

Nachhaltigkeitsbewertung von Systemalternativen zur Transformation des Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
DOKTORIN DER PHILOSOPHIE (Dr. phil.)

von der KIT-Fakultät für Geistes- und Sozialwissenschaften des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Jasmin Friedrich

KIT-Dekan: Prof. Dr. Michael Schefczyk

1. Gutachter: Prof. Dr. Armin Grunwald
2. Gutachterin: Prof. Dr. Ingela Tietze

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2020



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0 DE):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Kurzfassung

Für eine nachhaltige Entwicklung stellen Aufbau und Betrieb von Systemen zur Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie zur Energieversorgung insbesondere in urbanen Räumen drei der großen Herausforderungen unserer Zeit dar.

Die Einführung von zentralen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen seit Mitte des 19. Jh. hat in zahlreichen Städten maßgeblich zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge und zum Umweltschutz beigetragen. Eine nachhaltige Gestaltung jedes dieser Systeme stellt aber nicht nur jeweils für sich genommen eine Herausforderung dar. Vielmehr hängen die Probleme in den drei Ver- und Entsorgungsbereichen eng miteinander zusammen. Man spricht deshalb auch vom „Wasser-Energie-Nexus“.

So sind die Bereitstellung von Trinkwasser und seine Erwärmung mit erheblichem Energieaufwand verbunden. Die zentralen Abwasserbehandlungsanlagen sind sogar vielfach der größte Stromverbraucher unter städtischen Einrichtungen. Bislang wird lediglich der Klärschlamm als Ressource aus dem Abwasser genutzt. Hygienische Belastungen und Mikroschadstoffe können durch die konventionelle Behandlung nicht entfernt werden. Darüber hinaus entstehen durch den Klimawandel bzw. die damit verbundene Intensivierung von Wetterphänomenen wie Trockenheit und Starkregenereignisse Belastungen für die Trinkwasserbezugsquellen und die Kanalinfrastruktur. Um die genannten Defizite umfassend und nachhaltig zu beheben, reichen Anpassungsmaßnahmen an einzelnen Systemkomponenten typischerweise nicht aus. Dazu muss der Wasser-Energie-Nexus gezielt durch Systemalternativen transformiert werden. Die vorliegende Arbeit stellt eine solche Transformation dar.

Dazu wird als Fallbeispiel ein Wohnbestandsviertel mit ca. 5.000 EinwohnerInnen der Stadt Heidelberg untersucht. Anhand von Entscheidungspfaden werden drei Systemalternativen (SYAL1, SYAL2 und SYAL3) entwickelt, die Abwasser als Ressource nutzbar machen. Diese realisieren durch unterschiedliche technologische Systemkomponenten und Zentralisierungsgrade die Wärmerückgewinnung aus und Wiederverwendung von Grauwasser sowie die Co-Vergärung von Schwarzwasser und Bioabfällen zu Biogas und organischem Dünger.

Kernstück dieser Arbeit ist die Nachhaltigkeitsbewertung dieser Systemalternativen im Vergleich zum Status-Quo-System. Die Bewertung wird auf Basis des „integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung“ erstellt. Dazu werden quantitative Informationen für Umwelt und ökonomische Aspekte erarbeitet und eine qualitative Analyse der Nutzerperspektiven durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einführung	1
1.1 Transformation zu nachhaltiger Entwicklung	1
1.2 Der Wasser-Energie-Nexus	2
1.3 Zentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme in Städten	4
1.4 Systemalternativen im städtischen Gebäudebestand	6
1.5 Nachhaltigkeitsbewertung	8
1.6 Zielsetzung, Abgrenzung und wissenschaftliche Herausforderungen	9
1.7 Gliederung	12
2 Untersuchte Systeme	14
2.1 Untersuchungsgebiet	14
2.2 Status-Quo-System	17
2.3 Systemalternativen	20
2.3.1 Bezeichnungen	20
2.3.2 Technische Systemkomponenten	21
2.3.3 Nicht technische Ausgestaltung	28
2.3.4 Systemalternative 1	31
2.3.5 Systemalternative 2	33
2.3.6 Systemalternative 3	36
2.3.7 Zusammenfassung Systemmerkmale	38
2.4 Stoff- und Energieströme des Systembetriebs	39
2.4.1 Trinkwassernutzung und -bereitstellung für Haushalte	39
2.4.2 Abwassermenge	41

2.4.3	Ab- bzw. Grauwasserbehandlung.....	43
2.4.4	Fahrzeugtransport	45
2.4.5	Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlung.....	47
2.4.6	Energiebedarf Haushalte.....	49
2.5	Stoff- und Energieströme der Systemkonstruktion	51
2.5.1	Kanalbestand.....	51
2.5.2	Teilstromtrennung.....	53
2.5.3	Ab- bzw. Grauwasserbehandlungsanlagen	55
2.5.4	Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlungsanlage	59
2.5.5	Fahrzeuge.....	66
3	Nachhaltigkeitsbewertung.....	68
3.1	Das Integrative Konzept nachhaltiger Entwicklung.....	68
3.2	Vorgehensweise	71
3.3	Methoden zur Herleitung der Indikatorenwerte.....	75
3.4	Ableitung von Wasser-Energie-Nexus bezogenen Regeln / Indikatoren & Herleitung der Indikatorenwerte	77
3.4.1	Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz	77
3.4.2	Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials.....	88
3.4.3	Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten	102
4	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung.....	108
4.1	Auswertung der Ergebnisse.....	108
4.2	Diskussion der Ergebnisse	113
4.2.1	Bewertungsansatz.....	113
4.2.2	Verwendete Daten.....	114
4.3	Verallgemeinerungs- und Übertragungsoptionen.....	116
4.3.1	Untersuchungsviertel & Systemalternativen	116

4.3.2	Bewertung	119
5	Konklusion und Ausblick.....	120
5.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	120
5.2	Implementierungs- und Forschungsbedarf.....	122
	Bibliographie	124
	Anhang.....	163
A1	Erfassung Kanalbestand nach Kanaltyp.....	163
A2	Erfassung Kanalschächte	171
A3	Lebensdauern je Systemkomponente.....	173
A4	Angaben Investitionskosten.....	174
A5	Angaben laufende Kosten.....	177
A6	Investitionskosten Kanalbestand (Kanalnetz und Schächte)	180
A7	Investitionskosten Druckrohre	182
A8	Investitionskosten Liner und Harz.....	182
A9	Reinvestitionskosten je Systemkomponente.....	183
A10	Reinvestitionskosten je System.....	186
A11	Auslegung Wärmetauscher	187
A12	Auslegung Wärmepumpe.....	188
A13	Ökobilanz Status-Quo-System.....	189
A14	Ökobilanz SYAL1.....	190
A15	Ökobilanz SYAL2.....	192
A16	Ökobilanz SYAL3.....	193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Der Wasser-Energie-Nexus	4
Abbildung 2 Aufbau der Arbeit	13
Abbildung 3 Abgrenzung des Untersuchungsgebiets	15
Abbildung 4 Primärfunktionen des Status-Quo-Systems.....	17
Abbildung 5 Systemdarstellung des Status-Quo-Systems	19
Abbildung 6 Ziele Systemalternativen.....	21
Abbildung 7 Entscheidungspfad zur Teilstromtrennung.....	22
Abbildung 8 Trennung im Bestandsrohr	23
Abbildung 9 Entscheidungspfad zur Wärmerückgewinnung	23
Abbildung 10 Entscheidungspfad zur Grauwasserwiederverwendung.....	24
Abbildung 11 Entscheidungspfad zur Beimengung des Bioabfalls.....	25
Abbildung 12 Entscheidungspfad zum Vakuumsystem.....	26
Abbildung 13 Entscheidungspfad zur Integration der Vakuumtrasse	26
Abbildung 14 Entscheidungspfad zur Regenwasserauskopplung	27
Abbildung 15 Der M-Wasserweg um München.....	29
Abbildung 16 Partizipation bei der Stadtgestaltung	30
Abbildung 17 Systemdarstellung SYAL1	32
Abbildung 18 Küchenabfallzerkleinerer.....	34
Abbildung 19 Systemdarstellung SYAL2	35
Abbildung 20 Verlegungstiefen konventionelle Kanalisation vs. Vakuumkanalisation ...	36
Abbildung 21 Systemdarstellung SYAL3	37
Abbildung 22 Struktur des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung	71
Abbildung 23 Vorgehen zur Nachhaltigkeitsbewertung	72
Abbildung 24 Freizeitaktivitäten auf dem Neckar	79
Abbildung 25 Blau-grüne Stadtraumgestaltung.....	81
Abbildung 26 P-Mangel an Mais	83
Abbildung 27 Globale Erwärmung	86
Abbildung 28 Bedarf an fossilen Rohstoffen.....	92
Abbildung 29 Bedarf an metallischen Rohstoffen	93
Abbildung 30 Aufklärungsarbeit durch Verbraucherzentrale und Stadtentwässerungsbetriebe	106

Abbildung 31 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel I	109
Abbildung 32 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel II.....	110
Abbildung 33 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel III	111
Abbildung 34 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziele I, II und III.....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gebäudetypologie & Anzahl im Untersuchungskontext	16
Tabelle 2 Zusammenfassung Systemmerkmale	38
Tabelle 3 Trinkwasserbedarf.....	40
Tabelle 4 Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung	41
Tabelle 5 Abwassermenge Status-Quo-System	41
Tabelle 6 Menge Schwarzwasser	42
Tabelle 7 Abwassermenge SYAL1	42
Tabelle 8 Energetische Angaben Ab- bzw. Grauwasserbehandlung	44
Tabelle 9 Kraftstoffverbrauch	47
Tabelle 10 Energiebedarf Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlung.....	48
Tabelle 11 Energetische Angaben Co-Vergärung	49
Tabelle 12 Rückgewonnene Nährstoffe	49
Tabelle 13 Energiebedarf Haushalte	50
Tabelle 14 Konstruktionsmaterial Kanalbestand.....	52
Tabelle 15 Aushub Kanalnetz.....	53
Tabelle 16 Schlauchlänge Teilstromtrennung	54
Tabelle 17 Konstruktionsmaterial Teilstromtrennung.....	54
Tabelle 18 Konstruktionsmaterial Kläranlage	55
Tabelle 19 Konstruktionsmaterial Kohlekraftwerk	57
Tabelle 20 Konstruktionsmaterial semizentrale Wärmerückgewinnung	58
Tabelle 21 Konstruktionsmaterial dezentrale Grauwasserbehandlungsanlagen	59
Tabelle 22 Konstruktionsmaterial Kompostwerk.....	60
Tabelle 23 Konstruktionsmaterial Bioabfallzerkleinerung.....	61
Tabelle 24 Konstruktionsmaterial Vakuumtoiletten	61
Tabelle 25 Übertragung Nennweiten und Gewicht Vakuumnetz	62
Tabelle 26 Konstruktionsmaterial Vakuumnetz	62
Tabelle 27 Aushub Vakuumtrasse.....	63
Tabelle 28 Konstruktionsmaterial Vakuumpumpe	64
Tabelle 29 Konstruktionsmaterial Biogasanlage	65
Tabelle 30 Konstruktionsmaterial Fahrzeuge.....	66
Tabelle 31 Ziele und Regeln des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung	70

Tabelle 32 Bewertungsskala	74
Tabelle 33 Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz: Übersicht Indikatorenauswahl.....	78
Tabelle 34 Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz: Übersicht Indikatorenwerte	87
Tabelle 35 Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials: Übersicht Indikatorenauswahl	89
Tabelle 36 Investitionskosten	98
Tabelle 37 Laufende Kosten.....	99
Tabelle 38 Kostenübersicht.....	100
Tabelle 39 Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials: Übersicht Indikatorenwerte.....	101
Tabelle 40 Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten: Übersicht Indikatorenauswahl.....	103
Tabelle 41 Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten: Übersicht Indikatorenwerte	107

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
a	Jahr
AKWA 2100	Projekt: Alternativen Kommunalen Wasserver- und Abwasserentsorgung
ATT	Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren
AVZ	Abwasserzweckverband
AWBR	Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein
BAUA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BS	Bewertungsskala
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau
CEMR	The Council of European Municipalities and Regions
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischen Sauerstoffbedarf
CSI	Centrum für Soziale Investitionen und Innovationen
d	Tag
DBVW	Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft
Destatis	Statistisches Bundesamt
DEUS 21	Projekt: Dezentrales urbanes Infrastruktursystem
Difu	Deutsches Institut für Urbanistik
DIE	Deutsches Institut für Entwicklungspolitik
DN	Nennweite
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches – Technisch-wissenschaftlicher Verein
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
ECDPM	European Centre for Development Policy Management
EnBW	Energie Baden-Württemberg

EU	Europäische Union
EW	Einwohner/innen
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
Fbr	Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung
FCI	Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie
Fe	Eisen
FEI	Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- u. Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft
FNAU	The French network of planning agencies
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
GFEU	Gesellschaft zur Förderung und Entwicklung der Umwelttechnologien
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IASS	Institute for Advanced Sustainability Studies
IBA	Internationale Bauausstellung
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IGB	Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik
IK	Investitionskosten
IKR	Reinvestitionskosten
IKT	Institut für unterirdische Infrastruktur

IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRB	Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
IRENA	International Renewable Energy Agency
IRP	International Resource Panel
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
ISOE	Institut für sozial-ökologische Forschung
IST	Innovative Sewer Technologies
ISWA	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
K	Kalium
KbE	Koloniebildende Einheiten der Mikroorganismen
KISS	Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung
KLIWA	Arbeitskreis Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft
LAWA	Bund- / Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LCA	Life Cycle Assessment
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LK	Laufende Kosten
LUBW	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
N	Stickstoff

NASS	Neuartige Sanitärsysteme
ODI	Overseas Development Institute
P	Phosphor
PKBW	Projektkostenbarwert
RFGS	Reference framework for European sustainable cities
SDGs	Sustainable Development Goals
SQ	Status-Quo-System
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
STV	Stadtviertel
SYAL	Systemalternative
TWIST++	Transitionswege Wasserinfrastruktursysteme
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
UN DESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UN-HABITAT	United Nations Human Settlements Programme
VKU	Verband kommunaler Unternehmen
WHO	World Health Organization
Wido	Wissenschaftliches Institut der AOK
WWAP	United Nations World Water Assessment Programme
ZWK	Zweckverband Wasserversorgung Kurpfalz

1 Einführung

Ressourcenengpässe, Klimawandel, Umweltschäden - wir leben in Zeiten großer Herausforderungen, die durch „komplexe Interdependenzen“ (Bundesregierung 2016, S. 2) gekennzeichnet sind und deren „Bewältigung über die Zukunft der Menschheit und des Planeten entscheiden“ (ebd.) werden. Zu den Herausforderungen mit komplexen Interdependenzen und entscheidender Bedeutung für die Zukunft der Menschheit gehören die Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie die Energieversorgung. Im Folgenden werden Hintergrund und Untersuchungsgegenstand kurz eingeführt, das Ziel definiert sowie die Struktur der Arbeit skizziert.

1.1 Transformation zu nachhaltiger Entwicklung

Angesichts der oben erwähnten Herausforderungen hält das Thema Nachhaltigkeit¹ bereits in den 1990er Jahren Einzug in die gesamtgesellschaftliche Debatte (Kopfmüller et al. 2001). Auslöser der Debatte war 1987 die Veröffentlichung des Berichts der Brundtland-Kommission („Our common Future“). Dieser Bericht enthält eine Definition, die nach wie vor international maßgeblich ist als Ausgangspunkt der Formulierung des Leitbildes einer „nachhaltigen Entwicklung“ (Hauff und Kleine 2014). Demnach ist eine Entwicklung dann nachhaltig, „wenn sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Hauff 1987, S. 46). Ausgehend von dieser Definition verständigte man sich im Laufe der Jahre darauf, dass es beim Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung um „die Sicherung der Grundlagen dauerhafter menschlicher Zivilisation auf dem Planeten Erde, um Zukunftsverantwortung und Gerechtigkeit“ (Grunwald 2016, S. 13) geht.

¹ „Nachhaltigkeit“ und „nachhaltige Entwicklung“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

Trotz dieser „weithin anerkannten Orientierungsgröße“ (Dusseldorp 2014, S. 11) einer nachhaltigen Entwicklung und Fortschritten dahin gestalten sich Veränderungen angesichts des Ausmaßes der Herausforderungen zu langsam (UN 2015). Fast 30 Jahre nach dem Bericht der Brundtland-Kommission ist die Verabschiedung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung und der darin verkündeten Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) (UN 2016) deshalb vor allem Ausdruck dafür, dass sich die globalen Herausforderungen nur durch eine grundlegende *Transformation* hin zu einer nachhaltigen Entwicklung bewältigen lassen (Bundesregierung 2016). Die Agenda trägt deshalb den Namen „Transformation unserer Welt“ (UN 2015). Der Begriff „Transformation“ bezeichnet dabei Veränderungsprozesse, die deutliche Brüche zum Status-Quo verlangen sowohl technologischer als auch institutioneller und gesellschaftlicher Natur (Trapp und Libbe 2016; Kemp und van Lente 2011). Dies betrifft auch die Herangehensweise, wie die Herausforderungen in Angriff genommen werden. Sie können nicht mehr weiterhin isoliert voneinander angegangen werden, sondern müssen unter Berücksichtigung ihrer Interdependenzen, d.h. ihres „Nexus“ (siehe Kapitel 1.2), gelöst werden (Giampietro et al. 2014).

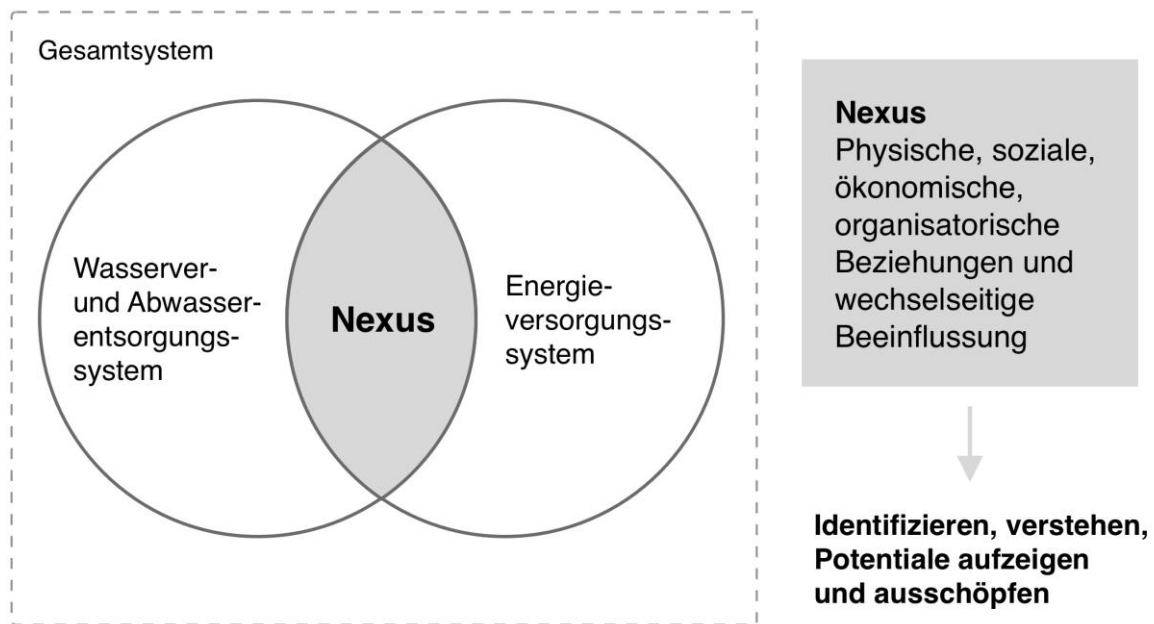
1.2 Der Wasser-Energie-Nexus

Großinfrastruktursysteme, wie die Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme sowie Energieversorgungssysteme, bilden das Rückgrat unserer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung (GIZ 2019; Müller et al. 2016). Sie sind deshalb essentiell für eine Transformation unserer Wirtschafts- und Lebensweise hin zu einer nachhaltigen Entwicklung und stellen drei der zuvor angesprochenen großen Herausforderungen unserer Zeit dar (WWAP 2017, 2014). Im Bericht „The Global Risks Report 2016“ des World Economic Forum werden Wasserkrisen und eine extreme Entwicklung der Energiepreise zum wiederholten Male als Top-Risiken in Bezug auf ihre globale Wirkung angeführt (World Economic Forum 2016). Die Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie Energieversorgung bergen aber nicht nur isolierte Herausforderungen. Vielmehr hängen die Versorgungsprobleme in den drei Bereichen eng miteinander zusammen (Schmidt 2017; Beisheim 2013). Man spricht deshalb auch vom „Wasser-Energie-Nexus“.

Der Begriff „Wasser-Energie-Nexus“ wurde bei der Bonn Nexus-Konferenz 2011 (Hoff 2011) in den internationalen Diskurs eingebracht und nimmt seither eine prominente Stellung in Politik und Forschung ein (Völker et al. 2019; Albrecht et al. 2018; Galaitsi et al. 2018; Cairns und Krzywoszynska 2016). Bis heute wurde der Begriff allerdings nicht eindeutig definiert (Kenway et al. 2019; Galaitsi et al. 2018; Cairns und Krzywoszynska 2016; Allan et al. 2015). Einig ist man sich darüber, dass durch das Einnehmen einer Nexus-Perspektive bisher unbekannte Beziehungen und wechselseitige Beeinflussungen zwischen der Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie der Energieversorgung identifiziert und verstanden werden sollen. Darüber hinaus wird angestrebt, sowohl für bereits bekannte als auch für neu identifizierte Beziehungen Potentiale für eine nachhaltige Entwicklung aufzuzeigen, die unter der bislang isolierten Behandlung der drei Bereiche nicht ersichtlich geworden sind und deshalb nicht ausgeschöpft werden konnten (BMZ 2017, 2018; Wilhelm 2016).

Hier wird unter Wasser-Energie-Nexus allgemein die Schnittstelle zwischen einem Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem sowie einem Energieversorgungssystem verstanden. Realisiert werden die drei Systeme durch eine Kombination von technischen Systemkomponenten, im weiteren Sinne Konversionsanlagen, die Stoffe und Energieträger verändern (Kraftwerke, Kläranlagen) wie auch infrastrukturellen Systemkomponenten (Wasser-, Abwasser- und Stromnetz). Die physischen, sozialen, ökonomischen und organisatorischen Beziehungen zwischen den Systemkomponenten der drei Systeme spezifizieren die Schnittstelle, die hier als Nexus verstanden wird (siehe Abbildung 1). Nexus wird in dieser Arbeit also nicht nur als ein rein ressourcenbedingtes, sondern als ein gesamtgesellschaftliches Problemfeld betrachtet, wodurch weiterreichende Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung berücksichtigt werden können.

Abbildung 1 Der Wasser-Energie-Nexus



Quelle: Eigene Darstellung

Systemalternativen ändern im Verständnis dieser Arbeit Systemstruktur und / oder -komponenten der Wasserver- und Abwasserentsorgung des Status-Quo-Systems so stark, dass der Nexus transformiert wird und zwar in eine Form, die potentiell zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen kann. Doch warum sind Systemalternativen überhaupt notwendig? Wo liegen die Defizite des gegenwärtigen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems? Und wie kann eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus durch Systemalternativen potentiell zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen?

1.3 Zentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme in Städten

Die Einführung von zentralen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen hat in zahlreichen Städten maßgeblich zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge und zum Umweltschutz beigetragen (UN-HABITAT 2016; Libbe et al. 2017). Unter „zentral“ wird dabei ein für die Gesamtstadt ausgelegtes System begriffen (in Anlehnung an DIN EN 16323: 2014; DIN EN 12056: 2000; Gujer 2007). Für die Bewohner überwiegend „unsichtbar“ (Van Vliet et al. 2011, S. 117 übersetzt; Veser 2015, S. 2) versorgen die zugehörigen Systemkomponenten die Städte komfortabel mit Trinkwasser, entsorgen sicher ihr Abwasser und gewährleisten Hochwasser- und Gewässerschutz (Gujer 2007). Diese Aufgaben wurden in der Vergangenheit weitestgehend erfüllt (Koziol et al. 2006;

Tauchmann et al. 2006). Besonders in Städten, in denen kein akutes Ver- oder Entsorgungsproblem besteht, kann die Leistungsfähigkeit der zentralen Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme daher suggerieren „es bestehe kein Grund zur Sorge“ (Röhrkasten et al. 2016, S. 5). Tatsächlich weist das gegenwärtige zentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem jedoch Defizite auf (DWA 2018a; WWAP 2014).

Die Bereitstellung von Trinkwasser sowie dessen Erwärmung sind mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden (EnBW 2017; Steusloff 2009). Die zentralen Abwasserbehandlungsanlagen sind sogar vielfach der größte Stromverbraucher unter städtischen Einrichtungen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2015a). Da sich im Gegensatz zur Abfallwirtschaft noch keine Kreislaufführung innerhalb der Abwasserwirtschaft etabliert hat (Veser 2015), wird bislang lediglich der Klärschlamm als Ressource aus dem Abwasser genutzt. Die thermischen und chemischen Energien aus dem Abwasser gehen gegenwärtig verloren (WWAP 2017). Außerdem können Mikroschadstoffe und hygienische Belastungen durch die konventionelle Abwasserbehandlung nicht vollständig entfernt werden und stellen eine Gewässerbelastung dar (UBA 2018b; UBA 2015a; Schwartz und Alexander 2014). Um dies zu ändern, müsste beispielsweise eine Nachrüstung der zentralen Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe (z.B. durch Ozonierung) erfolgen (BDEW 2018; UBA 2015c; Gawel und Schindler 2015; Launay et al. 2015). Diese erzielt zwar eine Verringerung einiger Stoffe, jedoch nicht aller (BDEW 2018) und würde den Energiebedarf der Kläranlage um bis zu 30% erhöhen (UBA 2015c). Der gegenwärtige Wasser-Energie-Nexus ist demnach durch eine recht einseitige Beziehung charakterisiert, in dem das Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem fast ausschließlich Energie bezieht.

Darüber hinaus gerät das konventionelle Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem durch den Klimawandel unter Veränderungsdruck (Libbe et al. 2017; Schramm et al. 2013; DWA 2010a). Zunehmende Trockenperioden durch den Klimawandel stellen eine Belastung für die natürlichen Trinkwasserbezugsquellen dar (Arcadis 2016; Kluge und Libbe 2010). Da die gesamte Trinkwasserversorgung durch diese Bezugsquellen gestaltet wird, kann es, wie im außergewöhnlich heißen und trockenen Sommer 2018, zu plötzlichen Engpässen in der Wasserversorgung kommen (Schaub und Tosun 2019). Zugleich nehmen Starkregenereignisse durch den Klimawandel zu. Dadurch, dass Regenwasser im konventionellen Abwassersystem in Städten zu einem großen Anteil

über die Kanalisation abgeleitet wird, ist diese bei Starkregen überlastet (DWA 2010a). Es kommt dann zu unkontrolliert oberflächlich abfließendem Wasser, das Gefahren für BewohnerInnen und materielle Güter bedeutet (KISS 2013).

1.4 Systemalternativen im städtischen Gebäudebestand

Um die genannten Defizite zu beheben reichen Anpassungsmaßnahmen einzelner Systemkomponenten nicht aus. Es bedarf einer Transformation des gegenwärtigen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems durch Systemalternativen (Kluge und Libbe 2010) (siehe Kapitel 2.3). Dadurch soll der Wasser-Energie-Nexus so transformiert werden, dass er zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt. Wie bereits erwähnt, zeichnet sich eine Transformation durch deutliche Brüche zum Status-Quo ab. Dieser Bruch besteht in den Systemalternativen vor allem durch die Wertung und Behandlung von Abwasser. Im Gegensatz zum konventionellen Abwasserentsorgungssystem wird das Abwasser in den Systemalternativen nicht als Abfallstoff eingeordnet, sondern als Ressource für Wasser, Nährstoffe, Wärme und Energie gesehen, die einen Beitrag zum Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem sowie Energieversorgungssystem leistet (WWAP 2017).

Grundlegende technische Voraussetzung, um Abwasser über den Klärschlamm hinaus als Ressource nutzbar zu machen, ist die Trennung in seine Teilströme. Durch eine Trennung kann aus dem meist warmen, gering verschmutzten Grauwasser (z.B. aus Duschen und Geschirrspülern) Wärme rückgewonnen werden. Darüber hinaus kann es zu Betriebswasser aufbereitet werden, das einen Teil des Trinkwassers substituiert. Dadurch können die Trinkwasserbezugsquellen, die durch den Klimawandel zunehmend belastet werden, entlastet werden (Libbe et al. 2017; DWA 2006; Kluge et al. 2003). Aus dem nährstoffreichen Schwarzwasser aus den Toiletten können durch die Trennung Biogas erzeugt werden und Nährstoffe rückgewonnen werden. Da das Schwarzwasser den stark kontaminierten Anteil des Abwassers ausmacht, können durch dessen getrennte Behandlung ohne Verdünnung durch andere Ströme hygienische Belastungen und Mikroschadstoffe gezielter behandelt und deren Eintrag in Fließgewässer vermieden werden (WWAP 2017; IRENA 2015; DWA 2010a). Darüber hinaus werden in den Systemalternativen durch den lokalen Einsatz des Regenwassers, z.B. für Stadtbegrünung, die Infrastruktur im Falle von Starkregenereignissen entlastet und das Stadtklima verbessert (Sieker et al. 2019; SRU 2018; BfN 2017a; BMUB 2015). Für die

Teilstromtrennung und die einzelnen Systemkomponenten sind verschiedene technische Ausgestaltungen möglich, über die anhand der jeweiligen Kontextbedingungen entschieden werden muss (Libbe et al. 2017; Michel et al. 2010). Hier wird die Entwicklung und Wahl der Systemalternativen durch Entscheidungspfade dargelegt und visualisiert (siehe Kapitel 2.3).

Konzepte für eine alternative Gestaltung der Wasserver- und Abwasserentsorgung bestehen unter dem Sammelbegriff der „Neuartigen Sanitärsysteme“ (NASS) (DWA 2010a) schon seit geraumer Zeit (siehe z.B. Otterpohl und Oldenburg 2002). Einzelne Systemkomponenten von Systemalternativen (z.B. Grauwasserwiederverwendung, Schwarzwasservergärung) werden bzw. wurden bereits in Pilotprojekten² verschiedener Größenordnungen - von Einzelgebäudelösungen (Arminplatz, Berlin) (Nolde 2013a) über einer Siedlung von 100 Gebäuden (DEUS 21, Knittlingen) (Hiessl et al. 2010) bis hin zu einer Konversionsfläche mit 770 Wohneinheiten (Jenfelder Au, Hamburg)³ (Stadt Hamburg 2017) - eingesetzt. Bislang adressieren diese Pilotbauprojekte jedoch überwiegend den Neubau (Ott et al. 2016; Sartorius et al. 2016; Vesper 2015; Wolter et al. 2014; Meinzinger et al. 2010). Auch in der Forschung analysieren nur wenige Projekte (z.B. AKWA 2100; Twist++) (Hiessl et al. 2005; Hillenbrand et al. 2017) explizit den städtischen Gebäudebestand.

Da aber durch die Lebensdauer von Gebäuden große Teile der Städte von morgen „heute bereits 'gebaut'“ (Waschnewski und Hürter 2017, S. 232) sind, darf der Gebäudebestand bei Transformationen des Wasser-Energie-Nexus nicht außen vorgelassen werden (Hillenbrand et al. 2017; IAO et al. 2015). Der fehlende Einbezug des Gebäudebestandes könnte zum einen daran liegen, dass die praktischen Gestaltungsmöglichkeiten für gängige Systemalternativen im Bestand eingeschränkter sind als im Neubau (siehe Kapitel 2.3). Zum anderen bestehen noch zahlreiche grundsätzliche offene Fragen für den Einsatz von Systemalternativen im Bestand, darunter (Ott et al. 2016; Winker und Schramm 2015; Kenway 2013; Meinzinger et al. 2010; Tauchmann et al. 2006): Welche Ausgestaltungen eignen sich für den jeweiligen städtischen Bestandskontext? Mit welchen Kosten sind Systemalternativen bei bereits bestehenden Systemkomponenten

² Für eine weitreichendere Auflistung nationaler und internationaler Projekte siehe z.B. Vesper 2015.

³ Noch im Aufbau.

verbunden? Sind diese durch den ressourcenbedingten Aufwand einer Transformation nicht ebenfalls mit negativen Umweltwirkungen verbunden? Welche Veränderungen ergeben sich für den Alltag der BewohnerInnen? In dieser Arbeit sollen diese Fragen eines konkreten Fallbeispiels aus dem Bestandskontext (siehe Kapitel 2.1) möglichst vielfältig übertragbar beantwortet werden.

1.5 Nachhaltigkeitsbewertung

Wie kann dabei fest- oder sichergestellt werden, dass eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus durch Systemalternativen zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt, wo es sich bei dem globalen Leitbild nachhaltiger Entwicklung doch um einen „Begriff der tausendundeinen möglichen Interpretationen“ (Gottschild 2017, S. 21) handelt? Genau hier kommen Nachhaltigkeitsbewertungen ins Spiel, denn das Leitbild ist „zu vage, um unmittelbar für Bewertungen herangezogen werden zu können“ (Dusseldorp 2014, S. 27). Nachhaltigkeitsbewertungen stellen ein Hilfsmittel dar, um das Leitbild zu konkretisieren und dadurch den Übergang hin zu einer nachhaltigen Entwicklung vor Ort einzuleiten und Fortschritte zu überprüfen (Bohunovsky und Jäger 2008). Mittlerweile bestehen hierfür zahlreiche Ansätze und Konzepte, die als Basis für eine Nachhaltigkeitsbewertung dienen könnten (Gottschild 2017; Grunwald 2016; Dusseldorp 2014; Sala et al. 2013; Kopfmüller 2007; Jörissen 2005).

Aufgrund dieser Vielfalt im „'Supermarkt' der Nachhaltigkeitsangebote“ (Grunwald 2016, S. 71), wird Nachhaltigkeit inzwischen „als etwas Beliebiger empfunden, als interessen-geleitet verwendetes Label für unterschiedlichste Inhalte, als Deckmantel für ('noch mehr') Umweltschutz, als Marketing-Schlagwort“ (Hartmuth et al. 2006, S.100). Gleichzeitig scheinen Vorstellungen, was mit Nachhaltigkeit für ein bestimmtes gesellschaftliches Problemfeld in einem bestimmten Kontext gemeint sein könnte, nach wie vor „bestenfalls vage“ (ebd.). Dies bedeutet allerdings keineswegs, dass es keine plausiblen und gebräuchlichen allgemeinen Annahmen und Verfahren gibt oberhalb der Ebene grundsätzlicher theoretischer Erwägungen.

Um der Behauptung der "Vagheit" von Nachhaltigkeit zu begegnen, erweist es sich als zielführend, den normativen, abstrakten Gehalt des globalen Leitbildes für ein bestimmtes gesellschaftliches Problemfeld auszubuchstabieren, d.h. zu operationalisieren, und für einen bestimmten lokalen Kontext zu konkretisieren, d.h. zu kontextuali-

sieren (Dusseldorp 2014; Hartmuth et al. 2006). In diesem Falle erfolgt dies für den Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand im Untersuchungsgebiet. Da der Wasser-Energie-Nexus hier als gesamtgesellschaftliches Problemfeld aufgefasst wird, ist darüber hinaus ein Konzept notwendig, das alle gängigen Nachhaltigkeitsdimensionen - Ökologie, Ökonomie, Soziales - inkludiert, aber „Nachhaltigkeit nicht additiv, sondern dimensionenübergreifend konzeptualisier[t]“ (Gottschild 2017, S. 329). Das „integrative Konzept nachhaltiger Entwicklung“ (Kopfmüller et al. 2001) erfüllt diese Anforderungen, wird hier verwendet und in Kapitel 3 erläutert. Die hierzu verwendeten Methoden werden ebenfalls dort besprochen.

1.6 Zielsetzung, Abgrenzung und wissenschaftliche Herausforderungen

Wie zuvor geschildert, könnte der fehlende Einbezug des städtischen Gebäudebestandes bei Transformationen des Wasser-Energie-Nexus darin liegen, dass diesbezüglich noch zahlreiche offene Fragen bestehen. Die Dissertation hat deshalb das Ziel das Systemverständnis und die Informationsbasis für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand signifikant zu verbessern. Dadurch soll gewährleistet werden, dass eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet. Hierzu werden folgende Teilziele verfolgt:

- Darlegung und Visualisierung der Entwicklung und Wahl von Systemalternativen zur Transformation des Wasser-Energie-Nexus für ein städtisches Bestandsviertel durch Entscheidungspfade und deren ausführliche Erfassung (Systembetrieb und -konstruktion)
- Konkretisierung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung durch systematische Umsetzung einer Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung für den Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand
- Vergleich von Status-Quo-System und Systemalternativen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitspotenziale
- Überprüfung der Übertragungsmöglichkeiten des Fallbeispiels auf andere städtische Bestandskontexte

Seit 2011 wurde eine Reihe von Forschungsarbeiten zum Wasser-Energie-Nexus zu einem Spektrum an Themenstellungen erstellt (Endo et al. 2015). Diese reichen von integrierten und dynamischen Ressourcenbeurteilungen (z.B. Smajgl et al. 2016; Giampietro et al. 2014) über ökobilanzielle Untersuchungen einzelner energieintensiver wasserwirtschaftlicher Anlagen (z.B. Li et al. 2013; Muñoz et al. 2010), Nutzerperspektiven von Systemalternativen (z.B. Hegger und van Vliet 2010; Hegger et al. 2008), Nexus als Gegenstand von Risikomanagement und im Umgang mit vernetzten Versorgungsrisiken (z.B. Angenendt und Dröge 2013; Bizikova et al. 2013) bis hin zu institutionsökonomischen Analysen zur Umsetzung von Systemalternativen (z.B. Ott et al. 2016). Die bestehenden Forschungsarbeiten beleuchten damit einzelne Systemkomponenten und Einflussfaktoren des Nexus, es besteht jedoch nach wie vor ein Bedarf an systemanalytischen Arbeiten wie dieser, die sowohl den technischen Untersuchungsgegenstand weiter fassen als auch ein umfangreicheres Analyseinstrumentarium einsetzen (Kenway et al. 2019).

Daneben adressiert eine Vielzahl von Bewertungsansätzen nachhaltige Stadtentwicklung und innerhalb dieses Rahmens implizit Fragestellungen rund um den städtischen Wasser-Energie-Nexus (u.a. Sustainable Cities Index; RFSC; SDGs; City Blueprints; European Green City Index; Urban Metabolism Framework) (Arcadis 2018; French Ministry of Housing and Sustainable Homes et al. 2017; UN 2016; Van Leeuwen und Sjerps 2014; Economist Intelligence Unit 2009; Minx et al. 2011). Im deutschsprachigen Raum haben sich bereits mehrere Forschungsprojekte (u.a. AKWA 2100; netWORKS; DEUS 21; TWIST++) (Hiessl et al. 2005; Michel et al. 2010; Hiessl et al. 2010; Sartorius et al. 2016) und Dissertationen (Baron 2018; Hillenbrand 2009; Herbst 2008) auch explizit mit der Bewertung von Alternativen zur zentralen Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie von Transformationsstrategien befasst. Außerdem hat die DWA einen Leitfaden zur multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserinfrastruktursystemen erarbeitet (DWA 2018b).

Die Arbeit hier geht einen Schritt weiter als die bestehenden Bewertungsansätze. Indem Nexus in dieser Arbeit nicht nur als ein ressourcenbedingtes, sondern gesamtgesellschaftliches Problemfeld umrahmt wird, werden das Status-Quo-System und die Systemalternativen nicht nur in ihren technischen Systemkomponenten erfasst, sondern auch in deren nicht-technischer Ausgestaltung (siehe Kapitel 2.3.3). Damit werden weitreichendere Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung berücksichtigt. Um das

vorhandene Know-How zu nutzen, werden bei der Nachhaltigkeitsbewertung Kriterien aus den bestehenden Ansätzen eingebunden. Entgegen bestehender Bewertungsansätze erfolgt die Zusammenstellung der Indikatoren über eine systematische Konkretisierung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung in der Umsetzung des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung.

Eine eher praktische Herausforderung für die Arbeit und Forschung bezüglich Wasser-Energie-Nexus ergibt sich dabei durch die Datenverfügbarkeit (UNECE 2018; Dai et al. 2018; McGrane et al. 2018; Flammini et al. 2015). Auf Landesebene bieten frei zugängliche Datenbanken wie z.B. AQUASTAT (FAO 2016) oder Behörden wie z.B. die Landesanstalten für Umwelt (LUBW 2019) den Zugang zu Daten bezüglich des Ressourcendargebots und der Ressourcenbeanspruchung. Mit zunehmend kleinerer Maßstabsebene hingegen ist der Zugang eingeschränkt (Allouche et al. 2019; McCarl et al. 2017). Sind Daten verfügbar, so liegen diese aufgrund der organisatorischen sowie institutionellen Trennung der Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie der Energieversorgung in der Regel fragmentiert vor und spiegeln nicht die übergreifenden Verbindungen wider (McGrane et al. 2018). Zudem besteht ein Mangel an spezifischen stoffstrom-, material- und nutzerbezogenen Daten zu innovativen Systemkomponenten (Covarrubias 2018; Hoolohan et al. 2018; Smajgl et al. 2016; Bhaduri et al. 2015; van Vliet und Spaargaren 2010). Hier ist deshalb in Kooperation mit Fachexperten, Herstellern und Forschungspartnern und durch enge Kontakte mit lokalen Stadtämtern eine extensive sowohl quantitative als auch qualitative Datenerhebung und -verarbeitung erfolgt.

Eine weitere wissenschaftliche Herausforderung besteht in der Frage der Systemgrenzen. Da die Schnittmenge zwischen der Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie Energieversorgung nicht klar abgegrenzt ist und die Beziehungen zwischen den Bereichen weitreichend sind, kann der Wasser-Energie-Nexus beispielsweise auch zu einem Wasser-Energie-Nahrungs-Nexus (Scanlon et al. 2017; Garcia und You 2016; Bhaduri et al. 2015; Leck et al. 2015; Flammini et al. 2015; ODI et al. 2012) oder gar Ressourcen-Nexus (Bleischwitz et al. 2017; Andrews-Speed et al. 2012) ausgedehnt werden. Durch diese Expansion können die weitreichenden Verbindungen des Wasser-Energie-Nexus aufgezeigt werden (Dai et al. 2018; Giupponi und Gain 2016; Drews et al. 2016; Cash et al. 2006). Zugleich wird der Ansatzpunkt zur Behandlung des Themas jedoch zu einem „Überall und Nirgendwo“ (Blackstock et al. 2018: <https://magic-nexus.eu/content/where-do-we-govern-nexus>). Hier wurde deshalb eine konzentrierte

Darstellung des Wasser-Energie-Nexus anhand eines Fallbeispiels gewählt, um detaillierte Informationen zu offenen Fragen zu liefern.

Für die Operationalisierung und Kontextualisierung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung liegt eine Herausforderung darin, den Anspruch nach Vollständigkeit für die Nachhaltigkeitsbewertung mit Relevanzeinschätzungen in Einklang zu bringen, damit diese operabel bleibt (Grunwald 2010). Wie zuvor erwähnt, liegt bereits eine Vielzahl von Bewertungskriterien vor und es gilt für den spezifischen Forschungsgegenstand und -kontext nicht nur abzuwägen „*ob* etwas relevant oder irrelevant [...] ist, sondern *wie* relevant etwas ist“ (Grunwald 2016, S. 336). Hier wird dieser Herausforderung begegnet indem die Auswahl der Indikatoren durch Stakeholder und ExpertInnen geprüft wurde (siehe Kapitel 3.2) und dadurch, dass der Hintergrund je Indikator ausführlich dargelegt wird (siehe Kapitel 3.4).

1.7 Gliederung

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert (siehe Abbildung 2).

In Kapitel 2 wird das analysierte Bestandsviertel vorgestellt und die Wahl als Fallbeispiel erläutert. Danach wird das Status-Quo-System in diesem Viertel vorgestellt. Anschließend werden für die Systemalternativen vor dem Hintergrund der Defizite des gegenwärtigen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems Ziele formuliert. Mit Hilfe von Entscheidungspfaden werden drei Systemalternativen erarbeitet und visualisiert. Sie repräsentieren unterschiedliche technologische Ausgestaltungen und Zentralisierungsgrade einer Transformation für die besonderen Gegebenheiten im Bestand. Neben der deskriptiven Darstellung erfolgt hier auch die Quantifizierung des Systembetriebes und der Konstruktionsmaterialien.

In Kapitel 3 wird zunächst das verwendete Konzept und das Vorgehen zur Nachhaltigkeitsbewertung erläutert. Es folgt eine Zusammenstellung der Indikatoren und Darlegung von deren Bedeutung für den Forschungsgegenstand und -kontext. Die Herleitung der Indikatorenwerte erfolgt u.a. durch eine Umweltbewertung, Kostenbewertung sowie Analyse der Nutzerperspektiven, die für diesen Zweck erstellt wurden.

In *Kapitel 4* erfolgt die Auswertung, Darstellung und Diskussion der Ergebnisse. Die Bewertung der einzelnen Systemalternativen wird mit dem Status-Quo-System verglichen und die Systemalternative identifiziert, die das größte Potenzial aufweist zu einer nachhaltigen Entwicklung im Untersuchungskontext beizutragen. Der gewählte Bewertungsansatz und die verwendeten Daten werden diskutiert. Außerdem werden Verallgemeinerungs- sowie Übertragbarkeitsoptionen der Ergebnisse aus dem Fallbeispiel thematisiert.

In *Kapitel 5* werden die Erkenntnisse zusammengefasst, über eine Implementierung der Systemalternativen reflektiert und weiterer Forschungsbedarf formuliert.

Abbildung 2 Aufbau der Arbeit

Kapitel 1	Problem	Ziel	Abgrenzung und Herausforderungen
Kapitel 2	Untersuchungs-kontext	Analyse Status-Quo-System	Findung und Analyse Systemalternativen
Kapitel 3	Nachhaltigkeits-bewertung	Auswahl Indikatoren	Herleitung Indikatorenwerte
Kapitel 4	Auswertung Ergebnisse	Darstellung Ergebnisse	Diskussion Ergebnisse
Kapitel 5	Zusammenfassung Erkenntnisse	Ausblick	

Quelle: Eigene Darstellung

2 Untersuchte Systeme

Die Systeme sind definiert durch das Untersuchungsgebiet, die technischen und infrastrukturellen Systemkomponenten sowie die nicht technische Ausgestaltung, die im Folgenden dargestellt werden. Die Darstellung enthält zahlreiche quantitative Informationen. Sie umfasst damit auch wesentliche Teile der Umwelt- und Kostenbewertung.

2.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet dient das Stadtviertel (STV) Rohrbach-Hasenleiser der baden-württembergischen Stadt Heidelberg (siehe Abbildung 3). Es wird als reines Wohnbestandsviertel analysiert und somit werden ausschließlich häusliche Stoffströme betrachtet.⁴ Zu den angegebenen 4.659 EinwohnerInnen (EW) (Stadt Heidelberg 2014) werden die 1.692 SchülerInnen (Stadt Heidelberg 2014) der im Viertel liegenden Gesamtschule addiert. Da es sich um eine Ganztageschule handelt, sind ähnliche Stoffströme wie durch die angegebenen EinwohnerInnen zu erwarten. Um Ferienzeiten und Berufstätigkeit zu berücksichtigen, werden 80% dieser Summe als Einwohnerzahl des Stadtviertels (\cong 5.081 EW / STV) festgelegt. Die Einwohnerzahl im Viertel ist seit 1980 nahezu konstant (Stadt Heidelberg 2014).

⁴ Nicht in die Untersuchung eingeflossen ist das an der östlichen Grenze liegende Gelände des ehemaligen U.S. Hospitals, da es als Konversionsfläche einen Sonderfall für Bestandskontexte darstellt.

Abbildung 3 Abgrenzung des Untersuchungsgebiets



Quelle: Weindl 2016, eigene Kennzeichnung des Untersuchungsgebiets

Die Wahl als Untersuchungsviertel gründet dabei auf folgenden Faktoren. Zum einen ist das Viertel größtenteils in den 1970er Jahren entstanden, d.h. vor der ersten Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV 1977). Es ist dadurch noch keiner vollständigen energetischen Modernisierung unterzogen worden (Stadt Heidelberg 2017a; BMUB 2016) und könnte deshalb in naher Zukunft für Transformationsstrategien in Frage kommen (Koziol et al. 2006). Zum anderen spiegelt das Viertel die städtebaulichen Herausforderungen bei Transformationen des Wasser-Energie-Nexus wider, da die Systemalternativen auf Basis der unterschiedlichen Gebäudetypen ausgelegt werden müssen. Zum Bestand gehören Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser sowie Mehrfamilienhäuser und Geschosswohnungsbauten (Stadt Heidelberg 2014). Ihre Anzahl (siehe Tabelle 1) im Untersuchungsviertel wird anhand von Luftbildern, die durch das Vermessungsamt der Stadt Heidelberg zur Verfügung gestellt wurden, ermittelt.

Tabelle 1 Gebäudetypologie & Anzahl im Untersuchungskontext

Gebäudetyp¹ / Haushalte	Anzahl²
Einfamilienhäuser	34
Doppelhäuser	33
Reihenhäuser	199
Mehrfamilienhäuser (3-4 Geschosse)	45
Geschosswohnungsbauten (5 Geschosse und mehr)	64
Haushalte	2.395

Quelle: Anzahl Gebäude eigene Berechnung; Typologie und Anzahl Haushalte Stadt Heidelberg 2014

Darüber hinaus bewirkt auch im Untersuchungskontext der Klimawandel merkliche Veränderungen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2015b). Zwar werden die Sommer im Bundesland Baden-Württemberg trockener, jedoch ist zugleich eine deutliche Zunahme sowohl in Häufigkeit und Intensität als auch Dauer von Starkniederschlägen zu verzeichnen (KLIWA 2006), welche das bestehende Abwasserentsorgungssystem unter Veränderungsdruck setzt (Karthe et al. 2017; Kluge und Libbe 2010). Durch die zunehmenden Trockenperioden entsteht eine Belastung für die lokalen Trinkwasserbezugsquellen (Schaub und Tosun 2019). Die Starkregenereignisse können die Kapazität der bestehenden lokalen Infrastruktur überlasten (DWA 2010a; KISS 2013).

Zuletzt erfolgte die Spezifikation des Untersuchungsquartiers in enger Abstimmung mit lokalen Behörden, wodurch belastbare amtliche Daten zugänglich waren.

2.2 Status-Quo-System

Das Status-Quo-System (SQ) (siehe Abbildung 5) stellt das gegenwärtige System zur Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie Energieversorgung im Stadtviertel dar. Es umfasst eine zentrale Trinkwasserver- und Mischwasserentsorgung (Stadtwerke Heidelberg 2014a; AVZ Heidelberg n.dat.; Gujer 2007) sowie eine zentrale Wärmeversorgung (Stadtwerke Heidelberg 2014b) und Bioabfallentsorgung (Stadt Heidelberg 2017). Die Wärmeversorgung und Bioabfallentsorgung werden als Primärfunktionen des Status-Quo-Systems (siehe Abbildung 4) mitbetrachtet, weil die Systemalternativen Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser als explizites Ziel haben und Bioabfälle aus den Haushalten integrieren (siehe Kapitel 2.3).

Abbildung 4 Primärfunktionen des Status-Quo-Systems

- Sichere Bereitstellung von Trinkwasser
- Komfortable Wärmeversorgung für Raumwärme und Warmwasserbereitung
- Sichere Ableitung und Behandlung des häuslichen Abwassers sowie anfallenden Regenwassers
- Entsorgung und Verwertung von Bioabfällen

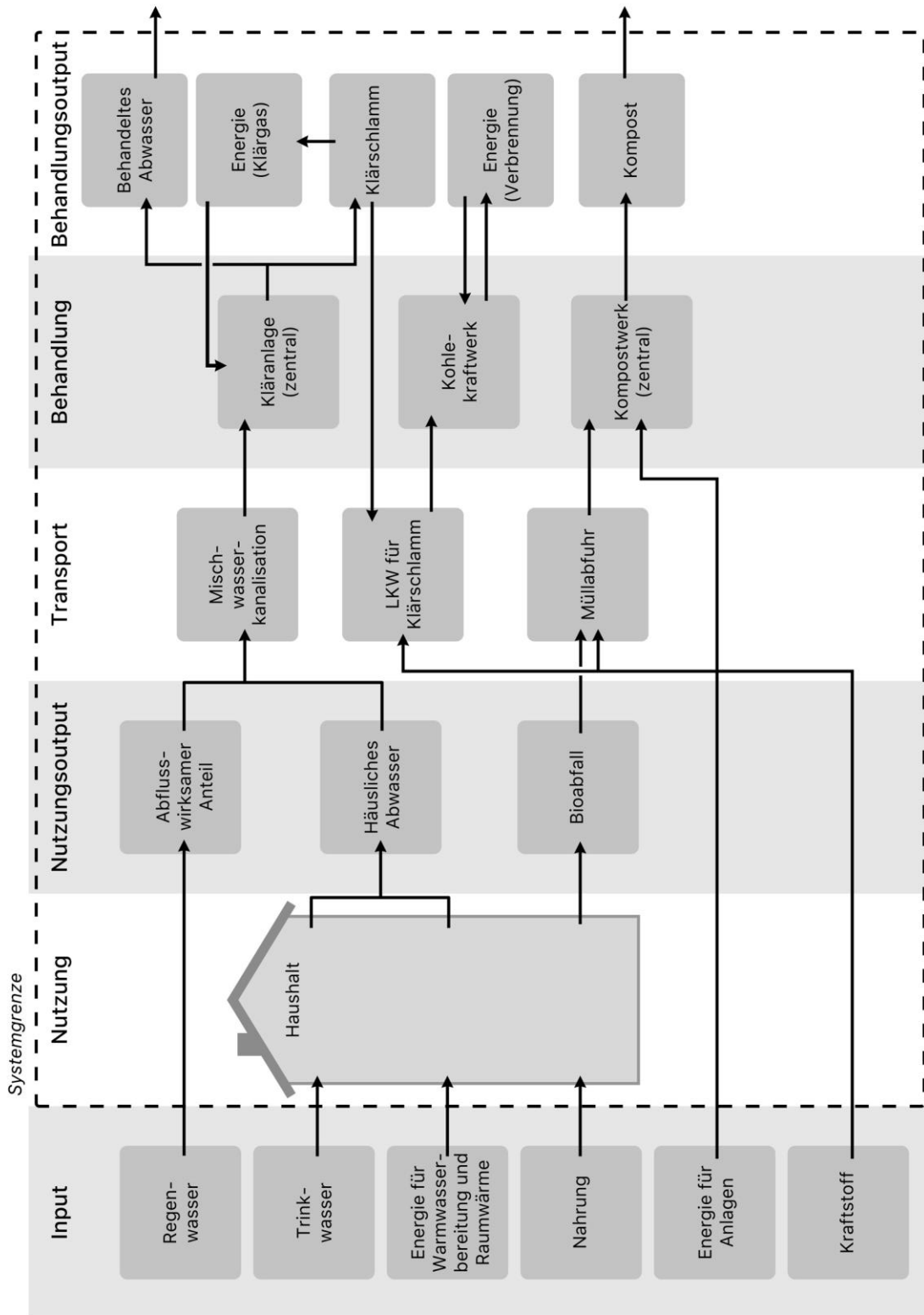
Quelle: Eigene Definition

Die Haushalte im Status-Quo-System beziehen hochwertiges Trinkwasser für alle Haushaltszwecke unabhängig der Qualitätsanforderungen (siehe Kapitel 2.4.1). Fernwärme mit Kohle als Hauptenergieträger wird für Raumwärme und die Warmwasserversorgung bezogen (Stadtwerke Heidelberg 2014b) (siehe Kapitel 2.4.6). Der in den Haushalten anfallende Bioabfall wird über die kommunale Müllabfuhr abtransportiert und im zentralen Kompostwerk zu Kompost weiterverarbeitet (Stadt Heidelberg 2017) (siehe Kapitel 2.4.5). Das in den Haushalten produzierte Abwasser wird gemeinsam mit dem abflusswirksamen Anteil des Regenwassers (d.h. der Anteil, der den Kanal erreicht) über die bestehende Mischwasserkanalisation abtransportiert und in einer zentralen Kläranlage behandelt (siehe Kapitel 2.4.3). Bei der Mischwasserkanalisation handelt es sich um das vorherrschende Abwasserentsorgungssystem in der südlichen Hälfte Deutschlands (Gujer 2007). Durch die Auslegung für sämtliches

häusliches Abwasser und Regenwasser sind die abwasserbedingten Systemkomponenten im Mischsystem material- und kapitalintensiv (Schaum 2018; Ott et al. 2016). Der Zustand des Kanalbestandes wird im analysierten Stadtviertel weitestgehend als „gut“ eingestuft (Tiefbauamt Heidelberg 2018), d.h. im Gegensatz zu anderen Städten in Deutschland liegt kein akuter bis mittelfristiger Sanierungsbedarf vor (siehe hierzu DWA 2016a, 2015).

Nach der Behandlung durch die Kläranlage wird das Abwasser in das lokale Fließgewässer (Neckar) eingeleitet. Mikroschadstoffe und hygienische Belastungen können durch die konventionelle Abwasserbehandlung nicht vollständig entfernt werden und stellen eine Gewässerbelastung dar (UBA 2018b; UBA 2015a; Schwartz und Alexander 2014). Der aus der Behandlung zurückbleibende Klärschlamm wird in der Kläranlage zu Klärgas vergärt (AVZ Heidelberg n.dat.), das den Energiebedarf der Kläranlage deckt (siehe Kapitel 2.4.3). Der nach der Vergärung zurückbleibende Klärschlamm wird je nach Ausschreibung in Kohlekraftwerken (z.B. im Raum Köln) mitverbrannt (AVZ Heidelberg 2018). Die bei der Verbrennung erzeugte Energie deckt den Eigenenergiebedarf der Co-Verbrennung (siehe Kapitel 2.4.3). Abgesehen vom Klärschlamm findet keine Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen (Nährstoffe, Wärme, Wasser) statt (Hiessl et al. 2005).

Abbildung 5 Systemdarstellung des Status-Quo-Systems



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DWA 2008

2.3 Systemalternativen

Hier werden zunächst grundlegende Bezeichnungen zur Darstellung der Systemalternativen definiert und die gemeinsamen Ziele und technischen Voraussetzungen für alle Systemalternativen geschildert. Mit Hilfe von Entscheidungspfaden wird anschließend die Wahl der technischen Systemkomponenten der drei Systemalternativen erarbeitet und visualisiert. Im Anschluss wird die nicht technische Ausgestaltung der Systemalternativen festgelegt, die Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation ist. Danach werden die einzelnen Systemalternativen detailliert einzeln beschrieben.

2.3.1 Bezeichnungen

Die folgenden Bezeichnungen werden für die Darstellung der Systemalternativen wie folgt definiert (in Anlehnung an DIN EN 16323: 2014; DIN EN 12056: 2000; Bieker 2009; Gujer 2007):

Semizentral	Für das Stadtviertel ausgelegt
Dezentral	Für ein Gebäude ausgelegt
Grauwasser	Fäkalienfreies, gering verschmutztes, meist warmes Abwasser aus Duschen, Waschmaschinen, Spülmaschinen und Handwaschbecken
Betriebswasser	Für Nutzungen, die keine Trinkwasserqualität erfordern, aufbereitetes Grauwasser
Schwarzwasser	Toilettenspülwasser inklusive Fäkalien
Regenwasserauskopplung	Verringerung des Regenwasseranteils, der den Kanal erreicht (abflusswirksamer Anteil)

2.3.2 Technische Systemkomponenten

Für die Systemalternativen werden vor dem Hintergrund der Defizite des gegenwärtigen Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems die in Abbildung 6 dargestellten Ziele formuliert (siehe Abbildung 6) (Schaum 2018; WWAP 2017; Libbe et al. 2017; Felmeden et al. 2017). Es wird dabei vorausgesetzt, dass die erarbeiteten Systemalternativen die Primärfunktionen des Status-Quo-Systems ohne Einschränkungen für die NutzerInnen und das erreichte Qualitätsniveau erfüllen.

Abbildung 6 Ziele Systemalternativen

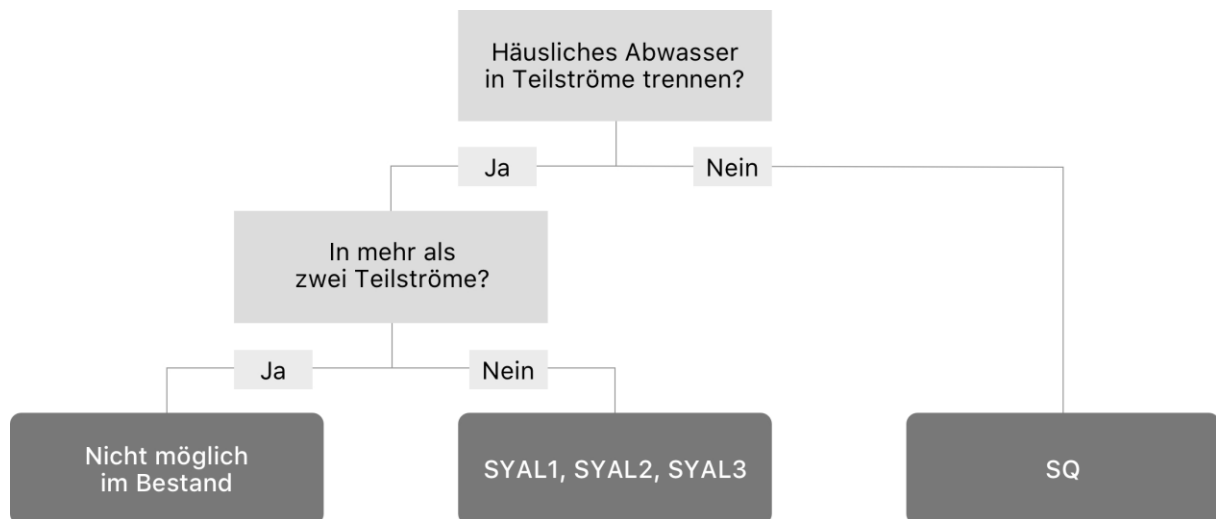
- Reduktion der eingesetzten Ressourcen (Trinkwasser, Energie, Baumaterial)
- Rückgewinnung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen (Wasser, Wärme, Nährstoffe)
- Erzeugung von erneuerbarer Energie aus Abwasser
- Verbesserte Elimination von Mikroschadstoffen und Keimen durch die Abwasserbehandlung
- Anpassung an klimatische Veränderungen

Quelle: Schaum 2018; WWAP 2017; Libbe et al. 2017; Felmeden et al. 2017

Grundlegende technische Voraussetzung für eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus ist die Trennung des Abwassers in seine Teilströme, da es so über den Klärschlamm hinaus als Ressource nutzbar gemacht werden kann (WWAP 2017; Libbe et al. 2017; DWA 2006; Kluge et al. 2003). Die Teilstromtrennung ist daher gemeinsames Element von Systemalternative 1 (SYAL1), Systemalternative 2 (SYAL2), und Systemalternative 3 (SYAL3). Ausgehend davon sind Ausgestaltungen durch verschiedene Systemkomponenten möglich. Die Entscheidungspfade, die zur jeweiligen Systemalternative geführt haben, werden im Nachfolgenden erläutert und visualisiert. Die Änderungen technologischer Komponenten zum jeweils zuvor vorgestellten System werden in der Systemdarstellung der jeweiligen Systemalternative farblich markiert.

In allen drei Systemalternativen erfolgt die Teilstromtrennung in zwei Teilströme (siehe Abbildung 7): Das meist warme, gering verschmutzte Grauwasser (z.B. aus Duschen und Geschirrspülern) und das nährstoffreiche, jedoch stark kontaminierte Schwarzwasser aus den Toiletten (DWA 2010a; 2006). Eine Trennung in weitere Teilströme (z.B. in Form einer zusätzlichen Urinseparation) ist zwar technisch möglich, wird jedoch aus folgenden Gründen nicht dargestellt. Zunächst ist die Trennung in zwei Teilströme im bestehenden Rohr realisierbar und damit weniger invasiv hinsichtlich der baulichen Eingriffe im Bestand. Eine nachträgliche Trennung in drei Teilströme ist durch den Umfang des Bestandrohres nicht möglich (Veser und Londong, 2017; Veser 2015) (siehe Abbildung 8). Darüber hinaus wird von einer Trennung in mehr als zwei Teilströme abgesehen, da im bisher größten Projekt in Deutschland mit Urinseparation eine Vielzahl von Funktionsstörungen (z.B. Verkrustungen der kleinteiligen Funktionsteile) auftraten (siehe hierzu ausführlich Winker und Rieck 2013). Die Projektverantwortlichen kamen deshalb zum Schluss, dass vorerst keine nachhaltige Marktakzeptanz für diese zusätzliche Teilstromtrennung im deutschen Wohnkontext zu erwarten ist (Winker und Rieck 2013).

Abbildung 7 Entscheidungspfad zur Teilstromtrennung



Quelle: Eigene Darstellung

Zur Trennung in zwei Teilströme wird das bestehende Rohr an einer Stelle im Gebäude geöffnet und per Druckluft zunächst ein Kalibrierschlauch aus PVC und dann zwei Gewebesschläuche aus Polyester eingeschoben. Für das Schwarzwasser wird wegen des geringeren Mengenaufkommens dabei ein Schlauch mit geringerem Durchmesser

vorgesehen. Durch Aushärtung mit Epoxidharz ergibt diese Konstellation zwei getrennte Leitungen (Veser und Londong 2017; Veser 2015) (siehe Abbildung 8).

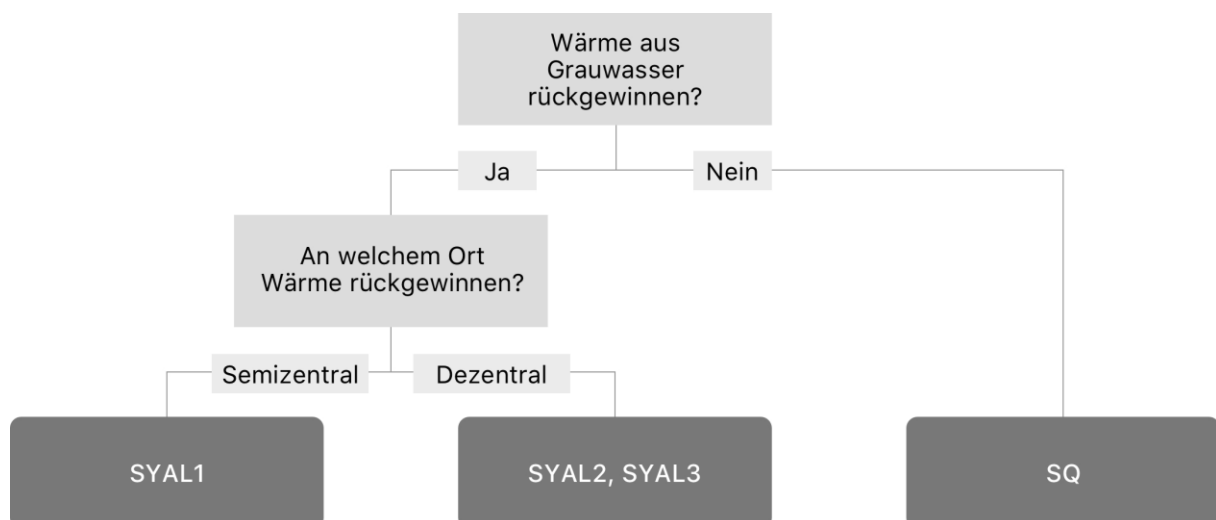
Abbildung 8 Trennung im Bestandsrohr



Quelle: Veser 2015 (Bildzuschnitt)

Durch die Trennung des Abwassers in die beiden Teilströme wird die im Grauwasser enthaltene Wärme bewahrt und kann rückgewonnen werden (Winker und Schramm 2015; Menger-Krug et al. 2010; Hiessl et al. 2010). Die Systemalternativen unterscheiden sich dabei im Ort der Rückgewinnung, d.h. ob die Wärme semizentral über einen Wärmetauscher im Kanal (SYAL1) oder dezentral in den Haushalten (SYAL2, SYAL3) rückgewonnen werden soll (siehe Abbildung 9).

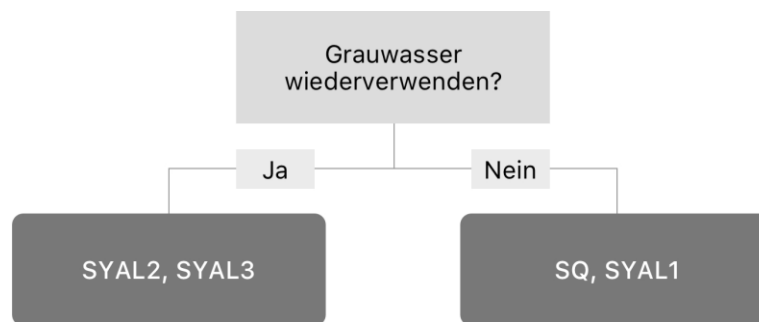
Abbildung 9 Entscheidungspfad zur Wärmerückgewinnung



Quelle: Eigene Darstellung

Das abgetrennte Grauwasser kann unter geringem Aufwand zu Betriebswasser aufbereitet und für Haushaltszwecke, die nicht den gesetzlichen Trinkwasserqualitätsanforderungen unterliegen, d.h. für alle Einsatzbereiche außer Trinken, Kochen und Körperhygiene, als Betriebswasser genutzt werden. Die Systemalternativen unterschieden sich, ob zusätzlich zur Wärmerückgewinnung eine (SYAL2, SYAL3) bzw. keine (SYAL1) Grauwasserwiederverwendung vorgesehen wird (siehe Abbildung 10). Für eine Grauwasserwiederverwendung spricht dabei die Entlastung der Trinkwasserbezugsquellen durch eine weitere Wasserbezugsquelle und der damit einhergehenden Reduktion des Trinkwasserbedarfs (Arcadis 2016; Kluge und Libbe 2010). Gegen eine Grauwasserwiederverwendung spricht der zusätzliche Implementierungsaufwand für die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen (Nolde 2013a; fbr 2005).

Abbildung 10 Entscheidungspfad zur Grauwasserwiederverwendung

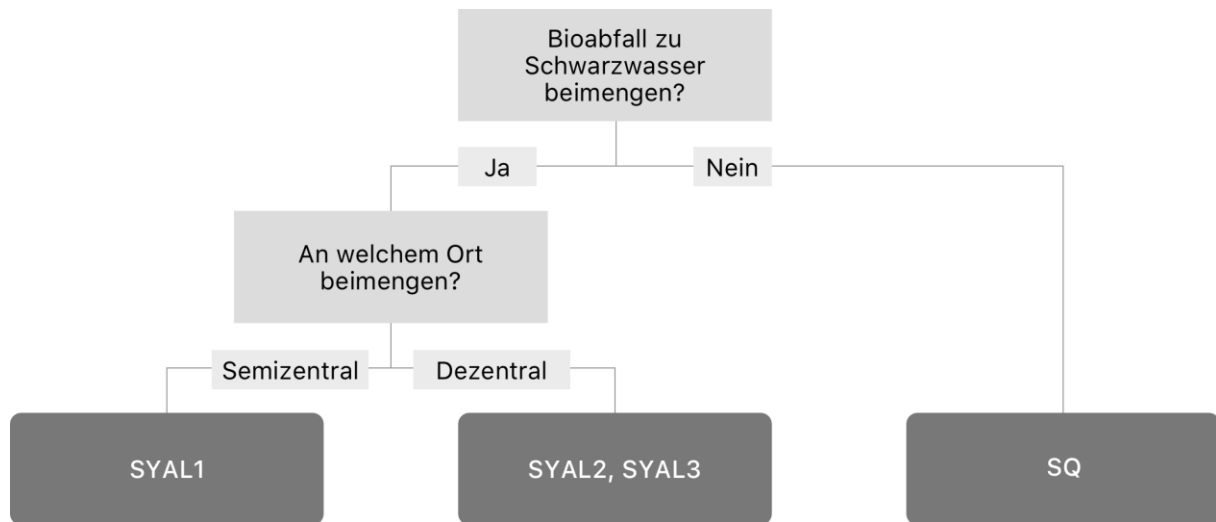


Quelle: Eigene Darstellung

Aus dem abgetrennten Schwarzwasser und den Bioabfällen wird in allen Systemalternativen Biogas erzeugt sowie organischer Dünger hergestellt (Hertel et al. 2015; Wendland 2009). Die Co-Vergärung des Schwarzwassers und des Bioabfalls eröffnet die Möglichkeit zwei „Abfall“-ströme in einem zu behandeln. Die Systemalternativen unterscheiden sich dabei im Ort der Beimengung des Bioabfalls, d.h. ob dieser semizentral (SYAL1) durch eine Zerkleinerungsanlage neben der Biogasanlage, oder dezentral (SYAL2, SYAL3 durch Küchenabfallzerkleinerer je Haushalt beigemengt wird (siehe Abbildung 11). Durch das Schwarzwasser wird die Biogasausbeute im Vergleich zur reinen Biomasseverwertung merklich gesteigert (Han et al. 2016). In Kombination mit der rückgewonnenen Wärme aus dem Grauwasser ersetzt das erzeugte Biogas die bisherigen, nicht erneuerbaren Energieressourcen für Warmwasserbereitung und Raumwärme im Stadtviertel (siehe Kapitel 2.4.6) und deckt den Energiebedarf der

Biogasprozesse ab (siehe Kapitel 2.4.5). Der bei der Biogaserzeugung zurückbleibende Gärrest wird als Düngemittel eingesetzt und enthält durch das nährstoffreiche Schwarzwasser wesentlich mehr Nährstoffe als der Kompost (Steinmetz 2012) (siehe Kapitel 2.4.5).

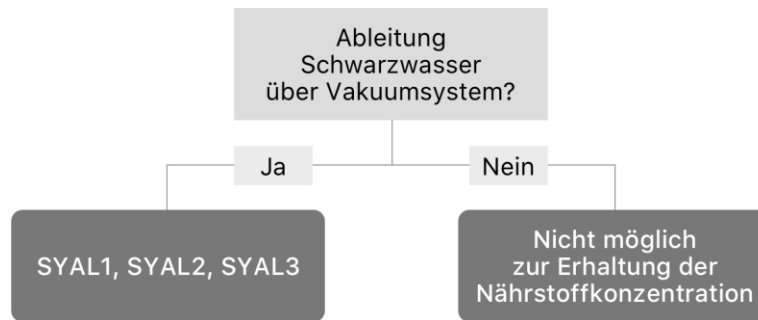
Abbildung 11 Entscheidungspfad zur Beimengung des Bioabfalls



Quelle: Eigene Darstellung

Damit Biogas erzeugt und organischer Dünger hergestellt werden kann, muss der Bakteriengehalt und die Nährstoffkonzentration des Schwarzwassers erhalten bleiben (Hertel et al. 2015; Wendland 2009). Um dies zu erreichen und den Abtransport des Schwarzwassers innerhalb der bestehenden Rohre zu realisieren, ist für alle Systemalternativen ein Vakuumsystem inklusive Vakuumtoiletten erforderlich (Veser und Londong, 2017; Veser 2015; Staben 2008) (siehe Abbildung 12). Diese bedürfen im Vergleich zu konventionellen Spültoiletten deutlich weniger Spülwasser und verhindern dadurch eine Verdünnung des Schwarzwassers (Steinmetz 2012; Zech et al. 2009).

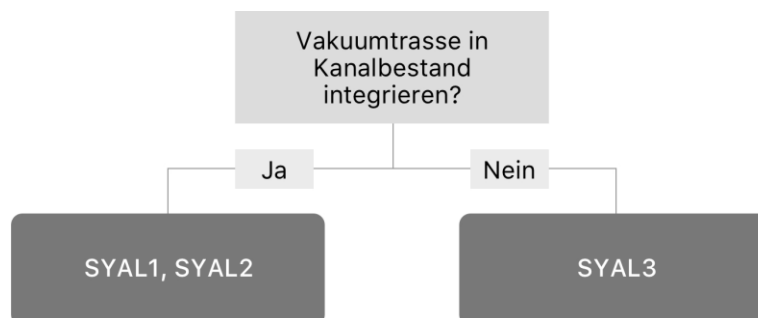
Abbildung 12 Entscheidungspfad zum Vakuumsystem



Quelle: Eigene Darstellung

Alle Systemalternativen sehen ein Vakuumsystem vor, unterscheiden sich jedoch darin, ob die Vakuumtrasse in den bestehenden Kanal integriert wird (SYAL1, SYAL2) oder nicht (SYAL3) (siehe Abbildung 13). Durch die Integration der Vakuumtrasse soll eine größtmögliche Nutzung der vorhandenen Kanäle und damit verbundener Vermögenswerte erzielt werden (Kluge und Libbe 2010). Wird die Vakuumtrasse extra verlegt, kann der bestehende Kanal hingegen gänzlich durch eine weniger materialintensive und flexiblere Infrastruktur ersetzt werden (z.B. WWAP 2017; Martin et al. 2015; Maurer 2011; Koziol et al. 2006).

Abbildung 13 Entscheidungspfad zur Integration der Vakuumtrasse



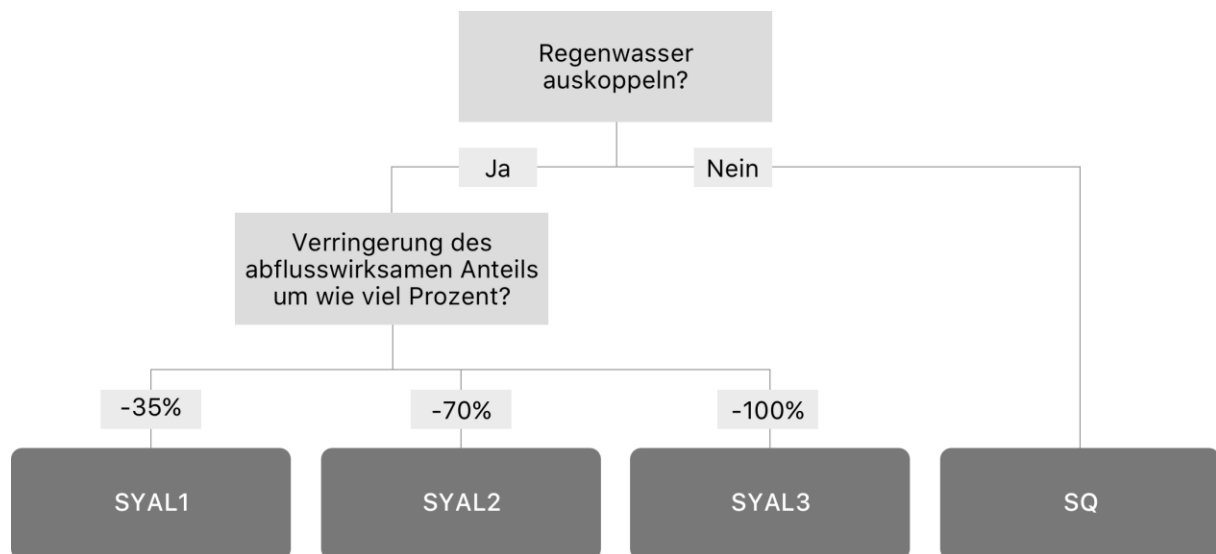
Quelle: Eigene Darstellung

Neben der Teilstromtrennung und dem Abtransport des Schwarzwassers durch ein Vakuumsystem ist ein weiteres gemeinsames Element aller Systemalternativen die Regenwasserauskopplung. Dabei wird das Regenwasser zunächst vom häuslichen Abwasser getrennt gehalten, um so die Menge an behandlungsintensivem Mischwasser und letztlich die für die Abwasserbehandlung benötigte Energie zu senken (Peter-Fröhlich et al. 2006; DWA 2006). Darüber hinaus wird durch Maßnahmen zur

Versickerung und Erhöhung der lokalen Verdunstungsrate, z.B. durch Gebäudebegrünung, gezielte Bepflanzung oder offenporige Beläge (Matzinger et al. 2017; Sieker et al. 2008), der abflusswirksame Anteil, d.h. die Menge, die vom Kanal aufgenommen werden muss, verringert. Dadurch wird zum einen ein Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas geleistet (Sieker et al. 2019; SRU 2018; BfN 2017a; BMUB 2015). Zum anderen können die beteiligten Infrastrukturen (Kläranlage, Kanalbestand) volumenmäßig kleiner und damit weniger materialintensiv gestaltet (Otterpohl 2011; Zech et al. 2009) und die Fließgewässer hydraulisch entlastet werden (Böcher 2018; Sieker et al. 2008).⁵

Die Verringerung des abflusswirksamen Anteils wird prozentual je Systemalternativen variiert (SYAL1: -35%, SYAL2: -70%; SYAL3: -100%) (siehe Abbildung 14).

Abbildung 14 Entscheidungspfad zur Regenwasserauskopplung



Quelle: Eigene Darstellung

Die hierfür angesetzten Prozentzahlen wurden so gewählt, dass sie eine gewisse Bandbreite der Regenwasserauskopplung abdecken. Dabei soll eine Verringerung um 35% mögliche bauliche Einschränkungen, die lediglich eine moderate Regenwasserauskopplung zulassen und eine Verringerung um 100% das Extrembeispiel einer

⁵ Eine hydraulische Belastung stellt z.B. eine regenbedingte plötzliche Abflusserhöhung dar, die zur Erosion der Gewässersole, einem Drift von Gewässerbewohnern und dem Verlust von Lebensräumen führen kann (Böcher 2018).

„kanallosen“ Abwasserentsorgung repräsentieren. Die gewählten 70% dienen zur Darstellung eines Falles, in dem möglichst viele Maßnahmen zur Versickerung und Verdunstung unternommen werden, eine vollständige Auskopplung jedoch nicht möglich ist. Eine detaillierte Maßnahmenplanung anhand sämtlicher abflusswirksamer Flächen, deren Beschaffenheit, sowie Bodenanalysen je Grundstück ist hier nicht Gegenstand der Arbeit (siehe hierzu Matzinger et al. 2017). Aus Gründen der Vereinfachung wird angenommen, dass der bestehende Kanal auch unter verringertem abflusswirksamem Regenwasseranteil ohne zusätzliche betriebliche Aufwände funktioniert. Für potentielle betriebliche sowie kostenmäßige Auswirkungen durch verringerte Stoffströme im Kanal siehe Hiessl et al. 2010.

2.3.3 Nicht technische Ausgestaltung

In bisherigen Pilotprojekten hat die nicht technischen Ausgestaltung über Scheitern und Gelingen einer Implementierung von Systemalternativen entschieden (van Vliet et al. 2011). Die nicht technische Ausgestaltung muss deshalb als Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation betrachtet werden. Im Folgenden wird deshalb die nicht technische Ausgestaltung für alle Systemalternativen festgelegt.

Wissen über eine Problematik und Alltagshandeln korrelieren zwar nicht notwendigerweise (UBA 2017b, 2016c; Kuckartz 2008; Bilharz 2000), es ist jedoch Voraussetzung, um die Tür für Veränderungen zu öffnen (Schaub und Tosun 2019; Stengel 2013). So lautet das Motto der Internationalen Bauausstellung (IBA) (2013 bis 2022) der Stadt im Untersuchungskontext auch gezielt „Wissen schafft Stadt“ (Stadt Heidelberg 2019; IBA 2019). Durch die semi- und dezentralen Komponenten der Systemalternativen werden Gelegenheiten geschaffen, vor Ort mehr über Technologien und Maßnahmen zur Gestaltung des Wasser-Energie-Nexus zu erfahren (van Vliet et al. 2011). In einem niederländischen Projekt wurden beispielsweise die Leitungen für Betriebswasser bewusst entlang der Wände in den Wohnblöcken geführt und in einer auffälligen Farbe gestaltet. Für die BewohnerInnen war so der Zusammenhang zwischen Trinkwasser und Abwasser sowie der bewusste Umgang damit präsenter und näher an ihrer eigenen Lebenswelt (van Vliet und Spaargaren 2010). Auch die Maßnahmen zur dezentralen Regenwasserauskopplung in den Systemalternativen bieten Möglichkeiten direkt vor Ort z.B. etwas über Oberflächenbeschaffenheit und den städtischen Wasserkreislauf zu erfahren. Dies wird beispielsweise durch wasserbezogene

Themenfahrrad- und Wanderwege im Umland von Städten, wie z.B. München (siehe Abbildung 15), bereits angeboten (Stadtwerke München 2016), jedoch meist nicht im unmittelbaren Lebensumfeld der BewohnerInnen. Für alle Systemalternativen sind deshalb wissensvermittelnde Gestaltungselemente im Stadtviertel vorgesehen.

Abbildung 15 Der M-Wasserweg um München



Quelle: Stadtwerke München 2016

Darüber hinaus wird festgelegt, dass die Implementierung aller Systemalternativen von nutzerorientierten Informations- und Partizipationsveranstaltungen begleitet wird. Da die Systemalternativen, z.B. durch die Vakuumtoiletten, in teils sehr intime Lebensbereiche und durch die Maßnahmen zur Regenwasserauskopplung in das unmittelbare Lebensumfeld eingreifen, ist es entscheidend, dass die BewohnerInnen bei der Gestaltung mitwirken (van Vliet und Spaargaren 2010). So wird lokales Wissen genutzt, Konflikte vermieden und die Legitimation der Systemalternativen gestärkt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2012). Vor allem während der Planungsphase und dem Start der tatsächlichen Nutzphase erweist sich Partizipation als wichtig, da sich die BewohnerInnen dort inmitten eines „De- und Reroutinisierungsprozesses“ (Hegger und van Vliet 2010, S. 214, übersetzt) befinden. Partizipation der BewohnerInnen bei der Ausgestaltung der Systemalternativen (wie in Abbildung 16 dargestellt), z.B. bei den Maßnahmen zur Regenwasserauskopplung, ist deshalb für alle Systemalternativen vorgesehen.

Abbildung 16 Partizipation bei der Stadtgestaltung



Quelle: Stadt Hamburg 2013

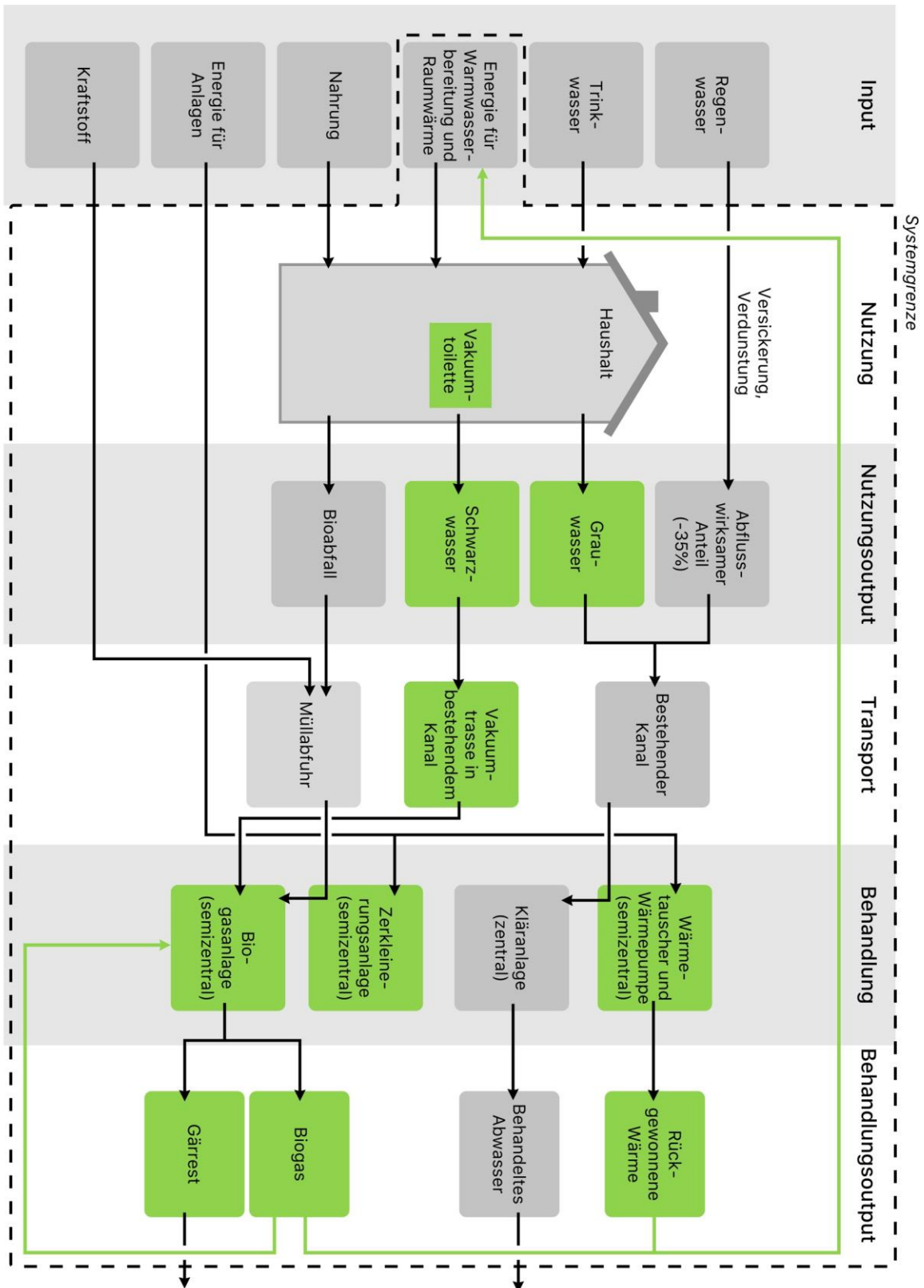
Durch die Informations- und Partizipationsveranstaltungen sollen sich die BewohnerInnen auch ihrer neuen Rolle als sogenannte „Prosumenten“ (BMU 2018, S. 150) bewusst werden. Die BewohnerInnen konsumieren in den Systemalternativen nicht nur Erzeugnisse innerhalb des Wasser-Energie-Nexus, sondern tragen auch zur Produktion von z.B. Biogas bei, das in ihren Haushalten verwendet wird. Sind sie sich dieser Rolle bewusst, sind sie potentiell geneigter das System sachgemäß zu verwenden (Hefter et al. 2015; Hegger 2007).

2.3.4 Systemalternative 1

In Systemalternative 1 (SYAL1) (siehe Abbildung 17) wird das Grauwasser vom Schwarzwasser abgetrennt, jedoch nicht zur Wiederverwendung aufbereitet, um die Eingriffe in den Haushalten selbst gering zu halten. Da demnach keine dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen vorgesehen sind, stellt ein semizentraler Wärmetauscher im Hauptkanal des Stadtviertels inklusive Wärmepumpe örtlich gesehen die nächstmögliche Option zur Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser dar. Der Abtransport des Grauwassers erfolgt gemeinsam mit dem um 35% verringerten abflusswirksamen Anteil des Regenwassers wie im Status-Quo-System über den bestehenden Kanal. Die Reinigung wird durch die bestehende Kläranlage vorgenommen. Da diese lediglich leicht verschmutztes Grau- und Regenwasser behandelt, benötigt sie weniger Energie als die Kläranlage im Status-Quo-System (Morandi et al. 2017; Menger-Krug et al. 2010) (siehe Kapitel 2.4.3).

Das Schwarzwasser wird in SYAL1 in einer im Kanalbestand integrierten Vakuumtrasse zur semizentralen Biogasanlage im Stadtviertel abtransportiert. Durch die Integration der Vakuumtrasse soll eine größtmögliche Nutzung der vorhandenen Kanäle und damit verbundener Vermögenswerte erzielt werden (Kluge und Libbe 2010). An der Biogasanlage werden dem Schwarzwasser die Bioabfälle der Haushalte, die von der Müllabfuhr dorthin transportiert werden (siehe Kapitel 2.4.4), über eine semizentrale Zerkleinerungsanlage beigemischt. In Kombination mit der rückgewonnenen Wärme aus dem Grauwasser ersetzt das erzeugte Biogas die bisherigen, nicht erneuerbaren Energieressourcen für Warmwasserbereitung und Raumwärme im Stadtviertel (siehe Kapitel 2.4.6) und deckt den Energiebedarf der Biogasprozesse ab (siehe Kapitel 2.4.5). Der bei der Biogaserzeugung zurückbleibende Gärrest wird als Düngemittel eingesetzt.

Abbildung 17 Systemdarstellung SYAL1



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DWA 2008, die grüne Einfärbung entspricht den Änderungen gegenüber SQ

2.3.5 Systemalternative 2

In Systemalternative 2 (SYAL2) (siehe Abbildung 19) wird Grauwasser in dezentralen Anlagen je Gebäudetyp zu Betriebswasser aufbereitet und ersetzt einen Teil des Trinkwassers, das die Haushalte im Stadtviertel beziehen (siehe Kapitel 2.4.1). Das Grauwasser wird dabei für die hier zugeordneten Einsatzbereiche gegenüber dem Regenwasser als kontinuierlich anfallende Bezugsquelle bevorzugt. Eine naturnahe Grauwasseraufbereitung anhand von bepflanzten Bodenfiltern, wie sie beispielweise im Projekt TWIST++ dargestellt wird (Maier 2016), wird hier aufgrund der Einschränkungen innerhalb des Gebäudebestandes im Untersuchungsquartier ausgeschlossen.

Durch den verringerten Trinkwasserbezug wird weniger Energie zur Trinkwasserbereitstellung benötigt (siehe Kapitel 2.4.1) und die lokalen Wasserressourcen geschont (Merz et al. 2012). Die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser ist in SYAL2 in die dezentralen Aufbereitungsanlagen integriert, um potentielle Wärmeverluste durch den Transport zu vermeiden (siehe Kapitel 2.4.3).

Da sämtliches anfallendes Grauwasser zwar dezentral behandelt, jedoch nicht für die Haushaltzwecke verwendet wird, die gesetzlich den Trinkwasserqualitätsanforderungen unterliegen (Nolde 2013a; Fbr 2005), verbleibt ein Rest Betriebswasser. Dieser wird gemeinsam mit dem um 70% verringerten abflusswirksamen Anteil des Regenwassers über den bestehenden Kanal abgeleitet und direkt in das lokale Fließgewässer eingeleitet. Ob eine Direkteinleitung möglich ist hängt u.a. vom Verschmutzungsgrad des Regenwassers ab, welcher durch die Beschaffenheit und Nutzung der Flächen im Bestandsgebiet bedingt wird (Schurr und Bohne 2008; DWA 2004). Für das Stadtviertel wird keine materialbedingte Kontamination durch Dachrinnen und Fallrohre angenommen. Darüber hinaus wird die Verschmutzung in einem reinen Wohnviertel ohne hohes Verkehrsaufkommen als tolerierbar eingeschätzt, wodurch eine Direkteinleitung zulässig ist (Matzinger et al. 2017). In isolierter Betrachtung des Stadtviertels würde die Kläranlage im Gegensatz zum Status-Quo-System und zu SYAL1 damit entfallen.

Das Schwarzwasser wird, wie bei SYAL1, in einer im Kanalbestand integrierten Vakuumtrasse zur semizentralen Biogasanlage abtransportiert, um die vorhandenen Strukturen und damit verbundenen Vermögenswerte zu nutzen (Kluge und Libbe 2010). Die Bioabfälle werden bei SYAL2 jedoch direkt im Haus durch dezentrale Küchenabfallzerkleinerer in der Küchenspüle (siehe Abbildung 18) unter geringem Trinkwassereinsatz (siehe Kapitel 2.4.1) beigemischt, wodurch der Transport der Abfälle entfällt (siehe Kapitel 2.4.4).

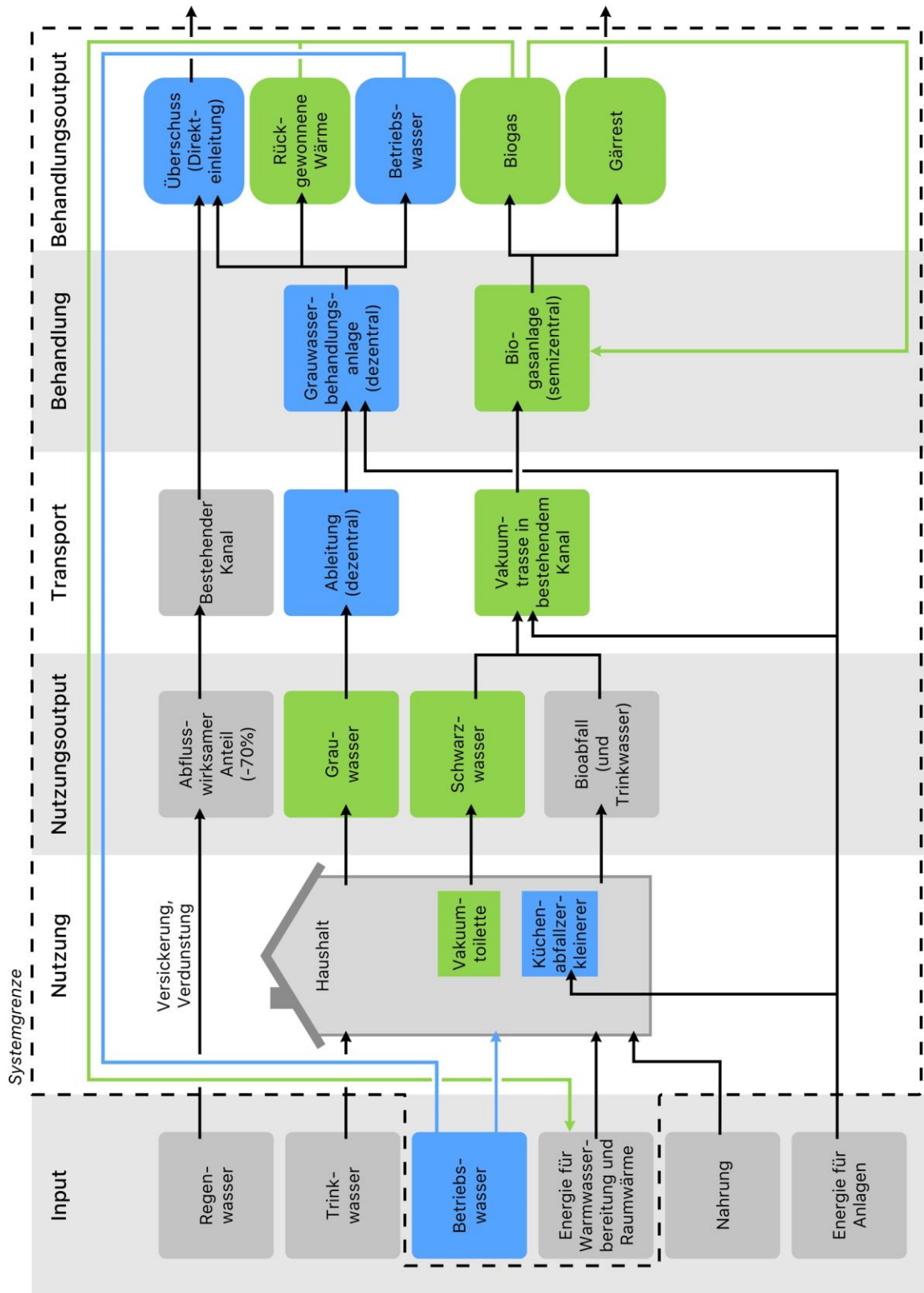
Abbildung 18 Küchenabfallzerkleinerer



Quelle: Emerson Electric 2016

Wie bei SYAL1 ersetzt das erzeugte Biogas in Kombination mit der rückgewonnenen Wärme aus Grauwasser die bisherigen, nicht erneuerbaren Energieressourcen für Warmwasserbereitung und Raumwärme im Stadtviertel (siehe Kapitel 2.4.6) und deckt den Eigenenergiebedarf der Biogasprozesse (siehe Kapitel 2.4.5). Auch hier wird der zurückbleibende Gärrest als Düngemittel eingesetzt.

Abbildung 19 Systemdarstellung SYAL2

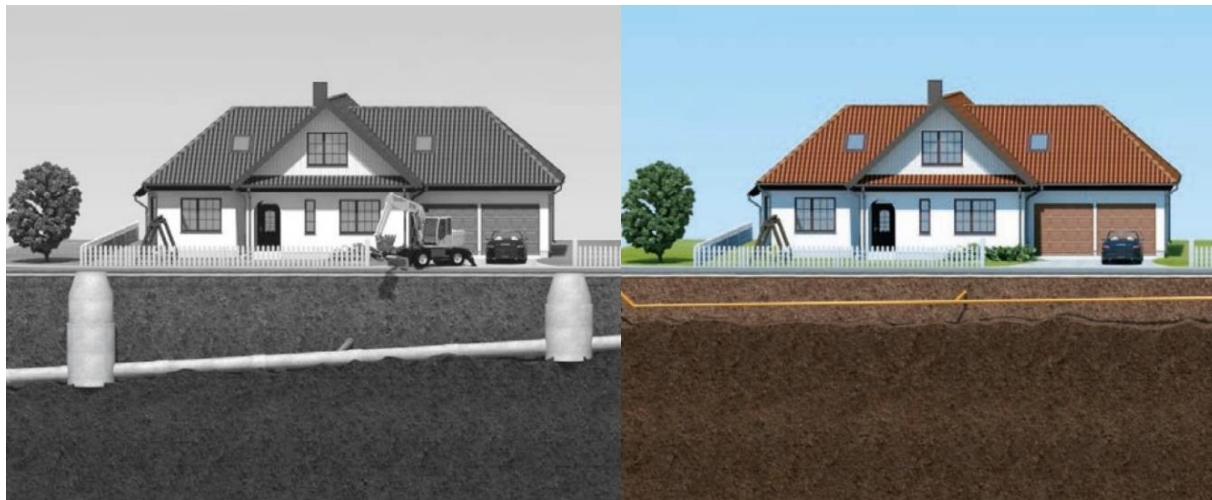


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DWA 2008, die blaue Einfärbung entspricht den Änderungen gegenüber SYAL1

2.3.6 Systemalternative 3

Mit Systemalternative 3 (SYAL3) (siehe Abbildung 21) wird auf die fortwährend wiederkehrenden Debatten Bezug genommen, ob das Kanalnetz in der gegenwärtigen Form überhaupt erhalten oder vollständig durch weniger materialintensive und flexiblere Infrastrukturen ersetzt werden sollte (z.B. WWAP 2017; Martin et al. 2015; Maurer 2011; Koziol et al. 2006). SYAL3 verfügt deshalb strukturell über dieselben Komponenten wie SYAL2, wird jedoch gänzlich ohne die bestehenden Kanäle betrieben. Die Vakuumtrasse, über die das Schwarzwasser zur semizentralen Biogasanlage im Stadtviertel transportiert wird, wird nicht integriert, sondern eigens verlegt. Der bauliche Aufwand hierfür ist geringer als bei der konventionellen Mischwasserkanalisation, da die Vakuumtrasse oberflächennah und mit wesentlich kleineren Nennweiten verlegt wird (Roediger 2018a) (siehe Abbildung 20).

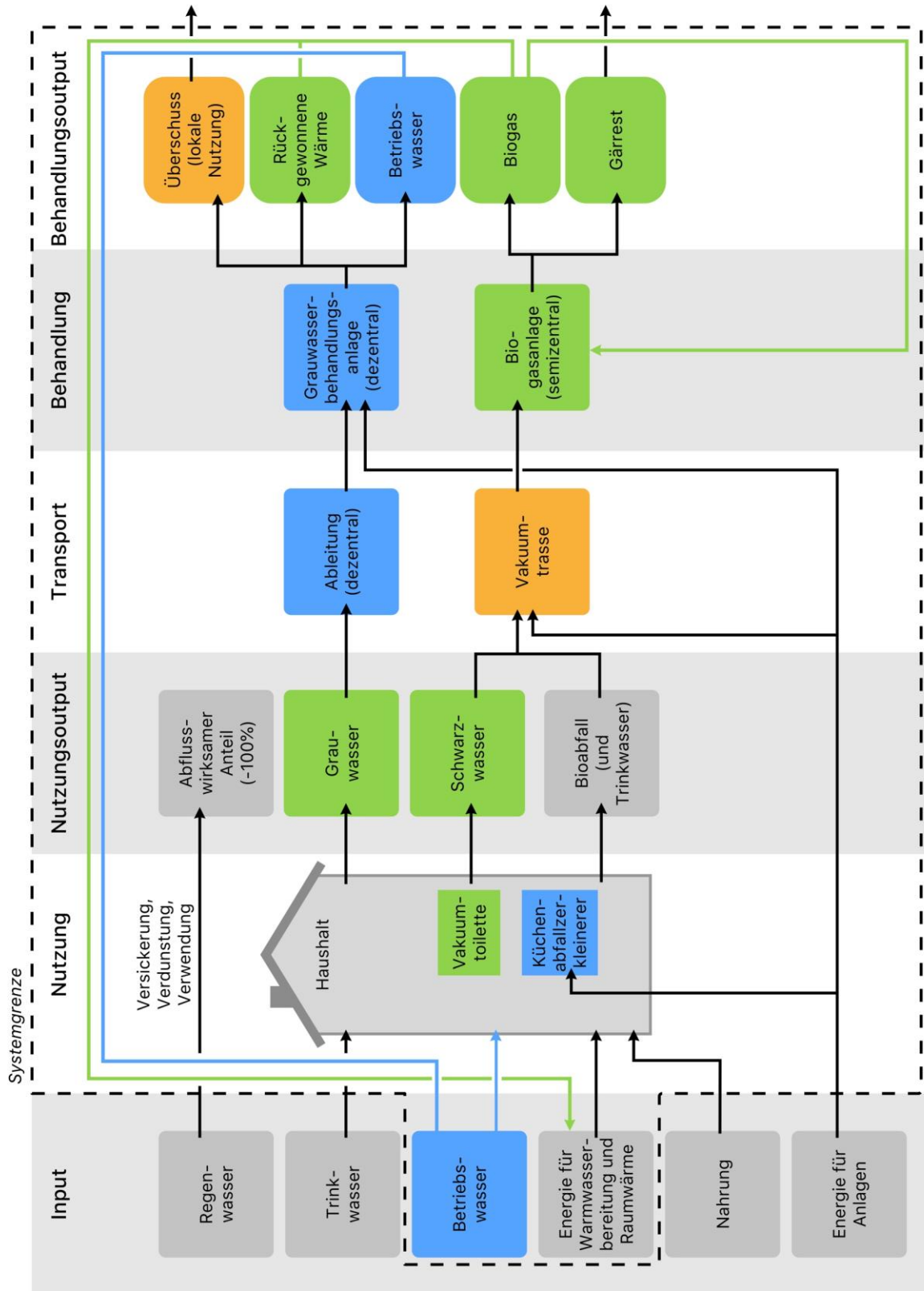
Abbildung 20 Verlegungstiefen konventionelle Kanalisation vs. Vakuumkanalisation



Quelle: Roediger 2018a (Bildzuschnitt), Links: Konventionelle Kanalisation, rechts: Vakuumtrasse

Zur Außerbetriebnahme des bestehenden Kanals wird der nicht verwendete Anteil des Betriebswassers (siehe Kapitel 2.3.5) bei SYAL3 für Bewässerungs- oder Gestaltungszwecke im Stadtviertel eingesetzt und der abflusswirksame Anteil des Regenwassers um 100% verringert, d.h. vollständig lokal versickert, verdunstet oder eingesetzt (Matzinger et al. 2017; Sieker et al. 2008).

Abbildung 21 Systemdarstellung SYAL3



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DWA 2008, die orange Einfärbung entspricht den Änderungen gegenüber SYAL2

2.3.7 Zusammenfassung Systemmerkmale

Nachfolgend sind alle Systemmerkmale zusammengefasst, um die Überschneidungen zwischen den Systemen sowie deren Unterscheidungsmerkmale darzustellen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Zusammenfassung Systemmerkmale

Teilprozess	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
Bereitstellung und Nutzung				
Trinkwasser-nutzung	Alle Haushaltszwecke		Trinken, Kochen und Körperhygiene (andere Haushaltszwecke mit Betriebswasser)	
Warmwasser-bereitung / Raumwärme	Fernwärme	Rückgewonnene Wärme aus Grauwasser (semizentral oder dezentral), Biogas aus Schwarzwasser und Bioabfällen		
Transport zur Behandlungsanlage				
Schwarzwasser	Vakuumsystem			
Grauwasser	Mischwasserkanalisation	Gemeinsam in Kanalisation		Entfällt, vollständige lokale Versickerung, Verdunstung und/oder Verwendung
Regenwasser				
Bioabfall	Müllabfuhr		Vakuumsystem	
Behandlung				
Bioabfall	Kompostwerk (zentral)	Biogasanlage (semizentral)		
Schwarzwasser	Kläranlage (zentral)			
Grauwasser	Kläranlage (zentral)		Grauwasserbehandlungsanlage (dezentral)	
Regenwasser			Entfällt, Direkt-einleitung Fließgewässer	Entfällt, vollständige lokale Versickerung, Verdunstung und / oder Verwendung

Quelle: Eigene Darstellung

2.4 Stoff- und Energieströme des Systembetriebs

Basierend auf den zuvor dargestellten Systemmerkmalen werden nachfolgend die Stoff- und Energieströme des Systembetriebs pro Jahr für das Stadtviertel mit 5.081 EinwohnerInnen bilanziert (STV*a). Die Ergebnisse werden dabei bewusst nur für das gesamte Stadtviertel und nicht als pro-Kopf-Wert angegeben, da für städtische EntscheidungsträgerInnen die notwendigen Gesamtmassen(ströme) bei einer Transformation eines Stadtviertels entscheidend sind. Die hier zusammengetragenen Werte sind Grundlage für die im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommene Umwelt- und Kostenbewertung.

2.4.1 Trinkwassernutzung und -bereitstellung für Haushalte

Der Trinkwasserbedarf wird mit 116 l pro EW und Tag (Rommel 2016) festgelegt. Die folgenden Prozentangaben wurden vom BDEW (2016) übernommen, wobei das Kleingewerbe (9%) nicht berücksichtigt wird. Dies (91%) ergibt für das Stadtviertel eine Summe von 195.767.881,4 l Trinkwasserbedarf pro Jahr für das Status-Quo-System. Die Haushaltszwecke, für die im Status-Quo-System Trinkwasser bezogen wird, umfassen: Körperhygiene (36% \cong 77.446.634,4 l / STV*a), Geschirrspülen (6% \cong 12.907.772,4 l / STV*a), Wäschewaschen (12% \cong 25.815.544,8 l / STV*a), Reinigung und Gartenpflege (6% \cong 12.907.772,4 l / STV*a), Kochen und Trinken (4% \cong 8.605.181,6 l / STV*a), Toilettenspülung (27% \cong 58.084.975,8 l / STV*a). Ein zusätzlicher Trinkwasserbedarf ergibt sich im Falle von SYAL2 und SYAL3 durch den Wasserverbrauch von 4 l / EW*d (Emerson Electric 2016) für den Küchenabfallzerkleinerer in der Spüle. Dies ergibt für SYAL2 und SYAL3 in Summe einen zusätzlichen Trinkwasserbedarf von 7.418.260 l / STV*a.

Durch den zuvor genannten Trinkwasserbedarf für die Toilettenspülung werden bei 9 l / Spülung (Zech et al. 2009) für eine konventionelle Spültoilette im Status-Quo-System 3,48 Spülungen / EW*d (\cong 6.453.886,2 Spülungen / STV*a) errechnet. Da alle Systemalternativen wassersparsame Vakuumtoiletten vorsehen, die lediglich 0,75 l / Spülung (Zech et al. 2009) beziehen, benötigen die Systemalternativen lediglich 4.840.414,7 l / STV*a für die Toilettenspülung.

In SYAL2 und SYAL3 wird Grauwasser zu Betriebswasser aufbereitet, das einen Teil des Trinkwassers substituiert. Weiterhin Trinkwasser bezogen werden muss für die Haushaltszwecke Körperhygiene, Geschirrspülen, Kochen und Trinken sowie den Küchenabfallzerkleinerer (\cong in Summe 106.377.848,4 l / STV*a), da diese gesetzlich den Trinkwasserqualitätsanforderungen unterliegen (Nolde 2013a; Fbr 2005). Durch Betriebswasser ersetzt werden kann folglich das Trinkwasser für Wäschewaschen, Reinigung und Gartenpflege sowie für die Spülung der Vakuumtoilette (\cong in Summe 43.563.731,9 l / STV*a). Dadurch ergibt sich folgender Gesamttrinkwasserbedarf für das Status-Quo-System und je Systemalternative (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Trinkwasserbedarf

Trinkwasserbedarf je Haushaltszweck	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	l / STV*a			
Körperhygiene	77.446.634,4			
Geschirrspülen	12.907.772,4			
Wäschewaschen	25.815.544,8		0 ¹	
Reinigung und Gartenpflege	12.907.772,4		0 ¹	
Kochen und Trinken	8.605.181,6			
Toilettenspülung	58.084.975,8	4.840.414,7	0 ¹	
Küchenabfall- zerkleinerer	Nicht vorhanden		7.418.260,0	
Gesamt	195.767.881,4	142.523.320,3	106.377.848,4	
Anmerkung: ¹ Entspricht Null, da für diese Haushaltszwecke das Trinkwasser durch Betriebswasser substituiert wird.				

Quelle: Eigene Berechnung

Der Energiebedarf zur Trinkwasserbereitstellung beträgt 0,0004 kWh / l (ZWK 2018). Dies resultiert in folgendem Energiebedarf zur Trinkwasserbereitstellung für das Status-Quo-System und je Systemalternative (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung

Energiebedarf	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kWh / STV*a			
Trinkwasserbereitstellung	78.307,2	57.009,3	42.551,1	

Quelle: Eigene Berechnung

2.4.2 Abwassermenge

Im Status-Quo-System ergibt sich die von der Kläranlage zu behandelnde Abwassermenge durch die Trinkwassermenge ($\cong 195.767.881,4$ l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.1) zuzüglich Urin und Fäzes sowie dem abflusswirksamen Regenwasseranteil. Die Urinmenge wird mit $1,37$ l / EW*d (Oldenburg et al. 2008) angesetzt ($\cong 2.540.754,1$ l / STV*a). Fäzes werden mit $0,14$ l / EW*d (Oldenburg et al. 2008) veranschlagt ($\cong 259.639,1$ l / STV*a). Der abflusswirksame Regenwasseranteil wird anhand des durchschnittlichen Niederschlags ($0,732$ m / a) (GEO-Net Umweltconsulting und ÖKOPLANA 2015) im Verhältnis zur Fläche des Stadtviertels (633.000 m²) (Becker 2018) und des im Rahmen des Generalentwässerungsplans ermittelten Befestigungsgrades (61%) (Meentz 2018) errechnet und beläuft sich auf $282.647,2$ m³ pro Jahr ($\cong 282.647.200$ l / STV*a). In Summe ergibt dies folgende zu behandelnde Abwassermenge im Status-Quo-System (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5 Abwassermenge Status-Quo-System

Stoffstrom	SQ (l / STV*a)
Abwasser aus der Trinkwasserverwendung	195.767.881,4
Urin	2.540.754,1
Fäzes	259.639,1
Abflusswirksamer Regenwasseranteil	282.647.200,0
Gesamt	478.415.581,4

Quelle: Eigene Berechnung

In SYAL1 erfolgt keine Grauwasserwiederverwendung, aber eine Schwarzwasser-
auskopplung und Verringerung des abflusswirksamen Regenwasseranteils. Deshalb
ergibt sich die von der Kläranlage zu behandelnde Abwassermenge aus der
Trinkwassermenge abzüglich des Schwarzwassers und zuzüglich des abflusswirksamen
Regenwasseranteils. Das Schwarzwasser ergibt sich aus der Urinmenge ($\cong 2.540.754,1$ l
/ STV*a), den Fäzes ($\cong 259.639,1$ l / STV*a) und dem verringerten Toilettenspülwasser
der Vakuumtoiletten ($\cong 4.840.414,7$ l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.1). Dies ergibt folgende
Summe für das Schwarzwasser (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6 Menge Schwarzwasser

Stoffstrom	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	l / STV*a		
Urin	2.540.754,1		
Fäzes	259.639,1		
Toilettenspülung (Vakuumtoiletten)	4.840.414,7		
Gesamt	7.640.807,9		

Quelle: Eigene Berechnung

Zieht man das Schwarzwasser ($\cong 7.640.807,9$ l / STV*a) von der Trinkwassermenge in
SYAL1 ab ($\cong 142.523.320,3$ l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.1) erhält man 134.882.512,4 l /
STV*a. In SYAL1 erfolgt eine Verringerung des abflusswirksamen Regenwasseranteils des
Status-Quo-Systems ($\cong 282.647.700$ l / STV*a) um 35%, wodurch sich dieser noch auf
183.721.005 l / STV*a beläuft. Dadurch ergibt sich folgende von der Kläranlage zu
behandelnde Abwassermenge in SYAL1 (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7 Abwassermenge SYAL1

Abwasser	SYAL1 (l / STV*a)
Trinkwasserverwendung abzüglich Schwarzwasser	134.882.512,4
Abflusswirksamer Regenwasseranteil	183.721.005,0
Gesamt	420.330.605,6

Quelle: Eigene Berechnung

In SYAL2 erfolgt eine Verringerung des abflusswirksamen Regenwasseranteils des Status-Quo-Systems ($\cong 282.647.700 \text{ l} / \text{STV}^*a$) um 70%, wodurch sich der abflusswirksame Regenwasseranteil noch auf $84.794.310 \text{ l} / \text{STV}^*a$ beläuft. Da hier eine Direkteinleitung ohne Behandlung vorgesehen ist, wird dieser jedoch nicht bilanziert. In SYAL3 erfolgt eine Verringerung um 100%, wodurch der abflusswirksame Regenwasseranteil gleich Null beträgt. Die restliche Abwassermenge für SYAL2 und SYAL3 wird im Zusammenhang mit der Grauwasserbehandlung (siehe Kapitel 2.4.3) und Schwarzwasserbehandlung (siehe Kapitel 2.4.5) geschildert.

2.4.3 Ab- bzw. Grauwasserbehandlung

Im Status-Quo-System erfolgt der Transport des Abwassers zur zentralen Kläranlage über die Kanalisation ohne energetischen Aufwand. Die Behandlung durch die zentrale Kläranlage mit drei Reinigungsstufen (mechanisch, biologisch, chemisch) bedarf $23,3 \text{ kWh} / \text{EW}^*a$ (AZV Heidelberg 2018) ($\cong 118.387,3 \text{ kWh} / \text{STV}^*a$). Der Energiebedarf der Kläranlage wird vollständig durch das aus dem Klärschlamm ($13,5 \text{ kg} / \text{EW}^*a$) (AZV Heidelberg 2018) ($\cong 68.593,5 \text{ kg} / \text{STV}^*a$) erzeugte Klärgas mit einem Energiegehalt von $48 \text{ kWh} / \text{EW}^*a$ (DWA 2010b) ($\cong 243.888 \text{ kWh} / \text{STV}^*a$) gedeckt und wird deshalb mit Null angegeben (siehe Tabelle 8). Der nach der Klärgaserzeugung verbleibende Klärschlamm wird in einem Kohlekraftwerk (AVZ Heidelberg 2018) unter einem Energieaufwand von $0,6 \text{ kWh} / \text{kg}$ (Haberkern 2007) ($\cong 41.156,1 \text{ kWh} / \text{STV}^*a$) mitverbrannt. Der Energiegehalt beträgt $1,8 \text{ kWh} / \text{kg}$ (DWA 2010b) ($\cong 123.468,3 \text{ kWh} / \text{STV}^*a$), d.h. der Energiebedarf der Co-Verbrennung ist durch das Verbrennen des Klärschlammes gedeckt und wird deshalb mit Null angegeben (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8 Energetische Angaben Ab- bzw. Grauwasserbehandlung

Angabe	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kWh / STV*a			
Energiebedarf für Ab- bzw. Grauwasserbehandlung inklusive Wärmerückgewinnung	0 ¹	367.607,8	192.756,1	
Rückgewonnene Wärme aus Grauwasser	Nicht vorhanden	1.601.328,0	2.065.243,6	
Anmerkung: ¹ Entspricht Null, da vollständig durch die Klärgaserzeugung und Mitverbrennung des Klärschlammes gedeckt.				

Quelle: Eigene Berechnung

Für den Fall von SYAL1, bei der eine zentrale Kläranlage lediglich Grau- und Regenwasser behandelt, wird angenommen, dass der Energiebedarf durch die geringere Verschmutzung (Otterpohl und Oldenburg 2002) auf 15,8 kWh / EW*a (Morandi et al. 2017) (\cong 80.279,8 kWh / STV*a) gesenkt werden kann. Der Fall, dass eine zentrale Kläranlage lediglich Grauwasser und Regenwasser behandelt, existiert in der Praxis noch nicht. Die Annahme eines verringerten Energiebedarfs gründet darauf, dass der Strombedarf einer Kläranlage hauptsächlich durch die Belüftung bedingt wird. Diese hängt von der CSB-Fracht⁶ des zu behandelnden Abwassers ab (Menger-Krug et al. 2010), welche durch die Schwarzwasserauskopplung verringert wird (Otterpohl und Oldenburg 2002).

Der für SYAL1 vorgesehene Wärmetauscher soll dem Grauwasser 10 Kelvin entziehen. Eine Pilotanlage mit diesem Temperaturentzug aus Grauwasser im Kanal liegt noch nicht vor (DWA 2018c). Es handelt sich um eine mit Experten (InfraWatt 2018; UHRIG 2018) abgestimmte Annahme eines einerseits möglichst hohen Wärmeentzugs, der andererseits die Reinigungsleistung der Kläranlage nicht gefährdet (Morandi et al. 2017). Bei einer Entzugsleistung von 182,8 kW des durch Experten ausgelegten Wärmetauschers (siehe

⁶ CSB steht für chemischer Sauerstoffbedarf und „ist ein Summenparameter, der ausdrückt, wie viel Sauerstoff zur vollständigen Oxidation von organischen Stoffen zu CO₂ und Wasser erforderlich ist (Gujer 2007, S. 37).

Anhang A10) und 8760 angesetzten Arbeitsstunden pro Jahr könnte der Wärmetauscher 1.601.328 kWh / STV*a entziehen. Um die entzogene Wärme für das Stadtviertel wieder nutzbar zu machen, wird eine semizentrale Wärmepumpe mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 32,8 kW (siehe Anhang A11) eingesetzt. Diese bedarf bei den angesetzten 8760 Arbeitsstunden pro Jahr 287.328 kWh / STV*a. In Summe aus Energiebedarf für die Kläranlage und Wärmepumpe ergibt sich für SYAL1 somit ein Energiebedarf von 367.607,8 kWh / STV*a (siehe Tabelle 8).

Die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen in SYAL2 und SYAL3 bereiten das Grauwasser zu Betriebswasser auf. Die Grauwassermenge ergibt sich aus der Summe des Trinkwasserbedarfs für Körperhygiene, Geschirrspülen, Wäschewaschen, Reinigung und Gartenpflege sowie Nahrungsmittelzubereitung ($\hat{=}$ in Summe 137.682.905,6 l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.1). Da Reinigung und Gartenpflege als ein gemeinsamer Betrag in der Literatur angegeben ist (Rommel 2016), wird zur Vereinfachung angenommen, dass das hierfür verwendete Trinkwasser vollständig als Grauwasser anfällt. Im Falle der Gartenpflege wäre andernfalls Versickerung und Verdunstung zu berücksichtigen.

Die Grauwasserbehandlungsanlagen benötigen 0,0014 kWh / l (Nolde 2013a) ($\hat{=}$ 192.756,1 kWh / STV*a) für Behandlung und Wärmerückgewinnung. Rückgewonnen werden 0,015 kWh / l (Nolde 2013a) ($\hat{=}$ 2.065.243,6 kWh / STV*a). Die dezentrale Rückgewinnung in SYAL2 und SYAL3 ist größer als bei der semizentralen Rückgewinnung in SYAL1, da hier Wärmeverluste durch den Transport entfallen (Trapp und Libbe 2016; Ott et al. 2016; Menger-Krug et al. 2010).

2.4.4 Fahrzeugtransport

Der Klärschlamm im Status-Quo-System wird per Lkw zu einem Kohlekraftwerk (je nach Ausschreibung z.B. nahe Köln) gebracht (AVZ Heidelberg 2018). Als Pauschalentfernung werden hierfür 250 km angenommen, die 5 Mal jährlich gefahren werden ($\hat{=}$ 1.250 km / STV*a). Für die durchgehende Strecke wird ein Kraftstoffverbrauch von 50 l je 100 km angenommen. Dies ergibt 625 l / STV*a für den Transport des Klärschlammes. In den Systemalternativen ist die Schlamm-Bildung aus der Grauwasserbehandlung mit 0,002 kg / EW*d (Steglich et al. 2016a) ($\hat{=}$ 3.709,1 kg / STV*a) im Vergleich zum Status-Quo-System ($\hat{=}$ 68.593,5 kg / STV*a) vernachlässigbar, weshalb in den Systemalternativen

kein Klärschlammtransport berücksichtigt wird. Eine Mitvergärung in der semizentralen Biogasanlage wäre denkbar (Davoudi et al. 2016).

Der Bioabfall der Haushalte beträgt 49 kg / EW*a (LUBW 2015) (\cong 248.969 kg / STV*a) und wird im Staus-Quo-System von der Müllabfuhr mit einer Transportstrecke von 7,4 km abgeholt. Die Strecke zur Abholung des Bioabfalls entspricht der errechneten Kanalgesamtlänge von 7,4 km (siehe Anhang A1), da die Kanalverläufe üblicherweise mit dem der Straßen korrespondieren. Nach der Einsammlung des Bioabfalls wird dieser zu einem 14,5 km entfernten Kompostwerk gebracht. Die 14,5 km zum Kompostwerk werden anhand von GoogleMaps und einem zentralen Punkt im Stadtviertel abgeschätzt. Somit ergibt sich eine Gesamtstrecke von 21,9 km, die 30 Mal pro Jahr⁷ bei der Abholung zurückgelegt wird (\cong 657 km / STV*a). Aufgrund des städtischen Stop-and-Go-Modus wird für die Abholung ein Kraftstoffverbrauch von 100 l je 100 km angenommen (\cong 657 l / STV*a). In Summe ergibt sich für das Status-Quo-System für den Bioabfall- und Klärschlammtransport somit insgesamt ein Kraftstoffverbrauch von 1.282 l / STV*a (siehe Tabelle 9).

In SYAL1 wird der Bioabfall wie im Status-Quo-System von der Müllabfuhr mit einer Transportstrecke von 7,4 km abgeholt. Es ändert sich die Transportstrecke zur Weiterverarbeitung des Bioabfalls, die bei SYAL1 durch eine semizentrale Zerkleinerungsanlage durchgeführt wird. Da diese am Rande des Stadtviertels neben der Biogasanlage verortet wird, werden für diese Strecke lediglich 0,5 km geschätzt. Die gesamte Strecke für eine Abholung beträgt folglich 7,9 km in SYAL1. Bei gleicher Abholungshäufigkeit ergibt sich eine Gesamtstrecke von 237 km / STV*a). Bei einem Kraftstoffverbrauch von 100 l / 100 km ergibt sich so ein Kraftstoffverbrauch von 237 l / STV*a für SYAL1 (siehe Tabelle 9). In SYAL2 und SYAL3 entfällt der Transport des Bioabfalls durch die dezentrale Beifügung zum Vakuumsystem über den Küchenabfallzerkleinerer.

⁷ Im Juli, August und September erfolgt die Abholung wöchentlich, im verbleibenden Jahr 14-tägig (Stadt Heidelberg 2017b).

Tabelle 9 Kraftstoffverbrauch

Transport	SQ		SYAL1	
	km / STV*a	l / STV*a	km / STV*a	l / STV*a
Klärschlamm	1.250	625	Nicht berücksichtigt	
Bioabfall	657	657	237	237
Gesamt	1.907	1.282	237	237

Quelle: Eigene Berechnung

2.4.5 Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlung

Das Kompostwerk, das den Bioabfall im Status-Quo-System verarbeitet, benötigt zur Verwertung von 35.000.000 kg Bioabfall 2.100.000 kWh / a (Stadt Heidelberg 2018a). Wenn die Mengenangabe des Kompostwerks auf die Menge Bioabfall im Stadtviertel ($\hat{=}$ 248.969 kg / STV*a) skaliert wird, ergibt dies ein Skalierungsfaktor von rund 141. Der Energiebedarf des Kompostwerks beträgt dadurch 14.893,6 kWh / STV*a (siehe Tabelle 10).

In SYAL1 erfolgt die Zerkleinerung des Bioabfalls ($\hat{=}$ 248.969 kg / STV*a) über eine Zerkleinerungsanlage neben der Biogasanlage unter einem Energiebedarf von 0,0026 kWh / kg (Remy 2010) ($\hat{=}$ 647,3 kWh / STV*a). In SYAL2 und SYAL3 wird der Bioabfall direkt in den Haushalten über einen Küchenabfallzerkleinerer (1,5 kWh / EW*a) (Hiessl et al. 2010) ($\hat{=}$ 7.621,5 kWh / STV*a) dem Vakuumsystem beigelegt.

Der Abtransport des Schwarzwassers erfolgt in allen Systemalternativen über ein Vakuumsystem, welches zum Betrieb 15 kWh / EW*a (Remy 2010) ($\hat{=}$ in 76.215 kWh / STV*a) bedarf. Die Co-Vergärung des Schwarzwassers und des Bioabfalls findet in allen Systemalternativen gleich statt und bedarf inklusive Vorbehandlung des Substrats 20,1 kWh / EW*a (Remy 2010) ($\hat{=}$ 102.128,1 kWh / STV*a). Der Energiebedarf für die Co-Vergärung wird durch die Energiegewinnung aus dem Biogas (siehe Tabelle 11) gedeckt und daher mit Null angegeben (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Energiebedarf Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlung

Energiebedarf	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kWh / STV*a			
Bioabfallbehandlung bzw. -zerkleinerung	14.893,6	647,3	7.621,5	
Vakuumsystem	Nicht vorhanden		76.215,0	
Co-Vergärung Schwarzwasser und Bioabfall	Nicht vorhanden		0 ¹	
Anmerkung: ¹ Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung abgedeckt.				

Quelle: Eigene Berechnung

Die Biogasausbeute wird aus dem Schwarzwasser-Bioabfallgemisch errechnet. Aus Gründen der Vereinfachung werden für die Bioabfälle die gleiche Dichte wie für das Schwarzwasser angenommen, d.h. 248.969 kg / STV*a ist gleich 248.969 l / STV*a. Das in SYAL2 und SYAL3 den Bioabfällen durch den Betrieb des Küchenabfallzerkleinerers beigemengte Abwasser wird hierbei aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt. Das Schwarzwasser ergibt sich aus der Urinmenge, den Fäzes und dem verringerten Toilettenspülwasser der Vakuumtoiletten (\cong in Summe 7.640.807,9 l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.2). In Summe beträgt das Schwarzwasser-Bioabfallgemisch folglich 7.889.776,9 l / STV*a.

Die Biogasausbeute beträgt 0,9 m³ Biogas pro l Schwarzwasser-Bioabfallgemisch (Remy 2010). Dies entspricht einer Biogasausbeute von 7.100.799,1 m³ / STV*a. Diesem wird ein Methangehalt von 65% (Remy 2010) zugerechnet, was 4.615.519,4 m³ / STV*a entspricht. Mit einem Heizwert von Methan von 9,97 kWh pro m³ (FNR 2018) resultiert eine Energiegewinnung von 46.016.728,4 kWh / STV*a aus der Co-Vergärung (siehe Tabelle 11).

Nach Vergärung erfolgt eine Hygienisierung des Gärrests, damit dieser als Dünger verwendet werden kann. Die Hygienisierung benötigt 68,83 kWh / EW*a (Remy und Ruhland 2006) (\cong 349.725,2 kWh / STV*a) (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11 Energetische Angaben Co-Vergärung

Angabe	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kWh / STV*a		
Energiegewinnung aus Co-Vergärung Schwarzwasser und Bioabfall	46.016.728,4		
Energiebedarf Hygienisierung	349.725,2		

Quelle: Eigene Berechnung

Aus dem Kompost des Bioabfalls werden im Status-Quo-System P: 0,0002; N: 0,009; K: 0,006 kg / EW*d (Remy und Ruhland 2006) (\cong P: 370,9; N: 1.669,1; K: 1.112,7 kg / STV*a) rückgewonnen (siehe Tabelle 12). Aus dem Gärrest in den Systemalternativen können aufgrund des Nährstoffreichtums des Schwarzwassers im Vergleich zum Kompost im Status-Quo-System deutlich mehr Nährstoffe rückgewonnen werden, nämlich P: 0,0017; N: 0,0124; K: 0,0038 kg / EW*d (Remy und Ruhland 2006) (\cong P: 3.152,8; N: 22.996,6; K: 7.047,3 kg / STV*a) (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12 Rückgewonnene Nährstoffe

Stoffstrom	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kg / STV*a			
Rückgewonnene Nährstoffe	P: 370,9 N: 1.669,1 K: 1.112,7	P: 3.152,8 N: 22.996,6 K: 7.047,3		

Quelle: Eigene Berechnung

2.4.6 Energiebedarf Haushalte

Für die Raumwärme werden 161 kWh pro m² / a (UBA 2012) auf die durchschnittliche Wohnfläche im Stadtviertel von 35,5 m² pro EW (Stadt Heidelberg 2014) angesetzt. Dies ergibt in Summe einen Energiebedarf von 29.040.455,5 kWh / STV*a für Raumwärme (siehe Tabelle 13).

Für die Warmwasserbereitung wird pauschal eine Erwärmung von 5°C auf 60°C für die Haushaltszwecke Körperhygiene, Geschirrspülen und Wäschewaschen (\cong in Summe 116.169.951,6 l / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.1) mit einem Energiebedarf von 0,063 kWh pro l angenommen (Stadtwerke Heidelberg 2017). Dies ergibt in Summe einen Energiebedarf von 7.318.707 kWh / STV*a für die Warmwasserbereitung (siehe Tabelle 13).

Der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasserbereitung ergibt in Summe 36.359.162,5 kWh / STV*a. Im Status-Quo-System wird dieser durch Fernwärme mit Kohle als Hauptenergieträger gedeckt. Der Anteil der erneuerbaren Energien beträgt hierbei lokal 20% (Stadtwerke Heidelberg 2014b) (\cong 7.271.832,5 kWh / STV*a). In allen Systemalternativen wird der Energiebedarf gänzlich durch die erneuerbare Energie aus der Co-Vergärung aus Schwarzwasser und Bioabfällen (\cong 46.016.728,4 kWh / STV*a) sowie der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser (SYAL1 \cong 1.601.328; SYAL2 und SYAL3 \cong 2.065.243,6 kWh / STV*a) gedeckt und daher mit Null angegeben (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13 Energiebedarf Haushalte

Angabe	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kWh / STV*a			
Energiebedarf Raumwärme	29.040.455,5	0 ¹		
Energiebedarf Wärmerückgewinnung	7.318.707,0	0 ¹		
Bereitstellung erneuerbare Energie	7.271.832,5	47.618.056,4	48.081.972,0	
Anmerkung: ¹ Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung und die Wärmerückgewinnung abgedeckt.				

Quelle: Eigene Berechnung

2.5 Stoff- und Energieströme der Systemkonstruktion

Studien zum Wasser-Energie-Nexus erachten für eine isolierte Betrachtung der Umweltwirkungen den Einfluss des Systembetriebs für ausschlaggebend (Kenway 2013; Stokes und Horvath 2011; Hiessl et al. 2010; Remy 2010). Dennoch ist für eine umfassende Bewertung grundsätzlich eine Bilanzierung der für die Konstruktion der Systeme benötigten Materialien erforderlich. Die Angaben geben die eingesetzten Mengen an Konstruktionsmaterialien für das Stadtviertel bezogen auf die jeweilige genannte Lebensdauer der entsprechenden Systemkomponenten und skaliert auf ein Jahr wieder (kg / STV*a). Für eine Zusammenfassung aller verwendeten Lebensdauern siehe Anhang A3.

Für die im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommene Umweltbewertung werden die Stoff- und Energiestromdaten der Konstruktionsmaterialien oder passender Ersatzmaterialien aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (2017) verarbeitet. Zur Nachvollziehbarkeit erfolgt die Auflistung unter der englischen Bezeichnung, die in der Datenbank zu finden ist. Außerdem werden alle Materialienmengen unabhängig ihrer Materialgrößen dokumentiert. Da die hier aufgeführten Werte Grundlage für die im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommene Umwelt- und Kostenbewertung sind, wird eine ausführliche Dokumentation für wichtig erachtet.

2.5.1 Kanalbestand

Der Kanalbestand wird durch lokale Pläne des Vermessungsamtes ausführlich erfasst (siehe Anhang A1 und A2) (Stadt Heidelberg 2017c). Die Gewichtszuordnung erfolgt anhand von Herstellerangaben zu den Kanalbestandteilen (Rinninger 2018; HABA 2018; Berding 2016; Steinzeug-Keramo 2017). Für das Kanalnetz und die Schächte wird im Status-Quo-System eine Lebensdauer von 80 Jahren angesetzt (DWA 2015b). Für SYAL1 und SYAL2, die den bestehenden Kanal aus dem Status-Quo-System weiterverwenden, wird eine Restlebensdauer von 30 Jahren festgelegt, da in Städten die meisten Kanäle ca. 50 Jahre alt sind (DWA 2015b). In SYAL3 entfällt der Kanalbestand, deshalb werden hierfür keine Angaben erhoben. Dadurch ergibt sich folgende Materialauflistung für den Kanalbestand (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14 Konstruktionsmaterial Kanalbestand

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SQ	SYAL1	SYAL2
		kg / STV*a		
Steinzeug	clay//[CH] market for clay	3.493,9	1.310,2	
Stahlbeton ¹	concrete, normal//[CH] market for concrete, normal	305.492,1	114.559,6	
	reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	11.080,0	4.155,0	
Beton	cement, unspecified//[CH] market for cement, unspecified	10.591,4	3.971,8	

Anmerkung:
¹ Für Stahlbeton liegt in der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) kein passendes Modul vor. Nach Herstellerangabe beträgt der Anteil von Stahl bei Stahlbeton 3,5% (Berding 2018). Die Menge Stahlbeton wird anhand dieser Prozentzahl auf die verfügbaren Module aufgeteilt.

Quelle: Eigene Berechnung

Für den Aushub zur Verlegung der Kanäle wird aus Gründen der Vereinfachung eine Grabung von 3 m Tiefe und 2 m Breite für die errechnete Gesamtkanalnetzlänge (\cong 7.389,9 m) (siehe Anhang A1) veranschlagt. Dies ergibt einen Aushub von 44.339,4 m³. Der Dieserverbrauch (0,131 kg / m³) und Schmierölverbrauch (0,0025 kg / m³) der zum Aushub benötigten Baumaschine wird dem Modul „Excavation, hydraulic digger - GLO“ der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) entnommen. Auf die Lebensdauer des Kanalnetzes von 80 Jahren bezogen ergibt sich für 1 Jahr folgender Materialaufwand für das Status-Quo-System (siehe Tabelle 15). In SYAL1 und SYAL2 erfolgt die Skalierung wie beim Kanalbestand anhand der Restlebensdauer von 30 Jahren.

Tabelle 15 Aushub Kanalnetz

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SQ	SYAL1	SYAL2
	kg / m ³	kg / STV*a		
lubricating oil//[GLO] market for lubricating oil	0,0025	1,4	0,5	
diesel//[GLO] market group for diesel	0,131	72,6	27,2	

Quelle: Eigene Berechnung

2.5.2 Teilstromtrennung

Die Teilstromtrennung innerhalb des Altrohres erfolgt durch ein Verfahren, bei dem per Druckluft an einer Öffnung des Altrohres zunächst ein Kalibrierschlauch aus PVC und dann zwei Gewebesläuche aus Polyester in das bestehende Rohr geschoben und durch Hinzugabe von Epoxidharz in 2-3 Stunden zu zwei getrennten Leitungen ausgehärtet werden (Veser und Londong 2017; Veser 2015). Für die Berechnung der Länge der Schläuche wird eine Raumhöhe von 2,5 m je Stockwerk angenommen. Aus Gründen der Vereinfachung wird die Länge anhand der vollständigen Höhe je Stockwerk berechnet. Für ein Einfamilienhaus werden zwei Stockwerke und ein Keller angenommen. Für die Berechnungen besteht ein Doppelhaus aus zwei und ein Reihenhauses aus drei Einfamilienhäusern. Für die Mehrfamilienhäuser werden drei Stockwerke zuzüglich Keller und vier Wohnungen je Stockwerk angesetzt. Für die Geschosswohnungsbauten werden fünf Stockwerke zuzüglich Keller und ebenfalls vier Wohnungen je Stockwerk angesetzt. Dadurch ergibt sich die benötigte Gesamtschlauchlänge für die Teilstromtrennung in den Systemalternativen (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16 Schlauchlänge Teilstromtrennung

Gebäudetyp	Anzahl	Schlauchlänge	Gesamtschlauchlänge
	St.	m	m
Einfamilienhäuser	34	7,5	255,0
Doppelhäuser	33	15	495,0
Reihenhäuser	199	22,5	4.477,5
Mehrfamilienhäuser	45	40	1.800,0
Geschosswohnungsbauten	64	60	3.840,0
Gesamt			10.867,5

Quelle: Eigene Berechnung

Die Kalibrierschläuche aus PVC (0,375 kg / m) (IST 2018) und Schlauchliner aus Polyester (0,64 kg / m) (lineTEC 2018) werden anhand von Herstellerangaben erfasst. Zur Aushärtung werden 0,5 kg / m Epoxidharz (Veser 2015) benötigt. Bei einer angesetzten Lebensdauer von 50 Jahren (IKT 2013) für die Schläuche und das Harz ergibt sich auf ein Jahr bezogen folgende Materialauflistung für die Teilstromtrennung innerhalb des Altrohres in den Systemalternativen (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17 Konstruktionsmaterial Teilstromtrennung

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
		kg / STV*a		
PVC	polyvinylchloride, suspension polymerised//[GLO] market for polyvinylchloride, suspension polymerised		81,5	
Polyester	fleece, polyethylene//[GLO] market for fleece, polyethylene		139,1	
Epoxidharz	epoxy resin, liquid//[GLO] market for epoxy resin, liquid		108,7	

Quelle: Eigene Berechnung

2.5.3 Ab- bzw. Grauwasserbehandlungsanlagen

Für die Kläranlage im Status-Quo-System und SYAL1 wird das Modul „Wastewater treatment facility construction, capacity 4.7E10l/year – CH“ aus Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Wenn die Mengenangabe von diesem Modul (4.7E10l/year) auf die Menge Abwasser im Status-Quo-Faktor ($\cong 478.415.581,4 \text{ l} / \text{STV}^*a$) (siehe Kapitel 2.4.2) skaliert wird, ergibt dies einen Skalierungsfaktor von 98,2. Anhand diesem werden die Materialien für das Status-Quo-System errechnet. Für die Materialmengen in SYAL1 wird errechnet, wie groß dessen Abwassermenge ($\cong 420.330.605,6 / \text{STV}^*a$) (siehe Kapitel 2.4.2) im Vergleich zum Status-Quo-Systems ist ($\cong 87,9\%$) und anhand dieses Prozentsatzes die Materialien berechnet. Als Lebensdauer werden 30 Jahre angesetzt (Doka 2009). In Bezug auf ein Jahr ergibt sich folgende Materialauflistung für die Kläranlage (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18 Konstruktionsmaterial Kläranlage

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SQ	SYAL1
	kg	kg / STV*a	
aluminium, cast alloy//[GLO] market for aluminium, cast alloy	221.000	75,0	65,9
chemical, inorganic//[GLO] market for chemicals, inorganic	127.000	43,1	37,9
chemical, organic//[GLO] market for chemical, organic	103.000.000	34.948,1	30.705,0
concrete, high exacting requirements//[CH] market for concrete, high exacting requirements	256.000	86,9	76,3
copper//[GLO] market for copper	235.000	79,7	70,1
glass fibre//[GLO] market for glass fibre	498.000	169,0	148,5
limestone, crushed, for mill//[CH] market for limestone, crushed, for mill	5.500.000	1.866,2	1.639,6
pitch//[CH] market for pitch	128.000	43,4	38,2

polyethylene, high density, granulate//[GLO] market for polyethylene, high density, granulate	622.000	211,0	185,4
polyethylene, low density, granulate//[GLO] market for polyethylene, low density, granulate	4.090	1,4	1,2
reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	19.800.000	6.718,2	5.902,5
steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	1.590.000	539,5	474,0
stone wool, packed//[GLO] market for stone wool, packed	222.000	75,3	66,2
synthetic rubber//[GLO] market for synthetic rubber	225.000	76,3	67,1

Quelle: Eigene Berechnung

Die Verbrennung des Klärschlammes, der nach der Klärgaserzeugung im Status-Quo-System zurückbleibt, erfolgt in einem Kohlekraftwerk. Für dieses wird das Standardmodul „Hard coal powerplant construction 500 MW – CH“ aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Als Lebensdauer werden 30 Jahre angesetzt (Dones et al. 2007). Der Mitverbrennungsanteil von Klärschlamm liegt bei Kohlekraftwerken bei durchschnittlich 2,75 % (Schmitz 2009). Die standardisierten Materialaufwendungen aus der Datenbank werden anhand dieses Prozentsatzes und der Lebensdauer auf 1 Jahr skaliert. Dadurch ergibt sich folgende Materialauflistung für das Kohlekraftwerk im Status-Quo-System (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19 Konstruktionsmaterial Kohlekraftwerk

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4 (kg)	SQ (kg / STV*a)
aluminium, cast alloy//[GLO] market for aluminium, cast alloy	96.000	88,0
aluminium, wrought alloy//[GLO] market for aluminium, wrought alloy	204.000	187,0
concrete, normal//[CH] market for concrete, normal	52.500	48,1
copper//[GLO] market for copper	650.000	595,8
polyethylene, high density, granulate//[RER] polyethylene production, high density, granulate	500.000	458,3
reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	42.200.000	38.683,3
steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	400.000	366,7
steel, low-alloyed, hot rolled//[GLO] market for steel, low-alloyed, hot rolled	3.600.000	3.300,0
stone wool//[GLO] market for stone wool	375.000	343,8

Quelle: Eigene Berechnung

Der semizentrale Wärmetauscher inklusive Wärmepumpe in SYAL1 wurde gemeinsam mit Fachexperten ausgelegt (UHRIG 2018, Viessmann 2018) (siehe Anhang A11 und A12), da für einen Temperaturentzug von 10 K durch einen Wärmetauscher im Kanal in der Praxis noch kein Beispiel vorliegt. Die Fläche des Wärmetauschers wurde mit 40 m² durch die Fachexperten errechnet. Als Material wird Edelstahl vorgesehen, der bei der genannten Fläche mit 936 kg berechnet wurde (UHRIG 2018). Die Lebensdauer des Wärmetauschers wird mit 50 Jahren festgelegt (Studer 2005). Als Material für die Wärmepumpe werden Stahlbleche mit 311,4 kg, Stahl mit 608 kg und Kupfer mit 260,6 kg veranschlagt (Viessmann 2018). Die Lebensdauer des Wärmetauschers wird mit 20 Jahren festgelegt (Heck 2007). Skaliert auf ein Jahr und in Übertragung auf die Materialien der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) ergibt sich somit folgende Auflistung für die semizentrale Wärmerückgewinnung in SYAL1 (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20 Konstruktionsmaterial semizentrale Wärmerückgewinnung

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL1 (kg / STV*a)
Edelstahl	steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	18,7
Stahlblech	tin plated chromium steel sheet, 2 mm//[GLO] market for tin plated chromium steel sheet, 2 mm	15,6
Stahl	steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	30,4
Kupfer	copper//[GLO] market for copper	13,0

Quelle: Eigene Berechnung

Die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen inklusive Wärmerückgewinnung in SYAL2 und SYAL3 wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit einem Hersteller für Grauwasserbehandlungsanlagen vorgenommen (INTEWA 2018a, b). Drei verschiedene Größenmodelle dieses Herstellers wurden auf die jeweiligen Gebäudetypen im Stadtviertel (siehe Kapitel 2.1) übertragen. Für die Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser (\cong in Summe 266 St.) wird je Gebäude eine Anlage des Typs „Aqualoop 300“ vorgesehen. Für die Mehrfamilienhäuser (\cong 45 St.) wird je Gebäude eine Anlage des Typs „Aqualoop 1800“ und für die Geschosswohnungsbauten (\cong 64 St.) des Typs Aqualoop 3600“ vorgesehen (INTEWA 2018a). Für die Anlagen wird eine Lebensdauer von 20 Jahren angesetzt (INTEWA 2018b). Skaliert auf ein Jahr und in Übertragung auf die Materialien der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) ergibt sich somit folgende Auflistung für die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen in SYAL2 und SYAL3 (siehe Tabelle 20).

Tabelle 21 Konstruktionsmaterial dezentrale Grauwasserbehandlungsanlagen

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL2	SYAL3
		kg / STV*a	
Edelstahl	steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	762,8	
PP	polypropylene, granulate//[GLO] market for polypropylene, granulate	197,6	
PE-HD	polyethylene, high density, granulate//[GLO] market for polyethylene, high density, granulate	3.977,2	
PE	polyethylene, low density, granulate//[GLO] market for polyethylene, low density, granulate	130,4	
ABS	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer//[GLO] market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	189,1	
EPDM	ethylene, pipeline system//[GLO] market for ethylene, pipeline system	11.892,5	

Quelle: Eigene Berechnung

2.5.4 Bioabfall- und Schwarzwasserbehandlungsanlage

Im Status-Quo-System wird der Bioabfall durch ein Kompostwerk behandelt. Für dessen Konstruktionsmaterial wird das Modul „Composting facility construction, open – CH“ aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Das Modul nimmt eine jährliche Behandlungsmenge von 10 Millionen kg / a an. Die angegebenen Konstruktionsmaterialien werden auf die jährliche Bioabfallmenge des analysierten Stadtviertels ($\cong 248.969$ kg / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.5) angepasst und anhand der Lebensdauer von 25 Jahren (Nemecek und Kägi 2007) auf ein Jahr skaliert. Dadurch ergibt sich folgende Materialauflistung für das Kompostwerk im Status-Quo-System (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22 Konstruktionsmaterial Kompostwerk

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4 (kg)	SQ (kg / STV*a)
cast iron//[GLO] market for cast iron	96.000	49,8
concrete, sole plate and foundation//[CH] market for concrete, sole plate and foundation	204.000	0,4
copper//[GLO] market for copper	52.500	0,4
glued laminated timber, for outdoor use//[GLO] market for glued laminated timber, for outdoor use	650.000	0,3
gravel, crushed//[CH] market for gravel, crushed	500.000	21.510,9
pitch//[CH] market for pitch	42.200.000	121,5
reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	400.000	21,1
sand//[GLO] market for sand	3.600.000	1.165,2
steel, low-alloyed, hot rolled//[GLO] market for steel, low-alloyed, hot rolled	375.000	37,3

Quelle: Eigene Berechnung

Die semizentrale Zerkleinerungsanlage für den Bioabfall in SYAL1 besteht laut Herstellerangaben nahezu ausschließlich aus Edelstahl (MOCO 2018). Für die Zerkleinerungsanlage wird eine Lebensdauer von 20 Jahren (Jungbluth et al. 2007) festgelegt. Die für die in SYAL2 und SYAL3 benötigten Materialien für die dezentralen Küchenabfallzerkleinerer umfassen Edelstahl (0,29 kg / EW*a) (Hiessl et al. 2010) und Kupfer (0,01 kg / EW*a) (Hiessl et al. 2010). Für die Küchenabfallzerkleinerer wird eine Lebensdauer von 15 Jahren (Hiessl et al. 2010) festgelegt. In Übertragung auf die Materialien aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) und in Bezug auf die Lebensdauer skaliert auf ein Jahr ergibt sich folgende Materialauflistung für die Bioabfallzerkleinerung (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23 Konstruktionsmaterial Bioabfallzerkleinerung

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
		kg / STV*a		
Stahl	steel, chromium steel 18/8, hot rolled//[GLO] market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	13,5		98,2
Kupfer	copper//[GLO] market for copper	-		3,4

Quelle: Eigene Berechnung

Für das Schwarzwasser wird in allen Systemalternativen ein Vakuumsystem vorgesehen. Hierfür werden zunächst Vakuumtoiletten benötigt. Es wird angenommen, dass in den Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern (\cong in Summe 266 St.) des analysierten Stadtviertels je zwei Toiletten im Haushalt installiert sind und in den restlichen Gebäudetypen je Haushalt (\cong in Summe 2.129 St.) jeweils eine Toilette. In Summe werden somit 2.661 Vakuumtoiletten benötigt. Für die Toiletten wird das Modul „sanitary ceramics production – CH“ aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Die dort angegebenen Werte beziehen sich auf ein Kilo Keramik. Es wird anhand einer handelsüblichen Toilette ein Gewicht von 20 kg je Vakuumtoilette geschätzt. In Bezug auf die Toilettenanzahl ergibt sich somit ein Keramikgewicht von 53.220 kg, anhand welchem die Werte aus Ecoinvent angepasst sind. In Bezug auf die Lebensdauer werden 30 Jahre angesetzt (Hiessl et al. 2010). Skaliert auf ein Jahr ergibt sich für die Vakuumtoiletten folgende Materialauflistung (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24 Konstruktionsmaterial Vakuumtoiletten

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kg	kg / STV*a		
clay//[CH] market for clay	0,43		754,0	
feldspar//[GLO] market for feldspar	0,38		672,4	
kaolin//[GLO] market for kaolin	0,44		787,7	
silica sand//[GLO] market for silica sand	0,25		445,3	

Quelle: Eigene Berechnung

Die Übertragung der Nennweiten (DN) aus dem Kanalnetz (siehe Anhang A1) auf das Vakuumnetz erfolgt in Anlehnung an Remy und Ruhland (2006) wie folgend dargestellt. Bei den Vakuumleitungen handelt es sich um Polyethylen-Leitungen, deren Gewichtsangabe aus Herstellerangaben errechnet wird (SIMONA 2017) (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25 Übertragung Nennweiten und Gewicht Vakuumnetz

DN Kanalnetz (mm)	DN Vakuumnetz (mm)	Länge (m)	Gewicht (kg / m)	Gesamtgewicht (kg)
2000, 1800	200	357,2	18,1	6.466,0
600, 1100, 1000/1500, 800/1200, 700/1500	150	1.969,2	9,5	18.708,0
DN 600, 600/900, 500, 450, 400	100	1.935,3	4,7	9.115,1
DN 350, 300, 250	65	2.720,6	1,9	5.033,1
DN 200, 150	50	407,6	1,4	558,5
Gesamt		7.389,9		40.480,7

Quelle: Übertragung Nennweiten in Anlehnung an Remy und Ruhland 2006, Gewichtsangabe SIMONA 2017

Das Gesamtgewicht wird auf das passende Material in der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) angesetzt und anhand der Lebensdauer von 60 Jahren (Hiessl et al. 2010) auf ein Jahr skaliert. Somit ergibt sich für das Vakuumnetz in den Systemalternativen folgende Auflistung (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26 Konstruktionsmaterial Vakuumnetz

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
		kg / STV*a		
Polyethylen	polyethylene, high density, granulate//[GLO] market for polyethylene, high density, granulate	674,7		

Quelle: Eigene Berechnung

In SYAL3 wird das Vakuumnetz nicht im Kanalbestand sondern in einer eigenen Vakuumtrasse verlegt. Für deren Aushub wird eine Grabung von 0,5 m Tiefe und 0,5 m Breite für die gesamte Kanalnetzlänge ($\cong 7.389,9$ m) (siehe Anhang A1) veranschlagt. Dies ergibt einen Aushub von 1.847,5 m³. Der Dieserverbrauch (0,131 kg / m³) und Schmierölverbrauch (0,0025 kg / m³) der zum Aushub benötigten Baumaschine wird dem Modul „Excavation, hydraulic digger - GLO“ der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) entnommen. Auf die Lebensdauer des Vakuumnetzes von 60 Jahren bezogen ergibt sich für ein Jahr folgender Materialaufwand für die Verlegung des Vakuumnetzes in SYAL3 (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27 Aushub Vakuumtrasse

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4 (kg / m ³)	SYAL3 (kg / STV*a)
lubricating oil//[GLO] market for lubricating oil	0,0025	0,1
diesel//[GLO] market group for diesel	0,131	4,0

Quelle: Eigene Berechnung

Für das Vakuumsystem in den Systemalternativen ist eine Vakuumpumpe notwendig (Roediger 2018b). Die Materialauflistung wird hierfür von Remy und Ruhland (2006) übernommen und auf die Materialien aus der Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) übertragen und anhand der Lebensdauer von 20 Jahren (Herbst 2008) auf 1 Jahr skaliert (Herbst 2008). Damit ergibt sich für die Vakuumpumpe folgende Materialauflistung (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28 Konstruktionsmaterial Vakuumpumpe

Material	Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
		kg / STV*a		
Stahlbleche	sheet rolling, steel//[GLO] market for sheet rolling, steel	300		
Gusseisen	cast iron//[GLO] market for cast iron	30		
Polyethylen	polyethylene, high density, granulate//[GLO] market for polyethylene, high density, granulate	2.024		

Quelle: Eigene Berechnung

Für die Materialaufwendungen der Biogasanlage, die zur Co-Vergärung des Schwarzwassers und der biogenen Abfälle in allen Systemalternativen vorgesehen ist, wird das Modul „Anaerobic digestion plant construction, for biowaste – CH“ aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Die Angaben in diesem Modul werden ohne Anpassung übernommen, da die Auslegung der Anlage mengenmäßig mit der Bioabfallmenge in den Systemalternativen übereinstimmt. Für die Biogasanlage wird eine Lebensdauer von 20 Jahren (Jungbluth et al. 2007) angesetzt. Somit ergibt sich in Bezug auf ein Jahr folgende Auflistung (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29 Konstruktionsmaterial Biogasanlage

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	kg	kg / STV*a		
aluminium, cast alloy//[GLO] market for aluminium, cast alloy	320	16,0		
aluminium, wrought alloy//[GLO] market for aluminium, wrought alloy	680	34,0		
cast iron//[GLO] market for cast iron	188.000	9.400,0		
concrete, normal//[CH] market for concrete, normal	1.850	92,5		
copper//[GLO] market for copper	3.000	150,0		
gravel, round//[CH] market for gravel, round	1.970.000	98.500,0		
pitch//[CH] market for pitch	11.200	560,0		
polystyrene, high impact//[GLO] market for polystyrene, high impact	3.920	196,0		
polyvinylchloride, emulsion polymerised//[GLO] market for polyvinylchloride, emulsion polymerised	447	22,4		
polyvinylchloride, suspension polymerised//[GLO] market for polyvinylchloride, suspension polymerised	3.050	152,5		
reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	120.000	6.000,0		
sand//[GLO] market for sand	106.000	5.300,0		

Quelle: Eigene Berechnung

2.5.5 Fahrzeuge

Die eingesetzten Fahrzeuge umfassen im Status-Quo-System einen LKW für den Klärschlammtransport und ein Müllabfuhrfahrzeug für den Bioabfall. Die gesamte Transportstrecke beträgt 1.907 km / STV*a (siehe Kapitel 2.4.4). In SYAL1 wird lediglich ein Müllabfuhrauto eingesetzt, das durch die semizentrale Behandlung des Bioabfalls eine geringere Transportstrecke von nur 237 km / STV*a fährt (siehe Kapitel 2.4.4). Für die Konstruktionsmaterialien der Transportfahrzeuge wird das Modul „transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 – RER“ aus der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) verwendet. Die dort angegebenen Mengen beziehen sich auf eine Lebensdauer von 540.000 km, die anhand der km / a für das Status-Quo-System und SYAL1 skaliert werden. Dadurch ergeben sich folgende Konstruktionsmaterialien für die eingesetzten Fahrzeuge (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30 Konstruktionsmaterial Fahrzeuge

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SQ	SYAL1
	kg	kg / STV*a	
alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state//[GLO] market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state	65,3	0,2	-
aluminium, cast alloy//[GLO] market for aluminium, cast alloy	112,0	0,4	-
aluminium, wrought alloy//[GLO] market for aluminium, wrought alloy	239,0	0,8	0,1
brass//[CH] market for brass	32,6	0,1	-
cast iron//[GLO] market for cast iron	1.800,0	6,4	0,8
copper//[GLO] market for copper	49,0	0,2	-

Fortsetzung der Tabelle auf der Folgeseite

Fortsetzung der Tabelle 30 Konstruktionsmaterial Fahrzeuge

Bezeichnung in Ecoinvent 3.4	Angabe in Ecoinvent 3.4	SQ	SYAL1
	kg	kg / STV*a	
electronics, for control units//[GLO] market for electronics, for control units	49,0	0,2	-
flat glass, uncoated//[GLO] market for flat glass, uncoated	73,4	0,3	-
lead//[GLO] market for lead	73,6	0,3	-
lubricating oil//[GLO] market for lubricating oil	100,0	0,4	-
pig iron//[GLO] market for pig iron	2.940,0	10,4	1,3
pitch//[CH] market for pitch	16,3	0,1	-
polyethylene, high density, granulate//[RER] polyethylene production, high density, granulate	375,0	1,3	0,2
propylene glycol, liquid//[GLO] market for propylene glycol, liquid	35,9	0,1	-
reinforcing steel//[GLO] market for reinforcing steel	3.970,0	14	1,7
section bar rolling, steel//[GLO] market for section bar rolling, steel	2.940,0	10,4	1,3
sheet rolling, steel//[GLO] market for sheet rolling, steel	682,0	2,4	0,3
stone wool, packed//[GLO] market for stone wool, packed	16,3	0,1	-
sulfuric acid//[GLO] market for sulfuric acid	27,9	0,1	-
synthetic rubber//[GLO] market for synthetic rubber	612,0	2,2	0,3
wire drawing, copper//[GLO] market for wire drawing, copper	49,0	0,2	-

Quelle: Eigene Berechnung

3 Nachhaltigkeitsbewertung

Im Folgenden werden das für die Nachhaltigkeitsbewertung verwendete Konzept und die zur Herleitung der Indikatorenwerte eingesetzten Methoden detaillierter dargestellt. Die Bewertung wird durch eine Ableitung der Nachhaltigkeitsregeln des Konzepts und Indikatoren für den untersuchten Wasser-Energie-Nexus sowie durch die Überführung der Indikatorenwerte in eine Bewertungsskala vorgenommen.

3.1 Das Integrative Konzept nachhaltiger Entwicklung

Die Nachhaltigkeitsbewertung wird auf Basis des „Integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung“ (Kopfmüller et al. 2001) der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren ausgearbeitet. Es ist als Konzept ausführlich begründet, detailliert ausgearbeitet und damit „sozusagen (nahezu) bereit zur Anwendung“ (Dusseldorp 2014 S. 25). Bezug nimmt das Konzept u.a. auf die Definition der Brundtland-Kommission, nach der eine Entwicklung dann nachhaltig ist, „wenn sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Hauff 1987, S. 46).⁸ Ausgehend von dieser Definition werden die intragenerative Gerechtigkeit, d.h. die Schaffung gerechter Möglichkeiten der Bedürfnisbefriedigung innerhalb jeder Generation, und die intergenerative Gerechtigkeit, d.h. das Sicherstellen vergleichbarer Möglichkeiten der Bedürfnisbefriedigung für die künftige Bevölkerung, als gleichberechtigt und anthropozentrisch motiviert gesetzt. Die Bezeichnung „integrativ“ bezieht sich also zunächst auf die Vereinbarung einer gegenwärtigen und langfristigen Perspektive mit dem Menschen im Mittelpunkt

⁸ Für eine vollständige Darstellung der Entstehungsumstände und Bezüge zu den eingegangenen Nachhaltigkeitsdebatten und wissenschaftlichen Positionen siehe Coenen und Grunwald (2003) sowie Kopfmüller et al. (2001).

nachhaltiger Entwicklung (Grunwald 2016; Nölting et al. 2012; Kopfmüller et al. 2001; Jörissen et al. 2000).

Auf Basis dieses Gerechtigkeitspostulats werden drei generelle Nachhaltigkeitsziele abgeleitet, die auf globaler Ebene Gültigkeit haben sollen: I. Sicherung der menschlichen Existenz; II. Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials; III. Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten. Die Ziele sind „integrativ“, weil sie nicht isoliert anhand der Dimensionen Ökologie, Wirtschaft oder Soziales, sondern bereichsüberspannend formuliert werden (Rösch et al. 2016; Kopfmüller et al. 2001). Sie stellen somit sicher, dass die Bewertung nicht auf Grundlage einzelner Felder von Nachhaltigkeit (Ökologie, Wirtschaft oder Soziales) erfolgt.

Diese übergeordneten Ziele werden durch 15 Mindestanforderungen in Form sogenannter „substanzieller Nachhaltigkeitsregeln“ operationalisiert, d.h. durch Handlungsleitlinien konkretisiert (Kopfmüller 2007). Die Regeln werden im Folgenden noch genauer erläutert (siehe Kapitel 3.4). Sie bieten eine Interpretationshilfe zum abstrakten, globalen Leitbild nachhaltiger Entwicklung (Hartmuth et al. 2006) und umfassende Prüfkriterien für die Bewertung (Grunwald 2019, 2016; Kopfmüller 2007). Zur besseren Übersicht werden die Regeln eines Nachhaltigkeitsziel dabei jeweils einer Farbe zugeordnet (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31 Ziele und Regeln des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung

Generelle Nachhaltigkeitsziele		
I. Sicherung der menschlichen Existenz	II. Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials	III. Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten
Substanzielle Nachhaltigkeitsregeln		
I.1 Schutz der menschlichen Gesundheit	II.1 Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	III.1 Chancengleichheit hinsichtlich Bildung, Beruf, Information
I.2 Gewährleistung der Grundversorgung	II.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	III.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen
I.3 Selbstständige Existenzsicherung	II.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	III.3 Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt
I.4 Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten	II.4 Vermeidung unvermeidbarer technischer Risiken	III.4 Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur
I.5 Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede	II.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskaptals	III.5 Erhaltung der sozialen Ressourcen

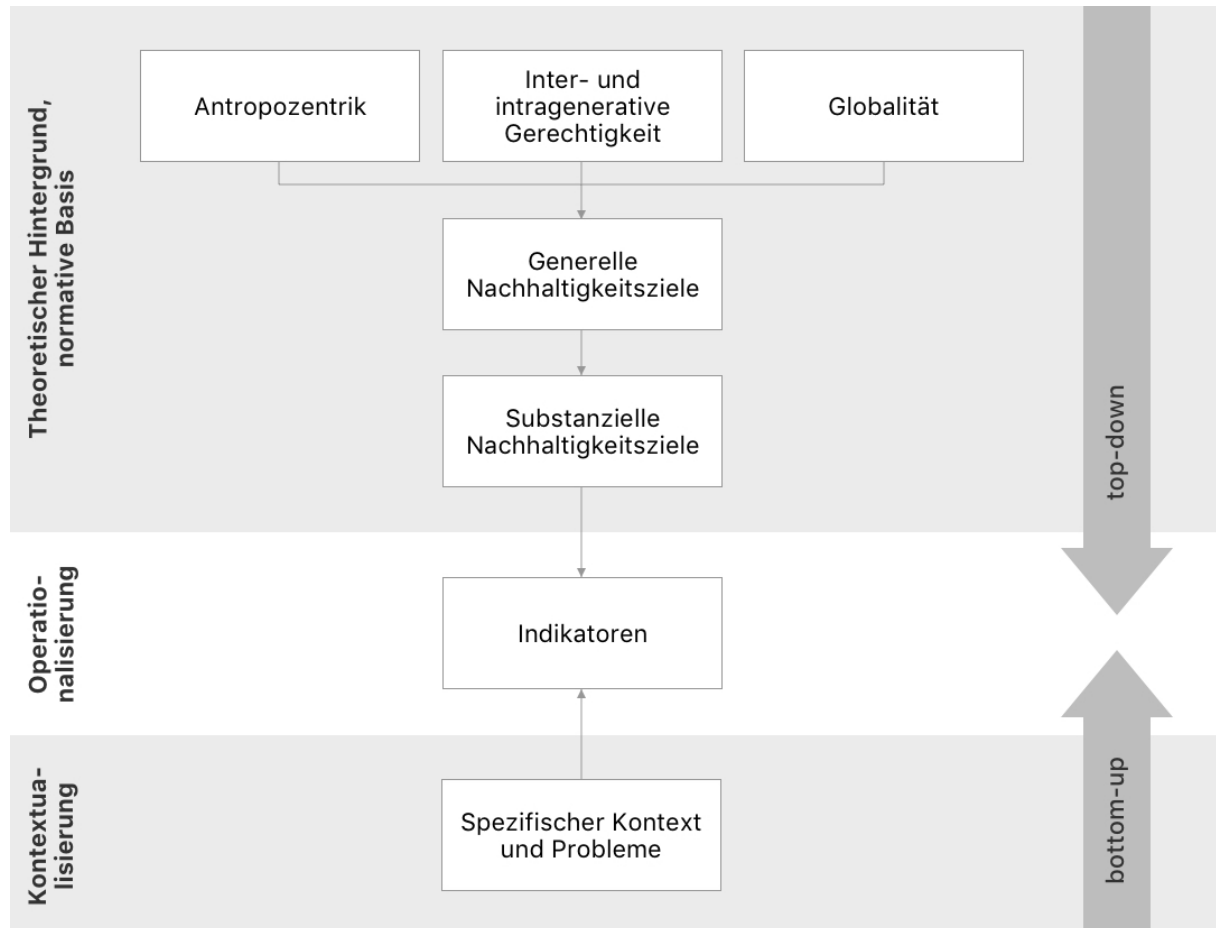
Quelle: Kopfmüller et al. 2001 (farblich modifiziert)

Für die Durchführung einer Nachhaltigkeitsbewertung sind diese Regeln durch eine Auswahl geeigneter Indikatoren für den jeweiligen Forschungsgegenstand und -kontext zu „übersetzen“ (Grunwald 2016, S. 95), d.h. zu kontextualisieren. Das „Integrative“ des Konzeptes spiegelt sich hier durch die Verknüpfung der top-down vorgegebenen Regeln mit bottom-up herangezogenen „real existierende[n] Probleme[n]“ (Kopfmüller 2007, S. 17) wider (siehe Abbildung 22).

Für die Übertragung der Regeln auf den jeweiligen Forschungsgegenstand und -kontext können sowohl qualitative als auch quantitative Indikatoren herangezogen werden (Grunwald 2016; Kopfmüller et al. 2001). Eine Aggregation zu einem Gesamtmaß (z.B. in Form eines Indexes) sieht das integrative Konzept nicht vor, da dies ein Widerspruch zum

Anspruch des Regelwerks wäre das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung ausdifferenzieren und damit greifbarer zu machen (Grunwald 2019; Hartmuth et al. 2006; Coenen und Grunwald 2003; Kopfmüller et al. 2001).

Abbildung 22 Struktur des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung

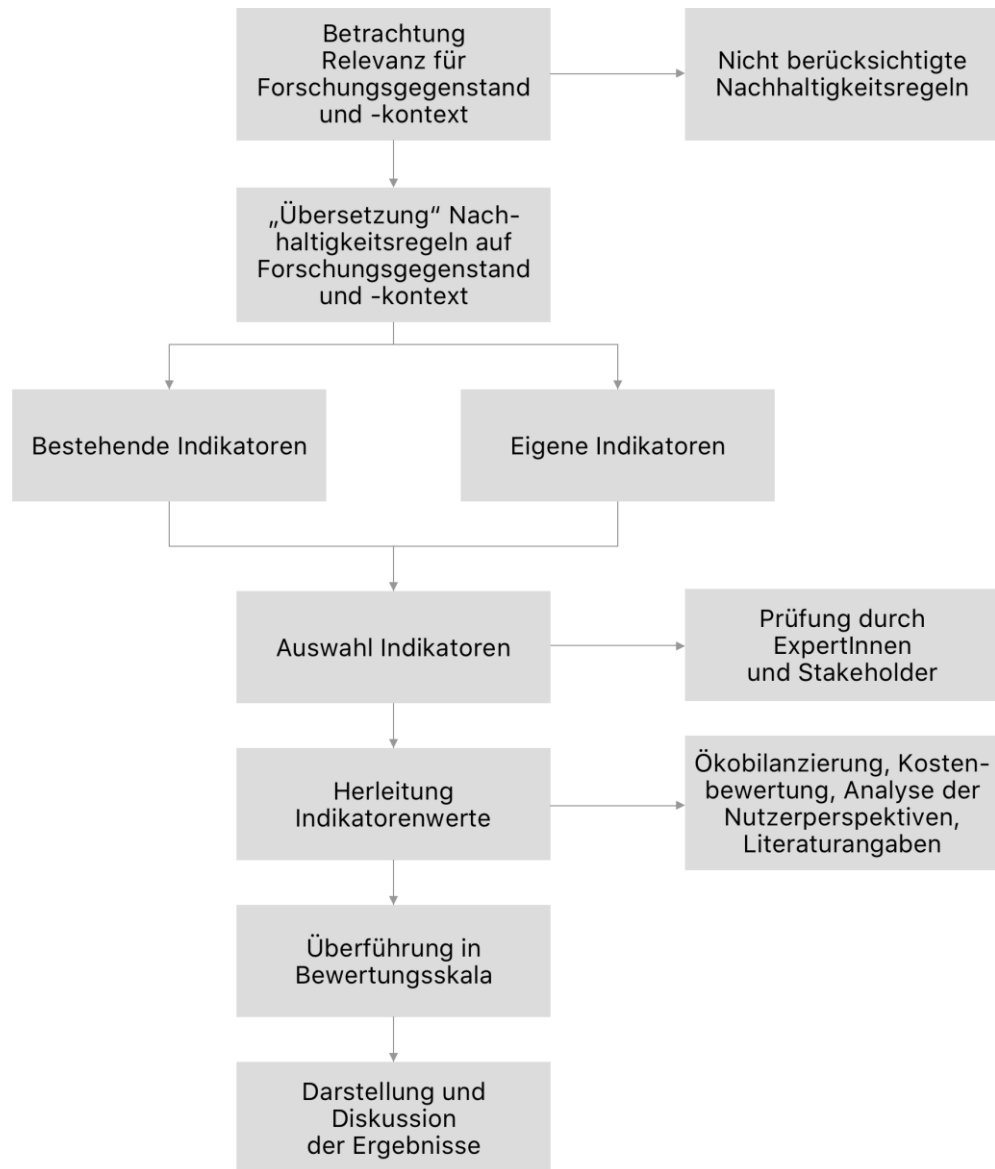


Quelle: Eigene Darstellung nach Grunwald 2016; Nölting et al. 2012; Kopfmüller et al. 2001

3.2 Vorgehensweise

Ziel der Nachhaltigkeitsbewertung ist festzustellen, ob die entwickelten Systemalternativen ein größeres Potenzial als das Status-Quo-System aufweisen zu einer nachhaltigen Entwicklung im Untersuchungskontext beizutragen. Wenn dies der Fall ist, soll darüber hinaus die Systemalternative identifiziert werden, die hierzu das größte Potenzial hat. Die Vorgehensweise zur Bewertung (siehe Abbildung 23) wird im Folgenden schrittweise erläutert.

Abbildung 23 Vorgehen zur Nachhaltigkeitsbewertung



Quelle: Eigene Darstellung

Zunächst wird betrachtet, ob jede Nachhaltigkeitsregel aus dem integrativen Konzept für den Forschungsgegenstand und -kontext relevant ist. Das integrative Konzept bezieht sich auf die nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft als Ganzes und erhebt den Anspruch global gültige Regeln zu formulieren. Da Technologien stets nur einen Beitrag zu nachhaltiger Entwicklung leisten können und vor dem Hintergrund einer Vielzahl weiterer gesellschaftlicher Entwicklungen betrachtet werden müssen, kann es sein, dass nicht alle Regeln für den Forschungsgegenstand und -kontext Anwendung finden (Grunwald 2012). Es wird aus diesem Grund auch bewusst vermieden die „nachhaltigste“ Systemalternative bestimmen zu wollen.

Die Nachhaltigkeitsregeln, die Anwendung finden, werden in passende Indikatoren „übersetz[t]“ (Grunwald 2016, S. 95), welche die jeweilige Nachhaltigkeitsregel „in möglichst adäquater Weise abbilden“ (Coenen und Grunwald 2003, S. 49). Dabei kann es durch den Forschungsgegenstand und -kontext sein, dass Regeln durch einen Indikator oder mehrere Indikatoren repräsentiert werden (Coenen und Grunwald 2003).

Ein erster Indikatorensatz wird aus Studien zu Themen mit inhaltlichen Ähnlichkeiten zum Wasser-Energie-Nexus abgeleitet, um deren vorhandenes Know-How zu nutzen. Wird kein Indikator in den bestehenden Bewertungsansätzen und Forschungsprojekten gefunden, wird ein eigener formuliert. Für die so getroffene Auswahl der Indikatoren wurde Feedback durch ExpertInnen und Stakeholder eingeholt, vor allem, um in Erfahrung zu bringen, ob möglicherweise Indikatoren fehlen. Den Expertinnen und Stakeholdern wurde hierzu schriftlich das Vorhaben geschildert und eine Liste mit den gewählten Indikatoren zugesendet. Sie sollten in einer Spalte durch ein „+“ bzw. „-“ kennzeichnen, wenn ein Indikator unbedingt in der Bewertung enthalten sein sollte, bzw. als nicht notwendig oder zielführend für die Bewertung eingeschätzt wird. Darüber hinaus hatten sie in einem Kommentarfeld die Möglichkeit einzutragen, ob ihnen Kriterien fehlen und / oder Adaptionen von ausgewählten Indikatoren vorzunehmen.

Bei den befragten Personen handelte es sich um Ingenieure und Fachplaner ($n = 4$), die an der technologischen Auslegung der Systemalternativen beteiligt waren und regionale ForscherInnen ($n = 3$), die sich im weitesten Sinne mit dem Thema Wasser-Energie-Nexus befassen sowie lokale zivilgesellschaftliche Organisationen ($n = 2$), die im Kontext der städtischen Nachhaltigkeit arbeiten. In Summe beteiligten sich 9 von 15 angefragten ExpertInnen und Stakeholder. Die Rücklaufquote war damit relativ hoch, dennoch ist die Auswahl der Befragten limitiert, wodurch eine gewisse Voreingenommenheit nicht ausgeschlossen werden kann. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass für ein Feedback Vorkenntnisse über den Forschungsgegenstand selbst für nötig befunden wurden und zur Berücksichtigung der lokalen und regionalen Spezifika soweit wie möglich ExpertInnen und Stakeholder aus dem Bundesland oder der Stadt des Untersuchungsquartals befragt werden sollten. Alle ExpertInnen und Stakeholder empfanden die getroffene Auswahl als relevant für das Forschungsvorhaben und schlugen lediglich geringfügige Adaptionen vor.

Die Herleitung der Werte für die ausgewählten Indikatoren erfolgt anhand eigener Erhebungen durch eine Kostenbewertung, Umweltbewertung und Analyse der Nutzerperspektiven (siehe Kapitel 3.3) sowie durch Literaturangaben oder qualifizierte Abschätzung.

Nach der Herleitung werden die unterschiedlichen Indikatorenwerte und Einheiten in eine Bewertungsskala überführt. Als Bewertungsskala (BS) für die Indikatoren wird 0 - 4 festgelegt (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32 Bewertungsskala

BS = 0	BS = 1	BS = 2	BS = 3	BS = 4
Keine Herleitung möglich aufgrund fehlender Daten	Im Vergleich schlechtesten erzielter Wert	Nächst besserer Wert gegenüber BS = 1	Nächst besserer Wert gegenüber BS = 2	Nächst besserer Wert gegenüber BS = 3

Quelle: Eigene Definition

Sollte ein Indikatorenwert aufgrund fehlender Daten nicht hergeleitet werden, wird dieser mit BS = 0 bewertet und dennoch aufgeführt, wenn er für den Forschungsgegenstand und -kontext relevant ist. BS = 1 entspricht im Vergleich der Systeme dem für den jeweiligen Indikator schlechtesten erzielten Wert. BS = 2 entspricht dem nächst besseren Wert gegenüber BS = 1; BS = 3 entspricht dem nächst besseren Wert gegenüber BS = 2; BS = 4 entspricht dem nächst besseren Wert gegenüber BS = 3. Es werden keine Zielwerte definiert, sondern die Systemalternativen mit dem Status-Quo-System verglichen. Folglich repräsentiert BS = 4 nicht einen nachhaltigen oder den nachhaltigsten Wert, sondern lediglich dem im Vergleich der Indikatorenwerte erzielten Wert, der eher zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt als BS = 1, 2 und 3.

Bei vier unterschiedlichen Werten für einen Indikator wird jeder Stufe der Bewertungsskala ein Wert zugeordnet. Gibt es drei unterschiedliche Ergebnisse von Indikatorenwerten, erfolgt die Zuordnung von BS = 1 bis zu BS = 3. Gibt es zwei unterschiedliche Ergebnisse, so erfolgt die Zuteilung zwischen BS = 1 und BS = 2. In konsequenter Anwendung werden damit auch marginale Unterschiede der Indikatorenwerte (< 10%) durch die unterschiedliche Zuteilung ausgedrückt. Dies ist bei der Einordnung der Ergebnisse zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.2.1). Eine Aggregation

der Bewertungsskala zu einer Gesamtpunktzahl ist bewusst nicht vorgesehen, da es das Ziel der Arbeit ist, die Informationsbasis signifikant zu verbessern. Durch das Neben- und Gegenüberstellen der einzelnen Indikatoren können die vielfältigen Aspekte innerhalb des Wasser-Energie-Nexus detaillierter beleuchtet werden, als dies bei einer Gesamtpunktzahl der Fall wäre. Darüber hinaus werden durch das Neben- und Gegenüberstellen potentielle Zielkonflikte zwischen den einzelnen Nachhaltigkeitsregeln ersichtlich, die im Falle einer Anwendung in der Praxis adressiert werden müssten (siehe Kapitel 4.2.2 und ausführlich hierzu Dusseldorp 2017). Am Ende der Abschnitte zu den einzelnen Nachhaltigkeitszielen findet sich eine Übersicht der Indikatoren, Einheiten, Werte und der Zuordnung auf der Bewertungsskala.

3.3 Methoden zur Herleitung der Indikatorenwerte

Die Kostenbewertung wird auf Basis der „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen“ (KVR-Leitlinien) der Bund- / Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) vorgenommen. Es handelt sich dabei um ein Standardwerk der wasserwirtschaftlichen Planungspraxis. Das grundlegende Verfahren stellt hierbei die dynamische Kostenvergleichsrechnung dar. Dabei werden alle über den Untersuchungszeitraum anfallenden Kostengrößen ausgehend des Bezugszeitpunktes Null erfasst und aufbereitet. Dies ist aufgrund der Langlebigkeit (siedlungs-)wasserwirtschaftlicher Systemkomponenten von Bedeutung (LAWA 2012). Die Summe der aufbereiteten Kostengrößen wird nach LAWA als Projektkostenbarwert (PKBW) bezeichnet und dient in dieser Arbeit zum Vergleich. Es wird nach Investitionskosten (IK), laufenden Kosten (LK) und Reinvestitionskosten (IKR) unterschieden (LAWA 2012).

Die Umweltbewertung erfolgt auf Basis einer Ökobilanzierung. Für die vollständige Umweltbewertung siehe Friedrich et al. 2019. Bei der Ökobilanzierung handelt es sich um eine anerkannte Methode zur Erfassung der Umweltwirkungen eines Produktes, einer Technologie oder einer Dienstleistung. Die Ökobilanzierung folgt den Regeln, die in den Normen DIN EN 14040 und DIN EN 14044 beschrieben sind. Alle Prozesse innerhalb des Lebenszyklus - von der für die Systemkonstruktion benötigten Rohstoffgewinnung und Produktion der Materialien bis zum eigentlichen Systembetrieb und den Prozessen am Ende des Produktlebensweges – sollen hierzu erfasst werden (DIN EN 14040: 2006; DIN EN 14044: 2006). Die für die Umweltbewertung getroffenen Annahmen (bezüglich der Systemgrenzen, Stoffströme etc.) basieren auf der Systemdarstellung. Die Wirkungs-

abschätzung zur Umweltbewertung erfolgt manuell in Excel anhand von aggregierten Datensätzen der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017), welche auf der ReciPe-Methode (siehe hierzu Goedkoop et al. 2013) basieren (siehe Anhang A13ff.). Da für die neu zu erhebenden Daten der alternativen System-komponenten keine Angaben zur Entsorgung vorliegen, konnten diese entgegen der Normvorgabe nicht berücksichtigt werden. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse durch die fehlende Entsorgung werden im Zusammenhang mit den verwendeten Daten besprochen (siehe Kapitel 4.2.2).

Die Erhebung der Nutzerperspektiven wurde in Kooperation mit dem Heidelberger Centrum für Soziale Investitionen und Innovationen (CSI) vorgenommen. Studierende generierten im Rahmen des Seminars „Soziologinnen und Soziologen in der Praxis“ hierzu Daten (CSI 2019). Durch einen Leitfaden gestützte, problemzentrierte Interviews (Witzel 2000) wurden durchgeführt, d.h. „eine offene, halbstrukturierte Befragung, welche die Befragten möglichst frei zu Wort kommen lässt, aber auf eine bestimmte Problemstellung zentriert ist“ (Kurz et al. 2007, S. 465) und mit Hilfe des Leitfadens immer wieder auf diese zurückführt. Während des Interviews wurden die Befragten mittels eines Informationsblatts über technische Systemkomponenten (Grauwasseraufbereitungsanlage, Regenversickerungsflächen, Vakuumtoilette und Küchenabfallzerkleinerer) in Kenntnis gesetzt (CSI 2019). Die Interviews wurden mit 14 Personen aus der gesamten Stadt des Untersuchungsquartiers durchgeführt. Vier der InterviewpartnerInnen sind EigentümerInnen von selbstbewohnten Einheiten, der Rest wohnt zur Miete (CSI 2019). Da die Nutzerperspektiven sehr stark kontextgebunden sind (Hegger und van Vliet 2010), ging es bei der Erhebung vor allem darum ein tieferes Verständnis über Einstellungen und Beweggründe der BewohnerInnen in Erfahrung zu bringen. Diesem sehr stark qualitativen Fokus der Befragungen ist die limitierte Anzahl der Befragungen geschuldet. Aufgrund der limitierten Anzahl wird bis auf die Angabe von Eigentums- bzw. Mietverhältnis vermieden, persönliche Merkmale der Befragten aufzuführen. Dies würde dazu verleiten Schlüsse über die Gesamtheit der NutzerInnen im Untersuchungsquartier zu ziehen, was anhand dieser Erhebung jedoch nicht möglich ist. Die Auswertung der Interviews erfolgte durch das CSI in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring 2015).

3.4 Ableitung von Wasser-Energie-Nexus bezogenen Regeln / Indikatoren & Herleitung der Indikatorenwerte

Im Folgenden wird für jede Nachhaltigkeitsregel die Auswahl der Indikatoren begründet, ihre Hintergründe sowie Bedeutung für den Forschungsgegenstand und -kontext geschildert.

3.4.1 Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz

Das Nachhaltigkeitsziel „Sicherung der menschlichen Existenz“ umfasst die Nachhaltigkeitsregeln, die notwendig sind, damit die jetzigen Generationen weder die Voraussetzungen für ihr eigenes noch das Leben künftiger Generationen zerstören. Darunter fällt zunächst das Aufrechterhalten der für die Gesundheit des Menschen erforderlichen Umweltbedingungen (Regel I.1) sowie der Grundversorgung (Regel I.2) (Kopfmüller et al. 2001; Jörissen et al. 2000). Um dieses Ziel einer „dauerhaft aufrecht erhaltbaren Entwicklung“ (Grunwald 2016, S. 99) zuzuordnen, muss es jedoch über das „nackt[e] Überlebe[n]“ (ebd.) hinausgehen. Vielmehr müssen die Menschen auch ein selbstbestimmtes Leben führen können (vgl. dazu Sen 1998). Mindestanforderungen hierfür sind, dass es allen Menschen offen steht ihre Existenz selbstständig zu sichern (Regel I.3), ihnen Umweltnutzungsmöglichkeiten in gerechter Verteilung zur Verfügung stehen (Regel I.4) und es einen Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede (Regel I.5) gibt (Grunwald 2012; Kopfmüller et al. 2001).

Tabelle 33 Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz:
Übersicht Indikatorenauswahl

Regel	Indikator	Quelle und Indikatorenbezeichnung ¹
I.1 Schutz der menschlichen Gesundheit	Hygienische Belastung des lokalen Fließgewässers	UN 2016; Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Qualität der Oberflächengewässer“ / DWA 2018b: „Vermeidung des Eintrags ökotoxischer Stoffe“
	Anteil blau-grüner Stadträume	Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Anteil an Grünflächen“ / French Ministry of Housing and Sustainable Homes et al. 2017; Minx et al. 2011; Economist Intelligence Unit 2009: „Anteil an versiegelter Fläche“ / Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Attraktivität“
I.2 Gewährleistung der Grundversorgung	Rückgewonnene Nährstoffe	DWA 2018b; Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Ressourcenrückgewinnung“
	Diversifikation der Wasserversorgung	Arcadis 2018; UN 2016; Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Zugang zu sauberem (und bezahlbarem) Trinkwasser“
I.3 Selbstständige Existenzsicherung	Nicht berücksichtigt, da weder das Status-Quo-System noch die Systemalternativen Einfluss auf die Einkommens- und Arbeitsmarktsituation im Untersuchungsquartier haben.	
I.4 Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten	Globale Erwärmung	Arcadis 2018; UN 2016; Minx et al.: „CO ₂ -Emissionen“ / DWA 2018b; Sartorius et al. 2016: „Vermeidung der Emission klimarelevanter Gase“ / Goedkoop et al. 2013: „Klimawandel“
I.5 Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede	Nicht berücksichtigt. Diese Regel gründet auf Armut und sozialer Marginalisierung, welche im Untersuchungskontext nicht durch das Status-Quo-System oder die Systemalternativen indiziert sind.	
Anmerkung: ¹ übersetzt		

I.1 Schutz der menschlichen Gesundheit

Indikator: Hygienische Belastung des lokalen Fließgewässers

Zwar liegt das analysierte Stadtviertel nicht direkt am lokalen Fluss Neckar, jedoch betrachtet sich Heidelberg als „Stadt am Fluss“ (Stadt Heidelberg 2017d, S. 3) und unternimmt gezielt Anstrengungen BewohnerInnen aller Stadtteile für Freizeitwecke „an den Fluss“ (Stadt Heidelberg 2017d, S. 3) zu bringen. Diverse wasserbezogene Freizeitaktivitäten wie z.B. „Stand-Up Paddling“ oder Rudern werden betrieben. Darüber hinaus findet jährlich ein renommierter Triathlon mit 1.200 Teilnehmern statt, welche eine Strecke im Neckar schwimmen (Stadt Heidelberg 2018b) (siehe Abbildung 24).

Abbildung 24 Freizeitaktivitäten auf dem Neckar



Quelle: Rothe 2018 (links), 2013 (rechts)

Aktivitäten mit direktem oder indirektem Wasserkontakt in Flüssen, die nicht als Badegewässer ausgewiesen sind, stellen ein gesundheitliches Risiko für Personen dar (BfG 2018; Schaum 2018), da dadurch Erkrankungen ausgelöst werden können, die mit Fieber, Durchfall und Erbrechen einhergehen können (BMU 2017c). Grund dafür ist, dass Fließgewässer durch die reguläre Einleitung von Kläranlagen und durch Mischwasserüberläufe in aller Regel hygienisch belastet sind (BMU 2017a; 2017c). Bei Mischwasserüberläufen werden die häuslichen Abwässer unbehandelt mit dem

Niederschlagswasser ins Fließgewässer eingeleitet, wenn die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kläranlage (z.B. bei starkem Niederschlag) überschritten wird. Dadurch werden die infrastrukturellen und technischen Systemkomponenten entlastet, das Gewässer jedoch belastet (Sieker 2019; Gantner und Barjenbruch 2012).

Ein so genannter Indikatororganismus für fäkale Verunreinigungen ist dabei *Escherichia coli*, kurz *E. coli* (BMU 2017a). *E. coli* sowie potentiell pathogene Mikroorganismen werden durch die konventionelle Abwasserbehandlung reduziert, aber nicht vollständig eliminiert (UBA 2011). Der Grenzwert für diese Bakterien liegt gemäß der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) bei 900 KbE / 100 ml für eine ausreichende Badegewässerqualität (EU 2006, 2008). Zum Vergleich: Im Kläranlagenablauf, d.h. nach der konventionellen Abwasserreinigung, liegen nach wie vor Konzentrationen von 10.000 bis 100.000 KbE / 100 ml vor (Steglich et al. 2016b).

Da im Neckar aktuell keine Badegewässer ausgewiesen sind (Untersteller 2017; EU 2006, 2008), wird der genannte Grenzwert vom Status-Quo-System überschritten. Dem Status-Quo-System wird somit BS = 1 auf der Bewertungsskala zugeordnet. In allen Systemalternativen wird das fäkalienhaltige Schwarzwasser gemeinsam mit den Bioabfällen vergärt und zur Verwendung des Gärrests als organischer Dünger hygienisiert, d.h. nach der Hygienevorschrift (1069/2009/EG) (EU 2009) für eine Stunde auf eine Temperatur von mindestens 70° C erhitzt (Haumacher et al. 2012; LfL 2010). Nach der Hygienisierung ist der hier betrachtete Indikatororganismus nicht mehr nachweisbar (Bertling und Nolde 2017; Philipp et al. 2005). Folglich findet in den Systemalternativen keine hygienische Belastung der Fließgewässer durch fäkale Verunreinigungen aus der Abwasserbehandlung mehr statt. Den Systemalternativen wird deshalb BS = 2 auf der Bewertungsskala zugeordnet. Da die Co-Vergärung aus Schwarzwasser und Bioabfällen gemeinsames Merkmal aller Systemalternativen ist, schneiden alle Systemalternativen hier gleich ab. Um auf die außerhalb der Systemgrenzen liegende hygienische Belastung durch Oberflächenabschwemmung aus der Stadt oder der umliegenden Landwirtschaft (BMU 2017c) hinzuweisen, wird die hygienische Belastung für die Systemalternativen mit „~0“ angegeben.

Indikator: Anteil blau-grüner Stadflächen

Unter blau-grünen Stadträumen werden alle unversiegelten Flächen im urbanen Raum begriffen, die Wasser und Begrünung z.B. in Form von begrünten Dächern oder parkähnlich angelegten, oberflächennahen Regenrückhaltemaßnahmen verbinden (siehe Abbildung 25) (Ramboll 2018; BfN 2017b). Die blau-grünen Flächen fungieren sowohl als passive als auch als aktive „Gesundheitsressource“ (BMUB 2015, S.45). Als passive „Gesundheitsressource“ mildern die Flächen die durch den Klimawandel bedingten Hitzeeffekte, da sie sich gegenüber der bebauten Umgebung weniger stark aufheizen, in der Nacht deutlich stärker abkühlen und Verdunstungskühle sowie Schatten spenden (Sieker et al. 2019; SRU 2018; BfN 2017a; BMUB 2015). Als aktive „Gesundheitsressource“ bieten die blau-grün gestalteten Stadträume allen Bewohnern unabhängig gesellschaftlicher Hintergründe einen Anreiz für (gemeinsame) Freiluftaktivitäten inmitten bebauter Umgebung (BBSR 2016).

Abbildung 25 Blau-grüne Stadtraumgestaltung



Quelle: BMUB 2015

Auch für den Untersuchungskontext gewinnen diese Flächen an Bedeutung. Es wird prognostiziert, dass sich in Baden-Württemberg die Anzahl der Tage mit gesundheitsschädlicher Hitzebelastung bis 2050 verdoppelt und die Zahl der Tropennächte sogar vervierfachen wird (LUBW 2017). Darüber hinaus wird das Stadtviertel gegenwärtig durch private und umzäunte Grünflächen geprägt, wodurch

zwar bereits Flächen zur Erholung vorliegen, jedoch nicht alle BewohnerInnen im gleichen Maße zur Verfügung stehen (Stadt Heidelberg 2017a). Durch eine gesteigerte blau-grüne Stadtraumgestaltung könnte im Stadtviertel also sowohl ein Mehrwert für die physische als auch „soziale Gesundheit“ (SRU 2018, S. 47) geschaffen werden.

Im Status-Quo-System wird der Regen als „übles Nass“ (Stadt Karlsruhe 2013, S.4) schnellstmöglich über versiegelte Stadtflächen und die Mischwasserkanalisation abgeleitet und somit nicht gezielt vor Ort zur blau-grünen Stadtraumgestaltung eingesetzt (Matzinger et al. 2017; Karlsruhe 2013). Dem Status-Quo-System wird demnach BS = 1 auf der Bewertungsskala zugeteilt. Zur Realisierung der Regenwasserauskopplung in den Systemalternativen müssen hingegen mehr blau-grüne Stadträume geschaffen werden (Matzinger et al. 2017). Da je Systemalternative die Regenauskopplung prozentual gesteigert wird, wird angenommen, dass in Korrelation dazu auch der Anteil blau-grüner Stadtflächen zunimmt. Je mehr der Anteil zunimmt desto höher fällt die Einordnung auf der Bewertungsskala aus. Bei SYAL1 nimmt der Anteil mit 35% Regenwasserauskopplung zu (BS = 2), bei SYAL2 mit 70% mehr zu (BS = 3) und bei SYAL3 mit 100% am meisten zu (BS = 4).

I.2 Gewährleistung der Grundversorgung

Indikator: Rückgewonnene Nährstoffe

Die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P), und Kalium (K) sind essentielle Pflanzennährstoffe und wesentlicher Bestandteil von NPK-Düngemitteln (Morandi und Steinmetz 2017; FCI 2013). Ein Mangel dieser Nährstoffe hat beträchtliche negative Auswirkungen für Pflanzen (siehe Abbildung 26). Sie tragen folglich dazu bei, die Ernährung der gegenwärtigen und künftigen Generationen zu sichern (BMZ 2013). Die globalen Phosphorvorkommen sind jedoch stark limitiert und Deutschland ist bei der Versorgung mit Mineraldüngerphosphat vollständig von Importen abhängig, welche überwiegend aus politisch instabilen Regionen stammen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2017; UBA 2015b; BMU 2017b). Die EU hat Phosphor deswegen 2014 auf die Liste der „kritischen Rohstoffe“ gesetzt (EU 2017). Die Herstellung von Stickstoff wiederum ist enorm energieintensiv (Gellings und Parmenter 2004) und auf diese Weise limitiert. Die Gewinnung von Kalium aus geogenen Lagerstätten ist mit negativen Umweltwirkungen verbunden (BGR 2016).

Dadurch entsteht eine Dringlichkeit die vorhandenen Nährstoffe rückzugewinnen und sogenannte sekundäre Quellen zu erschließen (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen beim BMEL 2015). Die Rückgewinnung aus Abwasser spielt dabei eine herausragende Rolle (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2017), da es reich an Phosphor, Stickstoff und Kalium ist und eine kontinuierliche sowie regenerative Quelle für die Nährstoffe darstellt (Morandi und Steinmetz 2017). In der konventionellen Abwasserbehandlung werden die Nährstoffe jedoch vorrangig eliminiert⁹ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017)). Die Rückgewinnung von Nährstoffen innerhalb des Wasser-Energie-Nexus kann dazu beitragen, die Importabhängigkeit der Landwirtschaft zu verringern und deren Produktivität zu sichern.

Abbildung 26 P-Mangel an Mais



Quelle: Kurtinez 2002

Im Vergleich zum Kompost aus Bioabfall im Status-Quo-System (P: 370,9; N: 1.669,1; K: 1.112,7 kg / STV*a) können aus dem Gärrest aus Bioabfall und Schwarzwasser in den Systemalternativen durch den Nährstoffreichtum der Fäzes deutlich mehr Nährstoffe rückgewonnen werden (P: 3.152,8; N: 22.996,6; K: 7.047,3 kg / STV*a) (siehe Kapitel 2.4.5). Dem Status-Quo-System wird BS = 1 und den Systemalternativen BS = 2 auf der

⁹ Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) wird vorgegeben, dass bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von über 50.000 EW P aus dem Klärschlamm rückgewonnen werden muss (Morandi und Steinmetz 2017). Für Stickstoff und Kalium liegen noch keine Vorgaben bezüglich Rückgewinnung vor.

Bewertungsskala zugeordnet. Da die Co-Vergärung aus Schwarzwasser und Bioabfällen gemeinsames Merkmal aller Systemalternativen ist, schneiden alle Systemalternativen hier gleich ab.

Indikator: Diversifikation der Wasserversorgung

In Hinblick auf die Qualität des Trinkwassers wird in Deutschland eine „gute bis sehr gute Qualität“ (UBA 2017a, S. 1) nachgewiesen. In 99,9% der untersuchten Proben werden die gesetzlichen Grenzwerte für Trinkwasser eingehalten (UBA 2017a). Herausforderungen für die Trinkwasserversorgung bestehen folglich vielmehr hinsichtlich der Quantität vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen (Karthe et al. 2017). So hat der „außergewöhnlich heiße und trockene Sommer 2018 [gezeigt], dass es auch in Deutschland zu plötzlichen Engpässen in der Wasserversorgung kommen kann“ (Schaub und Tosun 2019, S. 185).

Die Zunahme der sommerlichen Trockenperioden führt zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung in den Sommerhalbjahren (LUBW 2019). Zusätzlich ist durch die Trockenperioden eine verstärkte Beanspruchung der Grundwasservorräte im Zuge von erhöhtem Trinkwasserbedarf und landwirtschaftlicher Beregnung zu erwarten (Rechenberg 2019). Auch wenn die Grundwasservorräte durch die vermehrten Niederschläge im Winterhalbjahr bisher wieder aufgefüllt werden, so können regional Knappheiten auftreten (Rechenberg 2019), denn die Gesamtmenge des sich jährlich erneuernden Grundwassers ist nicht mit der regionalen Verfügbarkeit gleichzusetzen (Gawel 2012). So zeichnen sich für die Stadt im Untersuchungskontext erste lokale Knappheiten ab (Stadtwerke Heidelberg 2019a). Zwar ist das Stadtviertel selbst bisher nicht betroffen, jedoch müssen andere Teile der Stadt im Untersuchungskontext, die eigentlich aus lokalen Quellen versorgt werden, bereits seit Sommer 2018 alternativ durch regionale Wasserwerke versorgt werden, da die Quellschüttung durch zunehmende Trockenheit nicht zur Deckung des Trinkwasserbedarfs ausreicht (Stadtwerke Heidelberg 2019a).

Um die Beanspruchung der Grundwasservorräte zu reduzieren, gewinnt deshalb die Diversifikation der lokalen Wasserressourcen an Bedeutung (Arcadis 2016; Kluge und Libbe 2010). Anstatt die Versorgung ausschließlich durch frisches Grund- und Oberflächengewässer zu leisten, würde z.B. durch Betriebswasser aus aufbereitetem

Grauwasser eine weitere Bezugsquelle geschaffen werden (Rechenberg 2019; Arcadis 2016). Zwar ersetzt das Betriebswasser nicht die Grundversorgung der BewohnerInnen mit Trinkwasser, es entlastet als weitere Bezugsquelle aber die Trinkwasserversorgung und wird deshalb hier unter „Gewährleistung der Grundversorgung“ aufgeführt. Im Status-Quo-System und in SYAL1 wird die Trinkwasserversorgung ausschließlich durch die Bezugsquelle Grundwasser gestaltet, weshalb beide mit BS = 1 bewertet werden. In SYAL2 und SYAL3 hingegen liegt durch die Grauwasseraufbereitung zu Betriebswasser eine weitere Bezugsquelle vor, wodurch die Wasserversorgung diversifiziert wird. Beide werden deshalb mit BS = 2 bewertet.

I.4 Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten

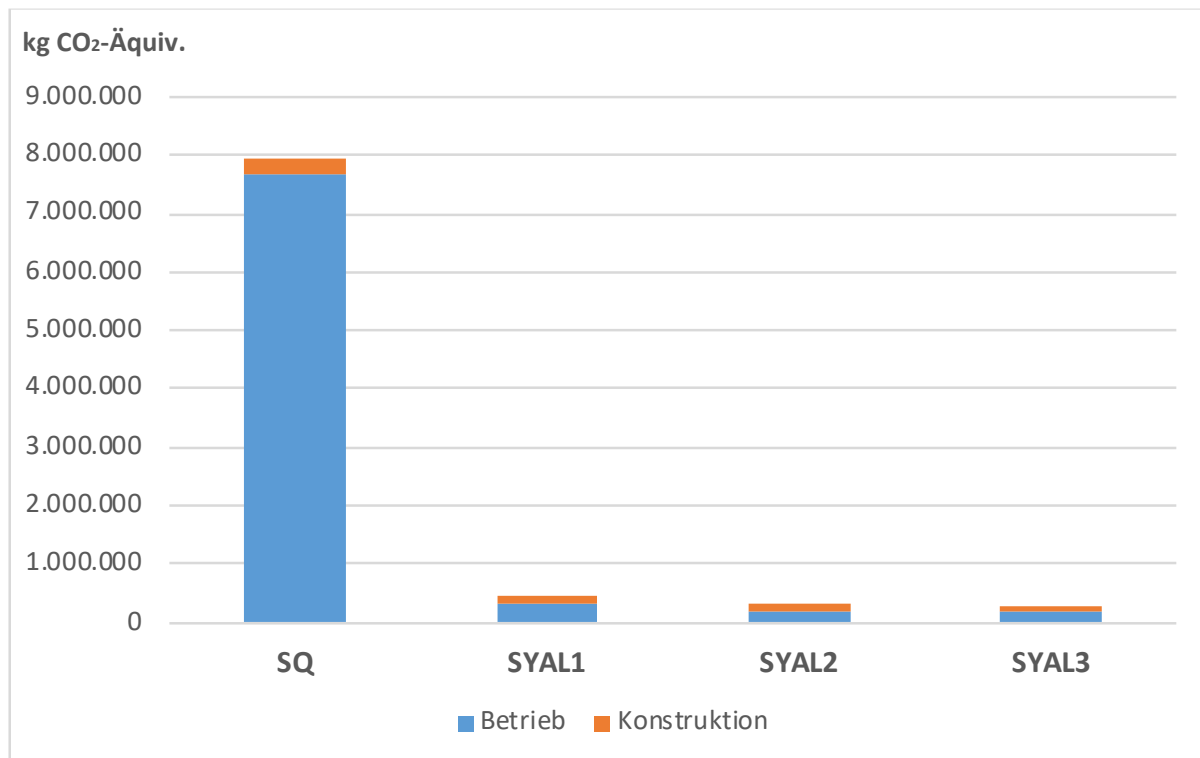
Indikator: Globale Erwärmung

Der Klimawandel ist gesellschaftlicher „Megatrend“ (Geden und Beck 2015, S.12) und wird „in den kommenden Jahrzehnten zum ständigen Begleiter werden“ (ebd.), da die durch Treibhausgase verursachte globale Erwärmung physische Effekte auf sämtliche global zugängliche Umweltgüter (Atmosphäre, Wasser, biologische Vielfalt etc.) hat (BMUB et al. 2016). Dies wiederum hat einen negativen Einfluss darauf, wie die gegenwärtige Generation und künftige Generationen die Umweltgüter zur Sicherung ihrer Existenz nutzen können (UN DESA 2017, 2016; Reusswig 2011). Dabei trifft es Regionen am gravierendsten, die nicht zu den Hauptemittenten von Treibhausgasen gehören und im Gegensatz zu den Hauptemittenten nicht über die Mittel verfügen sich gegen die Auswirkungen zu schützen (Van der Geest et al. 2019; Singer 2016; WHO 2009; Elvers 2011). Menschen in den betroffenen Regionen können beispielsweise Freiräume aufgrund extremer Wetterereignisse (Hitzewellen, Starkregenereignisse) nicht mehr als Teil des Lebensraums nutzen und Land für Selbstversorgungszwecke bewirtschaften (Van der Geest et al. 2019; Reusswig 2011; WHO 2009). Der Klimawandel ist damit vor allem auch eine Gerechtigkeitsfrage (Northcott 2018; Singer 2016; Posner und Weisbach 2015; Elvers 2011).

Da global 75% aller Treibhausgase von Städten emittiert werden, sind sie besonders gefragt bei Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase (BMZ 2016). Deshalb sind Treibhausgase auch bei Transformationen des städtischen Wasser-Energie-Nexus von Bedeutung. Als Indikator wird hierfür CO₂ herangezogen, da es eines der bedeutendsten

Treibhausgase darstellt (UBA 2018a). Die Ermittlung dieses Indikators erfolgt über eine Umweltbewertung auf Basis einer Ökobilanzierung. Diese ergibt, dass alle Systemalternativen die CO₂-Emissionen beträchtlich gegenüber dem Status-Quo-System (7.923.216 kg CO₂-Äquiv. / STV*a) reduzieren (siehe Abbildung 27), weshalb dieses mit BS = 1 bewertet wird.

Abbildung 27 Globale Erwärmung



Quelle: Eigene Berechnung

Mit SYAL1 werden hingegen lediglich 434.190 kg CO₂-Äquiv. / STV*a (BS = 2) emittiert, in SYAL2 309.430 CO₂-Äquiv. / STV*a (BS = 3) und in SYAL3 280.079 CO₂-Äquiv. / STV*a (BS =4). Die deutliche Verbesserung gegenüber dem Status-Quo-System ergibt sich dabei vorrangig durch die alternativen Energieressourcen (Wärmerückgewinnung aus Grauwasser, Biogas aus Schwarzwasser und Bioabfällen) für Raumwärme und die Warmwasserbereitung innerhalb des Systembetriebs.

Tabelle 34 Nachhaltigkeitsziel I: Sicherung der menschlichen Existenz:
Übersicht Indikatorenwerte

	Indikator	Einheit	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
I.1	Hygienische Belastung des lokalen Fließgewässers	E.Coli KbE / 100 ml	>900	~0		
			BS = 1	BS = 2		
	Anteil blau-grüner Stadträume	Qualitative Abschätzung	0	Nimmt zu	Nimmt mehr zu	Nimmt am meisten zu
			BS = 1	BS = 2	BS = 3	BS = 4
I.2	Rückgewonnene Nährstoffe	kg / STV*a	N: 1.669,1 P: 370,9 K: 1.112,7	N: 22.996,6 P: 3.152,8 K: 7.047,3		
			BS = 1	BS = 2		
	Diversifikation der Wasserversorgung	Anzahl der Wasserbezugsquellen	1	2		
			B = 1	B = 2		
I.3	Nicht berücksichtigt					
I.4	Globale Erwärmung	kg CO ₂ -Äquiv. / STV*a	7.923.216	434.190	309.430	280.079
			B = 1	B = 2	B = 3	B = 4
I.5	Nicht berücksichtigt					

3.4.2 Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials

Nachdem durch das I. Nachhaltigkeitsziel zunächst die Existenzbasis festgelegt wurde, werden mit dem Nachhaltigkeitsziel „Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials“ die Möglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung der gegenwärtigen und künftigen Generationen adressiert (Grunwald 2016; Kopfmüller et al. 2001). Um vergleichbare Möglichkeiten zu erhalten, sollen erneuerbare Ressourcen gefördert werden (Regel II.1) und nicht erneuerbare Ressourcen möglichst nur eingeschränkt genutzt werden (Regel II.2). Darüber hinaus wird gefordert, dass die anthropogenen Stoffeinträge die Aufnahmefähigkeit der Umwelt nicht überschreiten dürfen (Regel II.3) (Kopfmüller et al. 2001; Jörisen et al. 2000). Außerdem müssen, um das gesellschaftliche Produktivkapital nicht zu gefährden, technische Risiken mit möglicherweise katastrophalen Auswirkungen für Mensch und Umwelt vermieden werden (Regel II.4). Zuletzt muss das Sach-, Human- und Wissenskapital so entwickelt werden, dass es wirtschaftlich leistungsfähig ist (Regel II.5) (Grunwald 2016; Kopfmüller et al. 2001).

Tabelle 35 Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials:
Übersicht Indikatorenauswahl

Regel	Indikator	Quelle und Indikatorenbezeichnung ¹
II.1 Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	Trinkwasser-verbrauch	Felmeden et al. 2016: „Trinkwasserverbrauch“
	Bereitstellung erneuerbarer Energie	Arcadis 2018; French Ministry of Housing and Sustainable Homes et al. 2017; UN 2016; Minx et al. 2011; Economist Intelligence Unit 2009: „Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch“
II.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	Bedarf an fossilen Rohstoffen	Goedkoop et al. 2013: „Erschöpfung der fossilen Ressourcen“
	Bedarf an metallischen Rohstoffen	Goedkoop et al. 2013: „Erschöpfung der metallischen Ressourcen“
II.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	Eintrag organischer Mikroschadstoffe ins lokale Fließgewässer	Sartorius et al. 2016; Felmeden et al. 2016: „Gewässerschutz“ / DWA 2018b: „Vermeidung des Eintrags ökotox. Stoffe (z. B. Mikroschadstoffe, Ammonium, hygienische Belastungen, AFS fein, Nitrit)“
II.4 Vermeidung unvertretbarer technischer Risiken	Nicht berücksichtigt, da diese Regel technische Großrisiken mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und hohem Schadenspotential (wie z.B. nukleare Katastrophen, Ölunfälle) adressiert (Kopfmüller et al. 2001), die für den Forschungsgegenstand nicht zutreffen.	
II.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals	Beitrag zum Wissen der BewohnerInnen über Wasser-Energie-Problematiken	Eigene Formulierung
	Kosten der Systeme	DWA 2018b: „Investitionsabhängige Jahreskosten“ / Felmeden et al 2016: „Jahreskosten“ / Sartorius et al. 2016: „(Netto-)Kosten Investition und Betrieb“
Anmerkung: ¹ übersetzt		

II.1 Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen

Indikator: Trinkwasserverbrauch

Deutschland ist gegenwärtig noch nicht flächendeckend durch Wassermangel charakterisiert, da es von seinen erneuerbaren Wasserressourcen jährlich bisher lediglich rund 13% entnimmt (Rechenberg 2019; UBA 2014). Erst wenn 20% oder mehr des Wasserdargebots genutzt werden, wird in internationalen Vergleichen von Wasserstress gesprochen (UBA 2019). Dies spiegelt sich z.B. durch den uneingeschränkten Trinkwassergebrauch für alle Haushaltszwecke unabhängig der spezifischen Qualitätsanforderungen wider.

Das verfügbare Dargebot sollte jedoch sowohl vor dem Hintergrund regionaler Knappheiten (siehe auch Regel I.2, Indikator: Diversifikation der Wasserversorgung) als auch mit Hinblick auf die ökologischen Funktionen des natürlichen Wasserhaushalts nicht vollständig ausgeschöpft werden (Gawel 2012; BMU 2008). Ein sorgsamer Umgang mit den Trinkwasserressourcen und bewusster Trinkwasserverbrauch ist daher aus Ressourcenschonungsgründen von Bedeutung (UBA 2014). Dies betrifft sowohl die direkte Schonung der Wasserressourcen wie auch die Schonung der für die Bereitstellung und Nutzung des Trinkwassers notwendigen Energieressourcen (UBA 2018a).

Im Status-Quo-System wird hochwertiges Trinkwasser für sämtliche Haushaltszwecke unabhängig der spezifischen Qualitätsanforderungen verwendet. In Summe 195.767.881,4 l / STV*a (siehe Kapitel 2.4.1). Ihm wird daher BS = 1 auf der Bewertungsskala zugeteilt. In allen Systemalternativen wird durch den Einsatz der wassersparsamen Vakuumtoiletten eine Reduktion des Trinkwasserverbrauchs erzielt. In SYAL2 und SYAL3 wird darüber hinaus durch die Aufbereitung von Grauwasser zu Betriebswasser eine weitere Einsparung von Trinkwasser erzielt. Für SYAL1 beträgt der Trinkwasserverbrauch 142.523.320,3 l / STV*a (BS = 2) für SYAL2 und SYAL3 106.377.848,4 l / STV*a (BS = 3).

Indikator: Bereitstellung erneuerbarer Energie

Die Energiewende ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit und „gelingt nur dann, wenn alle regenerativen Energiequellen genutzt werden“ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg n.dat.: <https://energiewende.baden-wuerttemberg.de/projekte/kommunen/energie-aus-abwasser>). Bisher ist die Energiewende jedoch stark auf den Stromsektor fokussiert, während im Wärmebereich kaum Fortschritte erzielt werden (Vahlenkamp et al. 2019; FVEE 2015). Abwasser bietet neben den bekannteren regenerativen Energiequellen (z.B. Solar und Wind) noch nicht genutztes chemisches und thermisches Energiepotenzial (UBA 2018a; WWAP 2017) und könnte somit vor allem für die beiden größten wärmebedingten Energieposten in den Haushalten, d.h. Raumwärme (70,4% des Gesamtenergiebedarfs) und Warmwasserbereitung (14% des Gesamtenergiebedarfs) (Destatis 2018), eine umweltfreundliche Alternative darstellen.

Im Status-Quo-System beträgt der Anteil der erneuerbaren Energie an der Wärmeversorgung lediglich 20% (Stadtwerke Heidelberg 2014b), d.h. 7.271.832,5 kWh / STV*a (siehe Kapitel 2.4.6). Das Status-Quo-System wird daher mit Wert BS = 1 bewertet. In den Systemalternativen werden durch die Biogaserzeugung aus Schwarzwasser und Bioabfällen sowie durch die semi- bzw. dezentrale Wärmerückgewinnung aus Grauwasser erneuerbare Energie generiert. Diese kann, da das Abwasser täglich und quasi „von alleine“ anfällt, als regenerativ eingestuft werden (Steinmetz 2012). Die erneuerbare Energie in den Systemalternativen deckt den Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasserbereitung im Untersuchungsquartier vollständig ab. In SYAL1 werden durch die semizentrale Wärmerückgewinnung und die Biogaserzeugung 47.618.056,4 kWh / STV*a generiert (BS = 2). In SYAL2 und SYAL3 sind es durch die dezentrale Wärmerückgewinnung und die Biogaserzeugung 48.081.972 kWh / STV*a (BS = 3).

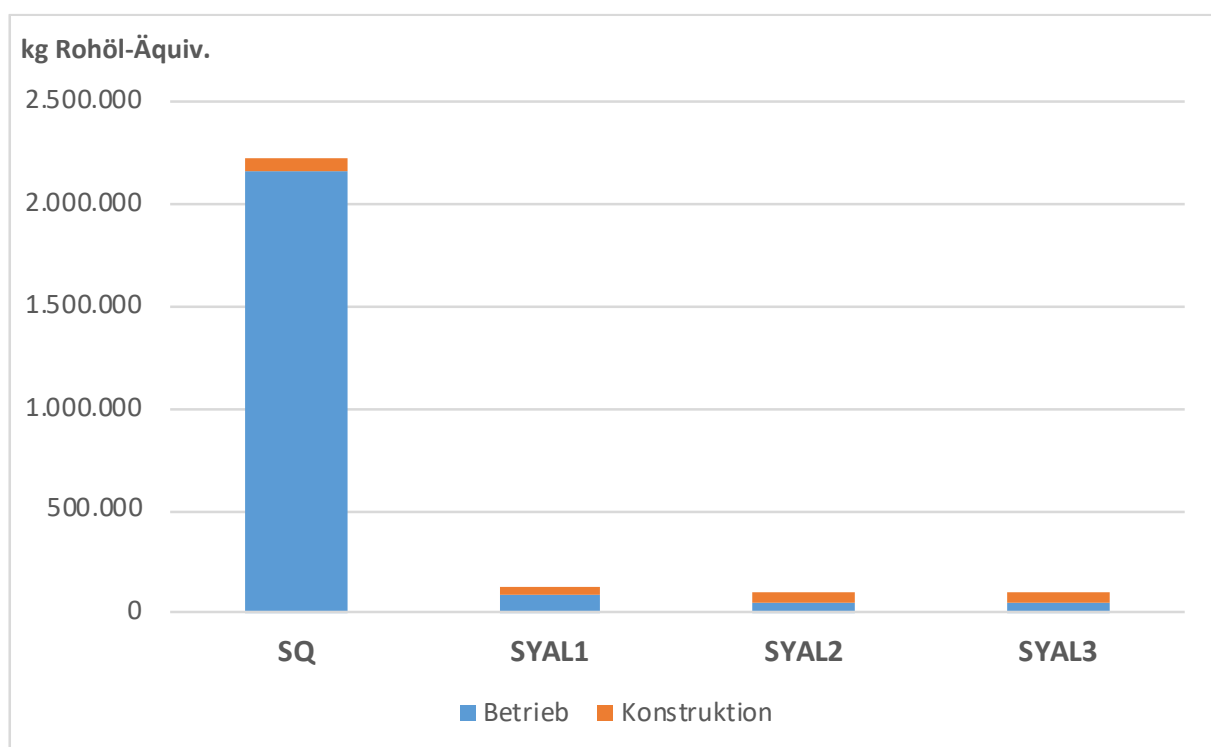
II.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen

Indikator: Bedarf an fossilen Rohstoffen / Indikator: Bedarf an metallischen Rohstoffen

Für das Leben in entwickelten Städten werden in großem Maße fossile Rohstoffe, wie Erdöl, und metallische Rohstoffe, wie Eisen, beansprucht (IRP 2018). Auch die Errichtung, der Betrieb und die Instandhaltung der technischen Infrastrukturen, die den Wasser-Energie-Nexus gegenwärtig gestalten, sind ressourcenintensiv (Trapp et al. 2017). Da die Vorkommen dieser Rohstoffe weltweit begrenzt sind und ihr Abbau meist unter nicht nachhaltigen Bedingungen stattfindet, ist ein schonender Umgang mit ihnen geboten (UBA 2016a; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2014). Folglich stellte sich auch für den Wasser-Energie-Nexus die Frage nach einer „ressourcenleichte[n] Ausgestaltung“ (Trapp et al. 2017, S. 99).

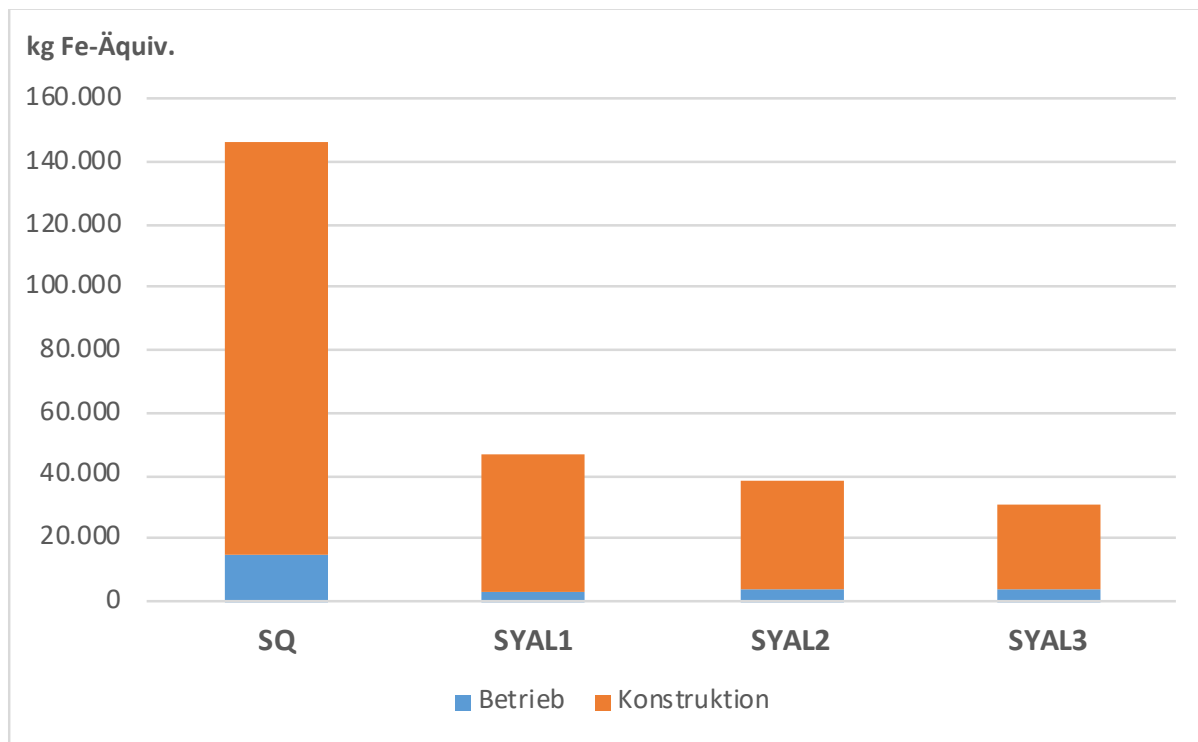
Beide Indikatoren werden über eine Umweltbewertung auf Basis einer Ökobilanzierung ermittelt. Diese ergibt, dass alle Systemalternativen den Bedarf an fossilen und metallischen Rohstoffen im Vergleich zum Status-Quo-System deutlich reduzieren (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29).

Abbildung 28 Bedarf an fossilen Rohstoffen



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 29 Bedarf an metallischen Rohstoffen



Quelle: Eigene Berechnung

Das Status-Quo-System (2.226.861 kg Rohöl-Äquiv. / STV*a; 146.402 kg Fe-Äquiv. / STV*a) wird für beide Indikatoren mit BS = 1 bewertet. Der Bedarf an fossilen Rohstoffen liegt bei SYAL1 bei 123.448 kg Rohöl-Äquiv. / STV*a (BS = 2), bei SYAL2 bei 101.096 kg Rohöl-Äquiv. / STV*a (BS = 3) und bei SYAL3 bei 96.447 kg Rohöl-Äquiv. / STV*a (BS = 4). Die deutliche Reduktion ergibt sich hierbei überwiegend aus den alternativen Energien aus der Grauwasserwärmerückgewinnung und Schwarzwasser-Bioabfall-Vergärung, die in den Systemalternativen die Fernwärme im Status-Quo-System ersetzt, die hauptsächlich aus fossilen Energien stammt.

Der Bedarf von metallischen Rohstoffen liegt bei SYAL1 bei 46.879 kg Fe-Äquiv. / STV*a (BS = 1), bei SYAL2 bei 38.578 Fe-Äquiv. / STV*a (BS = 3) und bei SYAL3 bei 30.629 Fe-Äquiv. / STV*a (BS = 4). Diese Reduktion ergibt sich vorrangig aus der Systemkonstruktion, da in den Systemalternativen zentrale Großinfrastrukturkomponenten (z.B. Kohlekraftwerk und / oder Kläranlage) entfallen.

II.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke

Indikator: Eintrag organischer Mikroschadstoffe ins lokale Fließgewässer

Unter organischen Mikroschadstoffen wird eine Vielzahl von Stoffen aus z.B. Arznei-, Reinigungs-, und Kosmetikmitteln begriffen, welche durch das konventionelle Abwassersystem nicht oder nicht vollständig abgebaut bzw. zurückgehalten werden (LAWA 2016; UBA 2015a). Die Wasserrahmenrichtlinie stuft 21 dieser Stoffe als prioritär gefährlich für aquatische Ökosysteme ein (EU 2008). Mögliche Auswirkungen sind Stoffwechseleränderungen und eine verzögerte Entwicklung der Organismen in z.B. Fließgewässern (Behrendt 2018; Bünning et al. 2018). Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Emission von Mikroschadstoffen und negativen Effekten auf die menschliche Gesundheit wurde bisher nicht nachgewiesen (Schaum 2016). Deshalb werden die organischen Mikroschadstoffe unter dieser Regel aufgeführt. Eine Aufführung unter Regel I.1 (Schutz der menschlichen Gesundheit) wäre möglich, müsste jedoch aufgrund des bisher fehlenden Nachweises schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit unter dem vorbeugenden Gesundheitsschutz eingeordnet werden.

In den letzten Jahren wird kontrovers diskutiert, wie das gegenwärtige Abwassersystem verändert werden kann, um die Einträge von Mikroschadstoffen zu verringern. Dabei hat sich eine Debatte um die Nachrüstung der zentralen Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe (z.B. durch Ozonierung) entwickelt (BDEW 2018; UBA 2015c; Gawel und Schindler 2015; Launay et al. 2015). Diese erzielt zwar eine Verringerung einiger Stoffe, jedoch nicht aller (BDEW 2018) und würde den Energiebedarf der Kläranlage um bis zu 30% erhöhen (UBA 2015c).

Die Vielzahl der Stoffe erschwert hierbei die Wahl eines einzigen Stoffes zur Beurteilung der Problematik. Mit dem Stadtviertel als reines städtisches Wohnviertel erweisen sich vor allem in den Fäkalien enthaltene Mikroschadstoffe, wie Arzneimittelrückstände, als relevant (LAWA 2016; UBA 2014). Für die Bewertung hier wird die Problematik daher mit einem der in Deutschland meistverkauften Schmerzmittel (Analgetika) - Diclofenac - beispielhaft dargestellt (Wido 2013). Die UBA bewertet die Umweltrelevanz von Diclofenac für die kommunalen Abwassersysteme als hoch (UBA 2018d) und seine schädliche Wirkung auf aquatische Ökosysteme ist in entsprechenden Konzentrationen

nachgewiesen (UBA 2018d; Stange und Tiehm, A. 2018; Bürgmann 2014; Triebskorn 2004; Schwaiger et al. 2004; Ferrari et al. 2003). Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass sich aus diesem beispielhaften Indikator keine generelle Aussage über Mikroschadstoffe innerhalb des Wasser-Energie Nexus ableiten lässt, da selbst innerhalb der Gruppe der Analgetika sehr unterschiedliche Stoffcharakteristika und Abbauverhalten festzustellen sind (UBA 2018d; De Graaf 2010).

Angaben zur Elimination von Diclofenac auf der Kläranlage im Status-Quo-System reichen von unter 10 bis über 90 % (UBA 2018d) und lassen damit nur schwer eine Bewertung zu. Aussagekräftiger ist die durch ein EU-weites Messprogramm¹⁰ definierte PNEC („predicted no effect concentration“), d.h. die Konzentration, bis zu der keine schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind. Diese wird für Diclofenac an 22 von 24 deutschen Fließgewässer-Messstellen überschritten, wobei der Eintrag vorrangig den konventionellen Kläranlagen zugerechnet wird (UBA 2018e).

Folglich findet im Status-Quo-System keine Elimination des Stoffes durch die Abwasserbehandlung statt. Das Fließgewässer, in das der Stoff eingetragen wird, muss als Senke wirken. Deshalb wird dem Status-Quo-System BS = 1 zugeordnet. In allen Systemalternativen wird durch die getrennte Schwarzwasserbehandlung ein direkter Eintrag ins Gewässer vermieden, sie werden daher mit BS = 2 bewertet. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass auch durch die Vergärung Rückstände von Diclofenac nicht vollständig eliminiert werden (UBA 2016b; De Graaf 2010). Da der Gärrest in den Systemalternativen als Dünger vorgesehen ist, muss der Boden folglich als Senke für das enthaltene Diclofenac fungieren, das dort nur unter bestimmten Bestimmungen abgebaut werden kann (Mayer-Grenu und Otterleben 2018; Facey et al. 2018).

¹⁰ Die sogenannte „EU-Watch-List“ (EU COM 2015/495) enthält Stoffe, bei denen ein Überschreitungspotenzial der PNEC erkannt wurde, aber noch nicht ausreichend Monitoringdaten vorliegen, um einen europaweiten Grenzwert für den jeweiligen Stoff zu begründen (UBA 2018e).

II.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals

Indikator: Beitrag zum Wissen der BewohnerInnen über Wasser-Energie-Problematiken

Die Strukturen, die gegenwärtig den Wasser-Energie-Nexus in Städten entwickelter Länder gestalten, sind für die Nutzer „praktisch unsichtbar“ (Hegger et al. 2008, S. 117). Damit einher geht ein „Entschwinden“ (Hummel et al. 2004, S. 70) der Wasserver- und entsorgung „als Problem aus dem öffentlichen Bewusstsein“ (ebd.). Dies spiegelt sich auch in den Befragungsergebnissen aus den Interviews mit BewohnerInnen aus der Stadt des Untersuchungskontextes wieder. Demnach beschränkt sich das Vorwissen der meisten Befragten in Hinblick auf die Abwasserentsorgung in Deutschland in ihrem Alltag auf einzelne technische Infrastrukturkomponenten, wie Kanalisation und Kläranlage. Die tatsächlichen Transport- und Aufbereitungsprozesse und ob bzw. wie das aufbereitete Abwasser wieder dem städtischen Wasserkreislauf zugeführt wird, sind den meisten jedoch nicht bekannt (CSI 2019). Durch diese mangelhafte Wahrnehmung und dem fehlenden Wissen über Wasser-Energie-Problematiken „scheitert der Aufruf zu umweltgerechterem, ressourcenschonendem Verhalten in industrialisierten Ländern, denen (scheinbar) ausreichend Wasser zur Verfügung steht“ (Hummel et al. 2004, S. 70f.) vielfach. Das Status-Quo-System wird deshalb mit BS = 1 bewertet.

Durch die semi- und dezentralen Systemkomponenten der Systemalternativen sind die Strukturen, die den Wasser-Energie-Nexus gestalten, per se deutlich präsenter im unmittelbaren Lebensumfeld der BewohnerInnen als im Status-Quo-System (Michalek et al. 2016; van Vliet und Spaargaren 2010). Da für alle Systemalternativen festgelegt wird, dass diese wissensvermittelnde Gestaltungselemente vor Ort einbinden (siehe Kapitel 2.3.3) und die BewohnerInnen somit ihr Wissen steigern können, werden sie besser als das Status-Quo-System bewertet. Da durch die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen in SYAL2 und SYAL3 eine weitere Systemkomponente in das unmittelbare Lebensumfeld geholt wird, durch welche potentiell Wissen vermittelt werden kann, werden beide mit BS = 3 bewertet, SYAL1 hingegen mit BS = 2.

II.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskaptals

Indikator: Kosten der Systeme

Durch ihre Ressourcenintensität sind die konventionellen Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme auch relativ kapitalintensiv. Neben den initialen Investitionen ergibt sich fortwährend ein hoher Kostenaufwand u.a. für die Instandhaltung und Sanierung der Kanalisation (DWA 2016a; Schiller 2010). Darüber hinaus sind mögliche Erweiterungen des konventionellen Systems (z.B. in Form einer vierten Reinigungsstufe), um auf neu erkannte Herausforderungen zu reagieren, mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden (BDEW 2018; Gawel et al. 2015). Eine Transformation zu einer Systemalternative ist durch die bestehenden Pfadabhängigkeiten jedoch ebenfalls mit Kosten verbunden (Ott; Wallbrecht; Bieschke 2016). Da die Gelder, die für die Systeme in Sachkapital investiert werden, nicht mehr zur Entwicklung des Human- und Wissenskaptals zur Verfügung stehen, sollte der Wasser-Energie-Nexus daher auch in monetärer Hinsicht ressourceneffizient gestaltet werden. Deswegen werden im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung die Kosten ermittelt (siehe Kapitel 3.3).

Unter den IK (siehe Tabelle 36) ist der zur Konstruktion der jeweiligen Systemkomponenten erforderliche einmalige Kostenaufwand zu verstehen. Zusätzlich werden 10 % der IK als bekannter Erfahrungswert für die Planungskosten veranschlagt. Die Diskontierung der IK erfolgt zu 3 % (Blohm et al. 2012). Die Kostenangaben zu den IK werden anhand von Preisanfragen bei Herstellern sowie aus Literaturangaben ermittelt (siehe Anhang A4, A6, A7, A8). Als Untersuchungszeitraum wird die Lebensdauer der Systemkomponente mit der höchsten Lebensdauer gewählt. Dies ist hier das Kanalnetz mit einer angesetzten Lebensdauer von 80 Jahren (DWA 2015b).

Tabelle 36 Investitionskosten

Systemkomponente	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	€/STV			
Grabungskosten	2.259.561	847.335		445.196
Kläranlage	899.337		-	
Kanalnetz und Schächte	2.542.742	953.528		-
Fahrzeug Klärschlamm	3.300		-	
Kohlekraftwerk	89.172		-	
Müllfahrzeug	24.420	21.120		-
Kompostwerk	1.307		-	
Konventionelle Spültoilette bzw. Vakuumtoiletten	1.197.500		4.694.200	
Druckrohre (Vakuum)	-		93.058	
Vakuumstation	-		274.374	
Liner und Harz	-		454.805	
Biogasanlage	-		5.081.000	
Wärmepumpe	-	53.109		-
Wärmetauscher	-	68.000		-
Zerkleinerungsanlage bzw. Küchenabfallzerkleiner	-	18.000		1.113.651
Grauwasserbehandlungs- anlagen	-			3.607.510
Σ IK	7.017.339	13.457.866	17.119.461	15.763.794
Σ IK gesamt inkl. Planungskosten 10 %	7.719.073	14.803.652	18.831.407	17.340.173
Σ IK gesamt inkl. Zinsen 3 %	7.950.645	15.247.762	19.396.349	17.860.378

Quelle: Eigene Berechnung

Die LK (siehe Tabelle 37) umfassen wiederkehrende Aufwendungen, die zum Betrieb und zur Wartung der Systeme anfallen. Die Kostenangaben zu den LK werden anhand von Literaturangaben sowie qualifizierter Annahmen ermittelt (siehe Anhang A5). Da die LK kontinuierlich über den gesamten Untersuchungszeitraum anfallen, werden sie nach LAWA anhand des DiskontierungsFAktors für gleichförmige KostenReihen (DFAKR) umgerechnet (LAWA 2012):

$$DFAKR(i; n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$

Als Zinssatz (i) wird dafür, wie in den Leitlinien empfohlen, 3 % p.a. standardmäßig angesetzt (LAWA 2012). (n) entspricht dem Untersuchungszeitraum von 80 Jahren.

Tabelle 37 Laufende Kosten

Systemkomponente	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	€/STV*a			
Trinkwasserversorgung	244.710	178.154	132.972,31	
Abwasserbeseitigung (Ableitung und Behandlung)	680.854	340.427	177.835	-
Betrieb Kohlekraftwerk	344	-		
Betrieb Kompostwerk	209	-		
Müllfahrzeug: Reparatur und Unterhaltung	2.323		-	
Klärschlammfahrzeug: Reparatur und Unterhaltung	363	-		
Kraftstoffkosten Fahrzeuge	1.667	308	-	
Biogasanlagenbetrieb	-	508.100		
Betriebsaufwand Schwarzwassertrennung und Vakuumentwässerung	-	33.051		
Bioabfallzerkleinerung	-	540	1.959	
Betrieb Wärmetauscher	-	9.885	-	
Grauwasserbehandlung	-		85.105	
Σ LK / a	930.469	1.072.789	939.022	761.187
Σ LK gesamt = LK / a · DFAKR (3; 80)	28.100.884	32.399.028	28.359.189	22.988.436

Quelle: Eigene Berechnung

Die IKR stellen den einmaligen Kostenaufwand zum Ersatz einer Systemkomponente nach Ablauf deren Lebensdauer zum Erhalt des Gesamtsystems für den Untersuchungszeitraum dar. Sie werden anhand des jeweiligen Diskontierungsfaktoren für Einmalige Kostengrößen (DFAKE) umgerechnet (LAWA 2012):

$$DFAKE(i; n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Als Zinssatz (i) wird ebenfalls 3 % p.a. standardmäßig angesetzt (LAWA 2012). Der zeitliche Bezug (n) entspricht hier der Lebensdauer der jeweiligen Systemkomponente (siehe Anhang A3). Für eine detaillierte Aufschlüsselung der IKR siehe Anhang A8.

Die Summe aller so errechneten Kostengrößen ergibt den PKBW (LAWA 2012). Damit ergibt sich folgende Gleichung; (x) entspricht dabei der Anzahl der jeweiligen Systemkomponenten:

$$PKBW = IK + LK \cdot DFAKR(3; 80) + \sum_{j=1}^x IKR_j \cdot DFAKE(3; \text{Lebensdauer Systemkomponente}_j)$$

Im Vergleich der Kostengrößen sowie zwischen dem Status-Quo-System und den Systemalternativen ergibt sich damit folgendes Bild (siehe Tabelle 38).

Tabelle 38 Kostenübersicht

Kostenart	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	€			
Σ IK gesamt	7.950.645	15.247.762	19.396.349	17.860.378
Σ LK gesamt	28.100.884	32.399.028	28.359.189	22.988.436
Σ IKR gesamt	1.311.708	10.059.351	14.907.804	13.860.219
PKBW	37.359.498	57.706.142	62.663.341	54.709.034

Quelle: Eigene Berechnung

Den größten PKBW hat SYAL2 und wird daher mit BS = 1 bewertet. SYAL1 wird folglich BS = 2, SYAL3 BS = 3 und dem Status-Quo-System BS = 4 zugeordnet.

Tabelle 39 Nachhaltigkeitsziel II: Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials:
Übersicht Indikatorenwerte

	Indikator	Einheit	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
II.1	Trinkwasser- verbrauch	l / STV*a	195.767.881,4	142.523.320,3	106.377.848,4	
			BS = 1	BS = 2	BS = 3	
	Bereitstellung erneuerbarer Energie	kWh / STV*a	7.271.832,5	47.618.056,4	48.081.972	
			BS = 1	BS = 2	BS = 3	
II.2	Bedarf an fossilen Rohstoffen	kg Rohöl- Äquiv.	2.226.861	123.448	101.096	96.447
			BS = 1	BS = 2	BS = 3	BS = 4
	Bedarf an metallischen Rohstoffen	kg Fe- Äquiv.	146.402	46.879	38.578	30.629
			BS = 1	BS = 2	BS = 3	BS = 4
II.3	Eintrag organischer Mikroschad- stoffe ins lokale Fließ- gewässer	Direkter Eintrag ins Gewässer (Ja o. Nein)	Ja	Nein		
			BS = 1	BS = 2		
II.4	Nicht berücksichtigt					
II.5	Beitrag zum Wissen der Bewohner- Innen über Wasser- Energie- Problematiken	Trägt zum Wissen der Bewohner- Innen bei (Ja o. Nein)	Nein	Ja		
			BS = 1	BS = 2		
	Kosten der Systeme	PKBW in €	37.359.498	57.706.142	62.663.341	54.709.034
			BS = 4	BS = 2	BS = 1	BS = 3

3.4.3 Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten

Während die vorhergehenden Nachhaltigkeitsziele die materiellen Bedürfnisse abgesichert haben, werden durch das Nachhaltigkeitsziel „Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten“ auch immaterielle Aspekte inkludiert, um eine ganzheitliche nachhaltige Entwicklung zu beschreiben (Grunwald 2012; Kopfmüller et al. 2001). Darunter fällt beim integrativen Konzept zunächst die Chancengleichheit hinsichtlich Bildung, Beruf, Information (III.1), die Voraussetzung ist, dass alle Mitglieder der Gesellschaft die gleichen Möglichkeiten haben ihre individuellen Potentiale auszuschöpfen (Grunwald 2016; Kopfmüller et al. 2001). Außerdem ist die „Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen“ (III.2) Voraussetzung, dafür, dass die Entwicklung auf Basis gesellschaftlichen Willens stattfinden kann. Um nachfolgenden Generationen auch immaterielle Ressourcen weiterzugeben, ist darüber hinaus die „Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt“ (III.3) zu gewährleisten (Jörissen et al. 2000). Dies umfasst auch die „Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur“ (III.4) als „Gegenstand kontemplativer, spiritueller, religiöser und ästhetischer Erfahrung“ (Grunwald 2016, S. 104). Eine Gesellschaft, die dauerhaft entwicklungs- und handlungsfähig bleiben möchte, muss für die „Erhaltung der sozialen Ressourcen“ (III.5) durch Förderung eines Verantwortungs- und Solidaritätssinnes ihrer Mitglieder sorgen (Grunwald 2016; Kopfmüller et al. 2001).

Tabelle 40 Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten: Übersicht Indikatorenauswahl

Regel	Indikator	Quelle und Indikatorenbezeichnung ¹
III.1 Chancengleichheit hinsichtlich Bildung, Beruf, Information	Nicht berücksichtigt, da Chancengleichheit hinsichtlich dieser Aspekte im Untersuchungskontext nicht durch das Status-Quo-System oder die Systemalternativen indiziert wird.	
III.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen	Eröffnung von Möglichkeiten zur Partizipation	Van Leeuwen und Sjerps 2015: „Öffentliche Teilnahme“ / French Ministry of Housing and Sustainable Homes et al. 2017: „Bürgerbeteiligung“
III.3 Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt	Nicht berücksichtigt, da durch diese Regel der Erhalt von Kulturdenkmälern und historischen Stätten für künftige Generationen angesprochen ist, die im Untersuchungsquartier nicht vorliegen.	
III.4 Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur	Nicht berücksichtigt, da blau-grüne Stadtraumgestaltung im Untersuchungskontext eher in der Funktion als „Gesundheitsressource“ (siehe Regel I.1) als kulturell einzuordnen ist.	
III.5 Erhaltung der sozialen Ressourcen	Akzeptanz der BewohnerInnen	DWA 2018b: „Komfort für Endnutzer“
	Förderung der sozialen Verantwortung	Eigene Formulierung
Anmerkung: ¹ übersetzt		

III.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen

Indikator: Eröffnung von Möglichkeiten zur Partizipation

In der gegenwärtigen Gestaltung des Wasser-Energie-Nexus haben die BewohnerInnen kaum Möglichkeiten zur Partizipation, da sie eine Rolle als passive Konsumenten der Ver- und Entsorgungsleistungen einnehmen (Hegger 2007). Das Status-Quo-System wird daher mit BS = 1 bewertet. In den Systemalternativen ist Partizipation fest in der nicht

technischen Ausgestaltung eingeplant (siehe Kapitel 2.3.3). Sie werden daher mit BS = 2 bewertet.

III.5 Erhaltung der sozialen Ressourcen

Indikator: Akzeptanz der BewohnerInnen

Die Systemalternativen bringen sowohl Veränderungen im umliegenden Lebensraum (z.B. durch die semizentrale Biogasanlage sowie Maßnahmen zur Regenwasserauskopplung) als auch in den Wohneinheiten selbst (z.B. durch die dezentralen Grauwasserbehandlungsanlagen) mit sich. Durch Änderungen der Nutzerschnittstellen (z.B. in Form der Vakuumtoiletten) greifen die Systemalternativen dabei in teils intime bzw. stark von Konventionen geprägte Vorgänge ein (van Vliet und Spaargaren 2010). Die Akzeptanz der BewohnerInnen ist für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus daher bedeutend.

Für die Systemalternativen werden die Systemkomponenten, die das städtische Lebensumfeld verändern würden, wie z.B. die Regenversickerungsflächen, von den Befragten akzeptiert. Selbst Einschränkungen, z.B. dass Regenversickerungsflächen durch Nässe temporär nicht genutzt werden können, schränken die Akzeptanz der Befragten nicht ein. Die vorgesehene semizentrale Biogasanlage wird ebenfalls nicht negativ erwähnt. Auch die Verwendung von aufbereitetem Grauwasser für die beabsichtigten Haushaltszwecke und Wärmerückgewinnung wird ebenfalls akzeptiert (CSI 2019), da dadurch das alltägliche Verhalten der BewohnerInnen nicht beeinflusst wird (Hefter et al. 2015).

Anders sieht es hingegen bei den direkten Nutzerschnittstellen aus, d.h. bei allen Systemalternativen in Form der Vakuumtoilette und bei SYAL2 und SYAL3 in Form der Küchenabfallzerkleinerer. Zu den Vakuumtoiletten besteht bei allen Befragten durch deren Vorkommen in Zügen und Flugzeugen eine negative Konnotation. Auch nachdem in den Interviews darauf hingewiesen wurde, dass moderne Vakuumtoiletten für Wohnhäuser trotz geringerem Wasserverbrauch Hygienekomfort bieten und weitaus geräuscharmer sind, konnte die vorbelastete Einstellung nur bedingt abgelegt werden. Auf besondere Ablehnung stieß bei den Befragten der Küchenabfallzerkleinerer. Dieser wurde von der Mehrheit der Befragten gegenüber der Bioabfalltonne oder der eigenen Kompostierung durch die von den Befragten vorgestellte Geruchsbelästigung,

Lockwirkung für Ungeziefer und Sicherheitsbedenken als inakzeptabel empfunden (CSI 2019).

Zwar ist die Befragung nicht repräsentativ und Erfahrungen aus niederländischen Projekten zeigen, dass gewisse Vorbehalte in Bezug auf Vakuumtoiletten z.B. durch Etablierung eines einfach zugänglichen Wartungsdienstes behoben werden können (Hegger und van Vliet 2010), dennoch ergibt sich in konsequenter Anwendung der Bewertungsskala folgende Zuteilung. SYAL2 und SYAL3, die Küchenabfallzerkleinerer vorsehen, die von den Befragten gänzlich abgelehnt wurden, werden mit BS = 1 bewertet. SYAL1, welche die herkömmliche Biotonne beibehält und „lediglich“ eine Barriere gegenüber Vakuumtoiletten mit sich bringt, wird BS = 2 zugeordnet.

Im Gegensatz dazu wird das Status-Quo-System von den Befragten als zuverlässig und komfortabel empfunden (CSI 2019). Es ist stark in den Konventionen verankert, da es bisher noch keinen für die BewohnerInnen spürbaren Veränderungen unterzogen wurde. Auch wenn einige Befragte von einzelnen Problemstellungen (wie z.B. Mikroschadstoffe) der konventionellen Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme schon einmal gehört haben, führt dies nicht zu einer Ablehnung dieser Systeme (CSI 2019). Das Status-Quo-System wird im Vergleich folglich mit BS = 3 bewertet.

Indikator: Förderung der sozialen Verantwortung

Bisher funktionieren Abwasserentsorgungssysteme eigenständig und weitestgehend unabhängig vom Handeln der NutzerInnen. Entsorgen sie z.B. feste Abfälle wie Slipeinlagen oder Katzenstreu fälschlicherweise über die Toilette (UBA 2018c) (siehe Abbildung 30), so „schlucken“ die Großinfrastrukturen diese erst einmal. Die Externalitäten, wie einen gesteigerten betrieblichen Aufwand für den Kanal- und Kläranlagenbetrieb, werden für die NutzerInnen, wenn überhaupt, durch geringfügig erhöhte Kosten für die Entsorgung greifbar (Sartorius et al. 2016). Das konventionelle Systemdesign begünstigt deshalb ein Nutzerverhalten im Sinne von „flush and forget“ (Hegger et al. 2008; S. 38) und erfordert Aufklärungsarbeit (wie in Abbildung 31). Als Folge lässt sich bei den NutzerInnen nur „ein geringes Maß an Verantwortungsgefühl und Kompetenz“ (Hummel et al. 2004, S. 70) im Umgang mit Wasser und Abwasser feststellen. Dem Status-Quo-System wird daher BS = 1 zugewiesen.

Abbildung 30 Aufklärungsarbeit durch Verbraucherzentrale und Stadtentwässerungsbetriebe



Quelle: Reichel 2018

Durch die Semi- und Dezentralität der Systemalternativen hingegen würde die unsachgemäße Handhabung einzelner BewohnerInnen, z.B. durch Entsorgung fester Abfälle über die Vakuumtoilette, aufgrund der geringeren Auslegung der Rohre zur Funktionsunfähigkeit des Systems im unmittelbaren Umfeld führen (Winker und Schramm 2015; Hegger et al. 2008). In der nicht technischen Ausgestaltung der Systemalternativen (siehe Kapitel 2.3.3) ist deshalb festgelegt, dass den BewohnerInnen durch ausreichende sowie nutzerfreundliche Partizipations- und Informationsveranstaltungen ihre neue Rolle als sogenannte „Prosumenten“ und die Auswirkungen unsachgemäßer Handhabung bewusst gemacht werden. Die BewohnerInnen sind demnach in den Systemalternativen geneigter Verantwortung im Umgang mit Wasser und Abwasser zu übernehmen. Diese werden deshalb mit BS = 2 bewertet.

Tabelle 41 Nachhaltigkeitsziel III: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten: Übersicht Indikatorenwerte

	Indikator	Einheit	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
III.1	Nicht berücksichtigt					
III.2	Eröffnung von Möglichkeiten zur Partizipation	Eröffnet Möglichkeiten zur Partizipation (Ja o. Nein)	Nein	Ja		
			BS = 1	BS = 2		
III.3	Nicht berücksichtigt					
III.4	Nicht berücksichtigt					
III.5	Akzeptanz der BewohnerInnen	Akzeptanz gegeben (Ja o. Nein)	Ja	Eher nein	Nein	
			BS = 3	BS = 2	BS = 1	
	Förderung der sozialen Verantwortung	Fördert die soziale Verantwortung (Ja o. Nein)	Nein	Ja		
			BS = 1	BS = 2		

4 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung

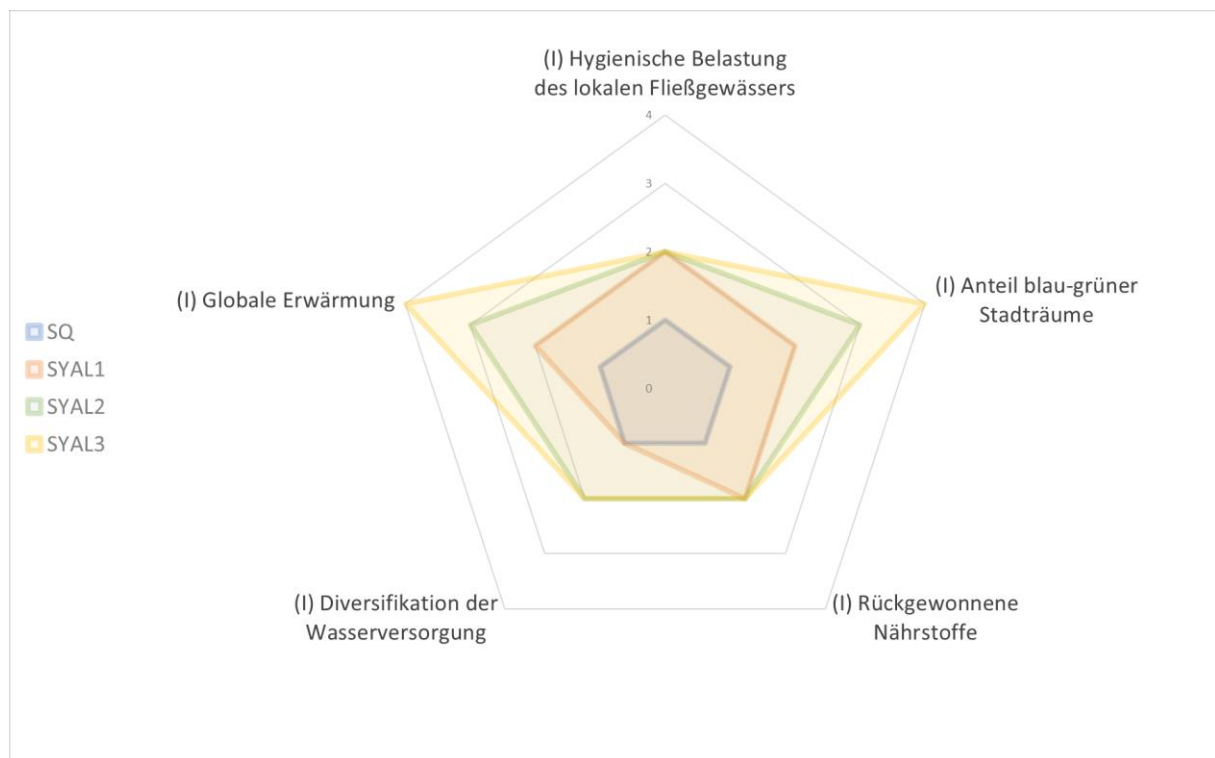
In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Ergebnisse sowie deren Darstellung in Netzdiagrammen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse in Hinblick auf den gewählten Bewertungsansatz und die verwendeten Daten diskutiert. Zuletzt werden Verallgemeinerungs- sowie Übertragbarkeitsoptionen der Ergebnisse aus dem Fallbeispiel thematisiert.

4.1 Auswertung der Ergebnisse

Wie zuvor erwähnt, soll durch die Nachhaltigkeitsbewertung die Frage beantwortet werden, ob die entwickelten Systemalternativen ein größeres Potenzial als das Status-Quo-System aufweisen zu einer nachhaltigen Entwicklung im Untersuchungskontext beizutragen. Wenn dies der Fall ist, soll darüber hinaus die Systemalternative identifiziert werden, die das größte Potenzial hat. Wie in Kapitel 3.1 geschildert, wird die Aggregation der Bewertung zu einer Gesamtpunktzahl bewusst vermieden, da dies gegen den Anspruch des integrativen Konzeptes wäre, das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung auszudifferenzieren und gegen den Anspruch der Arbeit die Informationsbasis für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus zu verbessern. Durch das Neben- und Gegenüberstellen der einzelnen Indikatoren können die vielfältigen Aspekte innerhalb des Wasser-Energie-Nexus intensiver beleuchtet werden, als dies bei einer Gesamtpunktzahl der Fall wäre. Die Ergebnisse werden deshalb durch Netzdiagramme je Nachhaltigkeitsziel dargestellt. Je größer sich ein Netz spannt, desto größer ist das Potential des zugehörigen Systems zu interpretieren. Das Status-Quo-System entspricht dabei dem blauen, SYAL1 dem orangenen, SYAL2 dem grünen und SYAL3 dem gelben Netz.

Für das Nachhaltigkeitsziel I „Sicherung der menschlichen Existenz“ spannen die Systemalternativen bei allen für den Untersuchungskontext gewählten Indikatoren ein größeres oder im Falle von SYAL1 in Bezug auf die Diversifikation der Wasserversorgung ein gleich großes Netz wie das Status-Quo-System (siehe Abbildung 31). Folglich weisen die Systemalternativen überwiegend ein größeres Potential als das Status-Quo-System für dieses Nachhaltigkeitsziel auf. SYAL2 überspannt dabei das Netz von SYAL1 und SYAL3 spannt sein Netz noch weiter als SYAL2 und hat damit für dieses Nachhaltigkeitsziel das größte Potential.

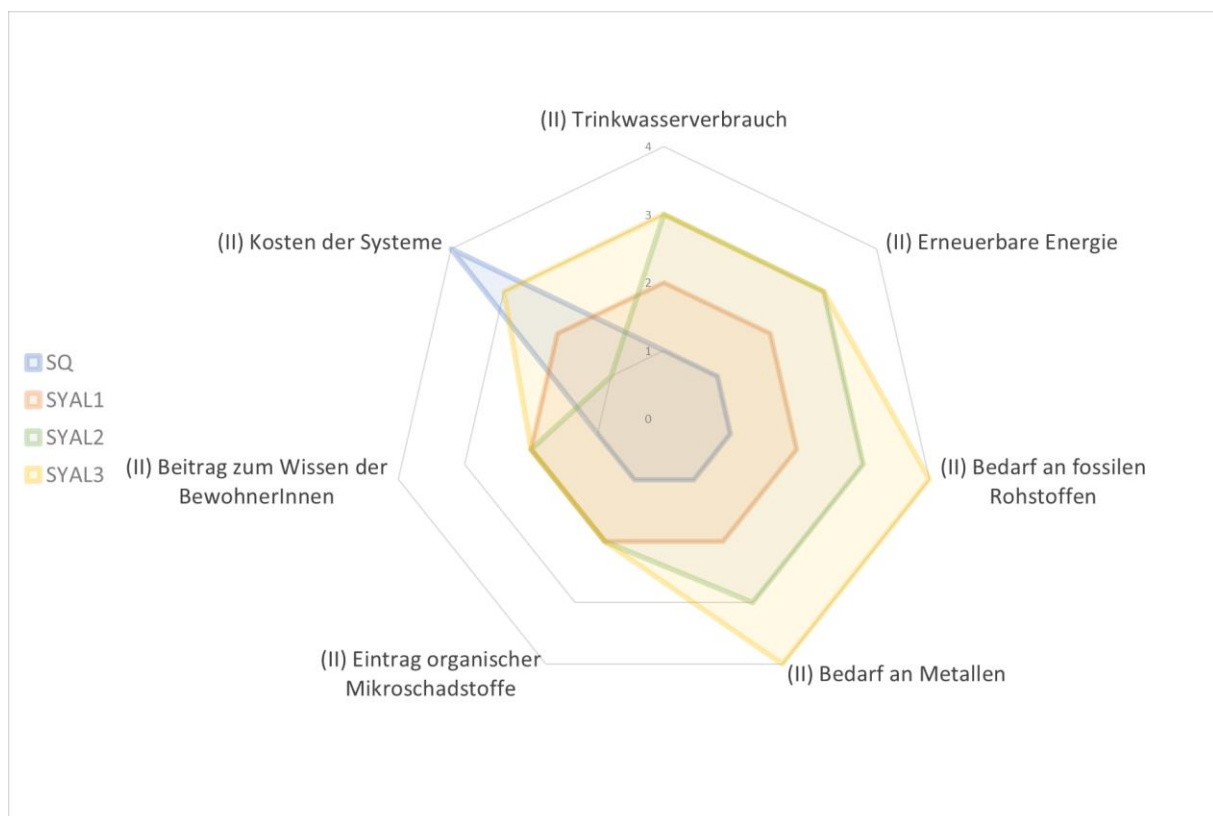
Abbildung 31 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel I



Quelle: Eigene Darstellung

Auch für das Nachhaltigkeitsziel II „Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials“ spannen die Systemalternativen bis auf den Indikator „Kosten der Systeme“ ein größeres Netz als das Status-Quo-System (siehe Abbildung 32). Abgesehen von den Kosten weisen die Systemalternativen somit ein größeres Potential als das Status-Quo-System für dieses Nachhaltigkeitsziel auf. Ähnlich wie beim Nachhaltigkeitsziel I überspannt das Netz von SYAL2 dabei das Netz von SYAL1. Ausnahme bilden auch hier die Kosten, wodurch das Netz von SYAL2 hier eine geringere Spannweite als SYAL1 zeigt. Bei SYAL2 handelt es sich um die Systemalternative mit den höchsten Investitionskosten, da hier sowohl bestehende Strukturen, d.h. der Kanalbestand, übernommen werden, als auch möglichst viele, teils kostenintensive, dezentrale Systemkomponenten eingeführt werden. SYAL3 spannt im Vergleich der Systemalternativen auch hier das größte Netz und hat damit für dieses Nachhaltigkeitsziel das größte Potential.

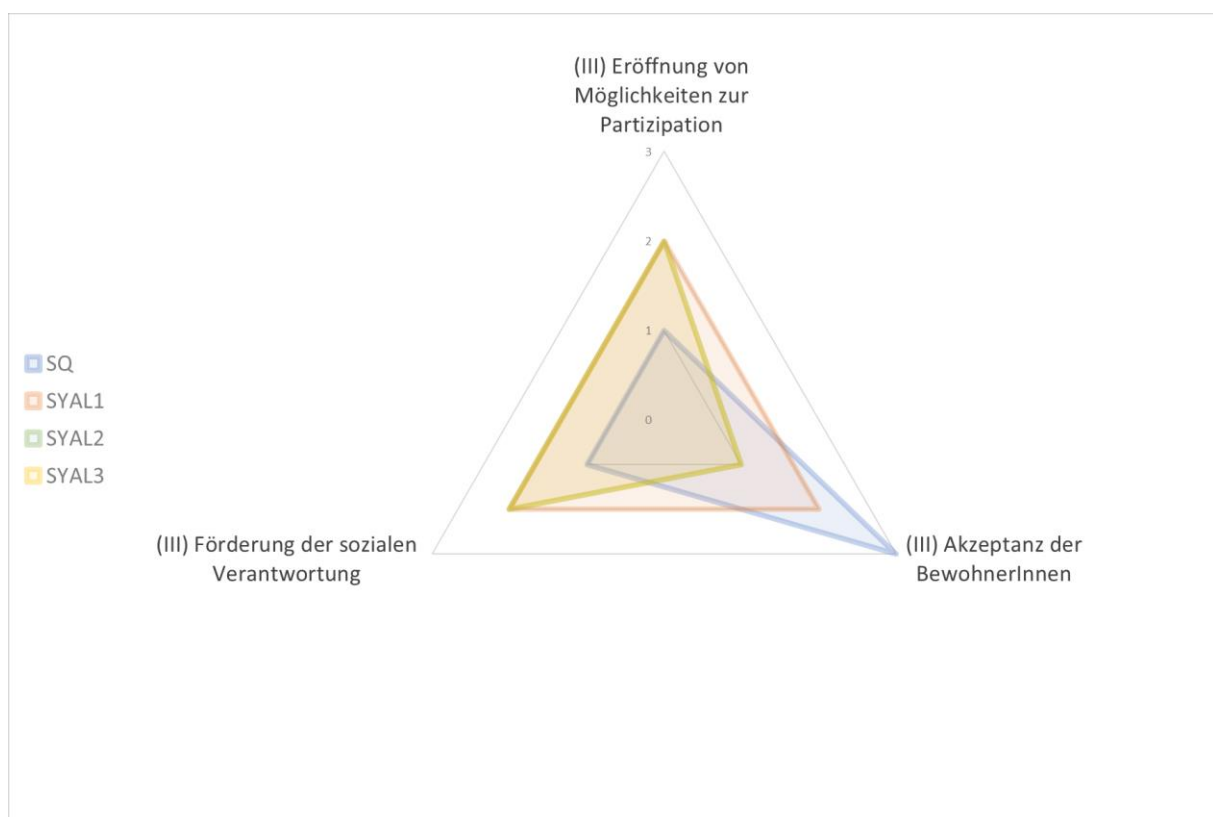
Abbildung 32 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel II



Quelle: Eigene Darstellung

Für das Nachhaltigkeitsziel III „Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten“ überspannt das Netz des Status-Quo-Systems die Netze der Systemalternativen an einer Stelle, nämlich in Bezug auf den Indikator „Akzeptanz der BewohnerInnen“ (siehe Abbildung 33). Im Vergleich der Systemalternativen untereinander überspannt SYAL1 im Gegensatz zum Muster der vorhergehenden Nachhaltigkeitsziele in Bezug auf die Akzeptanz sowohl SYAL2 als auch SYAL3, deren Netze hier übereinander liegen.

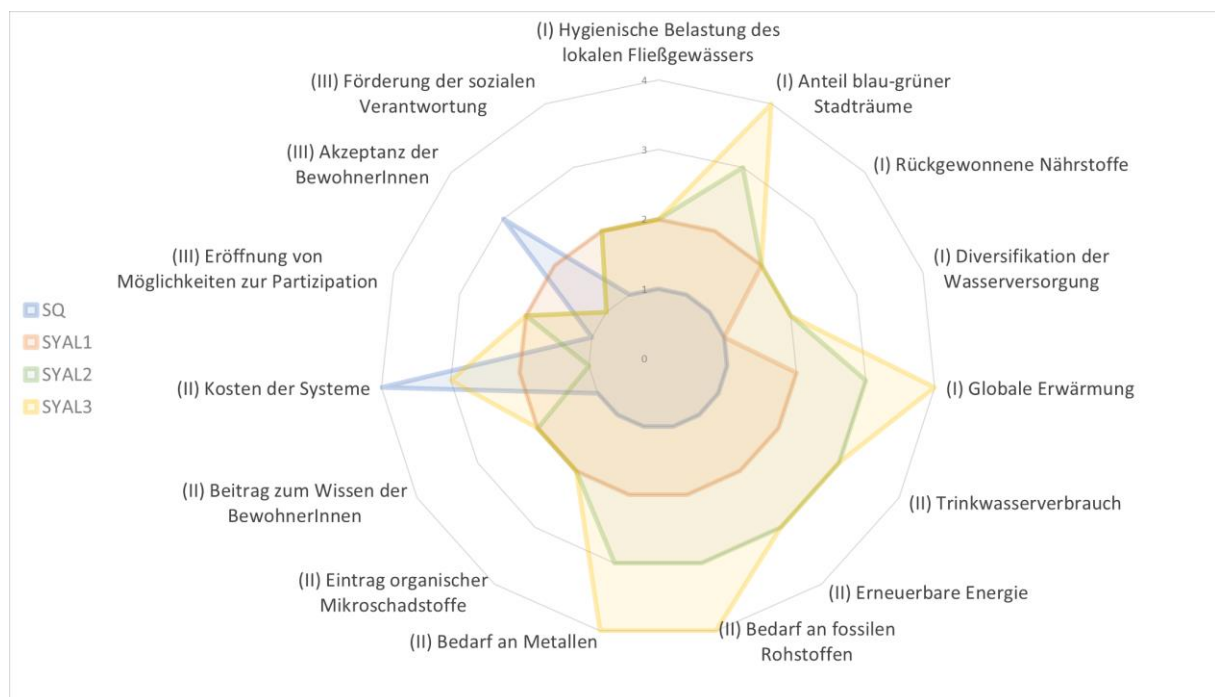
Abbildung 33 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziel III



Quelle: Eigene Darstellung

Bei gemeinsamer Betrachtung der drei Nachhaltigkeitsziele (siehe Abbildung 34) lässt sich festhalten, dass die Systemalternativen bis auf zwei Ausnahmen (Kosten der Systeme / Akzeptanz der BewohnerInnen) ein größeres oder in einem Fall gleich großes Netz wie das Status-Quo-System spannen. Damit weisen sie ein größeres Potential auf zu einer nachhaltigen Entwicklung im Untersuchungskontext beizutragen. Deshalb vermitteln die Ergebnisse - unabhängig von der Wahl einer der drei Systemalternativen - vor allem eine Chance, nämlich dass der Wasser-Energie-Nexus innerhalb des städtischen Gebäudebestandes im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu transformieren ist. Dennoch sind die beiden identifizierten Schwachpunkte im Falle einer Implementierung und für weitere Fallbeispiele noch zu adressieren. Im Vergleich der Systemalternativen untereinander spannt SYAL3 für alle drei Nachhaltigkeitsziele das größte Netz.

Abbildung 34 Netzdiagramm Nachhaltigkeitsziele I, II und III



Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Um die zuvor dargestellten Ergebnisse einordnen zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse in Bezug auf den gewählten Bewertungsansatz und die verwendeten Daten diskutiert.

4.2.1 Bewertungsansatz

Als Grundlage für die Bewertung diene das integrative Konzept nachhaltiger Entwicklung (Kopfmüller et al. 2001). Bei der Übertragung der Nachhaltigkeitsregeln auf Indikatoren bestand die Herausforderung darin, den Vollständigkeitsanspruch mit Relevanzentscheidungen in Einklang zu bringen, um die Bewertung operabel zu halten. Die so getroffene Auswahl an Indikatoren ist selektiv, da sie bestimmte relevante Aspekte des Problems abdeckt und andere nicht (Grunwald 2016). Diesem Selektivitätsproblem kann eine Vielzahl von Datenquellen und der Abgleich der Indikatorenauswahl mit ExpertInnen entgegeng gehalten werden. Durch dieses Vorgehen sollte ein potentieller „Bewertungsbias“ (Konrad und Nill 2001, S. 46) vermieden werden. Dennoch kann, wie zuvor erwähnt, durch die limitierte Auswahl der ExpertInnen eine Voreingenommenheit in der Zusammenstellung der Indikatoren nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dies wurde hier in Kauf genommen, da durch den gewählten Bewertungsansatz die Konkretisierung nachhaltiger Entwicklung intersubjektiv nachvollziehbar erfolgte (Dusseldorf 2014). Die methodischen Schritte, die zur Bewertung geführt haben, wurden transparent und verständlich dargelegt.

Durch die verwendete Bewertungsskala können sowohl qualitative als auch quantitative Indikatoren, die anhand unterschiedlicher Methoden hergeleitet wurden, eingestuft und auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Dabei wurde die Bewertungsskala (BS) konsequent von 0 bis 4 angewandt. Diese konsequente Zuordnung auf der Bewertungsskala suggeriert jedoch eine Zahlengenauigkeit, die nicht bei allen Indikatorenwerten gegeben ist. Die Indikatorenwerte, die durch die Umweltbewertung (z.B. Bedarf an fossilen und metallischen Rohstoffen) hergeleitet wurden, können für den Vergleich zwischen dem Status-Quo-System und den Systemalternativen als robust betrachtet werden, da sie Verbesserungen von 68 - 96% widerspiegeln. Die Bewertung innerhalb der einzelnen Systemalternativen erfolgte jedoch teilweise auf Basis von marginalen Unterschieden (< 10%) und es stellt sich die Frage, wie treffend in diesen

Fällen eine Unterscheidung auf der Bewertungsskala ist. Würde die Zuordnung jedoch entsprechend der Indikatorenwerte variiert werden, könnte der Eindruck von Beliebigkeit entstehen. Deshalb wurde hier an der konsequenten Zuordnung festgehalten, wonach SYAL3 das größte Netz spannt und somit das größte Potential aufweist.

4.2.2 Verwendete Daten

Für die Systemdarstellung und die Bewertung wurde eine Vielzahl von Datenquellen u.a. von lokalen Behörden und Herstellern eingeholt. Systemkomponenten, für die in der Praxis noch kein Äquivalent vorliegt, wurden in Kooperation mit Fachexperten fallspezifisch ausgelegt. Durch diesen vielfach direkten Bezug der Daten und die Abstimmung mit Experten können die Angaben durch diese Quellen weitgehend als kontextspezifisch und praxisrelevant eingestuft werden. Durch die Vielzahl der verwendeten Datenquellen wurde darüber hinaus für eine so breite Datenbasis gesorgt, dass Lücken einzelner Quellen ausgeglichen wurden.

Eine Qualitätseinschränkung stellen die Daten bezüglich der Regenwasserauskopplung dar. Die Regenwasserauskopplung ist eine essentielle Komponente der Systemalternativen. Dennoch wurde die Verringerung des abflusswirksamen Anteils lediglich prozentual je Systemalternative angenommen. Im Gegensatz zu Flächen- und Niederschlagsdaten, die aus lokalen Quellen (Meentz 2018; GEO-Net Umweltconsulting und ÖKOPLANA 2015) bezogen werden konnten, werden die für eine Regenwasserauskopplung notwendigen Daten in der Regel nicht von Städten erfasst. Sie müssen durch eine detaillierte Maßnahmenplanung für alle Flächen im Untersuchungsquartier generiert werden (siehe hierzu Matzinger et al. 2017). Dies war jedoch nicht Gegenstand der Arbeit, wodurch sich Unsicherheiten hinsichtlich der letztendlichen Stoffströme und Konstruktionsmaterialien bei einer Implementierung ergeben. Dies betrifft vor allem SYAL3, die eine vollständige Regenwasserauskopplung vorsieht. Würde sich durch eine detaillierte Maßnahmenplanung beispielsweise ein hoher baulicher Aufwand für die Regenwasserauskopplung manifestieren, könnte dies das Ergebnis zum Nachteil insbesondere von SYAL3 verändern.

Ähnlich verhält es sich mit der in die Systemdarstellung nicht inkludierten Entsorgung. Da für die innovativen Systemkomponenten der Systemalternativen auch den Herstellern und Fachexperten noch keine Angaben zur Entsorgung vorliegen, kann diese datenmäßig nicht erfasst werden. Dadurch werden ökologische und wirtschaftliche Belastungen, die durch die Entsorgung anfallen, aus Konsistenzgründen weder für das Status-Quo-System noch für die Systemalternativen berücksichtigt und somit nicht der gesamte Lebensweg abgebildet. Berücksichtigt man, dass bei SYAL2 die Kläranlage sowie die konventionelle Bioabfallentsorgung und in SYAL3 zusätzlich noch der gesamte Kanalbestand außer Betrieb genommen wird, so könnte sich dies durch den Entsorgungsaufwand zum Nachteil dieser Systemalternativen auswirken.

Durch die problemzentrierten Interviews (Witzel 2000) und deren qualitative Inhaltsanalyse (Mayring 2015) konnten wichtige Details über die bisher recht wenig beforschten Nutzerperspektiven zu alternativen Sanitärtechnologien in Erfahrung gebracht werden. Diesem stark qualitativen Fokus der Befragung ist jedoch die limitierte Anzahl der Befragten geschuldet. Durch die limitierte Anzahl der Befragten können anhand der erhobenen Daten keine Schlüsse über die Gesamtheit der NutzerInnen im Untersuchungsquartier gezogen werden. Es stellt sich deshalb die Frage, wie die so hergeleiteten nutzerspezifischen Ergebnisse einzuordnen sind. Der Küchenabfallzerkleinerer wurde von der Mehrheit der Befragten als inakzeptabel befunden (CSI 2019). Dies könnte jedoch ein sehr befragungsspezifisches Ergebnis sein, da in anderen Kontexten, beispielsweise in den USA, solche Zerkleinerer großflächig in Haushalten verwendet werden (Bolzonella et al. 2003). Würden weitere Erhebungen ergeben, dass es sich nicht um ein befragungsspezifisches, sondern kontextübergreifendes Akzeptanzproblem handelt, das z.B. für ganz Heidelberg oder ganz Süddeutschland besteht, müsste unter Umständen eine angepasste Version von SYAL2 und SYAL3 entwickelt werden, in denen die Küchenabfallzerkleinerer etwa durch die Bioabfallentsorgung aus SYAL1 ersetzt werden. In diesem Fall ergebe sich einer der zuvor angesprochenen Zielkonflikte, denn SYAL2 und SYAL3 haben anhand der Befragung gegenüber SYAL1 zwar eine Schwäche hinsichtlich der Akzeptanz der Küchenabfallzerkleinerer, emittieren jedoch z.B. weniger CO₂ als SYAL1. Es wäre zu prüfen, inwieweit die Bioabfallentsorgung Einfluss nimmt und im Falle einer Anwendung des Bewertungsansatzes in der Praxis müsste dieser und weitere Zielkonflikte adressiert werden (siehe hierzu ausführlich Dusseldorp 2017).

4.3 Verallgemeinerungs- und Übertragungsoptionen

Wie zu Beginn geschildert, sind Systemalternativen zur Transformation des Wasser-Energie-Nexus innerhalb des städtischen Gebäudebestands noch mit zahlreichen offenen Fragen verbunden. Als Ziel der Arbeit wurde deshalb formuliert, das Systemverständnis und die Informationsbasis für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand signifikant zu verbessern und dadurch zu gewährleisten, dass eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet. Dazu sind detaillierte Informationen notwendig, die nur unter genauem Eingehen auf lokale sowie regionale Gegebenheiten, d.h. in Form von Fallbeispielen, generiert werden können (Grunwald 2016; Krohn 2008a, 2008b). Deshalb wurden die Systemalternativen in dieser Arbeit für ein konkretes Stadtviertel passgenau entwickelt und eine Nachhaltigkeitsbewertung für diesen spezifischen Kontext erarbeitet.

Zugleich „muss das wissenschaftliche Interesse auch darauf gerichtet sein, aus dem Fall zu lernen und an ihm zu erkennen, warum er typisch oder atypisch, kritisch oder unkritisch ist“ (Krohn 2008b, S.41). Deshalb wurde das Teilziel gesetzt, die Übertragungsmöglichkeiten des Fallbeispiels auf andere städtische Bestandsviertel zu überprüfen. Inwieweit stellen das analysierte Untersuchungsquartier, die dafür entwickelten Systemalternativen und die vorgenommene Bewertung also einen „Einzelfall“ (ebd., S. 40) und inwieweit ein „Exemplar“ (ebd.) dar, das auf andere Kontexte übertragen werden kann?

4.3.1 Untersuchungsquartier & Systemalternativen

Das Untersuchungsquartier, das den physischen Rahmen für das Fallbeispiel bildet, zeichnet sich zunächst dadurch aus, dass es für Transformationsstrategien in nicht zu ferner Zukunft in Frage kommt. Das Untersuchungsquartier entstand in den 1970er-Jahren und bedarf vor dem Hintergrund des Sanierungszyklus (BMWi 2014) und aufgrund zunehmender energetischer Vorgaben einer Sanierung (Stadt Heidelberg 2017a; BMUB 2016). Eine solche Sanierung stellt einen opportunen Zeitpunkt für eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus dar (Koziol et al. 2006). Bei ähnlicher Entstehungszeit des Bestandsquartiers und ähnlichen energetischen Vorgaben wie in Deutschland dürfte der Sanierungsbedarf und damit die Opportunität für eine Transformation auch in anderen Bestandskontexten gegeben sein. Darüber hinaus gerät im Fallbeispiel das Status-Quo-

System durch klimatische Veränderungen unter Veränderungsdruck (Karthe et al. 2017; Kluge und Libbe 2010). Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels ist auch der Veränderungsdruck über das analysierte Stadtviertel hinaus übertragbar.

Zugleich ergeben sich jedoch praktische Limitierungen bei der Übertragung der Systemalternativen auf andere Bestandsviertel. So wurde die lokale Gebäudetypologie und die genaue Gebäudeanzahl inkludiert, die wohl sehr spezifisch für das Untersuchungsviertel sein dürften. Außerdem wurden die Annahmen zur Regenwasserauskopplung im Fallbeispiel für eine Mischwasserkanalisation getroffen, die in Bezug auf Deutschland lediglich in der südlichen Hälfte des Landes das vorherrschende Abwasserentsorgungssystem darstellt (Guyer 2007). Da die Regenwasserauskopplung ein zentrales Element der hier entwickelten Systemalternativen darstellt, können diese nicht auf ein Status-Quo-System übertragen werden, das durch ein anderes Abwasserentsorgungssystem gestaltet wird. Liegt wie im Fallbeispiel eine Mischwasserkanalisation vor, so sind die Annahmen zur Regenwasserauskopplung durch eine genaue lokale Maßnahmenplanung zu validieren. Für eine hohe Verringerung des abflusswirksamen Anteils wie in SYAL2 und SYAL3 sind ausreichend unbebaute Flächen erforderlich. Es kann angenommen werden, dass diese in dichter bebauten städtischen Bestandsvierteln nicht in ausreichendem Maße vorliegen.

Limitierungen bei der Übertragung der Systemalternativen auf andere Bestandsviertel ergeben sich darüber hinaus z.B. durch lokale Vorschriften des Denkmalschutzes oder durch einen schlechten Zustand der Bestandsrohre, die eine Trennung innerhalb des Altrohres nicht zulassen. Auch der Zustand des Kanalbestandes hat Einfluss auf die Übertragungsmöglichkeiten. Im Fallbeispiel liegt kein akuter bis mittelfristiger Sanierungsbedarf der Kanäle vor, weshalb der Kanalbestand in SYAL1 und SYAL2 weiterverwendet wird. Vor dem Hintergrund eines akuten bis mittelfristigen Sanierungsbedarfs der Kanäle, wie er in vielen anderen Städten Deutschlands vorliegt (siehe hierzu DWA 2016a, 2015), wäre eine Weiterverwendung dieser neu zu bewerten. Diese individuellen Einschränkungen anderer städtischer Bestandsviertel sind zu ermitteln und die Entscheidungspfade, die hier zur Findung der Alternativen dienen, dementsprechend anzupassen.

Eine weitere Grenze in der Übertragung auf andere Bestandskontexte stellen die nutzerspezifischen Ergebnisse dar, da sie stark durch kontextgebundene Konventionen und Einstellungen beeinflusst sind (Hegger und van Vliet 2010). So stieß die Grauwasserwiederverwendung im vorgesehenen Umfang bei den Befragten im Fallbeispiel auf Zustimmung. In gesellschaftlich vergleichbaren Pilotprojekten hingegen bestand bezüglich der Grauwasserwiederverwendung eine erhebliche Barriere. Der Begriff „Grauwasser“ wurde dort mit fehlender Reinheit assoziiert (Hefter et al. 2015). Im Gegensatz dazu wurde die alternative Bioabfallentsorgung durch Küchenabfallzerkleinerer, die in anderen Ländern bereits vielfach eingesetzt wird (Bolzonella et al. 2003), von den für das Fallbeispiel Befragten gänzlich abgelehnt. Folglich sind die lokalen Nutzerperspektiven je Fallbeispiel genauso wie die praktischen Einschränkungen zu erheben und die Systemalternativen dementsprechend anzupassen.

Die Einschränkungen machen deutlich, dass es nicht möglich ist, die Systemalternative mit dem größten Potential für das Fallbeispiel andernorts „eins zu eins zu replizieren“ (Krohn et al. 2017, S. 344). Vielmehr stellen die Ergebnisse und Überlegungen, die zu diesem Urteil geführt haben, einen Ausgangspunkt zur „Imitation des Gestaltungsprozesses unter ähnlichen Bedingungen“ (ebd., S. 345) dar. Zuvor wurde gezeigt, dass sich „ähnliche Bedingungen“ dabei sowohl auf das Abwassersystem des jeweiligen Status-Quo-Systems (Art und Zustand), auf die baulichen Bedingungen des jeweiligen Bestandsviertels (Gebäudetypologie/-zahl und Bebauungsdichte) als auch auf die Nutzerperspektiven beziehen. Folglich wird die Entwicklung und Wahl von Systemalternativen stets mit einem erheblichen Datenerhebungs- und Planungsaufwand verbunden sein. Dennoch sollte aus dem Fallbeispiel nicht nur abgeleitet werden, dass es möglich ist, Systemalternativen für Bestandskontexte zu entwickeln, sondern dass das dazu entwickelte Instrumentarium übertragbar ist. Eine Vielzahl von Festlegungen und Daten sind projektspezifisch, aber das Prozedere ihrer Verarbeitung kann übernommen werden. Der städtische Gebäudebestand sollte deswegen nicht weiter außen vor gelassen werden bei Transformationen des Wasser-Energie-Nexus.

4.3.2 Bewertung

Die Einschätzung des integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung als ein „übersichtlich strukturiertes Bearbeitungsraaster“ (Hartmuth et al. 2006, S. 111) zur Konkretisierung des abstrakten, globalen Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung bestätigt sich durch die Umsetzung hier. Anhand des Konzepts konnte nachhaltige Entwicklung in Bezug auf den Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand ausdifferenziert werden. Mit dem Konzept wurde somit bewusst ein Ansatz gewählt, der es zulässt, die Bewertung für das Fallbeispiel „maßzuschneidern“ (Grunwald 2019, S. 187, übersetzt). Die „Bedeutungsfestlegungen“ (Grunwald 2016, S. 207) der verwendeten Regeln fand anhand des Fallbeispiels und unter Einbezug lokaler ExpertInnen und Stakeholdern statt. Dennoch weisen nahezu alle Indikatoren einen exemplarischen Charakter auf. Indikatoren z.B. in Bezug auf Ressourcennutzung, Stadtraumgestaltung und Wissensvermittlung dürften auch in anderen städtischen Bestandskontexten von Relevanz sein, auch wenn diese sich in den baulichen oder nutzerspezifischen Bedingungen unterscheiden und deshalb zu einer anderen Auswahl von Systemalternativen kommen. Damit ist die erarbeitete Nachhaltigkeitsbewertung als Basis übertragungsfähig und über das Fallbeispiel hinaus von Bedeutung.

Einige Nachhaltigkeitsregeln (I.3, II.4, III.1, III.3, III.4) wurden in ihrer Bedeutung für das Fallbeispiel jedoch nicht berücksichtigt. Da die Nachhaltigkeitsregeln des integrativen Konzepts als Prüfkriterien fungieren, müsste ihr Ausschluss bei einer Übertragung auf ein anderes Fallbeispiel neu entschieden werden. Es könnte dadurch sein, dass sich in anderen Kontexten zusätzlich zur hier gelegten Basis noch weitere Indikatoren als relevant erweisen. Dann müsste die Bewertung erweitert werden, könnte aber dennoch als Basis dienen. Darin ist ein Vorzug der Bewertung zu sehen, denn wenn für jede Transformation des Wasser-Energie-Nexus eine „eigene Nachhaltigkeit“ (Grunwald 2016, S. 219) festgelegt werden müsste, wäre die Informationsbasis nicht verbessert, sondern eher diffuser gemacht worden und damit nicht gewährleistet, dass eine Transformation des Wasser-Energie-Nexus einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet.

5 Konklusion und Ausblick

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zusammengefasst, über eine Implementierung der Systemalternativen reflektiert und weiterer Forschungsbedarf formuliert.

5.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme sowie Energieversorgungssysteme sind essentiell für eine Transformation hin zu einer nachhaltigen Entwicklung, stellen aber nicht nur für sich genommen Herausforderungen dar, sondern auch in ihrem Nexus. Bisher wird der städtische Gebäudebestand für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus vielfach nicht berücksichtigt. Dieses Defizit wurde hier unter anderem darauf zurückgeführt, dass die Ausgestaltung der Systemalternativen im Bestand eingeschränkter ist als im Neubau und noch zahlreiche offene Fragen für den Einsatz von Systemalternativen bestehen.

In den Systemalternativen wird Abwasser nicht als Abfallstoff eingeordnet, sondern als Ressource für Wasser, Nährstoffe, Wärme und Energie gesehen, die einen Beitrag zum Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem sowie Energieversorgungssystem leistet. Um eine gewisse Bandbreite abzubilden, wurden drei Systemalternativen mit unterschiedlichen Systemkomponenten und Zentralisierungsgraden für das Fallbeispiel entwickelt. Über Entscheidungspfade wurde veranschaulicht, welche Möglichkeiten im spezifischen Bestandskontext gegeben sind und wie sich die gewählten Komponenten begründen. Die Herausforderung bei der Erfassung der Systemalternativen lag in der extensiven Datenerhebung, insbesondere für die in der Praxis noch nicht eingesetzten Systemkomponenten. Diese war jedoch notwendig, um die Systemalternativen umfassend zu bewerten und offene Fragen beantworten zu können.

Um festzustellen, ob die Systemalternativen tatsächlich ein größeres Potential haben zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen und wenn ja, welche das größte Potential aufweist, wurde eine Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis des „integrativen Konzepts nachhaltiger Entwicklung“ durchgeführt. Das Konzept bot einen Rahmen, in dem die Konkretisierung nachhaltiger Entwicklung in Bezug auf den Wasser-Energie-Nexus im städtischen Gebäudebestand intersubjektiv nachvollziehbar erfolgen konnte. Durch die Rahmung des Wasser-Energie-Nexus als gesamtgesellschaftliches Problem wurden dabei auch Bewertungskriterien inkludiert (z.B. Förderung der sozialen Verantwortung), die in bisherigen Bewertungsansätzen mit einem rein ressourcenbedingten Problemverständnis des Nexus noch nicht berücksichtigt waren.

Die Bewertung ergab, dass die Systemalternativen bis auf zwei Ausnahmen (Kosten der Systeme / Akzeptanz der BewohnerInnen) ein größeres oder in einem Fall gleich großes Netz wie das Status-Quo-System spannen und damit ein größeres Potential aufweisen zu einer nachhaltigen Entwicklung im Untersuchungskontext beizutragen. Die beiden identifizierten Schwachpunkte sind im Falle einer Implementierung und für weitere Fallbeispiele noch zu adressieren. Im Vergleich der Systemalternativen untereinander ergab sich für SYAL3 das größte Potenzial zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Aufgrund der individuellen lokalen baulichen sowie nutzerbedingten Spezifika eines jeden Stadtviertels kann SYAL3 jedoch nicht in anderen Bestandsvierteln repliziert werden, sondern lediglich als Ausgangspunkt für ähnliche Gestaltungsprozesse des Wasser-Energie-Nexus dienen. Systemalternativen sind folglich individuell für jeden Kontext zu entwickeln und damit mit einem erheblichen Datenerhebungs- und Planungsaufwand verbunden.

Da die Systemalternativen hier jedoch für alle Nachhaltigkeitsziele deutliches Potential aufgewiesen haben zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen, sollte dieser Aufwand in Kauf genommen und der städtische Gebäudebestand nicht weiter außen vor gelassen werden bei Transformationen des Wasser-Energie-Nexus. Die hier entwickelte Nachhaltigkeitsbewertung und das hierzu entwickelte Instrumentarium sind über das Fallbeispiel hinaus von Bedeutung und können als Basis für weitere Bewertungen dienen.

5.2 Implementierungs- und Forschungsbedarf

Für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus müssen zunächst Systemalternativen erarbeitet werden. Wie hier herausgearbeitet wurde, können bereits entwickelte Systemalternativen lediglich als Ausgangspunkt für ähnliche Gestaltungsprozesse dienen und sind daher individuell für jeden Kontext anzupassen. Damit die Wahl der Systemalternativen künftig strukturierter erfolgen kann, besteht der Bedarf anhand weiterer Fallbeispiele ein Schema für die folgenden Fragen zu entwickeln: Welche städtebaulichen Faktoren nehmen auf die Entscheidungspfade zur Findung der Systemalternativen Einfluss? Lassen sich diese Faktoren spezifischen Merkmalen bestimmter Bestandskontexte zuordnen?

Im Gegensatz zu den Systemalternativen wurde bezüglich der Nachhaltigkeitsbewertung argumentiert, dass diese auch auf andere Bestandskontexte übertragen werden kann, da die meisten Indikatoren einen exemplarischen Charakter aufweisen. Dennoch besteht hier der Bedarf an weiteren Fallbeispielen zu prüfen, ob eine kontextspezifische Ergänzung der gesetzten Bewertungsmaßstäbe erforderlich ist und wie die für den Untersuchungskontext dieser Arbeit nicht berücksichtigten Nachhaltigkeitsregeln in anderen Bestandskontexten einzuordnen sind.

Die beiden identifizierten Schwachpunkte - Kosten und Akzeptanz - sind noch zu adressieren. Bei den Investitionskosten der Systemalternativen schlagen vor allem die innovativen Systemkomponenten zu Buche, die gegenwärtig Nischenprodukte für Haushalte darstellen. Es gilt zu überprüfen, ob sich für diese Systemkomponenten bei zunehmendem Einsatz Kosteneinsparungen bewirken lassen, wie sie für Vakuumtoiletten angenommen werden (laut Hiessl et al. 2010 von 30 - 70%). Bezüglich der Akzeptanz liegt ein Bedarf an weiteren nutzerspezifischen Erkenntnissen vor, da gerade eine Systemkomponente unter den hier Befragten abgelehnt wurde, die andernorts bereits breitflächig eingesetzt wird. Da Nutzerperspektiven in bisherigen Projekten über Scheitern und Gelingen einer Implementierung von Systemalternativen entschieden haben (van Vliet et al. 2011), gilt es tiefer zu ergründen, wodurch die kontextgebundenen Konventionen und Einstellungen geformt werden, ob diese zu beeinflussen sind und wie sie im Transformationsprozess gelungen inkludiert werden können.

Der Fokus der Untersuchungen wurde in dieser Arbeit auf eine Transformation des städtischen Wasser-Energie-Nexus gelegt. Zwar wurde die Landwirtschaft implizit durch die rückgewonnenen Nährstoffe inkludiert, jedoch ist weitere Forschung notwendig, um die weiterreichenden Einflüsse der Veränderung innerhalb der Stadt z.B. auf die umliegende Landwirtschaft zu erfassen. Betrachtet man beispielsweise, dass allein die industrielle Bereitstellung einer Tonne Stickstoff 22 MWh (Gellings und Parmenter 2004) erfordert, und durch die Systemalternativen 14mal mehr Stickstoff rückgewonnen werden kann, so liefern die Ergebnisse Indizien, dass eine Transformation des Untersuchungsquartals auch den Wasser-Energie-Nahrungs-Nexus potentiell positiv beeinflussen kann.

Zuletzt müssen, nachdem das Potential der Systemalternativen hier dargelegt wurde, vor allem die Herausforderungen einer Implementierung adressiert werden. Im Gegensatz zu rein energetischen Innovationen, wie sie im Rahmen der Energiewende bisher eingeführt wurden, können die Systemalternativen für den Wasser-Energie-Nexus nicht sukzessive und mit einer gewissen Auswahl für die BewohnerInnen eingeführt werden (Wunder et al. 2019; Kuhn 2007; Talke 2005), sondern müssen gleichzeitig und für alle BewohnerInnen eines definierten städtischen Bereichs einheitlich implementiert werden. Systemkomponenten, wie beispielsweise das Vakuumsystem, würden andernfalls nicht funktionieren. Dies wirft zahlreiche Fragen für die bauliche Realisierung und die notwendigen institutionellen Vorkehrungen auf, die noch nicht geklärt sind. Doch „[w]er warten wollte, bis alle diese Fragen mit hinreichender Sicherheit geklärt sind, kommt nicht zum Handeln und verspielt [...] Chancen der Zukunft“ (Reuswig und Lass 2017, S. 315). Deshalb ist eine verbesserte Informationsbasis für Transformationen des Wasser-Energie-Nexus dringend notwendig. Dann muss jedoch ein „lernbereites Ausprobieren“ (Groß et al. 2005, S. 214) durch Implementieren der Systemalternativen in den Städten auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse folgen.

Bibliographie

- Albrecht, T.; Crootof, A.; Scott, C. (2018): The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. In: Kammen, D. (Hrsg.): Environmental Research Letters 13. S. 1 - 27.
- Allan, T.; Keulertz, M.; Woertz, E. (2015): The water–food–energy nexus: an introduction to nexus concepts and some conceptual and operational problems. In: Tortajada, C. (Hrsg.): International Journal of Water Resources Development (31). S. 301 - 311.
- Allouche, J.; Middleton, C.; Gyawali, D. (2019): The Water–Food–Energy Nexus: Power, Politics, and Justice. London und New York: Routledge.
- Andrews-Speed, P.; Bleischwitz, R.; Boersma, T.; Johnson, C.; Kemp, G.; VanDeveer, S. (2012): The global resource nexus: The struggles for land, energy, food, water, and minerals. Washington: Transatlantic Academy.
- Angenendt, S. und Dröge, S. (2013): Bevölkerungsentwicklung, Klimawandel und Lebensstandards: Globale Trends und ihre Folgen für die Versorgung mit Wasser, Energie und Nahrung. In: Beisheim, M. (Hrsg.): Der »Nexus« Wasser-Energie-Nahrung: Wie mit vernetzten Versorgungsrisiken umgehen? S. 19 - 28.
- Arcadis (2018): Citizen Centric Cities: The Sustainable Cities Index 2018 Europe. URL: <https://www.arcadis.com/media/6/7/0/%7B67088271-5764-4A21-A18A-68137704C65B%7DArcadis%20Sustainable%20Cities%20Index%202018%20Europe%20web%20final.pdf> (zuletzt aufgerufen 15.7.2019)
- Arcadis (2016): Sustainable Cities Water Index. URL: https://www.arcadis.com/media/4/6/2/%7B462EFA0A-4278-49DF-9943-C067182CA682%7DArcadis%20Sustainable%20Cities%20Water%20Index_003.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- ATT; BDEW; DBVW; DVGW; DWA; VKU (2015): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2015. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser.

AVZ Heidelberg (2018): Klärschlammbehandlung und -Transport (persönlicher Austausch 10.5.2018).

AVZ Heidelberg (n.dat): Aufgabe des Abwasserzweckverbands Heidelberg.
<http://www.azv-heidelberg.de/> (zuletzt aufgerufen 17.7.2019)

Baron, S. (2018): Analyse von Transformationspfaden zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Abwasserentsorgung im ländlichen Raum. Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen (Hrsg.). Kaiserslautern: Technischen Universität Kaiserslautern. Dissertation im Fachbereich Bauingenieurwesen.

BAUA (2018): Asbest Regelungen zum Schutz der Arbeitnehmer in der Bundesrepublik Deutschland. URL:
https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/artikel18.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt aufgerufen 26.7.2019)

BBSR (2016): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region: Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen. Bonn: BBSR

BDEW (2018): Kosten und verursachungsgerechte Finanzierung einer vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen. Berlin: civity Management Consultants

BDEW (2016) Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2016): Trinkwasserverwendung im Haushalt 2018. URL:
https://www.bdew.de/media/documents/Trinkwasserverwendung_im_HH_2018_o_j_Ott_online_03042019.pdf (zuletzt aufgerufen 24.7.2019)

Becker, J. (2018): Die öffentliche Abwasserentsorgung als ökologischer Faktor beim urbanen Wasser-Energie- Nexus. Darmstadt: Bachelorarbeit an der Technischen Universität Darmstadt.

Behrendt, S. (2018): Mikroschadstoffe in Gewässern. Berlin: IZT.

Beisheim, M. (2013): Einleitung: Vernetzte Versorgungsrisiken in den Bereichen Wasser, Energie und Ernährung. In: Beisheim, M. (Hrsg.): Der »Nexus« Wasser-Energie-Nahrung: Wie mit vernetzten Versorgungsrisiken umgehen? S. 11 -16.

- Berding (2019): Preisauskunft Kanalrohre (E-Mail 5.6.2019).
- Berding (2018): Materialzusammensetzung Kanalrohre (persönlicher Austausch 26.1.2018).
- Berding (2016): Betonrohre. URL: <https://www.berdingbeton.de/produkte/produkteoeffentlicher-bereich/kanalbau/produkte-kanalbau/> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- Bertling, R. und Nolde, E. (2017): Pilotanlage zur Herstellung von Flüssigdünger aus Schwarzwasser. In: Huss, C. und Huss, W. (Hrsg.): Wasserwirtschaft, Wassertechnik: Praxismagazin für Trink- und Abwassermanagement 6. S. 13 - 17.
- BfG (2018): Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland. Koblenz: BfG.
- BfN (2017a): Urbane grüne Infrastruktur: Grundlage für attraktive und zukunftsfähige Städte: Hinweise für die kommunale Praxis. Bonn: BfN.
- BfN (2017b): Bundeskonzept Grüne Infrastruktur. Bonn: BfN.
- BGR (2016): Salze in Deutschland. Hannover: BGR.
- Bhaduri, A.; Ringler, C.; Dombrowski, I.; Mohtar, R.; Scheumann, W. (2015): Sustainability in the water-energy-food nexus. In: Nickum, J. (Hrsg.): Water International (40). S. 723 - 732.
- Bieker, S. (2009): Semizentrale Ver- und Entsorgungssysteme: neue Lösungen für schnell wachsende urbane Räume: Untersuchung empfehlenswerter Größenordnungen. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Dissertation im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie.
- Biemann, K. (2015): Vergleichende Ökobilanzierung der semi-zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Dissertation im Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften.

- Bilharz, M. (2000): Vom Wissen zum Handeln? Fallstricke und Chancen für die Umweltbildung. URL: https://www.umweltbildung.de/uploads/tx_anubfne/bilharz_wissen_handeln.pdf (zuletzt aufgerufen 7.8.2019)
- Bizikova, L.; Roy, D.; Swanson, D.; Venema, H.; McCandless, M. (2013): The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development.
- Blackstock, K.; Waylen, K.; Juarez-Bourke, A.; Matthews, K. (2018): How do we tackle nexus governance? URL: <https://magic-nexus.eu/nexus-times-issues/issue-v-governance-challenge-june-2018> (zuletzt aufgerufen 4.9.2019)
- Bleischwitz, R.; Hoff, H.; Spataru, C.; van der Voet, E.; VanDeveer, S. (2017): Routledge Handbook of the Resource Nexus. London und New York: Routledge.
- BMU (2018): GreenTech made in Germany 2018: Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. Berlin: BMU.
- BMU (2017a): Qualitätsindikatoren Badegewässer. URL: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/binnengewasser/badegewasser/badegewasser-qualitaetsindikatoren/> (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)
- BMU (2017b): Deutschland soll Phosphor aus Klärschlamm gewinnen. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/deutschland-soll-phosphor-aus-klarschlamm-gewinnen/> (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)
- BMU (2017c): Badegewässer. URL: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/binnengewasser/badegewasser/> (zuletzt aufgerufen 15.8.2019)
- BMU (2008): Grundwasser in Deutschland. Berlin: BMU.
- BMUB (2016): Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Berlin: BMUB.

- BMUB (2015): Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft: Grünbuch Stadtgrün. Berlin: BMUB.
- BMUB; BMBF; IPCC; UBA (2016): Kernbotschaften des Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Klimaänderung 2013. Naturwissenschaftliche Grundlagen (Teilbericht 1). URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ipcc_sachstandsbericht_5_teil_1_bf.pdf (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)
- BMWi (2014): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand: Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin: BMWi.
- BMZ (2018): Querbezugsstrategie Wasser, Energie, Landwirtschaft (Nexus-Perspektive). URL: http://www.bmz.de/de/zentrales_downloadarchiv/web-apps/wasser/Strategiepapier430_01_2018.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- BMZ (2017): BMZ Wasserstrategie: Schlüssel zur Umsetzung der Agenda 2030 und des Klimaabkommens. URL: https://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/strategiepapiere/Strategiepapier404_06_2017.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- BMZ (2016): Städte nachhaltig gestalten. Bonn: BMZ.
- BMZ (2013): Phosphat: Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit. Hannover: BGR.
- Bolzonella, D.; Pavan P.; Battistoni P.; Cecchi F. (2003): The under sink garbage grinder: a friendly technology for the environment. In: Jarvis, P. (Hrsg.): Environmental Technology 24 (3). S. 349 - 59.
- Bohunovsky, L. und Jäger, J. (2008): Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung: Unterstützung für den gesellschaftlichen Übergang in Richtung Nachhaltigkeit. In: Garthe, C. (Hrsg.): Ökologisches Wirtschaften (2). S. 35 - 38.
- Böcher, D. (2018): Auswirkung der Einleitung aus der Siedlungsentwässerung auf die Fließgewässer. URL: https://www.gfg-fortbildung.de/web/images/stories/gfg_pdfs_ver/Hessen/MiLahn/2018/18_mil_v1.pdf (zuletzt aufgerufen 22.7.2019)

BRAWO® Systems (2019): Preisauskunft Liner und Harz (E-Mail 3.6.2019).

Bünning, B.; Löhn, S.; Rechtenbach, D.; Behrendt, J.; Otterpohl, R. (2018): Konzept und erste Ergebnisse zur Elimination von Mikroschadstoffen aus kommunalem Abwasser durch Nanofiltration und Festbettreaktor (MicroStop). In: Behrendt, J.; Rechtenbach, D.; Otterpohl, R. (Hrsg.): 30. Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft. Hamburg: GEFEU. S. 15 - 28.

Bundesregierung (2017): Phosphor aus Abwasser gewinnen. URL:
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/phosphor-aus-abwasser-gewinnen-459418> (zuletzt aufgerufen 6.8.2019)

Bundesregierung (2016): Bericht der Bundesregierung zum High-Level Political Forum on Sustainable Development 2016. URL:
https://www.bmz.de/de/zentrales_downloadarchiv/Presse/HLPF-Bericht_final_DE.pdf (zuletzt aufgerufen 22.11.2019)

Bürgmann, H. (2014): Eintrag von Antibiotika und Antibiotikaresistenzen in Wassersysteme der Schweiz. Ein Überblick über die Lage in Bezug auf Antibiotikaresistenzen und ihre Ausbreitung in die Umwelt. In Kugler, J. (Hrsg.): Prävention und Gesundheitsförderung (3). S. 185 - 190.

Butz, J. und Müller, E. (2010): Abwasserwärmenutzung: Erfahrungsbericht über Planung und Bau der Anlage in Bretten. In: DWA (Hrsg.): Korrespondenz Abwasser, Abfall, (57), Nr. 8. S. 765 - 770.

Cairns, R. und Krzywoszynska, A. (2016): Anatomy of a buzzword: The emergence of "the water-energy-food nexus" in UK natural resource debates. In: Beniston, M. (Hrsg.): Environmental Science and Policy (64). S. 164 - 170.

Cash, D.; Adger, W.; Berkes, F.; Garden, P.; Lebel, L.; Olsson, P.; Pritchard, L.; Young, O. (2006): Scale and cross-scale dynamics: Governance and information in a multilevel world. In: Gunderson, L. und Janssen, M. (Hrsg.): Ecology and Society 11 (2). S. 8 - 19.

Coenen, R.; Grunwald, A. (2003): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland: Analyse und Lösungsstrategien. Berlin: edition sigma.

- Covarrubias, M. (2018): The nexus between water, energy and food in cities: towards conceptualizing socio-material interconnections. In: Kazuhiko, T. (Hrsg.): Sustainability Science (14). S. 277 - 287.
- CSI (2019): Bericht zur Untersuchung der Einstellung zu NASS in Heidelberg. Unveröffentlichte Auftragsarbeit.
- Dai, J.; Shiqiang, W.; Han, G.; Weinberg, J.; Xie, X.; Wu, X.; Song, X.; Jia, B.; Xue, W.; Yang, Q. (2018): Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. In: (Hrsg.): Applied Energy (210). S. 393 - 408.
- Davoudi, A.; Milosevic, D.; Scheidegger, D.; Schramm, E.; Winker, M. (2016): Stoffstromanalyse zu verschiedenen Wasserinfrastruktursystemen in Frankfurter und Hamburger Quartieren. Berlin: Difu. netWORKS-Paper, Nr. 30.
- De Graaf (2010): Resource recovery from black water. Wageningen: University Wageningen. Dissertation im Rahmen des Graduiertenkollegs Socio-Economic and Natural Sciences of the Environment.
- Destatis (2018): Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen 2017 erneut gestiegen. Pressemitteilung Nr. 378. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/10/PD18_378_85.html (zuletzt aufgerufen 6.8.2019)
- DIN EN 12056: 2000: Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine und Ausführungsanforderungen.
- DIN EN 14040: 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN 14044: 2006: Umweltmanagement: Ökobilanz: Anforderungen und Anleitungen.
- DIN EN 16323: 2014: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik.
- Doka, G. (2009): Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent Report No.13. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

- Dones, R.; Bauer, C.; Röder, A. (2007): Wärmepumpen. In: Dones, R. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final Report ecoinvent No. 6-VI. Villingen und Dübendorf: Paul Scherrer Institut und Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Drews, M.; Mikkelsen, P.; Bauer-Gottwein, P.; Vezzaro, L.; Davidsen, C.; Madsen, H.; Larsen, M. (2016): Methodologies for managing the Energy-Water-Food nexus at different scales. In: Sønderberg, P.; Hvidtfeldt Larsen, H. (Hrsg.): DTU International Energy Report 2016: The Energy-Water-Food Nexus - from local to global aspects. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU). S. 73 - 82.
- Dusseldorp, M. (2017): Zielkonflikte der Nachhaltigkeit: Zur Methodologie wissenschaftlicher Nachhaltigkeitsbewertungen. Wiesbaden: Springer.
- Dusseldorp, M. (2014): Nachhaltigkeitsbewertung, In: Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.): Kontaktstudium Technikfolgenabschätzung. Karlsruhe: Karlsruhe, Institut für Technologie Fernstudienzentrum. S 1 - 51.
- DWA (2018a): Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS). Hennef: DWA.
- DWA (2018b): Leitfaden: Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserinfrastruktursystemen: Leitfaden zur Anwendung des DWA-A 272. Hennef: DWA.
- DWA (2018c): Merkblatt DWA-M 114: Abwasserwärmenutzung. Hennef: DWA.
- DWA (2016a): Zustand der Kanalisation in Deutschland: Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015. Hennef: DWA.
- DWA (2016b): Kennzahlenvergleiche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Baden-Württemberg: Ergebnisbericht für das Erhebungsjahr 2016. Hennef: DWA.
- DWA (2015b): Zustand der Kanalisation in Deutschland Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015. Hennef: DWA.
- DWA (2010a): Brauchen wir in Deutschland neuartige Sanitärsysteme? Hennef: DWA.

- DWA (2010b): Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft: Schwerpunkt Abwasser. Hennef: DWA.
- DWA (2008): DWA-Themen Neuartige Sanitärsysteme. Hennef: DWA.
- DWA (2006): Ressourcenökonomische Anreize für ein zukunftsfähiges Stoffstrommanagement in der kommunalen Abwasserwirtschaft. In: DWA (Hrsg.): Kommunale Abwasserbehandlung, KA – Abwasser, Abfall 53 (1). Hennef: DWA. S. 35 - 41.
- DWA (2004): Abkopplungsmaßnahmen in der Stadtentwässerung. Hennef: DWA.
- Ecoinvent Centre (2017): Ecoinvent database 3.4 (2017).
- Economist Intelligence Unit (2009): European Green City Index: Assessing the environmental impact of Europe's major cities. München: Siemens.
- Elvers, H. (2011): Umweltgerechtigkeit. In: Groß, M. (Hrsg.): Handbuch Umweltsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag. S. 464 - 484.
- Emerson Electric (2016): Evolution 100 Küchenabfallentsorger. URL: http://www.insinkerator.de/sites/insinkerator.de/files/downloads/products/Spec%20Sheet%20E100_German.pdf (zuletzt aufgerufen 3.2.2019)
- EnBW (2017): Gut zu wissen: Fakten zum Stromverbrauch. URL: <https://www.enbw.com/blog/energiewissen/gut-zu-wissen-fakten-zum-stromverbrauch/> (zuletzt aufgerufen 10.7.2019)
- Endo, A.; Burnett, K.; Orencio, P.; Kumazawa, T.; Wada, C.; Ishii, A.; Tsurita, I.; Taniguchi, M. (2015): Methods of the Water-Energy-Food Nexus. In: Hoekstra, A. (Hrsg.): Water (7). S. 806 - 5830.
- EU (2017): Liste kritischer Rohstoffe für die EU. Brüssel: Europäische Kommission.
- EU (2009): Verordnung 1069/200/EG des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte)

- EU (2006; 2008): Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG.
- Facey, S.; Nebel, B.; Kontny, L.; Allagier, M.; Hauer, B. (2018): Rapid and complete degradation of diclofenac by native soil microorganisms. In: Naidu, R.; Nghiem, L.; Rood, M.; Semple, K. (Hrsg.): *Environmental Technology & Innovation* (10). S. 55 - 61.
- FAO (2016): AQUASTAT Main Database. URL: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html> (zuletzt aufgerufen 4.9.2019)
- Fbr (2005): *Grauwasser-Recycling: Planungsgrundlagen und Betriebshinweise*. Darmstadt: Fbr.
- FCI (2013): *Informationsserie Pflanzenernährung: Ernährung – Wachstum – Ernte*. Frankfurt am Main: FCI.
- Felmeden, J.; Michel, B.; Zimmermann, M. (2017): Bewertungsrahmen und -kriterien für die integrierte Bewertung neuartiger Wasserinfrastrukturen. In: Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.): *Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung*. Berlin: Difu. S. 158 - 162.
- Felmeden, J.; Michel, B.; Zimmermann, M. (2016): *Integrierte Bewertung neuartiger Wasserinfrastruktursysteme: Vom städtischen Quartier über die Gesamtstadt bis zur regionalen Perspektive*. netWORKS-Paper Nr. 32.
- Ferrari, B.; Paxéus, N.; Lo Giudice, R.; Pollio, A.; Garric, J. (2003): Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: Study of carbamazepine, clofibrilic acid, and diclofenac. In: Handy, R. und Yan, B. (Hrsg.): *Ecotoxicology and Environmental Safety* (55). S. 359 - 370.
- Flammini, A.; Puri, M.; Pluschke, L.; Dubois, O. (2014): *Walking the nexus talk: Assessing the water-energy-food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative*. Rom: FAO.

- FNR (2018): Faustzahlen Biogas. URL: <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/> (zuletzt aufgerufen 2.9.2018)
- French Ministry of Housing and Sustainable Homes; CEMR; CEREMA; FNAU (2017): RFSC. URL: <http://rfsc.eu> (zuletzt aufgerufen 15.7.2019)
- Friedrich, J.; Poganietz, W.; Lehn, H. (2019): Life-cycle assessment of system alternatives for the Water-Energy Nexus in the urban building stock. Eingereicht bei Resources, Conservation and Recycling.
- FVEE (2015): Erneuerbare Energien im Wärmesektor – Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven. Berlin: FVEE.
- IAO; IBP; Difu (2015): Die Zukunftsstadt: CO₂-neutral, energie-/ressourceneffizient, klimaangepasst und sozial: Langfassung der Strategischen Forschungs- und Innovationsagenda (FINA). URL: https://www.energie.fraunhofer.de/content/dam/energie/de/documents/01_PDF_PI/150219_IBP_PDF_Zukunftsstadt_3.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- Galaiti, S.; Veysey, J.; Huber-Lee, A. (2018): Where is the added value? A review of the water-energy-food nexus literature. Somerville: SEI.
- Gantner, K. und Barjenbruch, M. (2012): Reduzierung des Frachteintrags aus Mischwasserentlastungen. URL: https://www.siwawi.tu-berlin.de/fileadmin/fg118/120326Abschlussbericht_Frachteintrag_downl.pdf (zuletzt aufgerufen 15.8.2019)
- Garcia, D. und You, F. (2016): The water-energy-food nexus and process systems engineering: a new focus. In: Pistikopoulos, E. (Hrsg.): Computers & Chemical Engineering (91). S. 49 - 67.
- Gawel, E. und Schindler, H. (2015): Mikroverunreinigungen, vierte Reinigungsstufe und das Verursacherprinzip. In: Köck, W. und Markus, T. (Hrsg.): Zeitschrift für Umweltrecht. Bremen: Nomos. S. 387 - 393.
- Gawel, E.; Köck, W.; Schindler, H.; Holländer, R.; Lautenschläger, S. (2015): Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe. UBA: Dessau-Roßlau.

- Gawel, E. (2012): Ist Wassersparen wirklich Unsinn? URL:
<https://www.zeit.de/wirtschaft/2012-04/wassersparen-verbrauch-replik> (zuletzt aufgerufen 6.8.2019)
- Geden, O. und Beck, S. (2015): Klimapolitik am Scheideweg. In: Bundeszentrale für politische Bildung (Hrsg.): Aus Politik und Zeitgeschichte. S. 12 - 18.
- Gellings, C. und Parmenter, K. (2004): Energy Efficiency in Fertilizer Production and Use. In: Gellings, C. (Hrsg.): Efficient Use and Conservation of Energy. Oxford: Encyclopedia of Life Support Systems.
- GEO-Net Umweltconsulting und ÖKOPLANA (2015): Stadtklimagutachten für die Stadt Heidelberg. URL:
https://www.heidelberg.de/site/Heidelberg_ROOT/get/documents_E-1056338902/heidelberg/Objektdatenbank/31/PDF/Luft%20und%20L%C3%A4rm/31_pdf_stadtklima-2015_klimaanalyse.pdf (zuletzt aufgerufen 24.7.2019)
- Giampietro, M.; Aspinalle, R.; Ramos-Martin, J.; Bukkens, S. (2014): Adressing the complexity of integrated resource assessment. In: Giampietro, M.; Aspinalle, R.; Ramos-Martin, J.; Bukkens, S. (Hrsg.): Resource Accounting for Sustainability Assessment: The nexus between energy, food, water and land use. New York: Routledge. S. 1 - 8.
- Giupponi, C. und Gain, A. (2016): Integrated spatial assessment of the water, energy and food dimensions of the sustainable development goals. In: Kramer, W.; Ford, J. (Hrsg.): Regional Environmental Change (17). S. 1881 - 1893.
- GIZ (2019): Nachhaltige Infrastruktur: Wasser, Energie, Verkehr. URL:
<https://www.giz.de/de/leistungen/255.html> (zuletzt aufgerufen 26.11.2019)
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J.; Van Zelm, R. (2013): ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. URL:
https://35f23ee4-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf (zuletzt aufgerufen 18.11.2019)

- Gottschlich, D. (2017): Kommende Nachhaltigkeit: nachhaltige Entwicklung aus kritisch-emanzipatorischer Perspektive. Baden-Baden: Nomos.
- Groß, M.; Hoffmann-Riem, H.; Krohn, W. (2005): Realexperimente: Ökologische Gestaltungsprozesse in der Wissenschaft. Bielefeld: Transkript.
- Grunwald, A. (2019): Technology assessment in theory and practice. London and New York: Routledge.
- Grunwald, A. (2016): Nachhaltigkeit verstehen: Arbeiten an der Bedeutung nachhaltiger Entwicklung. München: Oekom.
- Grunwald, A. (2013): Technikfolgenabschätzung als Schritt zu transformativer Wissenschaft. In: Garthe, C. (Hrsg.): Ökologisches Wirtschaften (2). S. 21 - 23.
- Grunwald, A. (2012): Sustainability Assessment of Technologies: An Integrative Approach. In: Ghenai, C. (Hrsg.): Sustainable Development: Energy, Engineering and Technologies: Manufacturing and Environment. Rijeka und Shanghai: InTech.
- Grunwald, A. (2010): Technikfolgenabschätzung: Eine Einführung. Berlin: edition sigma.
- Gujer, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. Berlin und Heidelberg: Springer.
- HABA (2019): Preisliste: URL: https://www.haba-beton.com/daten/Preisliste_DE_2019.pdf (zuletzt aufgerufen 25.9.2019)
- HABA (2018): Schachtteile. URL: https://www.haba-beton.com/daten/HABA_KATALOG_TIEFBAU_DE_AT.pdf (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- Haberkern, B.; Maier, W.; Schneider, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Dessau-Roßlau: UBA.
- Han, W.; Zhao, Y.; Chen, H. (2016): Study on Biogas Production of Joint Anaerobic Digestion with Excess Sludge and Kitchen Waste.
https://www.researchgate.net/publication/305893151_Study_on_Biogas_Production_of_Joint_Anaerobic_Digestion_with_Excess_Sludge_and_Kitchen_Waste (zuletzt aufgerufen 18.7.2019)

- Hartmuth, G.; Huber, K.; Rink, D. (2006): Downscaling von Nachhaltigkeit: Das integrative Nachhaltigkeitskonzept als Bauplan für kommunale Indiaktorensysteme. In: Kopfmüller, J. (Hrsg.): Ein Konzept auf dem Prüfstand: Das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschung. Berlin: edition sigma. S. 99 - 114.
- Hauff, V. (1987): Unsere gemeinsame Zukunft: Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven: Eggenkamp.
- Hauff, M. und Kleine, A. (2014): Nachhaltige Entwicklung. Grundlagen und Umsetzung. München: Oldenburg.
- Haumacher, R.; Schnauffer, S.; Philipp, W. (2012): Hygieneaspekte organischer Düngemittel und ihre Anwendung. Bonn: BLE.
- Heck, T. (2007): Wärmepumpen. In: Dones, R. et al. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final Report ecoinvent No. 6-X. Villingen und Dübendorf: Paul Scherrer Institut und Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Hefter, T.; Brizle-Harder, B.; Deffner, J. (2015): Akzeptanz von Grauwasserbehandlung und Wärmerückgewinnung im Wohnungsbau: Ergebnisse einer qualitativen Bewohnerbefragung. netWORKS-Papers Nr. 27.
- Hegger, D. und van Vliet, B. (2010): End User Perspectives on the Transformation of Sanitary Systems. In: Van Vliet, B.; Spaargaren, G.; Oosterveer, P. (Hrsg.): Social Perspectives on the Sanitation Challenge. Dordrecht: Springer. S. 203 - 216.
- Hegger, D.; van Vliet, B.; Spaargaren, G. (2008): Decentralized Sanitation and Reuse in Dutch Society: Social Opportunities and Risks. Wageningen: Wageningen University.
- Hegger, D. (2007): Greening Sanitary Systems: An End-user Perspectives. Wageningen: Wageningen University.
- Herbst, H. (2008): Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserinfrastruktursysteme. Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen.

- Hertel, S.; Navarro, P.; Deegener, S.; Körner, I. (2015): Biogas and nutrients from blackwater, lawn cuttings and grease trap residues: experiments for Hamburg's Jenfelder Au district. In: Thrän, D (Hrsg.): Energy, Sustainability and Society 5 (1). S. 5 - 29.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2017): Bodennahes Ozon und Sommersmog. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
- Hiessl, H.; Hillenbrand, T.; Gandenberger, C.; Klug, S.; Peter, A.; Tettenborn, F. (2010): Dezentrales Urbanes InfrastrukturSystem DEUS 21: Abschlussbericht. Karlsruhe: ISI.
- Hiessl, H.; Toussaint, D.; Becker, M.; Dyrbusch, A.; Geisler, S.; Herbst, H.; Prager, J. (2005): AKWA 2100: Alternativen der kommunalen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Karlsruhe: IRB.
- Hillenbrand, T.; Hiessl, H.; Menger-Krug, E.; Maier, K.; Niederste-Hollenberg, J.; Sorge, C.; Londong, J. (2017): Innovative Systemlösungen für unterschiedliche Randbedingungen im Bestand: Ergebnisse des Projekts TWIST++. In: Difu (Hrsg.): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin: Difu. S. 128 - 133.
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH). Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.
- Hoff, H. (2011): Understanding the nexus: Background paper for the Bonn 2011 Nexus Conference: The water, energy and food security nexus. Stockholm: SEI.
- Hoolohan, C.; Larkin, A.; McLachlan, C.; Falconer, R.; Soutar, I.; Suckling, J.; Varga, L.; Haltas, I.; Druckman, A.; Lumbroso, D.; Scott, M.; Gilmour, D.; Ledbetter, R.; McGrane, S.; Mitchell, C.; Yu, D. (2018): Engaging stakeholders in research to address water–energy–food (WEF) nexus challenges. In: Takeuchi, K. (Hrsg.): Sustainable Science (13). S. 1415 - 1426.

- Hummel, D.; Hertler, C.; Niemann, S.; Lux, A.; Janowicz, C. (2004): Versorgungssysteme als Gegenstand sozial-ökologischer Forschung: Ernährung und Wasser. Frankfurt am Main: ISOE.
- IBA (2019): IBA Magazin N°1: Lernräume. URL:
https://iba.heidelberg.de/media/iba_magazin_n_1.pdf (zuletzt aufgerufen 9.8.2019)
- IKT (2013): Qualitätseinflüsse Schlauchliner: Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen. URL: <https://www.ikt.de/website/down/f0104langbericht.pdf> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- InfraWatt (2018): Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauscher im Kanal (persönlicher Austausch 5.4.2018)
- INTEWA (2018a): AguaLoop System. URL:
<https://www.intewa.de/produkte/aqualoop/downloads> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- INTEWA (2018b): Aqualoop Konstruktionsmaterial (persönlicher Austausch 23.3.2018)
- IRENA (2015): Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus. URL:
https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_water_energy_food_nexus_2015.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- IRP (2018): The Weight of Cities: Resource Requirements of Future Urbanization. Nairobi und Kenia: UN Environment Programme.
- IST (2018): Easy LINER Kalibrierschläuche/Preliner.
<https://www.istweb.com/de/verbrauchsstoffe/kalibrierschlaeuche.html> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- Jörissen, J. (2005): Konzepte von Nachhaltigkeit im Vergleich: Grundlinien, Konfliktpunkte, Weichenstellungen. In: Hrsg. Rink, D; Hartmuth, G.; Huber, K.: Raum für Nachhaltigkeit: Zur Kontextualisierung des Leitbilds. Berlin: edition sigma. S. 11 - 35.

- Jörissen, J.; Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Paetau, M. (2000): Das integrative Konzept nachhaltiger Entwicklung. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.
- Jungbluth, N.; Chudacoff, M.; Dauriat, A.; Dinkel, F.; Doka, G.; Faist Emmenegger, M.; Gnansounou, E.; Kljun, N.; Schleiss, K.; Spielmann, M.; Stettler, C.; Sutter, J. (2007): Life Cycle Inventories of Bioenergy. Econinvent report No. 17. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Karow-Kluge, D. (2017): Experimentelles Handeln in hybriden Stadtlandschaften: Räumliches Planen zwischen Alltags- und Expertenwelten. In: Böschen, S.; Groß, M.; Krohn, W. (Hrsg.): Experimentelle Gesellschaft: Das Experiment als wissenschaftsgesellschaftliches Dispositiv. Baden-Baden: Nomos. S. 291 - 310.
- Karthe, D.; Rehkopp, N.; Reeh, T.; Faust, H. (2017): Klimawandel und demografischer Wandel: Potenzielle Gefährdungen für die Trinkwasserhygiene von morgen. In: Difu (Hrsg.): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin: Difu. S. 30 - 33.
- Kemmler (2016): Preisliste Steinzeug 2016. URL: https://www.kemmler.de/content/documents/10/Kemmler_Preisliste_Steinzeug_1.2016_gu%CC%88ltig_ab_Juli2016.PDF?1494497234 (zuletzt aufgerufen 1.11.2019)
- Kemp, R. und van Lente, H. (2011): The dual change of sustainability transitions. In: Van de Bergh, J. (Hrsg.): Environmental Innovation and Societal Transitions 1 (1). S. 121 -124.
- Kenway, S.; Lam, K.; Stokes-Draut, J.; Twomey Sanders, K. (2019): Defining water-related energy for global comparison, clearer communication, and sharper policy. In: Klemeš, J.; Villas Bôas de Almeida, C.; Wang, Y. (Hrsg.): Journal of Cleaner Production (236).
- Kenway, S. (2013): The Water-Energy Nexus and Urban Metabolism: Connections in Cities. Urban Water Security Research Alliance, Technical Report No. 100. URL: <http://www.urbanwateralliance.org.au/publications/UWSRA-tr100.pdf> (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)

KISS (2013): Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung, Methoden und Konzepte. URL:
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/KISS_Bericht.pdf
(zuletzt aufgerufen 23.11.2019)

KLIWA (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern: KLIWA-Projekt A 1.1.3: Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern. Frankfurt: Friedrich Bischoff Druckerei.

Kluge, T. und Libbe, J. (2010): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft: Handreichungen zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Berlin: Difu.

Kluge, T.; Koziol, M.; Lux, A.; Schramm, E. (2003): Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck: Sektoranalyse Wasser. Berlin: Difu. netWORKS-Papers, Nr. 2.

Konrad, W. und Nill, J. (2001): Innovationen für Nachhaltigkeit: Ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.

Kopfmüller, J. (2007): Auf dem Weg zu einem integrativen Nachhaltigkeitskonzept: Die Verbindung von Umwelt und Entwicklung im Nachhaltigkeitsdiskurs. In: Garthe, C. (Hrsg.): Ökologisches Wirtschaften 22 (1). S. 16 - 18.

Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Jörissen, J.; Paetau, M.; Banse, G.; Coenen, R.; Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet: Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Berlin: Edition Sigma.

Koziol, M.; Veit, A.; Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasserver- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess: Gesamtbericht des Analysemoduls "Stadttechnik" im Forschungsverbund netWORKS. Berlin: Difu. netWORKS-Paper, Nr. 22.

- Krohn, W.; Grunwald, A.; Ukowitz, M. (2017): Transdisziplinäre Forschung revisited: Erkenntnisinteresse, Forschungsgegenstände, Wissensform und Methodologie. In: Soentgen, J. (Hrsg.): GAIA 26 (4). S. 341- 347.
- Krohn, W. (2008a): Learning from Case Studies. In: Hirsch Hadorn, G.; Hoffmann-Riem, H.; Biber-Klemm, S.; Grossenbacher-Mansuy, W.; Joye, D.; Pohl, C; Wiesmann, U.; Zemp, E. (Hrsg.): Hanbook of Transadisciplinary Research. Dodrecht und London: Springer. S. 369 - 383.
- Krohn, W. (2008b): Epistemische Qualitäten transdisziplinärer Forschung. In: Bergmann, M.; Schramm, E. (Hrsg.): Transdisziplinäre Forschung: Integrative Forschungsprozesse verstehen und bewerten. Frankfurt am Main: Campus. S. 39 - 67.
- Kuckartz, U. (2008): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. URL: <https://www.bpb.de/izpb/8971/umweltbewusstsein-und-umweltverhalten?p=all> (zuletzt aufgerufen 9.8.2019)
- Kuhn, J. (2007): Markteinführung neuer Produkte. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Kurtinez, P. (2002): Akuter P- Mangel an Mais in Livada, Rumänien. In: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) (2003): Landbauforschung Völkenrode 53 (1). S. 8.
- Kurz A.; Stockhammer C.; Fuchs S.; Meinhard D. (2007): Das problemzentrierte Interview. In: Buber R. und Holzmüller H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung. Gabler: Wiesbaden. S. 463 - 474.
- Launay, M.; Droste, F.; Dittmer, U.; Steinmetz, H. (2015): Emittierte Spurenstoffströme von Kläranlage und Mischwasserentlastungen im Vergleich. In: FEI und ISWA (Hrsg.): Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 225. Essen: Vulkan-Verlag.
- LAWA (2016): Mikroschadstoffe in Gewässern. Stuttgart: LAWa.
- LAWA (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen. Berlin: Kulturbuchverlag.

- Leck, H.; Conway, D.; Bradshaw, M.; Rees, J. (2015): Tracing the water–energy–food nexus: Description, theory and practice. In: Bradshaw, M. (Hrsg.): *Geography Compass* (9). S. 445 - 460.
- LfL (2010): Hygienisierungspotenzial des Biogasprozesses: Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt. Freising-Tüntenhausen: ES-Druck.
- Li, Y.; Luo, X.; Huang, X.; Wang, D.; Zhang, W. (2013): Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. In: Klemeš, J.; Villas Bôas de Almeida, C.; Wang, Y. (Hrsg.): *Journal of Cleaner Production*, 57. S. 221 - 227.
- Libbe, J., Nickel, D.; Bock, S.; Langer, M., Wilhelm, C. (2017): Einleitung: Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt. In: Difu (Hrsg.): *Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung*. Berlin: Difu. S. 23 - 25.
- lineTEC (2015): Handbuch für den Einbau eines lineTEC ProFlex, ProFlex S, Flexliner Schlauches. URL: http://www.linetec.info/fileadmin/linetec/pdf/Handbuch_lineTEC_ProFlex_ProFlex_S_und_Flexliner_11.2015.pdf (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- LUBW (2019): Zustandsbericht über die Grundwasservorräte. URL: <https://guq.lubw.baden-wuerttemberg.de/GuQWeb.dll/p79197.html> (zuletzt aufgerufen 5.8.2019)
- LUBW (2017): Planungsempfehlungen für die (stadt-)klimawandelgerechte Entwicklung von Konversionsflächen. Reihe KLIMOPASS-Berichte: Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg. Stuttgart: LUBW.
- LUBW (2015): Bioabfall: Ein Wertstoff voller Energie. Stuttgart: LUBW.
- Maier, K. (2016): Abschlussbericht TWIST++: Transitionswege WasserInfraSTruktursysteme: Anpassung an neue Herausforderungen im städtischen und ländlichen Raum. Weimar: AVZ Nordkreis Weimar.

- Martin, B.; Curddas, P.; Hutchings, P. (2015): Imagining a Sewerless Society. Nexus Network Think Piece Series (5). URL: http://www.thenexusnetwork.org/wp-content/uploads/2014/08/MartinCruddasandHutchings_SewerlessSocietyNexusThinkpiece2015.pdf (zuletzt aufgerufen 23.7.2019)
- Matzinger, A.; Riechel, M.; Remy, C.; Schwarzmüller, H.; Rouault, P.; Schmidt, M.; Offermann, M.; Strehl, C.; Nickel, D.; Sieker, H.; Pallasch, M.; Köhler, M.; Kaiser, D.; Möller, C.; Büter, B.; Leßmann, D.; von Tils, R.; Säumel, I.; Pille, L.; Winkler, A.; Bartel, H.; Heise, S.; Heinzmann, B.; Joswig, K.; Rehfeld-Klein, M.; Reichmann, B. (2017): Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung: Ergebnisse des Projektes KURAS. URL: http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/pdf/20170428_Leitfaden_Regenwasser_full_final_med_res.pdf (zuletzt aufgerufen 22.7.2019)
- Maurer, M. (2011): Die Zukunft der Wasserinfrastrukturen in der Schweiz? URL: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Lehre/Weiterbildung/Infotag/2011/maurer_nachhaltige_sww.pdf (zuletzt aufgerufen 24.7.2019)
- Mayer-Grenu, A. und Otterleben, I. (2018): Diclofenac-Abbau nachgewiesen: Weniger Schmerzmittel in Umwelt und Nahrungskette? URL: <https://www.laborpraxis.vogel.de/diclofenac-abbau-nachgewiesen-weniger-schmerzmittel-in-umwelt-und-nahrungskette-a-717397/> (zuletzt aufgerufen 24.8.2019)
- Mayring, P. (2015): Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. Weinheim und Basel: Beltz.
- McGrane, S.; Acuto, M.; Artioli, F.; Chen, P-Y.; Comber, R.; Cottee, J.; Farr-Wharton, G.; green, N.; Helfgott, A.; Larcom, S.; McCann, J; O'Reilly, P.; Salmoral, G.; Scott, M.; Todman, L.; van Gevelt, T.; Yan, X. (2018): Scaling the nexus: Towards integrated frameworks for analyzing water, energy and food. In: Richards, K. (Hrsg.): Geographical Journal. S. 1 - 13.

- McCarl, B.; Yang, Y.; Srinivasan, R.; Pistikopolous, E.; Mohtar, R. (2017): Data for WEF nexus analysis: A review of issues. In: Webber, M. (Hrsg.): Current Sustainable/Renewable Energy Reports (4). S. 137 - 143.
- Meinzinger, F.; Ziedorn, V.; Peters, I. (2010): Interactions Between Urban Forms and Source-Separating Sanitation Technologies. In: Van Vliet, B.; Spaargaren, G.; Oosterveer, P. (Hrsg.): Social Perspectives on the Sanitation Challenge. Dordrecht: Springer. S. 125 - 143.
- Menger-Krug, E.; Hillenbrand, T.; Trettenborn, F.; Hiessl, H. (2010): Entwicklung und Erprobung eines Anlagenkonzeptes zur Wärmerückgewinnung und Wasserrecycling aus Grauwasser: Ökonomische und ökologische Analyse der Pilotanlage OIKOS III. URL: https://www.researchgate.net/publication/263057362_Entwicklung_und_Erprobung_eines_Anlagenkonzeptes_zur_Warmeruckgewinnung_und_Wasserrecycling_aus_Grau_wasser_Okonomische_und_ökologische_Analyse_der_Pilotanlage_OIKOS_III (zuletzt aufgerufen 18.7.2019)
- Merz, B.; Kaiser, K.; Bens, O.; Emmermann, R.; Flühler, H., Grünewald, U.; Negendank, J. (2012): Klimawandel und Wasserhaushalt. In: Acatech (Hrsg.): Georessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel: Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Michalek, G.; Meran, G.; Schwarze, R.; Yildiz, Ö. (2016): Nudging as a new 'soft' tool in environmental policy. An analysis based on insights from cognitive and social psychology. In: Schwarze, R. (Hrsg.): Zeitschrift für Umweltrecht & Umweltpolitik. (39). S. 169 - 207.
- Michel, B.; Felmeden, J.; Kluge, T (2010): Bilanzierung und Bewertung bestehender und neuartiger Wasserinfrastrukturen. In: Kluge, T.; Libbe, J. (Hrsg.): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft: Eine Handreichung zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik (Difu). S. 39 - 78.

- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (n.dat):
Energie aus Abwasser. URL: <https://energiewende.baden-wuerttemberg.de/projekte/kommunen/energie-aus-abwasser> (zuletzt aufgerufen 6.8.2019)
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018):
Unser kostbares Wasser. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017):
Kommunales Abwasser: Lagebericht 2017. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015):
Leitfaden Energieeffizienz Kläranlagen. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015b):
Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg:
Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern.
Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2014):
Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK).
Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Minx, J.; Creutzig, F.; Medinger, V.; Ziegler, T., Owen, A.; Baiocchi, G. (2011): Developing a pragmatic approach to assess urban metabolism in Europe: A report to the European Environment Agency. Berlin: Technische Universität Berlin.
- MOCO (2019): Preisauskunft Zerkleinerungsanlage (E-Mail 6.5.2019)
- MOCO (2018): Datenblatt AZ 5F (Bioabfallzerkleinerung). URL:
<http://datenblaetter.moco-shredder.de/de/az5f.pdf> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)

- Morandi, C. und Steinmetz, H., (2017): Ressourceneffizienz in der Abwasserwirtschaft. In: Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur (Hrsg.): Ingenieurspiegel, 4. S. 69 - 72.
- Morandi, C.; Wasielewski, S.; Mouarkech, K.; Minke, R.; Steinmetz, H. (2017): Impact of new sanitation technologies upon conventional wastewater infrastructures. In: Cedo Maksimovic, C.; Butler, D.; Makropoulos, C. (Hrsg.): Urban Water Journal 15 (6). S. 526 - 533.
- Muñoz, I.; Milà-i-Canals, L.; Fernández-Alba, A. (2010): Life Cycle Assessment of Water Supply Plans in Mediterranean Spain. In: Lifset, R. (Hrsg.): Journal of Industrial Ecology, 14 (6). S. 902 - 918.
- Müller, L.; Lossau, J.; Flitner, M. (2016): Infrastruktur, Stadt und Gesellschaft. In: Müller, L.; Lossau, J.; Flitner, M. (Hrsg.): Infrastrukturen der Stadt. Wiesbaden: Springer. S. 1 - 19.
- Nemecek, T. und Kägi, T. (2007): Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production System. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Nolde, E. (2013a): Hohe Energie- und Wassereffizienz durch Grauwasserrecycling mit vorgeschalteter Wärmerückgewinnung. URL: https://www.fbr.de/fileadmin/Daten/Artikel_aus_wsp/Artikel-Arnimplatz_GW_fbr_1_13.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- Nolde, E. (2013b): Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung in Kombination mit einer Grauwasserrecyclinganlage. URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-28201.pdf> (zuletzt aufgerufen 3.6.2018)
- Nölting, B.; Schäfer, M.; Mann, C.; Koch, E. (2012): Positionsbestimmungen zur Nachhaltigkeitsforschung am Zentrum Technik und Gesellschaft: Einladung zur Diskussion. Berlin: Zentrum Technik und Gesellschaft.
- Northcott (2018): Neoliberal (Mis)Management of Earth-Time and the Ethics of Climate Justice. In: Murphy, C.; Gardoni, P.; McKim (Hrsg.): Climate Change and Its Impacts: Risks and Inequalities. Cham: Springer. S. 233 - 250.

- ODI; ECDPM; DIE (2012): European Report on Development, Confronting Scarcity: Managing Water, Energy and Land for Inclusive and Sustainable Growth. EU: Brüssel.
- Oldenburg, M.; Meinzinger, F.; Nisipeanu, P.; Schneider, C. (2008): Begrifflichkeiten und Kennzahlen zur Zusammensetzung von Teilströmen neuartiger Sanitärsystem. In: DWA (Hrsg.): Korrespondenz Abwasser, Abfall, 55. S. 1113 - 1119.
- Ott, R.; Wallbrecht, A.; Bieschke, N. (2016): Institutionenökonomische Analyse der Umsetzung neuartiger Wasserinfrastrukturen. Berlin: Difu. netWORKS-Paper, Nr. 33.
- Otterpohl, R. (2011): Neue Abwassertechnologie für Städte. In: Lozán, J.; Graßl, H.; Hupfer, P.; Karbe, L.; Schönwiese, C. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Hamburg: Universität Hamburg, Institut für Hydrobiologie. S. 489 - 495.
- Otterpohl, R. und Oldenburg, M. (2002). Innovative Technologien zur Abwasserbehandlung in urbanen Gebieten. In: DWA (Hrsg.): Korrespondenz Abwasser, Abfall, 49. S. 1364 - 1371.
- Peter-Fröhlich, A.; Pawlowski, L.; Bonhomme, A.; Oldenburg, M. (2006): Separate Ableitung und Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser – Übersicht zum EU-Demonstrationsvorhaben SCST und Ergebnisse. Berlin: Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Philipp, W.; Ade-Kappelmann, K.; Drca, M.; Lorenz, H.; Böhm, R. (2005): New hygiene rules für biogas plants - revising german biowaste ordinance. In: Hartung, J.; Aland, A.; Opaliński, S. (Hrsg.): International Congress in Animal Hygiene, Volume 2. Breslau: Professor Tielen Foundation.
- Posner, E. und Weisbach, D. (2015): Climate Change Justice. Princeton: Princeton University Press;
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2017): Phosphor aus Abwasser gewinnen. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/phosphor-aus-abwasser-gewinnen-459418> (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)

- Ramboll (2018): Blau-grüne Infrastruktur. URL:
<https://de.ramboll.com/services/stadtplanung-und-gestaltung/blau-gruene-infrastruktur> (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)
- Rechenberg, J. (2019) in Tagesschau Inforadio 5.7.2019: Deutschland droht Kampf ums Wasser. URL: <https://www.tagesschau.de/inland/wasser-131.html> (zuletzt aufgerufen 5.8.2019)
- Reichel, L. (2018): Verstopfte Rohre: Die Toilette ist kein Mülleimer. In Schrotthofer, K. (Hrsg.): Neue Westfälische Online. URL:
https://www.nw.de/lokal/kreis_paderborn/paderborn/22304468_Verstopfte-Rohre-Die-Toilette-ist-kein-Muelleimer.html (zuletzt aufgerufen 8.8.2019)
- Reinhard, S.; Verhagen, J.; Wolters, W.; Ruben, R. (2017): Water-food-energy nexus: A quick scan. Wageningen: Wageningen Economic Research. Report 2017-096.
- Remy, C. (2010): Life Cycle Assessment of conventional and source-separation systems for urban wastewater management. Berlin: Technische Universität Berlin, Dissertation an der Fakultät Prozesswissenschaften.
- Remy, C. und Ruhland, A. (2006): Ecological assessment of alternative sanitation concepts with Life Cycle Assessment. Final report for task 5 of the demonstration project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST). Berlin: Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Reusswig, F. und Lass, W. (2017): Urbs laborans: Klimapolitische Realexperimente am Beispiel Berlins. In: Bösch, S.; Groß, M.; Krohn, W. (Hrsg.): Experimentelle Gesellschaft: Das Experiment als wissenschaftliches Dispositiv. Baden-Baden: Nomos. S. 311 - 340.
- Reusswig, F. (2011): Klimawandel und globale Umweltveränderungen. In: Groß, M. (Hrsg.): Handbuch Umweltsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag. S. 464 - 484.
- Rinninger Betonwaren (2018): Betonrohre. URL:
<https://www.rinninger.de/index.php/rohre-titel/betonrohre-kreisrund> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)

- Roediger (2018a): Allgemeine Informationen zum Roediger Vakuum Entwässerungs-System (Info-Mappe). Hanau: Aqseptence Group.
- Roediger (2018b): Auslegung Vakuum Entwässerungssystem (persönlicher Austausch 7.5.2018).
- Röhrkasten, S.; Schäuble, D.; Helgenberger, S. (2016): Sichere Energie in einer Welt knapper Wasserressourcen. In: IASS (Hrsg.): IASS Policy Brief 1/2016.
- Rommel, K. (2016): Wasserwirtschaft in Baden-Württemberg – unentbehrlich für Bevölkerung und Industrie. In: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.): Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 2016 (4). S. 34 - 39.
- Rösch, C.; Bräutigam, K.; Kopfmüller, J.; Lichtner, P.; Stelzer, V. (2016): Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung des deutschen Energiesystems. In: Soentgen, J. (Hrsg.): GAIA 25 (1). S. 69 - 70.
- Rothe, P. (2018): Stand-Up Paddling Heidelberg. URL: https://www.rnz.de/nachrichten/heidelberg_artikel,-heidelberg-was-jeder-auf-dem-neckar-darf-und-was-nicht-_arid,369341.html (zuletzt aufgerufen 5.8.2019)
- Rothe, P. (2013): Heidelberg Triathlon. URL: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.neckarschwimmen-in-heidelberg-der-neckar-wird-zum-swimming-pool.c812bf64-33df-470a-ba51-fce6f9fed31e.html> (zuletzt aufgerufen 5.8.2019)
- Sala, S.; Farioli, F.; Zamagni, A. (2013): Progress in sustainability science: lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment. In: Curran, M. (Hrsg.): The International Journal of Life Cycle Assessment 18(9). S. 1 - 21.
- Sartorius, C.; Nyga, I.; Levai, P.; Hillenbrand, T. (2016): Entwicklung und Anwendung einer multikriteriellen Methode zur Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserinfrastruktursystemen. In: Difu (Hrsg.): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin: Difu. S. 148 - 154.
- Scanlon, B.; Ruddell, B.; Reed, P.; Hook, R.; Zheng, C.; Tidwell, V.; Siebert, S. (2017): The food-energy-water nexus: Transforming science for society. In: Clark, M. (Hrsg.): Water Resources Research (53). S. 3550 - 3556.

- Schaub, S. und Tosun, J. (2019): Spurenstoffeinträge in Gewässer: Der Einfluss von Vertrauen in Akteure auf die Problemwahrnehmung. In: Schwarze, R. (Hrsg.): Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht (2). S. 185 - 213.
- Schaum, C. (2018): Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt. Verein zur Förderung des Instituts des IWAR (Hrsg.). Habilitationsschrift im Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften.
- Schiller, G. (2010): Kostenbewertung der Anpassung zentraler Abwasserentsorgungssysteme bei Bevölkerungsrückgang. In: IÖR (Hrsg.): IÖR Schriften, 51. Berlin: Rhombos. S. 127 - 149.
- Schmidt, M. (2017): Sektorübergreifende Infrastrukturentwicklung und städtische Ressourceneffizienz. In: Engels, I.; Janich, N.; Monstadt, J.; Schott, D. (Hrsg.): Nachhaltige Stadtentwicklung: Infrastrukturen, Akteure, Diskurse. Frankfurt und New York: Campus.
- Schmitz, E. (2009): Perspektiven der Mitverbrennung von Klärschlämmen. Vortrag auf den 6. Klärschlammtagen der DWA.
- Schramm, E.; Kluge, T.; Beck, B.; Hansjürgens, H.; Hiessl, H.; Sartorius, C. (2013): Integrierte Systemlösungen als Strategie für eine nachhaltige und exportstarke Wasserwirtschaft. In: BWK (Hrsg.): Wasser und Abfall 1 (2). S. 39 - 44.
- Schurr, J. und Bohne, D. (2008): Leitfaden nachhaltige Gebäudesysteme. Hannover: Universität Hannover.
- Schwaiger, J.; Ferling, H.; Mallow, U.; Wintermayr, H.; Negele, R. (2004): Toxic effects of the non-steroidal antiinflammatory drug diclofenac. In: Nikinmaa, M. und Tjeerdema, R. (Hrsg.): Aquatic Toxicology 68 (2). S. 141 - 150.
- Schwartz, T. und Alexander, J. (2014): Antibiotikaresistenzen in Abwasser: Nachweis und Vermeidung der Verbreitung. In: DWA (Hrsg.): Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 3. S. 183 - 185.
- Sen, A. (1998): Ausgrenzung und Politische Ökonomie. In: Hinrichs, K. (Hrsg.): Zeitschrift für Sozialreform, 44 (4 - 6). S. 234 - 247.

- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2012): Handbuch zur Partizipation. URL: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/soziale_stadt/partizipation/download/Handbuch_Partizipation.pdf (zuletzt aufgerufen 13.8.2019)
- Sieker, H. (2019): Probleme der Regenentwässerung: Mischwasserüberläufe. URL: <https://www.sieker.de/de/fachinformationen/umgang-mitregenwasser/probleme-der-regenentwaesserung/article/mischwasserueberlaeufe-80.html> (zuletzt aufgerufen 15.8.2019)
- Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Leßmann, D.; von Tils, R.; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten: Abschlussbericht. Dessau-Roßlau: UBA.
- Sieker, F.; Sieker, H.; Zweynert, U.; Hin, Z. (2008): Paradigmenwechsel in der Siedlungswasserwirtschaft beim Umgang mit Regenwasser. In Runge, H. (Hrsg.): GWF Wasser Abwasser, 7 - 8. S. 558 - 570.
- SIMONA (2019): Bruttopreisliste Rohre, Formteile - SIMONA® PE 100, PE-EL. URL: <https://www.simona.de/de/produkte/produktprogramm/> (zuletzt aufgerufen 13.6.2019)
- SIMONA (2017): Druckrohre. URL: <http://www.simona.de/?id=206&L=0&productType=Druckrohr> (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- Smajgl, A.; Ward, J.; Pluschke, L. (2016): The water-food-energy nexus: Realising a new paradigm. In: Anagnostou, E.; Bárdossy, A.; Borga, M.; Corradini, C.; Guo, H., Kitanidis, P.; Syme, G. (Hrsg.): Journal of Hydrology (33). S. 533 - 540.
- SRU (2018): Wohnungsneubau langfristig denken: Für mehr Umweltschutz und Lebensqualität in den Städten. Berlin: Geschäftsstelle des SRU.
- Staben, N. (2008): Technische Möglichkeiten der alternativen Gestaltung städtischer Wasser-und Abwasserinfrastruktur: Eine Technikrecherche im Rahmen des Projekts Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. netWORKS-Paper, Nr. 24.

Stadt Hamburg (2017): Jenfelder Au: Zuhause am Wasser. URL:

<http://www.jenfelderau-info.de/index.php/Broschueren-Plaene.html> (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)

Stadt Hamburg (2013): Das Herz von Mitte Altona wird grün. URL:

<https://www.hamburg.de/contentblob/4130714/1fc9c8a69619c3537cd0451bd79c6496/data/wettbewerbsdokumentation-park-mitte-altona.pdf> (zuletzt aufgerufen 11.8.2019)

Stadt Heidelberg (2019): IBA „Wissen | schafft | Stadt“ Wissen als Motor für die Stadtentwicklung. URL:

https://www.heidelberg.de/hd/HD/entwickeln/IBA+Wissen_schafft_Stadt.html (zuletzt aufgerufen 9.8.2019)

Stadt Heidelberg (2018a): Energieverbrauch Kompostwerk (persönlicher Austausch 9.2.2018).

Stadt Heidelberg (2018): Heidelbergman. URL: [https://www.heidelberg-](https://www.heidelberg-marketing.de/en/events/sportveranstaltungen/heidelbergman.htm)

[marketing.de/en/events/sportveranstaltungen/heidelbergman.htm](https://www.heidelberg-marketing.de/en/events/sportveranstaltungen/heidelbergman.htm) (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)

Stadt Heidelberg (2017a): Integriertes Handlungskonzept Rohrbach-Hasenleiser, Teil 1: Bestandsaufnahme, Analyse und Bewertung. Heidelberg: Stadt Heidelberg, Amt für Stadtentwicklung und Statistik.

Stadt Heidelberg (2017b). Der Bioabfall: Aus Abfall wird neue Erde. URL:

<http://www.heidelberg.de/hd,Lde/HD/Rathaus/Bioabfall+und+Kompost.html> (zuletzt aufgerufen 17.7.2019)

Stadt Heidelberg (2017c): Liegenschaftskataster Kanalbestand Rohrbach-Hasenleiser (angefordert über das Vermessungsamt).

Stadt Heidelberg (2017d): Stadt an den Fluss: Arbeitsprogramm. Heidelberg: Stadt Heidelberg, Stabsstelle Stadt an den Fluss, Stadtplanungsamt.

Stadt Heidelberg (2014): Gutachten zur Einrichtung eines Quartiersmanagements im Stadtviertel Rohrbach-Hasenleiser. Heidelberg: Stadt Heidelberg, Amt für Stadtentwicklung und Statistik.

Stadt Karlsruhe (2013): Regen bringt Segen: Versickern statt Ableiten. Karlsruhe: Stadt Karlsruhe, Umwelt und Arbeitsschutz.

Stadtwerke Heidelberg (2019a): Trinkwasser-Umstellung am Hang in Handschuhsheim und Neuenheim. URL: <https://www.swhd.de/de/SWH/Presse/Meldungslisten-SWH/Meldungsliste-SWH-2/Trinkwasser-Umstellung-am-Hang-in-Handschuhsheim-und-Neuenheim.html> (zuletzt aufgerufen 5.8.2019)

Stadtwerke Heidelberg (2019b): heidelberg STROM basis (Grundversorgung). URL: <https://www.swhd.de/de/Energie-und-Wasser/Strom/heidelberg-STROM-basis-/Preise/> (zuletzt aufgerufen 7.6.2019)

Stadtwerke Heidelberg (2017): Warmwasserbereitung mittels Fernwärme (persönlicher Austausch 15.3.2018).

Stadtwerke Heidelberg (2014a): Trinkwasser in Heidelberg. URL: <https://www.swhd.de/wasser> (zuletzt aufgerufen 17.7.2019)

Stadtwerke Heidelberg (2014b): Fernwärme - komfortabel, effizient und gut fürs Klima. URL: <https://www.swhd.de/fernwaerme> (zuletzt aufgerufen 17.7.2019)

Stadtwerke München (2016): M/ Wasserweg: Rad- und Wanderweg zwischen München und Gmund. München: Eberl Print.

Stange, C. und Tiehm, A. (2018): Antibiotikaresistente Bakterien und Antibiotikaresistenzgene in Oberflächengewässern. In: AWBR (Hrsg.): 50. Jahresbericht. Eggenstein: Stober. S. 143 - 151.

Steinzeug-Keramo (2017): Steinzeugrohre. URL: https://www.skdata.com/files/bro_gb_d_fin_2017_08_02_fin.pdf (zuletzt aufgerufen 3.5.2017)

Stengel, O. (2013): Ökologisches Bewusstsein und Handeln. URL: <http://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38593/oekologisches-bewusstsein> (zuletzt aufgerufen 8.8.2019)

- Steglich, A., Bürgow, G., Million, A. (2016a): Aufbereitung Grauwasser: Konzepte und Module. URL: <http://www.roofwaterfarm.com/kompakt/technologie/153-2/aufbereitung-grauwasser/> (zuletzt aufgerufen 30.9.2018)
- Steglich, A., Bürgow, G., Million, A. (2016b): Aufbereitung Grauwasser: Schlüsselparmeter, Referenzwerte. URL: <http://www.roofwaterfarm.com/kompakt/technologie/1531-2/hygienequalitaetgrauwasser/> (zuletzt aufgerufen 15.8.2018)
- Steinmetz, H. (2012): Abwasser - Rohstoff statt Reststoff. In: Engler, U. (Hrsg.): Themenheft Forschung: Wasser und Umwelt (6). Stuttgart: Universität Stuttgart. S. 34 - 43.
- Steusloff, H. (2009): Wasser und Energie: Eine Partnerschaft. URL: https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/16084/visIT_1_9.pdf (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- Stokes, J. und Horvath, A. (2011): Life Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems. Berkley: University of California.
- Studer, U. (2005): Wärmenutzung aus Abwasser: Abwasser, die ungenutzte Energiequelle: Eine ökologisch sinnvolle Alternative zur Wärmeenergieversorgung in Städten und Agglomerationen. URL: <https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/get/wrmepumpen/5.pdf> (zuletzt aufgerufen 30.5.2018)
- Talke, K. (2005): Einführung von Innovationen: Marktorientierte strategische und operative Aktivitäten als kritische Erfolgsfaktoren. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Tauchmann, H.; Hafkesbrink, J.; Nisipeanu, P.; Thomzik, M.; Bäumer, A.; Brauer, A.; Clausen, H.; Drouet, D.; Engel, D.; Körkemeyer, K.; Rothgang, M.; Schroll, M. (2006): Innovationen für eine nachhaltige Wasserwirtschaft: Einflussfaktoren und Handlungsbedarf. Heidelberg: Physika-Verlag.
- Tiefbauamt Heidelberg (2018): Auskunft zu Entwässerungsbauwerken und Kanalzustand (persönlicher Austausch 30.4.2018).

- Trapp, J.; Mottschall, M.; Arndt, W.; Bauknecht, D.; Bergmann, T.; Gröger, J.; Libbe, J.; Schneider, S.; Verbücheln, M.; Winkelhaus, J. (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. Berlin: Difu.
- Trapp, J. und Libbe, J. (2016): Neuartige Wasserinfrastrukturen: Optionen für Unternehmensstrategien und Innovation. Berlin: Difu. netWORKS-Paper, Nr. 28.
- Triebskorn, R. (2004): Qualitative und semiquantitative Bewertung ultrastruktureller Effekte von Arzneimitteln (Diclofenac) in Niere, Leber, Kieme und Darm der Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*). URL: http://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/humanarzneimittel_fische/doc/bericht_arzneimittel_juli_2004.pdf (zuletzt aufgerufen 17.7.2017)
- UBA (2019): Indikator: Nutzung der Wasserressourcen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-nutzung-der-wasserressourcen#textpart-1> (zuletzt aufgerufen 6.8.2019)
- UBA (2018a): Klimaschutz und Abwasserbehandlung: Sinnvolle Beiträge zur Energiewende. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2018b): Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2018c): Abfall, Arzneien, alte Farben – was darf nicht in die Toilette? URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-arzneien-alte-farben-was-darf-nicht-in-die> (zuletzt aufgerufen 7.8.2019)
- UBA (2018d): Antibiotika und Antibiotikaresistenzen in der Umwelt: Hintergrund, Herausforderungen und Handlungsoptionen. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2018e): Arzneimittelwirkstoffe. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/zustand/arzneimittelwirkstoffe#textpart-1> (zuletzt aufgerufen 28.8.2019)

- UBA (2018f): Best Practice Municipal Waste Management: Information pool on approaches towards a sustainable design of municipal waste management and supporting technologies and equipment. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-30_texte_40-2018-municipal-waste-management_en.pdf (zuletzt aufgerufen 25.9.2019)
- UBA (2017a): Bericht des Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch* (Trinkwasser) in Deutschland 2014 – 2016. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2017b): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/umweltbewusstsein-umweltverhalten#textpart-1> (zuletzt aufgerufen 9.8.2019)
- UBA (2016a): Die Nutzung natürlicher Ressourcen Bericht für Deutschland 2016. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2016b): Konzepte zur Minderung von Arzneimittleinträgen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in die Umwelt. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2016c): Umweltbewusstsein in Deutschland 2016: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Dessau-Roßlau und Berlin: UBA und BMUB.
- UBA (2015a): Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2015b): Schonung von Phosphor-Ressourcen aus Sicht einer nachhaltigen Bodennutzung und des Bodenschutzes. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2015c): Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern: Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2014): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer. Dessau-Roßlau: UBA.

- UBA (2012): Energieeffizienzdaten für den Klimaschutz. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2011): Häufig gestellte Fragen zu EHEC im Trink- und Badebeckenwasser. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/faq_ehec.pdf (zuletzt aufgerufen 27.8.2019)
- UHRIG (2019): Preisauskunft Wärmetauscher (E-Mail 21.5.2019).
- UHRIG (2018): Auslegung des Wärmtauschers (persönlicher Austausch 4.5.2018)
- Umweltbundesamt Österreich (2018): Emissionsfaktoren für Verkehrsmittel. URL: https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/verkehr/1_verkehrsmittel/EKZ_Doku_Verkehrsmittel.pdf (zuletzt aufgerufen 27.7.2019)
- UN (2016): Sustainable Development Goals. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (zuletzt aufgerufen 15.7.2019)
- UN (2015): Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. URL: <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf> (zuletzt aufgerufen 22.11.2019)
- UN DESA (2017): Climate Change and Social Inequality. DESA Working Paper No. 152. New York: UN DESA.
- UN DESA (2016): Climate Change Resilience: An Opportunity for Reducing Inequalities. New York: UN DESA.
- UNECE (2018): Methodology for assessing the water-food-energy-ecosystems nexus in transboundary basins and experiences from its application: synthesis. Genf: UNECE.
- UNECE (2014): Water-food-energy-ecosystems nexus: Reconciling different uses in transboundary river basins UNECE water convention. Genf: UNECE.
- UN-HABITAT (2016): Urbanization and Development: Emerging Futures: World Cities Report 2016. URL: <https://unhabitat.org/books/world-cities-report/> (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)

- Untersteller, F. (2017): Baden im Neckar: Möglichkeiten, Hindernisse und Chancen. URL: https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/2000/16_2950_D.pdf (zuletzt aufgerufen 2.8.2019)
- Vahlenkamp, T.; Ritzenhofen, I.; Gersema, G.; Bauer, K.; Beckmann, N.; Stockhausen, F. (2019): Energiewende unter Strom: Durch Elektrifizierung zur Dekarbonisierung. In: Lamprecht, F. (Hrsg.): *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 69 (3). S. 10 - 14.
- Van der Geest, K.; De Sherbinin, A.; Kienberger, S.; Zommers, Z.; Sitati, A.; Roberts, E.; James, R. (2019): The Impacts of Climate Change on Ecosystem Services and Resulting Losses and Damages to People and Society. In: Mechler, R.; Bouwer, L.; Schinko, T.; Surminski, S.; Linnerooth-Baye, J. (Hrsg.): *Loss and Damage from Climate Change Concepts, Methods and Policy Options*. Cham: Springer. S. 221 – 236.
- Van Leeuwen, C. und Sjerps, R. (2015): City Blueprint EIP Water. City Blueprints of 30 cities and regions. URL: https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/314887/EIP_Water_City_Blueprints_Action_REPORT_June_2014_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y (zuletzt aufgerufen 15.7.2019)
- Van Vliet, B.; G. Spaargaren, G.; Oosterveer, P. (2011): Sanitation under challenge: Contributions from the social sciences. In: Prisco, J. (Hrsg.): *Water Policy*, 13 (6). S. 797- 809.
- Van Vliet, B. und Spaargaren, G. (2010): Sense and Sanitation. In: Van Vliet, B.; Spaargaren, G.; Oosterveer, P. (Hrsg.): *Social Perspectives on the Sanitation Challenge*. Dordrecht: Springer. S. 31 - 48.
- Veser, S. und Londong, J. (2017): EVaSENS - Einsatz von Vakuum-Inlinern im Bestand. Integration von Unterdruck-Sanitärtechnik im bestehenden Gebäude zur Etablierung von NASS-Systemen. Karlsruhe: IRB.
- Veser, S. (2015): Doppel-Inliner-Verfahren zur getrennten Erfassung von Schwarz- und Grauwasser im Gebäudebestand. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen.

- Viessmann (2019): Preisauskunft Wärmepumpe (E-Mail 6.5.2019).
- Viessmann (2018): Auslegung der Wärmepumpe, Energieverbrauch und Materialaufwendungen (persönlicher Austausch 17.5.2018).
- Völker, T.; Blackstock, K.; Kovacic, Z.; Sindt, J.; Strand, R; Kerry Waylen (2019): The role of metrics in the governance of the water-energy-food nexus within the European Commission. URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016718315110> (zuletzt aufgerufen 4.9.2019)
- Waschnewski, J. und Hürter, J. (2017): Städtebauliche Handlungsoptionen zur Anpassung an Auswirkungen von Überflutung und Trockenheit im urbanen Raum. In: Difu (Hrsg.): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin: Difu. S. 232 - 236.
- Weindl, S. (2016): Luftbild des Stadtteils Rohrbach-Hasenleiser. URL:
https://www.rnz.de/nachrichten/heidelberg_artikel,-Heidelberg-Hoffnungen-und-Wuensche-der-Heidelberger-Stadtteilvereine-fuer-2016-_arid,160997.html (zuletzt aufgerufen 13.9.2019)
- Wendland, C. (2009): Anaerobic Digestion of Blackwater and Kitchen Refuse. In: GFEU (Hrsg.): Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 66. S. 1 - 120.
- WHO (2009): Protecting health from climate change: Connecting science, policy and people. Genf: WHO.
- Wido (2013): GKV-Arzneimittelindex im Wissenschaftlichen Institut der AOK: Fertigarzneimittel. Heidelberg: Springer.
- Wilhelm, C. (2016): Erschließung ungenutzter Potenziale durch Sektorübergreifende Lösungen. In: Difu (Hrsg.): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin: Difu. S. 92 - 94.
- Winker, M.; Schramm, E.; Schulz, O.; Zimmermann, M.; Liehr, S. (2016): Integrated water research and how it can help address the challenges faced by Germany's water sector. In: Environmental Earth Sciences. Thematic Issue: Water Resources and Research in Germany. Heidelberg: Springer.

- Winker, M. und Schramm, E. (2015): Nachhaltige Konzepte für die kommunale Wasserwirtschaft. <https://www.iso.de/uploads/media/winker-schramm-essener-tagung-2015.pdf> (zuletzt aufgerufen 19.7.2019)
- Winker, M. und Rieck, C. (2013): SANitärRecycling ESCHborn (SANIRESCH). URL: https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-3125-7-1523274700.pdf (zuletzt aufgerufen 18.7.2019)
- Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen beim BMEL (2015): Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft. Bonn: BMEL.
- Witzel, A. (2000): Das problemzentrierte Interview. In: Mruck, K. (Hrsg.): Forum qualitative Sozialforschung 1 (1), Art. 22.
- Wolter, S.; Hiessl, H.; Hillenbrand, T. (2014): TWIST++ Transitionswege WasserInfraSTRuktursysteme. In: DWA (Hrsg.): Korrespondenz Abwasser Abfall, Nr. 4. S. 273 - 275.
- World Economic Forum (2016): The Global Risks Report 2018. Genf: World Economic Forum.
- Wunder, S.; Albrecht, S.; Porsch, L.; Öhler, L. (2019): Kriterien zur Bewertung des Transformationspotentials von Nachhaltigkeitsinitiativen. Dessau-Roßlau: UBA.
- WWAP (2017): The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater: The Untapped Resource. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002471/247153e.pdf> (zuletzt aufgerufen 9.7.2019)
- WWAP (2014): The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. URL: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2014-water-and-energy/> (zuletzt aufgerufen 10.7.2019)
- Zech, T.; Mohr, M.; Trösch, W. (2009): Schlussbericht DEUS 21. Karlsruhe: Fraunhofer IGB.

ZWK (2018): Energieverbrauch Trinkwasserbereitstellung (persönlicher Austausch
8.2.2018)

Anhang

A1 Erfassung Kanalbestand nach Kanaltyp

Quelle

Teilstrecke: Stadt Heidelberg 2017c

Länge: Eigene Berechnung

Gewicht: Rinninger 2018; HABA 2018; Berding 2016; Steinzeug-Keramo 2017

Teilstreckenbezeichnung

Erlenweg = Erl, Konstanzer Straße = Ko, Max-Joseph-Straße = MJ, Karlsruher Straße = Ka, Offenburger Straße = Of, Waldshuter Weg = W, Kehler Weg = Ke, Lörracher Weg = Lö, Lahrer Straße = La, Freiburger Straße = F, Kolbenzeil = Kol, Raststätter Straße = R, Emmendinger Weg = Em, Breisacher Weg = Br, Baden-Badener Straße = Ba, Bühler Straße = Bü, Ortenauer Straße = Or, Markgräfle Straße = Mg, Erbprinzstraße = Erb

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Stahlbeton - 2000				
Erl9	64,16	64,16	3.360,00	215.577,60
Stahlbeton - 1800				
Erl1	62,01	293,08	2.890,00	847.001,20
Erl2	53,00			
Erl3	66,77			
Erl4	59,91			
Erl5	51,39			
Stahlbeton - 1600				
Erl6	47,95	134,38	2.520,00	338.637,60
Erl7	44,25			
Erl8	42,18			
Stahlbeton - 1100				
Kol3	55,44	165,5	1.665,00	275.557,50
Kol4	55,13			
Kol5	54,93			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Stahlbeton - 600				
Or5	38,78	38,78	563,00	21.833,14
Asbestzement (Beton) - 500				
F21	52,00	52,00	400,00	20.800,00
Steinzeug - 500				
Or1	6,97	247,28	174,00	43.026,72
Or2	54,88			
Or3	54,81			
Or4	40,09			
Or5	39,95			
Or6	43,95			
Erb1	6,63			
Steinzeug - 450				
Or8	45,22	99,61	155,00	15.439,55
Erb2	54,39			
Steinzeug - 400				
Ko14	9,35	329,18	136,00	44.768,48
Ko15	40,28			
Ko16	39,23			
Ko17	38,52			
F4	9,71			
F5	36,58			
F9	47,3			
Br1	8,84			
Or9	43,62			
Erb3	55,75			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Beton - 350				
MJ10	58,97	322,88	211,00	86.248,36
MJ11	60,07			
MJ12	67,40			
MJ13	58,19			
Kol6	20,79			
Mg1	27,53			
Mg2	29,93			
Asbestzement (Beton) - 350				
R4	11,83	85,88		
R5	29,33			
R6	36,34			
R7	8,38			
Steinzeug - 350				
MJ14	24,09	71,91	101,00	7.262,91
F22	16,82			
Mg4	31,00			
Steinzeug - 300				
Ko18	39,54	2.153,9	72,00	155.080,80
Ko19	9,85			
MJ7	11,40			
MJ8	60,57			
MJ9	58,72			
Of1	55,73			
Of2	55,93			
Of3	39,41			
Of4	30,27			
Of5	10,51			
W1	7,42			
W2	40,16			
W3	36,72			
W4	42,21			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Ke1	7,71			
Ke2	30,30			
Ke3	4,25			
Ke4	38,26			
Lö1	53,87			
Lö2	53,99			
Lö3	11,44			
La1	28,33			
La2	50,48			
La3	10,27			
F1	9,71			
F2	48,65			
F3	50,50			
F6	37,51			
F7	48,26			
F8	44,87			
F17	11,98			
F18	48,25			
F23	51,83			
Em1	40,19			
Em2	46,80			
Em3	47,77			
Em4	15,61			
Em5	24,31			
Em6	39,17			
Em7	40,26			
Em8	38,85			
Em9	10,07			
Br2	20,89			
Br3	55,30			
Br4	13,51			
Br5	35,44			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Br6	26,94			
Br7	63,47			
Br8	13,15			
Br9	19,23			
Ba6	46,66			
Ba7	10,30			
Ba8	56,83			
Bü1	27,45			
Bü4	15,29			
Bü5	47,62			
Bü6	47,21			
Bü7	47,68			
Bü8	9,80			
Mg3	31,97			
Mg5	28,03			
Mg6	29,97			
Erb4	57,87			
Erb5	7,36			
Asbestzement (Beton) - 300				
R8	42,49	86,02	208,00	17.892,16
R9	43,53			
Beton - 250				
R14	13,99	13,99	208,00	2.909,92
Steinzeug - 250				
Lö4	13,01	39,75	53,00	2.106,75
Bü2	10,94			
Bü3	15,8			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Steinzeug - 200				
Ke5	15,91	256,62	37,00	9.494,94
Ke6	29,86			
Ke7	9,45			
Ke8	36,50			
Ke9	33,31			
Ke10	26,77			
Lö5	30,56			
R10	20,15			
R11	4,89			
R12	23,67			
R13	25,55			
Steinzeug - 150				
Kol16	15,51	97,27	24,00	2.334,48
Kol17	27,05			
Kol18	7,38			
Kol19	24,00			
Kol20	23,33			
Stahlbeton - 1000/1500				
Erl10	8,98	934,99	1.880,00	1.757.781,20
Erl11	51,89			
Erl12	54,86			
Erl13	54,73			
Erl14	44,81			
Erl15	17,34			
Ko1	44,22			
Ko2	42,04			
Ko3	42,12			
Ko4	42,06			
Ko5	18,72			
Ko6	44,24			
Ko7	54,21			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
Ko8	52,91			
Ko9	57,06			
Ko10	52,70			
Ko11	19,44			
Ko12	54,71			
Ko13	52,22			
MJ1	35,89			
MJ2	36,06			
Kol13	53,78			
Stahlbeton - 800/1200				
MJ3	49,23			
MJ4	51,89			
MJ6	53,22	221,62	1.300,00	288.106,00
Kol14	56,46			
Kol15	10,82			
Stahlbeton - 700/1050				
Ka1	66,96			
Ka2	61,50			
Ka3	15,92			
Ka4	36,74			
Ka5	38,38	512,77	1.040,00	533.280,80
Ka6	23,49			
Ka7	84,26			
Ka8	86,77			
Ka9	55,11			
Ka10	43,64			
Stahlbeton - 600/900				
MJ5	57,56			
F10	59,94			
F11	60,15	1.168,42	760,00	887.999,20
F12	61,20			
F13	7,84			

Teilstrecke gruppiert nach Material - DN	Länge	Gesamtlänge	Gewicht	Gesamtgewicht
mm	m	m	kg / m	kg / m
F14	11,78			
F15	54,00			
F16	53,94			
F19	53,82			
F20	51,56			
Kol1	16,21			
Kol2	40,79			
Kol7	52,58			
Kol8	49,75			
Kol9	50,00			
Kol10	41,90			
Kol11	44,88			
Kol12	43,67			
R1	8,62			
R2	55,75			
R3	58,86			
Ba1	9,95			
Ba2	55,6			
Ba3	53,7			
Ba4	52,69			
Ba5	61,68			
Gesamtlänge Kanalnetz		7.389,99		
<p>Anmerkung: Das Stadtviertel entlastet bei starken Niederschlägen u.a. in einen größeren Ringkanal im Süden, welcher wie ein Entlastungsbauwerk fungieren kann, sowie in umliegende Flächen; es wird daher angenommen, dass für das Stadtviertel isoliert betrachtet kein Entlastungsbauwerk vorliegt (Tiefbauamt Heidelberg 2018)</p> <p>Für Asbest liegt seit dem 1.1.1995 ein Herstellungs- und Verwendungsverbot vor, welches auch Asbestzementkanalrohre umfasst (Gefahrenstoffverordnung – GefStoffV: Anhang II Nummer 1) (siehe auch BAUA 2018). Für belastbare Herstellerangaben werden die Asbestzementsegmente deshalb durch Betonsegmente ausgetauscht.</p>				

A2 Erfassung Kanalschächte

Quelle

Schachtgröße: Stadt Heidelberg 2017c

Länge: Eigene Berechnung

Gewicht: Rinninger 2018; HABA 2018; Berding 2016; Steinzeug-Keramo 2017

Schachtgröße gruppiert nach Material - DN	Länge	Schacht- anzahl	Gesamt- schacht- anzahl	Gewicht	Gesamt- gewicht
mm	m	St.	≈ St.	kg / St.	kg / St.
Schachtgröße DN 1500					
Stahlbeton - 2000	64,16	0,86	24	11.492,60	277.926,31
Stahlbeton - 1800	293,08	3,91			
Stahlbeton - 1600	134,38	1,79			
Stahlbeton - 1100	165,5	2,21			
Stahlbeton - 1000/1500	934,99	12,47			
Stahlbeton - 800/1200	221,62	2,95			
Schachtgröße DN 1200					
Stahlbeton - 600	38,78	0,52	27	7.308,00	145.640,64
Asbestzement (Beton) - 500	52,00	0,69			
Steinzeug - 500	247,28	3,30			
Stahlbeton - 700/1050	512,77	6,84			
Stahlbeton - 600/900	1.168,42	15,58			
Schachtgröße DN 1000					
Steinzeug - 450	99,61	1,33	48	6.208,00	295.893,15
Steinzeug - 400	329,18	4,39			
Beton - 350	322,88	4,31			

Steinzeug - 350	71,91	0,96			
Asbestzement (Beton) - 350	85,88	1,15			
Steinzeug - 300	2.153,90	28,72			
Asbestzement (Beton) - 300	86,02	1,15			
Beton - 250	13,99	0,19			
Steinzeug - 250	39,75	0,53			
Steinzeug - 200	256,62	3,42			
Steinzeug - 150	97,27	1,30			
Anmerkung: DN 1000 bei Kanälen bis DN 500; DN 1200 bei Kanälen bis DN 800; DN 1500 bei Kanälen <DN 800; Schächte durchschnittlich alle 75 m (Tiefbauamt Heidelberg 2018)					

A3 Lebensdauern je Systemkomponente

Systemkomponente	Lebensdauer (Jahre)	Quelle
Kläranlage	30	Doka 2009
Kanalnetz und Schächte	80	DWA 2015b
Kanalnetz und Schächte (Restlebensdauer)	30	DWA 2015b
Druckrohre (Vakuumleitungen)	60	Hiessl et al. 2010
Vakuumstation	20	Herbst 2008
Vakuumtoiletten	30	Hiessl et al. 2010
Liner und Harz	50	IKT 2013
Biogasanlage	20	Jungbluth et al. 2007
Wärmepumpe	20	Heck 2007
Wärmetauscher	50	Studer 2005
Müllfahrzeug	15	Umweltbundesamt Österreich 2018
Zerkleinerungsanlage	20	Jungbluth et al. 2007
Grauwasserbehandlungs- anlagen und zweites Leitungsnetz	20	INTEWA 2018b
Zerkleinerer Küchenspüle	15	Hiessl et al. 2010
Konventionelle Spültoiletten	30	Hiessl et al. 2010
Kohlekraftwerk	30	Dones et al. 2007
Kompostwerk	25	Nemecek und Kägi 2007

A4 Angaben Investitionskosten

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Kläranlage	177 € / EW	Herbst 2008	In der Quelle wird eine Anschlussgröße von 20.0000 EW angesetzt; potentielle Reduktion durch Skalierung nicht berücksichtigt	899.337 € / STV
Grabungskosten (SQ)	$y = 0,3806x + 21,226$	Biemann 2015	$y = 0,3806x + 21,226$ $y =$ Preis pro m Trasse $x =$ DN	2.259.561 € / STV
Grabungskosten (SYAL1/2)	$y = 0,3806x + 21,226$	Biemann 2015	$y = 0,3806x + 21,226$ $y =$ Preis pro m Trasse $x =$ DN; von Gesamtlebensdauer 80 J. noch 30 J. Restlebensdauer, d.h. 37,5 %	847.335 € / STV
Kanalnetz und Schächte (SQ)	Kalkulation siehe Anhang A6	Berding 2019; HABA 2019		2.542.742 € / STV
Kanalnetz und Schächte (Restlebensdauer) (SYAL1/2)	Kalkulation siehe Anhang A6	Berding 2019; HABA 2019	Von Gesamtlebensdauer 80 J. noch 30 J. Restlebensdauer, d.h. 37,5 %	953.528 € / STV
Druckrohre (Vakuumleitungen)	Kalkulation siehe Anhang A7	SIMONA 2019 Bruttopreisliste		93.057 € / STV
Vakuumstation	54 € / EW	Herbst 2008	5.081 EW	274.374 € / STV

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Vakuumtoiletten (inkl. Rohrleitungen im Haus)	1.960 € / Haushalt	Herbst 2008	2.395 Haushalte; Nischenprodukt, deutliche Preisreduktion durch Skalierung zu erwarten	4.694.200 € / STV
Konventionelle Spültoilette	500 € / Haushalt	Herbst 2008	2.395 Haushalte	1.197.500 € / STV
Liner und Harz	Kalkulation siehe Anhang A8	BRAWO® Systems 2019		454.805 € / STV
Biogasanlage	1.000 € / EW	Herbst 2008	5.081 EW	5.081.000 € / STV
Wärmepumpe	Preis auf Anfrage	Viessmann 2019	Technische Auslegung siehe Anhang A11	53.109 € / STV
Wärmetauscher	Preis auf Anfrage	UHRIG 2019	Technische Auslegung siehe Anhang A10	68.000 € / STV
Klärschlammfahrzeug	165.000 € / St.	UBA 2018f	Berechnung anhand Einsatz- bzw. Arbeitstage / STV*a; Klärschlamm (5 T \pm 2%) bei 250 angesetzten Arbeitstagen	3.300 € / STV
Biomüllfahrzeug	165.000 € / St.	UBA 2018f	Berechnung anhand Einsatz- bzw. Arbeitstage / STV*a; Bioabfall (32 T. \pm 12,8 %) bei 250 angesetzten Arbeitstagen	21.120 € / STV
Zerkleinerungsanlage	Preis auf Anfrage	MOCO 2019	Modell AZ 5F, Starterpreis; Korngröße und Mengen je h nicht berücksichtigt	18.000 € / STV

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Grauwasserbehandlungsanlagen (inklusive Wärmerückgewinnung)	20 € / m ²	Nolde 2013b	35,5 m ² pro EW, 5.081 EW	3.607.510 € / STV
Küchenabfallzerkleinerer	464,99 € / St.	Emerson Electric 2016	1 St. / Haushalt; 2.395 Haushalte	1.113.651 € / STV

A5 Angaben laufende Kosten

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Trinkwasserversorgung (SQ)	1,25 € / m ³	DWA 2016b	Trinkwasser: 195.767,9 m ³ / STV*a; Material-/ Personalaufwand, sonstige betriebliche Aufwendungen	244.710 € / STV
Trinkwasserversorgung (SYAL1)	1,25 € / m ³	DWA 2016b	Trinkwasser: 142.523,3 m ³ / STV*a; Material-/ Personalaufwand, sonstige betriebliche Aufwendungen	178.154 € / STV
Trinkwasserversorgung (SYAL2/3)	1,25 € / m ³	DWA 2016b	Trinkwasser: 106.377,8 m ³ / STV*a; Material-/ Personalaufwand, sonstige betriebliche Aufwendungen	132.972 € / STV
Abwasserbeseitigung (Ableitung und Behandlung) (SQ)	134€ / EW*a	DWA 2016b	5.081 EW	680.854 € / STV
Abwasserbeseitigung (Ableitung und Behandlung) bei verringertem Betriebsaufwand (SYAL1)	67€ / EW*a	Annahme	5.081 EW	340.427 € / STV
Abwasserableitung (SYAL2)	35 € / EW*a	DWA 2016b	5.081 EW	177.835 € / STV

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Biogasanlagenbetrieb (Energie, Wartung und Instandhaltung)	100 € / EW*a	Herbst 2008	5.081 EW; Quelle umfasst Energie, Wartung und Instandhaltung; Energieaufwand in den Systemalternativen aber durch energetische Gutschriften abgedeckt	508.100 € / STV
Betriebsaufwand Schwarzwasser-trennung und Vakuum-entwässerung	13,8 € / Haushalt*a	Herbst 2008	2.395 Haushalte; Quelle umfasst Energie, Wartung und Instandhaltung	33.051 € / STV
Betrieb Küchenabfall-zerkleinerer	0,257 € / kWh	Stadtwerke Heidelberg 2019b	Keine Angaben zu Wartung und Instandhaltung verfügbar; Kosten anhand Energieaufwand; 7.621,5 kWh / STV*a	1.959 € / STV
Betrieb Zerkleinerungs-anlage	3 % der initialen Investitionskosten (siehe Anhang A4)	Annahme		540 € / STV
Betrieb Grauwasser-behandlungs-anlagen	1 % der initialen Investitionskosten (siehe Anhang A4)	Fbr 2005	Reparatur, Wartung, Unterhaltung (ohne energetischen Aufwand)	3.5567 € / STV
Energiekosten Grauwasser-behandlungs-anlagen	0,257 € / kWh	Stadtwerke Heidelberg 2019b	Grauwasser: 137.682.905,6 l / STV*a	49.538 € / STV

Systemkomponente	Angabe	Quelle	Anmerkung	Verwendeter Wert
Betrieb Wärmetauscher	21.500 € / a	Butz und Müller 2010	Quellenangabe für Wärmetauscher von 87 m ² inkl. Wärmepumpe und BHKW; Kostenallokation anhand Flächenauslegung Wärmetauscher 40m ²)	9.885 € / STV
Betrieb Müllfahrzeug	11 % der initialen Investitionskosten (siehe Anhang A4)	UBA 2018	Für SQ und SYAL1 gleich, da keine Daten vorliegen wie sich Betriebskosten bei kürzerer Strecke ändern; Quelle umfasst Reparatur und Unterhaltung	2.686 € / STV
Betrieb Klärschlammfahrzeug	11 % der initialen Investitionskosten (siehe Anhang A4)	UBA 2018	Quelle umfasst Reparatur und Unterhaltung	363 € / STV
Dieserverbrauch Müll-/ Klärschlammfahrzeug (SQ)	1,30 € / l	Annahme anhand aktueller Kraftstoffpreise	1.282 l / STV*a	1.667 € / STV
Dieserverbrauch Müllfahrzeug (SYAL1)	1,30 € / l	Annahme anhand aktueller Kraftstoffpreise	237 l / STV*a	308 € / STV

A6 Investitionskosten Kanalbestand (Kanalnetz und Schächte)

Quelle

Berding 2019; HABA 2019; Kemmler 2016

Produkt - DN	Angabe	Kosten
mm	€ / m	€ / STV
Kreisprofil: Beton - DN 250 DN 300 ¹	93	1.302
Kreisprofil: Beton - DN 300	93	7.998
Kreisprofil: Beton - DN 350 DN 400 ¹	105	42.945
Kreisprofil: Beton - DN 500	110	5.720
Kreisprofil: Stahlbeton - DN 600	150	5.850
Eiprofil: Stahlbeton - DN 1000/1500	450	420.750
Eiprofil: Stahlbeton - DN 800/1200	310	68.820
Eiprofil: Stahlbeton - DN 700/1050	245	125.685
Eiprofil: Stahlbeton - DN 600/900	180	210.240
Kreisprofil: Stahlbeton - DN 2000	920	58.880
Kreisprofil: Stahlbeton - DN 1800	830	243.190
Kreisprofil: Stahlbeton - DN 1600	800	107.200
Kreisprofil: Stahlbeton - DN 1100	440	73.040
Kreisprofil: Steinzeug - DN 150	57	5.544
Kreisprofil: Steinzeug - DN 200	146	37.467
Kreisprofil: Steinzeug - DN 250	201	7.990
Kreisprofil: Steinzeug - DN 300	275	592.323
Kreisprofil: Steinzeug - DN 350	463	33.294
Kreisprofil: Steinzeug - DN 400	481	158.336
Kreisprofil: Steinzeug - DN 450 ³	481	47.912
Kreisprofil: Steinzeug - DN 500 ³	481	118.942
Gesamtkosten Kanalnetz		2.373.427

Fortsetzung der Tabelle auf der Folgeseite

Fortsetzung der Tabelle A6 Investitionskosten Kanalbestand (Kanalnetz und Schächte)

Schacht DN 1000	1.235 ²	59.299
Schacht DN 1200	1.813 ²	48.946
Schacht DN 1500	2.545 ²	61.070
Gesamtkosten Schächte		169.315
Gesamtkosten Kanalnetz und Schächte		2.542.742
Gesamtkosten Kanalnetz und Schächte (Restlebensdauer)		953.528
Anmerkung:		
¹ Nicht vorhandene Größen Kanalrohre wurden vom Hersteller zur Auskunft angepasst		
² Summe aus Kosten für Schachtring, Schachtkonus, Auflagering, Abdeckplatte		
³ Keine Herstellerangabe verfügbar, DN 400 wird angesetzt		

A7 Investitionskosten Druckrohre

Quelle

SIMONA 2019

Produkt - DN	Angabe	Kosten
mm	€ / m	€ / STV
Vakuumleitung - DN 200	40	14.397
Vakuumleitung - DN 150	23	45.293
Vakuumleitung - DN 100	11	21.385
Vakuumleitung - DN 65	4	10.882
Vakuumleitung - DN 50	3	1.101
Gesamtkosten Vakuumleitungen		93.057
Anmerkung: DN 200 entspricht Länge Kanalnetz SQ DN 2000, 1800; DN 150 entspricht Länge Kanalnetz SQ DN 1600, 1100, 1000 / 1500, 800 / 1200, 700 / 1 500; DN 100 entspricht Länge Kanalnetz SQ DN 600, 600 / 900, 500, 450, 400; DN 65 entspricht Länge Kanalnetz SQ DN 350, 300, 250; DN 50 entspricht Länge Kanalnetz SQ DN 200, 150		

A8 Investitionskosten Liner und Harz

Quelle

BRAWO® Systems 2019

Produkt - DN	Angabe	Kosten
mm	€ / m o. kg	€ / STV
Liner - DN 100	16,7	181.487
Liner - DN 50	18,8	203.766
Harz	12,8	69.552
Gesamtkosten Liner und Harz		454.805
Anmerkung: Nach Veser 2015 werden 0,5 kg Harz je m angesetzt		

A9 Reinvestitionskosten je Systemkomponente

Quelle

Eigene Berechnung

Formel

$$DFAKE(i; n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

(i) = 3 % p.a.

(n) = Lebensdauer der jeweiligen Systemkomponente

Systemkomponente	IK (€)	Rechengang	IKR (€)	IKR gesamt (€)
Kanalnetz und Schächte bei Restlebensdauer ¹	953.528	IK · DFAKE (3; 30)	1.047.584	1.047.584
Kläranlage	899.337	IK · DFAKE (3; 30)	370.518	523.162
		IK · DFAKE (3; 60)	152.644	
Fahrzeug Klärschlamm	3.300	IK · DFAKE (3; 15)	2.118	5.270
		IK · DFAKE (3; 30)	1.360	
		IK · DFAKE (3; 45)	873	
		IK · DFAKE (3; 60)	560	
		IK · DFAKE (3; 75)	360	
Kohlekraftwerk	89.172	IK · DFAKE (3; 30)	36.738	51.873
		IK · DFAKE (3; 60)	15.135	
Müllfahrzeug	21.120	IK · DFAKE (3; 15)	13.556	33.728
		IK · DFAKE (3; 30)	8.701	
		IK · DFAKE (3; 45)	5.585	
		IK · DFAKE (3; 60)	3.585	
		IK · DFAKE (3; 75)	2.301	
Kompostwerk	1.307	IK · DFAKE (3; 25)	624	1.065
		IK · DFAKE (3; 50)	298	
		IK · DFAKE (3; 27)	142	

Systemkomponente	IK (€)	Rechengang	IKR (€)	IKR gesamt (€)
Vakuumtoiletten (inkl. neuer Rohrleitungen im Haus)	4.694.200	IK · DFAKE (3; 30)	1.933.963	2.730.710
		IK · DFAKE (3; 60)	796.747	
Konventionelle Spültoilette	1.197.500	IK · DFAKE (3; 30)	493.358	696.610
		IK · DFAKE (3; 60)	203.252	
Druckrohre (Vakuumleitungen)	93.057	IK · DFAKE (3; 60)	15.795	15.795
Vakuumstation	274.374	IK · DFAKE (3; 20)	151.915	282.597
		IK · DFAKE (3; 40)	84.112	
		IK · DFAKE (3; 60)	46.570	
Liner und Harz	454.805	IK · DFAKE (3; 50)	103.746	103.746
Biogasanlage	5.081.000	IK · DFAKE (3; 20)	2.813.248	5.233.278
		IK · DFAKE (3; 40)	1.557.631	
		IK · DFAKE (3; 60)	862.398	
Wärmepumpe	53.109	IK · DFAKE (3; 20)	29.405	54.701
		IK · DFAKE (3; 40)	16.281	
		IK · DFAKE (3; 60)	9.014	
Wärmetauscher	68.000	IK · DFAKE (3; 50)	15.511	15.511
Zerkleinerungsanlage	18.000	IK · DFAKE (3; 20)	9.966	18.539
		IK · DFAKE (3; 40)	5.518	
		IK · DFAKE (3; 60)	3.055	
Küchenabfallzerkleinerer	1.113.651	IK · DFAKE (3; 15)	714.808	1.778.467
		IK · DFAKE (3; 30)	458.813	
		IK · DFAKE (3; 45)	294.494	
		IK · DFAKE (3; 60)	189.020	
		IK · DFAKE (3; 75)	121.332	

Systemkomponente	IK (€)	Rechengang	IKR (€)	IKR gesamt (€)
Grauwasserbehandlungs- anlagen und zweites Leitungsnetz	3.556.700	IK · DFAKE (3; 20)	1.969.274	3.715.627
		IK · DFAKE (3; 40)	1.090.342	
		IK · DFAKE (3; 60)	603.679	

Anmerkung:

¹ Im Falle des SQ fallen keine IKR an, da die Lebensdauer des Kanalnetzes mit 80 Jahren angesetzt wird. Im Falle von SYAL1 und SYAL2, welche den Kanalbestand in seiner Restlebensdauer von 30 Jahren weiternutzen, muss nach dieser Zeit reinvestiert werden.

A10 Reinvestitionskosten je System

Systemkomponente	SQ	SYAL1	SYAL2	SYAL3
	€ / STV			
Kanalnetz und Schächte bei Restlebensdauer	-	1.047.584		-
Kläranlage	523.162		-	
Fahrzeug Klärschlamm	5.270		-	
Kohlekraftwerk	51.873		-	
Müllfahrzeug	33.728		-	
Kompostwerk	1.065		-	
Vakuumtoiletten (inkl. neuer Rohrleitungen im Haus)	-		2.730.710	
Konventionelle Spültoilette	696.610		-	
Druckrohre (Vakuumleitungen)	-		15.795	
Vakuumstation	-		282.597	
Liner und Harz	-		103.746	
Biogasanlage	-		5.233.278	
Wärmepumpe	-	54.701		-
Wärmetauscher	-	15.511		-
Zerkleinerungsanlage	-	18.539		-
Küchenabfallzerkleinerer	-	-		1.778.467
Grauwasserbehandlungsanlagen und zweites Leitungsnetz	-	-		3.715.627
Gesamt	1.311.708	10.059.351	14.907.804	13.860.219

A11 Auslegung Wärmetauscher

Ansprechpartner: Christian Bechler - Helmut UHRIG Straßen- und Tiefbau GmbH - Am Roten Kreuz 2 - 78187 Geislingen
 Telefon: +49 7704 / 806 61 - E-Mail: bechler@uhrig-bau.de - Internet: www.uhrig-bau.de

Energie aus Abwasser Auslegung zu meinem Projekt



Erläuterung: Das hier vorliegende Dokument nennen wir "Auslegung". Auf Basis der Daten, die Sie uns zur Verfügung gestellt haben, können wir errechnen, wieviel Energie aus Abwasser Sie für Ihr Projekt aus dem Kanal nutzen können. Der Wert "Entzugsleistung Kanal" beschreibt dabei die Energie, die wir mit unserem Therm-Liner-System für Sie nutzbar machen können. Der Wert "Wärmepumpenleistung" beziffert die Heizleistung, die Sie realisieren können. Weiter unten finden Sie schließlich die Zahl der Wärmetauscher, die notwendig sind, um die genannte Entzugsleistung realisieren zu können.

1. Kundendaten	
Projektnummer	18030
Projektbezeichnung	Dissertation
Name des Kunden	Frau Jasmin Friedrich
Ihr Ansprechpartner bei UHRIG	Herr Christian Bechler
Datum der Erstellung	04.05.2018

2. Kanaldaten	
Kanalform	
Kanaldimension DN	



3. Energiepotential	Einheit	Daten
Sohlgefälle	‰	
Trockenwetterabfluss - Minimalwert	l/s	4,36
Abwassertemperatur - Minimalwert	°C	30,0
Verfügbare Haltungslänge Kanal	m	
Wärmetauscherfläche überströmt	m ² /m	1,00
Biofilmeinfluss	%	40
Entzugsleistung Kanal	kW	183
Zwischenmedium - Eintrittstemperatur	°C	14,0
- Austrittstemperatur	°C	18,0
Wärmepumpenleistung (bei COP4)	kW	244

4. Spezifikationen Therm-Liner System	Einheit	Daten
Einzelne Elementlänge	m	1,0
Wärmedurchg.koeff. k ohne Biofilm	kW/(m ² K)	0,90
Wärmedurchg.koeff. k mit Biofilm	kW/(m ² K)	0,54
Spezifische Entzugsleistung	kW/m ²	4,6
Gesamt-Volumenstrom-Primärkreislauf	m ³ /h	39,3
Volumenstrom-Primärkreislauf pro Modul	m ³ /h	1,0
überströmte Wärmetauscherfläche THERM-LINER	m ²	40,0
Anzahl THERM-LINER Elemente	Stück	40,0
ca. Gesamtlänge THERM-LINER	m	40

Δ t - Primärkreislauf (Rücklauf/Vorlauftemp.)	K	4,0
mittlere Δ t zwischen Abwasser und Primärkreislauf	K	8,6
Abkühlung des Abwassers bei Qmin	K	10,02
Transportmedium	Wasser	-

Quelle: UHRIG 2018

A12 Auslegung Wärmepumpe

Leistungsdaten Vitocal 300-G C/CS-Serie		 	
Einstellungen			
Sprache	Deutsch		
Maschinentyp	Vitocal 300-G Pro BW302.C140 / BW302.CS140		
Betriebsdaten (Normbetriebspunkt)	B0/W35	Einheit	
Heizleistung	134,60	kW	
Kälteleistung	106,60	kW	
Elektrische Leistungsaufnahme	29,30	kW	
Leistungszahl (COP)	4,59	-	
Mindestvolumenstrom			
Primärkreis (Spreizung 5K)	19,40	m³/h	
Sekundärkreis (Spreizung 10K)	11,50	m³/h	
Nenn-Volumenstrom			
Primärkreis (Spreizung 3K)	32,36	m³/h	
Sekundärkreis (Spreizung 5K)	23,33	m³/h	
Nenn-Druckverlust			
Primärkreis (Spreizung 3K)	23,00	kPa	
Sekundärkreis (Spreizung 5K)	14,00	kPa	
Betriebsstrom (max)			
	97	A	
Absicherung			
	125	A	
Anlaufstrom je Verdichter (max)			
	136 (184,5)	A	
Gesamtgewicht			
	1180	kg	
Abmessungen			
Länge x Breite x Höhe	1932x911x1650	mm	
Betriebsdaten (indiv. Betriebspunkt)	B18/W38	-	
Verdampfer Eintrittstemperatur	18	°C	
Verdampfer Austrittstemperatur	14	°C	
Verflüssiger Eintrittstemperatur	30	°C	
Verflüssiger Austrittstemperatur	38	°C	
Heizleistung	214,92	kW	
Kälteleistung	183,48	kW	
Elektrische Leistungsaufnahme	32,80	kW	
Leistungszahl (COP)	6,61	-	
Volumenstrom			
Primärkreis	41,19	m³/h	
Sekundärkreis	23,31	m³/h	
Druckverlust			
Primärkreis	33,28	kPa	
Sekundärkreis	11,80	kPa	
Vorlauftemperatur (max)			
Primärkreis	20,00	°C	
Sekundärkreis	-5,00	°C	
Vorlauftemperatur (min)			
Primärkreis	60,00	°C	
Sekundärkreis	33,00	°C	

Quelle: Viessmann 2018

A13 Ökobilanz Status-Quo-System

Quelle

Werte eigene Berechnung, Wirkungsabschätzung anhand von aggregierten Datensätzen der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) und ReciPe-Midpoint Kategorien (Goedkoop et al. 2013)

Teilprozess	Einheit	Wert	ReCiPe Midpoint Kategorie ¹		
			Verbrauch an fossilen Rohstoffen (kg Rohöl-Äquiv.)	Verbrauch an metall. Rohstoffen (kg Fe-Äquiv.)	Globale Erwärmung (kg Rohöl-Äquiv.)
Systembetrieb					
Energiebedarf Raumwärme Warmwasserbereitung ²	kWh	36.359.162,5	2.145.095,6	13.802,7	7.633.394,6
Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung ³	kWh	78.307,15	13.364,7	497,5	49.952,7
Energiebedarf Abwasserbehandlung ³	kWh	0 ⁴	0	0	0
Energiebedarf Bioabfallbehandlung ³	kWh	14.893,6	2.541,9	94,6	9.500,7
Kraftstoffverbrauch Biomülltransport ⁵	l	625,0	1.293,0	15,0	517,5
Kraftstoffverbrauch Klärschlammtransport ⁵	l	657,0	709,6	8,2	284,0
Summe			2.163.004,9	14.418,1	7.693.649,5
Systemkonstruktion⁶					
Kanalbestand inkl. Aushub	Einzelmaterialauflistung siehe Kapitel 2.5		12.396,4	21.197,6	78.269,6
Kläranlage			23.424,5	8.987,1	42.238,8
Kohlekraftwerk			27.711,0	101.492,8	108.347,5
Kompostwerk			285,7	230,0	584,2

Fahrzeuge		38,2	76,3	126,5
Summe		63.855,8	131.983,8	229.566,5
Anmerkungen				
¹ übersetzt				
² Modul Ecoinvent 3.4: heat, district or industrial, other than natural gas//[DE] heat and power co-generation, hard coal				
³ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, medium voltage//[DE] market for electricity, medium voltage				
⁴ Entspricht Null, da vollständig durch die Klärgaserzeugung und Mitverbrennung des Klärschlammes gedeckt.				
⁵ Modul Ecoinvent 3.4: diesel//[GLO] market group for diesel				
⁶ Einzelmaterialeauflistung siehe Kapitel 2.5				

A14 Ökobilanz SYAL1

Quelle

Werte eigene Berechnung, Wirkungsabschätzung anhand von aggregierten Datensätze der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) und ReciPe-Midpoint Kategorien (Goedkoop et al. 2013)

Teilprozess	Einheit	Wert	ReCiPe Midpoint Kategorie ¹		
			Verbrauch an fossilen Rohstoffen (kg Rohöl-Äquiv.)	Verbrauch an metall. Rohstoffen (kg Fe-Äquiv.)	Globale Erwärmung (kg Rohöl-Äquiv.)
Systembetrieb					
Energiebedarf Raumwärme Warmwasserbereitung	kWh	0 ²	0	0	0
Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung ³	kWh	57.009,3	9.729,8	362,2	36.366,7
Energiebedarf Grauwasserbehandlung inkl. Wärmerückgewinnung ³	kWh	367.607,8	62.739,9	2.335,5	234.499,6
Energiebedarf Bioabfallbehandlung ³	kWh	647,32	110,5	4,1	412,9

Fortsetzung der Tabelle auf der Folgeseite

Fortsetzung der Tabelle A14 Ökobilanz SYAL1

Teilprozess	Einheit	Wert	ReCiPe Midpoint Kategorie ¹		
			Verbrauch an fossilen Rohstoffen (kg Rohöl-Äquiv.)	Verbrauch an metall. Rohstoffen (kg Fe-Äquiv.)	Globale Erwärmung (kg Rohöl-Äquiv.)
Systembetrieb					
Kraftstoffverbrauch Biomülltransport ⁴	l	237	466,4	5,4	186,7
Energiebedarf Vakuumsystem ³	kWh	76.215	13.007,7	484,2	48.618,1
Energiebedarf Co-Vergärung Schwarzwasser und Bioabfall	kWh	0 ⁵	0	0	0
Summe			86.054,3	3.191,4	320.084,0
Systemkonstruktion⁶					
Kanalbestand inkl. Aushub	Einzelmaterial-auflistung siehe Kapitel 2.5		4.648,6	7.949,1	29.351,1
Kläranlage			16.474,2	6.320,6	29.706,1
Vakuumsystem			4.212,8	91,5	5.559,6
Biogasanlage			11.593,8	25.274,8	47.714,9
Fahrzeug			6,6	13,1	21,8
Wärmetauscher			453,4	4.027,9	1.735,6
Zerkleinerungsanlage			4,5	10,5	17,2
Summe			37.393,9	43.687,5	114.106,2
Anmerkungen					
¹ übersetzt					
² Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung und die Wärmerückgewinnung abgedeckt.					
³ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, medium voltage//[DE] market for electricity, medium voltage					
⁴ Modul Ecoinvent 3.4: diesel//[GLO] market group for diesel					
⁵ Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung abgedeckt.					

A15 Ökobilanz SYAL2

Quelle

Werte eigene Berechnung, Wirkungsabschätzung anhand von aggregierten Datensätzen der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) und ReciPe-Midpoint Kategorien (Goedkoop et al. 2013)

Teilprozess	Einheit	Wert	ReCiPe Midpoint Kategorie ¹		
			Verbrauch an fossilen Rohstoffen (kg Rohöl-Äquiv.)	Verbrauch an metall. Rohstoffen (kg Fe-Äquiv.)	Globale Erwärmung (kg Rohöl-Äquiv.)
Systembetrieb					
Energiebedarf Raumwärme Warmwasserbereitung	kWh	0 ²	0	0	0
Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung ³	kWh	42.551,1	7.262,2	270,3	27.143,7
Energiebedarf Grauwasserbehandlung inkl. Wärmerückgewinnung ⁴	kWh	192.756,1	31.563,8	2.776,3	117.963,6
Energiebedarf Bioabfallbehandlung ⁴	kWh	7.621,5	1.248,0	109,8	4.664,2
Energiebedarf Vakuumsystem ³	kWh	76.215	13.007,7	484,2	48.618,1
Energiebedarf Co-Vergärung Schwarzwasser und Bioabfall ³	kWh	0 ⁵	0	0	0
Summe			53.081,7	3.640,7	198.389,6

Fortsetzung der Tabelle auf der Folgeseite

Fortsetzung der Tabelle A15 Ökobilanz SYAL2

Systemkonstruktion					
Kanalbestand inkl. Aushub			4.648,6	7.949,1	29.351,1
Vakuumsystem			4.212,8	91,5	5.559,6
Biogasanlage	Einzelmaterial-auflistung siehe Kapitel 2.5		11.593,8	25.274,8	47.714,9
Grauwasser-behandlungs-anlage			27.428,0	623,8	27.910,7
Küchenabfall-zerkleinerer			130,6	998,0	504,3
Summe			48.013,8	34.937,2	111.040,6
Anmerkungen					
¹ übersetzt					
² Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung und die Wärmerückgewinnung abgedeckt.					
³ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, medium voltage//[DE] market for electricity, medium voltage					
⁴ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, low voltage//[DE] market for electricity, low voltage					
⁵ Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung abgedeckt.					

A16 Ökobilanz SYAL3

Quelle

Werte eigene Berechnung, Wirkungsabschätzung anhand von aggregierten Datensätzen der LCA-Datenbank Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent Centre 2017) und ReciPe-Midpoint Kategorien (Goedkoop et al. 2013)

Teilprozess	Einheit	Wert	ReCiPe Midpoint Kategorie ¹		
			Verbrauch an fossilen Rohstoffen (kg Rohöl-Äquiv.)	Verbrauch an metall. Rohstoffen (kg Fe-Äquiv.)	Globale Erwärmung (kg Rohöl-Äquiv.)
Systembetrieb					
Energiebedarf Raumwärme Warmwasserbereitung	kWh	0 ²	0	0	0
Energiebedarf Trinkwasserbereitstellung ³	kWh	42.551,1	7.262,2	270,3	27.143,7
Energiebedarf Grauwasserbehandlung	kWh	192.756,1	31.563,8	2.776,3	117.963,6

inkl. Wärmerückgewinnung ⁴					
Energiebedarf Bioabfallbehandlung ⁴	kWh	7.621,5	1.248,0	109,8	4.664,2
Energiebedarf Vakuumsystem ³	kWh	76.215	13.007,7	484,2	48.618,1
Energiebedarf Co-Vergärung Schwarzwasser und Bioabfall ³	kWh	0 ⁵	0	0	0
Summe			53.081,7	3.640,7	198.389,6
Systemkonstruktion					
Vakuumsystem inkl. Aushub	Einzelmaterialauflistung siehe Kapitel 2.5		4.218,4	91,6	5.561,9
Biogasanlage			11.593,8	25.274,8	47.714,9
Grauwasserbehandlungsanlage			27.428,0	623,8	27.910,7
Küchenabfallzerkleinerer			130,6	998,0	504,3
Summe			43.370,7	26.988,2	81.691,8
Anmerkungen					
¹ übersetzt					
² Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung und die Wärmerückgewinnung abgedeckt.					
³ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, medium voltage//[DE] market for electricity, medium voltage					
⁴ Modul Ecoinvent 3.4: electricity, low voltage//[DE] market for electricity, low voltage					
⁵ Entspricht Null, da durch Energiegewinnung aus Co-Vergärung abgedeckt.					