möglich ist. Bei einem Vergleich werden die Emissionen der Sektorenkopplung auf die Emissionen des Referenzprozesses bezogen.

1.3. Potentialmatrix

Auf Grundlage der allgemeinen Steckbriefe wurde eine Abschätzung der Potentiale der Sektorenkopplungen vorgenommen. Hierbei wurden die Kriterien CO₂-Einsparpotential, Wirtschaftlichkeit, technische Umsetzung, planerischer Aufwand, Marktreife des Konzeptes, Umweltwirkungen und Förderungsmöglichkeiten berücksichtigt. Eine Erläuterung zu den Kriterien befindet sich in Kapitel 4 Bewertung von Sektorenkopplungen im Band I der Handreichung.

Die Potentialabschätzung erfolgt in Form von Ampelfarben (siehe Legende) und kann anhand der Nummern, die auf die zugeordneten Steckbriefkategorien verweisen, nachvollzogen werden.

Es ist zu beachten, dass sich bei einer spezifischen Sektorenkopplung andere Einschätzungen ergeben können, da die bewerteten Kriterien stark von den jeweilig real existierenden Randbedingungen abhängen. Können beispielsweise vorhandene Gebäudestrukturen zur Unterbringung von Speichern genutzt werden, kann die Wirtschaftlichkeit der Sektorenkopplung Power-to-Heat verbessert werden.

Zusätzlich unterliegen die Kategorien dem Einfluss der Zeit. Eine heutige Einschätzung zur Marktreife einer Sektorenkopplung kann sich innerhalb eines kurzen Zeitraumes ändern. Die Potentialmatrix ist daher nicht als eine allgemein Gültige zu verstehen, sondern lediglich als eine Momentaufnahme.

Die in der Matrix 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.

Bewertungsgegenstand		Bewertungskriterium							
Anbieter/abgebender Sektor	Sektorenkopplung	CO ₂ -Einsparpotential	Wirtschaftlichkeit	Technische Umsetzung	Planerischer Aufwand	Marktreife des Konzeptes	Umweltwirkungen	Förderungsmöglichkeiten	
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	+	+	+	-	0	+	+
		10	11	6	5; 6; 7	13	0; 4	12
	Vehicle-to-Grid	+	+	-	-	-		
		11	6	6	7	6; 7		
Grüne Infrastruktur								
	Verdunstungskühlung	0		0	0	-	+	0
		10		6; 7	6; 7	9; 13	4; 15	12
	Wärmedämmung	0	0	+	0	+	+	0
		11; 12	10; 11	6; 7	6; 7	7; 14	15	12
Blaue Infrastruktur								
	Verdunstungskühlung			0	0	0	+	0
				6; 7	6; 7	9	4; 15	12
	Bewässerung	+	0	0	0	0	+	0
		4	4; 11; 12	6; 7	6; 7	16	15	12

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

2. Steckbriefe

2.1. Sektor Strom

Strombasierte Sektorenkopplungen sind für die Realisierung einer vollständigen regenerativen Energie- und Rohstoffversorgung notwendig ([7] 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.

Überschuss-Strom

Der Anteil EE an der Stromerzeugung betrug im Jahr 2017 33 % ([1] 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 ([7] S. 49) und beschränkt sich vor allem auf Regionen in Nord- und Ostdeutschland. Mit fortschreitendem Netzausbau werden die EE-Überschüsse weiter sinken ([6] S. 13).

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“ ([8] 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“ ([7] S. 4). Die aus Strom erzeugten Brenn-, Roh- und Kraftstoffe wären in erheblichem Maße mit CO₂ belastet ([7] S. 4).

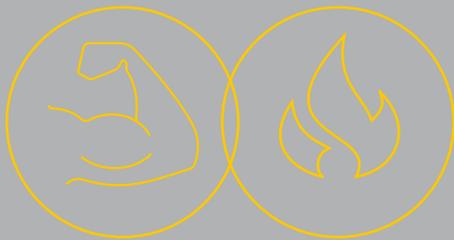
Das UBA vertritt die Position, ein Umbau von der fossilen zu einer regenerativen Energieversorgung über alle Sektoren hinweg mache strombasierte Sektorenkopplungstechnologien notwendig ([7] S. 8). Sie werden in Zukunft dabei helfen, die Sektoren zu verzahnen und schwankende Energiemengen auszugleichen, 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 ([7] S. 15). Eine vollumfängliche Dekarbonisierung der Sektoren mit Hilfe synthetischer Brennstoffe kann „nur im Zusammenhang mit zusätzlichen Investitionen in EE-Anlagen gedacht werden“ ([9] S. 18).

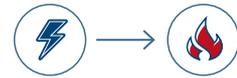
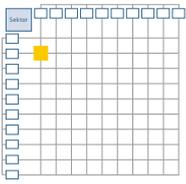
Die Verwendung lokal überschüssigen Stroms wird derzeit im Rahmen des Förderprogramms SINTEG (Schau-fenster intelligente Energie) des BMWI in verschiedenen Projekten erforscht (WindNODE, NEW 4.0).

Im Folgenden wird durch die Bezeichnung Überschuss-Strom aus EE auf diese momentane Problematik im Transformationsprozess des Energiesystems verwiesen.



2.1. Sektor Strom





2.1.1. Power-to-Heat

0 Beschreibung

Mit Hilfe von Power-to-Heat (PtH) wird Strom unter Nutzung von zum Beispiel Heizstäben oder Wärmepumpen in Wärme umgewandelt ([8] S. 284). Bei PtH-Anlagen handelt es sich idealerweise um einen zusätzlichen Überschuss-Stromverbraucher, der ein flexibles Wärmeerzeugungssystem ergänzt ([9] S. 17) und somit angebotsorientiert genutzt werden kann.

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

Überschuss-Strom aus EE

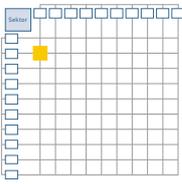
4 Ziele

- Substitution fossiler Energieträger in der Wärmeerzeugung und zusätzlich höherer EE-Anteil im Wärmesektor ([9] S. 9)
- Reduktion der Must-run-Kapazität konventioneller Kraftwerke durch Flexibilisierung des Strommarktes (Bereitstellung von Regelleistung: Vorhaltung negativer Regelleistung ([9] S. 8, [10])

16 Must-run-Kapazität: In den Stromnetzen kann keine elektrische Energie gespeichert werden. Angebot und Nachfrage müssen durch die Systemdienstleistung der Bereitstellung von **Regelleistung** aneinander angepasst werden. Für diesen Schwankungsausgleich werden meist konventionelle Kraftwerke genutzt, die „deshalb immer mit einer Mindestkapazität am Netz sein müssen“ ([10]). Durch die Etablierung flexibel reagierender Stromverbraucher mit entsprechenden Speicherkapazitäten können diese Dienstleistungen auch durch andere Technologien bereitgestellt werden.

5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

- In Kombination mit Nah- oder Fernwärmenetz: städtische Siedlungsstruktur, mittlere bis dichte Bebauung (wärmenetzgeeignetes Versorgungsgebiet)
- Vorhandene Flächen für Wärmespeicher
- Räumliche Nähe von Wärmespeicher und EE-Anlagen bzw. Stromnetzknotten mit hoher Belastung (z. B. Umspannwerk) sinnvoll



⑥ Komponenten

- PtH-Anlage: Elektrodenheizkessel (Wasser wird direkt durch Strom erhitzt) oder Elektrokessel (E-Kessel, Wasser wird über elektrisch erwärmte Stäbe erhitzt) oder (Groß-) Wärmepumpe
- Bei Verwendung einer Wärmepumpe: Anlagen zur Nutzbarmachung der entsprechenden Umweltenergie (bspw. Erdsonden)
- Stromanschluss zur Nieder- oder Mittelspannungsebene
- Bei zentraler Versorgungsstruktur: Wärmenetz mit den notwendigen Komponenten (u. a. Übergabestationen, Leitungen, Pumpen...)
- Wärmespeicher für Flexibilität und angebotsorientierte Fahrweise
- Regelungs-, Steuer-, Mess-, Informations- und Kommunikationstechnik (Steuerung mit interner oder externer Zugriffsmöglichkeit erfolgt entweder manuell oder automatisiert). Diese ist bei zentralen Strukturen (Heizkraftwerken) häufig schon vorhanden und daher sind keine hohen zusätzlichen Investitionen notwendig ([9] S. 18).

⑦ Technische Voraussetzungen

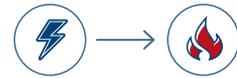
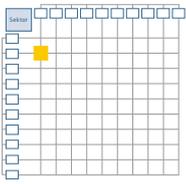
- Bivalentes Wärmeversorgungssystem, welches Wärme auf verschiedene Weise erzeugen kann und die Wärmenachfrage flexibel und unabhängig von der Lage am Strommarkt deckt ([9] S. 17f.) – Wärmespeicher notwendig
- Regelungs- bzw. Zugriffsmöglichkeit des Netzbetreibers auf PtH-Anlage, um flexibel auf Netzschwankungen reagieren und **Netzmanagement** betreiben zu können oder Zusammenarbeit mit einem **Regelleistungspoolbetreiber** (bei Zusammenschluss dezentraler PtH-Anlagen, so genanntes Pooling)
- Die konkrete PtH-Anlage muss im entsprechenden Zeitpunkt (Überschuss-Strom aus EE vorhanden) betriebsbereit sein und es muss die Möglichkeit bestehen, Wärme im aktuellen Zeitpunkt zu erzeugen und zu nutzen oder zu speichern ([11] S. 20)

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Die erzeugte Wärme muss verwendet oder gespeichert werden können.
- Die Ansteuerung der Anlagen sollte sich nicht nach dem Börsenpreis richten, sondern durch ein Steuersignal des Netzbetreibers ausgelöst werden, der die Nutzung von Überschuss-Strom aus EE sicherstellt ([11] S. 19).

Bevorzugung von Wärmepumpen

- E-Kessel sollten als Flexibilitätsoption ([8] S. 284) lediglich eine Ergänzung zur Wärmeerzeugung darstellen und bei Überschuss-Strom aus EE genutzt werden.
- Eine alleinige Versorgung durch E-Kessel ist nicht sinnvoll, da hochwertiger Strom im Verhältnis 1:1 in minderwertigere, thermische Energie umgewandelt wird. Zudem könnte es im Winter bei vielen dezentralen Anwendungen dazu kommen, dass „sehr viele Haushalte gleichzeitig Strom beziehen“ ([2] S. 784), mit dem Ergebnis einer schwer planbaren Netzstabilität sowie einer erhöhten Jahreshöchstlast.
- Favorisiert werden sollten Wärmepumpen, da diese unter Nutzung von Umweltwärme den Strom mit einem besseren Verhältnis in Wärme umwandeln als Heizstäbe.



9 Wirksamkeit

- E-Kessel: Wirkungsgrad von 98 % ([12] S. 165).
- Wärmepumpe: in Abhängigkeit von der Herkunft und des Temperaturniveaus der Umweltenergie (Luft, Erde, Wasser) werden Jahresarbeitszahlen (JAZ) zwischen 2 und 4 erreicht ([13] S. 14). Die JAZ gibt das Verhältnis von eingesetzter Strommenge und erzeugter Wärmemenge über das gesamte Jahr hinweg an. Im Gegensatz zur Leistungszahl, die für einen bestimmten Betriebszustand anzeigt, wie viele kWh_{Wärme} aus einer kWh_{Strom} erzeugt werden können, werden mit der JAZ die über das Jahr unterschiedlichen Betriebszustände erfasst.
- Es fallen Speicher- und Verteilverluste an

10 Einsparpotentiale

Die Einsparpotentiale sind u. a. abhängig von der Herkunft des Stroms und davon, welcher Energieträger in welchem Wärmeerzeugungssystem (Heizkraftwerk, Brennwertkessel, ...) ersetzt wird. Jedes System muss daher für sich betrachtet werden. Die hier aufgeführten Einsparpotentiale beziehen sich auf dezentrale Anwendungen – zentrale Systeme sind aufgrund ihrer Komplexität nicht in verallgemeinerter Form darstellbar.

Primärenergie ([7] S. 14)

Das UBA vergleicht die PtH-Sektorenkopplung (direktelektrisch und Wärmepumpe) mit einem Brennwertkessel (Kesselwirkungsgrad: 105 %). Dabei wird angenommen, dass der genutzte Strom zu 100 % aus regenerativen Energiequellen stammt.

Wärmepumpe (WP) – Jahresarbeitszahl = 3,3

1 MWh EE-Strom erzeugt 3,3 MWh Wärme. Ein Brennwertkessel benötigt für diese 3,3 MWh Wärme 3,14 MWh Erdgas. Durch die Wärmepumpe können mit 1 MWh EE-Strom ca. 3,14 MWh Erdgas eingespart werden.

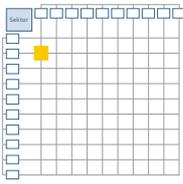
E-Kessel (EK) – Wirkungsgrad = 95 %

1 MWh EE-Strom erzeugt 0,95 MWh Wärme, wofür ein Brennwertkessel 0,91 MWh Erdgas benötigen würde.

Eingesetzter EE-Strom	Wärme aus eingesetztem EE-Strom	Menge substituiertes Erdgas
Mittels Wärmepumpe		
1MWh EE-Strom	3,3 MWh Wärme	3,14 MWh Erdgas
Mittels E-Kessel (EK)		
1MWh EE-Strom	0,95 MWh Wärme	0,91 MWh Erdgas

Tabelle 2: Substitution von Erdgas durch PtH; Purr et al. 2016

In der Tabelle 2 wird der Vorteil der Nutzung des EE-Stroms zur Wärmebereitstellung über eine Wärmepumpe sehr deutlich.



CO₂-Emissionen

Für die oben beschriebenen Beispiele werden je nach Herkunft des Stroms und wärme-producinger Anlage unterschiedliche Mengen CO₂ je MWh emittiert. Es wird deutlich, dass nur eine Nutzung von Strom aus EE tatsächlich zu relevanten Einsparungen führt: Eine mit Windstrom betriebene Wärmepumpe reduziert die Emissionen um 98 % (um 188 kg_{CO2}/MWh_{Wärme}) gegenüber einem Brennwertkessel.

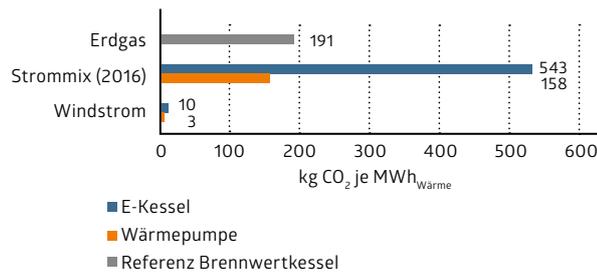


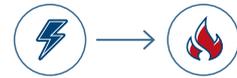
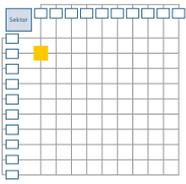
Abb. 3: PtH: CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

11 Kosten

16 Bereitstellung von Regellenergie: In Deutschland bereits umgesetzte PtH-Projekte refinanzieren sich derzeit vollständig durch die Teilnahme am Regelleistungsmarkt – allerdings ist bei steigender Teilnehmeranzahl mit einer Marktsättigung und somit mit sinkenden Erlösen zu rechnen ([9] S. 8).

- Investitionskosten E-Kessel, Fernwärme (abhängig vom Vorhandensein einer Heizzentrale) [14] 75 – 100 €/kW_{el}
- Investitionskosten E-Kessel, Industrie ([14]) (i.d.R. höhere Temperaturen notwendig) 100 – 200 €/kW_{el}
- Zusätzlich möglich: Baukostenzuschuss an den Netzbetreiber 25 – 100 €/kW_{el}
- Anschaffungskosten Wärmespeicher ([15] S. 12)
 - atmosphärischer Speicher 300 – 500 €/m³
 - atmosphärischer 2-Zonenspeicher 400 – 700 €/m³
 - Druckspeicher 800 – 1200 €/m³
- Wärmepumpe [16]
 - Luft-Wasser Erschließung (E) 500 – 2.000 €
 - Anschaffung (A) 4.000 – 12.000 €
 - Sole-Wasser (Erdsonden) (E) 3.500 – 8.000 €
 - (A) 5.200 – 12.000 €
 - Wasser-Wasser (Grundwasser) (E) 4.000 – 7.000 €
 - (A) 9.000 – 12.000 €

16 Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch PtH: Dezentrale Konzepte können für die Besitzer von PV-Anlagen ökonomisch sinnvoll sein, wenn dadurch der Eigenverbrauch erhöht werden kann. Gewerbe- oder Industriebetriebe, Hausbesitzer oder die öffentliche Hand, mit einer eigenen PV-Anlage können den Solarstrom mittels Wärmepumpe oder Heizstab für die Wärmeerzeugung verwenden, bevor eine Einspeisung ins Stromnetz erfolgt ([2] S. 781).



12 Förderungsmöglichkeiten

- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetze 4.0) ([17])
- Förderung von Machbarkeitsstudien und ggf. Investitionen
- Marktanreizprogramm (MAP): Programm des Bundesumweltministeriums zur Förderung von Anlagen zur Wärmegewinnung aus EE (zum Beispiel Wärmepumpen)
- KfW-Förderprogramme (Nummer): Erneuerbare Energien Standard (270), Erneuerbare Energien Premium (271)

13 Beispiele

- Hamburg, Vattenfall ([18], Blog von Vattenfall über Einführung eines Elektroheizkessels, November 2018)
- Stadtwerke Münster ([19], Artikel in der Wirtschaftswoche über einen Elektrodenheizkessel in Münster, Februar 2016)
- Förderinitiative Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze (EnEff): Wärme P2H@ Adlershof, Forschungsprojekt der TU Berlin (2015 – 2018)
- PtH/PtC-Anlage in Berlin, umgesetzt in Kombination mit einem multifunktionalen Speicher, der je nach Bedarf Kälte oder Wärme speichern kann, Projekt der GASAG Solution Plus GmbH [20], Oktober 2017

14 Weitere Kopplungsoptionen

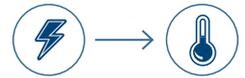
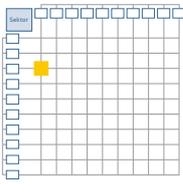
- Sektor Kälte: **Sorptionskälte**



15 Weitere Hinweise

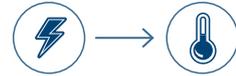
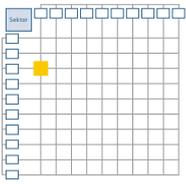
- Zentrale PtH-Konzepte sind in Kombination mit Fernwärmesystemen bereits umgesetzt. Vorteile für die Umsetzung bestehen in der „hohe[n] Anschlussleistung [...] bereits bestehender Erzeugungsanlagen, den verminderten Netzentgelten in den höheren Spannungsebenen und der Einbindung in bereits vorhandene Anlagenoptimierungs- und Vermarktungsprozesse“ ([9] S. 18). Es gibt bereits Wärmespeicher – PtH ist leicht integrierbar.
- Literatur:
Industrie- und Handelskammer Hessen: Faktenbuch des Ratgebers Wärme in Hessen. Faktenblatt Power-to-Heat. November 2014 [14]

16 **Alternative Anwendungsmöglichkeit für Stadtwerke:** Bisher wird in größeren Zeitabständen ein Stromkontingent vom Netzbetreiber gekauft. Wenn weniger Strom abgenommen wird als gekauft wurde (durch zum Beispiel vermehrte städtische dezentrale EE-Anlagen), muss eine Strafe gezahlt werden. Um diese zu vermeiden, kann der überflüssige Strom für PtH-Anwendungen genutzt werden, um so das Ungleichgewicht durch die EE-Anlagen auszugleichen.



2.1.2. Power-to-Cold

0 Beschreibung	<p>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 zusätzlichen Überschuss-Stromverbraucher, der ein flexibles Kälteerzeugungssystem inkl. Kältespeicher ergänzt und somit angebotsorientiert genutzt werden kann. Dieser Prozess 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 -nachfrage und somit ein netzdienlicher Einsatz möglich ist.</p>
1 Kopplungstyp	<p>– Primärkopplung</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div>
2 Sektoren	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid #ccc; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; text-align: left;">Angebot / Abgabe Strom</div> <div style="font-size: 2em;">→</div> <div style="border: 1px solid #ccc; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; text-align: left;">Nachfrage / Aufnahme Kälte (GHD-, Gebäudebereich)</div> </div>
3 Eingesetzte Ressourcen	Überschuss-Strom aus EE
4 Ziele	<p>– Flexibilisierung der Stromnachfrage und Verlagerung des Kältemaschinenbetriebs in Zeiten, zu denen besonders viel Strom erzeugt wird. Aufgrund der Kältespeicherung können Stromnachfragespitzen reduziert werden ([21] S. 98; [22]).</p>
5 Voraussetzungen im urbanen Kontext	<p>– In Kombination mit zentraler Versorgungsstruktur: Kältenetz mit entsprechender Abnehmerstruktur, beispielsweise ein Nahkältenetz in einem Gebiet mit Unternehmen, Forschungseinrichtungen etc., die einen erhöhten Kühlbedarf aufweisen.</p>
6 Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> – PtC-Anlage: Kompressionskältemaschine (KKM) – Stromanschluss zur Nieder- oder Mittelspannungsebene – Bei zentraler Versorgungsstruktur: Kältenetz mit den notwendigen Komponenten (u. a. Übergabestationen, Leitungen, Pumpen...) – Kältespeicher für erhöhte Flexibilität und angebotsorientierte Fahrweise, z. B.: <ul style="list-style-type: none"> • Eisspeicher (Behälter in Form eines Beckens vor Ort oder eines transportfähigen Containers) • Kaltwasserspeicher • Speicher mit Phase-Change-Materials



- Regelungs-, Steuer-, Mess-, Informations- und Kommunikationstechnik (Steuerung mit interner oder externer Zugriffsmöglichkeit erfolgt entweder manuell oder automatisiert)

⑦ Technische Voraussetzungen

- Bivalentes Kälteversorgungssystem, welches Kälte auf verschiedene Weisen erzeugen, die Kältenachfrage flexibel decken kann ([9] S. 17f.)
- Regelungs- bzw. Zugriffsmöglichkeit des Netzbetreibers auf Kälteerzeugungs- und Speicheranlagen, um flexibel auf Netzschwankungen reagieren und **Netzmanagement** betreiben zu können oder Zusammenarbeit mit **Regelleistungspoolbetreiber**
- Ansteuerung der Anlagen sollte sich nicht nach dem Börsenpreis richten, sondern durch ein Steuersignal des Netzbetreibers ausgelöst werden, der die Nutzung von Überschuss-Strom aus EE sicherstellt ([11] S. 19)
- Bestehende Kälteerzeugungssysteme können mit Eisspeichern nachgerüstet werden. Sie „stellen in der Regel keine hohen Anforderungen an die Technik im Bestand“ [22]

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Die konkrete PtC-Anlage muss im entsprechenden Zeitpunkt (Überschuss-Strom aus EE vorhanden) betriebsbereit sein und es muss die Möglichkeit bestehen, Kälte im aktuellen Zeitpunkt zu erzeugen und zu nutzen oder zu speichern

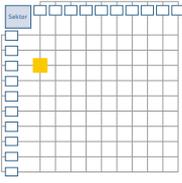
⑨ Wirksamkeit

- Die Leistungszahlen von KKM liegen zwischen 2,5 bis 6 ([21] S. 20). Je größer die Leistungszahl, desto effizienter ist die KKM, da sich die Leistungszahl aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bestimmt. Es handelt sich um eine theoretische Größe – in der Realität können Fahrweisen im Teillastbereich zu einer schlechteren Leistung führen.
- Es gilt zu beachten, dass mit dem Anstieg der Temperaturdifferenz (je mehr die Temperatur heruntergekühlt werden muss), die Leistungszahl der Kältemaschine und damit die Gesamteffizienz des Systems abnimmt ([21] S.281).
- Die Kombination einer KKM mit einem Speicher minimiert den Betrieb im Teillastbereich mit geringeren Wirkungsgraden, der sich an der benötigten Kühllast orientiert. Anstatt im Teillastbetrieb, kann die KKM am Auslegungspunkt betrieben werden, an dem in der Regel optimale Wirkungsgrade erzielt werden ([23] S. 160).

⑩ Einsparpotentiale

Primärenergie

Kälte wird bereits heute in der Regel durch KKM bereitgestellt. Mit einer Leistungszahl von 2,5 bis 6 können je kWh Strom 2,5 bis 6 kWh Kälte erzeugt werden. Diese Zusammenhänge werden durch PtC (Kombination KKM mit einem Eis- oder Kaltwasserspeicher) nicht verändert – es kommt zu keiner Einsparung von Endenergie. Allerdings kann durch die Verschiebung der Stromabnahme in Zeiten, in denen viel regenerative Energie im Stromnetz vorhanden ist, die Inanspruchnahme fossiler Energieträger für die Kälteerzeugung sinken.



CO₂-Emissionen

Je höher die Leistungszahl der KKM, desto effektiver wird der Strom für die Kälteerzeugung genutzt – umso geringer sind die jeweiligen CO₂-Emissionen der Kälteerzeugung. Durch die Nutzung von Windstrom können die Emissionen drastisch gesenkt werden (um 98 %).

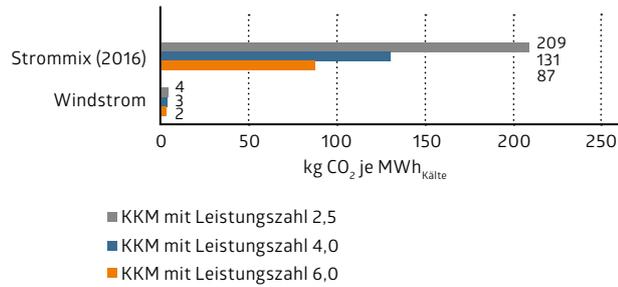


Abb. 4: PtC: CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

11 Kosten

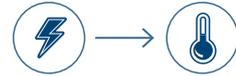
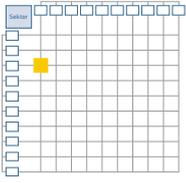
- Bei dezentraler Anwendung können ggf. erhöhte Investitions- und Prozesskosten für die registrierende Leistungsmessung, für die Informations- und Kommunikationstechnologie sowie für die Bilanzierung und Abrechnung entstehen ([9] S. 18).
- Systeme, die einen Kältespeicher nutzen, sind oftmals wirtschaftlicher als Systeme, die nur über eine KKM verfügen, die für die Spitzenlast ausgelegt ist, aber den größten Teil der Zeit nur schwach ausgelastet betrieben wird [22]

Anschaffungskosten KKM ([24])	75 – 120 €/kW _{Kälte}
– Anschaffungskosten Speicher	
• Eisspeicher (kleine Leistungsklassen) [25]	5.000 – 6.000 €
• (Zuzüglich Erdarbeiten und Kollektoren)	(5.000 – 4.000 €)
• Kaltwasserspeicher	130 – 550 €/m ³

16 Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch PtC: Dezentrale Konzepte können für die Besitzer ökonomisch sinnvoll sein, wenn dadurch der Eigenverbrauch erhöht werden kann. Gewerbe- oder Industriebetriebe, Hausbesitzer oder die öffentliche Hand, mit einer eigenen PV-Anlage können den Solarstrom mit einer Kompressionskältemaschine für die Kälteerzeugung verwenden, bevor eine Einspeisung ins Stromnetz erfolgt (in Anlehnung an S. [2] 781).

12 Förderungsmöglichkeiten

- BAFA-Förderung für Kälte- und Klimaanlage (u. a. werden Kältespeicher und Kälteanlagen gefördert) [26]



⑬ Beispiele

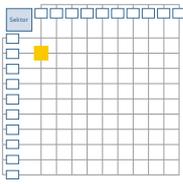
- PtC/PtH-Anlage in Berlin, umgesetzt in Kombination mit einem multifunktionalen Speicher, der je nach Bedarf Kälte oder Wärme speichern kann, Projekt der GASAG Solution Plus GmbH [20], Oktober 2017
- Kaltwasserspeicher in Mannheim für das Gesundheitsunternehmen Roche (Pressemeldung: [27])

⑭ Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen der Handreichung sind keine Kopplungen vorgesehen.

⑮ Weitere Hinweise

- Der Kältesektor ist größtenteils elektrifiziert: „Die [Kompressionskältemaschine] hat mit etwa 80 – 90 % die verbreitetste Anwendung in der Kältetechnik“ ([28] S. 518). Daher kann der Einsatz von Kältespeichern und die damit mögliche **netzdienliche** Fahrweise der KKM positive Effekte auf die Stabilisierung der Stromnetze haben.



2.1.3. Kraft-Wärme-Kopplung

0 Beschreibung

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) ([8] S. 111).

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 ([29] S. 23). Da die thermischen meist nicht mit den elektrischen Lasten übereinstimmen und so durch eine stromorientierte Fahrweise ggf. mehr Wärme anfällt als verbraucht werden kann, muss sichergestellt werden, dass die Wärme tatsächlich genutzt wird (durch Speicherung, Nutzung in der Kälteerzeugung) ([21] S. 102).

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren



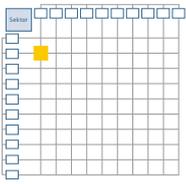
3 Eingesetzte Ressourcen

- Fossile Energieträger: Erdgas
- Regenerative Energieträger: biogene Energieträger, Abfall, Wasserstoff aus EE (siehe Steckbrief PtG Wasserstoff)

16 KWK-Anlagen als Brückentechnologie: Gas besitzt gegenüber anderen fossilen Energieträgern einen deutlich geringeren spezifischen CO₂-Emissionsfaktor. Der Einsatz von Gas im Wärmesektor hilft daher, diesen zu dekarbonisieren. Die alleinige Umstellung von kohlebetriebenen auf gasbetriebene Anlagen reicht jedoch nicht aus, um die Emissionsziele bis 2050 zu erreichen. Es ist deutlich, „dass die Bedeutung von KWK-Anlagen langfristig abnehmen wird, da größere Anteile der Wärme durch erneuerbare Energien und industrielle Abwärme bereitgestellt werden“ ([29] S. 8).

4 Ziele

- Treibhausgasreduktion durch Verdrängung nicht gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen [30]
- Ressourcenschonung durch effiziente Nutzung von Energieträgern, vor allem Erdgas (möglichst hohe Energieausbeute, Abwärme nutzen) [31]
- Flexibilisierung des Strommarktes durch netzdienliche Regelbarkeit der KWK-Anlage



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Zentrale Konzepte: städtische Siedlungsstruktur, mittlere bis dichte Bebauung (wärmenetzgeeignetes Versorgungsgebiet)
- Platzbedarf für die technischen Komponenten

⑥ Komponenten

- Zentrale KWK-Anlage: Heizkraftwerk, mehrere BHKWs
- Dezentrale KWK-Anlage: BHKW
- Stromanschluss zur Nieder- bzw. Mittelspannungsebene
- Wärmenetz mit Pumpen, Wärmeübergabe- und Hausanschlussstationen
- Wärmespeicher
- Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

⑦ Technische Voraussetzungen

- Flexibilität und somit **Netzdienlichkeit** der Anlage durch den Einsatz von Wärmespeichern und fernregelbaren (digitalisierten) Verbrauchern sichern

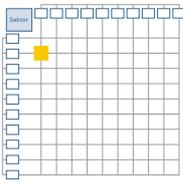
⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Durch den am **Wärmemarkt orientierten Einsatz** von KWK-Anlagen würde Strom ggf. zu Zeiten produziert, in denen auch EE-Anlagen (Windenergie, Photovoltaik) Strom produzieren – die Stromproduzenten stünden somit in Konkurrenz. Der am Strommarkt orientierte Einsatz von KWK-Anlagen im Einklang mit der Stromproduktion aus EE-Anlagen kann die Integration erneuerbaren Energien in den Strommarkt befördern [30].
- Die erzeugte Wärme muss verwendet oder gespeichert werden können. Ist dies nicht der Fall, sinken die Gesamtwirkungsgrade enorm und der Energieträger wird nicht ausgenutzt.

⑨ Wirksamkeit

Abhängig von der Art der KWK-Anlage und der Betriebsweise ([30])

KWK-Anlage	Wirkungsgrad
BHKW Gasmotor	0,80 – 0,95
BHKW Dieselmotor	0,85 – 0,98
Gasturbine mit Abhitzenutzung	0,70 – 0,85
Dampfkraftwerk Gegendruckturbine	0,82 – 0,90
Dampfkraftwerk Entnahme-Kondensationsturbine	0,55 – 0,75
Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Kraftwerk mit Gegendruckturbine	0,80 – 0,90
GuD-Kraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine	0,60 – 0,75
Brennstoffzelle	0,75 – 0,83



⑩ Einsparpotentiale

Primärenergie

Die Potentiale sind abhängig von der KWK-Anlagenkonfiguration (Anlagengröße, Brennstoff, Stromkennzahl) sowie der Referenzsysteme der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung, die durch die KWK-Anlage ersetzt werden ([30]). Die Einsparungen werden mit Hilfe der Wirkungsgrade abgeschätzt ([32] S. 105 f.; [31] S. 18).

Exemplarisch wird gezeigt, welche Einsparungen erzielt werden können, wenn die getrennte Erzeugung von Strom (Kraftwerk; $\eta_{el} = 0,4$) und Wärme (Heizkessel; $\eta_{th} = 0,9$) durch eine KWK-Anlage (GuD; $\omega = 0,85$ [Brennstoff wird zu 85 % ausgenutzt]) ersetzt wird. Die Ergebnisse sind abhängig von der Stromkennzahl, die angibt, in welchem Verhältnis die Zielenergien Strom und Wärme umgewandelt werden. Bei einer Stromkennzahl von 0,5 (wie im Beispiel verwendet) werden 1 Teil Strom und 2 Teile Wärme bereitgestellt.

Die KWK-Anlage benötigt $3,53 \text{ MWh}_{\text{Primärenergie}}$ für $1 \text{ MWh}_{\text{Strom}}$ und $2 \text{ MWh}_{\text{Wärme}}$ (Stromkennzahl von 0,5). Für die gleichen Strom- und Wärmemengen werden bei der getrennten Erzeugung $4,72 \text{ MWh}_{\text{Primärenergie}}$ benötigt – das bedeutet eine Einsparung von gut 25 % Primärenergie.

Erzeugungsart	Wärme	Strom	Menge Primärenergie
Getrennte Erzeugung			
Brennwertkessel	2 MWh	-	2,22 MWh
Gas- und Dampfturbinen Kraftwerk	-	1 MWh	2,50 MWh
Summe	2 MWh	1 MWh	4,72 MWh
KWK	2 MWh	1 MWh	3,53 MWh
Substituierte Primärenergie durch KWK			1,19 MWh

Tabelle 3: Substitution von Primärenergie durch KWK; Schmitz 2005: S. 18 und Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 105f.

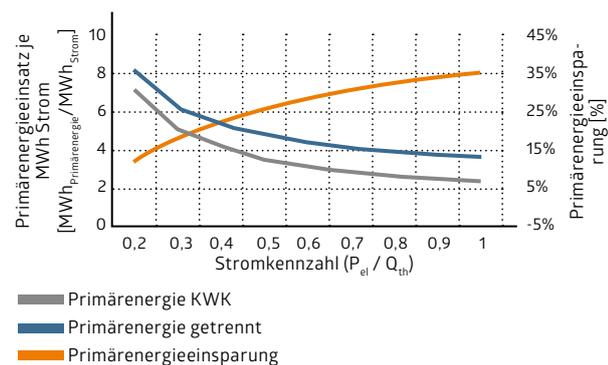
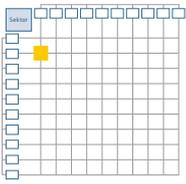


Abb. 5: KWK: Primärenergieeinsatz im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 101



CO₂-Emissionen

Die **Stadtwerke Kiel** sparen 70 % CO₂-Emissionen ein, indem ein Steinkohlenkraftwerk durch ein Gasmotorenkraftwerk ausgetauscht wird ([33]).

Die Höhe der CO₂-Emissionen ist abhängig von den eingesetzten Energieträgern. Untenstehend wird die Emissionsminderung für die Erzeugung von 1 MWh Strom für das oben beschriebene System dargestellt (Kraftwerk: kohlebetrieben, Kessel und GuD: gasbetrieben).

Durch den Einsatz einer KWK-Anlage mit einer Stromkennzahl von 0,5 könnten gut 50 % der CO₂-Emissionen eingespart werden.

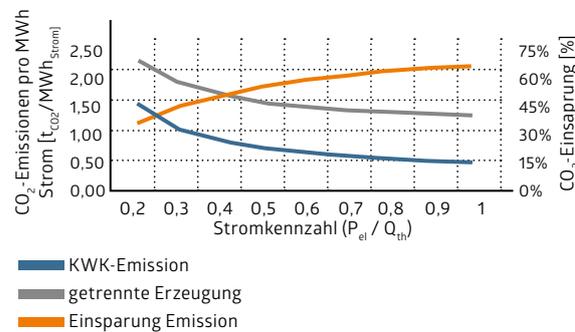


Abb. 6: KWK: CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 17 und Gesellschaft Energietechnik 2003: S. 101

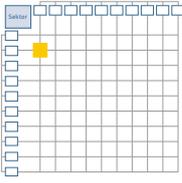
11 **Kosten**

- Die Stadtwerke Kiel haben in den Bau ihres „Küstenkraftwerkes“ (20 Gasmotoren in 4 Blöcken besitzen eine elektrische Leistung von 190 MW und eine thermische Leistung von 192 MW. Zusätzlich gibt es einen Elektrodenkessel, Wärmespeicher) rund 290 Mio. € investiert
- Neben Investitionskosten sind „Kosten für Transport, Aufstellung, Montage, Inbetriebnahme, [...] hydraulische Einbindung, Anbindung an Brennstoffversorgung, Abgasleitung sowie die Einbindung des BHKW in das Stromnetz“ ([34]) zu berücksichtigen.
- Die Kosten sind abhängig von der vorhandenen Infrastruktur – kann die Anlage bspw. in einen bestehenden Kraftwerksstandort integriert werden? Ist eine Weiternutzung baulicher Anlagen etc. möglich?

– Anschaffungskosten BHKW: Kosten abhängig von der elektrischen Leistung des BHKW [35]	
• BHKW mit 10 kW _{el}	2.000 – 4.000 €/ kW _{el}
• BHKW für 2.000 kW _{el}	400 €/kW _{el}
– Wartungskosten BHKW sinken mit wachsender Leistung des BHKW [35]	1 – 3 ct/kWh _{el}

12 **Förderungsmöglichkeiten**

- KWK-Gesetz gewährt Zuschlag (befristete Förderung zusätzlich zum Strommarktpreis) und Förderung für Infrastruktur (Netze, Speicher) [36]



- Neu- oder Ausbau von Wärmenetzen [37] (Herstellung von Haupt-, Verteil- und Hausanschlussleitung) sowie Wärmespeicher [38], zu beantragen beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Zulassungsvoraussetzungen und zeitliche Fristen sind den Quellen zu entnehmen.
- Unter bestimmten Voraussetzungen (§53a Energiesteuergesetz) bekommen BHKW-Anlagenbetreiber auf Antrag beim zuständigen Hauptzollamt die Energiesteuer für den eingesetzten Brennstoff zurückerstattet.
- Förderprogramme auf Bundesebene: KfW-Förderprogramme, Marktanreizprogramme, Mini-KWK-Impulsprogramm (BAFA)
- KfW-Förderprogramm 270: Erneuerbare Energien Standard
- Förderprogramme der Bundesländer/auf regionaler Ebene teilweise vorhanden

13 Beispiele

- Stadtwerke Kiel: Küstenkraftwerk. Fernwärmeversorgung mit modular aufgebauten Gasmotoren, Wärmespeicher und PtH statt Steinkohlekraftwerk. (Artikel in den VDI Nachrichten: [39]), November 2019

14 Weitere Kopplungsoptionen

- Sektor Kälte: **Sorptionskälte** (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung), Beispiel: Nestlé-Werk in Hamburg (in Verbindung mit einem BHKW)

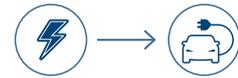
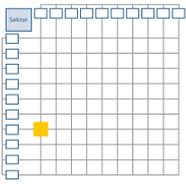


- Sektor Wärme: kombinierte Wärmeerzeugung mit regenerativen Energien (Forschungsprojekt SOLAR-KWK [40], siehe Kasten)

16 **Kopplung mit regenerativen Wärmeerzeugern:** Zur Effizienzsteigerung einzelner Komponenten im Energieerzeugungssystem können diese gekoppelt werden. Ein saisonaler Wärmespeicher könnte beispielsweise mit KWK-Wärme, Solarthermie und PtH gespeist werden und wäre damit effizienter. Hierzu gibt es ein Forschungsprojekt des Forschungsinstitutes für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme Solites: Solar KWK – Entwicklung multifunktionaler Systeme zur solarunterstützten KWK [40].

15 Weitere Hinweise

- „Eine Kombination aus emissionsarmen, gut regelbaren KWK-Anlagen mit einer am Strommarkt orientierten Fahrweise und anderen, regenerativen Wärmeerzeugungsanlagen ist [...] notwendig. In einem solchen Wärmeerzeugungssystem können KWK-Anlagen die Grundlast übernehmen, wenn die Versorgung mit Wärme aus erneuerbaren Energien (Solar- und Geothermie, Großwärmepumpen, Strom aus Wind und PV) nicht ausreichend ist. Hierfür müssen allerdings weitergehende Förderprogramme entwickelt werden „mit Fördermaßnahmen für Großwärmepumpen, Biomasseheizwerke[n], Geothermie, Solarthermie und Großwärmespeicher[n] sowie der Fernwärmenetztransformation hinsichtlich niedrigerer Temperaturen [BMWi: „Förderstrategie Energieeffizienz und Wärme aus erneuerbaren Energien]“ ([29] S. 12)



2.1.4. E-Mobilität

0 Beschreibung

Zur Kategorie „E-Auto“ zählen elektrisch betriebene Batterie-, von außen aufladbare Hybridelektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge [41]. Im Folgenden werden die ersten beiden Typen thematisiert, bei deren Nutzung es einer Strominfrastruktur bedarf. Die Umstellung der Mobilität auf elektrische Energie stellt einen wichtigen Schritt der Energiewende dar – ökologische Vorteile sind allerdings vor allem dann zu erwarten, wenn der Strom aus EE stammt.

Eine Sektorenkopplung (Strom, Verkehr) kommt zu Stande, wenn die Autos netzdienlich geladen werden können. Werden die E-Autos ohne ein intelligentes Last- und Erzeugungsmanagement geladen, „werden insgesamt keine Potentiale zur Verbesserung von Energie- und Kosteneffizienz erwartet, da die Ladung der Batterie voraussichtlich in den Abendstunden erfolgt. Darüber hinaus können bei einer stärkeren Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen sogar zusätzlich Kraftwerke notwendig werden, da der Elektrizitätsbedarf ansteigt, was sowohl die ökologische als auch die ökonomische Gesamtbilanz negativ beeinflussen würde“ ([42] S. 257). Der Vorteil eines intelligenten Lastmanagements liegt in der Möglichkeit, die Verbrauchsspitzen zu glätten und den Ladevorgang an die Energieerzeugung anzupassen. Die Ladung der Fahrzeuge kann über eine externe Einzelsteuerung oder über einen Aggregator erfolgen, der mehrere Fahrzeuge steuert ([43] S. 35).

Ladestationen sind beispielsweise an Arbeitsplätzen sinnvoll, da die Fahrzeuge tagsüber mit PV-Strom aufgeladen werden können.

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren

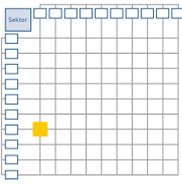


3 Eingesetzte Ressourcen

– Überschuss-Strom aus erneuerbaren Energien

4 Ziele

- Klimaneutrale Umgestaltung des Verkehrssektors ([44] S. 9)
- Reduktion des Verbrauchs von fossilen Energieträgern sowie von CO₂- und anderen Schadstoffemissionen
- Intelligentes Laden: Netzengpässen und weiteren negativen Netzeffekten entgegenwirken ([43] S. 35)



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Umfangreiche Ladeinfrastruktur, entsprechende Flächen
- Einrichtung öffentlich zugänglicher Aufstellorte für die Ladeinfrastruktur: Einkaufszentren mit Parkplätzen, Straßenränder und Parkplätze
- Ausgewiesene Stellflächen nur für E-Autos als Substitution von Stellflächen für fossil betriebene Fahrzeuge, keine Erweiterung der Stellplatzanzahl

⑥ Komponenten

- Geeignete elektrische Versorgungsstruktur, Anschluss an die Niederspannungsebene (Wechsel- und/oder Gleichstrom)
- Flächendeckende Ladeinfrastrukturen: Ladestationen und Ladeanschlusspunkte mit Aufgaben der Energiebereitstellung und -entnahme sowie der Abrechnung ([45] S. 146)
- Informations- und Kommunikationstechnik an den Schnittstellen der Sektoren Strom und Verkehr ([45] S. 33), smart Meter ([46])

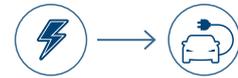
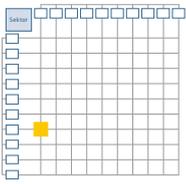
⑩ smart Meter, zu Deutsch: intelligente (digitale) Zähler: Neben dem Verbrauch wird die tatsächliche Nutzungsdauer angezeigt und die gemessenen Daten werden direkt an den Messdienstleister übermittelt. Zusätzlich ist es möglich, Daten zu empfangen, so dass beispielsweise die Batterie des E-Autos genau dann aufgeladen werden kann, wenn Überschuss-Strom aus EE zur Verfügung steht ([47]).

⑦ Technische Voraussetzungen

- Ladeinfrastruktur ausbauen, vorzugsweise mit einem einheitlichen Steckersystem, oder alle verschiedenen Steckertypen berücksichtigen
- Einsatz von Aggregatoren oder Einzelsteuerungen, die ein netzdienliches Laden unter Berücksichtigung der Stromnetzsituation erlauben und die jeweiligen Nutzerwünsche beachten ([43] S. 35) – z. B. : Wann soll die Batterie zu wie viel Prozent geladen sein
- Transparenz schaffen: Netzdienlichkeit erklären, warum ist Laden gerade nicht möglich?
- Zugriffsmöglichkeit des Netzbetreibers auf die Ladeinfrastruktur (durch bidirektionalen Daten- und Leistungsaustausch) für netzdienliches Laden
- Installation und Betrieb von Ladeinfrastrukturen muss mit Anzahl der zugelassenen Elektrofahrzeuge korrelieren ([45] S. 147)

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Die Umweltwirkung und klimafreundliche Vorteilhaftigkeit von E-Mobilität gegenüber Verbrennungsmotorfahrzeugen (Diesel, Benziner) werden in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Kritische Punkte sind die ökologische Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (z. B. energieintensive Herstellung der Batterie) sowie die Qualität des zum Laden verwendeten Strommixes.
- Die Batterieherstellung beinhaltet kritische Rohstoffgewinnung (Seltene Erden) und ist energieintensiv
- Der Umgang mit Batterien nach Nutzungsende (keine Eignung mehr für Fahren) muss geklärt werden: weitere Nutzung als Speicher, Recyclingmöglichkeiten (Urban Mining)
- Die Kopplung mit neuen Mobilitätskonzepten ist sinnvoll: Sharing-Modelle etc., führen zu einer intensiven Nutzung und einer Reduktion der Stückzahlen (siehe Steckbrief [Mobilstation](#))



9 Wirksamkeit

- Ein Elektroauto besteht aus Batterie, Inverter und Elektromotor mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. :85 % ([45] S.18)
- Verbrauch ca. 16 kWh elektrische Energie je 100 km ([44] S. 9)
- Der elektrische Motor arbeitet bei niedrigen Geschwindigkeiten effizient – Effizienzvorteile ergeben sich daher besonders im Stadtbereich, vor allem weil der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren im Teillastbereich deutlich sinkt ([44] S. 57 f.)

10 Einsparpotentiale

CO₂-Emissionen

Die Einsparpotentiale werden auf Grundlage der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ der Agora Verkehrswende aus dem Jahr 2019 beschrieben. Hierin werden die Emissionen von E-Autos denen von benzin- bzw. dieselbetriebenen Fahrzeugen gegenübergestellt. Die Ergebnisse von drei der fünf in der Studie untersuchten Fälle werden hier dargestellt. Die genauen Annahmen sind der Quelle [44] zu entnehmen.

Die **Fälle** unterscheiden sich in den spezifischen CO₂-Emissionen des zum Laden verwendeten Stroms:

Fall 1: Energiewende schreitet voran	421 g _{CO₂} / kWh
Fall 2: EE-Anteil im Strom stagniert (Stand 2016)	567 g _{CO₂} / kWh
Fall 3: Nutzung von 100 % Solarstrom	101 g _{CO₂} / kWh

Ergebnisse

Vorteile der E-Autos gegenüber Benzin/Diesel sind gemäß der Studie jeweils vorhanden, aber unterschiedlich ausgeprägt.

Emissionsverminderung über die Lebensfahrleistung der Batterie	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Benzin	24 %	12 %	50 %
Diesel	16 %	3 %	45 %

Tabelle 4: E-Mobilität: Emissionsverminderung; Agora Verkehrswende 2019

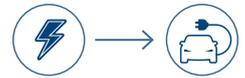
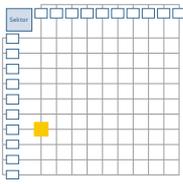
11 Kosten

Stromkosten

- Je nach Stromtarif und Verbrauch kosten 100 km Fahrt ca. 3,00 € (bei Verbrauch von 15 kWh pro 100 km und 20 ct/kWh) ([45] S. 18)
- Nimmt man gleiche Energiekosten für E-Auto und Verbrennungsmotor an, „darf die elektrische Energie ab Steckdose zur Aufladung der Batterie 50 ct/kWh und mehr kosten“ ([47] S. 61)

Kosten für die Infrastruktur (Ladesäulen)

- Abhängig von Spannungstyp an der Ladesäule, Anzahl der Ladepunkte, Vorhandensein eines Netzanschlusses, bereitgestellter Leistung
- In [45] S. 184 werden die Investitionskosten für eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur mit 1 bis 2 Ladepunkten auf 2.200 € bis 35.000 € (Stand 2015) geschätzt und für 2020 auf 1.700 € bis 24.000 € prognostiziert. Die großen Spannweiten resultieren aus der vorhandenen Ladeleistung – je größer diese ist, desto höher sind auch die Investitionskosten.



- Die Betriebskostenschätzung liegt zwischen 1.000 € und 3.000 € (2015) bzw. in der Prognose zwischen 500 € und 1.500 €.
- Im Sinne der Ladeinfrastruktur ist vor allem die für Abrechnungszwecke benötigte Kommunikationsstruktur ein Kostenpunkt – dies könnte gelöst werden, in dem die dafür notwendigen Kabel im Auto mitgeführt werden und nicht mehr vor Ort installiert werden ([2] S. 790)

12 Förderungsmöglichkeiten

E-Autos

- Die Anschaffung und Benutzung von E-Autos werden durch verschiedene Maßnahmen gefördert. Dazu zählen: die „Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer, der geldwerte Vorteil bei der Dienstwagenbesteuerung, die öffentlichen Initiativen zur Beschaffung von Elektrofahrzeugen, die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen hinsichtlich Laden und Ladeinfrastruktur sowie das Elektromobilitätsgesetz, welches am 26.09.2014 verabschiedet wurde und u. a. die Benutzung von Busspuren erlaubt sowie Park- und Halteregelelungen für Elektrofahrzeuge lockert“ ([43] S. 4 f.)
- KfW-Umweltprogramm 240: Elektro- und Hybridfahrzeuge

Infrastruktur

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Bundesförderung für öffentliche oder halböffentliche Ladeinfrastruktur
- KfW-Umweltprogramm 240: Ladestationen für E-Fahrzeuge und Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge

13 Beispiele

- Berlin, Wohnpark Mariendorf (2019): Versorgung von Ladesäulen mit Strom aus dem Quartier ([48])
- Ladesäulenkarte der Bundesnetzagentur: [49]

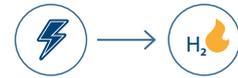
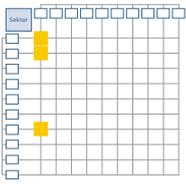
14 Weitere Kopplungsoptionen

- Sektor Verkehr: **Mobilstation**



15 Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise



2.1.5. Power-to-Gas (Wasserstoff)

0 Beschreibung

Power-to-Gas (PtG) wird als chemisches Energiespeichersystem beschrieben, das eine Langzeitspeicherung von EE-Strom in Form von Gas (in diesem Steckbrief Wasserstoff (H₂)) darstellt ([2] S. 327).

Das Speichersystem setzt sich aus drei Schritten zusammen: Einspeicherung (1), Speicherung (2) und Ausspeicherung (3) ([2] S. 449).

(1) Einspeicherung mittels Elektrolyse: unter Nutzung von Strom aus EE wird Wasser in H₂ und Sauerstoff gespalten.

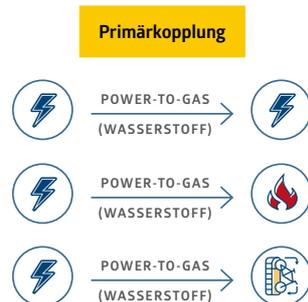
(2) Speicher: kurzzeitig in Wasserstoffleitungen oder oberirdischen Speichern und langfristig in Kavernenspeichern ([2] S. 454).

(3) Ausspeicherung: H₂ kann verbrannt, in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie umgesetzt oder stofflich genutzt werden.

H₂ kann einerseits in reiner Form genutzt und andererseits als Beimischung in geringen Mengen in das Erdgasnetz eingespeist werden.

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



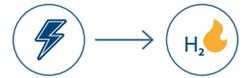
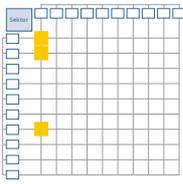
2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

Überschuss-Strom aus erneuerbaren Energien für grünes H₂ [50]

⑩ H₂ Farben: Grüner H₂ wird aus regenerativem Strom erzeugt und ist kaum mit CO₂ belastet. Grauer H₂ wird mit Hilfe fossiler Energieträger (v. a. aus Erdgas durch die Dampfreformierung) hergestellt. Wird die Erzeugung von H₂ aus fossilen Energieträgern mit einem CO₂-Abscheidungs- und Speicherverfahren gekoppelt, wird er als blauer H₂ bezeichnet. Er ist bilanziell CO₂-neutral, da das CO₂ nicht in die Atmosphäre gelangt. [50]



④ Ziele

- Flexibilisierung des Strommarktes: Ausgleich der saisonal und räumlich fluktuierenden Stromerzeugung aus EE durch dessen Langzeitspeicherung in Form von H₂ ([51] S. 6)
- Nutzbarmachung von erneuerbarem Strom als Kraft- und Brennstoff in den Sektoren Wärme und Verkehr ([2] S. 327) und somit Verringerung von THG-Emissionen ([51] S. 15) sowie Primärenergieträgereinsparung

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Der Aufbau einer leitungsgebundenen H₂-Infrastruktur ist in „Regionen geeignet, wo ein hoher Bedarf an H₂ herrscht, es Abnehmer in der Industrie gibt und geeignete Speichermöglichkeiten vorhanden sind“ ([2] S. 454).
- Möglichkeiten, wenn es keine Voraussetzungen für eine leitungsgebundene H₂-Infrastruktur gibt: dezentrale (H₂-Transport mittels Lkw) oder zentrale Konzepte (Elektrolyse vor Ort, z. B. zentrale Tankstelle)
- Räumliche Nähe der Elektrolyse zu erneuerbaren Stromquellen
- Bei Nutzung der Abwärme der Elektrolyse: vorhandenes Wärmenetz für den Absatz der Wärme sowie räumliche Nähe

⑥ Komponenten

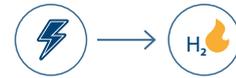
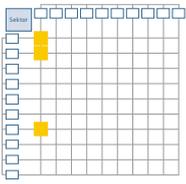
- Strombezug
 - Anschluss an das Stromnetz auf Mittelspannungsebene (Verteilungsnetz) oder
 - Eigene Stromverbindung zwischen EE-Anlagen und Elektrolyse (Umgehen der EEG-Umlage, Netzentgelte)
- Gesamtsystem Einspeicherung Elektrolyse ([52] S. 44, [53] S. 8):
 - Elektrolysezellen, die zu Stacks verbunden sind. Arten: Alkalische Elektrolyse, Polymer-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) oder Hochtemperaturelektrolyse (wird erforscht)

⑩ PEM-Elektrolyseure: Aufgrund ihrer schnelleren Reaktion auf Lastwechsel sowie ihrer guten Leistungen im unteren Teillastbereich, werden PEM-Elektrolyseure bevorzugt, da sie dadurch einem fluktuierenden Lasteintrag sehr gut folgen können. Nachteilig sind hohe Investitionskosten und die nicht gegebene großtechnische Verfügbarkeit ([53] S. 8)

- Nebenanlagen zur Wasseraufbereitung, Stromversorgung, Gasaufbereitung, Druckerhöhung, Steuerung und Kühlung
- Speicherung, abhängig von der H₂-Verwendung:
 - Lokaler Speicher und/oder
 - Einspeisemöglichkeit in eine leitungsgebundene Infrastruktur (Erdgas oder H₂) oder
 - Verteilungsinfrastruktur über Straßen-/Schienenverkehr durch Lkw oder Züge
- Ausspeicherung je nach Anwendung ([2] S. 454):
 - Strom: speziell angepasste Gasturbinen, BHKW oder Brennstoffzellen
 - Verkehr: Wasserstofftankstelle, Brennstoffzellenfahrzeuge
 - Wärme: Brennstoffzellenheizung

⑦ Technische Voraussetzungen

- Für kontinuierlichen Wasserstoffstrom sind Wasserstoffspeicher zur Zwischenspeicherung notwendig ([2] S. 452)



– H₂ kann auch in geringen Mengen in das Erdgasnetz eingespeist werden, allerdings ist der H₂-Gehalt auf 1 bis 5 Vol.-% H₂ begrenzt ([54] S. 196 f.). Die bestehende Erdgasinfrastruktur könnte gem. BDEW ca. 10 Vol.-% H₂ aufnehmen ([54] S. 198). Durch die Beimischung von H₂ sinkt der Heizwert des Gases, somit ist für die Aufrechterhaltung der Transportkapazität mehr Strom für die Verdichtung nötig ([54] S. 197).

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

– Das UBA empfiehlt für die Nutzung der PtG-Technologie den Strombezug aus zusätzlichen erneuerbaren Energiequellen, um so eine „höhere fossile Stromerzeugung zu vermeiden und die Erreichung der Klimaschutzziele zu gewährleisten“ ([7] S. 15). Eine Förderung entsprechender Anlagen solle nur bei einem parallelen Ausbau der EE erfolgen.

⑨ Wirksamkeit

- Die Effizienz des Gesamtsystems ist von der Elektrolysetechnik, vom Druckniveau, von der Größe der Anlage ([2] S. 370) und ihrer Fahrweise (Teillastbereich, Volllast), von der Effizienz der Speichereinrichtungen sowie von den Ausspeichertechniken abhängig.
- Spezifischer Energieverbrauch ([53] S. 9)
 - Alkalische Elektrolyse 4,0-5,0 kWh/Nm³ H₂
 - PEM-Elektrolyse 4,0-8,0 kWh/Nm³ H₂
- Für unterschiedliche PtG-Speichersysteme werden folgende Wirkungsgrade der Prozessketten angegeben ([2] S. 464):
 - Strom - H₂ (Kompression auf 80 bar): 57-80 %
 - Strom - H₂ - Strom (über Brennstoffzelle): 34-51 %
 - Strom - H₂ - Motorleistung (über Brennstoffzelle): 38-53 %
- Durch Abwärmenutzung der Elektrolyseanlagen kann die Effizienz gesteigert werden

⑩ Einsparpotentiale

Primärenergie

Die eingesparte Primärenergie ist maßgeblich abhängig von den Wirkungsgraden der Elektrolyse und der Anlagen, die den H₂ in die jeweilige Zielenergie umwandeln (Strom, Wärme, Fahrleistung) sowie von der Herkunft des Stroms für die Elektrolyse. Wird der aktuelle Strommix verwendet, kommt es zu einem Mehrverbrauch von Primärenergieträgern (siehe entsprechend Emissionen).

Emissionen (in Anlehnung an [2] S. 466)

Je nach Sektor, in dem der H₂ Verwendung findet, werden verschiedene Energieträger substituiert und unterschiedliche CO₂-Einsparungen erzielt. Die Stromquelle der Elektrolyse bestimmt maßgeblich, ob es tatsächlich zur Emissionsminderung kommt.

In der Berechnung beträgt der Wirkungsgrad der Elektrolyse 69 %.

Als Referenz werden folgende Prozesse gewählt:

- Sektor Strom: Gas- und Dampfturbinen Kraftwerk (GuD)
- Sektor Wärme: Brennwertkessel
- Sektor Verkehr: Dieselmotor

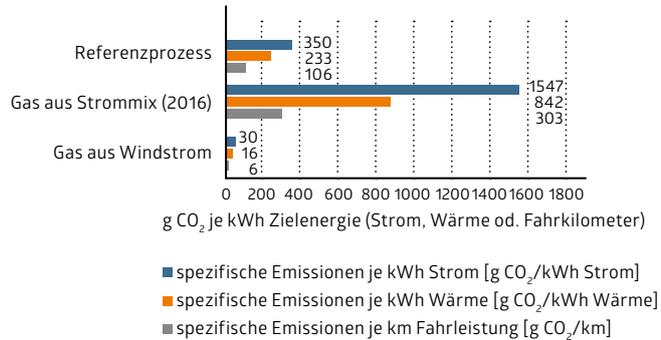
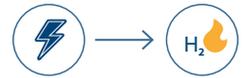
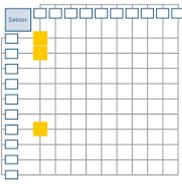


Abb. 7: PtG (Wasserstoff): CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

Nur bei der Nutzung von Windstrom werden CO₂-Einsparungen gegenüber den jeweiligen Referenzprozessen erzielt. Wird das Gas durch die Verwendung des Strommixes erzeugt, sind die Endprodukte für Wärme, Strom und Verkehr stärker CO₂-belastet als im konventionellen Referenzprozess.

Energieträger	Emission Energieträger [g _{CO2} /kWh]	Emission der Stromerzeugung [g _{CO2} /kWh _{Strom}]	Einsparung
Referenz (GuD)	201	350 (η = 0,58)	0 %
Gas aus Strommix	758 (η = 0,69)	1.547 (η = 0,49)	- 342 %
Gas aus Windstrom	14 (η = 0,69)	14 (η = 0,69)	92 %

Tabelle 5: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Stromsektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

Energieträger	Emission Energieträger [g _{CO2} /kWh]	Emission der Wärmeerzeugung [g _{CO2} /kWh _{Wärme}]	Einsparung
Kessel (Gasbetrieb)	201	223 (η = 0,90)	0 %
Gas aus Strommix	758 (η = 0,69)	842 (η = 0,90)	- 277 %
Gas aus Windstrom	14 (η = 0,69)	16 (η = 0,90)	93 %

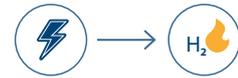
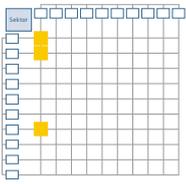
Tabelle 6: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Wärmesektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

Energieträger	Emission Energieträger [g _{CO2} /kWh]	Emission je [g _{CO2} /km]	Einsparung
Dieselmotor	266	106 (4 l/100 km)	0 %
Gas aus Strommix	758 (η = 0,69)	303 (40 kWh/100 km)	- 186 %
Gas aus Windstrom	14 (η = 0,69)	6 (40 kWh/100 km)	95 %

Tabelle 7: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Verkehrssektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

11 Kosten

– PtG-Anlagen sind kapitalintensiv und benötigen daher „für einen wirtschaftlichen Betrieb günstigen Erneuerbaren-Strom und hohe Volllaststunden [3.000-4.000 h/a]. Sie können



- daher nicht mit Überschuss-Strom betrieben werden.“ ([55] S. 16).
- Beim Bau von EE-Anlagen, müssten die PtG-Produkte deren Vollkosten ebenfalls tragen ([55] S. 18).
 - Die Strombezugskosten spielen aufgrund der Umwandlungsverluste eine große Rolle ([53] S. 12; [55] S. 16). Der direkte Strombezug aus EE-Anlagen stellt einerseits die ausschließliche Nutzung regenerativen Stroms sicher und ermöglicht andererseits die Umgehung von monetären Abgaben. Dies kann die Wirtschaftlichkeit der Anlagen erhöhen.
 - Die Erzeugung von H₂ ist kostengünstiger als die CH₄-Produktion, aber es entstehen Kosten für die Anpassung der Verteilungsinfrastrukturen und der Endgeräte ([55] S. 24).
 - Investitionskosten
 - Alkalische Elektrolyse ([53] S. 9) 800-1.500 €/kW_{el}
 - PEM-Elektrolyse ([53] S. 9) 2.000-6.000 €/kW_{el}
 - Allg. Wasserstoffelektrolyse ([55] S. 65) 750-4.000 €/kW_{el}
 - Die Investitionskosten sollen durch eine kontinuierliche Steigerung der jährlichen Stückzahlen sowie den Übergang zur seriellen Fertigung bis 2022 auf 500 €/kW_{el} ([53] S. 9) reduziert werden.

12 Förderungsmöglichkeiten

- Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP): Fördermaßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung, Unterstützung erster Produkte für eine Marktaktivierung (2016 – 2026)
- KfW-Förderprogramm 270: Erneuerbare Energien „Standard“

13 Beispiele

- Deutschlandweite Projektkarte: <https://www.powertogas.info/projektkarte/>
- Hybrid Kraftwerk Prenzlau (Artikel zum Projekt: [56]), Oktober 2011
- GP Joule: Nutzung überschüssigen Windstroms für die Erzeugung von H₂ für den ÖPNV (Artikel zum Projekt: [57])

14 Weitere Kopplungsoptionen

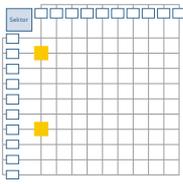
- Sektor Wärme: **Wärmerückgewinnung**



16 eFarm Projekt in Nordfriesland: Im Projekt eFarm nutzt die Fa. GP Joule die Abwärme von PEM-Elektrolyseuren und erreicht somit einen Gesamtwirkungsgrad von nahezu 100 %. Während 75 % der zugeführten Energie im Wasserstoff gespeichert sind, können die restlichen 25 % durch Nutzung der Abwärme verwertet werden [57].

15 Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.



2.1.6. Power-to-Gas (Methan)

0 Beschreibung

Power-to-Gas (PtG) wird als chemisches Energiespeichersystem beschrieben, das eine Langzeitspeicherung von EE in Form von Gas (in diesem Steckbrief **Methan** (CH₄)) darstellt ([2] S. 327). Für die Herstellung synthetischen Methangases wird Wasserstoff (H₂) benötigt. Dieser kann durch Elektrolyse hergestellt werden, in diesem Falle handelt es sich hier um eine Primärkopplung. Wird direkt grüner H₂ bezogen und für die Methanisierung verwendet, ist die Kopplung eine sekundäre.

Das Speichersystem setzt sich aus drei Schritten zusammen: Einspeicherung (1), Speicher (2) und Ausspeicherung (3) ([2] S. 455 f.).

(1) Einspeicherung: Gegebenenfalls Elektrolyse (Primärkopplung), Methanisierung (H₂ reagiert mit CO₂ zu CH₄ + Wasser)

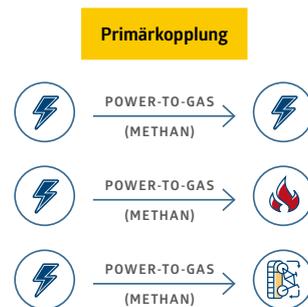
(2) Speicherung: Gasnetz, Kavernen-, Poren- oder oberirdische Speicher

(3) Das synthetische CH₄ kann in sämtlichen (erd-)gasbetriebenen Anlagen verbrannt werden.

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 ([51] S. 37). Damit können bestehende Infrastrukturen für Transport und Lagerung genutzt werden. Nachteilig sind weitere Zwischenschritte, die CO₂ benötigen, Abwärme generieren und den Wirkungsgrad vermindern ([2] S. 456).

1 Kopplungstyp

- Primärkopplung (Elektrolyse und Methansynthese in einer Anlagenkonfiguration). Informationen zur vorgeschalteten Elektrolyse siehe [Power-to-Gas \(Wasserstoff\)](#)
- Sekundärkopplung (H₂ wird weiterverarbeitet)

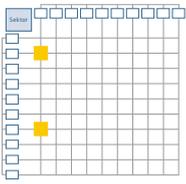


2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

- Überschuss-Strom aus EE
- Bei Sekundärkopplung: **grüner H₂**
- CO₂ aus biogenen Kohlenstoffquellen ([53] S. 10). Generell kann es folgenden Quellen entstammen ([2] S. 372 ff.; [58] S. 53):
 - biogenes CO₂ (Abscheidung aus Biogasaufbereitung oder aus Abgas aus Holzheizkraftwerken; Rohbiogas)



- atmosphärisches CO₂ (Abscheidung aus der Luft)
- CO₂-Recycling (Abscheidung bei Verbrennung von klimaneutralem Gas, Kreisprozess)
- fossiles CO₂ (Abscheidung aus Rauchgasen industrieller, eingeschränkt substituierbarer Prozesse z. B. Zementherstellung.).

④ Ziele

- Kopplung der Strom- und Gasnetze zur Entlastung der Stromnetze und Gewährleistung der Versorgungssicherheit
- Schaffung einer zusätzlichen inländischen erneuerbaren Gasquelle ([51] S. 36)
- Substitution fossiler Energieträger in den Sektoren Wärme und Verkehr ([2] S. 376)

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

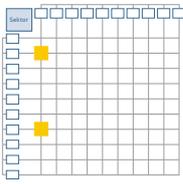
- Räumliche Nähe zu einem vorhandenen (grünen) H₂-Netz, einer grünen H₂-Quelle (Sekundärkopplung) oder räumliche Nähe der Elektrolyse zu erneuerbaren Stromquellen (Primärkopplung)
- Methanisierung: räumliche Nähe zu einer CO₂-Quelle ist erforderlich, um dessen kostenintensiven Transport zu vermeiden ([54] S. 167).
- Bei der Nutzung der Abwärme der Methanisierungsanlage: Wärmenetz und geeignetes Gebiet für den Absatz der Wärme

⑥ Komponenten

- Elektrolyse (siehe [Steckbrief Power-to-Gas Wasserstoff](#) ©)
- Methanisierung ([52] S. 59 f.)
 - Methanisierungsanlage (chemisch oder biologisch)
 - Ggf. Anlagen zur Gewinnung von CO₂
 - Nebenanlagen zur Aufbereitung des CO₂ und des erzeugten Methangases
- Speicherung: Erdgasnetz, Speicherbehälter oder unterirdische Speicher
- Ausspeicherung je nach Anwendung ([2] S. 456): GuD-Kraftwerke, Gasturbinen, BHKW, Gasheizung, gasbetriebene Fahrzeuge inkl. Gas-Tankstelleninfrastruktur

⑦ Technische Voraussetzungen

- Der technische Aufwand für die Methanisierungsanlage (Verdichter, Aufbereitungsanlage, Rührwerke) sollte berücksichtigt werden ([54] S. 179)
- Bei Erzeugung des H₂ mit Strom aus EE werden zum Ausgleich der volatilen Erzeugung H₂-Speicher für einen kontinuierlichen Betrieb der Methanisierungsanlage benötigt ([52] S. 60)
- Die CO₂-Quelle muss über eine Reinheit und Kontinuität verfügen ([2] S. 377) – eventuell CO₂-Speicher vorsehen
- Die Herstellung 1 kWh Methan bedarf 0,198 kg CO₂ ([55] S. 70)
- Nutzung des Gasnetzes als „sehr große und verfügbare Speicheroption. [...] Da das Gasnetz eine deutlich größere Kapazität sowie eine deutlich größere Reaktionsträgheit als das Stromnetz hat, ist auch ein saisonaler Ausgleich von Energieerzeugung und -verbrauch denkbar.“ ([51] S. 36)



⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Strombezug aus regenerativen Quellen
- Es muss die Ökobilanz der gesamten Produktionskette betrachtet werden ([52] S. 61) – das CO₂ muss aus der Atmosphäre oder aus biogenen Quellen stammen.
- Das UBA empfiehlt für die Nutzung der PtG-Technologie den Strombezug aus zusätzlichen erneuerbaren Energiequellen, um so eine „höhere fossile Stromerzeugung zu vermeiden und die Erreichung der Klimaschutzziele zu gewährleisten“ ([7] S. 15). Eine Förderung entsprechender Anlagen sollte nur bei einem parallelen Ausbau der EE erfolgen.

⑨ Wirksamkeit

- Die Effizienz des Gesamtsystems ist von der Elektrolyse und der Methanisierungstechnik, von der Effizienz der Speicheranlagen sowie von den Ausspeichertechniken abhängig
- Für unterschiedliche Speichersysteme werden folgende Wirkungsgrade der Prozessketten angegeben ([4] S. 464):
 - Strom – H₂ – CH₄ (Kompression auf 80 bar): 50-78 %
 - Strom – H₂ – CH₄ – Strom (über GuD-Kraftwerk): 30-38 %
 - Strom – H₂ – CH₄ – Motorleistung (über Ottomotor): 18-37 %
 - Strom – H₂ – CH₄ – Wärme und Strom (KWK): 43-68 %
 - Strom – H₂ – CH₄ – Wärme (Brennwertkessel): 53-84 %
- „Die Nutzung der entstehenden Prozessabwärme auf hohem Temperaturniveau kann den Wirkungsgrad, die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Bilanz der Methanisierung deutlich verbessern“ ([2] S. 378), dies ist vor allem bei Hochtemperaturelektrolyseuren der Fall.
- Die Kombination mit einer Biogasanlage steigert die Effizienz der Methanisierung: die Methanproduktion kann fast verdoppelt werden, da so das CO₂ des Biogases für die Methanisierung genutzt werden kann ([53] S.5).

⑩ Einsparpotentiale

Primärenergie

Die eingesparte Primärenergie ist maßgeblich abhängig von den Wirkungsgraden der Elektrolyse und der Methanisierungsanlage, die den H₂ in die jeweilige Zielenergie umwandeln (Strom, Wärme, Kraftstoff) sowie von der Herkunft des Stroms für die Elektrolyse. Wird der aktuelle Strommix verwendet, kommt es zu einem Mehrverbrauch von Primärenergieträgern (siehe entsprechend Emissionen).

Emissionen (in Anlehnung an [2] S. 466)

Je nach Sektor, in dem das CH₄ Verwendung findet, werden verschiedenen Energieträger substituiert und damit unterschiedliche CO₂-Einsparungen erzielt. Die Stromquelle der Elektrolyse bestimmt maßgeblich, ob es tatsächlich zur Emissionsminderung kommt.

In der Berechnung beträgt der Wirkungsgrad von Elektrolyse und Methanisierung 60 %. Es wird angenommen, dass das CO₂ aus biogenen Quellen stammt.

Als Referenzprozesse werden für den Sektor Strom ein Gas und Dampfturbinen Kraftwerk und für den Sektor Wärme ein Brennwertheizkessel definiert. Der Verkehrssektor wird hier nicht betrachtet.

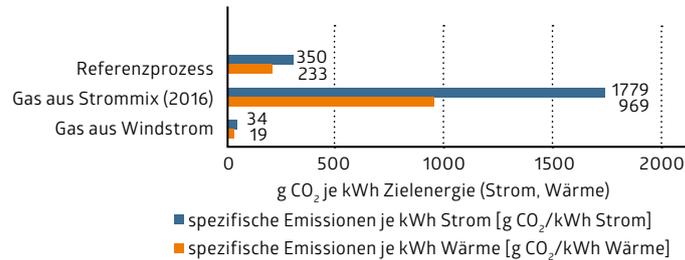
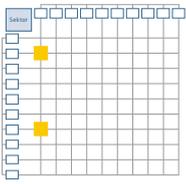


Abb. 8: PtG (Methan): CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

Energieträger	Emission Energieträger [g _{CO2} /kWh]	Emission der Stromerzeugung [g _{CO2} /kWh _{Strom}]	Einsparung
Referenz (GuD)	201	350 (η = 0,58)	0 %
Gas aus Strommix	872 (η = 0,60)	1.779 (η = 0,49)	- 408 %
Gas aus Windstrom	17 (η = 0,60)	34 (η = 0,49)	90 %

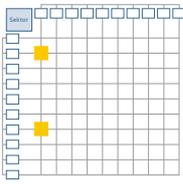
Tabelle 8: PtG (Methan): Einsparungen im Stromsektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

Energieträger	Emission Energieträger [g _{CO2} /kWh]	Emission der Wärmeerzeugung [g _{CO2} /kWh _{Wärme}]	Einsparung
Kessel (Gasbetrieb)	201	223 (η = 0,90)	0 %
Gas aus Strommix	890 (η = 0,69)	969 (η = 0,90)	- 334 %
Gas aus Windstrom	18 (η = 0,69)	19 (η = 0,90)	92 %

Tabelle 9: PtG (Methan): Einsparungen im Wärmesektor; Icha 2019: S. 10 u. 17 und Lauf et al. 2019: S. 49

11 Kosten

- PtG-Anlagen sind kapitalintensiv und benötigen daher „für einen wirtschaftlichen Betrieb günstigen Erneuerbaren-Strom und hohe Vollaststunden [3.000-4.000 h/a]. Sie können daher nicht mit Überschuss-Strom betrieben werden.“ ([55] S. 16)
- Würden zusätzliche EE-Anlagen gebaut werden, müssten die PtG-Produkte deren Vollkosten ebenfalls tragen ([55] S. 18)
- Betriebskosten: Die Strombezugskosten spielen aufgrund der Umwandlungsverluste eine große Rolle ([53] S. 12; [55] S. 16). Der direkte Strombezug aus EE-Anlagen stellt einerseits die ausschließliche Nutzung regenerativen Stroms sicher und ermöglicht andererseits die Umgehung von monetären Abgaben. Dies kann die Wirtschaftlichkeit der Anlagen erhöhen.
- Investition in eine Anlage für die CO₂-Gewinnung aus der Luft beträgt ca. 1.800 €/kW_{Methan} ([55] S. 70)
- Die Kosten von synthetischem Methan (Off-Shore, Nord-/Ostsee) liegen im Jahr 2022 bei 20 bis 30 ct/kWh (ohne Netzentgelte und Vertriebskosten) und sind damit im Mittel um ein zehnfaches höher als Erdgaskosten ([55] S. 20).
- Für eine erhöhte Wirtschaftlichkeit ist die Entwicklung der Stromerzeugungskosten und die Auslastung sowie die Investitionskosten der entsprechenden Anlagen ausschlaggebend ([55] S. 20)



POWER-to-GAS (METHAN)



– Durch Zusammenfassen verschiedener Studien können die heutigen Investitionskosten der Methanisierung auf 500-2750 €/kWh_{Methan} abgeschätzt werden. Für 2030 ergeben sich Kostensenkungspotentiale auf 250-1.000 €/kWh_{Methan} ([55] S. 68).

12 Förderungsmöglichkeiten

– KfW-Förderprogramm 270: Erneuerbare Energien „Standard“

13 Beispiele

– Deutschlandweite Projektkarte: <https://www.powertogas.info/projektkarte/>
– Pilotanlage in Allendorf (Eder): H₂ aus einer Elektrolyseanlage und CO₂ aus einer Biogasaufbereitungsanlage werden in Biomethan umgewandelt (Projektsteckbrief unter [59])

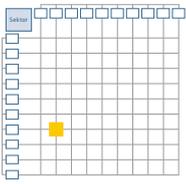
14 Weitere Kopplungsoptionen

– Sektor Wärme: **Wärmerückgewinnung**



15 Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.



2.1.7. Power-to-Liquid

0 Beschreibung

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 ([2] S. 471 f.).

16 **Kurzer Steckbrief:** PtL wird vor allem für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt. Aufgrund der geringen Wirkungsgrade sowie der Existenz wesentlich effizienterer Möglichkeiten zur Emissionsminderung im Verkehrssektor (Elektro- oder Wasserstoffmobilität, Vermeidung des motorisierten Individualverkehrs durch Mobilstationen), wird auf diese Technologie nur oberflächlich eingegangen. Für Kommunen ist PtL vor allem in Kombination mit einer Wärmerückgewinnung (Einspeisung in ein Wärmenetz) sinnvoll.

Für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe wird Wasserstoff (H₂) benötigt. Dieser kann durch Elektrolyse hergestellt werden, in diesem Falle handelt es sich hier um eine Primärkopplung. Alle Informationen zur Erzeugung des H₂ sind in 2.1.5 Power-to-Gas (Wasserstoff) enthalten. Wird direkt grüner H₂ bezogen und für die Herstellung flüssiger Energieträger verwendet, ist die Kopplung eine sekundäre.

Das Speichersystem setzt sich aus drei Schritten zusammen: Einspeicherung (1), Speicher (2) und Ausspeicherung (3) ([2] S. 473).

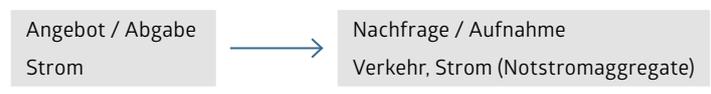
- (1) Einspeicherung: gegebenenfalls Elektrolyse und anschließende Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) oder Methanolsynthese
- (2) Speicherung: oberirdische Mineralölspeicher, Pipelines, Tankstellen
- (3) Ausspeicherung je nach Sektor: Flugzeugturbinen, Gasturbinen, BHKW, Dieselgeneratoren, konventionelle Verkehrsantriebe. Methanol wird für den Betrieb von Ottomotoren, Gasturbinen, BHKW, Wärmepumpen oder stofflich genutzt ([58] S. 474).

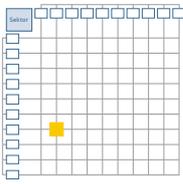
1 Kopplungstyp

- Primärkopplung (Elektrolyse und Synthese in einer Anlagenkonfiguration). Informationen zur vorgeschalteten Elektrolyse siehe [Power-to-Gas \(Wasserstoff\)](#)
- Sekundärkopplung (H₂ wird weiterverarbeitet).



2 Sektoren





③ Eingesetzte Ressourcen

- Überschuss-Strom aus EE
- Bei Sekundärkopplung: grüner H₂
- CO₂ aus biogenen Kohlenstoffquellen ([53] S. 10). Generell kann es folgenden Quellen entstammen ([2] S. 372 ff.; [58] S. 53):
 - biogenes CO₂ (Abscheidung aus Biogasaufbereitung oder aus Abgas aus Holzheizkraftwerken; Rohbiogas)
 - atmosphärisches CO₂ (Abscheidung aus der Luft)
 - CO₂-Recycling (Abscheidung bei Verbrennung von klimaneutralem Gas, Kreisprozess)
 - fossiles CO₂ (Abscheidung aus Rauchgasen industrieller, eingeschränkt substituierbarer Prozesse z. B. Zementherstellung.).

④ Ziele

- Substitution der fossilen Energieträger und somit treibhausgasneutrale Versorgung des Verkehrssektors mit strombasierter Energie ([7] S. 4), vor allem für Anwendungen, die auf energiereiche Flüssigkraftstoffe angewiesen sind: Flugverkehr, Schiffs- und Straßengüterverkehr ([7] S. 10)
- Substitution der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse, die in Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittellandwirtschaft steht

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

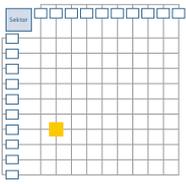
- Räumliche Nähe zu einer Wasserstoffquelle regenerativer Natur (Elektrolyse mittels EE-Strom)
- Räumliche Nähe zu einer CO₂-Quelle ist erforderlich, um dessen kostenintensiven Transport zu vermeiden ([54] S. 167).
- Bei der Nutzung der Abwärme der Synthesenanlagen: Wärmenetz für den Absatz der Wärme sinnvoll

⑥ Komponenten

- Fischer-Tropsch-Synthese-Einheit mit Aufbereitung des CO₂-Stroms oder Methanolsynthese-Einheit
- Speicherung: oberirdische Mineralölspeicher, Pipelines, Tankstellen ([2] S. 474)
- Ausspeicherung je nach Anwendung: Ottomotor, Gasturbine, GuD-Kraftwerk, BHKW, Wärmepumpen, Kältemaschinen, Flugzeugturbinen, konventionelle Verkehrsantriebe

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Ökobilanz der gesamten Produktionskette spielt [...] eine Rolle – neben einer erneuerbaren Stromquelle [bei der vorgeschalteten Wasserstoffproduktion] ist vorzugsweise eine biomasseentstammende Kohlendioxidquelle (CO₂-Strom aus dem Aufbereitungsprozess einer Biomethananlage) oder atmosphärisches CO₂ zu verwenden ([52] S. 61)
- Entstehende Prozesswärme sollte genutzt werden, um den Gesamtwirkungsgrad und die Ressourceneinsparung zu erhöhen
- Das UBA empfiehlt für die Nutzung der PtL-Technologie den Strombezug aus zusätzlichen EE-Quellen. Eine Förderung solle nur bei tatsächlichem Ausbau der EE erfolgen.



⑨ Wirksamkeit

- Die Effizienz der FTS ist stark von der vorangegangenen Elektrolyseart abhängig: die Gesamtwirkungsgrade der FTS betragen ([2] S. 475):
 - Mit Hochdrucktemperaturelektrolyse: 65-70%
 - Mit alkalischer oder PEM-Elektrolyse: 55-60%
- Die Methanolsynthese ist effizienter als die Methansynthese (PtG Methan), da weniger Abwärme entsteht. Gesamtwirkungsgrad: 75-80% ([2] S. 475)

⑬ Beispiele

- Pilotanlage des Karlsruher Instituts für Technologie, Presseinformation zu finden unter [60]

⑭ Weitere Kopplungsoptionen

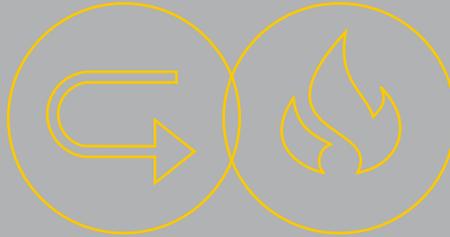
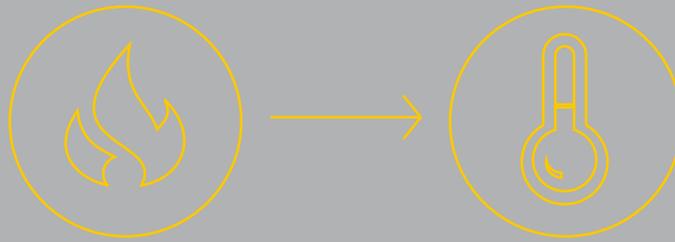
– Sektor Wärme: **Wärmerückgewinnung**

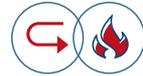
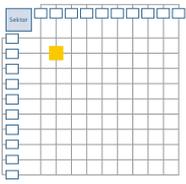


⑮ Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.

2.2. Sektor Wärme





2.2.1. Wärmerückgewinnung

0 Beschreibung

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 ([61] S. 34), Kühlwasser aus Kälteanlagen und Kühlsystemen [62] sowie Rechenzentren ([63] S. 69) zu nennen. Je nach Temperaturniveau kann die abgeführte Wärme innerbetrieblich zur Brauch- und Trinkwarmwassererwärmung verwendet; an benachbarte Abnehmer geliefert; oder in den Vor- oder Rücklauf eines Wärmenetzes eingespeist werden. Im Steckbrief wird eine Wärmerückgewinnung im Quartiersmaßstab thematisiert.

Die Abwärme kann abhängig von der Temperatur für verschiedene Anwendungen genutzt werden ([62]):

- 30 – 75°C Wasservorerwärmung, Raumheizung mittels Wärmepumpe
- 75 – 120°C Heizung, Warmwasser, Trocknung
- 80 – 160°C Kälteerzeugung (Sektorenkopplung Kälte)

Steht die Wärme in einem geringen Temperaturniveau zur Verfügung, kann sie in ein Niedertemperaturnetz eingespeist werden oder im Gebäude mit Hilfe einer Wärmepumpe auf ein entsprechendes Niveau angehoben werden – die Wärmepumpe erreicht so aufgrund konstant erhöhter Temperaturen bessere Leistungszahlen als bei der Nutzung von bspw. Umgebungsluft.

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



– Sekundärkopplung (PtG (Wasserstoff), PtG (Methan), PtL)

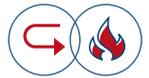
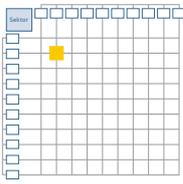


2 Sektor



3 Eingesetzte Ressourcen

Abluft bzw. Kühlwasser aus Industrie-, Sektorenkopplungs- bzw. betrieblichen Prozessen



④ Ziele

- Wirkungsgraderhöhung einzelner Prozesse. Zum Beispiel lässt sich der Wirkungsgrad beim Elektrolyseverfahren durch Abwärmenutzung von 75 % auf ≈ 100 % erhöhen (siehe [Steckbrief PtG Wasserstoff](#), ⑩)
- Emissions- und Primärenergieträgereinsparung durch effiziente Nutzung von Energieträgern und -quellen

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Städtische Siedlungsstruktur: mittlere bis dichte Bebauung (wärmenetzgeeignetes Versorgungsgebiet)
- Begünstigend: vorhandenes Nah-, Fernwärmenetz oder Nieder temperaturnetz
- Räumliche Nähe von Angebot und Nachfrage

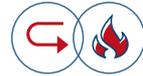
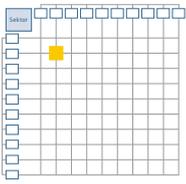
⑥ Komponenten

- Wärmeübertrager für die WRG (Bauart je nach wärmeübertragendem Medium (Luft, Wasser, Kältemittel) – Platzbedarf beachten)
- Ggf. Wärmespeicher zum Ausgleich von Ungleichzeitigkeiten der Erzeugung und des Bedarfs (bei Wärmenetzen meistens gegeben)
- Betriebsinterne Verwendung der Wärme ohne große Anpassungen möglich: Heizungsnetz kann weiter genutzt werden ([64] S. 7).
- Leitungen und je nach Weiterverwendung der Abwärme:
 - Einspeisemöglichkeit in den Rück- oder Vorlauf eines Wärmenetzes (je nach Temperaturniveau) mit entsprechenden Wärmeübergabestationen
 - Anbindung mit Übergabestation zu versorgenden Gebäuden im direkten Umfeld der Wärmeentstehung

⑦ Technische Voraussetzungen

- Entscheidende Parameter der Planung ([64] S. 5):
 - Temperaturniveau (der Abwärme, des Bedarfs)
 - Wärmeleistung (der Abwärme, des Bedarfs)
 - Zeitliche und kontinuierliche Verfügbarkeit, Schwankungen der Abwärme: Saisonale Verfügbarkeit ist zu beachten: Für Wärmenetzbetreiber könnte eine Abnahme im Sommer uninteressant sein.
- Zur Orientierung gibt es folgende Erfahrungswerte [62]:
 - Temperatur am Austritt der Wärmequelle sollte mind. 20°C über der benötigten Temperatur der Wärmesenke liegen
 - Je Meter Länge der Wärmeleitung sollte die jährlich gelieferte Energiemenge mind. $2 \text{ MWh}_{\text{th}}$ betragen
- Bei der Einspeisung in bestehende Wärmenetze sind Betriebsparameter des Netzbetreibers zu beachten: Temperatur und Druck ([64]), in der Regel enthalten in den technische Anschlussbedingungen des Wärmenetzbetreibers

⑩ **Absicherung:** Wird die Abwärme verkauft, muss die vertraglich gewährleistete Leistung abgesichert sein. Dies kann anhand von Spitzenlasterzeugern (Heizkesseln) erfolgen, die als Backup zur Verfügung stehen [62]. Ist eine Abschaltung der Abwärme erzeugenden Anlagen geplant, könnten Heizstationen gemietet werden ([64] S. 7).



⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Kann Wärme nicht als Abwärme zur Verfügung gestellt, sondern muss im Falle eines Ausfalls der Abwärme erzeugenden Anlagen durch einen Spitzenlastwärmeerzeuger bereitgestellt werden, sollte dieser ökologischen Ansprüchen genügen und zumindest nicht mehr CO₂ emittieren als ein „normaler Wärmeerzeuger“

⑨ Wirksamkeit

- Effizienz der WRG ist von der Art der Wärmeüberträger, vom Temperaturniveau etc. abhängig
- Durch Speichersysteme kann die Volllaststundenzahl erhöht und somit die Effizienz des Systems gesteigert werden [62]
- Es fallen ggf. Speicher- und Verteilungsverluste im Wärmenetz an
- Die Rückwärmzahlen liegen zwischen 0,45 und 0,8 – das heißt es können ca. 45 bis 80 % der Abwärme genutzt werden ([65] S. 55)
- Es wird elektrische Energie für Hilfsantriebe, die Überwindung von Druckverlusten, Umwälzpumpen etc. ([65] S. 46) benötigt. Die Menge ist systemabhängig.

⑩ Einsparpotentiale

Primärenergie

Die Höhe der Primärenergieeinsparung ist davon abhängig, welche Wärmeerzeugung durch Abwärme ersetzt wird. Es ist zu beachten, dass die Primärenergie nicht zu 100 % eingespart werden kann, da für die Nutzbarmachung der Wärme Hilfsenergien in Form von Strom benötigt werden. Die Einsparungen sind von den jeweiligen Systemen und Vor-Ort-Bedingungen abhängig, generelle Aussagen über Einsparungen sind nicht möglich.

Beispiel A: In Ingolstadt speisen eine Raffinerie sowie eine Müllverbrennungsanlage die erzeugte Abwärme in ein Fernwärmenetz ein (310 GWh). So können 16,3 Mio. m³ (ca. 165 GWh) Erdgas eingespart werden ([66]).

CO₂-Emissionen

Als „Abfallprodukt“ wird Abwärme als emissionsfrei betrachtet ([67] S. 20). Daher können die Emissionen der zu ersetzenden Wärmeerzeugung zu 100 % substituiert werden – abzüglich der Emissionen, die durch Hilfsenergien emittiert werden.

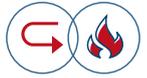
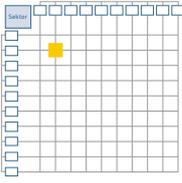
Beispiel A: Laut Projektträger können durch die Abwärme der Raffinerie und der Müllverbrennung in Ingolstadt über 35.000 t CO₂ eingespart werden.

Beispiel B: Der Zusammenschluss der Gemeinde Ostercappeln (Niedersachsen) und dem Unternehmen Meyer zu Venne (Waffelhersteller) führte zum Aufbau eines Nahwärmenetzes (154 Hausanschlüsse), dass durch die Abwärme der Fabrik (10 GWh) gespeist wird. Dadurch können 1.100 t CO₂ /a eingespart werden ([68] S. 64).

⑪ Kosten

Wirtschaftlichkeit

- Mit dem Aufbau von betriebsübergreifenden Infrastrukturen sind Kosten verbunden, die sich erst über einen längeren Zeitraum amortisieren ([63] S. 69). Beim Anschluss an ein bestehendes Wärmenetz können sich aus den Leitungen und den jeweils individuellen Planungen Kosten ergeben, die keine Wirtschaftlichkeit garantieren ([64] S. 7)



- Durch den Verkauf von Abwärme können Umsätze generiert werden
- „Wird Abwärme effektiv abgeführt, kann sich der Bedarf zur Prozesskühlung verringern und ggf. Investitionen für Kühlanlagen entfallen“ [62]. Die Wärme kann auch zur Kälteerzeugung genutzt werden (siehe ⑮).
- Um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu sichern, sollte die Leistungsdichte mind. 1 kW/m und die übertragene Energiemenge mind. 2 MWh/(m²a) betragen ([62])

Kosten

- Über die Kosten können schwierig allgemeine Aussagen getroffen werden, daher werden hier ebenfalls Beispiele aufgeführt
- **Beispiel A (Ingolstadt):** 23,4 Mio. €, beinhaltet den Ausbau des städtischen Fernwärmenetzes (5.300 m Leitung zur Raffinerie) und der Anlagen zur Auskopplung der Wärme ([66])
- **Beispiel B (Ostercappeln):** Kosten von ca. 3,94 Mio. € inkl. Bau des Nahwärmenetzes, eines Pufferspeichers, zweier Spitzenlastkessel und der 154 Hausstationen; davon ca. 1 Mio. € Förderung durch die KfW. Schätzung der Amortisationszeit auf 10 Jahre ([68] S. 65)
- **Beispiel C:** Die Brauerei C.&A. VELTINS GmbH & Co. KG spart durch innerbetriebliche Abwärmenutzung 6,5 GWh Wärme. Investition: 1,8 Mio. €, Kosteneinsparung: 238.500 €/a ([69] S. 7)
- **Beispiel D:** Die Roth Werke GmbH kann durch betriebsinterne Abwärmenutzung den Energieverbrauch der Heizung um knapp 1,7 GWh/a reduzieren. Investition: 250.000 €, Kosteneinsparung: 150.350 €/a

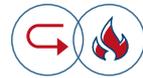
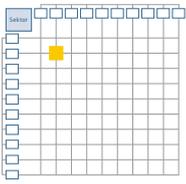
⑯ **WRG kombiniert mit anderen Wärmeerzeugern:** Die Kombination der Abwärmenutzung mit einem BHKW kann bei stromorientierter Fahrweise zu Problemen führen: Das BHKW erzeugt selbst Abwärme und müsste bspw. im Sommer bei wenig Wärmebedarf abgeschaltet werden, damit die stetig vorhandene Abwärme der Rechenzentren genutzt werden kann. Das führt zu langen Zeiträumen des Stillstands in der Sommerzeit und reduziert somit die Wirtschaftlichkeit des BHKW. Auch eine Wärmeabnahme in Kombination mit bspw. Solarthermie ist im Sommerfall problematisch, da die Wärmeerzeuger in Konkurrenz stehen.

⑫ Förderungsmöglichkeiten

- KfW-Förderprogramm 295: Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft für besonders effiziente Komponenten, Anlagen und Lösungen
- Karlsruher Institut für Technologie: Energieeffiziente und klimaschonende Produktionsprozesse
- Umweltinnovationsprogramm des UBA und des Bundesumweltministeriums, mit dem Unternehmen gefördert werden, die ihre Umweltbelastungen minimieren wollen

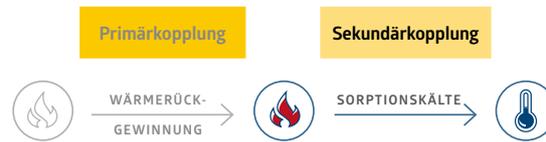
⑬ Beispiele

- Stockholm: FW-Netz wird u. a. durch Abwärme aus H&M-Rechnerzentren gespeist (Artikel: [70])
- Hamburg: Kupferhersteller Aurubis liefert Abwärme (Artikel: [71])
- Berlin: Porzellan-Manufaktur speist Abwärme in Fernwärmenetz ein ([62])
- Projekt der Thüringer Energie- und Green-Tech-Agentur: Abwärme-Kataster



⑭ Weitere Kopplungsoptionen

– Sektor Kälte: **Sorptionskälte**



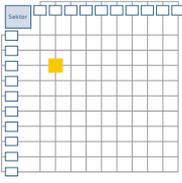
⑮ Weitere Hinweise

– Momentan gibt es viele Hemmnisse, die einer Abwärmenutzung im Wege stehen. Dazu zählen (Vgl. [63]):

- Räumliche Distanz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke – Investitionen in gut wärmegeämmte Netze notwendig, um Wärmeverluste zu begrenzen
- Lieferung ist nicht Kerngeschäft und wird daher gern aufgeschoben. **Contracting** könnte sinnvoll sein.
- Abwärme muss abgesichert werden, wird meist von Dritten erschlossen – zusätzliche Investitions- und Transaktionskosten sind notwendig
- „Für Betreiber von Fernwärmenetzen sollten regulatorische Anreize geschaffen werden, um die Wärme aus Rechenzentren abzunehmen, sofern dies wirtschaftlich und technisch sinnvoll ist“ [72]
- Verschiedene Vorstellungen der Unternehmen und Netzbetreiber über Vertragslaufzeiten als Hindernis ([63] S. 69)

– Praktische Literaturhinweise:

- Praxisleitfaden Abwärme in Unternehmen nutzen. Von der Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz [64]
- Abwärme nutzen. Praxiserprobt und wirtschaftlich. Von der Deutschen Energieagentur [69]
- VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 22. Ressourceneffizienzpotentiale von Gewerbebetrieben. VDI Zentrum Ressourceneffizienz [62]



2.2.2. Sorptionskälte

0 Beschreibung

Durch den Prozess der Sorption kann mit Hilfe einer Sorptionskältemaschine (SKM) aus Wärme Kälte gewonnen werden ([73] S.21). Da Wärme als Antriebsenergie dient, wird weniger elektrische Energie für die Kälteerzeugung verwendet ([73] S. 25).

Besteht das für den Sorptionsprozess benötigte Zweistoffsystem aus zwei flüssigen Stoffen, spricht man von Absorption. Ist das Sorptionsmittel jedoch ein Feststoff, handelt es sich um eine Adsorption.

Folgende Stoffgemische sind gängig (Vgl. [21] S. 12):

– Absorption:

- Wasser (Arbeitsmittel) und Lithiumbromid (Absorbens),
- Ammoniak (Arbeitsmittel) und Wasser (Absorbens) und

– Adsorption:

- Wasser (Arbeitsmittel) und Silikagel (Adsorbens)

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



– Sekundärkopplung (vorhergehende Kopplungen PtH, KWK)



2 Sektoren

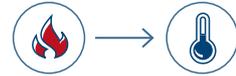
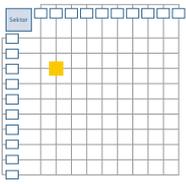
Angebot / Abgabe
Wärme (Energie-, Industriebereich)



Nachfrage / Aufnahme
Kälte (GHD-, Gebäudebereich)

3 Eingesetzte Ressourcen

- Wärme mit einem entsprechenden Temperaturniveau
 - Absorption: ab 80°C ([73] S. 29)
 - Adsorption: ab 55°C ([73] S. 40)
- Wärmequelle: öffentliches Wärmenetz, Abwärme eines BHKW oder aus der Industrie
- Abhängig von der Quelle und der Erzeugungsart der Abwärme werden folgende Energieträger eingesetzt:
 - Fossil: Erdgas, Erdöl, Kohle
 - Regenerativ: biogene Energieträger, Abfall, Solarthermie
- Hilfsenergie: Pumpenstrom für Lösungs- und Kältemittelkreislauf, für Rückkühlung sowie Mess-, Steuerungs- und Regelungs-Technik



④ Ziele

- Nutzung einer Antriebsenergie mit geringem Exergiegehalt (Wärme statt Strom) und dadurch Energieeinsparung
- Entlastung des Stromnetzes, indem ein Teil der Kältelast von der Stromlast entkoppelt wird ([73] S. 19)

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Zentrale Kälteerzeugung: Kältenetz mit Pumpen, Übergabestationen etc. zur Verteilung der Kälte, geeignete Abnehmerstruktur notwendig (Büro-, Forschungs-, Gewerbegebiete mit einem entsprechenden Kältebedarf)
- Dezentrale Kälteerzeugung: Es gibt eine Wärmequelle ([öffentliches] Fern- oder Nahwärmenetz), das auch im Sommer ein entsprechendes Temperaturniveau aufweist und für die SKM zur Verfügung steht

⑥ Komponenten

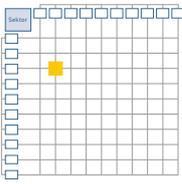
- Kältemaschine: Sorptionskältemaschine (ein- oder zweistufig)
- Anschluss zum öffentlichen Wärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 55°C...140°C ([73] S. 101) – abhängig von der Art der Sorptionskältemaschine, Übergabestationen
- eventuell Kältespeicher
- bei zentralen Anwendungen: Fernkältenetz mit Leitungen, Pumpen, Übergabestationen etc.

⑦ Technische Voraussetzungen

- Es wird Wärme mit entsprechendem Temperaturniveau benötigt (siehe Punkt ③). Dieses Temperaturniveau wird von Nahwärmenetzen häufig nicht erreicht, da in Quartieren für die Einbindung regenerativer Energiequellen geringe Vorlauftemperaturen angestrebt werden. Dem kann man durch den Einsatz von kleinen (Ad-) SKM, die auch bei geringeren Vorlauftemperaturen geeignet sind, entgegenwirken.
- Aus Sicht eines Wärmenetzes treten folgende Probleme auf ([21] S. 103):
 - Einhaltung hoher Temperaturen an den Übergabestationen erfordert ggf. einen großen Pumpenantriebsstrom sowie eine unflexible Betriebsweise in Sommermonaten, wenn allgemein Wärme auf einem geringeren Temperaturniveau zur Verfügung gestellt werden könnte
 - Abnahme im Vergleich zum Heizungsbetrieb geringer und somit: geringere Abkühlung des Rücklaufs und hohe Netzverluste.
- Potentielle Betreiber: Energieversorgungsunternehmen, Eigentümer, **Contractor** ([73] S.93)
- Es entstehen große abzuführende Wärmeleistungen und damit eine große Menge an Hilfsenergien. Die Aufwendungen für die Rückkühlung sind höher als bei konventionellen Kompressionskältemaschinen (KKM). Es entsteht ebenfalls ein größerer Kühlwasservolumenstrom, der umgewälzt werden muss ([73] S. 31).

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Kältemittel in der Regel nicht umweltschädigend: keine ozonschädigenden Bestandteile ([74])
- Nutzung solarer Wärme kann zu einer deutlichen Reduktion des Einsatzes fossiler



Brennstoffe führen und ist gut realisierbar, da es eine saisonale Übereinstimmung von Wärmeangebot und Kältebedarf gibt ([73] S. 103ff.) und mit solarthermischen Anlagen hohe Temperaturen generiert werden können

- Die genutzte (Ab-) Wärme sollte einen niedrigen Primärenergiefaktor bzw. einen niedrigen spezifischen CO₂-Emissionswert aufweisen, um tatsächlich Primärenergieträger- und Emissionseinsparungen gegenüber einer leistungsstarken KKM zu erzielen.

⑨ Wirksamkeit

- Absorptionskältemaschine: Wärmeverhältnis von 0,55...0,8
- Adsorptionskältemaschine geringfügig kleiner als bei der Absorptionskältemaschine ([73] S. 33 ff.)

⑩ Einsparpotentiale

Im folgenden Teil wird die Kälteerzeugung mittels SKM dem Referenzprozess Kälteerzeugung mit Hilfe der Kompressionskältemaschine gegenübergestellt. Die Einsparungen sind abhängig von den Leistungszahlen der verwendeten Geräte (SKM und KKM) und von den Primärenergiefaktoren bzw. spezifischen Emissionen der Strom- sowie der Wärmebereitstellung. Der Strombedarf für die Rückkühler wird jeweils nicht berücksichtigt.

Primärenergie

Für die Berechnung sind die Hilfsenergien in Form von Strom vernachlässigt worden – nur dadurch kommt ein Primärenergiebedarf von 0 kW je kW Kälte in der folgenden Abbildung zu Stande. Generell ist zu sagen, dass moderne KKM relativ effizient arbeiten und das Einsparpotential dadurch nicht allzu hoch ist. Allerdings nutzen SKM Wärme als Antriebsenergie, die energetisch einen wesentlich geringeren Stellenwert besitzt als Strom.

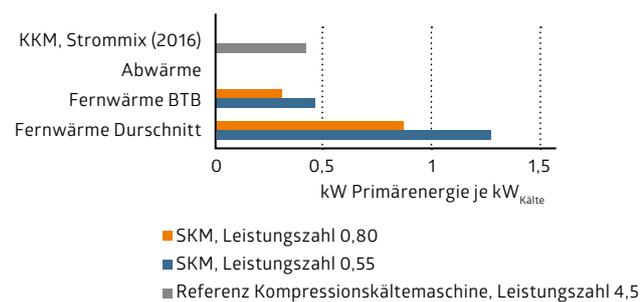
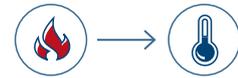
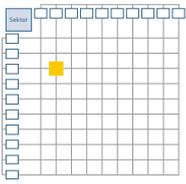


Abb. 9: Sorptionskälte: Primärenergie im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis der DIN V 18599

Bei geringeren Primärenergiefaktoren der eingesetzten Fernwärme können sich, je nach Leistungszahl der Anlagen, Einsparungen ergeben, da die Kombination Fernwärme und SKM dann weniger Primärenergie bedarf als die Kombination Strom und KKM.



CO₂-Emissionen

Die Einsparungen sind abhängig von der Höhe der Primärenergieeinsparung und den jeweilig verwendeten Energieträgern und ihren Emissionsfaktoren.

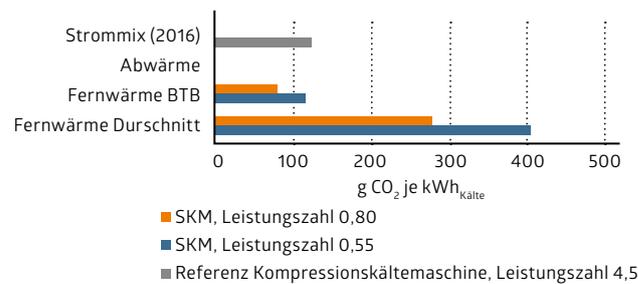


Abb. 10: Sorptionskälte: CO₂-Emissionen im Vergleich; eigene Darstellung auf Basis von Icha 2019: S. 10, Lauf et al. 2019: S. 49 und Fritsche et al. 2008: S. 14

Vor allem die spezifischen Emissionsfaktoren für Strom und deren Entwicklung spielen eine Rolle: je größer der Anteil der EE an der Stromerzeugung wird, desto geringer ist das Einsparpotential von SKM gegenüber KKM.

11) Kosten

- Die Investitionskosten einstufiger Absorptionskältemaschinen liegen bei ca. 250-350 €/kW_{Kälte} (KKM: 75-125 €/kW_{Kälte}). Zwar sind die Antriebskosten von SKM im Allgemeinen geringer, jedoch muss eine kostenintensivere Rückkühlung gewährleistet werden [24].
- Betriebskosten sind abhängig von den Kosten für die Antriebsenergie Wärme – Einsatz ist vorteilig, wenn kostengünstige Abwärme genutzt werden kann ([75])
- Geringe Anzahl an Betriebsstunden bedingt lange Amortisationszeiten. Einsatz ist vorteilig bei einem ganzjährigen Bedarf der Kälteleistung (Rechenzentren) ([75])

12) Förderungsmöglichkeiten

Keine Förderungsmöglichkeiten bekannt.

13) Beispiele

- Chemnitz: Fernkälte (zentrale Kälteerzeugung durch Abwärme, [76] Webseite Energiedienstleister „eins“ (Energie IN Sachsen) mit Informationen über Kältenetz und Speicher)
- Berlin: Fernkälte am Potsdamer Platz ([77] Vattenfall Blog)
- Neustrukturierung Laborbereich der Rudolf Hensel GmbH (Adsorptionskältemaschine, [75] Webseite Bauverlag: Kälte Klima Aktuell mit Bericht über Adsorptionskältemaschinen, weiter unten wird über das Beispiel berichtet)

14) Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

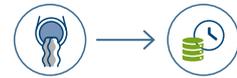
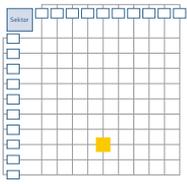
15) Weitere Hinweise

Keine ergänzenden Hinweise.



2.3. Sektor Abwasser





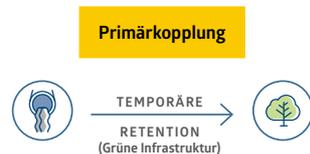
2.3.1. Temporäre Retention (Grüne Infrastruktur)

0 Beschreibung

Bei **Starkregenereignissen** treten in kurzer Zeit große Niederschlagsmengen auf [78]. 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 [79].

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren

Angebot / Abgabe
Abwasser (Retention von Niederschlag bei Starkregenereignissen)



Nachfrage / Aufnahme
Grüne Infrastruktur (Speichervolumen in Form von natürlichen oder naturnahen Senken auf Grünflächen)

3 Eingesetzte Ressourcen

Abgesenkte Grünflächen als temporäre Speicher des Niederschlagswassers aus Starkregenereignissen

4 Ziele

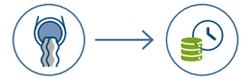
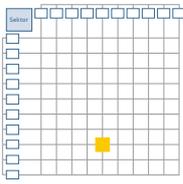
- Schutz von Gebäuden, Infrastrukturen und Bewohnern vor Schäden durch Überflutungen und Hochwasser
- Reduktion von Spitzenabflüssen
- Schutz der Gewässer vor stofflichen und hydraulischen Stoßbelastungen [79]
- Schutz der Kläranlage vor Überlastung [79]

5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Raum für die Zuleitung zu den Speicherbecken
- Raum für die Speicherbecken an den Tiefpunkten der Einzugsgebiete
- Abkopplung der Einzugsflächen von der Kanalisation [80]

6 Komponenten

- Zentrale Struktur (z. B. Regenrückhaltebecken)**
- **Zuleiten:** Netz zur Zuleitung des Niederschlags angeschlossener Flächen (geschlossen oder offen, z. B. über Mulden, Gerinne)
 - **Reinigen:** Vorreinigung zur Abscheidung von Grobstoffen, z. B. Sedimentationskammer [79];



- **Speichern:** Regenrückhalteraum mit Zulaufbauwerk und Speicherkammer
- **Ableiten:** Drosselbauwerk und Notüberlauf [81]

Dezentrale Struktur (z. B. Mulden)

- **Zuleiten:** offene Zuleitungsrinnen und Einrichtungen zur Wasserverteilung [82]
- **Speichern:** Mulden, Mulden-Rigolen, etc. [82]
- **Ableiten:** Drosselbauwerk und Notüberlauf [81]

⑦ Technische Voraussetzungen

- Datengrundlage für die Abflusssimulation
- Räumliche Nähe zu aufnehmendem Gewässer
- bei stark belasteten Abflüssen: Behandlungserfordernis von Oberflächenabflüssen prüfen ([83] S. 30)

⑩ **Stoffliche Belastung** ([83] S. 31): Eine stoffliche Belastung der Vegetation besteht aufgrund von Sauerstoffmangel, Streusalz oder sonstigen Schmutz- und Schadstoffen, wie z. B. Schwermetallen. Ein sehr geringes Schädigungsrisiko entsteht bei einer Einstaudauer < 24 Stunden und einer Einstauhöhe < 1 m bzw. Einstauhäufigkeiten < 3 bzw. 5 – mal pro Jahr.

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Schutz der Gesundheit

- Kein direkter Kontakt der Anwohner zu eingestautem Niederschlag und Boden [83]
- Einhaltung von Abklingzeiten nach Einstau des Niederschlags, in denen die Grünflächen nicht betreten werden dürfen. In dieser Zeit sinkt die Konzentration pathogener Mikroorganismen, die über den Niederschlag auf Boden und Vegetation gelangt sein können [83]
- Festlegung der maximalen Einstautiefe in Abhängigkeit der Zugänglichkeit der Anlage und der erforderlichen Verkehrssicherheit [84]
- geeignete Steigung der Böschung:
 - < 0,5 m Höhe: Seitenverhältnis 1:2 oder flacher
 - < 1,0 m Höhe: Seitenverhältnis 1:3 oder flacher ([85] S. 57)

Schutz der Natur

- Auswahl belastbarer Pflanzenarten gegenüber Trockenheit, Überflutung und Salz (siehe z. B. MURIEL: Multifunktionale Retentionsflächen Teil 3, Tabelle; [83] S. 30)
- Auswahl winterharter Pflanzenarten ([83] S. 30)

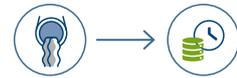
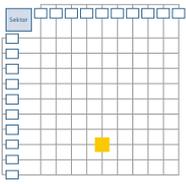
⑨ Wirksamkeit

Zentrale Struktur (z. B. Regenrückhaltebecken)

Das Retentionsvolumen wird abhängig vom zulässigen Drosselabfluss, der gewählten Überschreitungshäufigkeit und der angeschlossenen abflusswirksamen Fläche bemessen [79]. Bei ausreichender Bemessung können Starkregenereignisse, die die maßgebende Wiederkehrzeit nicht überschreiten, nahezu vollständig (bis zu 98% der Abflussspitze) abgepuffert werden [86].

Dezentrale Struktur (z. B. Mulden)

Verschiedene Studien zeigen, dass der mittlere Abfluss um über 50% reduziert werden kann [87].



⑩ Einsparpotentiale

- qualitativer Vergleich naturnaher Regenrückhaltemaßnahmen: mittleres (zentrale Struktur) bis geringes (dezentrale Struktur) CO₂-Einsparpotenzial gegenüber bebauten Flächen. Einsparpotentiale bestehen insbesondere, wenn Gehölze in das Konzept integriert werden [88; 89].
- Kosteneinsparungen beim Bau von Entwässerungssystemen aufgrund reduzierter Kanaldurchmesser [79]
- Vermeidung der Erweiterung vorhandener Entwässerungsanlagen [79]

⑪ Kosten

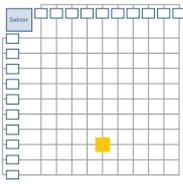
- Investitionskosten** für Regenrückhaltebecken ([86] S. 53):
0,36 €/m²·a im Median (Auswertung von 20 Studien) über eine Nutzungsdauer von 60 Jahren (Diskontierungszinssatz 3 %)
- Investitionskosten für Mulden** (mit Versickerung) ([86] S. 26):
0,17 €/m²·a im Median (Auswertung von 10 Studien) über eine Nutzungsdauer von 60 Jahren (Diskontierungszinssatz 3 %)
- Betriebs- und Instandhaltungskosten für Mulden** (mit Versickerung) [89]:
0,5 bis 4 €/m²·a
- Wiederherstellungskosten des Bodens** nach Einstau von Regenwasser [83]:
- Aushub und Entsorgung (25 - 50 €/m³)
 - Auftrag, Modellierung, Lockerung (15 - 35 €/m³)
- Wiederherstellungskosten der Vegetation** nach Einstau von Regenwasser [83]:
- Parkrasen (6 €/m²)
 - Sportrasen (60 €/m²)
 - Straßenbäume, Einzelbäume (800 €/Stück)
 - etc.

⑫ Förderungsmöglichkeiten

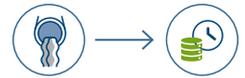
- Städtebauförderungsprogramm „Wachstum und Nachhaltige Erneuerung“ mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]
- Programm 208 der KfW „Investitionskredit Kommunen (IKK)“ [91]

⑬ Beispiele

- Toppilansaari Park, Oulu (Finnland) (Projektbeschreibung auf der Webseite des Planungsbüros [92])
- Spielwiesen im Stadtteil Luchtvaartbuurt, Helmond (Niederlande) (Projektbeschreibung in MURIEL: Multifunktionale Retentionsflächen Teil 3 [83])



TEMPORÄRE RETENTION AUF FLÄCHEN DER GRÜNEN INFRASTRUKTUR



14 Weitere Kopplungsoptionen

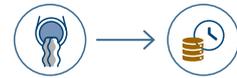
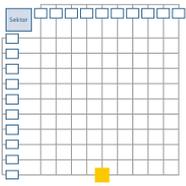
– Sektor Abwasser: Verdunstungskühlung (Temperatur im Außenraum durch Evapotranspiration von Pflanzenoberflächen senken)



15 Weitere Hinweise

Weitergehende Effekte:

Die temporäre Retention des Niederschlags auf Flächen der Grünen Infrastruktur macht diesen Abwasserteilstrom, der bisher nahezu ungesehen über die Kanalisation abgeleitet wird, für die Anwohner sichtbar. Dies kann das Bewusstsein der Bevölkerung über diesen Abwasserteilstrom und die Herausforderungen, diesen im urbanen Raum zu lenken, steigern.



2.3.2. Temporäre Retention (Soziale Infrastruktur)

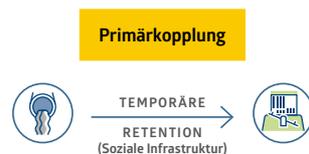
0 Beschreibung

Städtische Räume weisen eine hohe Dichte an Einwohnern, Funktionen und Infrastrukturen auf [93]. Zahlreiche Nutzungen konkurrieren um die verfügbaren Flächen [94]. Gleichzeitig muss der Innenentwicklung Vorrang vor der Außenentwicklung eingeräumt werden [95 § 1 Absatz 5]. Für die Reduktion der Flächenkonkurrenz im urbanen Raum ist daher eine Bündelung der Nutzungen sinnvoll [96].

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 [96].

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren

Angebot / Abgabe
Abwasser (Retention
von Niederschlag bei
Starkregenereignissen)



Nachfrage / Aufnahme
Soziale Infrastruktur
(Speichervolumen in Form von
multifunktionalen Senken im
öffentlichen Raum)

3 Eingesetzte Ressourcen

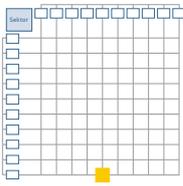
abgesenkte, multifunktionale Freiflächen des öffentlichen Raums als temporäre Speicher des Niederschlagswassers aus Starkregenereignissen.

4 Ziele

- Schutz von Gebäuden, Infrastrukturen und Bewohnern vor Schäden durch Überflutungen und Hochwasser
- Reduktion von Spitzenabflüssen
- Schutz der Gewässer vor stofflichen und hydraulischen Stoßbelastungen [79]
- Schutz der Kläranlage vor Überlastung [79]
- Reduktion der Flächenkonkurrenz im urbanen Raum ([96] S. 19)

5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Raum für die Zuleitung zu den Speicherbecken
- Raum für Speicherbecken an den Tiefpunkten der Einzugsgebiete
- Festlegung von Hauptzweck und Nutzungsintensität der Fläche – **Wiederkehrhäufigkeit** des Starkregenereignisses muss mit der Hauptnutzung vereinbar sein
- Abkopplung der Einzugsflächen von der Kanalisation [80]



⑥ Komponenten

- **Zuleiten:** Netz zur Zuleitung des Niederschlags angeschlossener Flächen in offener oder geschlossener Bauweise (Gerinne, Mulden)
- **Reinigen:** Vorreinigung, z. B. Sedimentationskammer [79];
Reinigung der Speicherbecken nach Starkregenereignissen
- **Speichern:** Regenrückhalteraum mit Zulaufbauwerk und Speicherkammer
- **Ableiten:** Drosselbauwerk und Notüberlauf [79] in offener Bauweise

⑦ Technische Voraussetzungen

- Festlegung der
- maximalen Einstautiefe [84] und
 - Ausbildung der Geländekanten

in Abhängigkeit der Anforderungen, die sich aus der Hauptnutzung und der Nutzung umliegender Bereiche ergeben

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Schutz der Gesundheit

- Reinigung nach Starkregenereignissen
- Kein direkter Kontakt zu eingestautem Niederschlag und Boden
- Einhaltung von Abklingzeiten bei weitgehend unbefestigten Retentionsflächen, damit die Konzentration pathogener Mikroorganismen auf Boden- und Vegetationsoberfläche auf ein unkritisches Level sinken kann – erforderliche Länge der Abklingzeit muss projektspezifisch bestimmt werden, i.d.R. 4 bis 6 Wochen ([96] S.150)

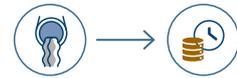
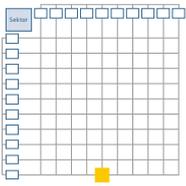
⑩ Mikrobielle und chemische Flächenbelastung [96]: Mikrobielle und chemische Belastung von befestigten und unbefestigten Flächen sowie Schmutzwasseranteile. Gefahr von Magen-Darm-Erkrankungen bei intensivem direktem Kontakt.

⑨ Wirksamkeit

Das Retentionsvolumen wird abhängig vom zulässigen Drosselabfluss, der gewählten Überschreitungshäufigkeit und der angeschlossenen abflusswirksamen Fläche bemessen [79]. Bei ausreichender Bemessung können Starkregenereignisse, die die maßgebende Wiederkehrzeit nicht überschreiten, nahezu vollständig (bis zu 98% der Abflussspitze) abgepuffert werden [86].

⑩ Einsparpotentiale

- Kosteneinsparungen beim Bau von Entwässerungssystemen aufgrund reduzierter Kanaldurchmesser [79]
- Vermeidung der Erweiterung vorhandener Entwässerungsanlagen [79]
- Einsparung bzw. effizienter Einsatz von Investitionen aufgrund der Bündelung von Nutzungen ([96] S.19)



⑪ Kosten

Instandsetzung:

Wiederherstellung ökologischer Schäden an Boden und Vegetation

Wiederherstellungskosten gemischter Oberflächen ([83] S.32):

- Grün- und Parkanlagen, Friedhöfe (40 – 100 €/m²)
- Spielplätze (40 – 100 €/m²)
- Sportflächen (40 – 100 €/m²)
- Wassergebundene Beläge für Sportbereiche auf Laufbahnen, Fußball und anderen Ballspielplätzen, Aufbau nach DIN 18035 (40 - 100 €/m²)
- Freiflächen öffentlicher Gebäude (Schulen, Kindergärten etc.) (60 - 120 €/m²)
- Straßenraum (Straßenbegleitgrün, Bäume) (40 – 100 €/m²)

⑫ Förderungsmöglichkeiten

- Städtebauförderungsprogramm „Lebendige Zentren“ zur Förderung der Innenentwicklung und historischer Stadtkerne mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]
- Städtebauförderungsprogramm „Sozialer Zusammenhalt“ mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]
- Programm 208 der KfW „Investitionskredit Kommunen (IKK)“ [91]

⑬ Beispiele

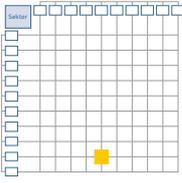
- Regenwasserspielplatz Hamburg (Projektbeschreibung in MURIEL: Multifunktionale Retentionsflächen Teil 3 [83])
- Stadionhal Brøndby (Projektbeschreibung in MURIEL: Multifunktionale Retentionsflächen Teil 3 [83])
- Benthemplein Rotterdam (Projektbeschreibung in MURIEL: Multifunktionale Retentionsflächen Teil 3 [83])
- Skatepark im Rabalderparken, Roskilde (Dänemark) (Projektbeschreibung in Kruse (2015) Integriertes Regenwassermanagement für den wassersensiblen Umbau von Städten [80])

⑭ Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

⑮ Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.



2.3.3. Retention (Blaue Infrastruktur)

① Beschreibung

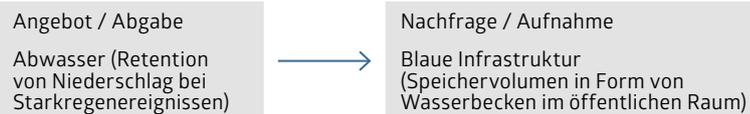
Öffentliche Wasserflächen besitzen einen hohen Erholungswert und können zur Aufwertung des öffentlichen Raums beitragen [97]. Daneben können naturnah oder künstlich gestaltete Wasserflächen im Falle eines Starkregenereignisses anfallende Wassermengen aufnehmen, speichern und für eine Folgenutzung verfügbar machen [79].

① Kopplungstyp

– Primärkopplung



② Sektoren



③ Eingesetzte Ressourcen

dauerhaft gefüllte Wasserbecken in offener Erdbauweise

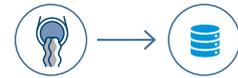
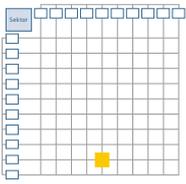
④ Ziele

- Schutz von Gebäuden, Infrastrukturen und Bewohnern vor Schäden durch Überflutungen und Hochwasser
- Reduktion von Spitzenabflüssen
- Schutz der Gewässer vor stofflichen und hydraulischen Stoßbelastungen [79]
- Schutz der Kläranlage vor Überlastung [79]

⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Raum für die Zuleitung zu den Speicherbecken
- Raum für die Speicherbecken an den Tiefpunkten der Einzugsgebiete (5 bis 20 % der Fläche des Einzugsgebiets [86])
- Abkopplung der Einzugsflächen von der Kanalisation [80]

⑯ **Der temperatenausgleichende Effekt von Gewässern:** Gewässer besitzen eine hohe spezifische Wärmekapazität. Wärme, die tagsüber im Wasser gespeichert wurde, kann nachts, wenn die Wassertemperatur die Umgebungstemperatur übersteigt, wieder an die Umgebungsluft abgegeben werden. In einigen Publikationen wird die Befürchtung geäußert, dieser Temperatenausgleich könne das Ausmaß von Tropennächten verstärken [170]. Wenige Studien betrachten jedoch bisher den Einfluss urbaner Gewässer auf das Mikroklima in den Nachtstunden [224].



⑥ Komponenten

- **Zuleiten:** Netz zur Ableitung des Niederschlags angeschlossener Flächen in geschlossener oder offener Bauweise (z. B. Gerinne, Mulden)
- **Reinigen:** Vorreinigung, z. B. Filter, Siebe, Sedimentationskammer [79] ggf. Umwälzung bei erhöhten Anforderungen an die Wasserqualität [86]
- **Speichern:** künstlicher oder naturnaher Regenrückhalteraum mit Einlauf- und Verteilungsbauwerk [98] und Speicherbecken; zusätzlicher Wasserspeicher, um Schwankungen des Wasserspiegels auszugleichen (z. B. unterirdische Zisterne); Teichabdichtung [99]; ggf. seichte Randbereiche mit Vegetation [88]
- **Ableiten:** Drosselbauwerk und Notüberlauf [81]; Notumlauf [98]

⑦ Technische Voraussetzungen

Starke Verdunstung oder die wiederholte Wasserentnahme zu Bewässerungszwecken können Schwankungen des Wasserspiegels zur Folge haben. Bei wiederkehrender Absenkung des Wasserspiegels sollte die Böschung terrassiert oder geringfügig geneigt sein, um auch bei niedrigem Wasserspiegel die Verkehrssicherheit gewährleisten zu können. Um eine **Resuspension** sedimentierter Partikel zu vermeiden, sollte ein Teil des Wasserbeckens permanent gefüllt sein, die Wasserentnahme sollte nicht über den Mindestfüllstand hinaus erfolgen. [100]

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Akzeptanz der Bevölkerung

In Bezug auf urbane Gewässer bestehen in der Bevölkerung zum Teil gesundheitliche (erhöhtes Insektenaufkommen) oder sicherheitstechnische Bedenken [101]. Diesen Bedenken muss durch Information und Aufklärung begegnet werden. Design und Instandhaltungsmaßnahmen müssen zur Reduzierung dieser Risiken beitragen.

Naturschutz

Bei Teichen ohne Böschung sind Amphibienleitern vorzusehen [86].

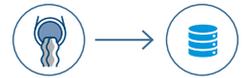
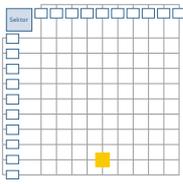
⑨ Wirksamkeit

Das Retentionsvolumen wird abhängig vom zulässigen Drosselabfluss, der gewählten Überschreitungshäufigkeit und der angeschlossenen abflusswirksamen Fläche bemessen [79]. Bei ausreichender Bemessung können Starkregenereignisse, die die maßgebende Wiederkehrzeit nicht überschreiten, nahezu vollständig (bis zu 98% der Abflussspitze) abgepuffert werden [86].

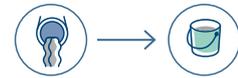
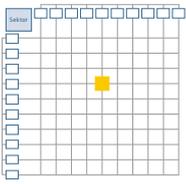
⑩ **Änderung der Jährlichkeit infolge des Klimawandels:** Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen werden sich in der Zukunft in vielen Regionen Deutschlands infolge des Klimawandels ändern. Dies ergibt die Auswertung regionaler Klimamodelle [225]. Um die Wirksamkeit der Retentionsanlagen sicherzustellen, sollte dies bei der Bemessung der Retentionsanlagen berücksichtigt werden.

⑩ Einsparpotentiale

- qualitativer Vergleich naturnaher Regenrückhaltmaßnahmen:
Mittleres CO₂-Einsparpotenzial gegenüber bebauten Flächen. Einsparpotentiale bestehen insbesondere, wenn Gehölze in das Konzept integriert werden [88].



<p>⑪ Kosten</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Vermeidung der Erweiterung vorhandener Entwässerungsanlagen [79] – Kosteneinsparungen beim Bau von Entwässerungssystemen aufgrund reduzierter Kanaldurchmesser [79]
<p>⑫ Förderungsmöglichkeiten</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Städtebauförderungsprogramm „Wachstum und Nachhaltige Erneuerung“ mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90] – Programm 208 der KfW „Investitionskredit Kommunen (IKK)“
<p>⑬ Beispiele</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Potsdamer Platz, Berlin (Projektbeschreibung in „Wasserlandschaften – Planen, Bauen und Gestalten mit Wasser“ [102]) – Tanner Springs Park, Portland (Projektbeschreibung in „Wasserlandschaften – Planen, Bauen und Gestalten mit Wasser“ [102]) – Center of Excellence, Sindelfingen (Projektbeschreibung in „Wasserlandschaften – Planen, Bauen und Gestalten mit Wasser“ [102]) – Augustenborg, Malmö
<p>⑭ Weitere Kopplungsoptionen</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Sektor Abwasser: Bewässerung (über adiabate Kühlung) <ul style="list-style-type: none"> – Sektor Abwasser: Verdunstungskühlung <ul style="list-style-type: none"> – Sektor Abwasser: Wärmedämmung <ul style="list-style-type: none">
<p>⑮ Weitere Hinweise</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Weitergehende Nutzung: <ul style="list-style-type: none"> • Doppelnutzung als Schwimm-/Badeteich bei entsprechenden Reinigungsmaßnahmen möglich [103] – Weitergehende Effekte: <ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der aquatischen Biodiversität [88] • Naturnahe Reinigung des gespeicherten Regenwassers [88]



2.3.4. Betriebswasserbereitstellung aus Grauwasser

0 Beschreibung

Für den Betrieb vieler wasserverbrauchender Einrichtungen in Haushalt, Industrie und Gewerbe ist keine Trinkwasserqualität erforderlich. Etwa 45 % des häuslichen Wasserverbrauchs werden für die Toilettenspülung, das Wäsche waschen und die Raumreinigung, Auto- und Gartenpflege benötigt (Stand 2013) [104]. Geringfügig verschmutztes Abwasser aus Badewanne und Dusche, Handwaschbecken und Waschmaschine, sogenanntes Grauwasser, kann als Betriebswasser für privat, öffentlich oder gewerblich genutzte Gebäude aufbereitet werden [105]. Es handelt sich dabei um den mengenmäßig größten Abwasserstrom im Haushalt. Dafür ist die Erfassung von Grauwasser in einem separaten Fassungs- und Ablaufsystem und die dezentrale mechanische, biologische und hygienische Aufbereitung in einem Multibarriere – System erforderlich [106, 107]. „Nach zahlreichen Forschungsvorhaben mit wissenschaftlichen Langzeituntersuchungen sind seit längerem industriell gefertigte Grauwassernutzungsanlagen in der Haustechnik auf dem Markt verfügbar. Diese Systeme decken einen großen Bereich der Gauwasserbehandlung ab“ ([105] S.3).

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

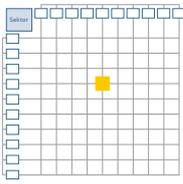
Gering verunreinigtes Abwasser, das dezentral aufbereitet und wiederverwendet wird

4 Ziele

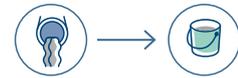
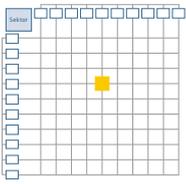
Reduktion des Trinkwasserverbrauchs für Verwendungszwecke, die keine Trinkwasserqualität voraussetzen

5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

Ein System zur Betriebswasserbereitstellung aus Grauwasser erfordert die getrennte Erfassung von Grau- und Schwarzwasser in separaten Fassungs- und Ablaufsystemen. Die erforderlichen doppelten Leitungen werden meist innerhalb eines einzelnen Bauprojekts umgesetzt. Entsprechend finden Grauwasseraufbereitung und Betriebswasserbereitstellung meist dezentral auf Gebäudeebene statt. In diesem Fall ist der Einfluss durch den urbanen Kontext gering.



⑥ Komponenten	
	<p>Dezentrale Versorgungsstruktur:</p> <ul style="list-style-type: none">– Speicherbehälter– Grauwasseraufbereitungsanlage<ul style="list-style-type: none">• Mechanische Aufbereitung, z. B. Siebung, Filtration und Sedimentation• Biologische Aufbereitung, z. B. Festbett, Bodenfilter, Wirbelbett oder Membranbioreaktor• Stabilisierung oder Hygienisierung, z. B. UV-Anlage, Ultrafiltration oder Umkehrosmose <p>Zentrale Versorgungsstruktur</p> <ul style="list-style-type: none">– Speicherbehälter– Betriebswassernetz<ul style="list-style-type: none">• Betriebswasserpumpe, -zähler und -leitungen [108]– Trinkwassernachspeisung für den Fall von Engpässen oder Ausfällen bei der Betriebswasserbereitstellung:<ul style="list-style-type: none">• Nachspeiseleitung und Druckerhöhungsanlage
⑦ Technische Voraussetzungen	
	<ul style="list-style-type: none">– Getrennte Erfassung von Grauwasser in separatem Fassungs- und Ablaufsystem– Mechanische, biologische und hygienische Aufbereitungsanlagen für Grauwasser ([105] S. 11)– Verwendungszweck:<ul style="list-style-type: none">• Nutzungsklasse C1 zur Toilettenspülung in Privathaushalten: geringe Anforderungen an die Betriebswasserqualität (Grauwasser Typ A)• Nutzungsklasse C2 zur Toilettenspülung in Privathaushalten und öffentlichen Gebäuden, Bewässerung und Textilwäsche: hohe Anforderungen an die Betriebswasserqualität (Grauwasser Typ A und B) [105]
⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit	
	<ul style="list-style-type: none">– Akzeptanz der Nutzer ggü. der Verwendung recycelten Grauwassers:– Etwa zwei Drittel der Bevölkerung stehen der Grauwassernutzung grundsätzlich positiv gegenüber,– entscheidend ist dabei eine hohe Zuverlässigkeit und eine unauffällige, störungsfreie Anlage, die ohne hygienische Einschränkungen im Hintergrund läuft [109].
⑨ Wirksamkeit	
	<p>Dimensionierung der Anlage basierend auf</p> <ul style="list-style-type: none">– dem täglichen Grauwasseranfall,– dem täglichen Betriebswasserbedarf und– der erforderlichen Aufbereitungsleistung [105] <p>Regelmäßige Wartung der Anlage (Abschluss eines Wartungsvertrags) [105]</p>
⑩ Einsparpotentiale	
	<p>Die Betriebswasserbereitstellung ermöglicht in privaten Haushalten eine Trinkwassereinsparung von 27 % (Toilettenspülung) bis 45 % (Toilettenspülung, Textilreinigung, Bewässerung und Raumreinigung) [104].</p>



⑪ Kosten

Eine Gegenüberstellung der Trinkwasserpreise und Abwassergebühren auf der einen (konventionelle Wasserversorgung), und der Kosten für die Betriebswasserbereitstellung auf der anderen Seiten ergibt „in der Regel eine deutliche wirtschaftliche Optimierung“ durch die Betriebswasserbereitstellung ([110] S. 22).

Investitionskosten [110]:

- Grauwasseraufbereitungsanlage: ca. 300 € pro Person (Stand 2005)
- Grau- und Betriebswasserleitungen: örtlich zu ermitteln

Betriebskosten [110]:

- Reparatur und Wartung: 1 bis 4 % der Investitionskosten (Stand 2005)
- Stromverbrauch: 1,5 bis 3 kWh pro m³ Betriebswasser (Stand 2005)
- Trinkwassernachspeisung: i. d. R. < 2 % des Betriebswasserbedarfs

⑫ Förderungsmöglichkeiten

Aktuell sind keine Förderungsmöglichkeiten für die Betriebswasserbereitstellung bekannt. Modul 3 der Richtlinie zur Förderung von innovativen marktreifen Klimaschutzprodukten im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Dezentrale Einheiten zur Wärmerückgewinnung in Gebäuden) sieht jedoch eine höhere Förderung vor, wenn für die Abwasserwärmerückgewinnung zunächst die Installation eines Grauwassernetzes erforderlich ist [111].

⑬ Beispiele

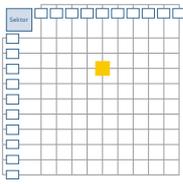
- Grauwassermanagement in der Wohnanlage „Block 6“ in Berlin seit 2006: Versorgung von ca. 250 Bewohnern mit Betriebswasser (Beitrag im fbr – Wasserspiegel 2009 [106])
- Grauwassermanagement in einem Studentenwohnheim in Düsseldorf seit 2010: Recycling von 14 m³ Grauwasser pro Tag (Beitrag in Sanitär. Heizung. Klima 2011 [112])

⑭ Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

⑮ Weitere Hinweise

Für Brauchwasseranlagen besteht gemäß Trinkwasserverordnung § 13 Abs. (4) Anzeigepflicht [113].



2.3.5. Adiabate Kühlung mit Regenwasser

0 Beschreibung

Wasser, das in einem abgeschlossenen System verdunstet, entzieht diesem System sensible (fühlbare) Wärme, sogenannte Verdunstungsenergie. Dadurch nimmt die Systemtemperatur ab. Nicht gesättigte Luft wird mit jedem Gramm Wasser, mit dem die Luft befeuchtet wird, um ca. 2,5 °C abgekühlt. 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. Alternativ zu energie- und kostenintensiv aufbereitetem Trinkwasser kann als Befeuchterwasser Regenwasser verwendet werden [114].

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

- Niederschlagswasser
- Strom

4 Ziele

- Annäherung an den natürlichen Wasserkreislauf
- Reduktion des Trinkwasserverbrauchs für Verwendungszwecke, die keine Trinkwasserqualität voraussetzen.
- Reduktion von CO₂-Emissionen durch Nutzung erneuerbarer Kühlenergiequellen [115]

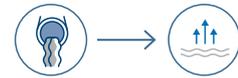
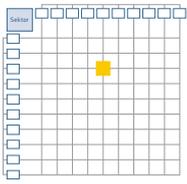
5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

Flächenbedarf [116]:

- ca. 0,5 bis 1 m² Grundfläche Regenwasserspeicher für 100 m² Dach
- ca. 1 bis 2 m Luftkanal für den Verdunster in den Lüftungsanlagen

6 Komponenten

Verschiedene Verfahren kommen bei der adiabaten Kühlung zum Einsatz. Grundsätzlich kann in direkte und indirekte adiabate Kühlverfahren unterschieden werden. Bei der direkten adiabaten Kühlung wird die Zuluft befeuchtet. Dadurch wird die Luftfeuchtigkeit im Innenraum erhöht und schädliche Stoffe können auf den Luftstrom übertragen werden. Verfahren dieser Art sind daher nicht für die praktische Anwendung geeignet.



⑩ Arten der adiabaten Kühlung

Direkt	Indirekt
Zuluftbefeuchtung	Abluftbefeuchtung (mit Wärmerückgewinnung)
vorgeschaltete Lufttrocknung	zentrale Lüftungsanlage
Wasser wird direkt in die zu kühlende Zone eingebracht	anschließende Kälteübertragung an die Zuluft

- Dezentrale Versorgungsstruktur:**
- Speicherbehälter für Regenwasser
 - Ggf. mechanische Behandlungsanlage: Siebung, Filtration, Sedimentation
 - Versorgungsnetz der raumlufttechnischen Anlage
 - raumlufttechnische Anlage mit Abluftbefeuchtung, Wärmeübertrager [115], Probenentnahmestelle zur Beprobung der Betriebswasserqualität und Möglichkeit zur manuellen Entleerung [116]

⑦ Technische Voraussetzungen

Niederschlagswassersammlung, -speicherung und ggf. -aufbereitung [86]

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

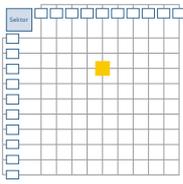
- Hygiene:**
- Sicherstellung der Trennung von Zu-/Abluft
 - zusätzlich empfohlen: UV-Desinfektion des Betriebswassers mit DVGW-geprüften bzw. zertifizierten Anlagen ([86] S. 18)

⑨ Wirksamkeit

- Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Anlage zur adiabaten Kühlung wird der Adiabate Kühlwirkungsgrad herangezogen. Dieser ist vom Wirkungsgrad des Befeuchtungssystems und der Rückwärmzahl der Wärmerückgewinnung abhängig. Er liegt für Abluftbefeuchter bei mindestens 70 % [117].
- Die Zuluft kann um bis zu 10 K abgekühlt werden [118].

⑩ Einsparpotentiale

Kosten: Immer mehr Gemeinden stellen ihre Entwässerungssatzung auf die gesplittete Abwassergebühr um. Das bedeutet, dass die Gebühren für das Niederschlagswasser separat zum Schmutzwasser anhand von versiegelten Flächen und Rückhalt auf dem Grundstück berechnet werden. Bei entsprechender Entwässerungssatzung besteht die Möglichkeit, Abwassergebühren einzusparen, da ein Teil des Regenwassers verdunstet.



Energie: ca. 80 % elektrische Energie-Einsparung [119]

	Kompressionskälteanlage	Adiabates System
Leistungszahl	3 bis 6	10 bis 20
Hohe Effizienz	bei geringeren Außentemperaturen	bei höheren Außentemperaturen

Tabelle 10: Leistungszahlen und Effizienz von Kompressionskälteanlagen im Vergleich zu adiabaten Systemen; VDI 2020

Trinkwasser (bei Regenwassernutzung): Aus technischen Gründen sollte die elektrische Leitfähigkeit des verwendeten Wassers bei der adiabaten Kühlung 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nicht überschreiten [116]. Wird Regenwasser anstelle von Trinkwasser verwendet, wird nur halb so viel Wasser benötigt und kein Abwasser erzeugt [120], da Niederschlagswasser nur eine geringe Leitfähigkeit (ca. 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hat [116] und daher nicht entsalzt bzw. entkalkt werden muss.

⑪ Kosten

Je nach Wasserkosten, Stromkosten, klimatischen Bedingungen und jährlicher Betriebszeit sind unterschiedliche Systeme zu empfehlen. Entsprechend variabel sind auch die Kosten [121].

Gegenüber herkömmlichen Lüftungssystemen können die Betriebskosten um 35 bis 70 % gesenkt werden [117].

Die Regelung der Anlage, insbesondere im Teillastbereich, wirkt sich entscheidend auf Energieverbrauch und Lebenszykluskosten aus [117].

⑫ Förderungsmöglichkeiten

– BAFA-Kälte-Klima-Richtlinie 2019 [122]

⑬ Beispiele

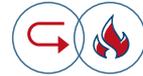
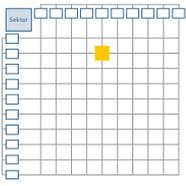
- Schulzentrum Mössingen seit 2014 (Beitrag in der Zeitschrift HLH 12/2016 des VDI [115])
- Technologie- und Gründerzentrum Würzburg seit 2016 (Projektbeschreibung auf der Webseite des Herstellers der Grauwasserrecyclinganlage [123])
- Institut für Physik der Humboldt Universität in Berlin-Adlershof (Broschüre der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin [124])
- Riedberg – Gymnasium, Frankfurt am Main (Beitrag im fbr – Wasserspiegel 3/2017 [125])

⑭ Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

⑮ Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.



2.3.6. Abwasserwärmerückgewinnung

0 Beschreibung

Der Energiebedarf für Warmwasser und Raumwärme betrug in Deutschland im Jahr 2017 31 % des Gesamtenergieverbrauchs. Für das Warmwasser, welches ganzjährig zur industriellen, gewerblichen oder häuslichen Nutzung erwärmt wird, wurden 448 PJ Energie benötigt [126]. Das häusliche Abwasser verlässt das Gebäude mit einer Temperatur von ca. 23 °C [127] und weist in der Kanalisation selbst im Winter ein Temperaturniveau von mindestens 10 °C auf ([128] S. 5)). Die thermische Energie des Abwassers kann mithilfe von Wärmepumpen für den Wärmebedarf angrenzender Abnehmer verfügbar gemacht werden ([128] S. 20). Schätzungen zufolge würde das Angebot an Abwasserwärme ausreichen, um etwa 10 % aller Gebäude in Deutschland zu beheizen [129].

Die Wärme kann über **dezentrale** Versorgungsstrukturen bereits im Gebäude (unbehandeltes häusliches Abwasser oder Grauwasser) verfügbar gemacht werden. Über **zentrale** Versorgungsstrukturen kann die Wärme im Kanal (unbehandeltes Abwasser) oder unterhalb der Kläranlage (behandeltes Abwasser) zurückgewonnen werden.

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren

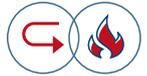
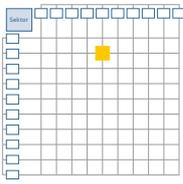


3 Eingesetzte Ressourcen

- Abwasserwärme
- Elektrische oder gasmotorische Antriebsenergie für die Wärmepumpe
- Elektrische Pumpenenergie für den Zwischenkreislauf

4 Ziele

- Reduktion fossiler Energieträger in der Wärmeerzeugung
- Reduktion von CO₂-Emissionen durch Nutzung erneuerbarer Wärmeenergiequellen [130]
- Reduktion örtlicher Schadstoffe aus Heizungsanlagen wie Feinstaub und Kohlenmonoxid aus Heizungsanlagen (z. B. Öl-, Gas- oder Holzheizungen) ([128] S. 59)
- Reduktion der thermischen Gewässerbelastung [129]



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

Eine Kanalsanierung oder ein Kanalneubau sind vorgesehen, in die das Vorhaben integriert werden kann [130].

Wärmeabnehmer:

Ganzjähriger Wärmebedarf/Doppelnutzung für Wärme und Kälte

- durch hohe Bebauungsdichte im Einzugsgebiet [130]
- oder große Gebäude, Hallenbäder, Krankenhäuser, etc. [127]

Kanal:

- Entfernung zwischen Kanalisation und Wärmeabnehmer in Abhängigkeit der Wärmeleistung im Gebäude, der Art des Wärmenetzes (vgl. ⑥) und der Bebauungsdichte
- minimal erforderlicher mittlerer Trockenwetterabfluss von 10 bis 15 l/s [131] entsprechend etwa 5.000 Einwohnergleichwerten [127]
- gerader Kanalisationsabschnitt von 20 – 200 m Länge in Abhängigkeit der Anlagengröße [127]

⑥ Komponenten

Wärmegewinnung mittels Wärmetauscher [128]

- **in den Kanal integriert:** vom Abwasser überströmte Rinnenwärmetauscher (nachträglich in den Fließquerschnitt eingebaut oder werkseitig integriert) [131]
- **im Bypass zum Kanal:** Doppelrohr-, Platten- oder Rohrbündelwärmeübertrager [129] wenn Querschnittsverkleinerung nicht möglich
- **im Ablauf der Kläranlage** [127]
- **im Gebäude:** Schacht vor der Kanalisation (gesamtes Abwasser) oder integriert in Duschwanne/-rinne (Grauwasser) [132]

Zwischenkreislauf [127]

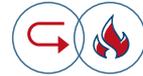
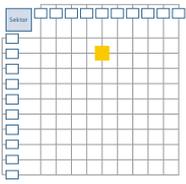
- Anlagen ohne Zwischenkreislauf sind apparativ einfacher und energetisch etwas günstiger jedoch empfindlicher ggü. Veränderungen der Abwassereigenschaften, die zu Vereisungen oder Verschmutzung des Wärmetauschers führen. Auch sind größere Kältemittelmengen erforderlich.
- Anlagen mit Zwischenkreislauf kann bei Verdampfungstemperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$ ein Frostschutzmittel beigegeben werde. Der Betrieb einer Anlage mit Zwischenkreislauf kann aufgrund behördlicher Bestimmungen zwecks Gewässerschutz vorgeschrieben werden.

Wärmenutzung mittels Wärmepumpe [128]

- Pufferspeicher zur Verbesserung von Nutzungsdauer und Regelbarkeit der Anlage ([128] S. 30), v. a. bei diskontinuierlichem Abwasseranfall ([128] S. 22ff)
- Heizzentrale mit Wärmepumpe, Pufferspeicher, etc. (dezentral)

Wärmetransport mittels Wärmenetz

- **Niedertemperatur-Nahwärmenetz (dezentral):** Beheizung mehrerer Gebäude im Nahwärmeverbund von gemeinsamer Heizzentrale aus. Transport der Wärme zu den Verbrauchern in isolierten Leitungen auf einem Temperaturniveau von 35°C bis 70°C bei kurzen Entfernungen zwischen Kanalisation und Wärmeabnehmer (etwa 100 m in bebauten, 300 m in unbebauten Gebieten) [131].



– **Fernwärmenetz (zentral):** Transport der Wärme in nicht isolierten Leitungen zur Heizzentrale des Verbrauchers bei größerer Entfernung der Wärmeverbraucher von der Kanalisation (mehrere Kilometer), Auslegungsvorlauftemperatur < 30 °C, Rohre können Umgebungswärme aufnehmen.

⑩ **Mono- oder bivalenter Betrieb:** Bivalente Anlagen verwenden neben Abwasser noch einen zweiten Energieträger, der Spitzenbedarfe deckt. So erreichen Wärmepumpen bedeutend längere Laufzeiten und können ökonomischer betrieben werden [127]. Als zusätzliche Anlage kann beispielsweise ein Heizkessel zum Einsatz kommen [132].

⑦ Technische Voraussetzungen

Wärmepumpe: Laut EEWärmeG muss eine Wärmepumpe je nach Randbedingungen eine Jahresarbeitszahl von mindestens 3,6 bis 4,0 erreichen ([133] Anlage Anforderungen Nr. 28 V-1 in Verbindung mit Nr. III.1).

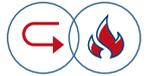
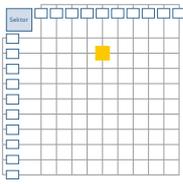
Abwasserwärmenutzung: Begrenzung der Wärmeentnahme

- zur Sicherstellung der Reinigungsleistung der Kläranlage:
- Die Leistungsfähigkeit der Stickstoffelimination nimmt mit sinkender Temperatur ab [131]. Um die Reinigungsleistung auch in den Wintermonaten zu gewährleisten, sollte die Absenkung der resultierenden Abwassertemperatur im Zulauf zur Kläranlage 0,5 K nicht überschreiten ([128] S. 57).
- zum Gewässerschutz:
- Die Wärmeentnahme im Ablauf der Kläranlage wirkt sich auch auf die Temperaturentwicklung im Vorfluter aus. Die verschiedenen im Wasser lebenden Organismen können nur begrenzte Temperaturbereiche tolerieren. Vor allem Temperaturerhöhungen sind kritisch, da sie u. a. die Sauerstofflöslichkeit verringern und die Empfindlichkeit der Organismen gegenüber giftigen Substanzen, Parasiten und Krankheiten steigern. Doch auch Größe und Geschwindigkeit einer Temperaturänderung können sich negativ auf die Organismen auswirken. In der Schweiz wird dies in der Eidgenössischen Gewässerschutzverordnung berücksichtigt: in Fließgewässern sind Temperaturschwankungen von max. 3 °C zulässig [134].

Abwassertemperatur: Für die Abwasserwärmerückgewinnung ist eine konstante Wärmequelle erforderlich. Tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen des Abwassers müssen daher überprüft werden.

Wärmeabnehmer: Niedertemperatur – Heizsystem mit niedrigen Vorlauftemperaturen (je kleiner der Temperaturunterschied zwischen Abwasser- und Vorlauftemperatur, desto größer ist die Effizienz der Wärmepumpe)

Kanalquerschnitt: Für die Installation eines Kanalwärmetauschers in Schwerkraftentwässerungsanlagen ist laut § 34 der DGUV Vorschrift 21 eine lichte Höhe von > 1 m bei direktem Einbau erforderlich. Bei lichten Höhen < 1 m sollte der Wärmetauscher im Bypass- oder Einschubsystem installiert werden [135].



⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Verschmutzung des Wärmetauschers: Die Ablagerung von Feststoffen und Biofilmbildung (in der Kanalisation als Sichelhaut bezeichnet) kann den Anlagenbetrieb massiv beeinträchtigen ([127] S. 5). Daher sind eine regelmäßige mechanische Reinigung und Spülung des Wärmetauschers erforderlich ([127] S. 46). Eine automatisierte Feststoffentnahme und Biofilmbereinigung wird empfohlen [131].

Frostschutzmittelaustritt im Zwischenkreislauf: Bei starker Abkühlung des Abwassers wird dem Zwischenkreislauf Glykol als Frostschutzmittel zugegeben. Dabei handelt es sich um einen wassergefährdenden Stoff. Mit Blick auf den Grundwasserschutz muss ein Austreten des Wasser-Glykol-Gemisch unbedingt verhindert werden ([128] S. 60).

Betrieb der Wärmepumpe auf Basis regenerativen Stroms ([128] S. 59).

⑨ Wirksamkeit

Wärmetauscher: Die Rückwärmezahl, d. h. der Wirkungsgrad von Wärmetauschern liegt bei 80 bis 90 % ([136] S.348)

Wärmepumpe: Wärmepumpeneffizienz stark von Vorlauftemperatur abhängig [128].

⑩ Einsparpotentiale

CO₂-Emissionen

Raumwärme und Warmwasser verursachen knapp 73 % der gesamten CO₂-Emissionen im Haushalt [137]. Entsprechend groß ist das CO₂-Einsparpotenzial bei der Umstellung von konventionellen Verfahren zur Wärmeerzeugung auf die Wärmerückgewinnung aus Abwasser.

Bei einer Jahresarbeitszahl von 3,5 werden aus 1 MWh Strom und 2,5 MWh Umweltwärme 3,5 MWh Nutzwärme erzeugt [128].

Dabei können die CO₂-Emissionen gegenüber Erdölheizungen um 60 % reduziert werden (vgl. Abbildung 11) [129].

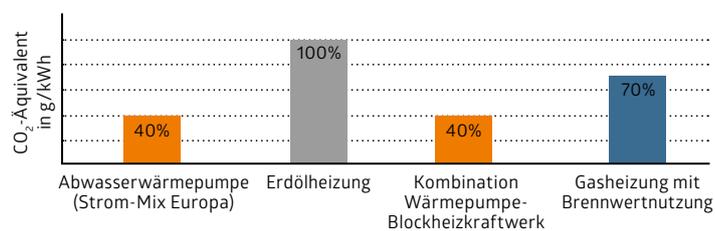
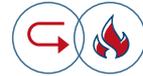
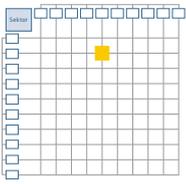


Abb. 11: Abwasserwärmerückgewinnung: CO₂-Emissionen im Vergleich; DWA 2013



⑪ Kosten

- Hohe Investitionskosten und geringe Energiekosten ggü. fossilen Heizungssystemen – bei einer Nutzungsdauer von 25 Jahren sind die Gesamtkosten beider Systeme etwa gleich hoch [132]
- **Contracting** denkbar [132]

⑫ Förderungsmöglichkeiten

- Richtlinie zur Förderung von innovativen marktreifen Klimaschutzprodukten im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Kleinserien Richtlinie):
 - Modul 3 – Dezentrale Einheiten zur Wärmerückgewinnung in Gebäuden (BAFA Zuschuss) [111]
- Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft:
 - Modul 1 – Querschnittstechnologien (BAFA-Zuschuss [138] oder KfW-Kredit 295 [139])
 - KfW-Programm Erneuerbare Energien „Premium“ [140]
 - KfW-Programm Energetische Stadtsanierung (KfW-Zuschuss 432 [141] oder KfW-Kredit 201 [142])

⑬ Beispiele

- Neckarpark Stuttgart (Projektbeschreibung auf der Webseite „Energiewende bauen“ des Forschungszentrum Jülich [143])
- IKEA im Stadtteil Lichtenberg, Berlin seit 2010 (Artikel in der Zeitschrift IKZ 2017 [144])
- Wohnsiedlung Ringermatten, Zwingen seit 1999 (Projektbeschreibung im Leitfaden zur Abwasserwärmenutzung des Bundesamts für Energie, Schweiz [145])
- Sportanlage Bachgraben, Basel seit 1982 (Projektbeschreibung im Leitfaden zur Abwasserwärmenutzung des Bundesamts für Energie, Schweiz [145])
- Nahwärmeverbund Binningen (Projektbeschreibung im Leitfaden zur Abwasserwärmenutzung des Bundesamts für Energie, Schweiz [145])

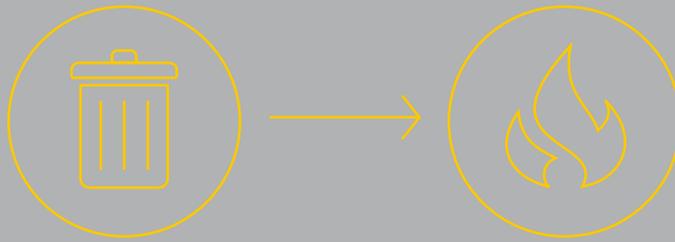
⑭ Weitere Kopplungsoptionen

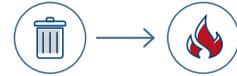
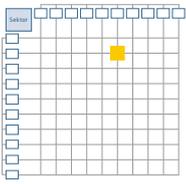
Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

⑮ Weitere Hinweise

- Erweiterungsmöglichkeiten der Sektorenkopplung:**
- Doppelnutzung von Wärme und Kälte
 - Grauwassernutzung

2.4. Sektor Abfall





2.4.1. Wärme aus Klärschlammmonoverbrennung

0 Beschreibung

In Deutschland fallen im Jahr (Stand 2016) fast 1,8 Millionen Tonnen Klärschlamm an [146]. Es bestehen verschiedene Verfahren, um diesen zu entsorgen. Während die landwirtschaftliche Verwertung in vielen südeuropäischen Ländern verbreitet ist, handelt es sich bei der Klärschlammverbrennung um das meistverbreitete Verfahren zur Klärschlamm Entsorgung in Deutschland [147]. Der Klärschlamm kann in bestehenden Kraftwerken mitverbrannt oder selbstgänglich in Monoverbrennungsanlagen verbrannt werden.

Das Ziel der Klärschlammverbrennung besteht in der Reduktion von Gewicht und Volumen und der Zerstörung organischer Schadstoffe und Erreger. Heutzutage richtet sich der Fokus darüber hinaus auf die energetischen und stofflichen Potentiale des Klärschlammes. Der Heizwert von getrockneten Klärschlamm ist mit 10.000 bis 12.000 kJ/kg vergleichbar mit dem Heizwert von Braunkohle [146]. Die Wärme, die im Verbrennungsprozess erzeugt wird, kann unter geeigneten Rahmenbedingungen in das örtliche Fernwärmenetz eingespeist werden. Im folgenden Steckbrief wird die Klärschlammverbrennung in Monoverbrennungsanlagen mit anschließender Wärmerückgewinnung zur Einspeisung in das Fernwärmenetz betrachtet.

1 Kopplungstyp

– Sekundärkopplung



2 Sektoren

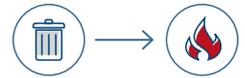
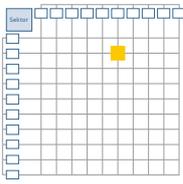


3 Eingesetzte Ressourcen

- Getrockneter Klärschlamm
- Energie aus Erdgas, Flüssiggas, Wasserstoff oder gasförmigen Brennstoffen zum Anfahren der Verbrennungsanlage und zur Einhaltung der Mindesttemperatur (17. BImSchV § 6 (8))
- Kalkhydrat oder Natriumhydrogenkarbonat zur Rauchgasreinigung

4 Ziele

- Thermisches Potential des organischen Anteils Klärschlammes zur Einspeisung in das Fernwärmenetz nutzen
- Fossile Energieträger ersetzen und CO₂-Emissionen reduzieren
- Regionale Wertschöpfung schaffen
- Interkommunale Zusammenarbeit stärken
- Umweltgerechte Entsorgungssicherheit entsprechend politischer Rahmenbedingungen dauerhaft gewährleisten [148]
- Marktunabhängigkeit sichern
- Stabile, marktgerechte Entsorgungspreise für beteiligte Kläranlagenbetreiber gewährleisten

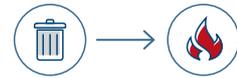
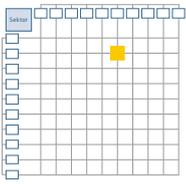


⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Bestimmung der Standorte für Trocknung (zentral oder dezentral) und Verbrennung (zentral)
- Entwicklung der Transportlogistik zwischen den Standorten

⑥ Komponenten

- **Klärschlamm-speicher**
- **Feuerungsanlage:** Verschiedene Arten von Feuerungssysteme kommen bei der Klärschlammmonoverbrennung zum Einsatz [146]. Der Wirbelschichtofen hat sich als Verfahren nach dem Stand der Technik zur thermischen Klärschlammbehandlung weltweit etabliert [149]. Allein in Deutschland sind 19 der 23 im kommunalen Bereich installierten großtechnischen Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung (inkl. Vergasung) Wirbelschichtöfen [146]. Es handelt sich dabei um eine besonders effiziente und schadstoffarme Technologie [148] mit geringen Aufenthaltszeiten und gleichmäßiger Verbrennung [150].
- **Aschesilo**
- **Abwasserbehandlung:** Die Abwassermenge variiert in Abhängigkeit des TR – Gehalts des Schlammes in der Zuführung zur Verbrennung, der Kondensation der Brüden in der Rauchgasreinigung und den Verfahren zur Rauchgasreinigung. Das Abwasser enthält erhöhte Anteile schwer abbaubarer organischer Verbindungen. [151]
- **Rauchgasreinigung** (Entstaubung, Entschwefelung und Entstickung): Rauchgas enthält Luftverunreinigungen wie CO_2 , NO_x , CO , N_2 , SO_x und Staub, die aus dem Abgas entfernt werden müssen. Die Wahl der Verfahren zur Abgasreinigung von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen hängt von den Inhaltsstoffen des Klärschlammes und der daraus resultierenden Abgaszusammensetzung sowie vom Standort und dessen Randbedingungen ab [148]. Trockene und nasse Verfahren sind möglich. Trockene Verfahren haben gegenüber nassen Verfahren den Vorteil einer einfachen verfahrenstechnischen Umsetzung, bei der das Rauchgas nicht abgekühlt werden muss. Es entsteht kaum Prozessabwasser. Eine großtechnische Ausführung ist bisher jedoch nicht möglich [152].
- **Kamin mit Emissionsmessung**
- **Reststoffsilo:** Entsorgung von festen Abfällen aus der Rauchgasbehandlung (Abfallschlüsselnummer AVV 19 01 07*), in der Regel Kalkhydrat oder Natriumhydrogenkarbonat und geringe Mengen Flugasche.
- **Wärmerückgewinnung** und ggf. Energieumwandlung (Strom): Verschiedene Verfahren stehen zur Rückgewinnung der thermischen Energie im Rauchgas zur Verfügung:
 - Dampf-, Thermalöl- oder Wasserrohrkessel
 - Rauchgaswärmetauscher
 - Rauchgaskondensator [151]
 - ggf. Wärmepumpe
- **Einspeisevorrichtung** in das Fernwärmenetz



⑦ Technische Voraussetzungen

- Bei der Einspeisung in das Fernwärmenetz durch Dritte können technische Restriktionen bestehen:
- **Wärmemenge/-transport:** Der Wärmetransport im Netz kann nur in kleinem Umfang variiert werden, da er auf der durch Pumpen erzeugten Strömung basiert. Auch kann überschüssige Wärme nicht andernorts abgesetzt werden. Die Einspeisung in das Wärmenetz wird insbesondere dann erschwert, wenn seitens des Netzbetreibers bereits eigene Erzeugungskapazitäten aufgebaut oder langfristige Wärmebezugsverpflichtungen eingegangen wurden [153].
- **Temperaturniveau:** Es sind die Exergie der Wärme und damit das Temperaturniveau (Beachtung einer gleitenden Vorlauftemperatur) zu beachten [153].
- **Hydraulik:** Aufgrund hydraulischer Restriktionen ist nicht jeder Punkt im Fernwärmesystem für die dezentrale Einspeisung größerer Wärmemengen geeignet. Es bedarf intelligenter Regelmechanismen um die Einspeisung zu steuern [153].

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Emissionsminderung

Bereits während des Verbrennungsprozesses können Emissionen durch konstruktive Änderungen oder Änderungen der Prozessführung reduziert werden. Durch diese Maßnahmen können vor allem Stickstoffoxide, Kohlenstoffmonoxide und Kohlenwasserstoffverbindungen reduziert werden [151].

⑨ Wirksamkeit

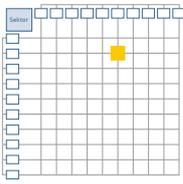
Klärschlamm-trocknung:

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 Trocknung des Klärschlammes erforderlich [148] und [146]. Unterschiedliche Wärmemedien kommen zur Klärschlamm-trocknung in Frage [146]. Um eine positive Energiebilanz zu erreichen und Überschusswärme an das Fernwärmenetz abgeben zu können, ist die Klärschlamm-trocknung mit Abwärme erforderlich. Verschiedene Abwärmequellen sind hier denkbar. Von der Abwärmequelle hängt auch der Ort der Trocknung ab. Kann Abwärme aus faulgasbetriebenen BHKW bereits auf der Kläranlage genutzt werden, findet die Trocknung **dezentral** statt. Eine **semizentrale** Abwärmenutzung aus 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.

Transport

Die Beförderungsleistung im Güterverkehr kann anhand von Tonnenkilometern gemessen werden. Die Messgröße hängt vom Gewicht der beförderten Güter und der Transportentfernung ab (1 Tonnenkilometer entspricht der Beförderung von Gütern im Gewicht von 1 t über 1 km). [154]

Günstig wirkt sich zum einen eine dezentrale Klärschlamm-trocknung und damit Gewichts- und Volumenreduktion des Klärschlammes noch vor dem Transport zur Verbrennungsanlage, zum anderen eine geringe Entfernung zwischen den Kläranlagen und der Verbrennungsanlage aus.



Verbrennung und Wärmerückgewinnung

Etwa 5 % der Wärme geht während des Verbrennungsprozesses durch Strahlungsverluste und Wärme in der Klärschlammasche verloren, weitere 20 % gehen während der Wärmerückgewinnung aus dem Rauchgas verloren [155].

10 Einsparpotentiale

Die Machbarkeitsstudie der TransMIT GmbH für den Raum Mittelhessen stellt in verschiedenen Szenarien die CO₂-Emissionen durch Transport, elektrischen und thermischen Energiebedarf der CO₂-Einsparung durch die Einspeisung thermischer Energie aus der Klärschlammverbrennung in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen gegenüber. In den Szenarien wird die zentrale Klärschlammverbrennung betrachtet. Die folgenden CO₂-Einsparungen werden erreicht [151]:

- 1. Zentrale Hochtemperaturtrocknung mit Wärme aus KS-Verbrennung,
- 2. Zentrale Niedertemperaturtrocknung mit Abwärme und
- 3. Dezentrale Trocknung mit Abwärme

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
-420 t CO ₂ /a	- 6.418 t CO ₂ /a	4.091 t CO ₂ /a

11 Kosten

Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Verbrennungsanlagen

Eine Gegenüberstellung von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen verschiedener Größen macht deutlich, dass die spezifischen Kosten mit steigender Größe der Anlage sinken (vgl. Tabelle) [155]. Entsprechend ist anzunehmen, dass dezentrale Verbrennungsanlagen aufgrund ihrer Anlagengröße unwirtschaftlicher als zentrale Anlagen sind und mit hoher Effizienz betrieben werden müssen [151]. Den Kosten der Verbrennungsanlage stehen die Kosten für Beladung und Transport gegenüber.

Kapazität	35.000 TS/a	4.000 TS/a	2.000 TS/a
Investitionskosten	35 Mio €	12 Mio €	6,6 Mio €
Betriebskosten	5,5 Mio €/a	1 Mio €/a	1 Mio €/a
Spezifische Kosten	157 €/Mg TS	487 €/Mg TS	510 €/Mg TS

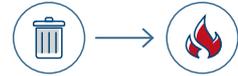
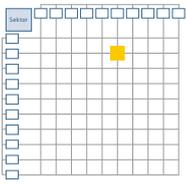
Tabelle 11: Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Verbrennungsanlagen für Klärschlamm; Tsybina et al. 2018

12 Förderungsmöglichkeiten

Keine Förderungsmöglichkeiten bekannt.

13 Beispiele

- Klärschlammverwertungskonzept Mittelhessen (Machbarkeitsstudie zu kommunalem Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen durch die TransMIT GmbH [151])
- Klärschlammverwertungskonzept Darmstadt (Machbarkeitsstudie zur Monoklärschlammverbrennung mit Phosphorrecycling durch den Zweckverband Abfallverwertung Südhessen, voraussichtlich bis Mitte 2020)



⑭ Weitere Kopplungsoptionen

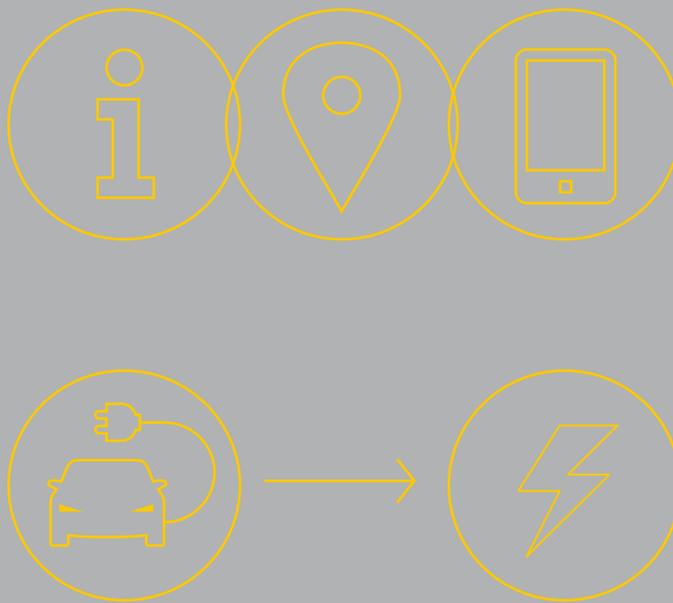
Zusätzliche Kopplungsmöglichkeiten ergeben sich, wenn die Liste der kommunal geprägten Sektoren (vgl. Band I Leitfaden) um die Sektoren Industrie und Landwirtschaft erweitert wird:

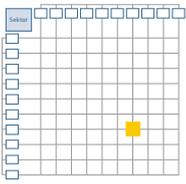
- mögliche **Primärkopplung**: Klärschlammrocknung mit industrieller Abwärme
- mögliche **Tertiärkopplung**: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

⑮ Weitere Hinweise

Keine weiteren Hinweise.

2.5. Sektor Verkehr





2.5.1. Mobilstation

0 Beschreibung

Eine Mobilstation ist die „sichtbare Ausprägung eines multimodalen Mobilitätskonzeptes“ ([156] S. 69). 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 ([157] S. 9). Der Umsteigeknoten stellt einen Treffpunkt und Wartebereich dar, sowie verschiedene Informations- und Serviceleistungen zur Verfügung ([157] S. 8).

⑩ **Der Umweltverbund:** umfasst den Fuß- und Radverkehr, öffentlichen Personennahverkehr, Schienenpersonennahverkehr sowie die „geteilte“ Mobilität.

Eine effiziente Verknüpfung der Komponenten soll die Attraktivität und somit die Auslastung des verkehrlichen Gesamtsystems verbessern ([158] S. 520). Der Umweltverbund kann durch eine gute Anbindung der Mobilstation an die Fuß- und Radwegenetze gestärkt werden ([158] S. 519). Kommunikations- und Informationsdienste ermöglichen weitergehende „Funktionen, wie die Planung der kürzesten und effizientesten Route“ ([158] S. 519).

⑩ **Marketing:** Eine Mobilstation kann als Marketinginstrument genutzt werden: vorhandene Mobilitätskonzepte werden gebündelt und öffentlichkeitswirksam präsentiert ([156] S. 69). Für eine stärkere Wahrnehmung der Stationen als Gesamtkonzept mit Wiedererkennungsfaktor ist die Entwicklung eines Corporate Designs sinnvoll ([158] S. 521, [156] S. 24).

1 Kopplungstyp

– Primärkopplung



2 Sektoren

Angebot / Abgabe

Physische Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel: MIV zu ÖPNV; Verkehrsmittel innerhalb des Umweltverbundes

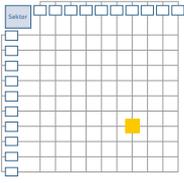


Nachfrage / Aufnahme

Verkehr (Fortbewegung)

4 Ziele

- Ressourcen- und Energieeinsparung, verringerte Flächeninanspruchnahme des MIV ([157] S. 10)
- Modal Shift (Veränderung des Mobilitätsverhaltens) in Richtung des Umweltverbundes, Substitution privater Pkw-Fahrten ([156] S. 5): Steigerung der CO₂-armen Mobilität
- Förderung der Zugänglichkeit zur Mobilität
- Verbesserte Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum ([156] S. 24)
- Werbeträger für den Umweltverbund ([156] S. 24)



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

- Flächen zur Verfügung stellen: zum Beispiel von der Stadt, den Verkehrsbetrieben oder von Wohnungsbaugesellschaften (Vorteil: Aufwertung von Wohnquartieren)
- Zentral gelegene Stationen: Sichtbarkeit, Wahrnehmung
- Analyse der örtlichen Gegebenheiten ([158] S. 524):
 - Qualität der vorhandenen Verknüpfungspunkte, Lage der Verknüpfungspunkte im urbanen/ländlichen Raum
 - Städtebauliche Dichte, Einwohner- und Arbeitsplatzdichte
 - Lebensstil der Bewohner
 - Pkw-Dichte und Parkdruck
 - Erreichbarkeit des Standortes durch den öffentlichen oder Schienenpersonennahverkehr (ÖPNV, SPNV), Fuß- oder Radverkehr
- Innerstädtisch: ideal an Orten mit hoher städtebaulicher Dichte mit gemischter Nutzung und Versorgungseinrichtungen vor Ort, Verbindung zum ÖPNV, hohem Parkdruck im öffentlichen Raum; sinnvolle Verteilung der Stationen in der Stadt ([157] S. 11)

⑥ Komponenten

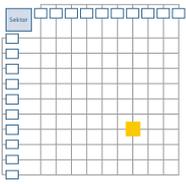
Die Ausstattung der Mobilstationen ist abhängig von unterschiedlichen Faktoren (siehe Voraussetzungen). Es sind folgende Komponenten möglich ([157] S. 29, [158] S. 520 f., [156] S. 5, 26):

- Bauliche Anlagen, mind. (Informations-) Stele
- Haltestellen des öffentlichen städtischen und überörtlichen Nah- und Fernverkehrs
- Verkehrsmittel, die geteilt, geliehen oder gemietet werden können.
 - (E-) Fahrzeuge (stationsbasiert (feste Stellplätze) oder flexible (innerhalb eines Geschäftsbereiches freie Stellplatzauswahl) Angebote) mit Stellplätzen von Unternehmen
 - Privates Car-Sharing
 - Car-Pooling-Angebote (moderne Fahrgemeinschaften)
 - Fahrräder, Lastenfahrräder, Pedelecs, e-Bikes
 - E-Roller
- WLAN-Hotspots
- Dienstleistungsangebote wie unternehmensübergreifende Paketstationen; Ladengeschäfte mit langen Öffnungszeiten (erhöhen gleichzeitig auch die Sicherheit durch Belegung des Ortes)
- Fahrradboxen
- Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung, die ein Laden der Verkehrsmittel ermöglichen

Zum Konzept sollten ebenso „Apps und Informationsdienste mit einheitlicher Echtzeitbuchungs- und Abrechnungsschnittstelle“ ([158] S. 520) gehören. Die Nutzerfreundlichkeit wird durch verschiedene tarifliche Optionen und einer einheitlichen Mobilitätskarte für alle Modi erhöht ([158] S. 520).

⑦ Technische/Bauliche Voraussetzungen

- Die Ausgestaltung der Mobilitätsstation sollte folgende Faktoren berücksichtigen: Barrierefreiheit, gute Erreichbarkeit und Wahrnehmung, räumliche Kompaktheit, Informations- und Orientierungshilfen, Aspekte einer hohen Aufenthaltsqualität, Berücksichtigung der angrenzenden Quartiere und deren Wegführung



- Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien: Ortungstechniken zur Standortbestimmung von Verkehrsmitteln, Medien in Besitz der Nutzergruppen ermöglichen Dienstleistungszugang, Informationen zu multimodalen Wegeoptionen
- Umklappbare Pfosten können Carsharing-Parkplätze vor Falschparkern schützen (Schlüssel zum Umklappen im Fahrzeug) ([157] S. 15)

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

- Der ÖPNV sollte nicht durch individuelle Formen der Mobilität, die Schadstoffe emittieren, ersetzt werden
- Im Rahmen der Mobilstationen sollten effiziente und umweltfreundlich betriebene Autos und Busse eingesetzt werden. In Bremen ist eine Voraussetzung zur Stellplatzvergabe die Zertifizierung des entsprechenden Car-Sharing-Unternehmens mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ ([159]). Dies ist vor allem wichtig, weil durch Car-Sharing-Angebote oftmals ein Auto genutzt wird, wo vorher keine Nutzung bestand, wodurch es in erster Linie zu einer Zunahme von Emissionen kommen kann.

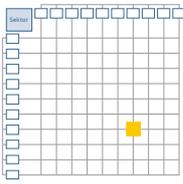
⑨ Wirksamkeit

- Träger: städtische Gesellschaft oder die Kommune
- Die Betriebsführung kann bspw. von Verkehrsbetrieben, Nahverkehrsunternehmen (...) übernommen werden
- Aufgaben der Kommune: Akquisition von Zuschüssen, Initiierung eines einheitlichen Zugangsmediums zu den Transportmitteln
- Unterhaltungskosten können durch Vermietung der Stationsflächen, Werbeflächen, Verkauf von PV-Strom gedeckt werden
- Tarifgestaltung: z. B. rabattierte Tarife für ÖPNV-Kunden
- Mobilitätskarte für alle Transportmittel, Buchung und Abrechnung erfolgt über einzelne Dienstleister
- Örtliche Fahrradhändler als Technikpartner
- Verkehrsunternehmen: Integration externer Mobilitätsdienstleistungen in das Repertoire des Angebotes (vergünstigte Nutzung von Carsharing-Angeboten oder Fahrradverleihsystemen) oder Erweiterung der eigenen Produktpalette mittels Zusatzangeboten

⑩ Einsparpotentiale

Effekte

- Verringerung der Flächeninanspruchnahme durch private Pkw: ein Carsharing-Auto wird statistisch von 48 Personen genutzt –somit ersetzt es zwischen 8 und 20 private Pkw; entspricht ca. 84 bis 228 m² innerstädtischer Fläche, die anders genutzt werden kann ([160] S. 10).
- Um die ökonomischen Potentiale des Radfahrens gegenüber Autofahrten zu bewerten, wurden für die Stadt Kopenhagen im Jahr 2008 Kosten untersucht, die sich durch das Fahrradfahren ergeben [161]. Für den einzelnen ist Radfahren zwar zeitintensiver, jedoch entstehen geringere Betriebskosten und Vorteile für die persönliche Gesundheit. Letzteres wirkt sich auch kostensenkend auf die Volkswirtschaft aus. Das Autofahren hingegen verursacht Kosten in Bezug auf Klimawandel, Lärmbelastung und durch Stau. Insgesamt kommt die Studie zu dem Schluss, dass für eine mit dem Rad zurückgelegte Strecke umgerechnet 0,08 €/ km benötigt werden, während das Auto Kosten von umgerechnet 0,5 €/ km verursacht ([161] S. 5).



- Die Nutzung von Mobilstationen führt zu einer erhöhten körperlichen Bewegung – positiver Einfluss auf die Gesundheitspolitik ([160] S. 11)

Emissionen

Anhand einer Masterarbeit ([157]) zum Thema der Wirksamkeit von Mobilstationen in Würzburg sollen exemplarisch die Emissionseinsparungen abgebildet werden.

2015 ist in Würzburg ein Konzept umgesetzt worden, dass die Errichtung von insgesamt 9 Mobilstationen (Car-, Bike-Sharing sowie ÖPNV) vorsieht. Die Stadt plante die Standorte, das Design sowie das Gesamtkonzept mit einer gemeinsamen Marke und einem integrierten Marketing. Beteiligt waren die Firmen Würzburger Straßenbahn GmbH, nextbike und scouter, die in Würzburg auch jeweils von den Mobilstationen unabhängige Stationen haben. Alle Partner der Stationen stellen mobile Apps bereit, mit denen sich die jeweiligen Services buchen und nutzen lassen.

In der Masterarbeit werden 3 Effekte unterschieden, um die CO₂-Emissionen abzuschätzen: die Car-Sharing-Flotte ist effizient (Reduktion); es kommt zu einer verringerten Nutzung des eigenen Pkw (Reduktion) und es findet ein Wechsel vom ÖPNV/Fahrrad zum Car-Sharing statt (Zunahme der Emissionen) ([157] S. 38).

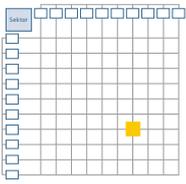
- Höhere Effizienz: 100 statt 172,9 g CO₂ pro Pkw-km; von den mit Car-Sharing-Fahrzeugen zurückgelegten Wegen ersetzen ca. 30 % eine Fahrt mit einem eigenen Pkw, in einem Jahr wurden 439.000 Car-Sharing-km zurückgelegt – Reduktion CO₂ von 9,6 t/a
- Laut Befragung verringerten 730 Nutzer ihre Pkw-Fahrleistung – dieser Effekt wird mit einer Verringerung von 3,6 Mio. Pkw-km/a bewertet – Reduktion CO₂ von 629 t/a
- 70% der zurückgelegten Wege wären ohne das Angebot nicht mit einem Pkw zurückgelegt worden – Zunahme CO₂ von 30,7 t/a
- Ergebnis: 608 t CO₂/a werden durch Mobilstationen eingespart

⑪ Kosten

- Es sind Investitionskosten zur baulichen Erschließung von Stellflächen und Stationsinfrastruktur notwendig. Die Unterhaltungskosten sind gering und können durch Mieteinnahmen der verpachteten Stellplätze refinanziert werden ([156] S. 71)
- Sicherung einer umfassenden Mobilität zu erschwinglichen Preisen für Menschen, die sich kein eigenes Fahrzeug leisten können/wollen – Carsharing-Nutzung in Kombination mit weiteren Verkehrsmitteln generiert eine monetäre Einsparung ([160] S. 11)
- Die Mobilstationen in Würzburg wurden mit Hilfe von Fördermitteln des Umweltbundesamtes finanziert, die ca. 50 % der Gesamtkosten von rund 70.000 € deckten ([157] S. 11)
- Einen Überblick über die Finanzierungsmöglichkeiten und Kosten realisierter Mobilstationen bieten die Steckbriefe im Bericht des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) „Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt“ ([156])

⑫ Förderungsmöglichkeiten

- Ggf. können Fördermittel (EU, Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz, Nahverkehrsmittel, Umsetzung Klimaschutzkonzepte) genutzt werden
- Eine intensive Abstimmung mit Fördermittelgebern ist notwendig, damit die Mobilstationen die jeweiligen Förderbedingungen erfüllen ([156] S. 71)



13 Beispiele

- Vorstellung verschiedener Mobilstationen in Deutschland durch das BBSR (März 2015) ([156])

14 Weitere Kopplungsoptionen

- Sektor Verkehr: **E-Mobilität** (Ladesäulen zur Verfügung stellen)



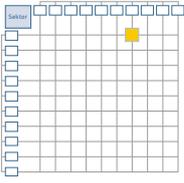
- Sektor Verkehr: **Vehicle-to-Grid** (netzdienliches Laden unterstützen)



Sektorgruppe Soziale Infrastruktur: „Durch eine verbesserte Verknüpfung der verschiedenen Mobilitätsangebote können Flächen für soziale und ökologische Funktionen zurückgewonnen werden“ [159]

15 Weitere Hinweise

- Flächen für die Mobilstation können, wie in Bremen, durch Sondernutzungsgenehmigungen (als intermodale Mobilstationen) im Baugenehmigungsverfahren gesichert werden ([159])
- In Bremen gab das Projekt „mobil.punkt“ einen Anstoß zur Änderung der Straßenverkehrsordnung: 2017 „wurden die bundesrechtlichen Voraussetzungen geschaffen, dass die Länder Regelungen für eine Privilegierung von Car-Sharing-Stellplätzen im öffentlichen Raum treffen können“ ([159])



2.5.2. Vehicle-to-Grid (VtG)

① Beschreibung

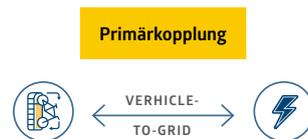
Private Autos werden im Durchschnitt täglich ca. 9 % der Zeit genutzt, das bedeutet eine Stillstandzeit von ca. 22 Stunden pro Tag ([43] S. 36). Vehicle-to-Grid (VtG) ist ein Konzept, das sich diesen Umstand zu Nutze macht: Während des Parkens werden E-Autos geladen. Bei Strombedarf jedoch, stellen die rückspeisefähigen E-Autos dem Stromnetz Strom zur Verfügung ([162] S. 2) 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 in Reallaboren erprobt** (siehe Beispiele ⑬). Viele Fahrzeughersteller verweigern das bidirektionale Laden bzw. den dafür notwendigen Zugriff auf die fahrzeuginterne Batterie, um einer frühzeitigen Alterung vorzubeugen ([2] S. 791), da sich Gewährleistungsfragen ergeben würden.

Eine Dissertation zum Thema an der BTU Cottbus kommt zu dem Schluss, dass einzelne Elektrofahrzeuge eines dienstlich genutzten Fahrzeugpools, die innerhalb eines Ladesäulenparks angeschlossen sind, „durch einen Aggregator zu einem mobilen Speicher zusammengefasst werden“ können ([43] S. 152). Der Aggregator übernimmt die Aufgabe, den virtuellen Speicher zu vermarkten und zu steuern ([42] S. 257). Durch den Zusammenschluss der Fahrzeuge zu einem großen mobilen Speicher „lassen sich Nutzungspotentiale gezielt aggregieren und für höherwertige Zusatznutzen konzentriert einsetzen. Zukünftig könnten Aggregatoren auf die gezeigte Art und Weise bspw. steuerbare Lasten und Speicher lokal zusammenfassen und Systemdienstleistungen auf entsprechenden regionalen Märkten anbieten, wobei der Betreiber dieses Pools Partner im Netzregelverbund wäre.“ ([43] S. 152). Hierfür bedarf es einer komplexen Informations- und Kommunikationsinfrastruktur.

① Kopplungstyp

– Primärkopplung



– Sekundärkopplung: Mobilstation

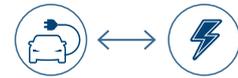
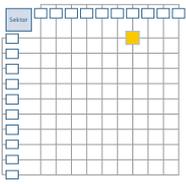


② Sektoren

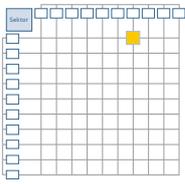


③ Eingesetzte Ressourcen

Überschuss-Strom aus erneuerbaren Energien

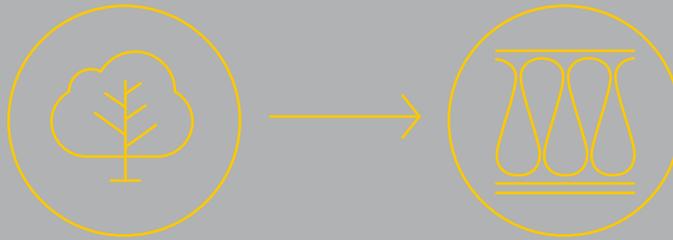
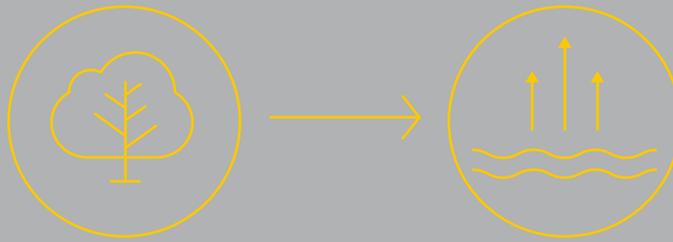


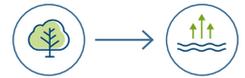
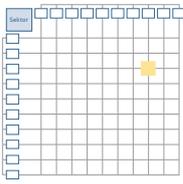
④ Ziele	
	<ul style="list-style-type: none">– Netzverträgliche EE-Integration durch mobile Speicherkapazitäten: Einsatz von Fahrzeugbatterien bei Netzüberlastungen oder Spannungshaltungsproblemen ([43] S. 36)
⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext	
	<ul style="list-style-type: none">– Umfangreiche Ladeinfrastruktur, entsprechende Flächen– Einrichtung öffentlich zugänglicher Aufstellorte für die Ladeinfrastruktur: Autohöfe, Autobahnraststätten, Einkaufszentren mit Parkplätzen, Straßenränder und öffentliche Parkplätze– Ausgewiesene Stellflächen nur für E-Autos
⑥ Komponenten	
	<ul style="list-style-type: none">– Ladesäulen, die ein bidirektionales Laden ermöglichen sowie Fahrzeuge mit der Möglichkeit des bidirektionalen Ladens– Für VtG ist der Aufbau von geeigneten Kommunikations- und Ladeinfrastrukturen, mit denen Systemdienstleistungen erbracht werden können, notwendig ([2] S. 791). Es muss ein externer Zugriff bzw. eine externe Verwaltung auf die Fahrzeuge gewährleistet werden.– Ggf. Einrichtung eines Energiemanagementsystems, das Zugriff auf mehrere Fahrzeuge hat und diese steuern kann
⑦ Technische Voraussetzungen	
	<ul style="list-style-type: none">– „Informationen hinsichtlich der Bedürfnisse des Nutzers, des Betriebsverhaltens sowie Batteriezustandes der teilnehmenden Transaktionsbatterien und der Grenzen des Energieversorgungsnetzes bilden die essenziellen Voraussetzungen zur langfristig netzverträglichen Integration“ ([43] S. 150) – Schaffung einer geeigneten Informationsinfrastruktur– Ladesäulenpark sollte von einem Aggregator organisiert werden
⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit	
	<ul style="list-style-type: none">– Es ist sicherzustellen, dass die Batterie mit Überschuss-Strom aus EE geladen wird.– Konzept birgt an sich keine besonderen Voraussetzungen. Siehe Steckbrief E-Mobilität.
⑨ Wirksamkeit	
	<ul style="list-style-type: none">– Aus der Speicherung von Strom in Batterien resultieren Verluste– Erhöhung der Zyklenrate der Transaktionsbatterie beschleunigt die Batteriealterung, was die Lebensdauer zusätzlich zur fahrtbezogenen Nutzung verkürzt ([43] S. 36). Diese Auswirkungen können durch die „ausschließliche Nutzung eines optimalen Arbeitsbereiches minimiert werden“ ([43] S. 152)
⑩ Einsparpotentiale	
	<ul style="list-style-type: none">– Die Kopplung von Verkehrs- und Stromsektor durch VtG birgt die gleichen Einsparpotentiale gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren wie die E-Mobilität (siehe entsprechenden Steckbrief, ⑩). Darüber hinausgehende Einsparungen können hier nicht abgeschätzt werden.



<p>⑪ Kosten</p>
<ul style="list-style-type: none"> – Um Anreize für ein bidirektionales Laden zu schaffen, könnten spezifische monetäre oder andere Zusatznutzenbezogene Vorteile geschaffen werden – Wenn beim Aufbau einer E-Mobilität-Infrastruktur auf die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens (entsprechende Ladesäulen, siehe Komponenten ⑥) geachtet wird, können die durch das VtG-Konzept entstehenden Kosten geringer ausfallen
<p>⑫ Förderungsmöglichkeiten</p>
<p>Keine Förderungsmöglichkeiten bekannt.</p>
<p>⑬ Beispiele</p>
<ul style="list-style-type: none"> – Projekt ESOLCAR der BTU Cottbus, Vattenfall Europe Mining & Generation und dem Fahrzeughersteller German e-cars R&D GmbH: https://www.b-tu.de/institut-fuer-elektrische-und-thermische-energiesystem/projekte/e-solcar/ – Projekte der Fa. The mobility house (siehe Internetauftritt unter [163]) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Automobilherstellern
<p>⑭ Weitere Kopplungsoptionen</p>
<p>– Sektor Verkehr: Mobilstation</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Primärkopplung</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Sekundärkopplung</p> </div> </div> <p>– Sektor Verkehr: Mobilstation</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Primärkopplung</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Sekundärkopplung</p> </div> </div>
<p>⑮ Weitere Hinweise</p>
<p>Keine weiteren Hinweise.</p>

2.6. Sektor Grüne Infrastruktur





2.6.1. Verdunstungskühlung auf Flächen der Grünen Infrastruktur

0 Beschreibung

Länge und Häufigkeit sommerlicher Hitzewellen haben sich in Westeuropa zwischen 1880 und 2005 verdoppelt bzw. verdreifacht [164, 165]. Insbesondere im urbanen Raum verursachen die Flächenversiegelung und der Rückgang der Vegetation durch die Reduktion von **Evapotranspiration** und **Bodenalbedo** einen lokalen Temperaturanstieg im Außenraum. Die Temperatur kann zeitweise bis zu 15 °C höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten liegen (Urbane Hitzeinsel-Effekt) [166]. Dies stellt eine Belastung für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Bewohner dar [167]. Vor allem Säuglinge, Kleinkinder, ältere und kranke Menschen sind gefährdet [168].

Grüne Infrastrukturen können durch die Verdunstung (und die Verschattung) von Pflanzenoberflächen eine Absenkung der Temperatur im Außenraum bewirken.

Für die Verdunstung des Wassers ist Energie erforderlich, die der näheren Umgebung als sensible (fühlbare) Wärme entzogen wird. Sie wird im Wasserdampf als latente (verborgene) Wärme gespeichert.

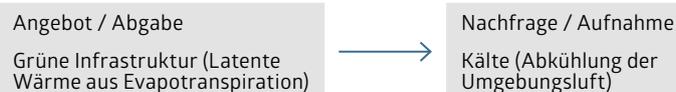
16 Verdunstung [226]: Für den Phasenübergang werden bei einer Wassertemperatur von 0 °C ca. 2.500 kJ/kg benötigt, bei höheren Temperaturen ist eine geringere Energiemenge erforderlich. Sofern keine anderen atmosphärischen Prozesse entgegenwirken, tritt dieser Energieverbrauch als Verdunstungskühlung in Erscheinung.

1 Kopplungstyp

– Tertiärkopplung, Verdunstungskühlung



2 Sektor

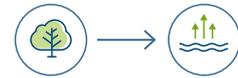
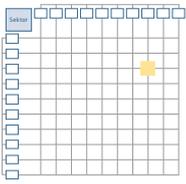


3 Eingesetzte Ressourcen

Alle Vegetationselemente der Grünen Infrastruktur; vor allem Bäume und Sträucher empfehlen sich aufgrund der hohen Reichweite des Kühleffekts (Verteilungsleistung) [169; 170]

4 Ziele

- Absenkung der Umgebungstemperatur,
- insbesondere Abschwächung des Urbane-Hitzeinsel-Effekts
- Annäherung an die natürliche Wasserbilanz [171]
- Verbesserung der „gefühlten Temperatur“ und damit des menschlichen Wohlbefindens



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

Verschiedene Randbedingungen im urbanen Kontext können Verdunstungs- und Verteilungsleistung beeinflussen:

Erhöhte **Verdunstungsleistung** aufgrund lokaler Gegebenheiten wie

- hohe Bodenfeuchtigkeit [172]
- geringe Luftfeuchtigkeit [172]
- heißes, trockenes Klima [173]

Erhöhte **Verteilungsleistung** in Abhängigkeit der Bebauungsstruktur (vorzugsweise offen) [173]

⑩ **Verdunstungs- und Verteilungsleistung**: Die Effizienz einer Maßnahme zur Verdunstungskühlung hängt zunächst von der Verdunstungsleistung ab. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Verdunstungsmenge und können diese steigern oder verringern (vgl. ⑦). Die entstandene Verdunstungskälte muss anschließend im Außenraum verteilt werden. Unterschiedliche Parameter können sich fördernd oder einschränkend auf die Reichweite der Kühlung auswirken (vgl. ⑤ und ⑦).

⑥ Komponenten

Zentrale (z. B. Park) oder **dezentrale** (z. B. Baumrigole) Struktur:

- Vegetation (Bäume, Sträucher, Gräser)
- Belebte Bodenzone oder Substratsystem (bei Dach- oder Fassadenbegrünung)
- Bewässerungsvorrichtungen
- Speicher für Bewässerungswasser

⑦ Technische Voraussetzungen

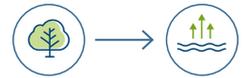
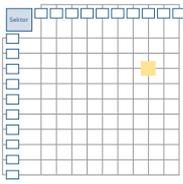
Verschiedene Faktoren bei der Umsetzung Grüner Infrastrukturen können Verdunstungs- und Verteilungsleistung positiv beeinflussen:

- Erhöhte **Verdunstungsleistung** durch hohe Oberflächenrauigkeit der Vegetation (Kombination aus verschiedenartigen Bäumen und Sträuchern)
- **Verteilungsleistung** in Abhängigkeit von
 - Größe, Geometrie und Netzwerk der Grünflächen [174]
 - Pflanzenarten [173]

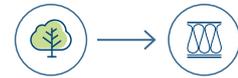
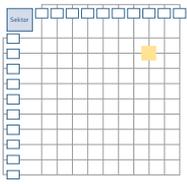
Modelle, um die Evapotranspiration im urbanen Raum in Abhängigkeit dieser Parameter zu beurteilen, existieren bisher kaum [175]. Modelle wie UrbanEVA für das Storm Water Management Model (SWMM) der US – amerikanischen Umweltschutzbehörde (EPA) befinden sich aktuell in der Entwicklung [176].

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Die Verdunstungsleistung einer Pflanze wird in hohem Maße durch die Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Diese muss ggf. durch zusätzliche, künstliche Bewässerung gewährleistet werden (siehe Steckbrief „Bewässerung aus Gewässern der Blauen Infrastruktur“) [177].



⑨ Wirksamkeit	
	<p>Das Ausmaß der Temperaturabsenkung ist von zahlreichen Faktoren (siehe ⑤ und ⑦) abhängig. In verschiedenen, standortspezifischen Studien zu Grünen Infrastrukturen konnte die Außenraumtemperatur um 2 bis 8 °C reduziert werden [173; 178].</p> <p>Aufgrund fehlender Messwerte und Modellanwendungen ist es schwierig, das Potential der Verdunstungskühlung auf Quartiersebene abzuschätzen. Messwerte auf Gebäudeebene können nicht linear auf das Quartier übertragen werden [171].</p>
⑩ Einsparpotentiale	
	<p>Reduktion von Gesundheitskosten [179]:</p> <ul style="list-style-type: none">– Verbesserung der Arbeitsproduktivität– Reduktion der Gesundheitsausgaben (je Einwohner)
⑪ Kosten	
	<p>Die Kosten der Grünen Infrastruktur sind stark abhängig vom Vegetationstyp, der erforderlichen Bewässerung und notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen. Die Kosten müssen daher für jedes System individuell ermittelt werden.</p>
⑫ Förderungsmöglichkeiten	
	<p>Verschiedene Städtebauförderungsprogramme, z.B. „Wachstum und Nachhaltige Erneuerung“, mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]</p>
⑬ Beispiele	
	<p>Quartier im Bezirk Pankow, Berlin (Modellgebiet im Rahmen des KURAS-Projektes, beschrieben im Leitfaden des Projekts [180])</p>
⑭ Weitere Kopplungsoptionen	
	<p>Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.</p>
⑮ Weitere Hinweise	
	<p>Weitergehende Effekte der Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none">– Reduktion (oder Erhöhung) der Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit des Aufbaus der Vegetation (Dichte, Höhe, etc.) [181]– Erhöhung der Luftfeuchtigkeit– Lärmreduktion– Weitergehende Temperaturabsenkung durch Verschattung



2.6.2. Wärmedämmung von Gebäuden durch Bauwerksbegrünung

0 Beschreibung

In Deutschland (wie auch weltweit) entspricht der gebäuderelevante Endenergieverbrauch für Raumwärme und Raumkühlung einem Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs [182; 183]. Bauwerksbegrünungen können durch die Verdunstung, die Verschattung und die Wärmekapazität der Vegetation und des Substrats 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.

Bauwerksbegrünungen umfassen alle Formen der Dach- und Fassadenbegrünung [184].

1 Kopplungstyp

– Tertiärkopplung, Wärmedämmung



2 Sektor

Angebot / Abgabe
Grüne Infrastruktur (Dach-
und Fassadenbegrünung)



Nachfrage / Aufnahme
Wärme (und Kälte)

3 Eingesetzte Ressourcen

Dach- oder Fassadenbegrünung

4 Ziele

Reduktion des Energiebedarfs zur Temperaturregulation im Gebäudeinneren

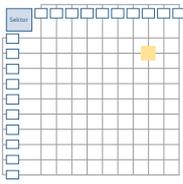
5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

Unterschiedliche Gebäudetypen (Geschosshöhe, Dachneigung, etc.) beeinflussen die Wirksamkeit von Bauwerksbegrünung auf Gebäudeebene, es ist jedoch nicht ersichtlich, dass unterschiedliche urbane Rahmenbedingungen diese beeinflussen. Auf Stadtebene jedoch hat sich eine flächendeckende Bauwerksbegrünung als vorteilhaft erwiesen. Während die Kosten für Installation und Instandhaltung ausschließlich beim Hausbesitzer liegen, entsteht der Nutzen sowohl auf privater als auch auf öffentlicher Ebene. Der private Nutzen allein überwiegt möglicherweise nicht die Kosten. Um eine flächendeckende Umsetzung zu erreichen, sollten daher Fördermaßnahmen auf kommunaler Ebene in Betracht gezogen werden ([184] S. 26f).

6 Komponenten

Dachbegrünung [185]:

- Substrat- und Vegetationsschicht
- Filterschicht
- zum Schutz der Dränschicht vor Verstopfen



- Dränschicht
- Schutzschicht
- zum Schutz der Dachkonstruktion vor Wurzelwerk u. ä.

⑩ **extensiv oder intensiv [185]:** Extensiv begrünte Dächer weisen eine geringe Aufbauhöhe (bis zu 15 cm) auf und sind aufgrund der niedrigen, trockenheitsangepassten Pflanzenarten besonders pflegeleicht. Intensiv begrünte Dächer können aufgrund der Aufbauhöhe von bis zu 100 cm auch größere Pflanzenarten wie Stauden und Gehölze enthalten. Der Pflegeaufwand ist hier höher.

Fassadenbegrünung [186]:

- Bodenanschluss, Substratsystem oder Textil
- ggf. Kletterhilfe oder Spalier
- ggf. Wasser- und Nährstoffversorgungsanlage
- Absturzsicherung
- Entwässerung

⑩ **boden- oder wand- bzw. systemgebunden [186]:** Die bodengebundene Fassadenbegrünung erfolgt an fertigen Außenwänden mit Kletterpflanzen (als Selbstklimmer oder mit Kletterhilfe), die eine direkte Verbindung zum gewachsenen Boden haben. Die fassadengebundene Begrünung benötigt keinen Bodenanschluss, die Versorgung mit Nährstoffen erfolgt über automatische Anlagen. Diese Art der Fassadenbegrünung besitzt sofortige Wirksamkeit und große Gestaltungsspielräume, aber auch Wartungs- und Pflegeaufwand sind größer.

⑦ Technische Voraussetzungen

Dachbegrünung [185]:

- Schubsicherungsmaßnahmen ab 15° Dachneigung
- Berücksichtigung von Flächen- und ggf. Verkehrslasten (Dachgärten)
- Berücksichtigung von Windsoglast und Verwehsicherheit

Fassadenbegrünung [186]:

- Berücksichtigung von Wandlast (wandgebundene Systeme) und Zuglast (Kletterhilfen)
- Berücksichtigung der Windsoglast

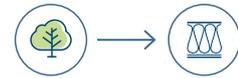
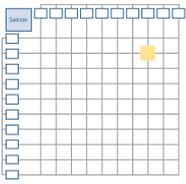
⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Instandhaltungsmaßnahmen [187]:

- Rückschnitt
- Düngen
- Wartung der Anlagen
- etc.

⑨ Wirksamkeit

- Wirksamkeit der **Verschattung** abhängig von Höhe, Leaf Area Index und Reflektivität der Bepflanzung [188]
- Wirksamkeit der **Verdunstungskühlung** abhängig von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit [189]
- Wirksamkeit der **Wärmekapazität** abhängig von Dichte, Höhe und Durchfeuchtung des Substrats [190]



⑩ **Ausrichtung der Fassade (bei Fassadenbegrünung) [184]:** Die Temperaturabsenkung durch Verschattung fällt an Südwänden stärker als an Nordwänden aus. Während dieser Effekt im Sommer wünschenswert ist, ist eine Aufheizung der Südwand durch die Sonneneinstrahlung im Winter von Vorteil. Diesen Anforderungen kann man mit sommer- anstelle von immergrüner Bepflanzung gerecht werden. An Nordwänden ist die dämmende Wirkung im Winter stärker, hier ist eine ganzjährig grüne Vegetation vorteilhaft.

⑩ Einsparpotentiale

– Implementierung in **Neubau oder Bestand:**

Aufgrund von variierender Substratfeuchte und variierendem Vegetationsbesatz schwanken auch die Wärmedurchgangswerte von Gebäudebegrünungen. Daher werden diese bisher nicht in der Wärmeschutzbetrachtung berücksichtigt. Die erforderliche Wärmedämmung muss durch die darunterliegenden Schichten erbracht werden. Gebäude, die nach modernen Standards gebaut sind (Castleton et al. beziehen sich dabei auf die britischen Bauvorschriften im Jahr 2006) weisen bereits sehr gute Dämmeigenschaften und hohe Wärmedurchgangskoeffizienten auf. Die Gebäudebegrünung kann daher kaum zusätzliche Energieeinsparung bewirken. Größere Einsparpotentiale bestehen hingegen beim Nachrüsten auf Bestandsgebäuden [191].

– Reduktion von **Reparatur- & Sanierungskosten** (Dachbegrünung):

Die Temperaturbeanspruchung des verwendeten Materials ist geringer als die konventioneller Dächer. Dadurch kann die Lebensdauer des Dachs verlängert werden, Reparatur- und Sanierungskosten sinken [184]

⑪ Kosten

Dachbegrünung:

- 20 – 40 €/m² (extensiv) [185]
- ab 60 €/m² (intensiv) [185]

Investitions- und Instandhaltungskosten von Dachbegrünungen sind hoch. Gleichzeitig besitzen sie eine hohe Lebensdauer (etwa doppelt so hoch wie konventionelle Dächer) [192]. Dies bewirkt eine langfristige Kostenersparnis. Die Ergebnisse verschiedener Kosten-Nutzen-Analysen zeigen: die Wirtschaftlichkeit wird je nach Objekt und Standort nach 10 bis 30 Jahren erreicht [185].

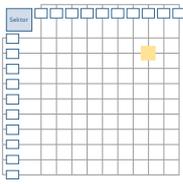
Fassadenbegrünung [186]:

- 15 – 35 €/m² (bodengebunden)
- ab 400 €/m² (fassadengebunden)

Die Kosten sind stark abhängig von Flächengröße, baulichen Gegebenheiten, Bewässerungstechnik und gewünschtem Begrünungsziel.

⑫ Förderungsmöglichkeiten

- KfW-Kredit [193] oder – Investitionszuschuss [194] „Energieeffizient Sanieren“
- Anreiz: Entwässerungssatzung mit gesplitteter Abwassergebühr



13 Beispiele

Strategien und Programme:

- Gründachstrategie Hamburg (weitere Informationen auf der Webseite Stadtportal Hamburg [195])
- Kommunales Grünprogramm Stuttgart (weitere Informationen in der Richtlinie für das kommunale Grünprogramm [196])

Projekte:

- Dachbegrünung und PV – Anlage im Technologiezentrum MTZ, München (Projektbeschreibung auf der Webseite Structurae [197])
- Fassadenbegrünung mit Rankhilfen am Bürogebäude, Westerstede (Impressionen auf der Webseite des Architekten [198])
- Bosco Verticale, Mailand (Projektbeschreibung auf der Website des World Green Building Council [199])

14 Weitere Kopplungsoptionen

Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.

15 Weitere Hinweise

– Weitergehende Effekte:

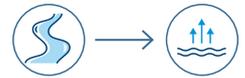
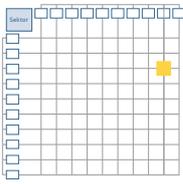
- Lärmreduktion
- Steigerung der Biodiversität

– Weiterführende Literatur:

- Pfoser (2018) Vertikale Begrünung: Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss [200]
- Dachbegrünungs- und Fassadenbegrünungsrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau [201; 202]

2.7. Sektor Blaue Infrastruktur





2.7.1. Verdunstungskühlung durch offene Wasserflächen

0 Beschreibung

Länge und Häufigkeit sommerlicher Hitzewellen haben sich in Westeuropa zwischen 1880–2005 verdoppelt bzw. verdreifacht [164, 165]. Insbesondere im urbanen Raum verursachen die Flächenversiegelung und der Rückgang der Vegetation durch die Reduktion von **Evapotranspiration** und **Bodenalbedo** einen lokalen Temperaturanstieg im Außenraum. Die Temperatur kann zeitweise bis zu 15 °C höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten liegen (Urbane Hitzeinsel-Effekt) [166]. Dies stellt eine Belastung für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Bewohner dar [167]. Vor allem Säuglinge, Kleinkinder, ältere und kranke Menschen sind gefährdet [168].

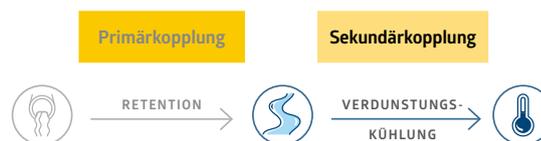
Blaue Infrastrukturen können durch die Verdunstung von Wasseroberflächen und die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers eine Absenkung und einen Ausgleich der Temperatur bewirken [173].

Für die Verdunstung des Wassers ist Energie erforderlich, die der näheren Umgebung als sensible (fühlbare) Wärme entzogen wird. Sie wird im Wasserdampf als latente (verborgene) Wärme gespeichert.

16 Verdunstung [226]: Für den Phasenübergang werden bei einer Wassertemperatur von 0 °C ca. 2.500 kJ/kg benötigt, bei höheren Temperaturen ist eine geringere Energiemenge erforderlich. Sofern keine anderen atmosphärischen Prozesse entgegenwirken, tritt dieser Energieverbrauch als Verdunstungskühlung in Erscheinung.

1 Kopplungstyp

– Sekundärkopplung, Verdunstungskühlung



2 Sektoren

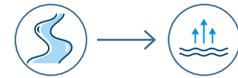
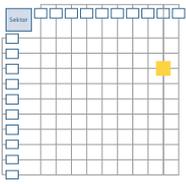


3 Eingesetzte Ressourcen

Wasserflächen offener, stehender Gewässer

4 Ziele

- Annäherung an die natürliche Wasserbilanz [171]
- Absenkung der Umgebungstemperatur (zusätzliche Reduktion durch Minderung des Kühlungsbedarfs durch Klimaanlage)
- insbesondere Abschwächung des urbanen Hitzeinseleffekts
- Verbesserung der „gefühlten Temperatur“ und damit des menschlichen Wohlbefindens



⑤ Voraussetzungen im urbanen Kontext

Erhöhte **Verdunstungsleistung** bei warmem, trockenem Klima [173] und Wind [170]

⑩ **Thermische Behaglichkeit:** Die thermische Behaglichkeit, also das Wohlbefinden des Menschen bei bestimmten klimatischen Bedingungen, ist neben der Temperatur von weiteren Faktoren abhängig, unter anderem der Luftfeuchtigkeit [203]. Ein Parameter zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit ist daher das Schwüleempfinden [203]. Ist aufgrund der lokalen klimatischen Bedingungen bereits ein hohes Schwüleempfinden vorhanden, sollte die Luftfeuchtigkeit nicht durch zusätzliche Verdunstungskühlung gesteigert werden. Dies gilt vor allem für tropische und subtropische Klimazonen [227].

Erhöhte **Verteilungsleistung** bei geringer Bebauungsdichte und breiten Straßen [173]

⑥ Komponenten

Zuleiten – Reinigen – Speichern – Ableiten:
vgl. Steckbrief „Retention auf Flächen der Blauen Infrastruktur“ ⑥

⑦ Technische Voraussetzungen

Verdunstungsleistung in Abhängigkeit von

- Tiefe und Füllstand der Wasserkörper
- Bepflanzung (die Bepflanzung der Uferzone mit Schilf oder Sumpfpflanzen kann die Verdunstung signifikant erhöhen [171])
- Windexposition
- Form und Größe der Wasserkörper

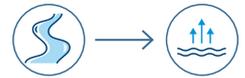
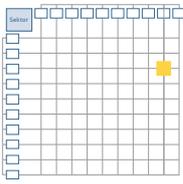
⑩ **Oaseneffekt:** Zwischen Wasseroberfläche und Luft befindet sich die laminare Grenzschicht. Diese übt einen hohen Verdunstungswiderstand aus. Über kleinen Flächen ist die laminare Grenzschicht dünner und damit weniger verdunstungshemmend als über großen Wasserflächen. Der Effekt der Verdunstungskühlung ist hier größer. Dieses Phänomen wird als Oaseneffekt bezeichnet.

„Die Auslegung von Teichen erfolgt am besten mit einer Wasserhaushaltsmodellierung“ ([171] S.27).

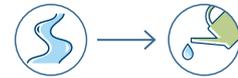
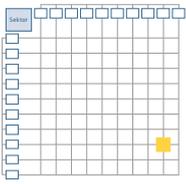
„Die gängigen Modellierungswerkzeuge in der Wasserwirtschaft berücksichtigen die Verdunstung jedoch meist nur als „Verluste“, soweit es für die Abflussberechnung erforderlich ist“ ([171] S. 66). Modelle, um die Evapotranspiration im urbanen Raum in Abhängigkeit der oben genannten Parameter zu beurteilen, existieren bisher kaum [175]. Modelle wie UrbanEVA für das Storm Water Management Model (SWMM) der US – amerikanischen Umweltschutzbehörde (EPA) befinden sich aktuell in der Entwicklung [176].

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

vgl. Steckbrief „Retention auf Flächen der Blauen Infrastruktur“ ⑧



⑨ Wirksamkeit	
	<p>Das Ausmaß der Temperaturabsenkung ist von zahlreichen Faktoren abhängig. In verschiedenen, standortspezifischen Studien zu Blauen Infrastrukturen in der nördlichen Hemisphäre konnte die Außenraumtemperatur um bis zu 5,6 °C reduziert werden. Im Median lag die Absenkung bei 1,8 °C [173] bzw. 2,5 °C [203].</p> <p>Die Kühlleistung eines Gewässers kann durch den Bewuchs der Wasserfläche bei ausreichender Wasserversorgung erheblich gesteigert werden. Dieser Gewässertyp wird als Verdunstungsbeet (wassergesättigtes Vegetationsbeet) oder Urban Wetland bezeichnet ([171] S.28).</p>
⑩ Einsparpotentiale	
	<p>Reduktion von Gesundheitskosten [179]:</p> <ul style="list-style-type: none">– Verbesserung der Arbeitsproduktivität– Reduktion der Gesundheitsausgaben (je Einwohner)
⑪ Kosten	
	<p>Die Kosten der Blauen Infrastruktur sind stark abhängig von Art und Größe der Anlage, geo- und topologischen Rahmenbedingungen und erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen. Die Kosten müssen daher für jedes System individuell ermittelt werden.</p>
⑫ Förderungsmöglichkeiten	
	<p>Verschiedene Städtebauförderungsprogramm, z. B. „Wachstum und Nachhaltige Erneuerung“, mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]</p>
⑬ Beispiele	
	<p>Leitplan Regenwasser und Hitzeanpassung im Schumacher Quartier, Berlin (Projektsteckbrief in UBA TEXTE 111 zu den Potentialen von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten [171])</p>
⑭ Weitere Kopplungsoptionen	
	<p>Im Rahmen des Leitfadens sind keine weiteren Kopplungen vorgesehen.</p>
⑮ Weitere Hinweise	
	<ul style="list-style-type: none">– Weitergehende Effekte:<ul style="list-style-type: none">• Steigerung der Biodiversität bei naturnahen Gewässern• Erhöhung der Luftfeuchtigkeit (vgl. ⑮ Thermische Behaglichkeit)• Naturerfahrung [204] und Erlebbarkeit des Regenwassers [86]– Forschungsbedarf: Studien wurden bisher vor allem in asiatischen Ländern mit subtropischem Klima durchgeführt; Forschungsbedarf besteht in anderen Regionen (z. B. Europa) und Klimazonen (z. B. gemäßigtes Klima) der Welt [203].



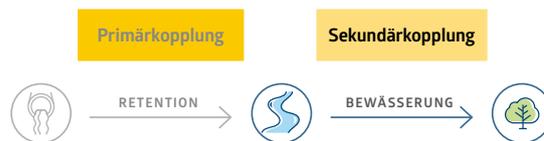
2.7.2. Bewässerung aus Gewässern der Blauen Infrastruktur

0 Beschreibung

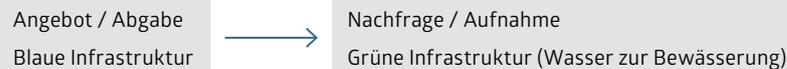
Die extreme Trockenheit im Jahr 2018 (das Jahr war eines der vier trockensten seit 1881) [205] brachte viele Kommunen in Deutschland bei der Bewässerung der Grünanlagen an ihre Grenzen [206]. Die Notwendigkeit einer arbeits- und ressourcensparenden Bewässerung in den warmen, niederschlagsarmen Monaten wurde deutlich. Die Anforderungen, die zur Bewässerung von Grünflächen an die Wasserqualität gestellt werden, unterscheiden sich von den Anforderungen, die in vielen Bereichen des häuslichen Gebrauchs bestehen [207]. Anstatt das ressourcen- und energieintensiv aufbereitete Trinkwasser zu verwenden, kann der Bewässerungsbedarf durch Niederschlagswasser aus niederschlagsreichen Zeiten gedeckt werden [208]. Eine rein mechanische Aufbereitung, ggf. gekoppelt mit naturnahen Aufbereitungsprozessen innerhalb des Speicherbeckens reicht in der Regel aus, um den Anforderungen an die Wasserqualität zur Bewässerung zu genügen [207].

1 Kopplungstyp

– Sekundärkopplung, Bewässerung



2 Sektoren



3 Eingesetzte Ressourcen

Niederschlag (Oberflächenabfluss) von geringfügig verschmutzten Oberflächen, bevorzugt Dachflächen [207], gespeichert in den Gewässern der Blauen Infrastruktur

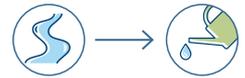
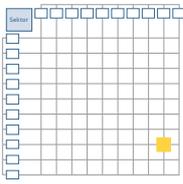
4 Ziele

- Reduktion des Trinkwasserverbrauchs für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Wasserqualität
- Reduktion von Kosten, Energie und Ressourcen zur Trinkwasseraufbereitung
- Anpassung an Extremereignisse in Folge des Klimawandels (Starkregen, Dürre)

5 Voraussetzungen im urbanen Kontext

Schutz der Bewässerungsanlage vor Beschädigungen durch Arbeitseinsätze, Tiere oder Vandalismus ([209] S. 262)

Anpassung des Bewässerungssystems an die Art der Begrünung: Spezielle Begrünungsformen im urbanen Raum wie Straßenbäume, mobiles Grün (z. B. Kübelpflanzen) und Bauwerksbegrünung, stellen spezielle Anforderungen an das Bewässerungssystem. So empfiehlt sich bei Straßenbäumen beispielsweise ein unterirdisch verbautes Bewässerungssystem [208].



Berücksichtigung des Platzbedarfs von Speicherbecken und technischen Anlagen

⑩ **Bestimmung des Wasserbedarfs landschaftlicher Flächen:** Die Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Wasserbedarfs landschaftlicher Flächen leiten sich aus den Verfahren zur Wasserbedarfsbestimmung in Landwirtschaft und Gartenbau ab. Hier wird die Referenzverdunstung ET_0 , also die errechnete Verdunstung einer ebenen Grasfläche basierend auf lokalen Klimaparametern mit einem kulturspezifischen Korrekturfaktor verrechnet. Dieser berücksichtigt den Wasserbedarf einer bestimmten Feldfrucht. Bei Grünanlagen handelt es sich um eine z.T. sehr inhomogene Vegetation mit unterschiedlichen Aufgaben. Der Korrekturfaktor zur Berechnung des Wasserbedarfs landschaftlicher Flächen muss daher angepasst an die speziellen Anforderungen der landschaftlichen Bepflanzung entwickelt werden [228]. Richtwert: je m^2 Nutzgarten oder Grünanlage entsteht ein jährlicher spezifischer Wasserbedarf von $60 l/m^2$ [108].

⑥ Komponenten

- **Zuleiten – Reinigen – Speichern:**
vgl. [Steckbrief Retention auf Flächen der Blauen Infrastruktur](#)
- Ersatzquelle zur Wasserversorgung
- **Aufbereiten:** vgl. ⑦
- **Verteilen:**
 - **Druckerhöhung:** in Abhängigkeit von erforderlichem Druck und Durchflussrate; i.d.R. Kreiselpumpe [210]
 - **Betriebswasserleitungen:** Haupt- und Nebenleitungen; Frostschutz
 - **Regeleinheit:** Druckregelgerät, Druckregelventil (Magnetventil, Kugelventil), Filter, Bewässerungssteuergerät [209]
 - **Emitter:** Tropfer, Tropfrohre, Bubblerrohre, Mikrospüher, Mikroregner, etc. [209], [208]
 - **Entleerungseinrichtungen** [211]
- **Wasser einsparen:** ggf. Bodenfeuchtesensor und Regensensor [209]

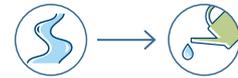
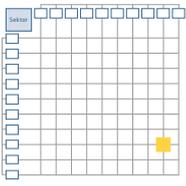
⑩ Bewässerungsverfahren [218]

Beregnung	Mikrobewässerung
– Reihenregner	– oberirdisch
– mobile Beregnungsmaschinen	– unterirdisch
– teilmobile Beregnungsmaschinen	

⑦ Technische Voraussetzungen

Bestimmung des Wasserbedarfs in Abhängigkeit von [212]

- Pflanzenarten,
- Dichte der Bepflanzung,
- lokalem Mikroklima und
- Anforderungen an Funktionalität und Erscheinungsbild der Bepflanzung
- Dimensionierung der Speicherbehälter in Abhängigkeit des Wasserbedarfs (vgl. ⑤).



Anforderungen an die Wasserqualität:

Bewässerungswasser muss den technischen, hygienischen (chemisch und mikrobiologisch) und pflanzenphysiologischen Anforderungen des Einsatzbereichs genügen [208]. Auf (Schul-)Sportplätzen und öffentlichen Parkanlagen beispielsweise müssen Grenzwerte für die Fäkalstreptokokken- und E-Coli-Koloniezahl eingehalten werden; Salmonellen und potentiell infektiöse Stadien von Mensch- und Haustierparasiten müssen in nicht nachweisbaren Konzentrationen vorliegen [108].

Dachflächen sind für die Nutzung von Regenwasser bevorzugt geeignet. Eine Aufbereitung durch Filtration und Sedimentation im Regenwasserspeicher reicht hier aus. Bei erhöhtem Wasserbedarf können auch partiell stärker verschmutzte Auffangflächen (z. B. Verkehrsflächen) genutzt werden. Dann wird eine weitergehende Aufbereitung (z. B. Flockung) erforderlich [108].

⑩ **Verbesserung der Wasserqualität [207]:** Die Zwischenspeicherung in einem Teich kann die Wasserqualität ohne schädigenden Einfluss auf den Bodenkörper verbessern. Sie dient dem Rückhalt von Schwebstoffen sowie dem Abbau organischer Substanzen, Ammonium, Nitrat, Nitrit und Phosphat. Unter aeroben Verhältnissen ist auch die Reduzierung von Eisen und Mangan möglich.

⑧ Voraussetzungen für Nachhaltigkeit

Verteilgenauigkeit: Für eine wassersparende Bewässerung sollte das eingesetzte Bewässerungssystem das Bewässerungswasser möglichst gleichmäßig über die zu bewässernde Fläche verteilen. Diese Verteilgenauigkeit kann anhand eines Gleichmäßigkeitskoeffizienten bestimmt werden. Würde eine Fläche völlig gleichmäßig mit Wasser versorgt, würde ein Gleichmäßigkeitskoeffizient von 100 % erreicht werden. In der Praxis sind für Mikrobewässerungssysteme Gleichmäßigkeitskoeffizienten von 80 % (bei durchschnittlicher Instandhaltung) bis 95 % (bei hervorragender Instandhaltung) möglich [213].

Wartung und Instandhaltung [211] sind notwendig, um Betriebs- und Funktionssicherheit zu erhöhen, die Nutzungsdauer zu verlängern und Bauschäden sowie unplanmäßige Reparaturen zu verhindern [108]. Die Instandhaltungsmaßnahmen umfassen u. a.

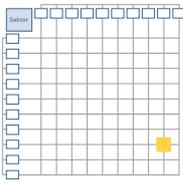
- das Betätigen der Absperrhähne,
- das Reinigen der Filter,
- das Einstellen der Düsen,
- die Überwachung des Wasserverbrauches,
- und das Freischneiden der Regner [208].

Dafür sind ein hohes technisches **Fachwissen** und die **Akzeptanz** der kommunalen Mitarbeiter erforderlich [211].

⑨ Wirksamkeit

Vitalität und Erscheinungsbild:

Anders als in der Landwirtschaft, in der der Wasserbedarf meist einzig anhand des gewünschten Ertrags bestimmt wird, können unterschiedliche Erwartungen bezüglich Ästhetik und Erholungswert an die landschaftliche Vegetation gestellt werden. Die Wirksamkeit



hängt also davon ab, inwiefern die Bewässerung diesen Erwartungen entspricht. Besonders in der ersten Zeit nach einer Pflanzung, in der sich die Wurzeln erst entwickeln müssen, in Dürreperioden oder bei oberirdischen Pflanzgefäßen ist die Bewässerung der Vegetation jedoch dringend für die Vitalität der Pflanzen erforderlich [214].

Verdunstungsleistung:

Die Verdunstungsleistung einer Pflanze wird in hohem Maße durch die Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Diese muss ggf. durch die Bewässerung gewährleistet werden [177].

⑩ Einsparpotentiale

Substituiert die Bewässerung mit Regenwasser die Bewässerung mit Trinkwasser, wird eine entsprechende **Trinkwassereinsparung** erreicht.

Ist eine entsprechende Entwässerungssatzung vorhanden, können durch die Substitution von Trinkwasser durch Regenwasser **Einsparungen bei der Entwässerungsgebühr** erreicht werden [215].

Darüber hinaus ist Regenwasser weicher und daher besser als Trinkwasser für die Bewässerung geeignet [216]. **Kalkablagerungen** in der Bewässerungsanlage und auf den Pflanzenoberflächen machen **zusätzliche Wartungsintervalle** erforderlich. Keine Beeinträchtigungen sind erst bei einer Gesamthärte < 8 °dH zu erwarten [208]. Auch darf eine Eisen- bzw. Mangankonzentration von 0,2 bzw. 0,02 mg/l nicht überschritten werden.

⑪ Kosten

Die Kosten eines Bewässerungssystems variieren in Abhängigkeit der Bewässerungsart, dem Wasserbedarf, Ausdehnung und Verteilung des zu bewässernden Gebiets.

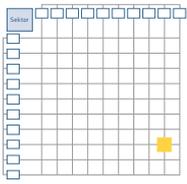
Mikrobewässerungssysteme weisen im Vergleich zu Beregnern hohe Kapital- und Verfahrenskosten auf. Im Betrieb sind sie dagegen wasser- und energiesparender [217], da sie direkt an der Pflanze bewässern und auch der erforderliche Durchfluss und Druck (< 2,5 bar) der Anlagen deutlich geringer ist [218].

⑫ Förderungsmöglichkeiten

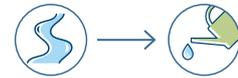
Verschiedene Städtebauförderungsprogramm, z. B. „Wachstum und Nachhaltige Erneuerung“, mit „der Fördervoraussetzung Klimawandel/Klimaanpassung einschließlich Stadtgrün“ ab 2020 [90]

⑬ Beispiele

- Potsdamer Platz, Berlin (Projektbeschreibung in „Wasserlandschaften“ [102])
- Eagle Valley und Prestwick Golf Club, Woodbury (USA) (Projektbeschreibung auf der Website des Minnesota Stormwater Manuals [219])
- Carver County Club (USA) (Projektbeschreibung auf der Website des Minnesota Stormwater Manuals [219])



BEWÄSSERUNG AUS GEWÄSSERN DER BLAUEN INFRASTRUKTUR



14 Weitere Kopplungsoptionen



15 Weitere Hinweise

Weitergehende Effekte:

- Luftreinhaltung
- Lärmreduktion
- Steigerung der Biodiversität
- Steigerung der Ästhetik des öffentlichen Raums

Glossar

Betriebsweise von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

KWK-Anlagen erzeugen Strom und Wärme und können entweder strommarkt- oder wärmemarktorientiert betrieben werden.

Bei einer **strommarktorientierten** Betriebsweise richtet sich die Leistungsabgabe der KWK-Anlage nach dem Strombedarf oder dem durch die Anlage maximal erzeugbaren Strom. Als Nebenprodukt fällt hierbei Wärme an, die im idealen Fall ebenfalls verbraucht oder gespeichert wird.

Orientiert sich die Betriebsweise am **Wärmemarkt**, wird so viel Wärme erzeugt, wie verbraucht wird. In diesem Fall ist Strom das Nebenprodukt, welches in das Stromnetz eingespeist wird.

Bodenalbedo

Reflexionsvermögen des Bodens in Abhängigkeit der Flächenbeschaffenheit und der eintreffenden Strahlung.

Contracting

Kooperation in Form eines Vertrages, bei dem durch den Contractingnehmer zum Beispiel eine Leistung (Wärme, Energie, etc.) bereitgestellt wird. Der Contractinggeber vergütet die Leistung wie im Vertrag vereinbart. Je nach Vertragsform kann der Contractingnehmer unter Umständen Besitzer der notwendigen Anlagentechnik sowie für deren Betrieb verantwortlich sein. Eine Übernahme der Anlagentechnik durch den Contractinggeber ist nach Ablauf der Vertragslaufzeit möglich.

Evapotranspiration

Summe der Verdunstung von Boden- und Wasserflächen (Evaporation) sowie Pflanzen (Transpiration).

Free-floating

Free-Floating ist ein Sharing-Modell, bei dem die Nutzenden das Fahrzeug innerhalb eines Geschäftsbereiches an beliebiger Stelle abstellen können. Im Gegensatz zum stationsbasierten Modell gibt es keine festen Parkplätze oder Stationen, an denen das Fahrzeug wieder abgestellt werden muss.

Jährlichkeit

Siehe Wiederkehrhäufigkeit

Netzdienlich

Unter dem Begriff netzdienlich bzw. netzdienlichem Verhalten versteht man, dass elektrisch betriebene Geräte einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten. Durch zeitliche Verschiebung ihres Strombezugs können sie sich der Ist-Situation im Stromnetz anpassen. In Zeiten, in denen viel Strom erzeugt wird, verbrauchen sie Strom. Im Gegensatz dazu reduzieren sie ihren Stromverbrauch in Zeiten, in denen weniger Strom produziert wird.

Netzmanagement

Unter Netzmanagement versteht man die Verwaltung, Betriebstechnik und Überwachung von Netzen.

Regelleistung, in Anlehnung an [220]

Mit Hilfe von Regelleistung, auch Regelenergie genannt, werden Schwankungen der Stromnetzfrequenz ausgeglichen. Im Falle einer zu niedrigen Netzfrequenz wird im Rahmen der **positiven Regelenergie** Strom in das Stromnetz eingespeist oder aber der Stromverbrauch netzdienlicher Geräte reduziert. Eine **negative Regelleistung** erfolgt im Falle einer zu hohen Netzfrequenz und besteht darin, die Stromeinspeisung zu reduzieren bzw. zusätzliche elektrische Verbraucher zu nutzen, die Strom aus dem Netz entnehmen.

Die Regelleistung muss als Reserve zur Verfügung stehen und innerhalb einer bestimmten Zeit durch den Netzbetreiber abgerufen werden können. Die Regelleistung kann innerhalb von Sekunden (Primärreserve), von fünf Minuten (Sekundärreserve) oder Viertelstunden (Minutenreserve) bereitgestellt werden. Die Übertragungsnetzbetreiber sind für die Vorhaltung von Regelenergie verantwortlich und schreiben die benötigte Regelleistung am Regelenergiemarkt aus.

Über die Teilnahme am **Regelenergiemarkt** und das Bereitstellen von Regelleistung können Gewinne generiert werden. Es wird einerseits das Vorhalten (Leistungspreis) und andererseits das Abrufen (Arbeitspreis) der Regelleistung vergütet. Verbraucher mit einer geringeren elektrischen Leistung können durch einen Regelleistungspoolbetreiber zusammengefasst werden. Dadurch kann am Regelenergiemarkt durch den **Regelleistungspoolbetreiber** eine größere Regelleistung ausgeschrieben werden.

Regionalisierung

Als Regionalisierung kann der Prozess bezeichnet werden, bei dem Akteure miteinander kooperieren und Netzwerke bilden, die regionale Strukturen verstärken oder neu schaffen.

Resuspension

Erneute Suspension sedimentierter unlöslicher Partikel.

Starkregen

Bei Starkregen handelt es sich um selten auftretenden Niederschlag, der zu schnell ansteigendem und abfließendem Hochwasser oder Überschwemmungen führen kann [221]. Die charakteristischen Niederschlagsmengen hängen von der jeweiligen Klimazone ab [222]. Zur Definition können Schwellenwerte, die auf festen Größen, Perzentilwerten oder auf deskriptiver Statistik basieren, herangezogen werden [223].

Strommix

Der Strommix beschreibt die prozentualen Anteile einzelner Energieträger an der elektrischen Energieerzeugung und bezieht sich auf die Nettostromerzeugung (Stromerzeugung exklusive des Eigenverbrauchs der Kraftwerke).

Wiederkehrhäufigkeit

Anzahl der Ereignisse, die im langjährigen statistischen Mittel innerhalb eines Jahres einen Wert erreichen oder überschreiten (Einheit 1/a) [79].

Literatur

- [1] Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019].
- [2] Sterner, M.; Stadler, I. (Hrsg.): Energie-speicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [3] Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].
- [4] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energien in Zahlen, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#strom> [Zugriff am: 02.10.2019].
- [5] Fritsche, Uwe; Rausch, Lothar: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, 2008, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bestimmung-spezifischer-treibhausgas> [Zugriff am 04.05.2020].
- [6] Blockheizkraftwerks- Träger und Betreibergesellschaft mbH Berlin: Fernwärmebezogene Kennzahlen BTB, 2018, https://www.btb-berlin.de/fileadmin/user_upload/files/sonstiges/Energiekennzahlen_Fernwaerme_BTb.pdf [Zugriff am: 15.12.2019].
- [7] Purr, Katja; Osiek, Dirk; Lange, Martin et al.: Position. Integration von Power to Gas und Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas_power_to_liquid_web.pdf [Zugriff am: 13.01.2020].
- [8] Wietschel, Martin et al.: Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-erneuerbarer-energien-durch-0> [Zugriff am: 02.05.2019].
- [9] Agora Energiewende: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten, 2014, <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/power-to-heat-zur-integration-von-ansonsten-abgeregeltem-strom-aus-erneuerbaren-energien-1/> [Zugriff am: 08.05.2019].
- [10] Agentur für Erneuerbare Energien: Glossar. Must-run-Kapazität, <https://unendlich-viel-energie.de/glossar?letter=M> [Zugriff am: 16.12.2019].
- [11] nymoen; ifeu: Stromheizungen als EE-Heizung und Flexibilitätsoption? – Analysepapier zur Beurteilung von Power to Heat im privaten Heizungsmarkt. im Auftrag der Gas-Union GmbH und des Zukunft Erdgas e.V., Berlin Ausgabe Februar 2014.
- [12] Böttger, D.; Götz, M.; Theofilidi, M. et al.: Control power provision with power-to-heat plants in systems with high shares of renewable energy sources – An illustrative analysis for Germany based on the use of electric boilers in district heating grids. In: Energy 82 (2015), S. 157-167.
- [13] Bruckner, Thomas; Kondziella, Hendrik: Sektorkopplung – die nächste Stufe der Energiewende, 2019, <https://www.fes.de/abteilung-wirtschafts-und-sozialpolitik/artikelseite-wiso/sektorkopplung-die-naechste-stufe-der-energiewende/> [Zugriff am: 08.05.2019].
- [14] Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: Faktenblatt Power-2-Heat, <https://www.ffegmbh.de/kompetenzen/system-markt-analysen/539> [Zugriff am: 01.05.2019].
- [15] Kraft, Armin; Maximini, Marius: Sektorkopplung - Strom und Wärme im Energiemarkt der Zukunft, 2016, https://enerko.de/wp-content/uploads/2016/12/161130-Sektorkopplung_und_Speicher_Kraft_final.pdf [Zugriff am 10.03.2020].
- [16] Schmitz, Jascha: 5 Kosten der Wärmepumpe, die man kennen muss, <https://ihre-waermepumpe.de/kosten-forderung-recht/waermepumpe-kosten-preise.html> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [17] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0), https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html [Zugriff am: 17.12.2019].
- [18] Gross, Bernd: Erste Power-to-Heat-Anlage in Hamburg ermöglicht Sektorkopplung, 2018, <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog-news-presse/blog/2018/november/erste-power-to-heat-anlage-in-hamburg-ermoglicht-sektorkopplung> [Zugriff am: 08.05.2019].

- [19] Rentzing, S.: Power-to-Heat: So heizt Münster künftig mit überschüssigem Windstrom, 2016, <https://www.wiwo.de/technologie/green/power-to-heat-so-heizt-muenster-kuenftig-mit-ueberschuessigem-windstrom/13553866.html> [Zugriff am: 08.05.2019].
- [20] WindNODE-Projektmanagement: Power-to-Heat/Power-to-Cold bei GASAG Solution Plus, 2019, <https://www.windnode.de/ergebnisse/windnode-konkret/gasag-solution-plus/> [Zugriff am: 25.06.2019].
- [21] Urbaneck, T.: Kältespeicher – Grundlagen, Technik, Anwendung. Oldenburg Verlag, Munich, Germany, 2012.
- [22] Meyer, Franz: Projektinfo 10/05. Kältespeicher in großen Kältenetzen, 2005, <http://www.bine.info/publikationen/publikation/kaeltespeicher-in-grossen-kaeltenetzen/speichervarianten-und-kosten/> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [23] Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Platzer, B. et al.: Kältespeicher – Überblick zum Stand der Technik. In: : 12. Symposium Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, S. 160-167.
- [24] BINE Informationsdienst: Projektinfo: Kältespeicher in großen Kältenetzen - Speichervarianten und Kosten, <http://www.bine.info/publikationen/publikation/kaeltespeicher-in-grossen-kaeltenetzen/speichervarianten-und-kosten/> [Zugriff am: 13.05.2019].
- [25] Greenhouse Media GmbH: Funktion und Kosten von Eisspeichern im Überblick, 2019, <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/arten/eisspeicher.html#c13490> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [26] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Kälte- und Klimaanlage, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Klima_Kaeltetechnik/klima_kaeltetechnik_node.html [Zugriff am: 17.12.2019].
- [27] Roche Diagnostics GmbH: Roche setzt auf Nachhaltigkeit: Größter Kaltwasserspeicher Deutschlands, 2018, <https://www.roche.de/medien/meldungen/Roche-setzt-auf-Nachhaltigkeit-Groesster-Kaltwasserspeicher-Deutschlands-4785.html> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [28] Ihle, C.: Klimatechnik mit Kältetechnik, Der HeizungsingenieurBand 4, Werner Verlag, Düsseldorf, 2006.
- [29] Agora Energiewende: Wie werden Wärmenetze grün? Dokumentation zur Diskussionsveranstaltung am 21. Mai 2019 auf den Berliner Energietagen 2019, 2019, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Waermenetze/155_Waermenetze_WEB.pdf [Zugriff am: 23.05.2019].
- [30] Umweltbundesamt Dessau-Roßlau: Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), 2018, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraft-waerme-kopplung-kwk#textpart-1> [Zugriff am: 29.04.2019].
- [31] Schmitz, K.W.: Kraft-Wärme-Kopplung. Springer, Berlin [u.a.], 2005.
- [32] Gesellschaft Energietechnik: Rationelle Energienutzung in der Industrie - ein Beitrag zum Klimaschutz. Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Heft 1767, VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.
- [33] Stadtwerke Kiel AG: Die Zukunft der Kieler Energieversorgung, https://www.stadtwerke-kiel.de/swk/de/unternehmen/kuestenkraftwerk_1/kuestenkraftwerk.jsp [Zugriff am: 25.11.2019].
- [34] BHKW-Consult: BHKW-Kenndaten, <http://www.bhkw2016.de/bhkw2016-bhkw-kenn-daten/> [Zugriff am: 25.11.2019].
- [35] Greenhouse Media GmbH: Alle Kosten von Blockheizkraftwerken im Überblick, 2017, <https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten.html> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [36] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Stromvergütung, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Stromverguetung/stromverguetung_node.html [Zugriff am: 29.04.2019].
- [37] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Wärme- und Kältenetze, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Waerme_Kaeltenetze/waerme_kaeltenetze_node.html [Zugriff am: 29.04.2019].
- [38] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Wärme- und Kältespeicher, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Waerme_Kaeltespeicher/waerme_kaeltespeicher_node.html [Zugriff am: 29.04.2019].
- [39] Neidlein, Hans-Christoph: Stolpersteine in Serie [online]. In: VDI Nachrichten 2019, 2019, 2019, <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik/Stolpersteine-in-Serie> [Zugriff am: 29.07.2019].

- [40] Berberich, M.; Deschaintre, L.; Mangold, D. et al.: SOLAR-KWK - Entwicklung multifunktionaler Systeme zur solar unterstützten Kraft-Wärme-Kopplung - solare Fernwärme und saisonale Wärmespeicher für die Energiewende – Forschungsbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0325542A; Laufzeit April 2013 bis Juni 2015. Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, 2015, http://www.solites.de/Portals/0/Lehrauftrag/Solar-KWK_Forschungsbericht_BMWi_FKZ%200325542A.pdf [Zugriff am: 03.07.2019].
- [41] Bundesrepublik Deutschland: Gesetz zur Bevoorzugung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge – Elektromobilitätsgesetz – EmoG. Bundesrepublik Deutschland, 2015.
- [42] Proff, H.; Pascha, W.; Schönharting, J. et al.: Schritte in die künftige Mobilität – Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte [4. Wissenschaftsforum Mobilität am 21. Juni 2012]. Wissenschaftsforum Mobilität. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [43] Blasius, E.: 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, https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/3859/blasius_erik.pdf [Zugriff am 25.11.2019].
- [44] Agora Verkehrswende: Publikation - Klimabilanz von Elektroautos, 2019, <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimabilanz-von-elektroautos/> [Zugriff am: 06.06.2019].
- [45] Komarnicki, P.; Haubrock, J.; Styczynski, Z.A.: Elektromobilität und Sektorenkopplung – Infrastruktur- und Systemkomponenten, Springer-Link Bücher, Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [46] Hakenes, Jens: Smart Meter: Verbrauch digital im Blick, 2018, <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/smart-home/smart-meter-uebersicht/#c117785> [Zugriff am: 14.12.2019].
- [47] Crastan, V.: Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft und Liberalisierung, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung, Elektrische Energieversorgung/ Valentin Crastan ; 2, Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [48] Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.: E-Mobilität trifft Quartier-Strom im Wohnpark Mariendorf, 2019, <https://www.ikem.de/e-mobilitaet-trifft-quartier-strom-im-wohnpark-mariendorf/> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [49] Bundesnetzagentur: Ladesäulenkarte, 2017, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaeulenkarte/Ladesaeulenkarte_node.html [Zugriff am: 17.12.2019].
- [50] dos Santos, Dorothee: Spielt Wasserstoff bereits eine Rolle in der Energieversorgung?, 2019, <https://www.euwid-energie.de/spielt-wasserstoff-bereits-eine-rolle-in-der-energieversorgung/> [Zugriff am: 14.12.2019].
- [51] Schenuit, Carolin; Heuke, Reemt; Paschke, Jan: Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen., 2016, https://www.powertogas.info/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf [Zugriff am: 12.11.2019].
- [52] Hentschel, J.: Potenziale nachhaltiger Power-to-Gas Kraftstoffe aus Elektrizitätsüberschüssen im Jahr 2030, Dissertation.
- [53] Deutsche Energie-Agentur GmbH: Systemlösung Power to Gas. Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife, 2015, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9096_Fachbroschuere_Systemloesung_Power_to_Gas.pdf [Zugriff am: 12.11.2019].
- [54] Zapf, M.: Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [55] Agora Energiewende; Agora Verkehrswende: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, 2018, <https://www.agora-energie-wende.de/veroeffentlichungen/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe/> [Zugriff am: 18.12.2019].
- [56] Deutsche Energie-Agentur GmbH: In Prenzlau gibt es Strom in Flaschen. Und was hat die dena damit zu tun?, 2016, <https://www.dena.de/news-room/power-to-gas/> [Zugriff am: 02.12.2019].
- [57] Petersen, Ove: Grüner Wasserstoff für die Verkehrswende in Nordfriesland, 2018, <https://www.energie-wasser-praxis.de/gruenegase/artikel/gruener-wasserstoff-fuer-die-verkehrswende-in-nordfriesland/> [Zugriff am: 04.11.2019].

- [58] Bünger, U.; Landinger, H.; Pschorr-Schoberer, E. et al.: Power-to-Gas (PtG) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven. Kurzstudie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des BMVI, 2014, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ptg.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 03.07.2019].
- [59] Deutsche Energie-Agentur GmbH: Pilotanlage Allendorf, <https://www.powertogas.info/projektkarte/pilotanlage-allendorf/> [Zugriff am: 18.12.2019].
- [60] Karlsruher Institut für Technologie: Power-to-Liquid: 200 Liter Sprit aus Solarstrom und dem Kohlenstoffdioxid der Umgebungsluft, 2017, https://www.kit.edu/kit/pi_2017_103_power-to-liquid-200-liter-sprit-aus-solarstrom-und-dem-kohlenstoffdioxid-der-umgebungsluft.php [Zugriff am: 05.12.2019].
- [61] BMWi: Energieeffizienz in Unternehmen. Das rechnet sich: Mehr aus Energie machen und Kosten senken, 2019, <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEFF/Redaktion/DE/Publikation/das-rechnet-sich-energieeffizienz-in-unternehmen.html> [Zugriff am: 29.07.2019].
- [62] VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH: Vernetzung von Wärme. Einsparpotential durch Abwärmenutzung, 2019, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/vernetzung-von-waerme/> [Zugriff am: 11.11.2019].
- [63] Pehnt, Martin et al.: Wärmenetze 4.0 - Endbericht: Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hoch-effizienten Niedertemperaturnetzen“, Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln Ausgabe April 2017.
- [64] Mittelstandsinitiative Energie und Klimaschutz: Praxisleitfaden: Abwärmenutzung in Unternehmen, 2017, <https://www.mittelstand-energie-wende.de/leitfaeden/> [Zugriff am: 13.01.2020].
- [65] Jüttemann, H.: Wärme- und Kälterückgewinnung in raumlufttechnischen Anlagen. Werner, Düsseldorf, 1999.
- [66] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie: Wärmeverbund Ingolstadt - Bayerns größtes Projekt zur Ausserbetrieblichen Nutzung von Abwärme, 2011, https://www.energie-atlas.bayern.de/thema_abwaerme/ausserbetrieblich/praxisbeispiele/details.96.html [Zugriff am: 28.11.2019].
- [67] Dötsch, C.; Taschenberger, J.; Schönberg, I.: Leitfaden Nahwärme. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998.
- [68] Pichlmeier, Franziska: VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 22: Ressourceneffizienzpotenziale von Gewerbegebieten, Berlin Ausgabe Juni 2018.
- [69] Deutsche Energie-Agentur GmbH: Abwärme nutzen - praxiserprobt und wirtschaftlich, 2017, <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/flyer-abwaerme-nutzen-praxiserprobt-und-wirtschaftlich/> [Zugriff am: 12.11.2019].
- [70] EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH: Abwärme von H&M Rechenzentrum für Stockholmer Fernwärmenetz, 2017, <https://www.euwid-energie.de/abwaerme-vom-hm-rechenzentrum-fuers-stockholmer-fernwaermenetz/> [Zugriff am: 31.07.2019].
- [71] Kühn, Armin; Heuke, Reemt; Raulien, Tom: Mehr als heiße Luft: Industrielle Abwärme als Stellschraube der Energiewende, 2017, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energie-systeme/Leuchtturm_Abwaerme/2017_dena_Fachartikel_Leuchtturme_energieeffiziente_Abwaermenutzung.pdf [Zugriff am: 31.07.2019].
- [72] Billerbeck; Jens D.: Abwärme aus Rechenzentren sinnvoll nutzen [online]. In: VDI Nachrichten, 2019, <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik/Abwaerme-Rechenzentren-sinnvoll-nutzen> [Zugriff am: 25.06.2019].
- [73] Henning, H.-M.: Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. Fachinformationszentrum Karlsruhe; BINE Informationsdienst, BINE-Fachbuch, Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2015.
- [74] Schindler, Walter: Wärme ist Antrieb für Kälte. Sorptionskälte und KWKK, https://www.kka-online.info/artikel/kka_Waerme_ist_Antrieb_fuer_Kaelte_902833.html [Zugriff am: 19.12.2019].
- [75] Schindler, Walter: Adsorptionskältemaschinen auf dem Vormarsch, 2012, https://www.kka-online.info/artikel/kka_Adsorptionskaeltemaschinen_auf_dem_Vormarsch_1418787.html [Zugriff am: 19.12.2019].
- [76] eins energie in sachsen GmbH & Co. KG: Fernkälte - eins energie in sachsen, <https://www.eins.de/%C3%BCber-eins/infrastruktur/verteilung/fernkc3%A4lte/> [Zugriff am: 09.05.2019].

- [77] Vattenfall GmbH: 20 Jahre Fernkälte für Potsdamer Platz, 2017, <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog-news-presse/blog/2017/06/fernkalte-potsdamer-platz> [Zugriff am: 09.05.2019].
- [78] DWD: Starkregen, 2019, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html> [Zugriff am: 28.10.2019].
- [79] DWA: Arbeitsblatt – Bemessung von Regenrückhalteräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkA 117,, Hennef, 2013.
- [80] Kruse, E.: Integriertes Regenwassermanagement für den wassersensiblen Umbau von Städten – Großräumige Gestaltungsstrategien, Planungsinstrumente und Arbeitsschritte für die Qualifizierung innerstädtischer Bestandsquartiere. Zugl.: Hamburg, HafenCity Univ., Diss., 2014. Fraunhofer IRB-Verlag. Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart, 2015.
- [81] DWA: Merkblatt – Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkM 176,, Hennef, 2013.
- [82] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: DWA-Regelwerk. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. DWA, Hennef, 2005.
- [83] Benden, J.; Broesi, R.; Illgen, M. et al.: Multifunktionale Retentionsflächen – Teil 3. Arbeitshilfe für Planung, Umsetzung und Betrieb Ausgabe 2017.
- [84] Benden, J.; Broesi, R.; Illgen, M. et al.: Multifunktionale Retentionsflächen – Teil 2. Fallstudien Ausgabe 2017.
- [85] Water by Design: Bioretention Technical Design Guidelines. Water by Design. Healthy Waterways Ltd., Brisbane, 2014.
- [86] Riechel, M.; Remy, C.; Matzinger, A. et al.: Maßnahmensteckbriefe der Regenwasserbewirtschaftung – Ergebnisse des Projektes KURAS, Berlin Ausgabe 2017.
- [87] Blanc, J.; Arthur, S.; Wright, G.: Natural flood management (NFM) knowledge system – Part 1: Sustainable urban drainage systems (SUDS) and flood management in urban areas. Final report, Aberdeen Ausgabe 2012.
- [88] OIEau: Retention ponds Ausgabe 2015.
- [89] OIEau: Swales, 2015, http://nwrn.eu/sites/default/files/nwrn_ressources/u4_-_swales.pdf [Zugriff am: 28.10.2019].
- [90] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Neue Städtebauförderung – Einfacher, flexibler, grüner. Knapp 1 Mrd. Euro Bundesmittel für Städtebauförderung und Soziale Integration im Quartier in 2020. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019.
- [91] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – IKK - Investitionskredit Kommunen, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [92] Ramboll Group: Toppilansaari Park, <https://ramboll.com/projects/germany/toppilansaari-park> [Zugriff am: 16.01.2020].
- [93] Bläser, K.; Fox-Kämper, R.; Rawak, M. et al.: Urbanes Grün in der integrierten Stadtentwicklung – Strategien, Projekte, Instrumente. Forschungsbericht, Düsseldorf Ausgabe 2012.
- [94] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Weißbuch Stadtgrün – Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft, Berlin Ausgabe 2017.
- [95] Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), zuletzt geändert durch den Artikel 6 des Gesetzes vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 587).
- [96] Benden, J.; Broesi, R.; Illgen, M.: Multifunktionale Retentionsflächen – Teil 1. Wissenschaftliche Grundlagen Ausgabe 2017.
- [97] Stiftung Die Grüne Stadt: Nachhaltige Infrastruktur – Schwerpunkt: Wasser in der Stadt, Berlin Ausgabe 2013.
- [98] DWA: Arbeitsblatt – Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkA 166,, Hennef, 2013.
- [99] DWA: Merkblatt – Dichtungssysteme im Wasserbau. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkM 512-1,, Hennef, 2012.
- [100] Minnesota Stormwater Manual: Stormwater wet pond fact sheet. Minnesota Pollution Control Agency, 2018, https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Stormwater_wet_pond_fact_sheet [Zugriff am: 14.01.2020].

- [101] Jarvie, J.; Arthur, S.; Beevers, L.: Valuing Multiple Benefits, and the Public Perception of SUDS Ponds. In: Water 9 (2017), Heft 2, S. 128.
- [102] Leppert, S.: Wasserlandschaften – Planen, Bauen und Gestalten mit Wasser. Birkhäuser, Basel, 2005.
- [103] Mahabadi, M. (Hrsg.): Richtlinien für Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Freibädern mit biologischer Wasseraufbereitung (Schwimm- und Badeteiche) – Aus der Arbeit des RWA „Öffentliche Schwimm- und Badeteichanlagen“, unter Mitwirkung des AK „Schwimm- und Badeteiche“. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau; Deutsche Gesellschaft für das Badewesen. FLL, Bonn, 2011.
- [104] Umweltbundesamt: Wassernutzung privater Haushalte, 2016, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wassernutzung-privater-haushalte#text-part-1> [Zugriff am: 02.01.2020].
- [105] DWA: Merkblatt – Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Regelwerk M 277, DWA, Hennef, 2017.
- [106] FBR: Grauwasser-Recycling – Wasser zweimal nutzen, Darmstadt Ausgabe 2009.
- [107] FBR: Betriebs- und Regenwassernutzung – Bestandsaufnahme und Zukunftsvision. Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V., Darmstadt Ausgabe 2005.
- [108] DIN 1989-1:2002-04; Regenwassernutzungsanlagen - Teil 1: Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung (1989-1).
- [109] Winker, M.; Brüning, H.; Meyer, C. et al.: Die Akzeptanz ist da – Repräsentative Studie zur Grauwassernutzung in Norderstedt. In: fbr - Wasserspiegel 24 (2019), Heft 2, S. 12-17.
- [110] Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V.: Grauwasser-Recycling – Planungsgrundlagen und Betriebshinweise, Darmstadt Ausgabe 2005.
- [111] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Modul 3 – Dezentrale Einheiten zur Wärmerückgewinnung in Gebäuden. Merkblatt für Anträge nach der Richtlinie zur Förderung von innovativen marktreifen Klimaschutzprodukten im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Kleinserien-Richtlinie) vom 02. Februar 2018 Ausgabe 2018.
- [112] iWater: Grauwassernutzung im Studentenwohnheim. In: Sanitär.Heizung.Klima (SBZ) (2011), Heft 21.
- [113] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch - TrinkwV, 2016.
- [114] Kerschberger, A.: Energieeffizientes Bauen im Bestand – Konzepte, Methoden, Umsetzungen Mit Beiträgen von Markus Binder, Martin Brilinger, Gerhard Boeddinghaus, Friedrich Sick und Bodo Weidlich. VDE Verlag, s.l., 2012.
- [115] König, K.W.: Beschattung und Kühlung von halb-öffentlichen und öffentlichen Gebäuden mit Verwendung von Regenwasser, 2019, <https://www.hlh.de/2016/Ausgabe-12/Klimatechnik/Beschattung-und-Kuehlung-von-halboeffentlichen-und-oeffentlichen-Gebaeuden-mit-Verwendung-von-Regenwasser?page=2> [Zugriff am: 18.05.2019].
- [116] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Kommunikation: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung – Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung, Berlin Bauen, Berlin, 2010.
- [117] Lackmann, T.: Adiabate Verdunstungskühlung in der Lüftungstechnik, Bonn Ausgabe 2019.
- [118] Kabus, M.: Adiabate Kühlung – Kühlen ohne Strom, Wuppertal Ausgabe 2009.
- [119] VDI: Adiabate Abluftkühlung, 2020, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/ressourcenschonendes-gebaeude/adiabate-abluftkuehlung/> [Zugriff am: 07.01.2020].
- [120] König, K.W.: Starkregen in Deutschland. In: Moderne Gebäudetechnik (2017), Sonderausgabe, S. 30-32.
- [121] Freiherr, M.; Summerer, F.: Adiabate Abluftkühlung im Vergleich zu befeuchteten Wärmetauschern. In: Fach.Journal (2015).
- [122] BAFA: Richtlinie zur Förderung von energieeffizienten Kälte- und Klimaanlageanlagen mit nicht-halogenierten Kältemitteln in stationären und Fahrzeug- Anwendungen. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle Ausgabe 2019.
- [123] INTEWA: Adiabate Kühlung im Technologie- und Gründerzentrum (TGZ) Würzburg, 2014, <https://www.intewa.de/produkte/aqualoop/referenzen/projekte/technologie-und-gruenderzentrums-tgz-wuerzburg/> [Zugriff am: 18.05.2019].

- [124] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Institut für Physik in Berlin-Adlershof – Stadt-ökologisches Modellvorhaben, Berlin.
- [125] König, K.W.: Naturnahe Prozesse sparen 90 % Energie – Beschattung und Kühlung von (halb-) öffentlichen Gebäuden mit Verwendung von Regenwasser. In: fbr - Wasserspiegel 3 (2017), S. 10-13.
- [126] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten und -szenarien – Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin Ausgabe Oktober 2019.
- [127] Wanner, O.: Wärmerückgewinnung aus Abwasser – Untersuchung zu den Möglichkeiten und Grenzen der Abwasserenergienutzung, insbesondere der Wärmetauschverschmutzung, ihrer Auswirkung und möglichen Gegenmassnahmen in der Praxis, Schriftenreihe der Eawag Heft 19, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG, Dübendorf, 2009.
- [128] DWA: Merkblatt – Abwasserwärmenutzung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkM 114,, Hennef, 2018.
- [129] DWA: Merkblatt – Energie aus Abwasser. Wärme- und Lageenergie. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkM 114, DWA, Hennef, 2013.
- [130] Hamann, A.: Grundlagen der Abwasserwärmenutzung – Leitfaden für Architekten, Ingenieure und Stadtplaner. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2015.
- [131] Christ, O.; Mitsdoerffer, R.: Abwasserwärmenutzung: ein Mosaikstein zur Energiewende am Beispiel einer Anlage in Straubing. In: Wasser und Abfall (2012), Heft 5, S. 16-19.
- [132] EnergieSchweiz: Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherren, Gemeinden und Betreiber. Bundesamt für Energie BFE, Bern Ausgabe 2016.
- [133] Bundestag: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz) – EEWärmeG. Bundestag, 2008.
- [134] Bundesrat: Gewässerschutzverordnung – GSchV. Bundesrat, 1998.
- [135] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: DGUV Vorschrift 21 – Abwassertechnische Anlagen Ausgabe 1997.
- [136] Bohne, D.: Technischer Ausbau von Gebäuden – Und nachhaltige Gebäudetechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.
- [137] Umweltbundesamt: Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld „Wohnen“, 2018, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxid-emissionen-im-bedarfsfeld-wohnen> [Zugriff am: 03.01.2020].
- [138] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Merkblatt zu den CO₂-Faktoren – Energieeffizienz in der Wirtschaft. Zuschuss und Kredit Ausgabe 2019.
- [139] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft. Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [140] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – Erneuerbare Energien „Premium“, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [141] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – Energetische Stadtsanierung -Zuschuss. Kommunale und soziale Infrastruktur, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [142] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – IKK -Energetische Stadtsanierung -Quartiersversorgung. Kommunale und soziale Infrastruktur, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [143] Forschungszentrum Jülich GmbH: Neckarpark Stuttgart gewinnt Nahwärme und -kälte aus dem Abwasserkanal – Abwärme versorgt Stadtquartier, 2017, <https://projektinfos.energiewendebauen.de/projekt/neckarpark-stuttgart-gewinnt-nahwaerme-und-kaelte-aus-dem-abwasserkanal/> [Zugriff am: 16.01.2020].
- [144] Brusckke-Reimer, A.: Energie aus schmutzigem Wasser, 2017, <https://www.ikz.de/nc/detail/news/detail/energie-aus-schmutzigem-wasser/> [Zugriff am: 16.01.2020].
- [145] ABuri, R.; Kobel, B.: Wärmenutzung aus Abwasser – Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen, Bern Ausgabe 2004.
- [146] Roskosch, A.; Heidecke, P.: Klärschlamm-entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Dessau-Roßlau Ausgabe 2018.

- [147] eurostat: Sewage sludge disposal from urban wastewater treatment, by type of treatment, 2015 (% of total mass), 2015, [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) [Zugriff am: 29.01.2020].
- [148] Wiesgickl, S.; Plank, H.: Aller guten Dinge sind drei – Verschiedene Standort- und Kapazitätsvarianten zur Klärschlammmonverbrennung. In: Wasser und Abfall (2019), Heft 11, S. 14-22.
- [149] Langen, J.; Wyss, F.; Reinmöller, F. et al.: Sewage Sludge – Fluidized Bed Incineration as a Reliable and Proven Treatment Process. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Winter, F. et al. (Hrsg.): Waste Management – Volume 8. Waste-to-Energy, 2018.
- [150] Vatachi, N.: Wastewater sludge to energy production – A review. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 595 (2019), S. 1-11.
- [151] TransMIT GmbH: Machbarkeitsstudie – Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen. Endbericht. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Gießen Ausgabe 2018.
- [152] Strauss, K. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [153] Schneller, A.; Frank, L.; Töpfer, K.: Wärmenetze 4.0 im Kontext der Wärmewende – Analyse der Regelungs- und Förderlandschaft innovativer Wärmenetzsysteme, Berlin Ausgabe 2017.
- [154] Krieger, W.: Tonnenkilometer (tkm), 2018, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/tonnenkilometer-tkm-50606/version-273824> [Zugriff am: 31.01.2020].
- [155] Tsybina, A.; Wuensch, C.: Analysis of sewage sludge thermal treatment methods in the context of circular economy. In: Detritus 2 (2018), Heft 1, S. 3-15.
- [156] 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). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.
- [157] Pfertner, Maximilian: Evaluation der Mobilstationen in Würzburg – Wahrnehmungen, Aufmerksamkeit und Effekte auf das Mobilitätsverhalten, Pkw-Besitz und CO₂ Emissionen. München, Technische Universität München, Masterarbeit, 2017.
- [158] Jansen, H.; Garde, J.; Bläser, D. et al.: Städtische Mobilstationen. In: Proff, H. (Hrsg.): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität – Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015, S. 515-532.
- [159] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Bremen „mobil.punkt“ – Car-Sharing-Stationen im öffentlichen Straßenraum, 2017, https://www.nationale-stadtentwicklungs-politik.de/NSP/SharedDocs/Projekte/WSPProjekte_DE/Bremen_mobilpunkt.html;jsessionid=2731D910BA2EB24D3ABF9DCEFA211BB9.live11293?nn=1375556#Start [Zugriff am: 29.11.2019].
- [160] Zukunftsnetz Mobilität NRW: Handbuch Mobilstationen NRW , 2017, https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/sites/default/files/handbuch_mobilstationen_2_aufgabe1.pdf [Zugriff am: 18.11.2019].
- [161] Willumsen, Eva: Economic evaluation of cycle projects - methodology and unit prices, 2009, <http://www.cycling-embassy.dk/2010/06/10/economic-evaluation-of-cycle-projects/> [Zugriff am: 17.12.2019].
- [162] Kempton, W.; Tomić, J.: Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. In: Journal of Power Sources 144 (2005), Heft 1, S. 268-279.
- [163] the mobility house AG: Vehicle-to-Grid, https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid [Zugriff am: 01.12.2019].
- [164] Della-Marta, P.M.; Haylock, M.R.; Luterbacher, J. et al.: Doubled length of western European summer heat waves since 1880. In: Journal of Geophysical Research 112 (2007), D15, D05109.
- [165] Della-Marta, P.M.; Luterbacher, J.; Weissenfluh, H. von et al.: Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. In: Climate Dynamics 29 (2007), 2-3, S. 251-275.

- [166] Santamouris, M.: Energy and Climate in the Urban Built Environment. Routledge, 2013.
- [167] WHO Regional Office for Europe: Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Technical Report, Kopenhagen Ausgabe 2013.
- [168] D'Ippoliti, D.; Michelozzi, P.; Marino, C. et al.: The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. In: Environmental health: a global access science source, Vol. 9 (2010), p. 37.
- [169] Doick, K.J.; Peace, A.; Hutchings, T.R.: The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. In: The Science of the total environment, Vol. 493 (2014), pp. 662-671.
- [170] Gunawardena, K.R.; Wells, M.J.; Kershaw, T.: Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. In: Science of The Total Environment 584-585 (2017), S. 1040-1055.
- [171] Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B. et al.: Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten, Dessau-Roßlau Ausgabe 2019.
- [172] Santamouris, M.: Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. In: Solar Energy 103 (2014), S. 682-703.
- [173] Lai, D.; Liu, W.; Gan, T. et al.: A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. In: The Science of the total environment, Vol. 661 (2019), pp. 337-353.
- [174] Honjo, T.; Takakura, T.: Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. In: Energy and Buildings 15 (1990), 3-4, S. 443-446.
- [175] Feng, Y.: Evapotranspiration from Green Infrastructure: Benefit, Measurement, and Simulation. In: Bucur, D. (Hrsg.): Advanced Evapotranspiration Methods and Applications. IntechOpen, 2019.
- [176] Hörschemeyer, B.; Henrichs, M.; Uhl, M. (Hrsg.): Setting up a SWMM-integrated model for the evapotranspiration of urban vegetation, 2019.
- [177] Coutts, A.M.; Tapper, N.J.; Beringer, J. et al.: 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 (2013), Heft 1, S. 2-28.
- [178] Doick, K.J.; Hutchings, T.: Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure, Research note (Forestry Commission) FRN012, Forestry Commission, Farnham, Surrey, 2013.
- [179] Brasseur, G.P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S.: Klimawandel in Deutschland. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [180] Matzinger, A.; Riechel, M.; Remy, C. et al.: Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung – Ergebnisse des Projektes KURAS, Berlin Ausgabe 2017.
- [181] Menke, P.; Thönessen, M.; Beckröge, W. et al.: Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen – Schwerpunkt Feinstaub, Berlin Ausgabe 2013.
- [182] Umweltbundesamt: Indikator: Energieverbrauch für Gebäude, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-gebäude#textpart-1> [Zugriff am: 28.10.2019].
- [183] Ürge-Vorsatz, D.; Cabeza, L.F.; Serrano, S. et al.: Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015), S. 85-98.
- [184] Brune, M.; Bender, S.; Groth, M.: Gebäudebegrünung und Klimawandel – Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30, Hamburg Ausgabe 2017.
- [185] Bundesverband GebäudeGrün e.V.: Grüne Innovation Dachbegrünung – Welche Vorteile habe ich durch eine Dachbegrünung?, Berlin Ausgabe 2018.
- [186] Bundesverband GebäudeGrün e.V.: Grüne Innovation Fassadenbegrünung – Welche Vorteile habe ich durch eine Fassadenbegrünung?, Berlin Ausgabe 2018.
- [187] Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V.: Pflege von Extensivbegrünungen – Technische Informationen für Planung und Ausführung. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V., FBB-Schlaglicht Heft 8., Saarbrücken, 2013.
- [188] Cascone, S.; Gagliano, A.; Poli, T. et al.: Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations. In: Building Simulation 12 (2019), Heft 3, S. 379-393.
- [189] Raji, B.; Tenpierik, M.J.; van den Dobbelaer, A.: The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 45 (2015), S. 610-623.

- [190] Besir, A.B.; Cuce, E.: Green roofs and facades: A comprehensive review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018), S. 915-939.
- [191] Castleton, H.F.; Stovin, V.; Beck, S.B.M. et al.: Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. In: Energy and Buildings 42 (2010), Heft 10, S. 1582-1591.
- [192] Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H. et al.: Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel – Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland, Dessau-Roßlau Ausgabe 2012.
- [193] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – Energieeffizient Sanieren. Kredit, Frankfurt am Main Ausgabe 2019.
- [194] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Merkblatt – Energieeffizientes Sanieren. Investitionszuschuss, Frankfurt am Main Ausgabe 2018.
- [195] Bornholdt, H.: Stadtportal Hamburg – Gründach, <https://www.hamburg.de/gruendach> [Zugriff am 30.01.2020].
- [196] Amt für Stadtplanung und Wohnen der Landeshauptstadt Stuttgart: Hof-, Dach- und Fassadenbegrünung – Richtlinie für das kommunale Grünprogramm der Landeshauptstadt Stuttgart zur Förderung der Hof-, Dach- und Fassadenbegrünung, Stuttgart Ausgabe 2014.
- [197] Structurae: Münchner Technologiezentrum MTZ – Hightech und Synergieeffekte auch auf den Dächern, <https://structurae.net/de/produkte-services/muenchner-technologiezentrum-mtz-hightech-und-synergieeffekte-auch-auf-den-daechern> [Zugriff am: 30.01.2020].
- [198] Fischer Architekten: Wohnen und Arbeiten Westerstede, 2016, <http://www.fischerarchitekten.de/projekte/wohnen-und-arbeiten-westerstede/> [Zugriff am: 30.01.2020].
- [199] Burrows, V.K.: It's not that easy being green, 2019, <https://www.worldgbc.org/news-media/bosco-verticale-not-easy-being-green> [Zugriff am: 30.01.2020].
- [200] Pfoser, N.: Vertikale Begrünung – Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Eugen-Ulmer-Verlag. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2018.
- [201] FLL: Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen, Bonn Ausgabe 2018.
- [202] FLL: Fassadenbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen, Bonn Ausgabe 2018.
- [203] Völker, S.; Baumeister, H.; Claßen, T. et al.: Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space – a health geographic perspective. In: Erdkunde 67 (2013), Heft 04, S. 355-371.
- [204] Breuste, J. (Hrsg.): Die Grüne Stadt. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [205] VDI: Adiabate Abluftkühlung, 2020, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/ressourcenschonendes-gebaeude/adiabate-abluftkuehlung/> [Zugriff am: 07.01.2020].
- [206] KommunalTechnik: Bewässerung von kommunalen Grünflächen, 2019, <https://kommunaltechnik.net/news/fuhrpark/bewaesserung-von-kommunalen-gruenflaechen/> [Zugriff am: 05.12.2019].
- [207] DIN 19650:1999-02, Bewässerung - Hygienische Belange von Bewässerungswasser (19650:1999-02).
- [208] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.: Bewässerungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Installation und Instandhaltung von Bewässerungsanlagen in Vegetationsflächen, Bonn, 2. Ausgabe 2015.
- [209] Waller, P.; Yitayew, M.: Landscape Irrigation Systems. In: Waller, P.; Yitayew, M. (Hrsg.): Irrigation and Drainage Engineering. Springer International Publishing, Cham, 2016, S. 259-269.
- [210] Waller, P.; Yitayew, M.: Pumps. In: Waller, P.; Yitayew, M. (Hrsg.): Irrigation and Drainage Engineering. Springer International Publishing, Cham, 2016, S. 147-167.
- [211] Eppel, J.; Kendzia, N.; Öchsner, J. et al.: Standortangepasste Bewässerung öffentlicher Grünflächen als Beitrag zur Klimamäßigung im urbanen Lebensraum – Endbericht zum Forschungsvorhaben KL/08/03. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheim Ausgabe 2012.
- [212] Snyder, R.L.; Eching, S.: Landscape Irrigation Management Program – ISO05 Quick Answer. University of California, Davis Ausgabe 2004.
- [213] Lightle, D.: Distribution Uniformity – Why it Matters, What Influences it, and Improving Yours. JCS Marketing Publications, 2019, <https://www.wcngg.com/2019/05/06/distribution-uniformity-why-it-matters-what-influences-it-and-improving-yours/> [Zugriff am: 31.01.2020].

- [214] Kjelgren, R.; Rupp, L.; Kilgren, D.: Water Conservation in Urban Landscapes. In: HortScience 35 (2000), Heft 6, S. 1037-1040.
- [215] BENZ GmbH & Co. KG Baustoffe: Leitfaden – Regenwassernutzung und Bewirtschaftung, Neckarbischofsheim Ausgabe 2016.
- [216] Umweltbundesamt: Regenwassernutzung, 2016, <https://www.umweltbundesamt.de/umwelt-tipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/regenwassernutzung#textpart-2> [Zugriff am: 19.12.2019].
- [217] Grambow, M.: Nachhaltige Technologie als praktische Konkretisierung des IWRM. In: Grambow, M. (Hrsg.): Nachhaltige Wasserbewirtschaftung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2013, S. 91-303.
- [218] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen, Freising Ausgabe 2008.
- [219] Minnesota Stormwater Manual: Case studies for stormwater and rainwater harvest and reuse. Minnesota Pollution Control Agency, 2019, https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Case_studies_for_stormwater_and_rainwater_harvest_and_use/reuse [Zugriff am: 19.12.2019].
- [220] Next Kraftwerke GmbH: Was ist Regelenergie, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenergie> [30.01.2020].
- [221] Climate Service Center Germany: Starkregen. Publikationen, https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063152/index.php.de [Zugriff am: 04.02.2020].
- [222] Liebscher, H.-J.; Baumgartner, A. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrologie. Borntraeger, Berlin, 1996.
- [223] Manton, M.J.; Della-Marta, P.M.; Haylock, M.R. et al.: Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific – 1961-1998. In: International Journal of Climatology 21 (2001), Heft 3, S. 269-284.
- [224] Manteghi, G.; Limit, H.B.; Remaz, D.: Water Bodies an Urban Microclimate: A Review. In: Modern Applied Science 9 (2015), Heft 6.
- [225] Rajczak, J.; Pall, P.; Schär, C.: Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118 (2013), Heft 9, S. 3610-3626.
- [226] Herwig, H.: Ach, so ist das! – 50 thermofluidynamische Alltagsphänomene anschaulich und wissenschaftlich erklärt. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [227] Foken, T. (Hrsg.): Angewandte Meteorologie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [228] Sun, H.; Kopp, K.; Kjelgren, R.: Water-efficient Urban Landscapes – Integrating Different Water Use Categorizations and Plant Types. In: HortScience 47 (2012), Heft 2, S. 254-263.
- [229] DIN V 18599-1:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger (V 18599-1:2018-09).

Quellennachweis zu den Abbildungen

Abb. 1: Sektorenmatrix, S. 7. eigene Darstellung.

Abb. 2: Steckbriefe: Aufbau der Kopfzeile,
S. 8 eigene Darstellung.

Abb. 3: PtH: CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 23. eigene Darstellung auf Basis von Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Abb. 4: PtC: CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 27. eigene Darstellung auf Basis von Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Abb. 5: KWK: Primärenergieeinsatz im Vergleich, S. 31. eigene Darstellung auf Basis von Gesellschaft Energietechnik: Rationelle Energienutzung in der Industrie - ein Beitrag zum Klimaschutz. Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Heft 1767, VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.

Abb. 6: KWK: CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 32 eigene Darstellung auf Basis von Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Gesellschaft Energietechnik: Rationelle Energienutzung in der Industrie - ein Beitrag zum Klimaschutz. Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Heft 1767, VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.

Abb. 7: PtG (Wasserstoff): CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 41. eigene Darstellung auf Basis von Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Abb. 8: PtG (Methan): CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 46. eigene Darstellung auf Basis von Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Abb. 9: Sorptionskälte: Primärenergie im Vergleich, S. 59. eigene Darstellung auf Basis der DIN V 18599-1:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger (V 18599-1:2018-09).

Abb. 10: Sorptionskälte: CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 60. eigene Darstellung auf Basis Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019], Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019] und Fritsche, Uwe; Rausch, Lothar: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, 2008, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bestimmung-spezifischer-treibhausgas>. [Zugriff am 04.05.2020].

Abb. 11: Abwasserwärmerückgewinnung: CO₂-Emissionen im Vergleich, S. 81. DWA: Merkblatt – Energie aus Abwasser. Wärme- und Lageenergie. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-RegelwerkM 114, DWA, Hennef, 2013.

Quellennachweis zu den Tabellen

Tabelle 1: Potentialmatrix der allgemein beschriebenen Sektorenkopplungen, S. 16. eigene Darstellung.

Tabelle 2: Substitution von Erdgas durch PtH, S. 22. Purr, Katja; Osiek, Dirk; Lange, Martin et al.: Position. Integration von Power to Gas und Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf [Zugriff am: 13.01.2020].

Tabelle 3: Substitution von Primärenergie durch KWK, S. 31. Schmitz, K.W.: Kraft-Wärme-Kopplung. Springer, Berlin [u. a.], 2005. und Gesellschaft Energietechnik: Rationelle Energienutzung in der Industrie - ein Beitrag zum Klimaschutz. Gesellschaft Energietechnik, VDI Berichte Heft 1767, VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.

Tabelle 4: E-Mobilität: Emissionsverminderung, S. 36. Agora Verkehrswende: Publikation – Klimabilanz von Elektroautos, 2019, <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimabilanzvon-elektroautos/> [Zugriff am: 06.06.2019].

Tabelle 5: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Stromsektor, S. 41. Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Tabelle 6: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Wärmesektor, S. 41. Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Tabelle 7: PtG (Wasserstoff): Einsparungen im Verkehrssektor, S. 41. Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Tabelle 8: PtG (Methan): Einsparungen im Stromsektor, S. 46. Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Tabelle 9: PtG (Methan): Einsparungen im Wärmesektor, S. 46. Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [Zugriff am: 12.11.2019] und Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, 2019, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energie-traeger> [Zugriff am: 12.11.2019].

Tabelle 10: Leistungszahlen und Effizienz von Kompressionskälteanlagen im Vergleich zu adiabaten Systemen, S. 77. VDI: Adiabate Abluftkühlung, 2009-2020 [Zugriff am: 07.01.2020].

Querverweise

Stichwort zum Querverweis im Text.....	Erläuterung auf Seite
Am Strom orientierte Betriebsweise.....	siehe Betriebsweisen von KWK-Anlagen
Betriebsweisen von KWK-Anlagen.....	115 (Glossar)
Bodenalbedo	115 (Glossar)
Contracting.....	115 (Glossar)
Contractor.....	siehe Contracting
E-Mobilität	34
Entsprechende Steckbriefe.....	34ff
Evapotranspiration	115 (Glossar)
Grüner H ₂	38
Jährlichkeit.....	115 (Glossar)
Mobilstation	90
Netzdienlich.....	115 (Glossar)
Netzmanagement	115 (Glossar)
Power-to-Gas (Methan)	43
Power-to-Gas (Wasserstoff).....	38
Power-to-Liquid	48
Regelenergie.....	115 (Glossar)
Regelleitungspoolbetreiber	115 (Glossar)
Resuspension	115 (Glossar)
Retention auf Flächen der Blauen Infrastruktur.....	69ff
Sorptionskälte	57
Stadtwerke Kiel.....	33 
Starkregenereignisse	115 (Glossar)
Vehicle-to-Grid	95
Wärmemarkt orientierten Einsatz	siehe Betriebsweisen von KWK-Anlagen
Wärmerückgewinnung	52
Wiederkehrhäufigkeit.....	115 (Glossar)

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 Konzepterstellung 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.

