

netWORKS-Papers

**Stoffstromanalyse zu verschiedenen
Wasserinfrastruktursystemen in
Frankfurter und Hamburger Quartieren**

Arash Davoudi
Danijela Milosevic
Ruth Scheidegger
Engelbert Schramm
Martina Winker



netWORKS-Papers

Heft 30 *Stoffstromanalyse zu verschiedenen
Wasserinfrastruktursystemen in
Frankfurter und Hamburger Quartieren*

Arash Davoudi, Danijela Milosevic, Ruth Scheidegger,
Engelbert Schramm, Martina Winker

Impressum

**Arash Davoudi, Danijela Milosevic, Ruth Scheidegger, Engelbert Schramm,
Martina Winker**

Herausgeber

Forschungsverbund netWORKS

www.networks-group.de

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten im Verbundvorhaben „Potenzialabschätzung und Umsetzung wasserwirtschaftlicher Systemlösungen auf Quartiersebene in Frankfurt am Main und in Hamburg (netWORKS 3)“, das unter dem Förderkennzeichen 033W006A-E innerhalb der Fördermaßnahme „Intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (INIS)“ im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM)“ als Bestandteil des BMBF-Programms „Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA)“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird.

Textverarbeitung

Edith Steuerwald

Verlag und Vertrieb

Deutsches Institut für Urbanistik GmbH
Zimmerstraße 13-15
10969 Berlin
Telefon: 030/39001-0
Telefax: 030/39001-100
E-Mail: difu@difu.de
Internet: www.difu.de

Alle Rechte vorbehalten

Berlin, 1. Auflage 30.06.2016

ISBN: 978-3-88118-577-6

Forschungsverbund netWORKS im Projekt „Potenzialabschätzung und Umsetzung wasserwirtschaftlicher Systemlösungen auf Quartiersebene in Frankfurt am Main und in Hamburg (netWORKS 3)“

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)
Dr.-Ing. Martina Winker (Koordination)
Hamburger Allee 45
60486 Frankfurt
Tel.: 069/7076919-53
E-Mail: winker@isoe.de



Deutsches Institut für Urbanistik GmbH (Difu)
Dr. Jens Libbe
Zimmerstr. 13-15
10969 Berlin
Tel.: 030/39001-115
E-Mail: libbe@difu.de



Technische Universität Berlin
Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP1)
Prof. Dr. Thorsten Beckers
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin
Tel.: 030/314-23243
E-Mail: tb@wip.tu-berlin.de



COOPERATIVE Infrastruktur & Umwelt
Dr.-Ing. Bernhard Michel
Am Seegärtchen 23
64354 Reinheim
Tel.: 06162/9117-582
E-Mail: b.michel@cooperative.de



ABG FRANKFURT HOLDING Wohnungsbau-
und Beteiligungsgesellschaft mbH
Frank Junker
Elbestraße 48
60329 Frankfurt/Main
Tel.: 069/2068-276
E-Mail: f.junker@abg-fh.de



ABGnova GmbH, Unternehmen für Innovationen in der
Energie- und Wohnungswirtschaft (ABGnova)

Bernd Utesch

Ginnheimer Straße 48

60487 Frankfurt/Main

Tel.: 069/21384101

E-Mail: b.utesch@abgnova.de



Hamburger Stadtentwässerung AöR,
ein Unternehmen der HAMBURG WASSER (HSE)

Thomas Giese

Billhorner Deich 2

20539 Hamburg

Tel.: 040/7888-82612

E-Mail: thomas.giese@hamburgwasser.de



Inhalt

Einleitung	10
1 Einführung in die Stoffstromanalyse	12
2 Überblick über das methodische Vorgehen	14
3 Auswahl der Modellgebiete	15
3.1 Vorgehen bei der Auswahl der Modellgebiete	15
3.2 Ausgewählte Gebiete in netWORKS 3 und deren Typologisierung	18
4 Technische Systemvarianten	21
4.1 Methodisches Vorgehen bei der Auswahl der technischen Systemvarianten	21
4.2 Grundlegende Überlegungen bei der Auswahl der technischen Systemvarianten	21
4.3 Allgemeine Beschreibung der technischen Systemvarianten	22
5 Stoffstromanalyse	32
5.1 Softwareauswahl	32
5.2 Auswahl der zu untersuchenden Stoffströme	32
5.3 Festlegung der zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen	33
5.4 Modellierung/Simulation von Stoffströmen	33
5.5 Datensammlung und Parameteridentifizierung	39
5.6 Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation	39
6 Ergebnisse und Diskussion der Stoffstromanalyse	42
6.1 Modellgebiet A: Wohnbebauung einer bisher kaum genutzten Fläche (FFM)	42
6.2 Modellgebiet B: Bürostandort mit Umwandlung/Nachverdichtung (FFM)	47
6.3 Modellgebiet C: Neustrukturierung eines Bildungsstandorts (HH)	51
6.4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation	55
6.5 Weitergehende Ergebnisanalyse und Interpretation	59
7 Zusammenfassung und Folgerung	64
Literatur	65
8 Anhang	69
8.1 Kurzbeschreibung der Rahmenbedingungen in den Städten, die für abwasserinfrastrukturelle Fragestellungen relevant sind	69
8.2 Systemvarianten	72
8.3 Parameterliste für die Stoffstrommodellierungen (Wasser, Energie, Nährstoffe)	81

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Die Schritte der drei Arbeitsstränge Gebietsauswahl, Entwicklung der Systemvariante und Stoffstrommodellierung im zeitlichen Verlauf.....	14
Abbildung 2:	Teilräumliche Priorisierung der Transformation: Städtische Teilräume unterscheiden sich in ihrer Attraktivität.	17
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Systemvariante 1 (kurz: V1) im Modellgebiet A in Frankfurt am Main	24
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Systemvariante 1 (V1) im Modellgebiet C in Hamburg	25
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Systemvariante 2 des Modellgebiets A in Frankfurt am Main, das dem „FFM KonvGrau“-System entspricht	27
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Systemvariante 3 des Modellgebiets C in Hamburg, das dem „HH KonvGrau“-System entspricht	28
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Systemvariante 3 des Modellgebiets A in Frankfurt am Main, das einem ideal-typischen HWC-System mit zusätzlicher WRG entspricht	30
Abbildung 8:	Bilanzierungsbeispiel in einer Stoffstrommodellierung (Baccini/Bader 1996).....	34
Abbildung 9:	Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A.....	43
Abbildung 10:	Energiebedarf und -produktion für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A.....	44
Abbildung 11:	Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A exkl. Niederschlag.....	46
Abbildung 12:	Stickstoffoutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A exkl. Niederschlag	47
Abbildung 13:	Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B.....	48
Abbildung 14:	Energiebilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B	49
Abbildung 15:	Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B exkl. Niederschlag	50
Abbildung 16:	Stickstoffoutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B exkl. Niederschlag.	51
Abbildung 17:	Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C	52
Abbildung 18:	Energiebilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C.	53
Abbildung 19:	Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C.....	54

Abbildung 20: Stickstoffbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C	55
Abbildung 21: Monte-Carlo-Simulation für die Trinkwasserbereitstellung im Modellgebiet C ...	57
Abbildung 22: Monte-Carlo-Simulation für die Strombilanz im Modellgebiet C	58
Abbildung 23: Monte-Carlo-Simulation für Phosphorströme im Modellgebiet C	59
Abbildung 24: Stoffstromdarstellung der Wasserflüsse des Modellgebiets A (Frankfurt) ohne Regenwasser.	61
Abbildung 25: Systemvariante V1 des Modellgebiets A: Referenzsystem	72
Abbildung 26: Systemvariante V2 des Modellgebiets A (Grauwasser- und Abwärmenutzung auf Quartiersebene)	72
Abbildung 27: Systemvariante V3 des Modellgebiets A (Grauwasser- und Abwärmenutzung auf Quartiersebene, Schwarzwasserverwertung)	73
Abbildung 28: Systemvariante V1 des Modellgebiets B: Referenzsystem	73
Abbildung 29: Systemvariante V2 des Modellgebiets B (Grauwassernutzung und Wärmerückgewinnung auf Blockebene)	74
Abbildung 30: Systemvariante V3 des Modellgebiets B (Transformation des bestehenden Trennsystems)	74
Abbildung 31: Systemvariante V1 des Modellgebiets D: Referenzsystem	75
Abbildung 32: Systemvariante V2a des Modellgebiets D (Abwärmenutzung aus großen Mischwasserkanälen)	75
Abbildung 33: Systemvariante V2b des Modellgebiets D (Abwärmenutzung aus großen Mischwasserkanälen und auf Blockebene)	76
Abbildung 34: Systemvariante V3 des Modellgebiets D (Wärmerückgewinnung aus großen Mischwasserkanälen, Regenwassernutzung als Betriebswasser)	76
Abbildung 35: Systemvariante V1 des Modellgebiets C: Referenzsystem	77
Abbildung 36: Systemvariante V2 des Modellgebiets C (überquartierliche Wärmerückgewinnung)	77
Abbildung 37: Systemvariante V3 des Modellgebiets C (Teilstromnutzung auf Quartiersebene)	78
Abbildung 38: Systemvariante V1 des Modellgebiets E: Referenzsystem	78
Abbildung 39: Systemvariante V2a des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Quartiersebene)	79

Abbildung 40: Systemvariante V2b des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Quartiersebene und überquartierliche Wärmerückgewinnung)	79
Abbildung 41: Systemvariante V3 des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Blockebene)	80

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der in der Stoffstrommodellierung diskutierten Modellgebiete	20
Tabelle 2: Zuordnung der spezifischen Systemvarianten der Modellgebiete zu den allgemeinen technischen Systemvarianten	23
Tabelle 3: Systematische Übersicht der untersuchten grundlegenden Systemvarianten	31
Tabelle 4: Sensitive Parameter in der Stoffstrommodellierung	40
Tabelle 5: Überblick über die in der Stoffstrommodellierung eingesetzten Parameter in Hamburg und Frankfurt am Main.	81

Abkürzungen

B-Plan	Bebauungsplan
BHKW	Blockheizkraftwerk
BW	Betriebswasser
CSTR	Continuously stirred tank reactor
E	Einwohner
FFM	Frankfurt am Main
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GW	Grauwasser
HH	Hamburg
HWC	HAMBURG WATER Cycle®; System mit Schwarz- und Grauwassertrennung, bei dem Schwarzwasser über Vakuum abgeleitet und dezentral vergoren wird. Dieses System wird erstmals in der Jenfelder Au in Hamburg umgesetzt. Hier wird eine optimale Variante betrachtet, die im BMBF-Vorhaben KREIS definiert wurde (Giese/Londong 2015).
KA	Kläranlage
KonvGrau	Name der Systemvariante, bei denen Grauwasser getrennt abgeleitet und genutzt wird, während das Schwarzwasser konventionell behandelt wird (vgl. Kap. 4.3).
KREIS	Forschungsprojekt „Kopplung von regenerativer Energiegewinnung mit innovativer Stadtentwässerung“, das in der Jenfelder Au in Hamburg innovative Konzepte und Verfahren für die Versorgung und Entsorgung urbaner Räume am Beispiel eines innerstädtischen Wohngebietes weiterentwickelt und erforscht (Giese/Londong 2015).
MBR	Membranbelebungsreaktor
RW	Regenwasser bzw. Niederschlagswasser
RWB	Regenwasserbewirtschaftung
SW	Schwarzwasser
TR	Trockenrückstandsgehalt
oTR	organischer Trockenrückstandsgehalt
TW	Trinkwasser
TWh	Terawattstunde
TWV	Trinkwasserversorgung
WRG	Wärmerückgewinnung
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket

Einleitung

Die Siedlungswasserwirtschaft hat mehrere Aufgaben zu erfüllen. Es gilt, den Bürgerinnen und Bürgern eine qualitativ einwandfreie und zugleich quantitativ ausreichende Versorgung mit Trinkwasser sicherzustellen. Das anfallende Abwasser ist so zu behandeln, dass es entweder weiter genutzt oder schadlos an die Umwelt abgegeben werden kann. Alle notwendigen Dienstleistungen sind dabei im Sinne der Daseinsvorsorge für die Bürgerinnen und Bürger dauerhaft zugänglich und bezahlbar anzubieten. Zudem sind die Siedlungen vor Überschwemmungen zu schützen und die vorhandenen Ressourcen in ihrer Qualität und, soweit als möglich, Quantität zu erhalten.

In ihrer Aufgabenerfüllung ist die Siedlungswasserwirtschaft zahlreichen dynamischen Entwicklungen unterworfen. Zu diesen zählen demografische Veränderungen, steigende Energiepreise und der Klimawandel. Dadurch gerät das über Jahrzehnte gewachsene System der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zunehmend unter Veränderungsdruck. Die Anpassung der Infrastrukturen verlangt nach neuen intelligenten Ansätzen, die die Wasserinfrastruktur auf die aktuellen und zukünftigen dynamischen Entwicklungen besser (re)agieren lassen.

Der Forschungsverbund netWORKS hat es sich zur Aufgabe gemacht, innovative und nachhaltige Lösungen im Bereich der Wasserver- und Abwasserentsorgung zu erarbeiten, um Kommunen bei der dafür nötigen Umgestaltung ihrer Wasserinfrastruktur zu unterstützen. Technologische oder auch organisatorische Ansätze, die gleichermaßen ökologische, soziale wie ökonomische Vorteile gegenüber tradierten Formen ausweisen, sind dabei von besonderem Interesse. Ob es sich um die Nutzung der im Abwasser enthaltenen Wärme, die Verwendung von Abwasser und seiner Inhaltsstoffe oder die Umnutzung von Abwassernetzen handelt – diese „intelligenten“ und oft semi- oder dezentralen Lösungen versprechen zugleich flexiblere und wirtschaftlichere Wasserinfrastrukturen. Neben interdisziplinärer Zusammensetzung der Forscherinnen und Forscher arbeitet der Verbund mit Städten und ihren Ver- und Entsorgungsunternehmen als Praxispartner zusammen, um deren Wissen und Erfahrungen einzubinden als auch die erarbeiteten Ergebnisse mit ihnen zu reflektieren und weiterzuentwickeln.

Der Forschungsverbund arbeitet inzwischen an seinem dritten Projekt „Intelligente wasserwirtschaftliche Systemlösungen in Frankfurt am Main und Hamburg“. Während es in den Vorgängerprojekten eher um die Erarbeitung von Konzepten und um strategische Überlegungen ging, orientiert sich das dritte Projekt an konkreten Quartieren und den Möglichkeiten der Umsetzung.

Trotz ihrer höheren Flexibilität und Wirtschaftlichkeit haben sich die neuen Lösungen in der Fläche bislang nicht durchgesetzt, denn für die Kommunen und Akteure der Siedlungswasserwirtschaft sind noch viele Fragen offen. Neue technische Lösungen verändern Stadt- und Haustechnik gleichermaßen. Welche Möglichkeiten gibt es beim Umbau hin zu einer nachhaltigen Wasserinfrastruktur? Wie wirken sich innovative Wasserinfrastruktursysteme auf den All-

tag der Bewohner aus? Welche Strategien und neuen Geschäftsmodelle zeichnen sich für Kommunen bzw. die Ver- und Entsorgungswirtschaft ab? Welche Kosten ergeben sich aus neuen Koordinationserfordernissen in der Ver- und Entsorgung? Wie kommen die Akteure vor Ort zu einer umfassenden Bewertung und Auswahl der passenden Maßnahme? Diesen Fragen widmet sich netWORKS 3.

1 Einführung in die Stoffstromanalyse

Die Stoffstromanalyse¹ hat sich als Methode zur Erfassung von Stoff- und Materialströmen (In- und Outputs), von Produkten, Dienstleistungen und Verfahren bewährt (Baccini/Brunner 1991, Brunner/Rechberger 2004). Mithilfe der Stoffstromanalyse können Potenziale zur Reduzierung der Umweltauswirkungen (Reduzierung des Ressourcen- und Energieverbrauchs, Mobilisierung von Wertstoffen; Verringerung von Emissionen etc.) und der Kosten identifiziert werden. Somit können Stoffstromanalysen dazu dienen, die wirtschaftliche und ökologische Leistungsfähigkeit von Verfahren, Dienstleistungen usw. zu optimieren. Die Durchführung von Stoffstromanalysen kann auch bei den Ver- und Entsorgungssystemen als eine Basis bzw. eine Entscheidungshilfe für die Betriebsoptimierung dienen. Durch die Bilanzierung der Input- und Outputdaten können Effizienzsteigerungsmaßnahmen im gesamten System identifiziert werden. Hierzu ist die Erfassung und Analyse aller relevanten Stoffströme notwendig.

Baccini und Mitarbeiter konnten bereits 1993 am Beispiel von St. Gallen zeigen, dass in mitteleuropäischen Städten Wasser der quantitativ wichtigste Stoffstrom ist. Dabei funktioniert die Siedlungswasserwirtschaft als „Durchflussreaktor“. Wasser in Lebensmittelqualität wird mit Energieaufwand in die Städte transportiert, um dort mit Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphat sowie Umweltchemikalien beladen zu werden (Baccini et al. 1993). Die Nährstoffe werden aus dem Abwasser entfernt, bevor es in die Gewässer eingeleitet wird; auch hierfür muss Energie in erheblichem Umfang aufgewendet werden.

Für die Weiterentwicklung von Infrastruktursystemen wurde die Frage aufgeworfen, was an die Stelle dieses an hohen Durchflussmengen ausgerichteten Systems treten kann (Schramm/Kluge 1997, Winker/Schramm 2015). Eine effizientere Aufbereitung einzelner Teilströme und die Orientierung an einer Kreislaufführung haben mittlerweile an Bedeutung gewonnen (DWA 2008a). Dabei sind neue Lösungsansätze wie etwa die neuartigen Sanitärsysteme (kurz NASS; DWA 2008a und 2014) entstanden, die als Systeminnovationen wirken können. Vom Grundsatz her sind die Potenziale der Teilstrombehandlung wissenschaftlich erkannt und die sich daraus ergebenden neuen Möglichkeiten der Infrastrukturanpassung und -auslegung diskutiert worden (z.B. DWA 2008a, DWA 2014).

In der Siedlungswasserwirtschaft werden Stoffstromanalysen vereinzelt verwendet, um Handlungsprioritäten von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen zu ermitteln (Brunner et al. 1990, Huang et al. 2006, Fuchs et al. 2008). Die Erstellung von Stoffstromanalysen für die kommunale Wasserinfrastruktur mit Modellierungs- und Simulationsprogrammen erlaubt, die untersuchten Stoffströme zu dokumentieren, zu bilanzieren und zu vergleichen. Grundlagen der Stoffstrom-

¹ Die Autoren verwenden den Begriff Stoffstromanalyse im Sinne des analytischen Blicks auf das Verfahren. Der Begriff der Stoffstrommodellierung beschreibt das methodische Verfahren, während Stoffstrombilanzierung im Kontext der Ergebnisbetrachtung/Bilanzbetrachtung genutzt wird.

analysen sind dabei Angaben der Praxispartner zu den ausgewählten Modellgebieten/Städten, Literaturangaben zu Stoffströmen und eigene Berechnungen.

Die Stoffstromanalysen erfolgen auf Ebene der identifizierten Modellgebiete in den Städten Frankfurt am Main und Hamburg. Dabei wird auf städtische Gebiete fokussiert, die sich aktuell in einer Neuplanung befinden und bei denen eine Umgestaltung der Wasserinfrastruktur möglich wäre. Es werden die Stoffströme für unterschiedliche Systemvarianten betrachtet; entsprechend werden in den ausgewählten Modellgebieten mit verschiedenen Skalenebenen, Entwicklungsphasen und Randbedingungen unterschiedliche siedlungswasserwirtschaftliche Konstellationen, die einen Umbau (Transformation) und systemische Innovationen beinhalten, dargestellt und auf ihr Realisierungspotenzial hin untersucht. Die wesentlichen technischen Konstellationen sind die getrennte Erfassung und Aufbereitung von unterschiedlichen Abwasserströmen, die Wärmerückgewinnung aus Abwasser oder Abwasserteilströmen sowie die Nutzung von aufbereitetem Abwasser (Grauwasser) zur Substitution von Trinkwasser.

Das Ziel ist es, mithilfe von Simulationen und Szenarien (technische Systemvarianten) die Potenziale der intelligenteren Umnutzung und weitergehenden Umgestaltung der Wasserinfrastruktur seitens der betroffenen Stoffströme Wasser, Energie, Stickstoff und Phosphor abzuschätzen, um so in den Kommunen eine rationale Entscheidung über die angemessene Evolution der technischen Infrastruktur zu ermöglichen. Informationen zur Effizienzsteigerung der Teilströme und der stärkeren Schließung der lokalen Kreisläufe werden darüber erhältlich.

Die leitende Fragestellung dabei lautet:

Inwiefern kann man Stoffstromanalysen für Fragen der Systemoptimierungen in der Wasserinfrastruktur einsetzen? Was kann die Rolle einer Stoffstromanalyse in Planungskonzepten sein?

2 Überblick über das methodische Vorgehen

Das Vorgehen bestand methodisch aus drei Arbeitssträngen: der Gebietsauswahl (siehe Kap. 3), bei der geeignete Modellgebiete in den Städten Frankfurt am Main und Hamburg identifiziert wurden; der Entwicklung der passenden Systemvarianten für die jeweiligen Modellgebiete (siehe Kap. 4) und der Stoffstrommodellierung (siehe Kap. 5). Die drei Arbeitsstränge fanden teilweise parallel statt bzw. haben sich immer wieder aufeinander bezogen. So war z.B. die Entwicklung der Systemvariante auf Gebietsebene erst in dem Moment möglich, als das Gebiet feststand (vgl. Abbildung 1). Sowohl bei der Gebietsauswahl als auch bei der Entwicklung der Systemvarianten wurden die relevanten städtischen Akteure in Frankfurt am Main und in Hamburg über Einzelgespräche und gemeinsame Arbeitstreffen in die Entscheidungsprozesse einbezogen.

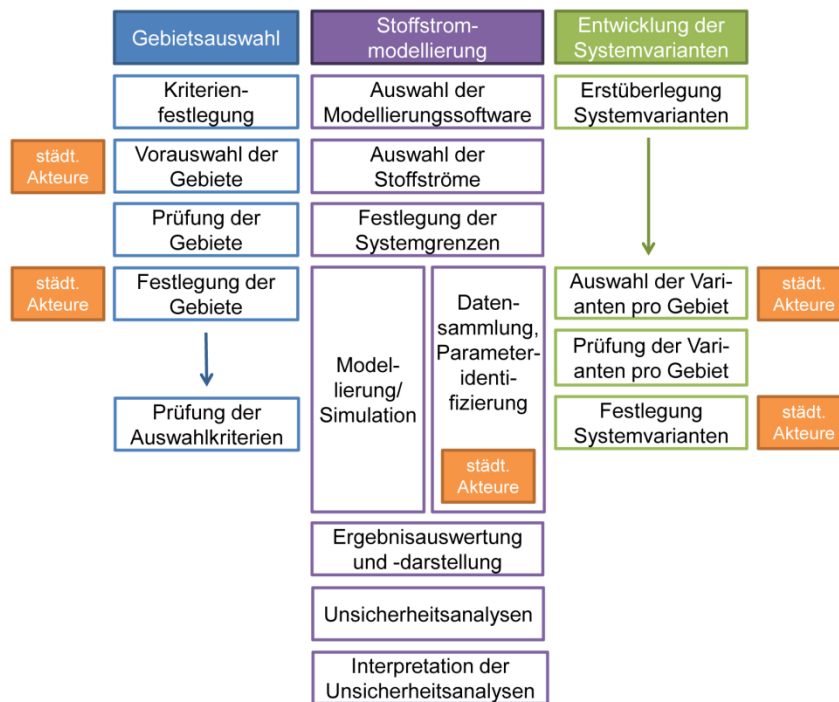


Abbildung 1: Die Schritte der drei Arbeitsstränge Gebietsauswahl, Entwicklung der Systemvariante und Stoffstrommodellierung im zeitlichen Verlauf. An bestimmten Stellen wurden die städtischen Akteure einbezogen.

3 Auswahl der Modellgebiete

3.1 Vorgehen bei der Auswahl der Modellgebiete

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, städtische Gebiete zu identifizieren, die Umwandlungspotenzial besitzen und sich daher eignen würden, um innovative Wasserinfrastruktursysteme im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft umzusetzen. Hierzu wurde auf die Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsprojekts netWORKS 2 zurückgegriffen (vgl. Kluge/Libbe 2010). Dort wurde vor allem jenen städtischen Teilräumen großes Umwandlungspotenzial zugesprochen, die einer hohen Entwicklungsdynamik unterliegen und einen geringen Transformationsaufwand aufweisen. Während die Dynamik von demografischen, sozio-ökonomischen und baulich bestimmten Entwicklungszyklen bestimmt wird, ergibt sich der spezifische Transformationsaufwand aus der technischen Struktur und den Verhältnissen der bestehenden Wasserinfrastruktur und anderen verlegten Infrastrukturen. Stadtplanerische Eingriffe finden vor allem dort statt, wo starke Entwicklungsdynamiken durch Konversion, Umnutzung oder Nachverdichtung auftreten. In Städten, die beispielsweise großen Zuwachs erfahren, werden bestimmte Teilräume nachverdichtet oder im innerstädtischen Bereich stärker Richtung Wohngebiete umgenutzt. Oftmals geht dies mit Sanierungsnotwendigkeiten der Bestandsgebäude einher. Fällt dies nun damit zusammen, dass es vergleichsweise einfach ist, im Zuge der Baumaßnahmen auch öffentliche Maßnahmen im Tiefbaubereich durchzuführen, stehen die Bedingungen günstig, innovative Wasserinfrastrukturen zu implementieren. Der Teilraum ist im Hinblick auf sein Umwandlungspotenzial attraktiv.

Im Forschungsprojekt netWORKS 2 wurden idealtypische Teilräume, sogenannte Teilraumtypen einer Stadt bestimmt. Hierzu wurden die Teilräume, die von ihrer Größe her ungefähr einem Quartier entsprechen können, nach ihren Hauptmerkmalen bestimmten Teilraumtypen zugeordnet. Ein Teilraum mit überwiegendem Gewerbebestand würde somit dem Typ „Gewerbegebiet“, ehemalige umzunutzende Militärkasernen dem Typ „Konversionsgebiet“ zugeordnet; befinden sich im Teilraum vor allem mehrgeschossige Wohnungen, so entspräche er dem Typ „Geschosswohnungsbau“ usw. (vgl. Kluge/Libbe 2010: 43ff.). Diese insgesamt 16 Teilraumtypen wurden zudem je nach Lage der „Innenstadt“, „Innenstadtrandlage“, „Peripherie“ oder dem „Außengebiet“ zugeordnet. Für die verschiedenen Teilraumtypen ergeben sich durch ihren unterschiedlichen Charakter verschiedene Entwicklungsdynamiken und Transformationsaufwände (vgl. Kluge/Libbe 2010: 48, Abb. 3), so dass deutlich wird, dass verschiedene Teilraumtypen in ihrem Umwandlungspotenzial (und damit in ihrer Attraktivität) differieren. So ist das Umwandlungspotenzial des Teilraumtyps „Kerngebiet“ in der Innenstadt gering, da trotz hoher Entwicklungsdynamik der Transformationsaufwand sehr hoch ist, während z.B. ein Konversionsgebiet in Innenstadtrandlage ein hohes Umwandlungspotenzial hätte. Die Priorisierung bestimmter Teilräume für stadtplanerische Aktivitäten macht auch deutlich, dass Transformationsprozesse sukzessive stattfinden (Kluge/Libbe 2010).

In Abgrenzung zu der Terminologie in B-Plänen wird die hier genutzte Begrifflichkeit zur Kategorisierung der Teilraumtypen auf aggregierter Ebene verwendet. So kann z.B. ein Mischgebiet in Innenstadtrandlage durchaus reine Industrie- oder Gewerbegebiete gemäß B-Plan enthalten, allerdings in der Gesamtstruktur ein Mischgebiet ergeben (zur Charakterisierung der Teilraumtypen vgl. auch Kluge/Libbe 2010: 44, Tab. 3). Die hier gebrauchten Begriffe werden also nicht im Sinne der Baunutzungsverordnung verwendet (es sei denn, dies ist explizit ausgewiesen).

Im Forschungsverbund netWORKS 3 wurden nun auf theoretischer Ebene für die zuvor entwickelten Teilraumtypen Kriterien abgeleitet, die die Entwicklungsdynamik und den Transformationsaufwand beeinflussen. Die Kriterien wurden mithilfe einer Ordinalskala bewertet (-/0/+) und kumuliert. So zeichnet sich beispielsweise der Teilraumtyp „Konversionsgebiet in Innenstadtrandlage“ im Hinblick auf die Entwicklungsdynamik durch attraktive Lage, verfügbare Flächen und Marktfähigkeit aus. All diese Kriterien fördern die Entwicklungsdynamik. Auf aggregierter Ebene ergibt sich also eine hohe Entwicklungsdynamik (++). Hinsichtlich des Transformationsaufwands zeichnet sich das Gebiet aus durch einfache Erschließung, nicht vorhandene Nutzer, vorhandene Infrastruktur, die flexibel nutzbar ist sowie eine gesicherte Verfügbarkeit und geringe Akteurszahl. All diese Kriterien sprechen für einen niedrigen Transformationsaufwand, was daher auch in diesem Falle auf aggregierter Ebene einen förderlichen Effekt (++) auf eine mögliche Umwandlung hat. Kriterien, die in Gesprächen mit den Stadtplanern/städtischen Akteuren genannt wurden, decken sich größtenteils mit den theoretisch erarbeiteten Kriterien. Häufig spielten „Lage“, „Marktfähigkeit“, „Komplexität der bestehenden Infrastruktur“, „bauliche Dichte“ oder „Streubesitz“ eine Rolle.

Zudem wurde festgestellt, dass einige Kriterien je nach spezifischer städtischer Situation verschiedene Wirkungen haben können. Handelt es sich um wachsende Städte, so können beispielsweise „Geschosswohnungen in der Peripherie“ durchaus attraktiv werden und eine hohe Entwicklungsdynamik entfalten, während davon in schrumpfenden Städten nicht auszugehen ist. Das in netWORKS 2 entwickelte Modell (Kluge/Libbe 2010: 48, Abb. 3) konnte darauf aufbauend erweitert und differenziert werden (siehe Abbildung 2).

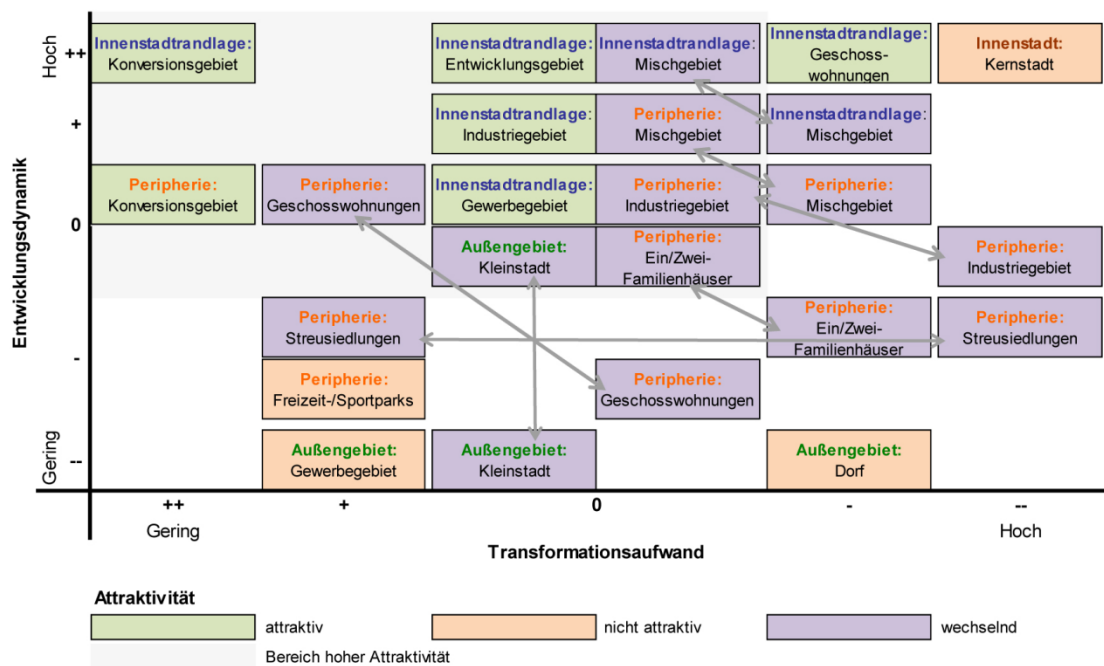


Abbildung 2: Teilräumliche Priorisierung der Transformation: Städtische Teilräume unterscheiden sich in ihrer Attraktivität. Die als „wechselnd“ charakterisierten Teilräume sind sehr stark von der spezifischen städtischen Situation beeinflusst. Während sie in wachsenden Städten eher im attraktiven Bereich liegen, wären sie in schrumpfenden Städten eher im unattraktiven Bereich zu finden, da hier tendenziell eine geringere Entwicklungsdynamik und ein höherer Transformationsaufwand zu erwarten wäre.

Die sieben als wechselnd charakterisierten Teilraumtypen sind je nach spezifischer städtischer Situation unterschiedlich einzuordnen. Dies ist vor allem durch die Entwicklungsdynamik der jeweiligen Städte bestimmt. Je stärker der Bevölkerungszuwachs, umso größer der Bedarf an Siedlungsfläche, so dass auch unattraktive Räume potenziell attraktiv werden können. Andere Teilraumtypen ließen sich unabhängig von der Entwicklungsdynamik der Städte charakterisieren. So ergibt sich in Bezug auf das Umwandlungspotenzial die Zuordnung zu einer von drei möglichen Gruppen:

- attraktive Teilräume: mittlere bis hohe Entwicklungsdynamik und geringer bis akzeptabler Transformationsaufwand; Beispiel: Konversionsgebiet in Innenstadtrandlage
- eher unattraktive Teilräume: geringe bis keine Entwicklungsdynamik und hoher bis sehr hoher Transformationsaufwand; Beispiel: Dorf im Außengebiet
- wechselnde bzw. ggf. attraktive Teilräume, die je nach Stadt und der regionalen Entwicklung sehr unterschiedlich bzgl. ihrer Entwicklungsdynamik und ihres Transformationsaufwandes einzuschätzen sind; Beispiel: Kleinstadt im Außengebiet oder Geschosswohnungen in der Peripherie.

Da sowohl Frankfurt am Main als auch Hamburg großen Zuwachs erfahren, handelt es sich bei den wechselnden Teilraumtypen in diesen Städten hauptsächlich um attraktive Teilräume.

Diese Priorisierung der Teilräume diente als Ausgangspunkt für die Auswahl möglicher Gebiete in den beiden Projektstädten. Die Gebietsauswahl erfolgte in Gesprächen mit den jeweiligen Fachbehörden, die ihrerseits Vorschläge gemacht haben. Bei allen vorgeschlagenen Modellgebieten handelt es sich um reale Quartiere in Frankfurt am Main und Hamburg, die sich aktuell in einem Planungsprozess befinden. Diese Gebiete wurden dann auf den Stand der Planung, die Siedlungsstruktur, wasserwirtschaftliche Gegebenheiten und die soziale Situation hin analysiert und auf ihre Eignung geprüft. Im gemeinsamen Workshop mit der Fachbehörde und dem verantwortlichen Akteur für die Entwässerung wurde die finale Auswahl getroffen. Die fünf ausgewählten Modellgebiete, zwei in Hamburg, drei in Frankfurt am Main, konnten vier verschiedenen Teilraumtypen zugeordnet werden: zwei Entwicklungsgebiete in Innenstadtrandlage, ein Konversionsgebiet in Innenstadtrandlage, ein Mischgebiet in Innenstadtrandlage sowie ein Mischgebiet in der Peripherie. Alle Gebiete gehören zu den attraktiven Teilräumen. Somit konnte die These bestätigt werden, dass insbesondere Gebiete mit hoher Entwicklungsdynamik und geringem Transformationsaufwand für eine Umwandlung in Betracht gezogen werden.

3.2 Ausgewählte Gebiete in netWORKS 3 und deren Typologisierung

Da im Folgenden nicht alle Modellgebiete im Einzelnen vorgestellt werden können, werden beispielhaft drei (Modellgebiet A, B und C) herausgegriffen. Um diese drei auszuwählen, wurden die Modellgebiete anhand charakteristischer Merkmale, insbesondere der Eigentumsstruktur, typologisiert. Beide Städte und beide Typen sollten vertreten sein. Dadurch konnte eine möglichst große Spannbreite an Modellgebieten abgebildet werden.

Typ I: Die Stadt verfügt über große Flächen und kann die Entwicklung dadurch deutlich beeinflussen. Das Gebiet verfügt über ein großes Potenzial in der Nachverdichtung. Große Gebäudeanteile werden neu gebaut. Die Erstellung oder Änderung eines Bebauungsplanes ist verhältnismäßig einfach, da sich im Vergleich zu Typ II weniger Stakeholder einigen müssen. Wenn Aushandlungsprozesse einfacher sind, kann unter Umständen von einer höheren Entwicklungsdynamik ausgegangen werden.

Typ II: Flächen sind überwiegend in privater Hand. Gewerbe oder Industrie sind bereits angesiedelt. Verhandlungen mit derzeitigen Eigentümern sind notwendig, was die Erstellung oder Änderung des Bebauungsplanes verzögern kann. Hinzu kommt, dass in der Baunutzungsverordnung definierte Gewerbe- oder Industriegebiete andere Emissionsgrenzen einhalten müssen als Wohngebiete. Das erschwert, im Unterschied zu Typ I, die Errichtung von Wohnbebauung.

Die drei Modellgebiete, A, B und C werden im Folgenden näher betrachtet. Tabelle 1 zeigt die charakteristischen Merkmale dieser Modellgebiete und ordnet sie den oben beschriebenen

Typen zu. Um den realen Prozess nicht zu beeinflussen, wurden die Modellgebiete anonymisiert.

Die Eigentumsstruktur kann vor allem auch in Bezug auf den institutionellen Rahmen bedeutsam werden. Weitere Informationen hierzu finden sich auch in Kerber et al. (2016).

Tabelle 1: Übersicht der in der Stoffstrommodellierung diskutierten Modellgebiete

Modellgebiet	Kurzbezeichnung und Beschreibung		Charakterisierung nach derzeitigem Teilraumtyp (netWORKS 3 Terminologie)	Charakterisierung nach zukünftigem Teilraumtyp (netWORKS 3 Terminologie)	Charakterisierung nach B-Plan	Wasserinfrastrukturelle Merkmale	Eigenumsstruktur	Charakterisierung nach Typologie (vgl. oben)
Frankfurt am Main	A	Wohnbebauung einer bisher temporär bzw. extensiv genutzten Fläche	Innenstadtrandlage: Konversionsgebiet (attraktiv)	Innenstadtrandlage: Mischgebiet, (attraktiv)	Gewerbegebiet (GE), Gartenbauwirtschaftliche Fläche (B-plan erfordert Überarbeitung, noch im Verfahren)	Weitgehende RWB im Gebiet; Kanalisationsneubau im Quartier mit Trennkanalisation; innovatives Projekt in früher Planungsphase bietet Potenzial für innovative Wasserinfrastruktur	Sehr heterogen; Vielzahl an Eigentümern und Pächtern; große Flächen im Eigentum der Stadt, eine große Fläche im Eigentum eines Unternehmens	Typ I
	B	Bürostandort mit Umwandlung/ Nachverdichtung im Wohnbereich	Peripherie: Mischgebiet (attraktiv)	Peripherie: Mischgebiet (attraktiv) Wandel von Peripherie zu Innenstadtrandlage auch möglich	Mischgebiete (MI), Kerngebiete (MK), Sondergebiete (SO)	Trennkanalisation im Quartier vorhanden; RWB; Versickerungsfähiger Sandboden (aber Grundwasserspiegel rel. hoch); keine großen Schmutzwasserkanäle, die sich für WRG eignen; Gewässer in der Nähe: Schwarzbach	überwiegend Privateigentum, das durch Kapitalgesellschaften verwaltet wird; Grundstücke im Plangebiet nur vereinzelt in städtischem Besitz	Typ II
Hamburg	C	Neustrukturierung eines bisher reinen Schul-/Bildungsstandortes, Erhöhung des Wohnanteils	Innenstadtrandlage: Entwicklungsgebiet (attraktiv)	Innenstadtrandlage: Mischgebiet (attraktiv)	Noch kein rechtsverbindlicher B-Plan	Vorhandene Mischkanalisation; RWB notwendig, da Kanalkapazität ausgeschöpft; Gebiet ist von Fernwärmenetz umgeben	Gesamte Fläche im Eigentum der Stadt Hamburg bis auf einen S-Bahn-Ausgang	Typ I

4 Technische Systemvarianten

Dieses Kapitel beinhaltet die Vorgehensweise und grundlegende Überlegungen bei der Auswahl der technischen Systemvarianten sowie deren Beschreibung.

4.1 Methodisches Vorgehen bei der Auswahl der technischen Systemvarianten

Bei der Auswahl der technischen Systemvarianten wurde ein zweistufiges Verfahren gewählt. Zunächst wurde über eine Betrachtung des aktuellen Entwicklungsstands, eine Abschätzung der weiteren Entwicklung und diskutierten Trends sowie den aktuell in der Umsetzungsdiskussion befindlichen Systemoptionen eine Grundausswahl von Systemvarianten getroffen und beschrieben. Eine erste Sammlung möglicher Systemvarianten geschah in Absprache und Rückabstimmung mit den Projektpartnern. Für die technischen Aspekte fand eine enge Abstimmung mit Hamburg Wasser statt, außerdem wurde die technische Lösung der Frankfurter Umsetzung (Systemvariante FFM KonvGrau) berücksichtigt. Eine Überprüfung bzgl. der Sinnigkeit mit Blick auf die Akteurskonstellationen und möglichen institutionellen Belange fand durch einen gemeinsamen Workshop mit den daran arbeitenden Projektpartnern statt. Durch die Überlegungen zur Einbringung der Varianten in den Modellgebieten wurden die im Kap. 4.3 vorgestellten fünf Systemvarianten als interessant identifiziert und teilweise auch ausgehend von den grundlegenden Systemvarianten nochmals gebietsspezifisch leicht modifiziert.

4.2 Grundlegende Überlegungen bei der Auswahl der technischen Systemvarianten

Trinkwasser

Grundsätzlich bleibt in allen Systemvarianten die zentrale Trinkwasserversorgung bestehen. Allerdings kann die Einführung neuer Systemvarianten auch Veränderungen bei der Wasserversorgung nach sich ziehen. Diese werden in der Bewertung der Varianten mit Blick auf die Gebiete zu prüfen sein. So kann z.B. ein geringerer Bedarf von Wasser mit Trinkwasserqualität durch die Bereitstellung von Betriebswasser zu einer Reduktion des Trinkwasserbedarfs führen. Daraus folgt nicht nur eine Verminderung der Wasserförderung, sondern auch eine potenzielle Verringerung der Querschnitte der Trinkwasserleitungen, welche zudem eine separate Löschwasserversorgung im Gebiet erforderlich machen könnte.

Niederschlagswasser

Niederschlagswasser ist wichtig für die ganzheitliche Betrachtung. Häufig ist es in der raumplanerischen Neugestaltung der wichtigste Ausgangspunkt für alternative Überlegungen. Da Niederschlagswasser jedoch nicht im Fokus der Projektüberlegungen steht und es zu keiner Ver-

zerrung dadurch kommen soll, dass es in der einen Variante berücksichtigt wird und in der anderen nicht, wurde folgender Umgang beschlossen:

- Im Referenzszenario wird das Niederschlagswasser analog der bestehenden Planung betrachtet, die sich stark an den bestehenden Standards und Anforderungen in den beiden Städten orientiert. Das heißt, für die zentralen Systeme wird von einem qualitativen Trennsystem ausgegangen, welches zunächst die Retention/den Rückhalt des Niederschlagswassers im Gebiet vorsieht und den abzuleitenden Abfluss drosselt.
- Für die weiteren Systemvarianten wird für die Erfassung des Niederschlagswassers von einer Trennkanalisation ausgegangen. Für das Niederschlagswasser ist zu einem gewissen Grad ein Rückhalt bzw. lokale Versickerung nach vorheriger Behandlung vorgesehen (siehe hierzu z.B. im Anhang Abbildung 25), der ebenfalls eine gedrosselte Ableitung folgt. Als zusätzliches Element kommen hier Gründächer hinzu. Ggf. erfolgt an der Gebietsgrenze eine Übergabe in den Mischkanal.

Nutzung von Betriebswasser

Zunächst wurde in den Systemvarianten davon ausgegangen, dass grundsätzlich der gesamte Wasserbedarf, der in den Haushalten nicht als Trinkwasser zum Einsatz kommt, durch Betriebswasser ersetzt werden wird. Also auch für Zwecke wie Reinigen, Wäschewaschen, Grünpflege oder Geschirrspülen.

Diese Annahme wurde nach Auswahl der Systemvarianten für die Gebiete revidiert, da dort nicht nur Eigenheime entstanden, sondern auch Mietwohnungen, in denen nach der derzeitigen rechtlichen Lage für die genannten Prozesse Trinkwasser (auf Verlangen) angeboten werden muss. So wird vereinfachend davon ausgegangen, dass das Betriebswasser zunächst nur für die Toilettenspülung eingesetzt wird. Auch eine Grünpflege ist darüber hinaus möglich. Die wurde hier aus Gründen der Vereinfachung zunächst nicht berücksichtigt.

Co-Substrate

Co-Substrate werden in den konventionellen Systemvarianten, wie aktuell praktiziert (in Hamburg: geringe Menge, in Frankfurt: keine), mitbilanziert (siehe auch Kap. 5.4.2). Außerdem kommen sie auch im HWC zum Einsatz (Kap. 4.3.5). Alle Modellierungen, die auf dem (bzw. Teilen des) konventionellen Frankfurter System(s) basieren, haben keine Co-Substrate berücksichtigt.

4.3 Allgemeine Beschreibung der technischen Systemvarianten

Nach Auswahl der Modellgebiete in Frankfurt am Main und Hamburg (siehe Kap. 3) wurde in einem zweiten Schritt geprüft, welche der grundlegenden Systemvarianten für die ausgewählten Gebiete interessant sind. Gemeinsam mit den städtischen Akteuren wurden dabei folgende fünf definiert: konventionelles System Frankfurt am Main, konventionelles System Hamburg, FFM

KonvGrau, HH KonvGrau, Hamburg Water Cycle (HWC). Sie werden im Folgenden genauer beschrieben.

Die betrachteten Systemvarianten lassen sich jeweils in unterschiedlicher Kombination aus den folgenden Systemmodulen zusammensetzen:

- Konventionelle Abwasserableitung und -behandlung
- Konventionelle Abwasserableitung und -behandlung in Kombination mit einer Grauwasserabtrennung, ggf. nur leichtes Grauwasser ohne Küchenabwasser, und aktiven Nutzung
- Getrennte Ableitung von Schwarz- und Grauwasser, ggf. Ableitung des Schwarzwassers mittels Vakuum

Zusätzlich ist jedes Systemmodul mit Wärmerückgewinnung als additives technisches Element denkbar.

Die Anpassung der Systemvarianten an die Erfordernisse der ausgewählten Modellgebiete geschah im Austausch mit den Abwasserunternehmen und den Stadtplanungsämtern der beiden Städte. Pro Modellgebiet A, B und C wurden auf diese Weise ein Referenzsystem jeweils benannt als Systemvariante 1 bzw. V1 und zwei neuartige Systemvarianten, entsprechend Systemvarianten 2 und 3 bzw. V2 und V3, definiert, für die jeweils eine Modellierung durchgeführt wurde. Kriterien in der Festlegung der Systemvarianten waren die örtlichen und das Gebiet umgebenden Rahmenbedingungen wie etwa die bereits bestehende Kanalisation, der Anschluss des Gebiets an die bestehende Kanalisation/die Nutzung der umliegenden Kanalisation, die Gebietsgröße, die zu erwartenden Nutzungsmuster aufgrund des Teilraumtyps und sozialer Aspekte, die planerischen Ansprüche an das Gebiet und der verfügbare Raum. Welche technischen Systemvarianten in den Modellgebieten betrachtet werden, zeigt Tabelle 2. Komplette Abbildungen zu den verschiedenen Systemvarianten finden sich im Anhang (Kap. 8.2). Systemvarianten für die Modellgebiete, die in dieser Publikation nicht näher behandelt werden (Modellgebiete D und E), finden sich ebendort (Kap. 8.2.3 und 8.2.5).

Tabelle 2: Zuordnung der spezifischen Systemvarianten der Modellgebiete zu den allgemeinen technischen Systemvarianten

	Systemvariante 1 (V1)	Systemvariante 2 (V2)	Systemvariante 3 (V3)
Modellgebiet A	Konventionelles System FFM	FFM KonvGrau Quartiersebene	HWC mit zusätzl. WRG
Modellgebiet B	Konventionelles System FFM	FFM KonvGrau Blockebene	FFM KonvGrau Quartiersebene
Modellgebiet C	Konventionelles System HH	Konventionelles System HH mit WRG	HH KonvGrau Quartiersebene

4.3.1 Konventionelles System in Frankfurt am Main

Die Erfassung und Ableitung des Abwassers erfolgt über eine Trennkanalisation. In der zentralen Kläranlage findet die dreistufige Abwasserbehandlung statt (mechanisch, biologisch, chemisch). Der Kläranlagenablauf geht ins Oberflächengewässer. Klärschlamm wird ohne vorgeschalteten Faulungsprozess unter Zugabe von Heizöl verbrannt. Reststoffe werden im Bergbau deponiert (SEF o.J.). Strom und Wärme aus dem Verbrennungsprozess werden genutzt (vgl. Tabelle 3).

Das konventionelle System spiegelt den aktuellen Stand der Technik und eignet sich daher als Referenzsystem. Die Details orientieren sich stark an den spezifischen Gegebenheiten der Stadt und den hierzu verfügbaren Daten. Eine nähere Beschreibung der bestehenden Wasser- und -entsorgungsstruktur von Frankfurt am Main findet sich im Anhang (Kap. 8.1.1).

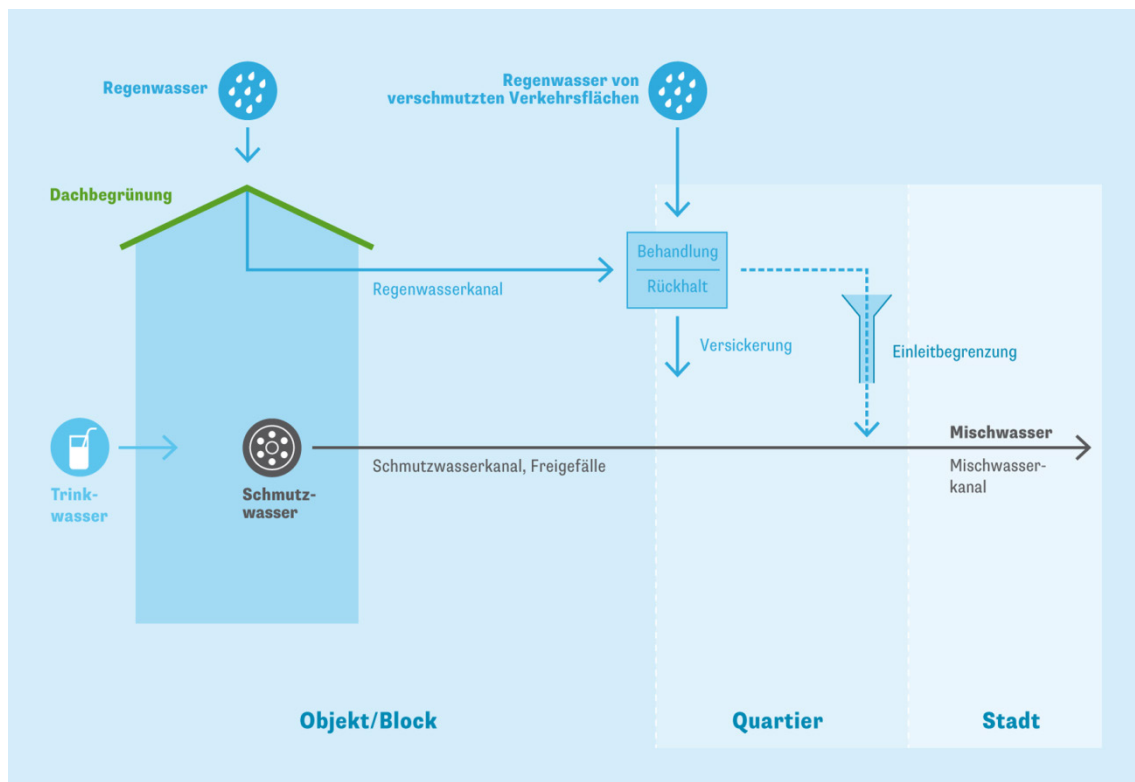


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Systemvariante 1 (kurz: V1) im Modellgebiet A in Frankfurt am Main

Abbildung 3 zeigt die konventionelle Abwasserbeseitigung im Modellgebiet A (vgl. Tabelle 1) in Frankfurt am Main, das zugleich das Referenzsystem bzw. die Systemvariante 1 (V1) bildet. Zusätzlich wurde in dem Modellgebiet von einer Behandlung des verschmutzten Regenwassers auf Block- bzw. Quartiersebene oder einem größtmöglichen Rückhalt ausgegangen. Im Gegensatz dazu gibt es im Referenzsystem des Modellgebiets B keine Behandlung des Regenwassers. Hier ist geplant, Regenwasser auf privaten Flächen zurückzuhalten und zu versickern.

Angestrebt ist eine Drosselung, bevor das Regenwasser über die existierende Trennkanalisation abgeleitet wird (vgl. auch Anhang, Kap. 8.2.2).

4.3.2 Konventionelles System in Hamburg

Die Abwassererfassung und -ableitung erfolgt teilweise über eine Trenn- und teilweise über eine Mischkanalisation. Nach der dreistufigen zentralen Abwasserbehandlung (mechanisch, biologisch, chemisch) geht der Ablauf ins Oberflächengewässer. Klärschlamm und geringe Mengen an Co-Substraten gehen in die Vergärung, Gärreste und Faulgas werden thermisch verwertet (Hamburg Wasser 2010). Dadurch entstehende Wärme und Strom werden intern auf der Kläranlage und die Wärme auch zusätzlich extern (zur Versorgung von einem benachbarten Containerterminal über eine Nahwärmeleitung) genutzt (Hamburg Wasser 2010). Auch wird eine kleine Menge aufbereitetes Faulgas (< 10%) als Biomethan in das Gasnetz eingespeist. Gips und Reste aus der Verbrennung gehen als Baustoffe in die Bauindustrie (vgl. Tabelle 3), Schwermetalle werden monodeponiert. Die Asche wird rückholbar monodeponiert, damit sie später für eine Phosphorrückgewinnung zugänglich ist (Hamburg Wasser 2010).

Auch hier wurde das konventionelle System aus zuvor genannten Gründen als Referenzsystem gewählt. Eine nähere Beschreibung der bestehenden Wasserver- und -entsorgungsstruktur von Hamburg findet sich im Anhang (Kap. 8.1.2).

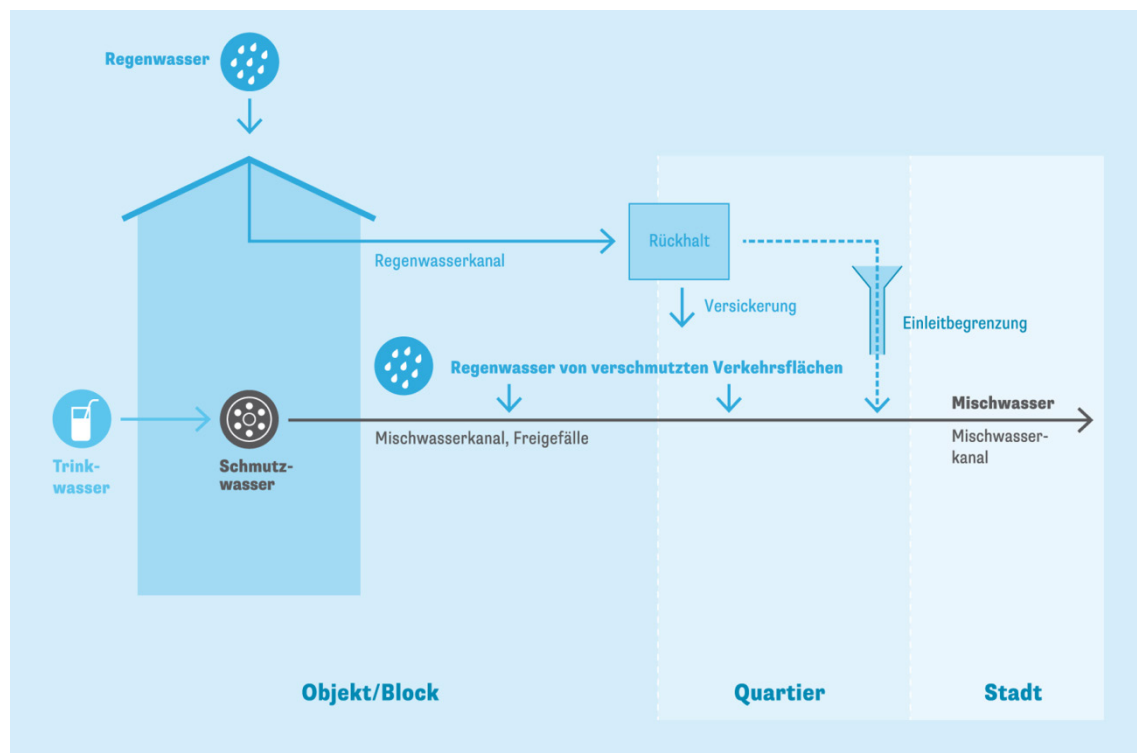


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Systemvariante 1 (V1) im Modellgebiet C in Hamburg

Abbildung 4 zeigt die konventionelle Abwasserbeseitigung im Modellgebiet C (vgl. Tabelle 3) in Hamburg, das zugleich das dortige Referenzsystem ist. Im Unterschied dazu wird in Systemvariante 2 desselben Modellgebiets eine überquartierliche Wärmerückgewinnung (WRG) aus dem Mischwasserkanal mitbetrachtet (vgl. Anhang, Kap. 8.2.4).

4.3.3 FFM KonvGrau

In dieser Systemvariante werden „leichtes“ Grauwasser (Abwasser aus Dusche und Waschbecken sowie Waschmaschinenabläufen)² und Schwarzwasser (Toilettenabwasser und zusätzlich Küchenabwasser) getrennt erfasst und abgeleitet. Schwarzwasser wird weiterhin konventionell behandelt (vgl. Kap. 4.3.1). Beim Grauwasser findet Wärmerückgewinnung und Aufbereitung statt. Das Grauwasserverfahren kann wahlweise auf Haus-, Blockebene oder für ein gesamtes Gebiet/Quartier installiert werden. Auf Blockebene erfolgt die Grauwasseraufbereitung über Wirbelbettreaktoren inklusive Desinfektion (Nolde o.J.) und auf Quartiersebene über eine Vollbiologie inklusive P-Fällung³ (Giese/Londong 2015). In dieser technischen Variante wurde von einer Etablierung der Behandlung auf Quartiersebene ausgegangen, wenn nicht anders benannt. Somit entstehen einerseits auf der zentralen Kläranlage Strom und Wärme durch das zugeführte Schwarzwasser, andererseits wird aufbereitetes Grauwasser dezentral energetisch und stofflich genutzt (Wärme für Trinkwassererwärmung und/oder Heizung, Betriebswasser für Toilettenspülung (vgl. Tabelle 3)).

Eine solche Variante erfordert wenige Berührungspunkte und Verhaltensänderungen auf Seiten der BewohnerInnen, wird von privaten Investoren bereits diskutiert und kleinräumig umgesetzt (siehe z.B. Heffer et al. 2015). Diverse Anlagen sind auf dem Markt für diese Skalengröße verfügbar. Eine Ausweitung auf die Quartiersebene ist vorstellbar. Darüber hinaus ist der rechtliche und institutionelle Rahmen bereits relativ sicher und gut überschaubar, wie die Umsetzung des Frankfurter Praxispartner ABG/ABGnova zeigt (vgl. auch Kerber et al. 2016, Löw 2011, Nolde o.J.).

² Im DWA-Themenband A272 (DWA, 2008) als schwach belastetes Grauwasser bezeichnet.

³ Diese Technik wurde aufgrund der Datenverfügbarkeit gewählt. Bisher ist keine Anlage auf Quartiersebene in Betrieb oder wurde für solch einen Einsatz in kleinerem Maßstab pilotiert, die nur leichtes Grauwasser behandelt. Die bisher einzig geplante Anlage auf Quartiersebene soll mit Grauwasser betrieben werden (Giese/Londong 2015). Dies bedeutet, dass der Energiebedarf bei leichtem Grauwasser wahrscheinlich geringer wäre als nun über die verfügbaren Daten kalkuliert. Auch eine Techniko Optimierung mit Blick auf Phosphor und Stickstoff ist zu diskutieren, da in leichtem Grauwasser nur 50% des P-Gehalts bzw. 33% des N-Gehalts im Vergleich zu Grauwasser enthalten ist (siehe auch Tabelle 5).

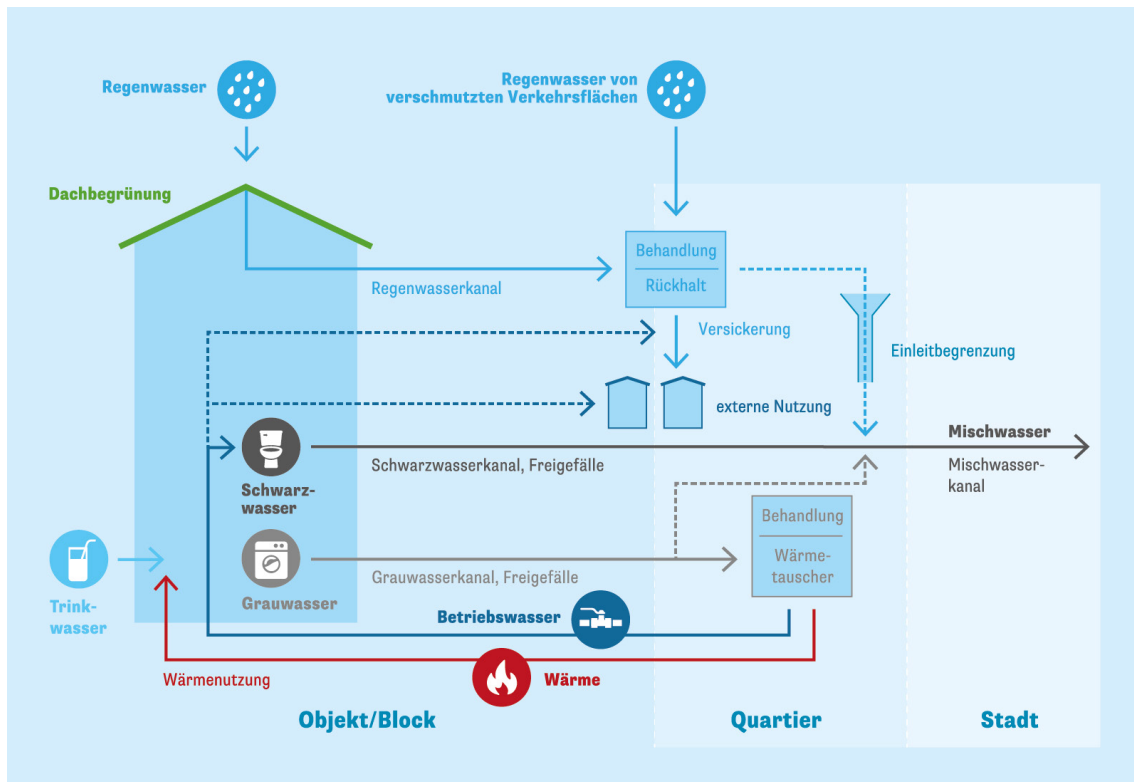


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Systemvariante 2 (V2) im Modellgebiet A in Frankfurt am Main, das dem „FFM KonvGrau“-System entspricht.

Abbildung 5 zeigt die Systemvariante 2 des Modellgebiets A, in der leichtes Grauwasser getrennt abgeleitet und aufbereitet wird, um anschließend für die Toilettenspülung genutzt zu werden. Gleichzeitig findet am Ort der Aufbereitung, auf Quartiersebene, auch eine Wärmerückgewinnung statt. Dadurch kann das Trinkwasser im Quartier vorerwärmt werden (die Wärme kann auch für die Wärmeversorgung/Nahwärme genutzt werden). Im „FFM KonvGrau“-System wird außerdem das Regenwasser von verschmutzten Verkehrsflächen behandelt, bevor es ins Rückhaltebecken gelangt. Weitere Systemvarianten des Typs „FFM KonvGrau“ sind Systemvarianten 2 und 3 des Modellgebiets B. In Modellgebiet B kommt „FFM KonvGrau“ in der Systemvariante 2 auf Blockebene und in der dritten Systemvariante auf Quartiersebene vor. Dazu wird die vorhandene Trennkanalisation umgenutzt, indem Inliner eingezogen werden: Schwarzwasser wird über den ehemaligen Schmutzwasserkanal, Grauwasser über den ehemaligen Regenwasserkanal abgeleitet (vgl. Anhang, Kap. 8.2.1 und 8.2.2). Das Regenwasser wird im Gebiet vollständig dezentral versickert, was sich aufgrund des vorhandenen Sandbodens sehr gut anbietet.

4.3.4 HH KonvGrau

In diesem System wird Grauwasser (Abwasser aus Dusche, Waschbecken und Waschmaschinenabläufen sowie Küchenabwasser) und Schwarzwasser (hier nur Toilettenabwasser) getrennt erfasst und im Falle des Schwarzwassers mit Vakuum im Quartier abgeleitet. An der Quartiersgrenze wird es in die konventionelle Kanalisation überführt. Hintergrund dieses Ansatzes ist, das Gebiet mittelfristig mit weiteren angrenzenden kleineren Gebieten zusammenzuführen und das Schwarzwasser dann ebenfalls vor Ort zu behandeln. Das Schwarzwasser wird in die zentrale Kläranlage transportiert und dort konventionell behandelt (vgl. Kap. 3.3.2). Beim Grauwasser findet Wärmerückgewinnung und Aufbereitung zu Betriebswasser statt (Giese/Londong 2015). Auf Blockebene erfolgt die Grauwasseraufbereitung über Wirbelbettreaktoren inklusive Desinfektion (Nolde o.J.) und auf Quartiersebene über eine Vollbiologie inklusive P-Fällung (Giese/Londong 2015). Die P-Fällung wird aufgrund der Versickerung des überschüssigen Betriebswassers nötig. Hier wurde von einer Etablierung der Behandlung auf Quartiersebene ausgegangen, wenn nicht anders benannt. Das aufbereitete Grauwasser wird als Betriebswasser und die darin enthaltene Wärme auf Quartiersebene genutzt (vgl. Tabelle 3). Der Unterschied zu „FFM KonvGrau“ besteht vor allem darin, dass Grauwasser statt leichtem Grauwasser abgeleitet wird, was eine andere Aufbereitung erfordert. Durch die Unterdrucktechnologie wird zudem weniger Wasser für den Transport des Abwassers benötigt und somit Wasser für die Toilettenspülung eingespart.

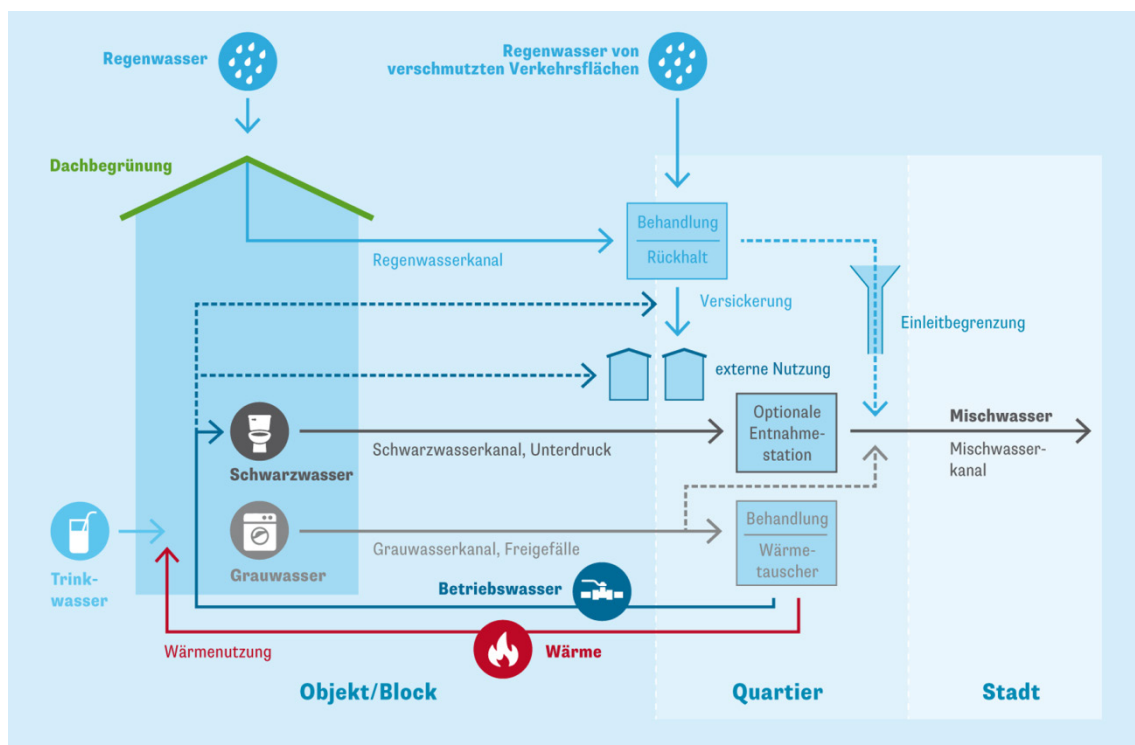


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Systemvariante 3 (V3) im Modellgebiet C in Hamburg, das dem „HH KonvGrau“-System entspricht.

Abbildung 6 zeigt die Systemvariante 3 des Modellgebiets C, in der Grauwasser getrennt abgeleitet und aufbereitet wird, um anschließend für die Toilettenspülung genutzt zu werden. Das Betriebswasser, das für diesen Zweck nicht genutzt wird, steht für andere Einsatzmöglichkeiten zur Verfügung bzw. kann versickert werden, überschüssiges Betriebswasser muss evtl. abgeleitet werden. Das Schwarzwasser wird in der zentralen Kläranlage konventionell behandelt. Die Grauwasseraufbereitung und Wärmerückgewinnung findet auf Quartiersebene statt.

4.3.5 Hamburg Water Cycle (HWC)

Schwarz- und Grauwasser werden im Gebiet getrennt erfasst und abgeleitet. Im Falle von Schwarzwasser kommt ein Vakuumsystem zum Einsatz, wodurch nur geringe Mengen an Wasser für den Transport erforderlich sind. Die Grauwasseraufbereitung erfolgt über eine biologische Behandlung mit P-Fällung, danach wird es als Betriebswasser genutzt. Schwarzwasser wird gemeinsam mit Co-Substraten/organischen Abfällen und Klärschlamm aus der Grauwasserbehandlung in einem CSTR (Continuously stirred tank reactor) und einem UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) behandelt. Es findet hierbei eine Fest-Flüssig-Trennung statt, die flüssige Phase wird im UASB und die feste Phase im CSTR behandelt. Gewonnenes Biogas geht in die Energieerzeugung. Die Feststoffe der Gärreste können zur Kompostierung bzw. zur Erzeugung von Kompost eingesetzt und landwirtschaftlich genutzt werden. Die Flüssigphase der Gärreste geht in die Grauwasserbehandlung und wird zusammen mit dem behandelten Grauwasser als Betriebswasser genutzt bzw. aufbereitet in die Umwelt gegeben (Giese/Londong 2015).

Bei der hier betrachteten Systemvariante handelt es sich um eine angenommene technische Realisierung des HWC-Systems nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (= HWC KREIS, wie sie im BMBF-Projekt KREIS festgelegt wurde; Giese/Londong 2015). Diese technische Lösung verspricht einen geringeren Reinigungsaufwand als die konventionelle (siehe Kap. 4.3.2 und 8.1.2), eine bessere Nutzung der Wertstoffe aus dem (hoch konzentrierten) Schwarzwasser, eine bessere Behandelbarkeit von Medikamentenrückständen und Keimen sowie eine Entlastung der Kanäle und eine erhöhte Biogasgewinnung, die das Quartier energieautarker macht und seine CO₂-Bilanz verbessert (internes Dokument von Hamburg Wasser). Dieses System wird in der Jenfelder Au in Hamburg für über 600 Wohneinheiten umgesetzt, wobei von dieser idealtypischen Form abgewichen werden muss.

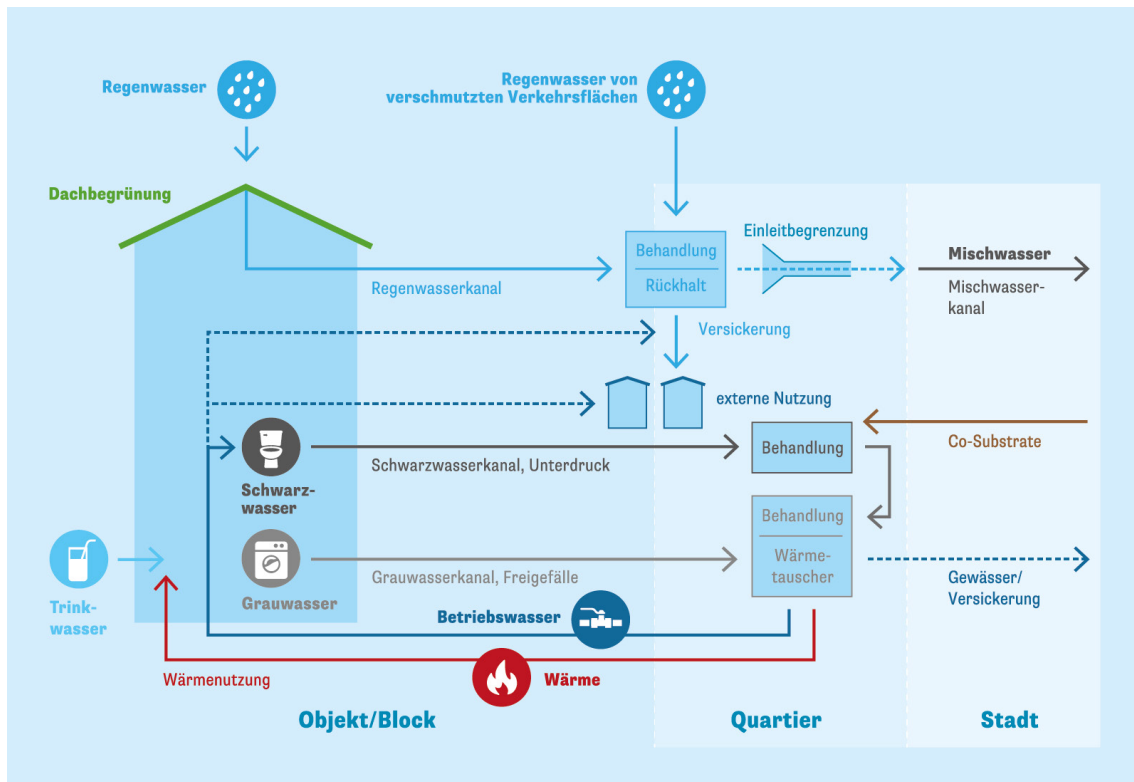


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Systemvariante 3 (V3) im Modellgebiet A in Frankfurt am Main, das einem ideal-typischen HWC-System mit zusätzlicher WRG entspricht.

Abbildung 7 zeigt die Systemvariante 3 des Modellgebiets A, das dem „HWC-System“ mit einer zusätzlichen Wärmerückgewinnung auf Quartiersebene entspricht: Schwarzwasser wird über ein Vakuumsystem getrennt abgeleitet und dezentral, auf Quartiersebene, behandelt, d.h. vergoren. Die Gärreste werden mit LKW zur zentralen Kläranlage transportiert und dort in die konventionelle Behandlung gegeben (siehe Kap. 4.3.1 und 4.3.2). Im Falle des in Frankfurt gelegenen Modellgebiets A bedeutet das, dass die Gärreste verbrannt werden. Weiterhin findet die Trennung von Grauwasser statt, das ebenfalls semizentral, wie bei „FFM KonvGrau“ (nur leichtes Grauwasser in diesem Fall) und „HH KonvGrau“ aufbereitet und wiederverwendet wird, sowohl stofflich als auch energetisch. Diese Systemvariante des HWC wurde in die Stoffstromanalyse aufgenommen.

Tabelle 3: Systematische Übersicht der untersuchten grundlegenden Systemvarianten

			HH Konv/FFM Konv	FFM KonvGrau	HH KonvGrau	HWC
Behandlung von Schmutzwasser	Schwarzwasser		Erfassung/Ableitung über Trennkanalisation; Behandlung in zentraler KA; Klärschlammvergärung (+ Co-Substrate) und -verbrennung in HH/ Klärschlammverbrennung in FFM	Erfassung/Ableitung über Trennkanalisation; Behandlung in zentraler KA, Klärschlammverbrennung	Erfassung/Ableitung über Trennkanalisation; Vakuumableitung für Schwarzwasser, Behandlung in zentraler KA, Klärschlammvergärung (+ Co-Substrate) und -verbrennung	Vakuumableitung, Klärschlammvergärung im Quartier; Fest-Flüssig-Trennung von SW, Co-Substraten und GW-Klärschlamm; Gärreste werden konventionell behandelt (HH Konv/FFM Konv)
	Grauwasser	schwer		WRG und dezentrale Aufbereitung: auf Blockebene über Wirbelbettreaktoren inklusive Desinfektion, auf Quartiersebene über Vollbiologie und P-Fällung	WRG und dezentrale Aufbereitung: auf Blockebene über Wirbelbettreaktoren inklusive Desinfektion, auf Quartiersebene über Vollbiologie und P-Fällung	Behandlung über Vollbiologie und P-Fällung mit zusätzlicher WRG
		leicht				
Regenwasser			Trennkanalisation ⁴	Trennkanalisation	Trennkanalisation	Trennkanalisation
Wasserversorgung			Zentrale TWV	Zentrale TWV; Betriebswasser aus beh. GW	Zentrale TWV; Betriebswasser aus beh. GW	Zentrale TWV; Betriebswasser aus beh. GW
Produkte			HH: Strom und Wärme aus Faul-/Biogas und Verbrennung von Gärresten, Biomethan. Asche (monodeponiert zur späteren P-Rückgewinnung) und Gips (Baustoff) FFM: Strom und Wärme aus Klärschlammverbrennung. Asche und Gips (Deponie im Bergbau)	Wärme und Strom aus der Klärschlammverbrennung.. Asche und Gips (Deponie im Bergbau). Betriebswasser aus GW; lokale Wärme aus GW	Faul-/Biogas, das als Wärme und Strom genutzt wird. Biomethan, das ins Gasnetz eingespeist wird. Asche (monodeponiert zur späteren P-Rückgewinnung) und Gips (Baustoff). Betriebswasser aus GW; lokale Wärme aus GW.	Gärreste zur Nutzung in der Landwirtschaft optional auch möglich; Biogas zur Wärmeerzeugung und Verstromung; Betriebswasser; Wärme
Entsorgung			Monodeponierung der Schwermetalle	Monodeponierung der Schwermetalle	Monodeponierung der Schwermetalle	

⁴ Ideal wäre die vollständige Ableitung über die Trennkanalisation. Aufgrund der aktuellen Gegebenheiten erfolgt jedoch teils eine Übergabe des Regenwassers in die Mischkanalisation.

5 Stoffstromanalyse

5.1 Softwareauswahl

Zur Erstellung (Modellierung, Simulation) und mathematischen Behandlung (Berechnung) der betrachteten technischen Systemvarianten (Durchführung der Stoffstromanalysen) wurde nach einer Recherche zu geeigneten Modellierungsprogrammen und einem intensiven Abwägungsprozess dem geplanten Kauf einer Software zur Stoffstrommodellierung (z.B. Umberto – vgl. ifu Hamburg o.J.) bzw. der Software STAN (vgl. Technische Universität Wien o.J.), die Nutzung der Software SIMBOX der Forschungsanstalt Eawag, Schweiz vorgezogen. SIMBOX ist ein Computerprogramm zur Simulation/Modellierung von Energie-, Materie-, Stoff- und Geldflüssen in anthropogenen Systemen, das im Jahr 1991 von Eawag entwickelt wurde und bis heute weiterentwickelt wird (Bader 2012). Es wurde schon häufig für die Modellierung von Wasserinfrastruktursystemen eingesetzt (z.B. Meinzingen 2009, Kenway et al 2013, Woltersdorf 2016).

Wesentliche Gründe für die Auswahl der Software waren neben einer kostengünstigeren Lösung bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit der von der Eawag über die EDV-technische Betreuung angebotene inhaltliche Austausch bezüglich der Stoffstrommodellierung innovativer Wasserinfrastrukturen sowie daraus mögliche gemeinsame Publikationen.

5.2 Auswahl der zu untersuchenden Stoffströme

Zur Durchführung der beabsichtigten Stoffstromanalysen zum Vergleich von verschiedenen technischen Systemvarianten im Bereich der (Ab-)Wasserinfrastruktur in den Städten Hamburg und Frankfurt ohne Industrie und Großgewerbe wurden die Stoffströme Wasser, Energie und die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff ausgewählt. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Betriebsphase. Die Bauphase der Infrastrukturen wird nicht berücksichtigt. Sowohl Energie als auch Nährstoffe spielen für eine sichere und nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung eine große Rolle, insbesondere mit Blick auf Gewässerschutz und Ressourcennutzung. Wasser als zentrales Produkt in der Versorgung und als Transportmedium in der Entsorgung stellt die Basis dar, von der ausgehend die Stoffströme betrachtet wurden.

Deutschland gehört zu den wasserreichen Ländern. Wassermangel kommt nur saisonal begrenzt, etwa in langen, heißen und niederschlagsarmen Sommern vor. Große Städte wie Hamburg und Frankfurt sind in ihrer Wasserversorgung nicht autark, sondern aktuell auch von der Bereitstellung aus der Region abhängig. Frankfurt bezieht fast die Hälfte des Gesamtbedarfs aus dem Vogelsberg, dem Spessart und dem Kinzigtal sowie 36% aus dem Hessischen Ried (Frankfurt Green City 2016). Hamburg bezieht Trinkwasser aus mehreren Standorten der Metropolregion, rund 8% davon aus der Lüneburger Heide (taz 2010). Eine Reduzierung des Trinkwasserbedarfs, z.B. durch innerstädtische Kreislaufführung, führt letztlich zu einer geringeren Belastung der Trinkwasserlieferregionen.

Die Siedlungswasserwirtschaft ist außerdem ein großer Energieverbraucher. In den rund 10.000 Kläranlagen in Deutschland werden jährlich ca. 4,2 TWh Strom und ca. 3,2 TWh Wärme verbraucht (DWA 2011a). Somit sind sie im kommunalen Bereich die größten Energieverbraucher (DWA 2011a). Die Siedlungswasserwirtschaft benötigt auf der einen Seite viel Energie, auf der anderen Seite ist sie aber auch ein Energieproduzent mit großem energetischen Potenzial. Jährlich werden ca. 1,1 TWh Strom und ca. 1,1 TWh Wärme auf deutschen Kläranlagen produziert und genutzt (DWA 2011a).

Neben der Energie sind auch Nährstoffe ein großes Thema. Im Abwasser sind viele Nährstoffe enthalten, wie zum Beispiel Phosphor und Stickstoff. Diese Nährstoffe haben eine große Bedeutung für Gewässer (Überdüngung bzw. Eutrophierung) und Landwirtschaft und werden durch verschiedene Verfahren mit hohem Energieaufwand in Kläranlagen gezielt eliminiert (DWA 2008).

5.3 Festlegung der zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen

Für die Stoffstromanalyse ist es wichtig, den räumlichen und zeitlichen Rahmen, häufig als Systemgrenzen bezeichnet, festzulegen. Die räumlichen Systemgrenzen sind auf Modellgebiets-ebene der beiden Städte die im B-Plan-Verfahren festgesetzten Grenzen, in den Abbildungen zu den technischen Systemvarianten als „Quartiersgrenze“ gekennzeichnet. Als Bezugsjahr für die Daten wurde für diese Arbeit das Jahr 2012 gewählt. Jedoch stammen nicht alle eingesetzten bzw. genutzten Daten in den Analysen aus diesem Jahr, da nicht alle benötigten Daten für dieses Jahr vorhanden waren. Als Betrachtungszeitraum für die Bilanz wurde die Zeitspanne von einem Jahr gewählt, da die meisten relevanten Daten für die durchzuführenden Analysen jährlich ermittelt werden und verfügbar sind.

5.4 Modellierung/Simulation von Stoffströmen

Die Stoffströme Wasser, Energie, Phosphor und Stickstoff wurden innerhalb der oben beschriebenen Systemgrenzen der ausgewählten technischen Systemvarianten für die Modellgebiete modelliert. Die betrachteten Inputs in den Modellgebieten waren dabei Trinkwasser, Energie und Niederschläge. Als Outputs sind (Ab)Wässer (in verschiedenen Qualitäten), Energie, Reststoffe etc. zu betrachten. Bei der Modellierung der Stoffströme erfolgten Input-Output-Analysen (vgl. Abbildung 8). Dabei wurden die Prozesse Trinkwasserbereitstellung, Abwasser- und Klärschlammbehandlung, Energieproduktion während der Behandlung sowie Nährstoffelimination als „Black Boxes“ betrachtet. Die detaillierten Prozessschritte oder Teilprozesse innerhalb eines Prozesses wurden nicht betrachtet.

Materialbilanz: $a = b + c + d$

Stoffbilanz für Stoff i: $a_i = b_i - c_i + d_i$

Bedingung: keine Lagerveränderung in Prozess 1

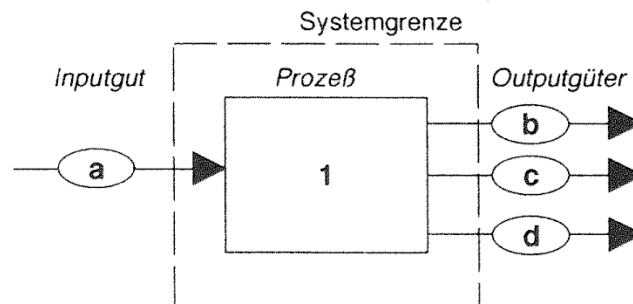


Abbildung 8: Bilanzierungsbeispiel in einer Stoffstrommodellierung (Baccini/Bader 1996: 52)

5.4.1 Wassermmodellierung

Die Wassermmodellierung erfolgte in der Referenzvariante (V1) als Trinkwasser und häusliches Abwasser sowie Niederschlags-/Regenwasser und in den dezentralen/semizentralen Systemen (V2 und V3) in den unterschiedlichen Teilströmen Trinkwasser, Grauwasser, Schwarzwasser, gereinigtes Grauwasser bzw. Betriebswasser und Niederschlags-/Regenwasser. Die Infiltrations- und Exfiltrationsraten (Fremdwasser und Verluste) wurden mit einer Infiltrationsrate von 30% (Stadtentwässerung Frankfurt 2015) und einer Exfiltrationsrate von 5% (Reynolds/Barrett 2003) berücksichtigt. Leitungslängen wurden hierbei nicht betrachtet. In Hamburg liegt die Kanalisation im Grundwasser und deshalb ist eine Exfiltration zu vernachlässigen (= 0%). In den Fällen, in denen Rohre für die Systemvarianten neu verlegt wurden, wurde mit einer Infiltrations- und Exfiltrationsrate von 0% gerechnet, da davon ausgegangen wird, dass aufgrund der Neuinstallation/-verlegung der Leitungen/Kanäle kein Fremdwassereintritt bzw. keine Wasserverluste aus den Kanälen in den ersten Jahren (und damit im Bilanzzeitraum) auftreten. In den Modellgebieten A und C sind alle Leitungen in allen drei Systemvarianten neu verlegt. In Modellgebiet B, das kein Neubau ist und eine Weiter-/Umnutzung der bestehenden Leitungen und Kanäle stattfindet, werden Inliner in die bestehenden Rohre gezogen. Daher wird hier ebenfalls mit 0% In-/Exfiltration gerechnet.

In allen drei Modellgebieten verbleibt ein geringer Anteil im Gebiet. Dieser basiert auf den Aktivitäten Raumreinigung, Autopflege, Gartenbewässerung, Essen und Trinken (BDEW 2015). Der Verlust wurde auf Basis der BDEW-Angaben für diese Aktivitäten mit 6% veranschlagt und wird im weiteren Text als „TW-Verluste“ geführt. Außerdem ist für die Modellgebiete A und B eine Exfiltration aus der Trinkwasserleitung von 6,5% angesetzt (Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011), da hierzu seitens Mainova keine Angaben verfügbar waren. Für das Mo-

Modellgebiet C wird eine Exfiltration von 4,2% (Hamburg Wasser 2013) aus der Trinkwasserleitung berücksichtigt. D.h., dass 6,5% bzw. 4,2% weniger Trinkwasser bei dem Verbraucher ankommt als von der zentralen Trinkwasserversorgung bereitgestellt wird. Diese Differenz, verursacht durch das im Gebiet verbleibende Trinkwasser und die Exfiltration aus der Trinkwasserleitung, wird in den vorgestellten Bilanzen im Ergebnisteil sichtbar.

Im Modellgebiet A wird mit einem Trinkwasserbedarf von 143 l/E*d gerechnet (Hessisches Statistisches Landesamt 2012). Es ist von ca. 3.000 EinwohnerInnen in dem Gebiet nach Bau und Bezug auszugehen. Der Wasserverbrauch durch die geplanten Kitas und die Grundschule sowie den Arbeitsplätzen wurde nicht zusätzlich berücksichtigt, da zu wenig verlässliche Informationen zum aktuellen Zeitpunkt vorlagen.

Das Modellgebiet B hat 3.600 Einwohner. Hinzu kommen 12.780 Arbeitsplätze (im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistung) und 720 SchülerInnen. Es wurde zudem davon ausgegangen, dass der spezifische TW-Bedarf von 8 l/Arbeitsplatz*d (projektinterne Herleitung/Annahme) sowie von 5 l/Schüler*d (Hamburg Wasser 2015) im Trinkwasserbedarf nach BDEW (2016) im Kleingewerbeanteil von 9% enthalten ist. Dies entspricht in der Summe 4.400 Einwohnern. Auch in diesem Gebiet wurden die Arbeitsplätze und Schüler nicht extra berücksichtigt, sondern mit dem Frankfurter Trinkwasserbedarf von 143 l/E*d (für 3.600 Einwohner) gerechnet (Hessisches Statistisches Landesamt 2012).

Im Modellgebiet C (Hamburg) wohnen ca. 700 EinwohnerInnen. Außerdem sind auf dem Standort tagsüber ca. 1.100 Schüler. Wenn man von einem TW-Bedarf von 5 l/Schüler*d ausgeht (Hamburg Wasser 2015), dann entspricht das insgesamt 750 Einwohnern. Aufgrund der vorliegenden Daten rechnet Hamburg außerdem mit einem Trinkwasserbedarf von 111 l/E*d (Hamburg Wasser 2015), da in diesem Modellgebiet kein Kleingewerbe vorhanden ist. Sonst liegt der durchschnittliche Trinkwasserbedarf in Hamburg bei 139 l/E*d.

5.4.2 Energiemodellierung

Bei der Energiemodellierung wurden der Strom- und Wärmebedarf für die Trinkwasserbereitstellung, Abwasserableitung, Abwasser- und Klärschlammbehandlung, Biogasaufbereitung sowie WRG berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die produzierten Energiemengen in Form von Strom, Wärme, Biogas und Biomethan mithilfe des Modells bilanziert. Ebenso wurde bilanziert, wie hoch der maximal theoretisch mögliche Deckungsgrad des Wärmebedarfs von Haushalten für Warmwasser und Heizung durch die WRG ist. Die Bilanzierung des Gesamtenergiebedarfs von Haushalten war jedoch nicht der Untersuchungsgegenstand in dieser Arbeit. Es wurden nur die Energieströme betrachtet, die mit der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung/-behandlung in Verbindung stehen.

Für die Hamburger Energiemodellierung wurde berücksichtigt, dass auf der Kläranlage ca. 33 Mio. m³/a Klär-/Faulgas produziert wird (Hamburg Wasser 2015); etwa 20% davon durch Co-Substrate, darunter ein großer Anteil Fett aus den Fettabseichern der Restaurants. Um für das Hamburger Modellgebiet (Modellgebiet C) die an der gesamtstädtischen Produktion anteilige Menge der Co-Substrate zu bestimmen, wurde die produzierte Faulgasmenge aus Co-Substraten auf Gesamtstadtebene über die prozentuale Einwohnerzahl (Einwohner im Modellgebiet/Einwohnerzahl Hamburg) umgerechnet. Da sich die Zusammensetzung der Co-Substrate untereinander unterscheidet, wurde in dieser Arbeit Fettwasser als beispielhaftes Co-Substrat herangezogen. Dies stellt eine Vereinfachung dar. In der Praxis werden normalerweise unterschiedlichste Co-Substrate parallel verwertet.

Die Ergebnisse zur Wärmerückgewinnung aus dem Ab-/Grauwasser stellen die theoretisch maximal mögliche Wärmerückgewinnung aus den Abwasserströmen dar. Darin sind bereits Verluste in Höhe von 30% einkalkuliert (Sievers et al. 2014). Zur genaueren Ermittlung des Wärmerückgewinnungspotenzials aus dem Abwasser und dessen Nutzung sind zahlreiche Faktoren bzw. Randbedingungen zu berücksichtigen, die sehr stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig sind. Dazu gehören u.a. Parameter wie Durchmesser und Länge der Kanalisation, Rohrwandstärke/-material, Druck, Boden- und Außenlufttemperatur, Abwasservolumen und -geschwindigkeit, Aufenthaltszeit der Luft in der Kanalisation, Wärmetauscherfläche und -leistung, Volumenstrom im Wärmetauscher, Entfernung zum Verbraucher usw. Diese Parameter konnten im Umfang dieser Arbeit nicht im Detail untersucht werden. Auch sind Jahrgangslinien in Bereitstellung/Bedarf nochmals genau zu untersuchen.

Das häusliche Abwasser hat eine Temperatur von 10-15°C in der Kanalisation und etwa 15-25°C im Gebäude (Baumann et al. 2007). Um den Betrieb der Kläranlage bzw. die Nitrifikationsleistung in der biologischen Behandlungsstufe der Kläranlage nicht zu beeinträchtigen, darf die Temperatur im Abwasserzulauf zur Kläranlage nicht unter 10°C abgekühlt werden (Wanner 2009, DWA 2008b). Aus diesem Grund wird für die Temperaturabsenkung des Abwassers aus dem Mischwasserkanal eine Wärmeentnahme von 1 K angenommen. Dies ist eine sehr konservative Annahme. Theoretisch wären höhere Entnahmegrade auch denkbar, da ja nur ein gewisser Anteil des städtischen Abwassers, der zur Kläranlage geht, abgekühlt wird. Wichtig ist hier zu berücksichtigen, in welchem Umfang auch in anderen Gebieten einer Stadt solch eine Maßnahme erfolgt und was das bzgl. der Temperatur des aus der Kläranlage ankommenden Abwassers bedeutet.

Für die Grauwassertemperatur werden in der Literatur verschiedene Angaben gemacht. So nennen Morel/Diener (2006) Werte zwischen 20-30°C und Knerr et al. (2009) zwischen 14.6-43°C. Aus diesem Grund wurden höhere Temperaturabsenkungen für die WRG aus dem Grauwasser angenommen. Auf Blockebene wird eine Temperaturabsenkung von 10 K (Nolde o.J.) und auf Quartiersebene von 8 K angesetzt. Die geringere Temperaturabsenkung liegt an längeren Verweilzeiten in den Leitungen und der Kanalisation.

Für den Transport von allen Co-Substraten in allen Systemvarianten wurde ein Transport mittels LKW (22-Tonner) über eine Strecke von 25 km nach Rücksprache mit Hamburg Wasser (2015) angenommen. Diese Entfernung wurde einheitlich angesetzt, unabhängig von der Gebietslage, da nicht klar bestimmt werden konnte, wo die Co-Substrate jeweils bereitgestellt werden. Kraftstoff ist Diesel (für weitere Details siehe Kap. 8.3).

5.4.3 Nährstoffmodellierung

Die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff wurden sowohl auf der Inputseite, z.B. Phosphor- und Stickstoffgehalt im Abwasser, als auch auf der Outputseite, z.B. Phosphorgehalt in Kompost oder Gärresten usw. berücksichtigt und bilanziert. Es wurde nicht bilanziert, wie viel Nährstoffe durch Nahrung, Reinigungsmittel etc. in Haushalte kommen bzw. vorhanden sind. Hier wurden die Outputs aus den Haushalten/Städten (z.B. Phosphor im Abwasser oder Abfall) als Input für die Analysen betrachtet.

Die Datenbasis für die beiden konventionellen Systemvarianten sind die Leitfäden der DWA (2011b, c). Bei den eingesetzten Parametern für die Phosphor- und Stickstoffbilanzierung (siehe Kap. 8.3) bestehen noch große Unsicherheiten. Als Ausgangsbasis dienten die Werte des DWA-Themenbandes (DWA 2008a). Wo möglich, wurden diese Werte durch gemessene Daten aus Pilotprojekten oder, wo diese nicht vorhanden waren, über Daten der Anlagenauslegung von in der Implementierung sich befindenden Projekten herangezogen. Dies gilt insbesondere für den HWC und im Fall von KonvGrau für den Schwarzwasserstrom. (Deren Verifizierung aus dem Betrieb konnte noch nicht erfolgen.)

Die unterschiedlichen Parameterwerte für die verschiedenen Abwasserströme (Schmutzwasser, Grauwasser, Schwarzwasser) setzen sich je nach Datenlage aus Konzentrationen bzw. Frachten zusammen. Die Werte für das häusliche Abwasser wurden aus der bestehenden kommunalen Datenlage gespeist, während die für die neuartigen Varianten von kleineren Pilotprojekten auf Haus- oder Blockebene stammen. Durch den anderen Bezugsrahmen entstehen somit Unterschiede in den Bilanzen, da z.B. bei Daten aus einem Wohngebäude zu Schwarz-/Grauwasser nicht mögliche Einträge aus Kleingewerbe berücksichtigt sind, wie das im Schmutzwasser der Fall ist. Diesen Unterschieden wurde nochmals in einem zusätzlichen Analyseschritt nachgegangen, indem in den Ergebnisbilanzen nochmals wechselseitig die jeweils anderen Gesamtbilanzierungen von Stickstoff und Phosphor anteilig umgerechnet und dann die Verhältnisse der Ergebnisse zwischen den Varianten auf Änderungen überprüft wurden.

5.4.4 Das Gleichungssystem und seine Festlegungen

Im Folgenden soll anhand von zwei einfachen Beispielen die Modellierung/Simulation und die mathematische Behandlung bzw. Berechnung von Stoffströmen mit SIMBOX näher erläutert werden. In SIMBOX werden die Systemzusammenhänge als Gleichungen formuliert. Die in den Gleichungen benötigten Werte werden als Parameter bezeichnet. Die berechneten Werte werden Variablen genannt, welche wiederum für weitere Gleichungen zur Verfügung stehen. Zur Durchführung der Stoffstrommodellierung wurden die Parameter aus Texttabellen eingelesen und daraus die Variablen für jeden einzelnen Fluss innerhalb des Systems (Input-, Output- oder innerer Fluss) berechnet.

Das Gleichungssystem für die Berechnung der Stoffflüsse ist in dieser Arbeit ein (quasi) stationäres System, d.h. zeitliche Entwicklungen/Änderungen wurden nicht berücksichtigt (keine zeitabhängige dynamische Modellierung).

Beispiel 1: Berechnung des Stoffstroms Trinkwasserbedarf [l/d]:

$$X1 = \sum_{i=2}^8 P_i \cdot P_1$$

X1: Trinkwasserbedarf [l/d]

P1: Einwohnerzahl [E]

P2: Trinkwasserbedarf-Baden, Duschen, Körperpflege [l/E*d]

P3: Trinkwasserbedarf-Toilettenspülung [l/E*d]

P4: Trinkwasserbedarf-Wäschewaschen [l/E*d]

P5: Trinkwasserbedarf-Kleingewerbeanteil [l/E*d]

P6: Trinkwasserbedarf-Raumreinigung, Autopflege, Garten [l/E*d]

P7: Trinkwasserbedarf-Geschirrspülen [l/E*d]

P8: Trinkwasserbedarf-Essen und Trinken [l/E*d]

Beispiel 2: Berechnung des theoretischen WRG-Potenzials aus Ab-/Grauwasser:

$$X2 = Q \cdot W \cdot \Delta T \cdot (1 - V)$$

X2: WRG aus Ab-/Grauwasser

Q: Abwassermenge [m³/a] (Dieser Wert wurde vorher ebenfalls berechnet.)

W: Wärmenutzungspotenzial (Wärmeentnahme/Wärmeübertragungsleistung) [kWh/m³*K]

ΔT : Änderung der Abwassertemperatur (Temperaturabsenkung) [K] und

V: Wärmeverluste [%]

5.5 Datensammlung und Parameteridentifizierung

Die umfassende Datensammlung ist über eine Literaturrecherche zu bereits national und international umgesetzten (Pilot)Projekten bezüglich der Stoffströme Wasser, Energie und Nährstoffe im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft bzw. neuartigen Sanitärsystemen, Angaben von verschiedenen Praxis- und Forschungspartnern, gewonnene Informationen aus Fachgesprächen mit Experten sowie eigene Berechnungen und Annahmen erfolgt.

Durch den kontinuierlichen Austausch mit Hamburg Wasser als Praxis- und Forschungspartner im Projekt und der Stadtentwässerung Frankfurt als Abwasserentsorger in Frankfurt am Main war die Möglichkeit gegeben, die Stoffstrommodellierungen mit den – soweit möglich – tatsächlichen Daten aus dem Betrieb durchzuführen bzw. darauf aufzubauen.

Ein Überblick über die zentralen Parameter findet sich im folgenden Kapitel. Eine Übersicht aller Parameter in Tabellenform ist dem Anhang in Kap. 8.3 zu entnehmen.

5.6 Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation

5.6.1 Sensitivitätsanalysen

Der Einfluss der Parameter auf die einzelnen Variablen kann über die Sensitivitätsanalyse bestimmt werden (Baccini/Bader 1996). Somit können sogenannte Schlüsselparameter bestimmt werden. Diese wiederum geben Hinweise, wie die berechneten Größen beeinflusst werden können. Dies ist wichtig, weil so gezielt Maßnahmen geplant werden können.

Die besonders sensitiven Parameter für die Modellierung der Wasser-, Energie- und Nährstoffströme sind in Tabelle 4 aufgelistet, nach Stoffströmen aufgeteilt. Sie gibt die Parameter entsprechend der Sensitivität an, die mit der Software SIMBOX identifiziert wurden. Da die Energie- und Nährstoffmodellierung auf die Wassermmodellierung aufbaut, sind die sensitiven Parameter der Wassermmodellierung auch die Schlüsselparameter für die Energie- und Nährstoffmodellierung. Eine vollständige Liste der eingesetzten Parameter ist dem Anhang 8.3 zu entnehmen.

Tabelle 4: Sensitive Parameter in der Stoffstrommodellierung

Wassermmodellierung
▪ (Trink)Wasserbedarf für unterschiedliche Zwecke (Baden, Duschen, Körperpflege, Toilettenspülung, Wäschewaschen, Kleingewerbeanteil, Raumreinigung, Autopflege, Garten, Geschirrspülen, Essen und Trinken) ▪ Anteil der Misch- und Regenwasserableitung in der Stadt ▪ Infiltration in der Misch-, Schmutz- und Regenwasserkanalisation ▪ Exfiltration aus der Trinkwasserleitung ▪ Niederschläge ▪ Abflussbeiwert ▪ Versiegelungsgrad
Energiemmodellierung
▪ Strombedarf für die Trinkwasserbereitstellung, Abwasser-, Klärschlamm-, Grauwasser-, Schwarzwasserbehandlung und Schwarzwasserableitung ▪ Wärmebedarf für die Klärschlammbehandlung ▪ Klärschlammanteil im Abwasser und Schwarzwasser ▪ TR und oTR des Abwassers und Schwarzwassers ▪ Methananteil im Klärschlamm und in den Co-Substraten ▪ Spezifische Faulgasproduktion von Klärschlamm und den Co-Substraten ▪ Menge der Co-Substrate ▪ TR und oTR der Co-Substrate ▪ Wärmenutzungspotenzial aus den Abwasserströmen ▪ Wärmeverluste bei der Wärmerückgewinnung aus den Abwasserströmen ▪ Energiebedarf für die Wärmerückgewinnung aus den Abwasserströmen ▪ Temperaturdifferenz (Temperaturabsenkung) von Abwasserströmen ▪ Elektrische und thermische Wirkungsgrade bei der Energieproduktion
Nährstoffmodellierung
▪ Phosphor- und Stickstoff-Bemessungswerte (Zulauf der Kläranlage) ▪ Phosphor im Primär- und Überschussschlamm ▪ Phosphor und Stickstoff im Schwarzwasser und Grauwasser ▪ Phosphor- und Stickstoff-Reduktionsraten (Schwarzwasserbehandlung) ▪ Phosphor und Stickstoff in den Co-Substraten ▪ Phosphor und Stickstoff im Betriebswasser ▪ Phosphor und Stickstoff in der festen Phase der Gärreste ▪ N-Reduktionsrate (gesamte Kläranlage) ▪ N-Verluste bei der Klärschlammbehandlung

5.6.2 Monte-Carlo-Simulation

Zur besseren Aussagefähigkeit der Ergebnisse wurden neben der Sensitivitätsanalyse auch Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Hier kann aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameter (Häufigkeitsverteilung) die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen bestimmt werden. Dabei wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameter durch eine (große) Parameterstichprobe approximiert. Das heißt, das Modell lässt 10.000mal die Modellierung mit innerhalb der gewählten Verteilung zufällig gewählten Werte für jeden Parameter berechnen. Die

Werte der Parameterstichprobe werden durch das Zufallsprinzip bestimmt. Daraus lassen sich für die Variablen die Medianwerte mit ihren entsprechenden 5- und 95%-Perzentilen bestimmen.

In der hier durchgeführten Modellierung waren insbesondere die Annahmen im Bereich der Trinkwasserversorgung, da wichtiger Inputflow, und die Wärmerückgewinnung aufgrund der diskutierten Unsicherheiten, sehr prägend für die Ergebnisse (siehe hierzu auch Tabelle 4). Da es nicht möglich ist, alle Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation vorzustellen, werden diese in Kap. 6.4 exemplarisch am Modellgebiet C dargestellt.

6 Ergebnisse und Diskussion der Stoffstromanalyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Stoffstrommodellierungen im Bereich der Abwasserinfrastruktur von drei der insgesamt fünf ausgewählten und modellierten Modellgebiete behandelt (zwei Modellgebiete für Hamburg und drei für Frankfurt am Main, siehe Kap. 2). Dabei werden die Ergebnisse für ein Modellgebiet aus Hamburg (Modellgebiet C) und zwei Modellgebiete aus Frankfurt (Modellgebiet A und B) dargestellt (siehe auch Tabelle 1). Es wurden für jedes Modellgebiet drei verschiedene Systemvarianten betrachtet. Die erste Systemvariante (V1) baut jeweils auf dem konventionellen System in den jeweiligen Städten auf und dient als Referenzsystem. Die weiteren Systemvarianten (V2 und V3) sind Systemvarianten, die auf neuartigen Technikansätzen bzw. die auf einer additiven Technologie beruhen. Eine grundsätzliche Übersicht findet sich hierzu in Kap. 2.

6.1 Modellgebiet A: Wohnbebauung einer bisher kaum genutzten Fläche (FFM)

Wasser: Die Systemvariante V1 hat mit einem täglichen Trinkwasserbedarf von $167.471 \text{ m}^3/\text{a}$ den höchsten Trinkwasserbedarf. Dieser liegt in den Systemvarianten FFM KonvGrau (V2) und HWC (V3) bei $122.968 \text{ m}^3/\text{a}$. Somit ist bei V2 und V3 eine Trinkwassereinsparung von ca. 27% gegeben. Der Wasserbedarf für die Toilettenspülung wird in den Systemvarianten V2 und V3 durch den Einsatz von Betriebswasser bzw. aufbereitetem Grauwasser gedeckt. Dieser liegt in V2 bei $41.610 \text{ m}^3/\text{a}$ und in V3 aufgrund der Vakuumableitung deutlich niedriger bei $6.570 \text{ m}^3/\text{a}$. Dementsprechend weist V3 einen Betriebswasserüberschuss von $112.154 \text{ m}^3/\text{a}$ auf, der kleinräumig in den Wasserkreislauf zurückgegeben werden kann bzw. für andere Bedarfszwecke zur Verfügung steht. Aufgrund des höheren Wasserbedarfs für die Toilettenspülung entsteht in V2 mit $39.723 \text{ m}^3/\text{a}$ weniger Überschuss an Betriebswasser. Eine weitere Ursache für den höheren Überschuss von Betriebswasser in V3 liegt in der Aufbereitung des Schwarzwassers auf diese Qualität.

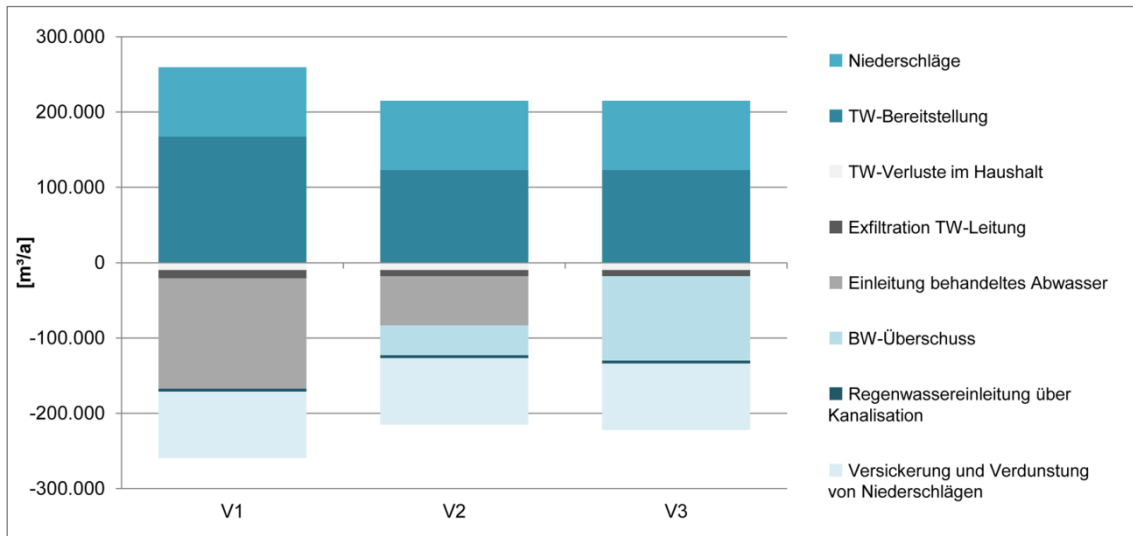


Abbildung 9: Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau, V3: HWC. In V3 ergibt sich eine Diskrepanz von rund 7.033 m³/a zwischen Input und Output. Diese ist auf die Co-Substrate zurückzuführen, die in den Wasserbilanzen nicht dargestellt wurden.

Bezüglich der Einleitung von gereinigtem Abwasser in die Gewässer zentral an der Kläranlage ist festzustellen, dass V1 mit 146.730 m³/a die größten Wassermengen einleitet, gefolgt von V2 mit 65.397 m³/a. Bei V3 wird das gereinigte Schwarzwasser zusammen mit dem behandelten Grauwasser als Betriebswasserüberschuss im Stadtquartier in die Umwelt gegeben. Die Regenwassereinleitung ist bei allen drei Varianten identisch und liegt bei 3.784 m³/a. Eine Beeinflussung des Grundwassers durch In-/Exfiltration ist in diesem Gebiet zunächst nicht erkennbar, da alle Systemvarianten komplett neu installiert wurden.

Energie: Für die Energiebilanzen wurden alle einzelnen Energieströme (siehe Kap. 5.4) von der Trinkwasserbereitstellung bis hin zur Abwasserbehandlung berücksichtigt.

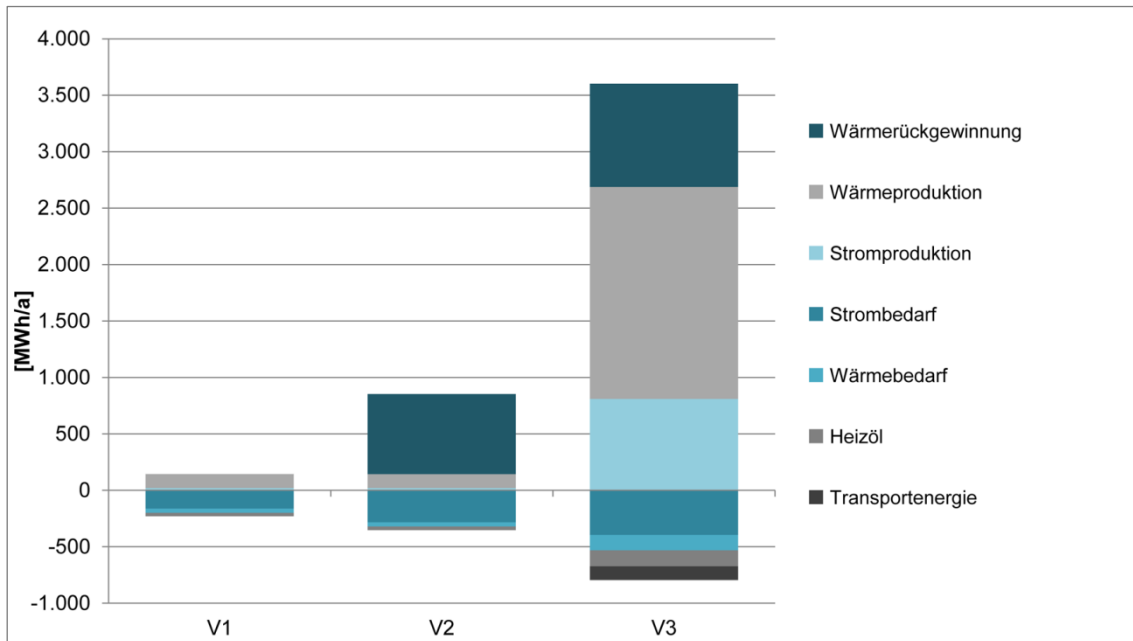


Abbildung 10: Energiebedarf und -produktion für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau, V3: HWC

Bei der Betrachtung der Energiebilanzen (Produktion abzgl. Bedarf, dargestellt für Strom und Wärme) wird deutlich, dass die Systemvariante V3 mit 415 MWh/a eine bessere Strombilanz im Vergleich zu den Varianten V1 und V2 aufweist. Es ist die einzige Variante, die eine positive Strombilanz hat. Der Grund dafür ist die Mitbehandlung von Co-Substraten (täglich 20 m³ Fettwässer und 6 m³ Rasenschnitt; Hartmann 2015, mündliche Auskunft). Es ist dabei zu beachten, dass die hier gewählten Werte für ein Hamburger Wohngebiet mit 600 WE berechnet wurden. Das heißt, dass höchstwahrscheinlich für dieses Gebiet mit 1.500 WE mit einer deutlich höheren Co-Substratmenge gearbeitet werden muss. An zweiter Stelle steht das konventionelle System (V1) mit -141 MWh/a gefolgt von V2 mit -264 MWh/a. Für FFM KonvGrau ist dabei noch zu berücksichtigen, dass es sich hier nur um leichtes Grauwasser handelt und daher ein etwas geringerer Energiebedarf zu erwarten ist (siehe hierzu auch Kap. 4.3.3).

Hinsichtlich der Wärmebilanzen steht ebenfalls die Systemvariante V3 (HWC) mit 2.654 MWh/a am besten da, gefolgt von V2 mit 795 MWh/a. Der Grund für die besseren Wärmebilanzen bei V3 liegt ebenfalls im Einsatz von Co-Substraten und der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser. V2 (FFM KonvGrau) weist im Vergleich zu V1 eine bessere Wärmebilanz auf, weil auch in dieser Systemvariante eine Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser auf Quartiersebene stattfindet. Durch die Wärmerückgewinnung wäre es theoretisch möglich, in V2 rund 11% und in V3 rund 14% des Wärmebedarfs der 3000 E für Warmwasser und Wärmeversorgung der Wohnungen im Gebiet zu decken.

Die Energieaufwendungen (Heizöl) für die Verbrennung der Klärschlämme (V1/V2) sowie Gärreste (V3) aus der Schwarzwasserbehandlung liegen bei V3 mit rund 140 MWh/a am höchsten.

Diese sind in den Systemvarianten V1 und V2 deutlich geringer (31 MWh/a), da in diesen Systemen nur die Klärschlämme verbrannt werden. Aus diesem Grund fallen in diesen zwei Systemen allerdings auch keine Energieaufwendungen zum Transport von Co-Substraten zur Behandlungsanlage an. Der Energieaufwand zum Transport der Co-Substrate/Gärreste liegt in V3 bei rund 122 MWh/a.

Phosphor: Die Phosphorbilanzierung zeigt, dass bei der konventionellen Systemvariante (V1) mit 315 kg/a mehr Phosphor in die Gewässer eingeleitet wird als bei V2 (108 kg/a). Das gereinigte Schwarz- und Grauwasser wird in V3 zunächst als Betriebswasser bereitgestellt und dadurch erfolgt keine zentrale Einleitung ins Gewässer. Auch wenn der Betriebswasserüberschuss in V3 versickert oder dezentral in Gewässer eingeleitet wird, gelangt hier weniger Phosphor in die Umwelt als in den anderen Varianten. In der Summe (Einleitung des behandelten Abwassers und Betriebswasserüberschüsse) ergeben sich für die Varianten folgende Phosphoreinträge ins Gewässer: 315 kg/a (V1) > 121 kg/a (V2) > 90 kg/a (V3). Der Phosphoreintrag über den Niederschlag ist in allen drei Varianten vernachlässigbar.

Der Phosphoranteil in den Reststoffen liegt in V3 (3.963 kg/a, ursprünglich in den Gärresten) deutlicher höher als in V1 und V2 (1.656 kg/a bzw. 1.432 kg/a in der Asche als Produkt der Klärschlammverbrennung). Die Ursache für den höheren Phosphoranteil in den Gärresten bei V3 liegt in der Mitbehandlung von Co-Substraten in dieser Systemvariante. Allerdings würde bei einer Überführung der Gärreste in die konventionelle Behandlung in Frankfurt am Main dies aktuell eine Verbrennung gemeinsam mit dem Klärschlamm und damit Festlegung in der Asche bedeuten. Jedoch ist eine Umrüstung der Klärschlammbehandlung auf Faulung geplant (SEF 2015). Hier kommt es somit darauf an, wie zukünftig die weitergehende Nutzung der Gärreste z.B. in der Landwirtschaft praktiziert wird bzw. ob eine andere Weiterbehandlung erfolgt oder die Phosphorreste in der Asche wiedergewonnen werden, um die Bilanzierung der drei Varianten abschließend zu bewerten.

Zusätzlich wurde noch untersucht, inwiefern die abweichenden Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei einer künstlichen Nivellierung der Eingangskonzentrationen zwischen den verschiedenen Stoffströmen die Reststoffe in FFM KonvGrau (V2) dann etwas größer als im konventionellen System (V1) sind. Die weiteren Ergebnisse bleiben davon unberührt.

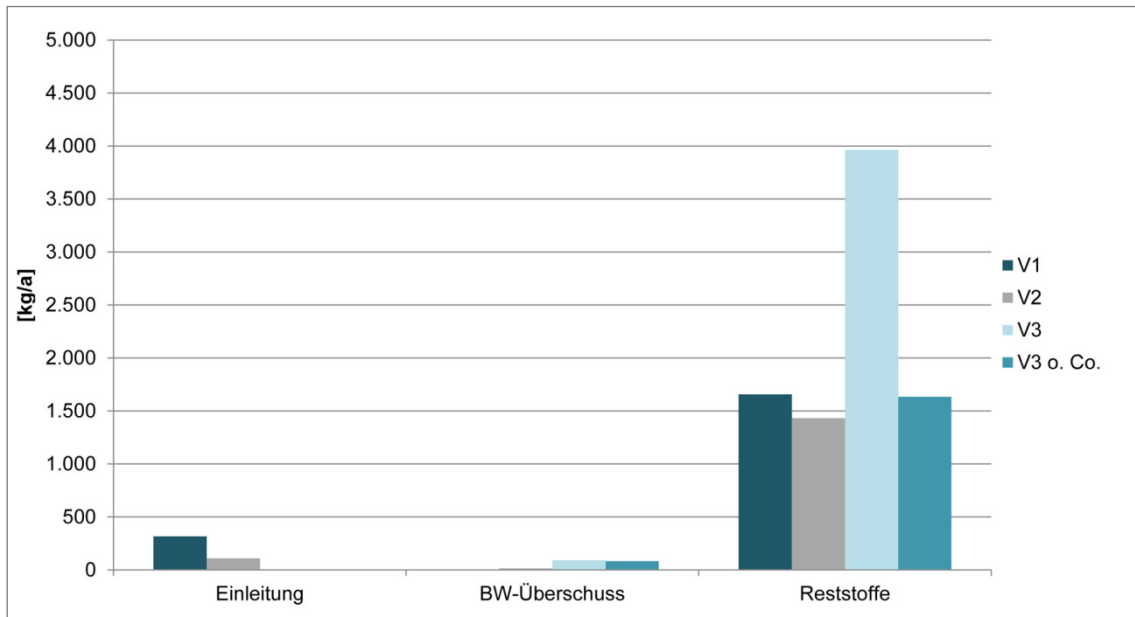


Abbildung 11: Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A exkl. Niederschlag. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau, V3: HWC, V3 o.Co.: Darstellung der HWC-Ergebnisse ohne Co-Substrate.

Stickstoff: Ähnlich wie bei der Phosphoranalyse wird auch mehr Stickstoff bei V1 mit 2.289 kg/a in die Gewässer eingeleitet als bei V2 (1.732 kg/a). Auch hier ändert sich nichts, wenn man für V3 annimmt, dass das Betriebswasser kleinräumig in den Naturhaushalt eingeleitet wird: V3 käme dann auf eine Stickstoffeinleitung von 493 kg/a. Auch hier ist die Einleitung über den Niederschlag gering: 5,6 t/a über das eingeleitete Regenwasser und 130 t/a über das nicht erfasste Niederschlagswasser und dessen Versickerung bzw. Verdunstung. Die Stickstoffverluste in die Atmosphäre sind in V3 höher als in V1 und V2, allerdings handelt es sich überwiegend um Stickstoffgas. In V3 verbleiben außerdem 3.852 kg/a Stickstoff in den Gärresten (Reststoffen). Bei Überführung in die konventionelle Behandlung in Frankfurt würden sie ebenfalls verbrannt werden, bei einer landwirtschaftlichen Verwertung ist eine Freisetzung in Form von Ammoniak möglich. In V1 und V2 entweicht der restliche Stickstoff bei der Verbrennung in die Atmosphäre und ist nicht mehr in der Asche zu finden. Die Ursache für den höheren Stickstoffanteil bei V3 (und entsprechend bei den Verlusten bzw. Gärresten) liegt in der Mitbehandlung von Co-Substraten in dieser Systemvariante.

Zusätzlich wurde auch hier der Einfluss der abweichenden Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) analysiert. Es ergab sich das gleiche Bild wie beim Phosphor: die Verluste in FFM KonvGrau (V2) sind dann etwas größer als im konventionellen System (V1). Die weiteren Ergebnisse bleiben davon unberührt.

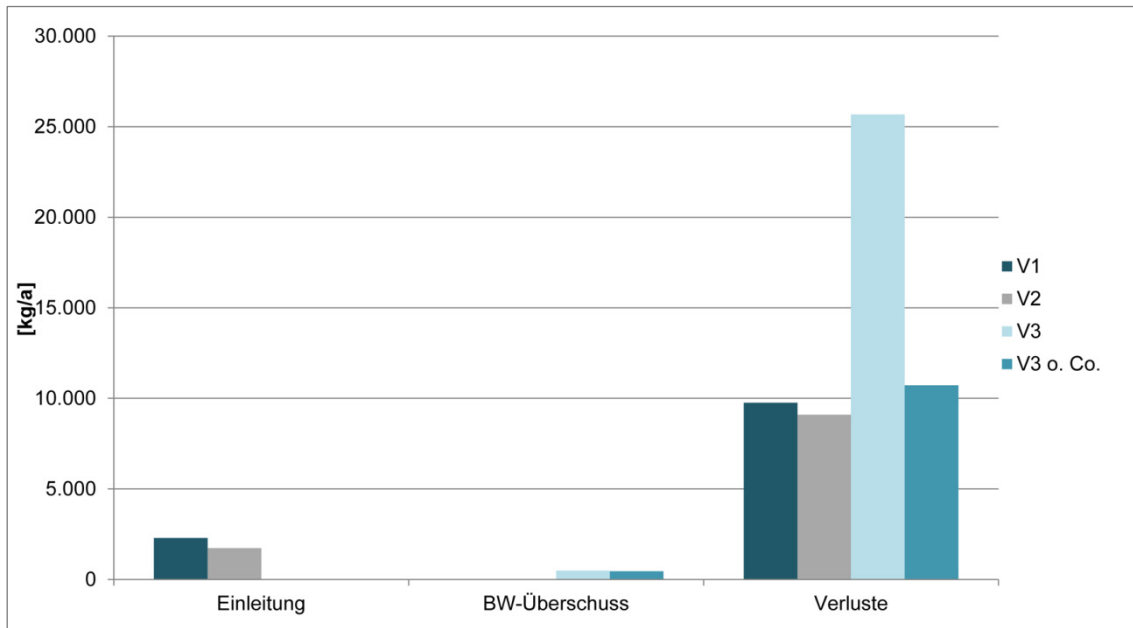


Abbildung 12: Stickstoffoutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet A exkl. Niederschlag. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau, V3: HWC, V3 o.Co.: Darstellung der HWC-Ergebnisse ohne Co-Substrate. „Verluste“ beziffern die gasförmigen Stickstoffemissionen in die Atmosphäre.

6.2 Modellgebiet B: Bürostandort mit Umwandlung/Nachverdichtung (FFM)

Wasser: Die konventionelle Systemvariante (V1) hat mit einem täglichen Trinkwasserbedarf von 245.624 m³/a den größten Stofffluss. Der Trinkwasserbedarf liegt in den Systemvarianten V2 und V3 (beide FFM KonvGrau, einmal auf Blockebene (V2) und einmal auf Quartiersebene (V3)) bei 180.353 m³/a. Somit ist bei V2 und V3 eine Trinkwassereinsparung von ca. 27% gegeben analog zu Modellgebiet A. Der Wasserbedarf für die Toilettenspülung wird in den Systemvarianten V2 und V3 durch den Einsatz von zu Betriebswasser aufbereitetem Grauwasser gedeckt. Dieser liegt jeweils bei 61.028 m³/a, während der Betriebswasserüberschuss in beiden neuartigen Systemvarianten 58.260 m³/a beträgt. Insgesamt liegen die Unterschiede in diesem Gebiet im Umgang mit Grauwasser (getrennte Erfassung, Behandlung und Wärmerückgewinnung), da die Schwarzwasserbehandlung auch in den neuartigen Systemvarianten weiterhin im konventionellen System erfolgt.

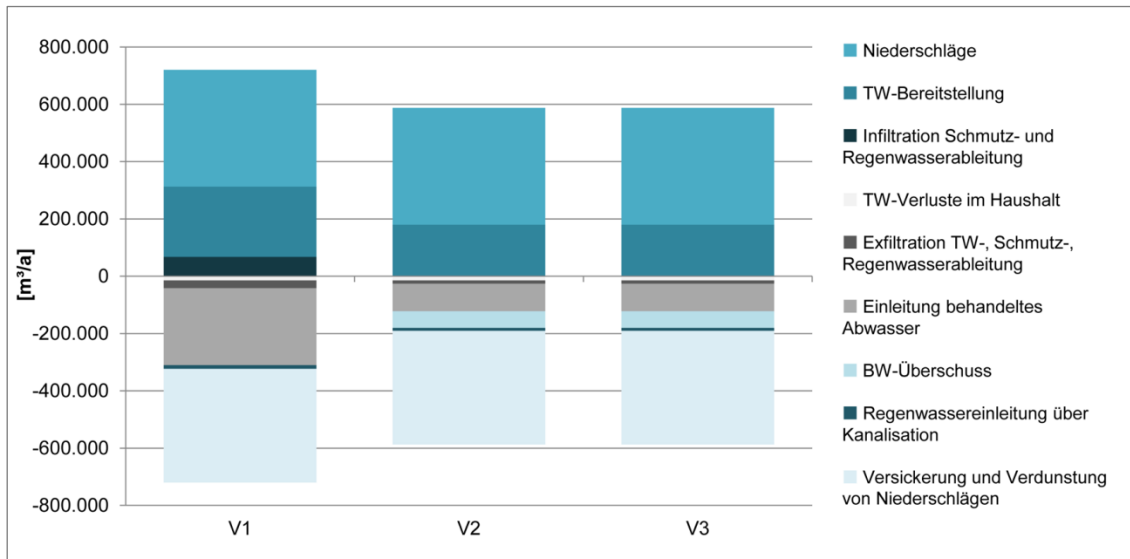


Abbildung 13: Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau Blockebene, V3: FFM KonvGrau Quartiers-ebene

Bezüglich der zentralen Einleitung von gereinigtem Abwasser in die Gewässer ist festzustellen, dass V1 mit $269.005 \text{ m}^3/\text{a}$ (unter Berücksichtigung von In- und Exfiltration in bzw. aus der Kanalisation) die größten Wassermengen an der Kläranlage einleitet. Bei V2 und V3 werden durch den geringeren Trinkwasserbedarf sowie fehlende Fremdwassereinträge $95.916 \text{ m}^3/\text{a}$ gereinigtes Schwarzwasser in die Gewässer eingeleitet. Das sind 64% weniger als V1, wobei vorausgesetzt ist, dass andere Versorgungszwecke gefunden werden, für die der Betriebswasserüberschuss verwendet wird. Werden diese nicht gefunden und das überschüssige Betriebswasser ebenfalls ins Gewässer eingeleitet, reduziert sich der Eintrag nur um 43% im Vergleich zum konventionellen System.⁵

Die Einleitung von Regenwasser ins Gewässer ist bei V1 aufgrund der In- und Exfiltrationseffekte mit $12.591 \text{ m}^3/\text{a}$ etwas höher anzusetzen als bei V2 und V3 mit jeweils $10.073 \text{ m}^3/\text{a}$. Der Vergleich zeigt, dass sich die räumlichen Unterschiede zwischen V2 und V3 mit der Ansiedlung der Behandlung nicht auf die Wasserströme auswirken. Dies war nicht anders zu erwarten.

Energie: Für die Energiebilanzen wurden wie beim ersten vorgestellten Modellegebiet alle einzelnen Energieströme (siehe Kap. 5.4) von der Trinkwasserbereitstellung bis hin zur Abwasserbehandlung berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Strombilanzen wird deutlich, dass die Systemvariante V1 (-239 MWh/a) im Vergleich zu den Varianten V2 und V3 eine bessere Bilanz aufweist, gefolgt von V2 mit -293 MWh/a und V3 mit -539 MWh/a . Der Grund für die bessere

⁵ Aufgrund der räumlichen Nähe zur zentralen Kläranlage ist hier durch die (evtl. dezentrale) Einleitung selbst noch keine stadtökologische Verbesserung zu diskutieren.

Bilanz für elektrische Energie bei V2 im Vergleich zu V3 liegt im geringeren Strombedarf für die dort gewählte Technik der Grauwasserbehandlung.

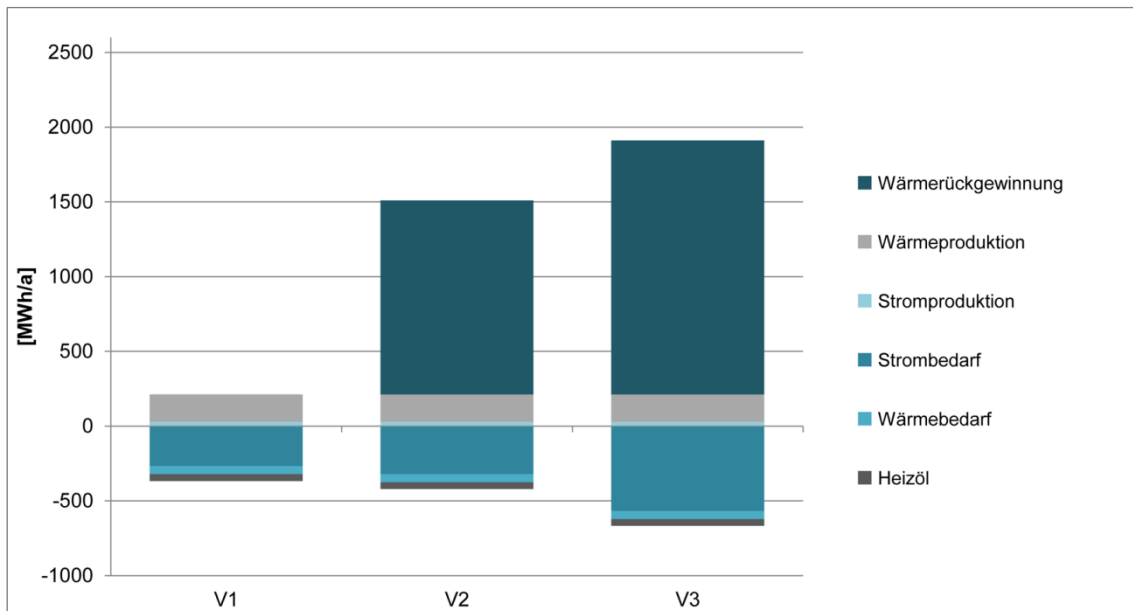


Abbildung 14: Energiebilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau Blockebene, V3: FFM KonvGrau Quartiers-ebene

Hinsichtlich der Wärmebilanzen steht die Systemvariante V3 mit 1.829 MWh/a an erster Stelle, gefolgt von V2 (1.426 MWh/a). Der Grund für die besseren Wärmebilanzen bei diesen beiden Systemen ist die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser (V2: WRG auf Blockebene, V3: WRG auf Quartiersebene). Durch die Wärmerückgewinnung wäre es theoretisch möglich, im System V2 rund 13% und im System V3 rund 11% des Wärmebedarfs für Warmwasser und Wärmeversorgung der Gebäude der ca. 4.400 Einwohner zu decken. Darüber hinaus werden für die Klärschlammverbrennung für alle drei Systemvarianten rund 45 MWh/a Energie in Form von Heizöl benötigt.

Phosphor: Die Phosphorbilanzierung zeigt, dass bei der Systemvariante V1 mit 463 kg/a dreimal soviel Phosphor in die Gewässer eingeleitet wird als bei V2 und V3 (bei beiden 158 kg/a). Ebenso ist der Phosphoranteil im Klärschlamm, dem „Reststoff“ in V1, höher als bei den anderen Systemen. Bei V1 sind aufgrund von Exfiltrationen aus der Kanalisation Phosphorverluste in Höhe von 116 kg/a in den Boden bzw. ins Grundwasser festzustellen. Bei V2 und V3 tritt zunächst keine Exfiltration aufgrund der neu gelegten Inliner in den Rohren und Kanälen auf, später läge sie bei ca. 91 kg/a.

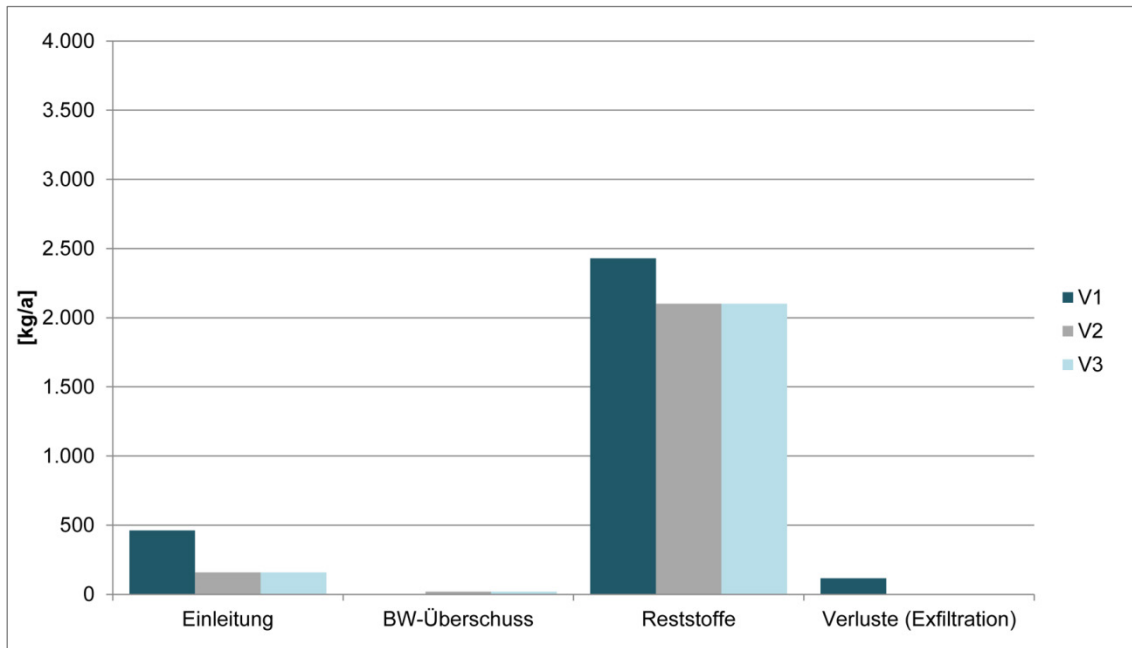


Abbildung 15: Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B excl. Niederschlag. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau Blockebene, V3: FFM KonvGrau Quartiersebene

Zusätzlich wurde noch untersucht, inwiefern die abweichende Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei einer künstlichen Nivellierung der Eingangskonzentrationen zwischen den verschiedenen Stoffströmen die Reststoffe in den neuartigen Varianten V2 und V3 dann etwas größer sind als im konventionellen System (V1). Die Verhältnisse der Werte bzgl. Einleitung, BW-Überschuss und Exfiltration bleiben davon unberührt.

Stickstoff: Ein ähnliches Bild wie bei Phosphor ergibt die Stickstoffbilanzierung: Bei V1 wird mit 3.357 kg/a mehr Stickstoff in die Gewässer eingeleitet als in den anderen Varianten; allerdings ist der Unterschied für Stickstoff deutlich geringer (V2 und V3 liegen beide bei 2.541 kg/a). Die Stickstoffverluste in die Atmosphäre sind in der konventionellen Variante höher als in V2 und V3. Dazu gibt es in V1 noch Stickstoffverluste von 707 kg/a, die durch Exfiltration aus der Kanalisation in die Umwelt gehen. Stickstoffverluste aufgrund einer Exfiltration sind in V2 und V3 aufgrund der verlegten Inliner zunächst nicht vorhanden (später würden sie bei rund 628 kg/a liegen und die Werte in der Einleitung bzw. im BW-Überschuss auf 2.443 kg/a respektive 115 kg/a sinken).

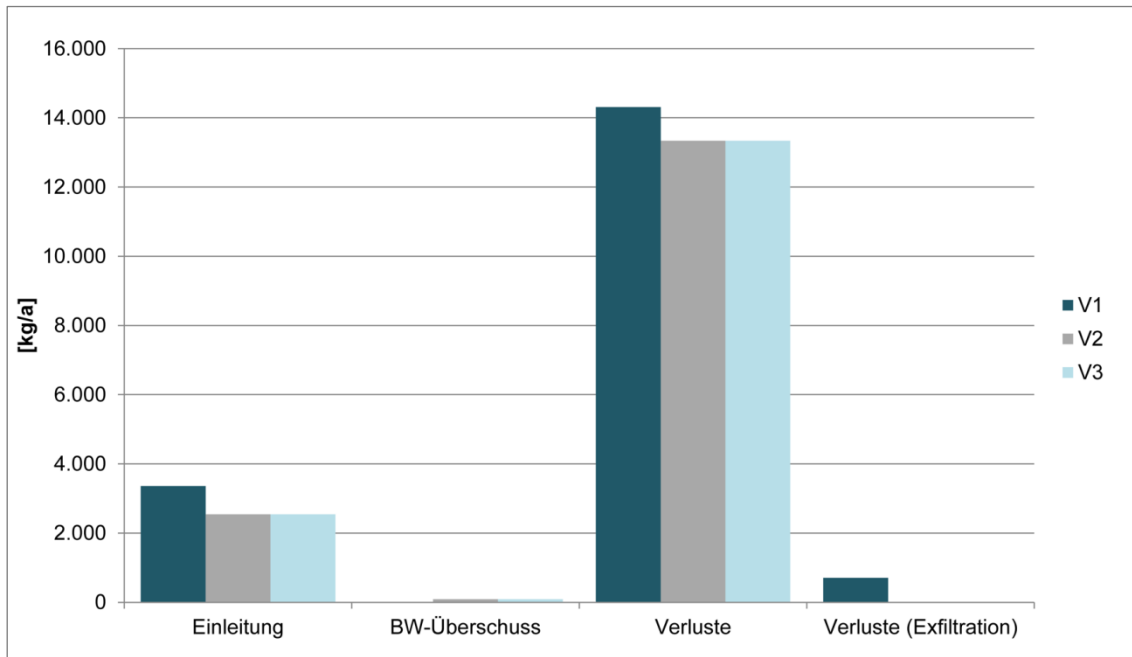


Abbildung 16: Stickstoffoutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet B exkl. Niederschlag. V1: Konventionelles System FFM, V2: FFM KonvGrau Blockebene, V3: FFM KonvGrau Quartiersebene. „Verluste“ beziffern die gasförmigen Stickstoffemissionen in die Atmosphäre.

Auch hier wurde noch untersucht, inwiefern die abweichende Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) die Ergebnisse beeinflussen: die Verluste in den neuartigen Varianten V2 und V3 liegen dann über denen im konventionellen System (V1). Die Verhältnisse der Werte bzgl. Einleitung, BW-Überschuss und Exfiltration bleiben davon unberührt.

6.3 Modellgebiet C: Neustrukturierung eines Bildungsstandorts (HH)

Wasser: Die konventionelle Systemvariante (V1) und die Variante mit einer zusätzlichen Wärmerückgewinnung im konventionellen System (V2) haben mit einem täglichen Trinkwasserbedarf von $31.718 \text{ m}^3/\text{a}$ den höchsten Trinkwasserbedarf. Im Vergleich dazu wird in der Systemvariante V3 (HH KonvGrau) mit $22.289 \text{ m}^3/\text{a}$ eine Trinkwassereinsparung von ca. 30% erreicht. Der Wasserbedarf für die Toilettenspülung, der in der Systemvariante V3 durch den Einsatz von Betriebswasser aus aufbereitetem Grauwasser gedeckt wird, ist aufgrund der Vakuumableitung gering und liegt bei $1.643 \text{ m}^3/\text{a}$. Der entstehende Betriebswasserüberschuss in Höhe von $17.463 \text{ m}^3/\text{a}$ kann für andere Versorgungszwecke oder für Verbesserungen von Stadtökologie und Mikroklima verwendet werden.

Bezüglich der Einleitung von gereinigtem Abwasser in die Gewässer wird in den ersten beiden Systemvarianten mit $30.821 \text{ m}^3/\text{a}$ (inklusive Regenwasser von verschmutzten Verkehrsflächen) deutlich mehr eingeleitet als in Systemvariante V3.

Die Regenwassereinleitung aus der Trennkanalisation ist bei V1 und V2 mit 957 m³/a etwas geringer als bei V3. Der Grund dafür ist, dass das Regenwasser von den verschmutzten Verkehrsflächen mit dem Schmutzwasser abgeleitet wird.

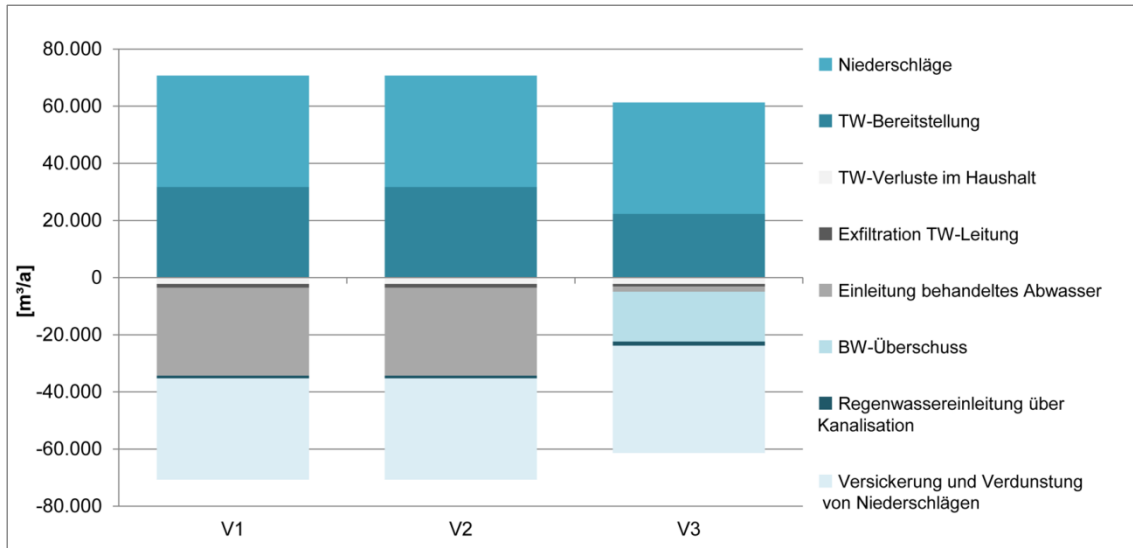


Abbildung 17: Wasserbilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau. In V3 ergibt sich eine Diskrepanz von 105 m³/a zwischen Input und Output. Grund dafür sind die im Input nicht berücksichtigten Co-Substrate (Fettwasser).

Energie: Für die Energiebilanzen wurden alle einzelnen Energieströme (siehe Kap. 5.4) von der Trinkwasserbereitstellung bis hin zur Abwasserbehandlung berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Energiebilanzen wird deutlich, dass die Systemvariante V1 mit einem zusätzlichen Strombedarf von 11 MWh/a im Vergleich zu den Varianten V2 (51 MWh/a) und V3 (121 MWh/a) besser dasteht.

Hinsichtlich der Wärmebilanzen steht die Systemvariante V2 mit 311 MWh/a am besten da, gefolgt von V3 (168 MWh/a). Der Grund für die besseren Wärmebilanzen bei diesen beiden Systemen ist die Wärmerückgewinnung aus dem Ab- bzw. Grauwasser. Durch die Wärmerückgewinnung wäre es theoretisch möglich, im System V2 rund 18,5% und im System V3 rund 10% des Wärmebedarfs zu decken, der für die Bereitstellung von Warmwasser und die Wärmeversorgung der 750 Einwohner benötigt wird. Der Energiebedarf für den Transport von Co-Substraten mit dem LKW ist bei allen Systemvarianten sehr gering und liegt einheitlich bei 0,69 MWh/a (für Details zur Berechnung siehe auch Kap. 5.4.2). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass dieses Modellgebiet vom Fernwärmenetz umgeben ist. Das heißt, alternative Quellen der Wärmeversorgung sind sorgfältig zu prüfen und hierzu ins Verhältnis zu setzen.

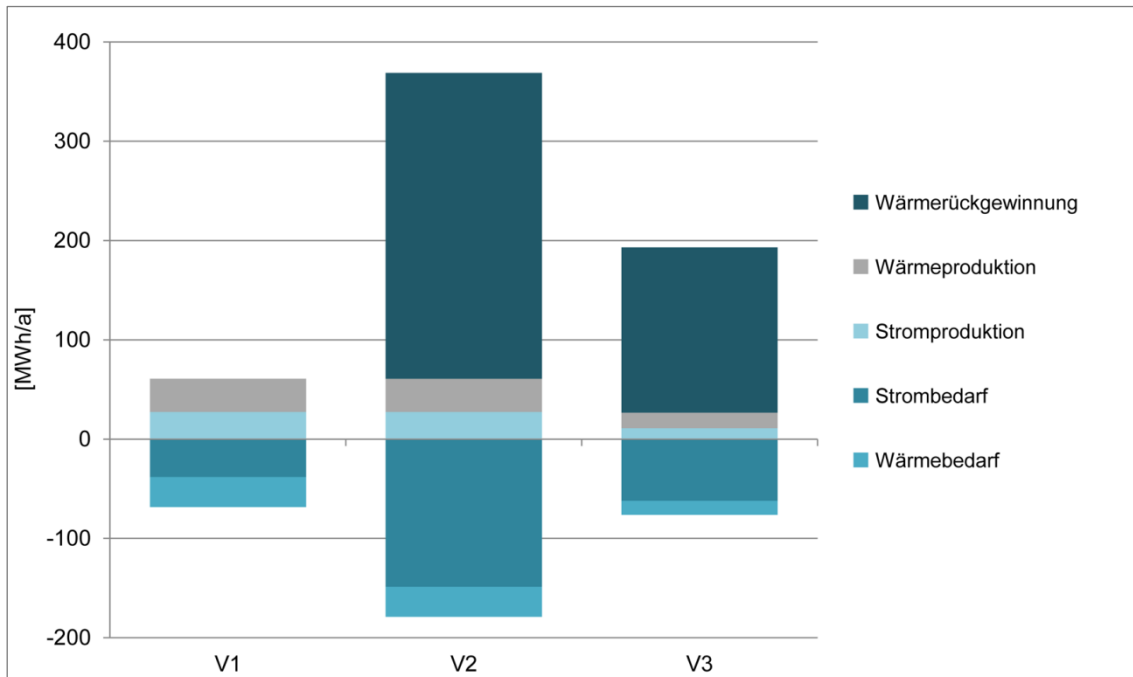


Abbildung 18: Energiebilanzen für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau. Die benötigte Transportenergie ist nicht dargestellt, da sehr gering (V1-3: 0,69 MWh/a).

Phosphor: Die Phosphorbilanzierung zeigt, dass bei den Systemen V1 und V2 (bei beiden 79 kg/a) mehr Phosphor in die Gewässer eingeleitet wird als bei V3. Ebenso ist der Phosphoranteil im Klärschlamm (siehe Reststoffe in Abbildung 19) höher als bei den anderen Systemen. Wie bereits erwähnt, gibt es für das Modellgebiet in Hamburg keine Phosphorverluste in den Untergrund (siehe Kap. 5.4.1).

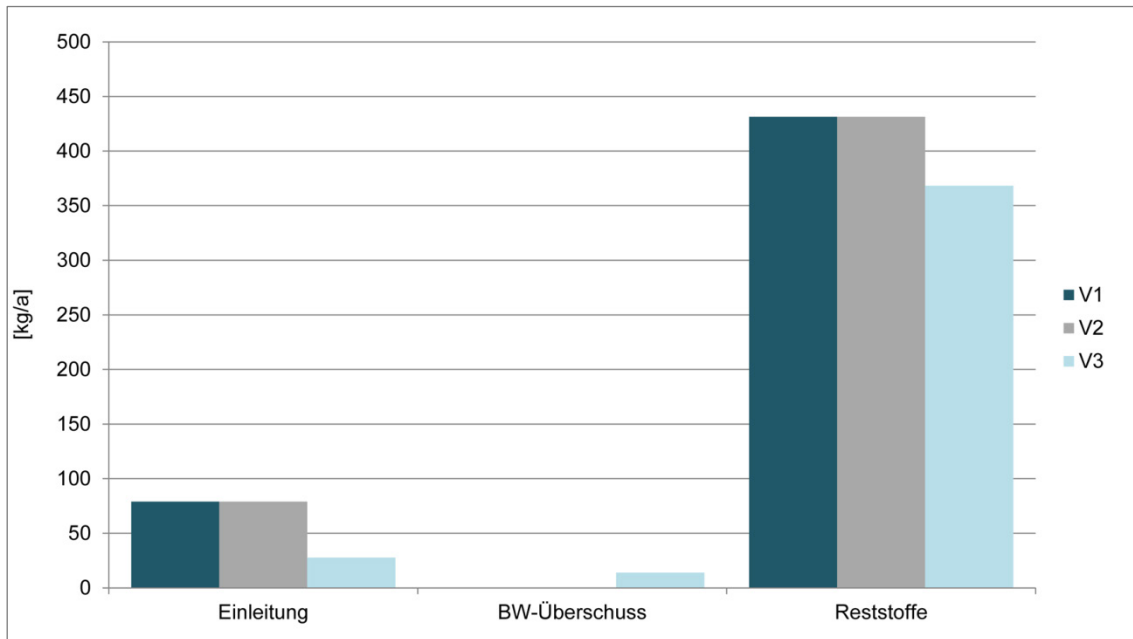


Abbildung 19: Phosphoroutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau

Zusätzlich wurde noch untersucht, inwiefern die abweichende Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei einer künstlichen Nivellierung der Eingangskonzentrationen zwischen den verschiedenen Stoffströmen die Reststoffe in den neuartigen Varianten V2 und V3 dann etwas größer sind als im konventionellen System (V1). Die Verhältnisse der Werte bzgl. Einleitung, BW-Überschuss und Exfiltration bleiben davon unberührt.

Stickstoff: Ähnlich wie bei der Phosphorbilanzierung wird auch mehr Stickstoff bei V1 und V2 (bei beiden 572 kg/a) in die Gewässer eingeleitet. Die Stickstoffverluste in die Atmosphäre sind in V1 und V2 höher im Vergleich zu V3.

Auch hier hat die abweichende Datenlage bei den betrachteten Abwasserteilströmen (siehe Kap. 5.4.3) Einfluss auf die Ergebnisse zu den Verlusten. Der Stickstoffanteil der Verluste in HH KonvGrau (V3) läge dann minimal (7 kg/a) über denen von V1 und V2. Die Verhältnisse der Werte bzgl. Einleitung und BW-Überschuss bleiben davon unberührt.

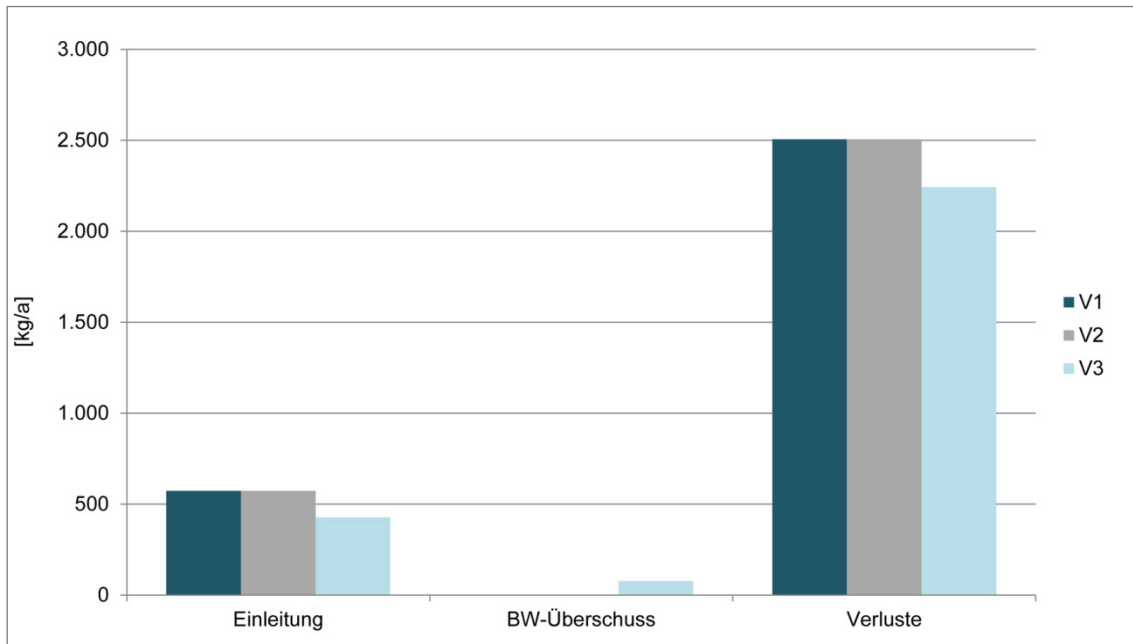


Abbildung 20: Stickstoffoutput für die technischen Systemvarianten im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau. „Verluste“ beziffern die gasförmigen Stickstoffemissionen in die Atmosphäre.

6.4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation

In diesem Unterkapitel werden beispielhaft Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und der Monte-Carlo-Simulation für das Modellgebiet C dargestellt. Für Modellgebiet A und B ergeben sich ähnliche Muster.

6.4.1 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird für das Modellgebiet C in drei Beispielen gezeigt, wie sich die Ergebnisse/Werte für bestimmte Variablen ändern, wenn die Parameterwerte einiger sensibler Parameter (siehe Tabelle 4) geändert werden. Die Auswahl der Beispiele erfolgte einerseits aufgrund der sich verändernden Trinkwasserverbräuche und bestehenden Unsicherheiten über die Verwendungsmuster (TZW 2015) und der sich andeutenden weiteren Absenkungen. Das dritte Beispiel wurde eingeführt, weil bei der Wärmerückgewinnung, wie bereits im Kap. 5.4.2 erläutert, sehr große Unsicherheiten hinsichtlich Potenzial bzw. Verluste bestehen.

Beispiel 1: Reduzierung des Trinkwasserbedarfs bei den Systemvarianten V1 und V2

Der Trinkwasserbedarf für die Systemvarianten V1 und V2 liegt bei $31.718 \text{ m}^3/\text{a}$. Wenn man den TW-Bedarf zum Baden, Duschen, Körperpflege ($44 \text{ l/E}^*\text{d}$) sowie zur Toilettenspülung ($33 \text{ l/E}^*\text{d}$) um 20% reduziert (der TW-Bedarf für andere Verbrauchszwecke bleibt unverändert), würde der Trinkwasserbedarf bei $27.318 \text{ m}^3/\text{a}$ liegen. Diese Reduktion könnte ohne Komforteinbußen möglich sein. Kenway et al. (2013) halten etwa eine Reduktion auf $23 \text{ l/E}^*\text{d}$ für Baden, Duschen, Körperpflege und $11 \text{ l/E}^*\text{d}$ für die Toilettenspülung für machbar. Dadurch hätte man eine Trinkwassereinsparung von 14%, eine Energieeinsparung von 14% bei der Trinkwasserbereitstellung (von rund 14 MWh/a auf ca. 12 MWh/a) und gleichzeitig 14% Energieeinsparung bei der Abwasserbehandlung (von rund 12 MWh/a auf 11 MWh/a). Solch eine Trinkwassereinsparung könnte eventuell durch den Einsatz von Wasserspartoiletten in Kombination mit weiteren Wassersparmaßnahmen und veränderter Körperpflege (wie „kürzere Duschzeiten“) möglich werden.

Beispiel 2: Reduzierung des Trinkwasserbedarfs bei der Systemvariante V3

Der Trinkwasserbedarf für die Systemvariante V3 liegt bei $22.289 \text{ m}^3/\text{a}$. Wenn man den TW-Bedarf zum Baden, Duschen, Körperpflege ($44 \text{ l/E}^*\text{d}$) um 20% reduzieren würde (Kenway et al. 2013 schlagen sogar eine Reduktion von ca. 45% vor), Trinkwasser für Toilettenspülung entfällt an dieser Stelle, da Betriebswasser genutzt wird, würde der Trinkwasserbedarf bei $19.774 \text{ m}^3/\text{a}$ liegen. Dadurch hätte man eine Trinkwassereinsparung von 11%, eine Energieeinsparung von 11% bei der Trinkwasserbereitstellung (von rund 10 MWh/a auf ca. 9 MWh/a) und gleichzeitig 13% Energieeinsparung bei der Grauwasserbehandlung (von rund 38 MWh/a auf 33 MWh/a).

Beispiel 3: Wärmerückgewinnung aus Grauwasser in der Systemvariante V3

Die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser beträgt in der Systemvariante V3 rund 166 MWh/a . Bei einer Erhöhung der Wärmerückgewinnungsverluste von aktuell 30% auf 50% aufgrund von z.B. ungünstigen Rahmenbedingungen für die Wärmerückgewinnung (siehe auch Kap. 5.4.2), würde die Wärmerückgewinnung nur noch rund 119 MWh/a betragen. Das heißt, dass die Erhöhung der Wärmerückgewinnungsverluste um 70% eine Wärmeertragsminderung aus dem Grauwasser um insgesamt 29% verursachen würde. Da der Strombedarf in V3 für die WRG bei $7,5 \text{ MWh/a}$ liegt, bleibt auch dann noch eine positive Energiebilanz bestehen.

6.4.2 Monte-Carlo-Simulation

Im Folgenden werden die möglichen Verteilungen der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit einem Sample von 10.000 Wiederholungen auf Basis der vorhandenen Kenntnisse über die eingesetzten Parameter (siehe Anhang 8.3) anhand von drei Beispielen für das Modellgebiet C dargestellt.

Beispiel 1: Monte-Carlo-Simulation für die Wassermodellierung

Die Monte-Carlo-Simulation hat für die Trinkwasserbereitstellung in den Systemen V1 und V2 einen Median (50%-Perzentil) von 31.406 m³/a ergeben. 90% der zufällig berechneten Ergebnisse liegen dabei zwischen 25.359 m³/a (5% Perzentil) und 39.158 m³/a (95% Perzentil). Bei der Systemvariante V3 liegt der Median der Monte-Carlo-Simulation für die Trinkwasserbereitstellung bei 22.025 m³/a. 90% der Ergebnisse liegen dabei zwischen 17.275 m³/a (5% Perzentil) und 28.396 m³/a (95% Perzentil). In V3 liegt der Median der Monte-Carlo-Simulation für den Betriebswasserüberschuss bei 17241 m³/a. 90% der Ergebnisse liegen dabei zwischen 12.636 m³/a und 23.316 m³/a. Der Median liegt hier in allen drei Fällen unter dem Mittelwert.

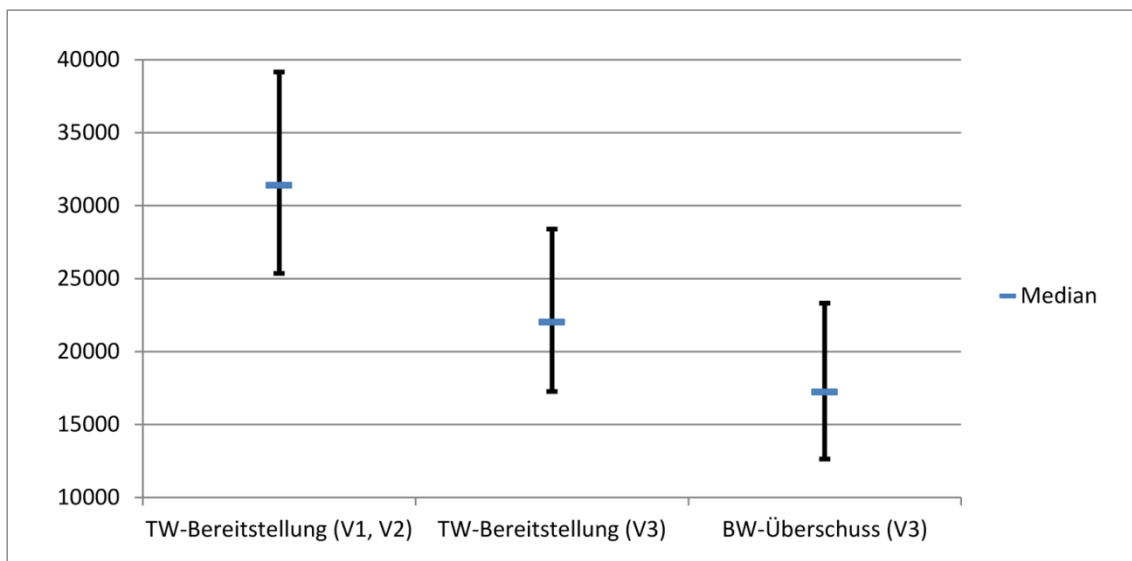


Abbildung 21: Monte-Carlo-Simulation für die Trinkwasserbereitstellung im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau

Beispiel 2: Monte-Carlo-Simulation für die Energiemodellierung

Die Monte-Carlo-Simulation hat für die Strombilanz in V1 einen Median von -27 kWh/a ergeben. 90% der zufällig berechneten Ergebnisse liegen dabei zwischen -42 kWh/a (5% Perzentil) und -12 kWh/a (95% Perzentil). In V2 liegt der Median für die Strombilanz bei -65 kWh/a, das 5%-Perzentil bei -84 kWh/a und das 95%-Perzentil bei -27 kWh/a. Bei der Systemvariante V3 liegt der Median bei -46 kWh/a. 90% der Ergebnisse liegen dabei zwischen -68 kWh/a (5% Perzentil) und -30 kWh/a (95% Perzentil). Der Median liegt bei V1 in etwa bei dem Mittelwert. Bei V2 liegt

der Median deutlich unter und bei V3 über dem Mittelwert. Eine große Unsicherheit wird in der Strombilanz von V2 ersichtlich. Dies liegt sicherlich an der im konventionellen System zusätzlich eingesetzten WRG, die ja, wie bereits diskutiert, ein großes Unsicherheitspotenzial birgt.

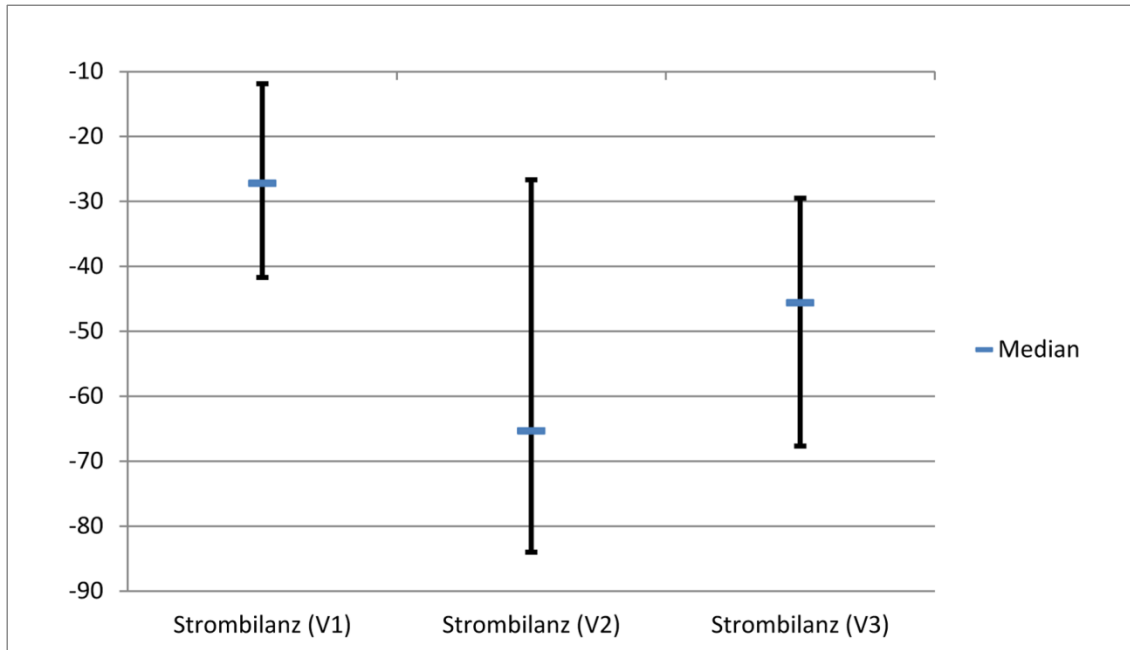


Abbildung 22: Monte-Carlo-Simulation für die Strombilanz im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau

Beispiel 3: Monte-Carlo-Simulation für die Nährstoffmodellierung

Die Monte-Carlo-Simulation hat bei den Systemvarianten V1 und V2 für die Phosphoreinleitung in Gewässer einen Median von 90 kg/a ergeben. 90% der zufällig berechneten Ergebnisse liegen dabei zwischen 4 kg/a (5% Perzentil) und 200 kg/a (95% Perzentil). Bei der Systemvariante V3 liegt der Median für die Phosphoreinleitung bei 47 kg/a. 90% der Ergebnisse liegen dabei zwischen 5 kg/a (5% Perzentil) und 137 kg/a (95% Perzentil). Bei V3 gibt es zusätzlich zur Schwarzwassereinleitung auch durch die Abgabe (Versickerung/Einleitung) des BW-Überschusses in die Umwelt Phosphoreinträge. Hier liegt der Median bei 12 kg/a. Das 5%-Perzentil liegt bei 6 kg/a und das 95%-Perzentil bei 22 kg/a.

Der Median für den Phosphorgehalt in den Reststoffen liegt bei V1 und V2 bei 400 kg/a. Das 5%-Perzentil liegt bei 300 kg/a und das 95%-Perzentil bei 600 kg/a. Für V3 liegt der Median bei 252 kg/a, das 5%-Perzentil bei 136 kg/a und das 95%-Perzentil bei 468 kg/a. Der Median liegt bei allen dargestellten Variablen unter dem Mittelwert.

Große Unsicherheiten bestehen hier in den Reststoffen, in denen hohe Phosphoranteile enthalten sind. Ein Grund hierfür ist die geringe P-Menge im Betriebswasser.

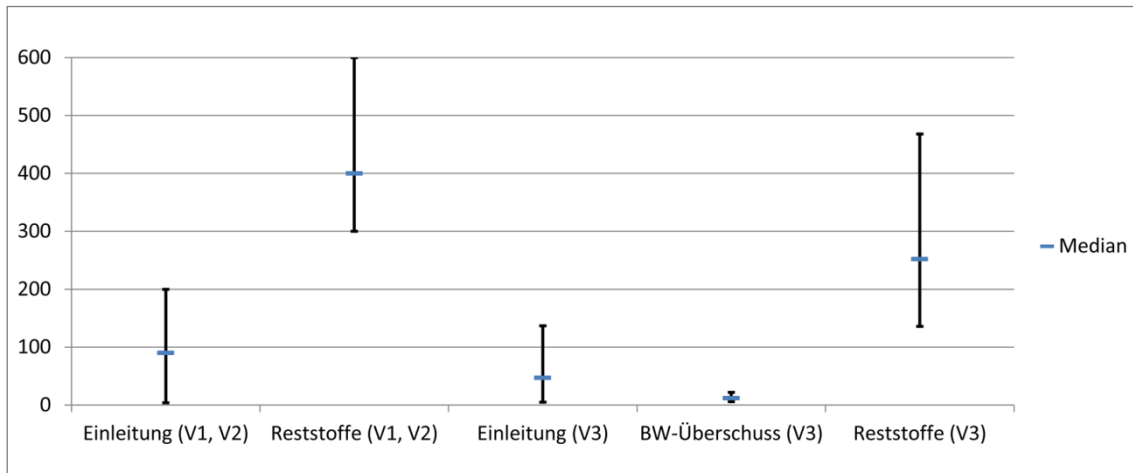


Abbildung 23: Monte-Carlo-Simulation für Phosphorströme im Modellgebiet C. V1: Konventionelles System HH, V2: Konventionelles System HH mit WRG, V3: HH KonvGrau

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation machen bei den meisten dargestellten Beispielen deutlich, dass die Spanne zwischen den Minimum- und Maximumwerten weit auseinander liegt. Um dies zu vermeiden, sind genauere Kenntnisse über die Parameterwerte notwendig. Dies gilt insbesondere für die neuartigen Systemvarianten. Hier kann ein sogenanntes Parameter-Ranking helfen. Mit einem Parameter-Ranking kann analysiert werden, welche Parameterunsicherheit den größten Einfluss auf die Unsicherheit (Fehler) einer berechneten Variable hat. Dieses gibt Hinweise, welche Werte genauer bekannt sein müssten, damit eine Variable besser (genauer) bestimmt werden kann.

Das Ziel bei der Durchführung der Unsicherheitsanalysen in dieser Arbeit war, in erster Linie die sensitiven Parameter zu identifizieren und mithilfe der Monte-Carlo-Simulation die Spannbreite, in der die Werte/Ergebnisse liegen, darzustellen, um zukünftig Optimierungspotenziale nutzen zu können. Mittels eines Parameter-Rankings hätte zudem analysiert werden können, welche Parameterunsicherheit den größten Einfluss auf die Unsicherheit (Fehler) einer berechneten Variable hat.

6.5 Weitergehende Ergebnisanalyse und Interpretation

Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die Aussagefähigkeit von Stoffstromanalysen beschränkt ist und diese nur im Rahmen der Systemgrenzen unter vorgegebenen Bedingungen gültig ist. In Stoffstromanalysen werden soziale und ökonomische Aspekte sowie Fragen zur technischen Machbarkeit nicht betrachtet (Brunner 2004). Aus diesem Grund sollte eine Stoffstromanalyse nicht als alleinige Entscheidungsgrundlage für oder gegen ein System oder eine Maßnahme dienen, sondern im Verbund mit der Betrachtung aller Aspekte des Systems als eine Basis für Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfe zum Entscheidungsprozess beitragen.

Gebietsübergreifend lässt sich feststellen, dass durch die Einführung von neuartigen Systemvarianten mit Betriebswassernutzung Trinkwassereinsparungen von 27-30% zu erzielen sind. Dieses Ergebnis bezieht sich nur auf den Einsatz des Betriebswassers zur Toilettenspülung. Werden weitere Einsatzorte wie z.B. Waschmaschinen und Geschirrspülmaschinen möglich (in Einzelfällen so realisiert und mit einer gewissen Nutzerakzeptanz unterlegt, siehe Hefter et al. 2015), ist noch eine weitergehende Reduzierung möglich. Allerdings wird auch sichtbar (siehe Abbildung 24), dass immer noch ein erheblicher Betriebswasserüberschuss auf lokaler Ebene erzeugt wird. Dies gilt insbesondere für die Systemvarianten, in denen die Schwarzwasserablenkung mittels Vakuum erfolgt. Das produzierte Betriebswasser ist einem anderen Nutzungszweck zuzuführen (z.B. Nutzung zur Grünpflege, Betriebswasserversorgung von Haushalten oder Gewerbe in einem angrenzenden Gebiet, zum Urban Gardening, Straßenreinigung, Gebäudekühlung o.ä.), ebenso kann es kleinräumig versickert bzw. in ein Gewässer eingeleitet werden. Nicht immer wird die Versickerung oder auch Einleitung möglich sein, so dass dem Errichten der Systemalternative eine sorgfältige Planung der Verwertung bzw. Rückführung in die Umwelt vorangehen sollte.

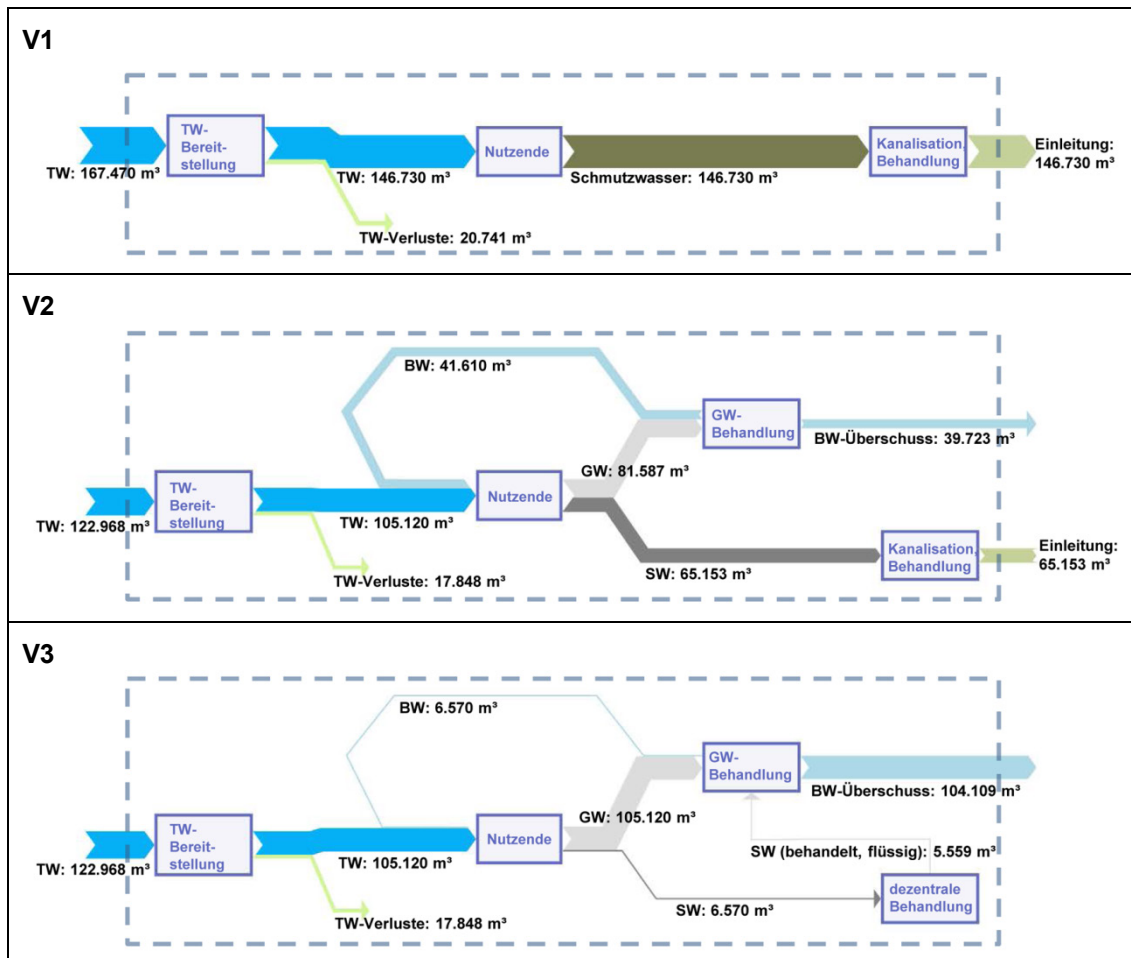


Abbildung 24: Stoffstromdarstellung der Wasserflüsse des Modellgebiets A (Frankfurt) ohne Regenwasser. V1: konventionelles System, V2: FFM KonvGrau, V3: HWC. Niederschläge wurden nicht berücksichtigt, da sie sich in den einzelnen Varianten nicht unterscheiden.

Die Abbildung 24 zeigt jedoch auch sehr gut, wie neuartige Systeme den Bedarf an Trinkwasser und damit die häufig außerhalb der Stadt befindliche Inanspruchnahme der Wasserressourcen verringert und eine nachhaltigere Nutzung der zur Verfügung gestellten Ressourcen über eine Kreislaufführung möglich wird.

Der Diskussion zum Wasserbedarf ist jedoch auch anzumerken, dass erhebliche Unsicherheiten bzgl. der Verbrauchsmuster im Haushalt bestehen (TZW 2015). Die verfügbaren Daten beruhen immer noch auf Erhebungen aus den 1970er und -80er Jahren. Auch liegen die Trinkwasserbedarfe in Frankfurt am Main, die in der Analyse mit 143 l/E*d (Hessisches Statistisches Landesamt 2012) angesetzt wurden, deutlich über dem deutschen Durchschnitt mit 121 l/E*d (BDEW 2015). Der Grund hierfür sind die großen Pendlerströme Frankfurts. Hinzu kommt, dass mit Daten aus unterschiedlichen Bezugsrahmen (siehe Kap. 5.4.3) gearbeitet werden musste, die u.a. aufgrund der zuvor geschilderten Problematik nicht vereinheitlicht werden konnten. Da-

her sind die betrachteten absoluten Summen zwischen den Systemvarianten z.B. nicht einheitlich.

Kritisch zu prüfen ist sicherlich auch nochmals die Wärmerückgewinnung. Diese zeigt in der Stoffstrombilanzierung ein erhebliches Potenzial auf und scheint eine attraktive Ergänzung zu den sich in der Diskussion befindlichen alternativen Energiequellen zu sein. Wie jedoch aus der Praxis bekannt, ist an vielen Stellen eine Entnahme in bestehenden Kanalsystemen aufgrund der Gegebenheiten nicht möglich (wirtschaftlich und technisch). Inwiefern sich hier auch noch weitere Einschränkungen bei der Prüfung von semizentralen und dezentralen Lösungen z.B. aufgrund von Skaleneffekten ergeben werden, ist aktuell schwierig abzusehen. Jedoch scheint insbesondere eine Rückgewinnung aus dem Grauwasserstrom interessant, der ja auch der Wasserstrom mit dem größeren Wärmeanteil aus Bad/Dusche und Wasch-/Spülmaschinen ist. Auch wenn man berücksichtigt, dass die Rückgewinnungspunkte näher am Entstehungsort der Wärme liegen und dadurch ein höheres Abschöpfungspotenzial möglich wird (DWA 2008b, siehe auch Kap. 5.4.2).

Bezüglich der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor zeichnet sich das Bild ab, dass eine Reduzierung der Belastung der Gewässer durch die Stoffstromtrennung möglich ist. Neuartige Verfahren erzielen hier bessere Reinigungsergebnisse. Hier ist nicht alleine auf die aufnehmenden Fließgewässer zu achten, da die ins Wasser gelangenden Nährstoffe nicht nur dort zur Eutrophierung beitragen, sondern von dort weiter in die küstennahen Bereiche der Meere gelangen. Auf Teilstromtrennung basierende Systemalternativen bieten folglich die Möglichkeit, die Überdüngung unserer Flüsse und der Weltmeere zu verringern.

Auch die Einleitung von Betriebswasser, etwa zum Management der grünen und blauen Infrastruktur der Städte, ändert in Gebieten wie A oder C nichts an diesem Bild, sofern die Gewässer groß genug sind. Für die Gewässergüte ist allerdings nicht alleine der stoffliche Eintrag aus dem Betriebswasser zu beachten, sondern auch dessen Temperatur, insbesondere in kleineren Bächen, Teichen und Seen. Diese kann aber gegebenenfalls durch weitere, bisher nicht in den Systemvarianten enthaltene Maßnahmen der Wärmerückgewinnung aus dem Betriebswasser entsprechend der limnologischen Erfordernisse eingestellt werden.

Der Großteil des Phosphoroutputs befindet sich in den Reststoffen. Hier bedarf es ein besonderes Augenmerk für deren weitere Verwertung und damit die tatsächliche Entlastung der Umwelt. Bzgl. der landwirtschaftlichen Verwertung und der dabei entstehenden Emissionen ist nur eine sehr schwache Datenlage vorhanden. Gemeinsam mit der Landwirtschaft sind aus den Restschlämmen und Aschen Düngemittel zu entwickeln, die sich unbedenklich und erfolgreich anwenden lassen. Hierzu kann möglicherweise auch auf die Forschungen zur Phosphorwiederverwendung des letzten Jahrzehnts zurückgegriffen werden – auch um angesichts der sich andeutenden Ressourcenverknappungen handlungsfähig zu bleiben (vgl. Schramm 2008).

Bezogen auf die Stickstoffoutputs lösen die auf der Teilstromtrennung basierenden Systemvarianten bisher allerdings nicht das siedlungswasserwirtschaftliche Problem, dass es zu Stickstoffemissionen aus der Abwasserbehandlung in die Atmosphäre kommt. Diese bestehen zwar überwiegend aus Stickstoffgas, vermutlich im Promillebereich, aber auch aus dem Treibhausgas Distickstoffmonoxid, das ein Zwischenprodukt der Denitrifikation bei der Abwasserbehandlung ist (Umweltbundesamt 2009). Die neuen Systemalternativen verringern diese Emissionen jedoch und sind deshalb durchaus als Innovation in die richtige Richtung zu betrachten. Denn ebenso wie bei Phosphor ist hier ein Handeln unbedingt erforderlich, damit die „planetarischen Grenzen“ (Rockström et al. 2009) nicht überschritten werden.

Die gemeinsame Betrachtung von Wasser und Energie weist darauf hin, dass es auch sinnvoll sein kann, sich anschließende Systeme wie Fernwärme oder auch die Bioabfallbehandlung mitzubetrachten. Je nach städtischer Lage und Gelegenheit verändern Systemvarianten durch Entscheidungen in diesen Bereichen nochmals ihre Attraktivität.

Übergreifend lässt sich sagen, dass mittels einer Stoffstromanalyse der kommunalen Planung Hinweise gegeben werden können, welche technische Alternative mit Blick auf die Stoffströme für ein Gebiet geeignet sein könnte und wo etwa ein besonders hoher Grad an Ressourcenschutz/-verbrauch zu verzeichnen ist. Über die Input- und Outputströme lassen sich auch Abschätzungen zu stofflichen Effekten aus dem Gebiet auf seine Umgebung darstellen. So kann z.B. deutlich werden, welches zusätzliche Potenzial durch im Gebiet nicht genutztes Betriebswasser zur Verfügung steht. Gleichzeitig entstehen so wichtige Hinweise für die weitere Planung wie etwa für notwendige Überlegungen zum weiteren Umgang mit dieser nicht genutzten Betriebswassermenge. Stoffstromanalysen können somit in der Planung helfen und unterstützen, sie sind jedoch sicherlich immer im Verbund mit weiteren Analyse- und Planungstools zu sehen.

7 Zusammenfassung und Folgerung

Die Stoffstromanalyse kann ein hilfreiches Unterstützungstool in der Planung bzgl. Ressourcennutzung und -schutz sein. Gleichzeitig lassen sich wichtige Hinweise für die weitere Planung etwa mit Blick auf sich anschließende Infrastrukturen wie die Trinkwasserversorgung, die Pflege von öffentlichen Grünflächen oder auch die Energieversorgung daraus ableiten.

In Hinsicht auf die betrachteten neuartigen Systemvarianten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Gebietsübergreifend lässt sich feststellen, dass durch die Einführung von neuartigen Systemvarianten mit Betriebswassernutzung Trinkwassereinsparungen von 27-30% zu erzielen sind. Dieses Ergebnis bezieht sich nur auf den Einsatz des Betriebswassers zur Toilettenspülung.
- Allerdings wird auch sichtbar, dass immer noch ein erheblicher Betriebswasserüberschuss auf lokaler Ebene erzeugt wird, solange Betriebswasser nur für die Toilettenspülung zum Einsatz kommt. Das produzierte Betriebswasser ist somit einem anderen Nutzungszweck zuzuführen (z.B. Nutzung zur Grünpflege, Betriebswasserversorgung von Haushalten oder Gewerbe in einem angrenzenden Gebiet, zum Urban Gardening, Straßenreinigung o.ä.); ebenso kann es kleinräumig versickert bzw. in ein Gewässer eingeleitet werden.
- Die de- und semizentrale Wärmerückgewinnung zeigt in der Stoffstrombilanzierung ein erhebliches Potenzial auf und scheint eine attraktive Ergänzung zu den sich in der Diskussion befindlichen alternativen Energiequellen zu sein. Dieses Potenzial ist jedoch sicherlich nochmals kritisch zu prüfen hinsichtlich der zeitlichen Wärmeabnahme und der technisch/wirtschaftlichen Ausgestaltung (wie etwa bei bestehender Fernwärme). Wie aus der Praxis bekannt, ist an vielen Stellen eine Entnahme in bestehenden Kanalsystemen aufgrund der Gegebenheiten nicht möglich. Erfahrungen jenseits weniger Pilotanlagen liegen noch nicht vor.
- Der Großteil des Phosphoroutputs befindet sich in den Reststoffen. Hier bedarf es eines besonderen Augenmerks für deren weitere Verwertung und damit die tatsächliche Entlastung der Umwelt.
- Bezogen auf die Stickstoffoutputs lösen die auf der Teilstromtrennung basierenden Systemvarianten bisher nicht das siedlungswasserwirtschaftliche Problem der Stickstoffemissionen aus der Abwasserbehandlung in die Atmosphäre. Die neuen Systemalternativen verringern diese Emissionen allerdings und sind deshalb durchaus als Innovation in die richtige Richtung zu betrachten. Wichtig ist es jedoch, eine Verwertungsvariante anzustreben, die Stickstoffemissionen nicht befördert.

Literatur

- Baccini, P./P. H. Brunner (1991): Metabolism of the anthroposphere. Berlin/Heidelberg
- Baccini, P./H. Daxbeck/E. Glenck/G. Henseler (1993): METAPOLIS: Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt. NFP 25 "Stadt und Land" 1993, Bd. 34 A
- Baccini, P./H.-P. Bader (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg
- badenova (2007): Wärme aus Abwasser. Evaluation von Technik, Betrieb und Randbedingungen Potenzial der Kanalwärmenutzung in Freiburg im Breisgau. Freiburg. https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche_1/stab_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2002_1/2002-6_KanalwaermeAbschlussbericht.pdf (09.02.2016)
- Bader, H.-P./R. Scheidegger (2012): MMFA Framework. Eawag – Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. Dübendorf, Schweiz
- Baumann, M./H.-J. Laue/P. Müller (2007): Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie. BINE Informationsdienst, 4. Aufl. Berlin
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2015): Trinkwasser-verwendung im Haushalt 2014. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/3852C5217E9FD4E1C125786C004274E7/\\$file/Trinkwasserverwendung%20im%20HH%202014-Anteile.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/3852C5217E9FD4E1C125786C004274E7/$file/Trinkwasserverwendung%20im%20HH%202014-Anteile.pdf) (14.02.2016)
- Brunner, P. H./H. Rechberger (2004): Practical handbook of material flow analysis. Boca Raton/London/New York/Washington D.C.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2008a): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Hennef
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2008b): DWA Regelwerk. Merkblatt DWA-M114. Energie aus Abwasser – Wärme- und Lageenergie. Hennef
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011a): DWA-Positionen. Positionen zur Energie- und Wasserwirtschaft. Hennef
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011b): Leitfaden Nr. 2-13 Betrieb von Abwasseranlagen. Die Phosphorbilanz im kommunalen Abwasser. Hennef
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011c): Leitfaden Nr. 2-14 Betrieb von Abwasseranlagen. Die Stickstoffbilanz im kommunalen Abwasser. Hennef

- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014): Arbeitsblatt DWA-A 272 Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Hennef
- Eawag – Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Dübendorf, Schweiz
- Frankfurt Green City (2016): Wassergewinnung: Die natürlichen Wasservorkommen bewahren. <http://www.frankfurt-greencity.de/umwelt-frankfurt/frankfurts-trinkwasser/wassergewinnung/> (08.03.2016)
- Fuchs, S./S. Fach/H. H. Hahn (Hg.) (2008): Stoffströme in Flussgebieten. Von der Bilanzierung zur Bewirtschaftung. Tagungsband der Karlsruher Flussgebietstage 2008. Schriftenreihe SWW, 128
- Giese, T./J. Londong (Hg.) (2016): Kopplung von regenerativer Energiegewinnung mit innovativer Stadtentwässerung – Synthesebericht zum Verbundforschungsvorhaben KREIS. Schriftenreihe des b.is, Bd. 30. Berlin
- Hamburg Wasser (2010): Umwelterklärung 2010. Hamburg. <http://www.hamburgwasser.de/umwelterklaerung.html?download=555> (11.03.2016)
- Hamburg Wasser (2015): Auskunft von Thomas Giese
- Hartmann, M. (2015): Auskunft zum KREIS-Projekt. Bauhaus-Universität Weimar
- Heffer, T./B. Birzle-Harder/J. Deffner (2015): Akzeptanz von Grauwasserbehandlung und Wärmerückgewinnung im Wohnungsbau. Ergebnisse einer qualitativen Bewohnerbefragung. netWORKS Paper Nr. 27
- Hessisches Statistisches Landesamt (2012): Statistische Berichte. https://www.destatis.de/GP/Statistik/servlets/MCRFileNodeServlet/HEHeft_derivate_00001260/QI1-3j10.pdf;jsessionid=B9D93EAE80AE296617E79DB4FFDBB162 (12.03.2015)
- Huang, D.-B./H.-P. Bader/R. Scheidegger/R. Schertenleib/W. Gujer (2006): Confronting limitations: New solutions required for urban water management in Kunming City. Journal of Environmental Management, 84, 49–61
- ifu Hamburg (o.J.): Umberto. <http://www.umberto.de/de/> (09.02.2016)
- Kenway, S./R. Scheidegger/T. Larsen/P. Lanta/H.-P. Bader (2013): Water-related energy in households: A model designed to understand the current state and simulate possible measures. Energy and Buildings, 58, 378–389
- Kerber, H./E. Schramm/M. Winker (2016): Transformationsrisiken bearbeiten: Umsetzung differenzierter Wasserinfrastruktursysteme durch Kooperation. netWORKS Paper Nr. 28

- Kluge, T./J. Libbe (Hg.) (2010): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Handreichung zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Berlin
- Knerr, H./M. Engelhardt/V. Keuter/A. Rechenburg/T. G. Schmitt (2009): Potentiale des Grauwasserrecyclings am Beispiel des BMBF-Verbundprojektes KOMPLETT. Grauwasser-Recycling – Wasser zweimal nutzen. Schriftenreihe fbr, 12, 31-53
- Löw, K. (2011): An innovative greywater treatment system for urban areas – international transferability of a German approach, installed in GIZ's headquarters in Eschborn. Masterarbeit, HFU – Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen
- Meininger, F. (2009): Stoffstrom- und Energieanalysen zur Bewertung der Ressourceneffizienz alternativer Abwasserkonzepte. Bremer Colloquium Produktionsintegrierte Wasser-/Abwassertechnik, 28.-29. September 2009, Bremen
- Morel A./S. Diener (2006): Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods. Eawag – Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. Dübendorf, Schweiz
- Nolde, E. (o.J.): Die klima-positive Recyclinganlage; http://nolde-partner.de/system/files/final_web.pdf (03.02.2016)
- Reynolds, J. H./M. H. Barrett (2003): A review of the effects of sewer leakage on groundwater quality. Water and Environment Journal, 17(1), 34-39
- RMB – Rhein Main Biokompost GmbH (o.J.): Die Bioabfallbehandlungsanlage. http://rmb-frankfurt.de/upload/pdf/Bioabfallbehandlungsanlage_2010.pdf (03.02.2016)
- Rockström, J./W. Steffen/K. Noone/A. Persson/F.S. Chapin III/E. Lambin/T.M. Lenton/M. Scheffer/C. Folke/H. Schellnhuber/B. Nykvist/C.A. De Wit/T. Hughes/S. van der Leeuw/H. Rodhe/S. Sorlin/P.K. Snyder/R. Costanza/U. Svedin/M. Falkenmark/L. Karlberg/R.W. Corell/V.J. Fabry/J. Hansen/B. Walker/D. Liverman/K. Richardson/P. Crutzen/J. Foley (2009): Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society 14(2): 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> (03.02.2016)
- SEF – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (o.J.): Rein in den Main. Abwasserableitung und Abwasserbehandlung in Frankfurt am Main. http://stadtentwaesserung-frankfurt.de/images/stories/dateien/rein_in_den_main_web.pdf (03.02.2016)
- Sievers, J./J. Londong/A. Stübler/D. Bestenlehner/H. Drück/W. Schönfelder (2014): Heat recovery potential of domestic grey water in the pilot project Jenfelder Au in Hamburg. 17th EWA Symposium during IFAT 2014, Munich, Germany, 5-9 May 2014. Water, Energy and Resources: Innovative Options and Sustainable Solutions Session 4: Energy and Resources in New Sanitation Approaches – Part Two. http://www.kreis-jenfeld.de/tl_files/content/mitgliederpublikationen%20oeffentlich/Manuscript_Londong.pdf (11.02.2016)

- SRH – Stadtreinigung Hamburg (o.J.): Biogas- und Kompostwerk Bützberg. <http://www.stadtreinigung.hamburg/ueberuns/unternehmen/kompostwerk/> (10.02.2016)
- taz (2010): Heidewasser – Angst vor der Lüneburger Wüste. <http://www.taz.de/!5149045/> (08.03.2016)
- Technische Universität Wien (o.J.): STAN – Software for Substance Flow Analysis. <http://www.stan2web.net/> (09.02.2016)
- Technologiezentrum Wasser (TZW) (2015): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs. DVGW Forschungsvorhaben W 10-01-11. http://www.tzw.de/de/projekte/rohrnetz/aktualisierung_der_verbrauchsg-619/ (22.10.2015)
- Wanner, O. (2009): Wärmerückgewinnung aus Abwasser: Wärmetauscherverschmutzung – Auswirkungen und Gegenmaßnahmen. Eawag – Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. Dübendorf, Schweiz
- Woltersdorf, L. (2016): Evaluating alternative water sources and their use for small-holder agriculture from a systemic perspective. A focus on water reuse and rainwater harvesting in Namibia. Dissertation, Johann-Wolfgang-Goethe Universität. Frankfurt am Main (im Druck)

8 Anhang

8.1 Kurzbeschreibung der Rahmenbedingungen in den Städten, die für abwasserinfrastrukturelle Fragestellungen relevant sind

8.1.1 *Frankfurt am Main*

Frankfurt am Main ist mit rund 700.000 Einwohnern die fünftgrößte Stadt Deutschlands und die größte Stadt Hessens. Ihre Einwohnerzahl ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen und mit einem weiteren Anstieg wird gerechnet (Stadt Frankfurt am Main 2015).

Das Klima in Frankfurt gilt als warm und gemäßigt. Der jährliche Niederschlag beträgt 643 mm, wobei der niederschlagsärmste Monat der Februar mit 40 mm ist; der niederschlagsreichste Monat ist Juni mit 70 mm (Stadt Frankfurt am Main, o.J.; climate-data.org, 2016).

Das Abwasserkanalnetz umfasst die Länge von 1.600 km, für dessen Instandhaltung die Stadtentwässerung Frankfurt (SEF) zuständig ist. Auf einem Viertel der kanalisierten Fläche (entspricht etwa 400 km Leitungslänge) wird das Regenwasser getrennt erfasst und direkt in Gewässer abgeleitet. Bei dem Rest der Fläche handelt es sich um Mischkanalisation, wo Schmutz- und Regenwasser zusammenfließen und Regenüberläufe und Regenbecken das Kanalnetz entlasten (SEF 2008).

Etwa 300 Mio. Liter Abwasser (bei Trockenwetter) fallen täglich in Frankfurt an und teilen sich auf zwei Kläranlagen auf: Eine liegt in Niederrad/Griesheim und hat eine Kapazität von 1,35 Mio. Einwohnerwerten, die andere mit 470.000 Einwohnerwerten liegt in Sindlingen. Das Abwasser fällt nicht nur im Stadtgebiet an, auch der Abwasserverband Main-Taunus, der Westerbachverband sowie fünf weitere Städte (Offenbach, Kelsterbach, Neu-Isenburg, Steinbach, Maintal Ortsteil Bischofsheim) leiten ihr Abwasser in das Kanalnetz der Stadt Frankfurt am Main ein (SEF 2008).

Eine Faulung des Schlammes findet nicht statt. Der Frischschlamm beider Anlagen wird mittels Zentrifugen auf einen Trockensubstanzgehalt von etwa 30% entwässert. Der entwässerte Schlamm aus Niederrad (mehrere Tausend Kubikmeter pro Tag) wird über unterirdische Druckleitungen 11 km weit nach Sindlingen transportiert. Dort wird der gesamte Schlamm in der SEVA, der Schlammmentwässerungs- und -verbrennungsanlage, bei 830°C (davor im Gegenstrom von heißen Rauchgasen getrocknet) verbrannt. Die Verbrennung erfolgt weitgehend selbstgänglich, bei Störungen oder beim An- und Abfahrbetrieb steht eine heizölbetriebene Stützfeuerung zur Verfügung. Über eine Dampfturbine wird Strom erzeugt und ins öffentliche Stromnetz gespeist. Die Wärme wird zum Teil anlagenintern in der SEVA genutzt (SEF 2016).

Quellen:

- climate-data.org (2016): Klima Frankfurt am Main. <http://de.climate-data.org/location/447/> (27.01.16)
- SEF – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (2008): Rein in den Main. Frankfurt am Main. http://passthrough.fw-notify.net/download/949663/http://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/images/stories/dateien/rein_in_den_main_web.pdf (27.01.16)
- SEF – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (2016): SEVA Sindlingen. <http://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/anlagen/abwasserreinigung/seva-sindlingen.html> (27.01.16)
- Stadt Frankfurt am Main (2015): Frankfurt am Main – Regionalisierte Bevölkerungsentwicklung bis 2040. Materialien zur Stadtbeobachtung, Heft 19. https://www.frankfurt.de/sixcms/media.php/678/MSB_19_Bev%C3%B6lkerungsvorausberechnung.pdf (27.01.16)
- Stadt Frankfurt am Main (o.J.): Statistisches Porträt Frankfurt am Main 2012. http://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=2811&ffmpar%5b_id_inhalt%5d=7526 (05.03.2015)

8.1.2 Hamburg

Die Freie und Hansestadt Hamburg ist mit rund 1,8 Millionen Menschen nach Berlin die zweitgrößte Stadt und gleichzeitig eines der 16 Bundesländer in Deutschland. Ihre Einwohnerzahl ist in den letzten Jahren ständig gestiegen und eine weitere Zunahme für die nächsten Jahre wird erwartet (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein 2016).

Das Klima in Hamburg gilt als gemäßigt. Der jährliche Niederschlag beträgt 750 mm (BSU 2006) und verteilt sich kontinuierlich über das gesamte Jahr. Februar ist mit 42 mm der niederschlagsärmste, August mit 79 mm der niederschlagsreichste Monat (climate-data.org 2016).

Für die Wasserver- und Abwasserentsorgung unterhält Hamburg Wasser ein unterirdisches Rohrleitungsnetz von etwa 11.000 km Länge. Etwa die Hälfte davon, 5.500 km, dienen der Abwasserentsorgung. Ein Viertel dieses Kanalnetzes besteht aus Mischsilen, in denen Regenwasser und Schmutzwasser zusammen abgeleitet werden. Der Rest ist als Trennkanalisation angelegt. Die Mischkanalisation besteht aus einem rund 1.200 km langen Rohrsystem und erstreckt sich vor allem über die Innenstadt und große Teile der Bezirke Bergedorf und Altona. Die Trennkanalisation besteht aus rund 2.200 km Schmutzwasser- und rund 1.700 km Regenwasserrohrleitungen. Zusätzlich gibt es in flachen Entwässerungsgebieten, wo kein natürliches Gefälle vorliegt, ein Druckentwässerungssystem von 450 km Länge, bei dem Pumpen eingesetzt werden, um das Schmutzwasser in die Kläranlage zu leiten (eine Regenkanalisation ist hier nicht vorhanden) (Hamburg Wasser 2016a).

Das Abwasser, täglich rund 450.000 m³, wird zentral im Klärwerksverbund, bestehend aus den beiden Klärwerken Dradenau und Köhlbrandhöft, aufbereitet. Mit 2,9 Mio. Einwohnerwerten ist

der Klärwerksverbund einer der größten Deutschlands. Die mechanische Reinigungsstufe befindet sich im Klärwerksteil Köhlbrandhöft, von dort aus wird das Abwasser über eine unterirdische 2,3 km lange Leitung in den Klärwerksteil Dradenau transportiert, wo die biologische Reinigung und Nachklärung stattfindet (Hamburg Wasser 2016b).

Täglich fallen etwa 3.700 m³ Klärschlamm an, der zusammen mit anderen organischen Abfällen, die im Rahmen externer Dienstleistungen angenommen werden, in Faultürmen vergoren und zu Biogas bzw. Faulgas umgesetzt wird. So entsteht täglich rund 90.000 m³ Faulgas, wodurch in der VERA (Verwertungsanlage für Rückstände aus der Abwasserbehandlung) mittels Gasturbine und Gasmotor Strom und Wärme generiert werden. Zentrifugen reduzieren den Wassergehalt des ausgefaulten Schlammes. Dieser wird anschließend in der VERA verbrannt, wodurch ebenfalls Energie erzeugt und kläranlagenintern genutzt wird (Hamburg Wasser 2016c).

Quellen:

BSU – Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (2006): Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Freie und Hansestadt Hamburg, Hamburg

climate-data.org (2016): Klima Hamburg. <http://de.climate-data.org/location/69/> (27.01.16)

Hamburg Wasser (2016a): Abwasserableitung: störungsfrei und unbemerkt. <http://www.hamburgwasser.de/abwasserableitung.html> (27.01.16)

Hamburg Wasser (2016b): Abwasserreinigung in Hamburg. <http://www.hamburgwasser.de/abwasserreinigung.html> (27.01.16)

Hamburg Wasser (2016c): Schlammbehandlung und Reststoffverwertung. <http://www.hamburgwasser.de/schlammbehandlung.html> (27.01.16)

Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2015): Bevölkerungsentwicklung 2015 bis 2035. Statistische Berichte Kennziffer A I 8 - j 15 HH. [http://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische_Berichte/bevoelkerung/A I 8 j HH/A I 8 j15 HH.pdf](http://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische_Berichte/bevoelkerung/A_I_8_j_HH/A_I_8_j15_HH.pdf) (27.01.16)

8.2 Systemvarianten

8.2.1 Frankfurt am Main – Modellgebiet A

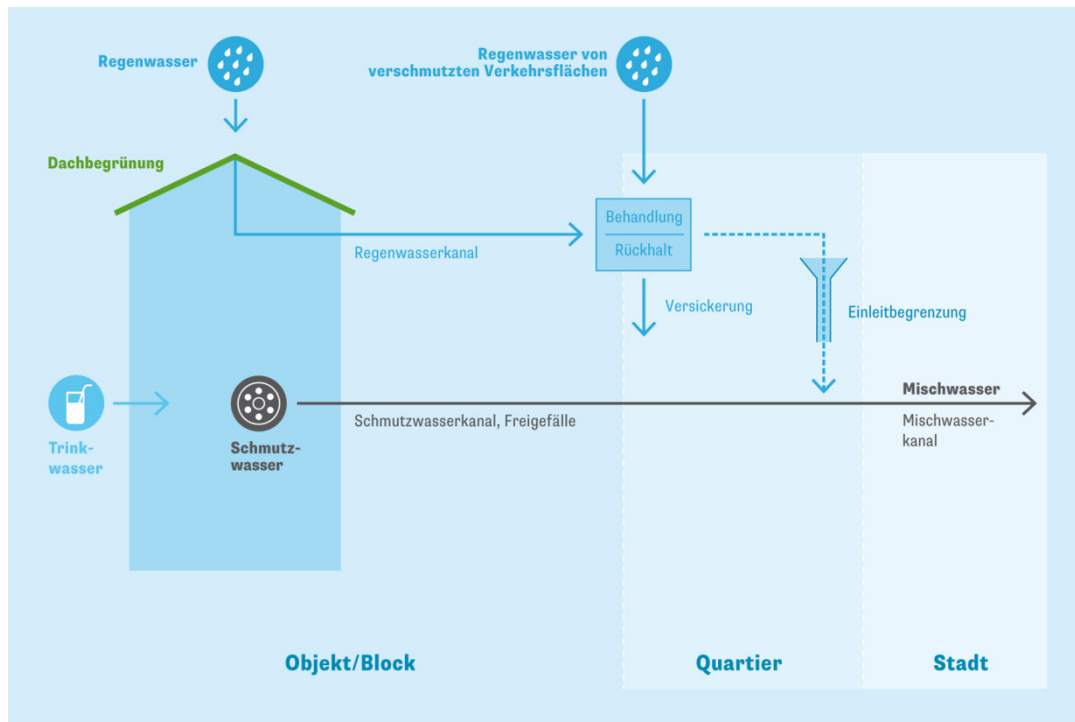


Abbildung 25: Systemvariante V1 des Modellgebiets A: Referenzsystem

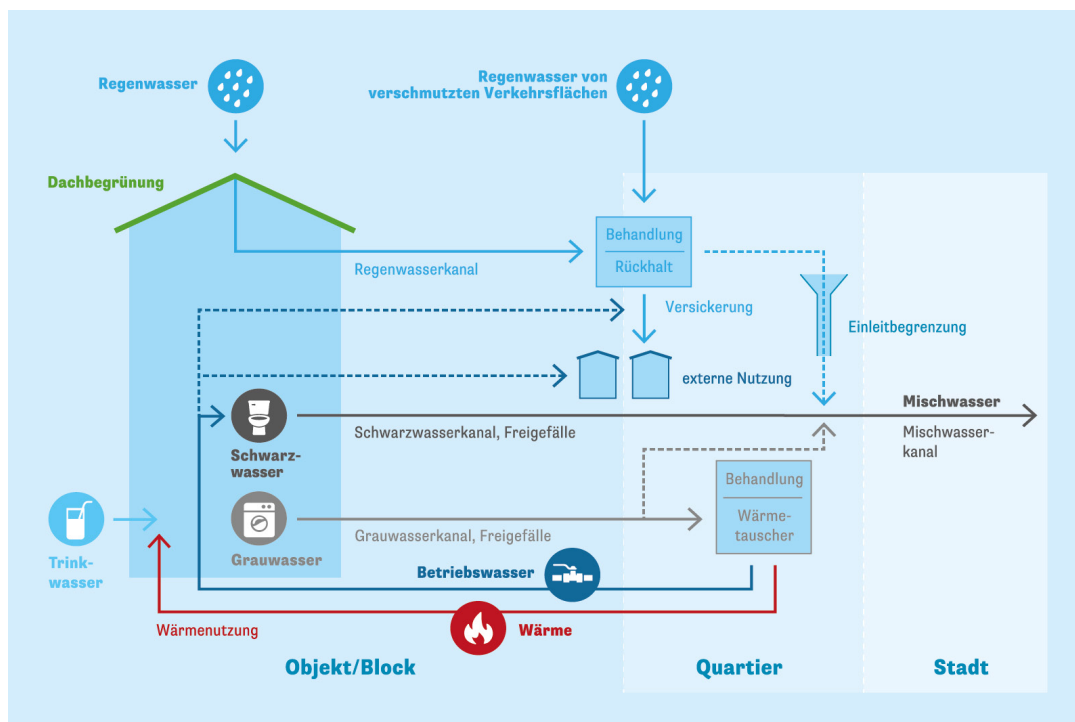


Abbildung 26: Systemvariante V2 des Modellgebiets A (Grauwasser- und Abwärmenutzung auf Quartiersebene)

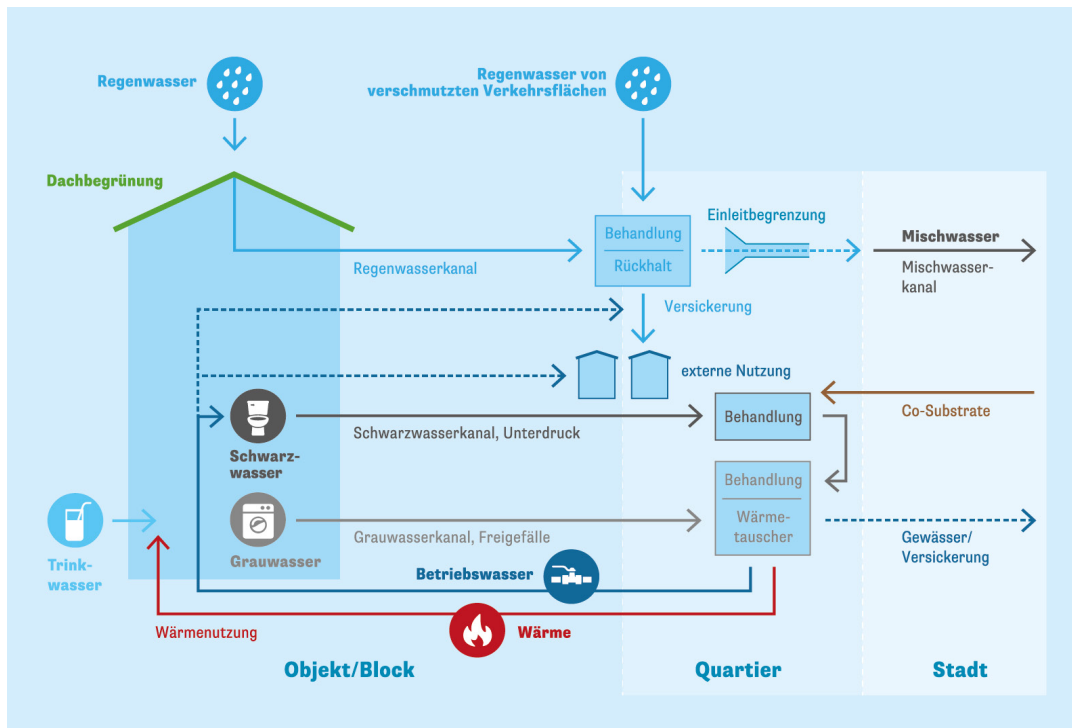


Abbildung 27: Systemvariante V3 des Modellgebiets A (Grauwasser- und Abwärmenutzung auf Quartiersebene, Schwarzwasserverwertung)

8.2.2 Frankfurt am Main – Modellgebiet B

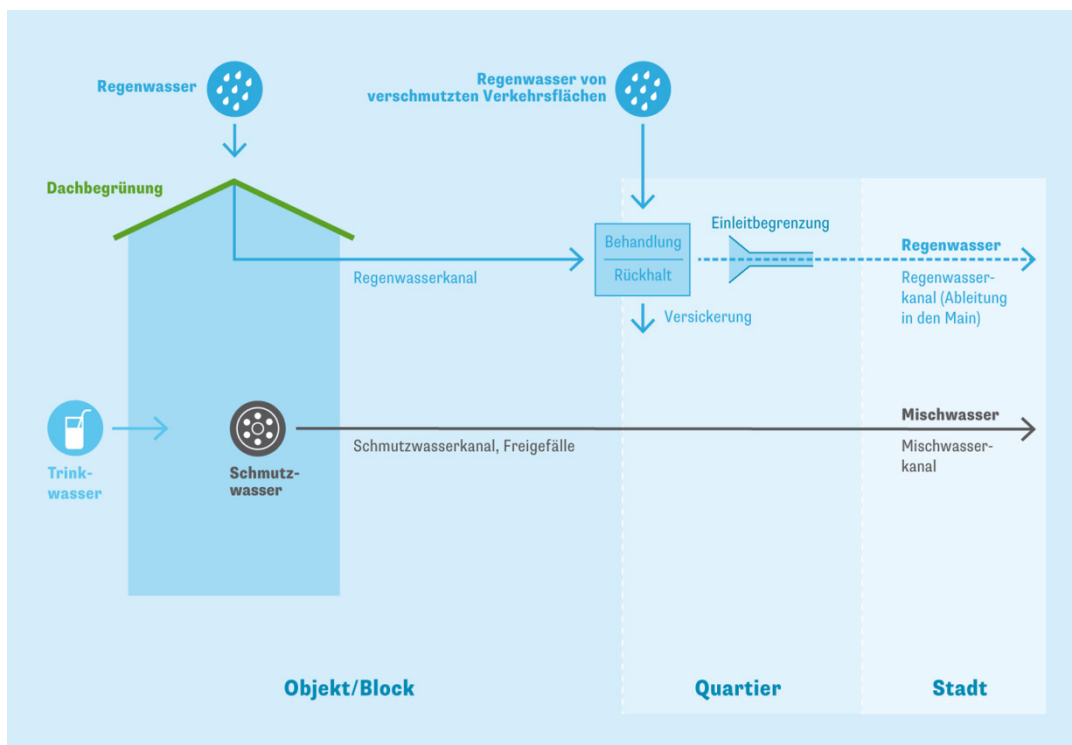


Abbildung 28: Systemvariante V1 des Modellgebiets B: Referenzsystem

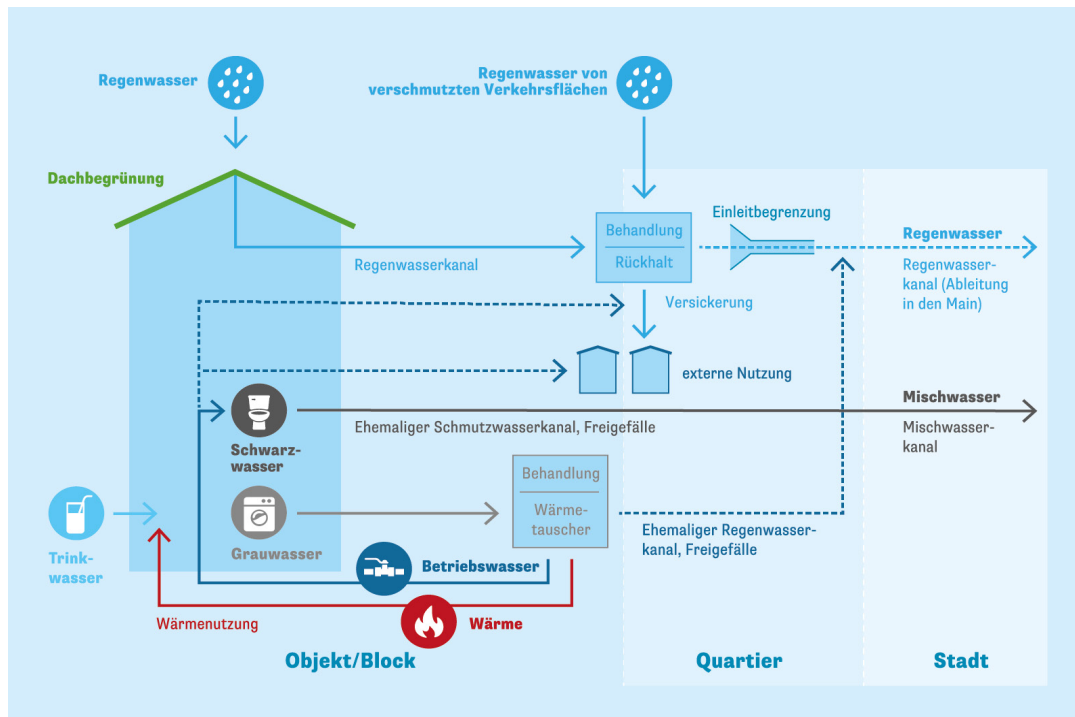


Abbildung 29: Systemvariante V2 des Modellgebiets B (Grauwassernutzung und Wärmerückgewinnung auf Blockebene)

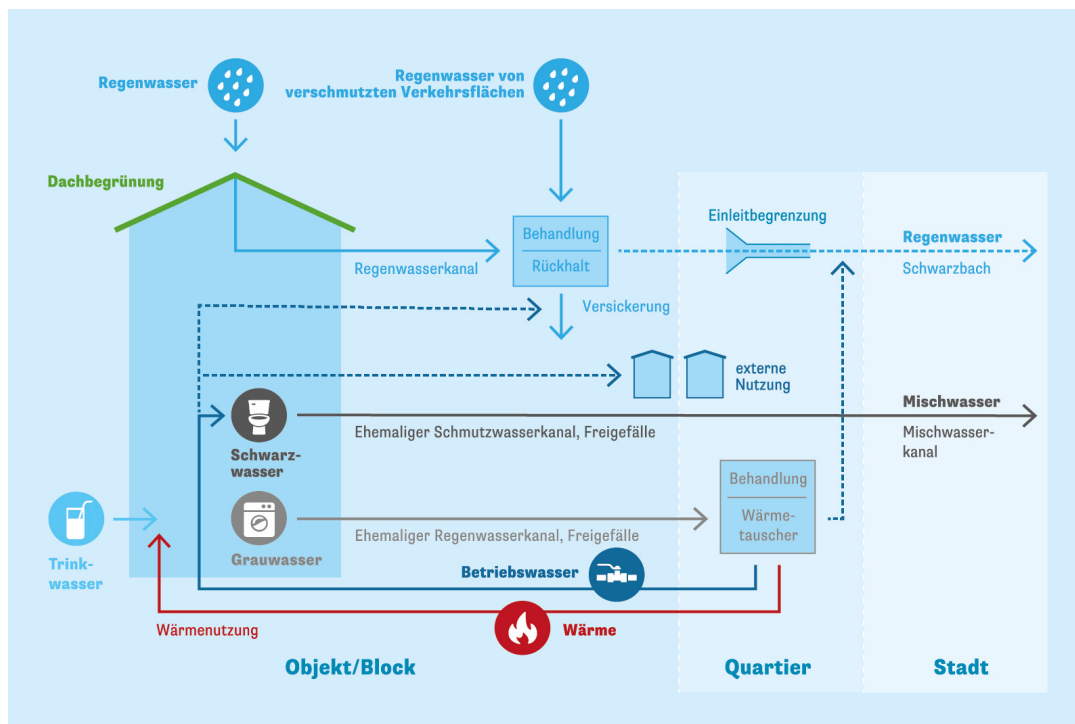


Abbildung 30: Systemvariante V3 des Modellgebiets B (Transformation des bestehenden Trennsystems)

8.2.3 Frankfurt am Main – Modellgebiet D

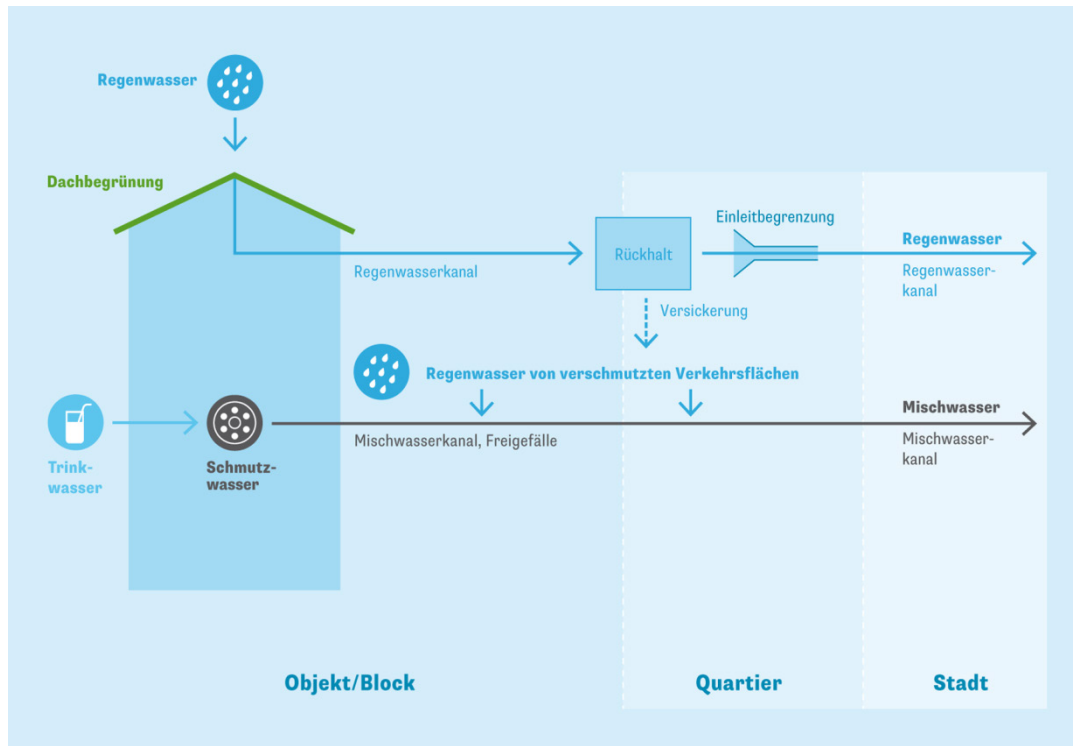


Abbildung 31: Systemvariante V1 des Modellgebiets D: Referenzsystem (ursprünglich wurden drei Referenzszenarien aufgestellt, mit diesem wurde im Folgenden weiter gearbeitet)

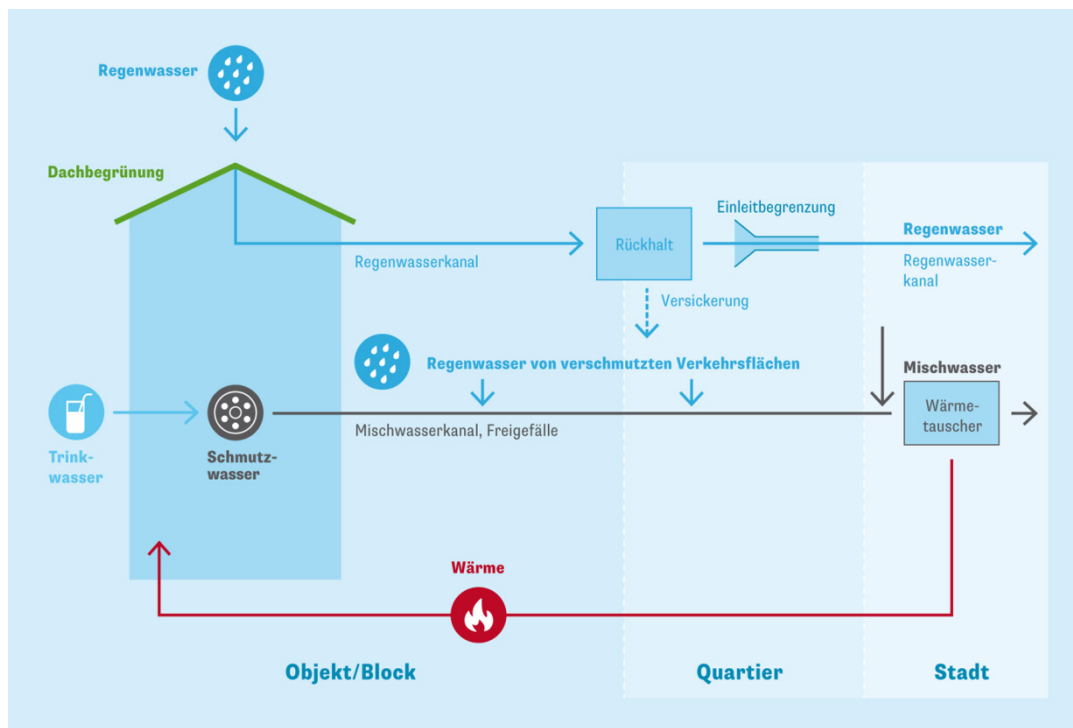


Abbildung 32: Systemvariante V2a des Modellgebiets D (Abwärmenutzung aus großen Mischwasserkanälen)

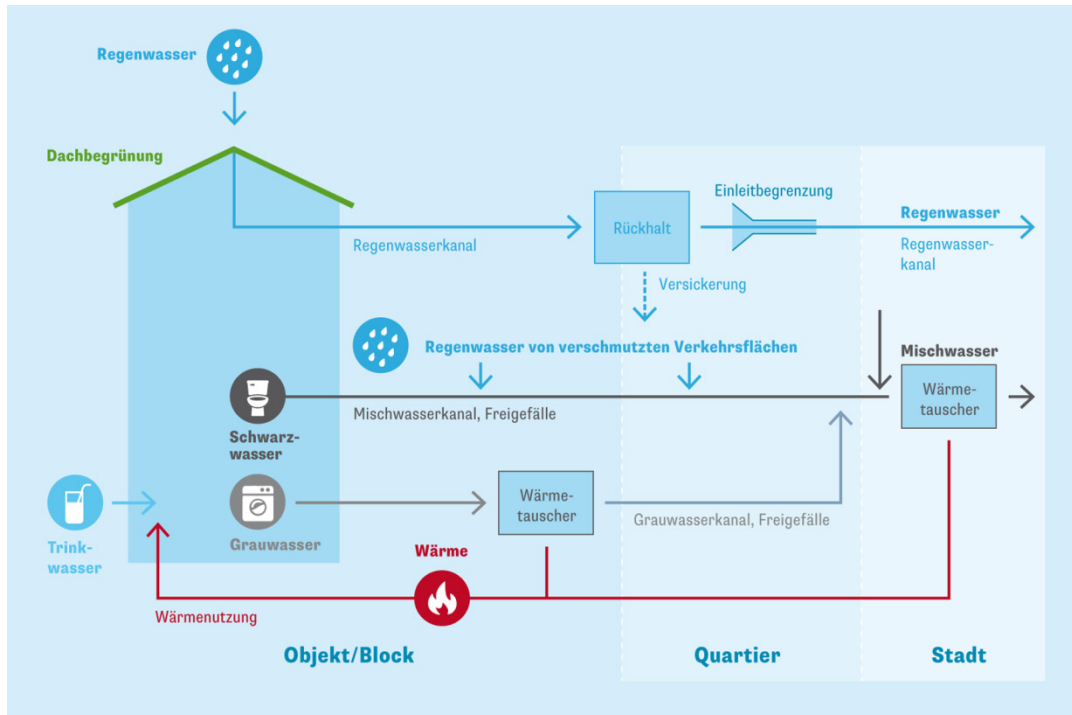


Abbildung 33: Systemvariante V2b des Modellgebiets D (Abwärmenutzung aus großen Mischwasserkanälen und auf Blockebene)

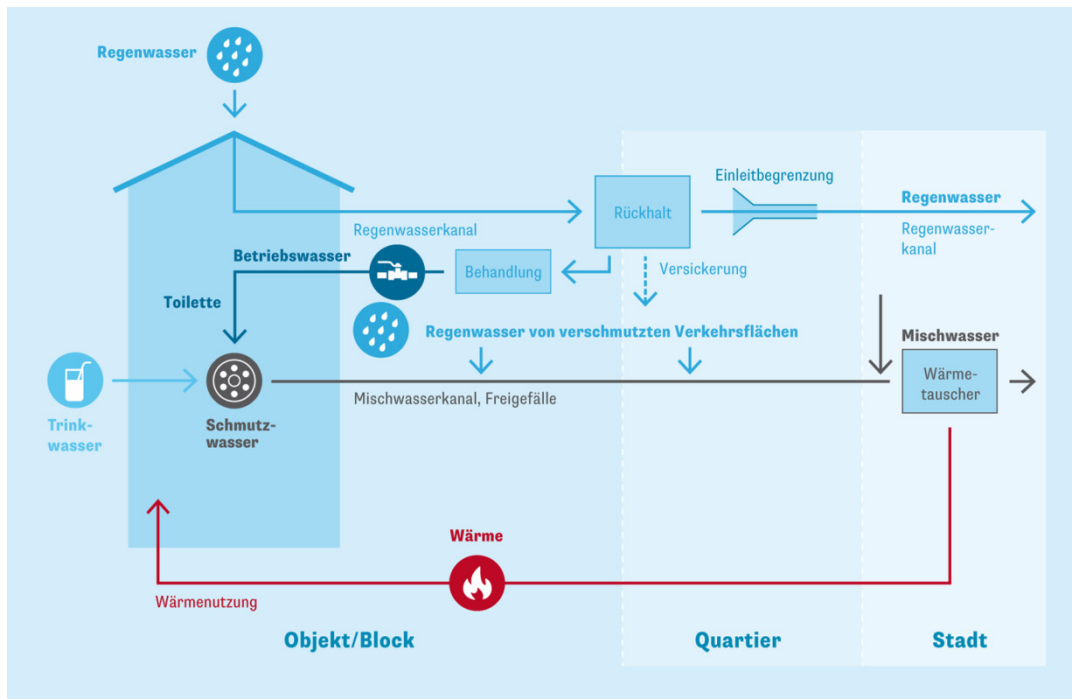


Abbildung 34: Systemvariante V3 des Modellgebiets D (Wärmerückgewinnung aus großen Mischwasserkanälen, Regenwassernutzung als Betriebswasser)

8.2.4 Hamburg – Modellgebiet C

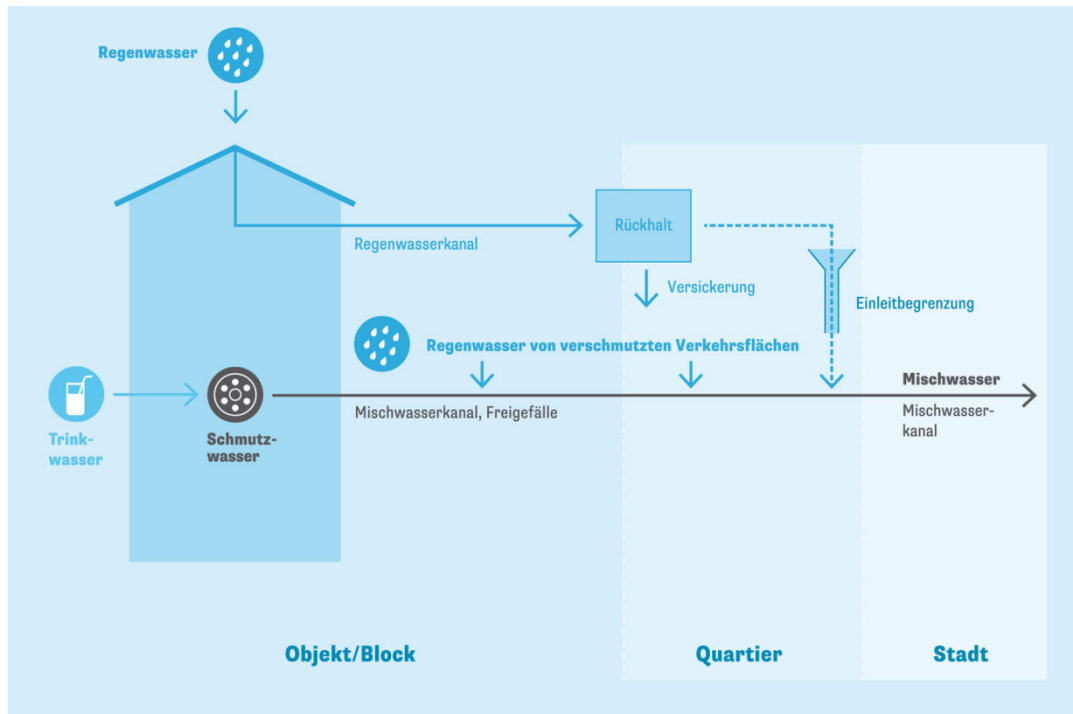


Abbildung 35: Systemvariante V1 des Modellgebiets C: Referenzsystem

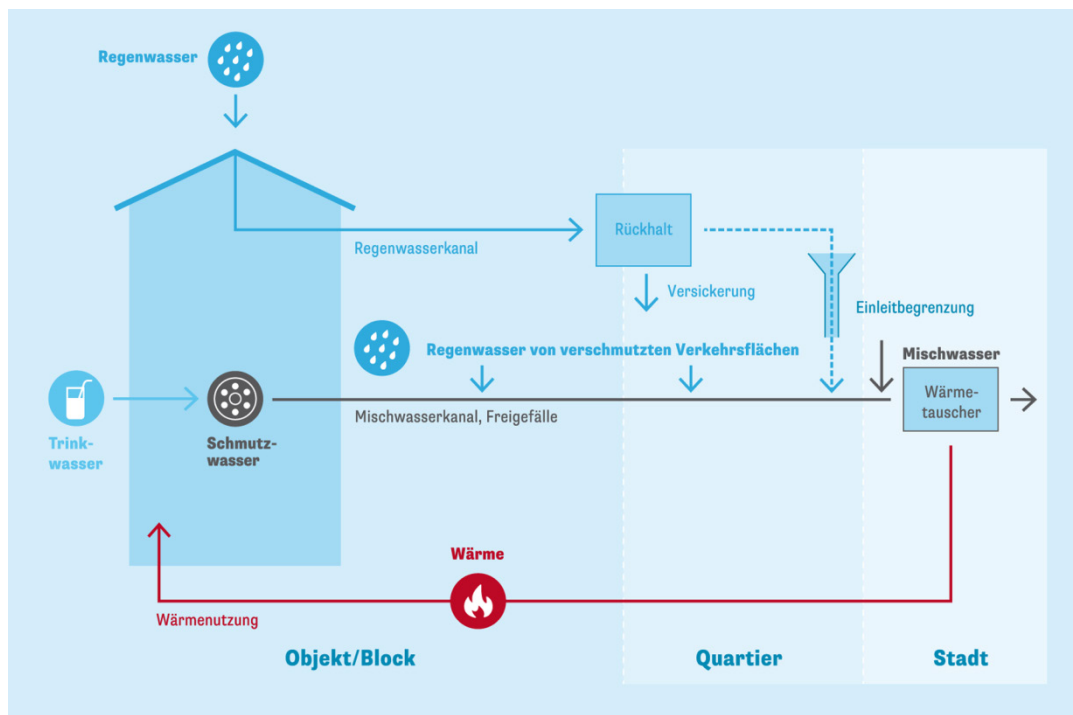


Abbildung 36: Systemvariante V2 des Modellgebiets C (überquartierliche Wärmerückgewinnung)

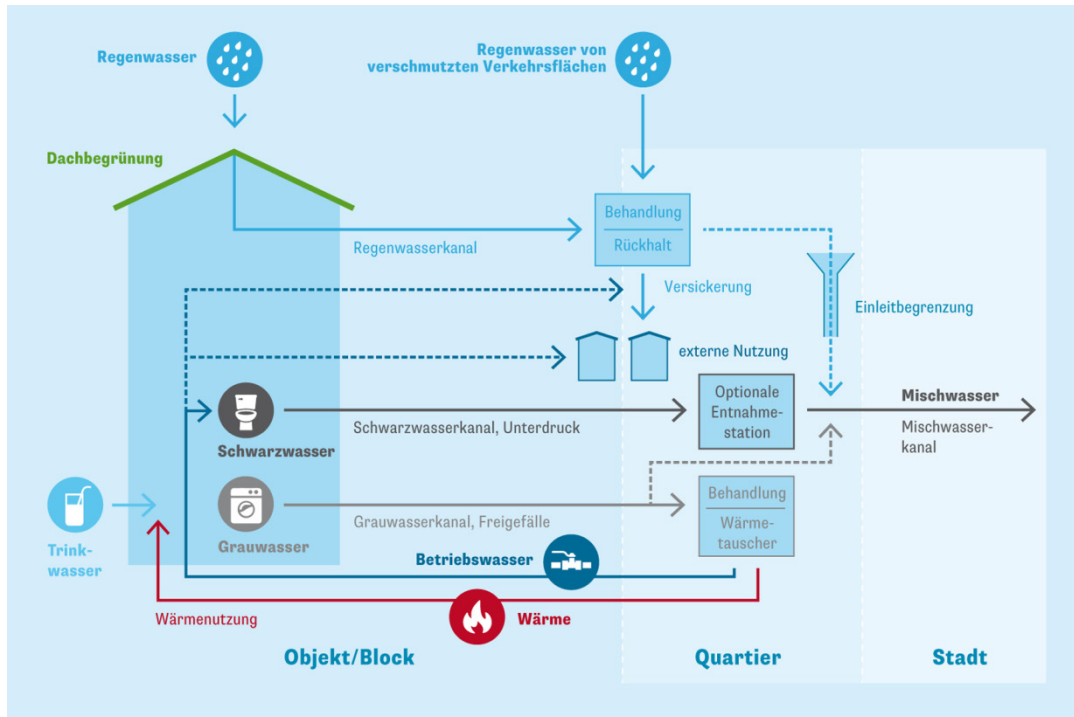


Abbildung 37: Systemvariante V3 des Modellgebiets C (Teilstromnutzung auf Quartiersebene)

8.2.5 Hamburg – Modellgebiet E

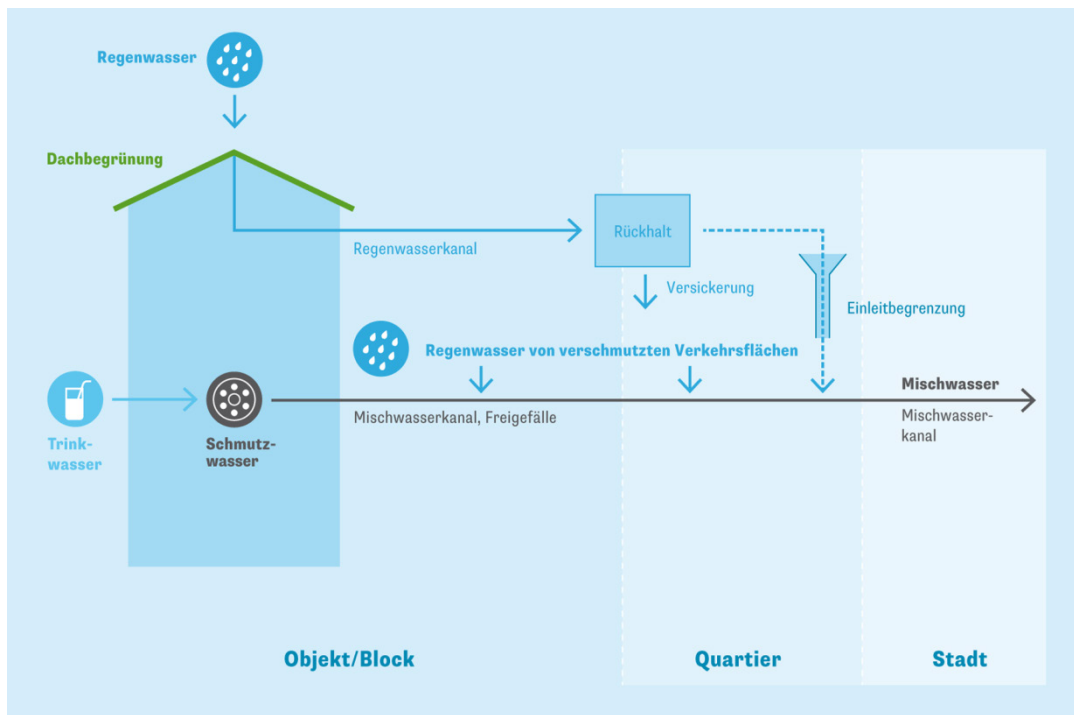


Abbildung 38: Systemvariante V1 des Modellgebiets E: Referenzsystem

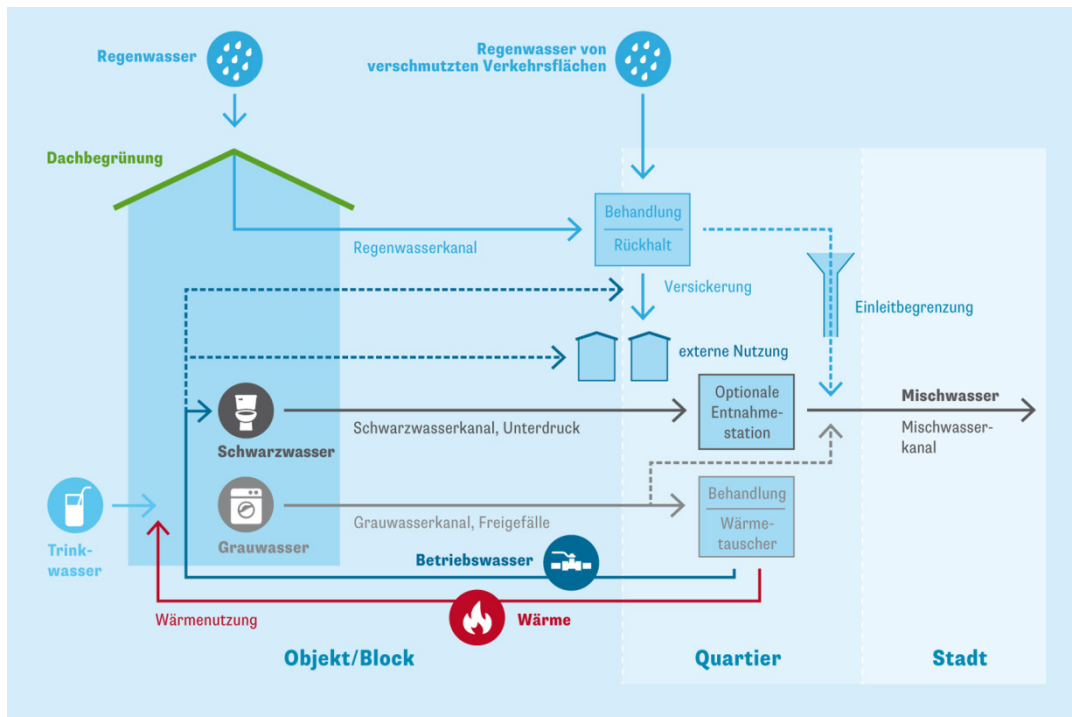


Abbildung 39: Systemvariante V2a des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Quartiersebene)

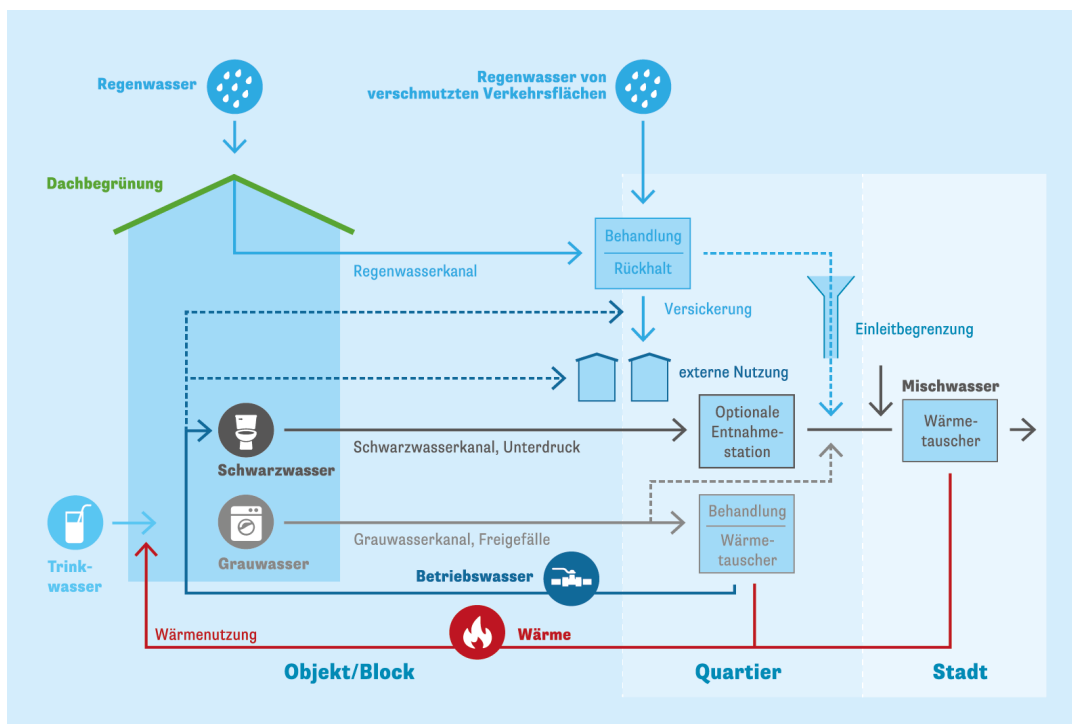


Abbildung 40: Systemvariante V2b des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Quartiersebene und überquartierliche Wärmerückgewinnung)

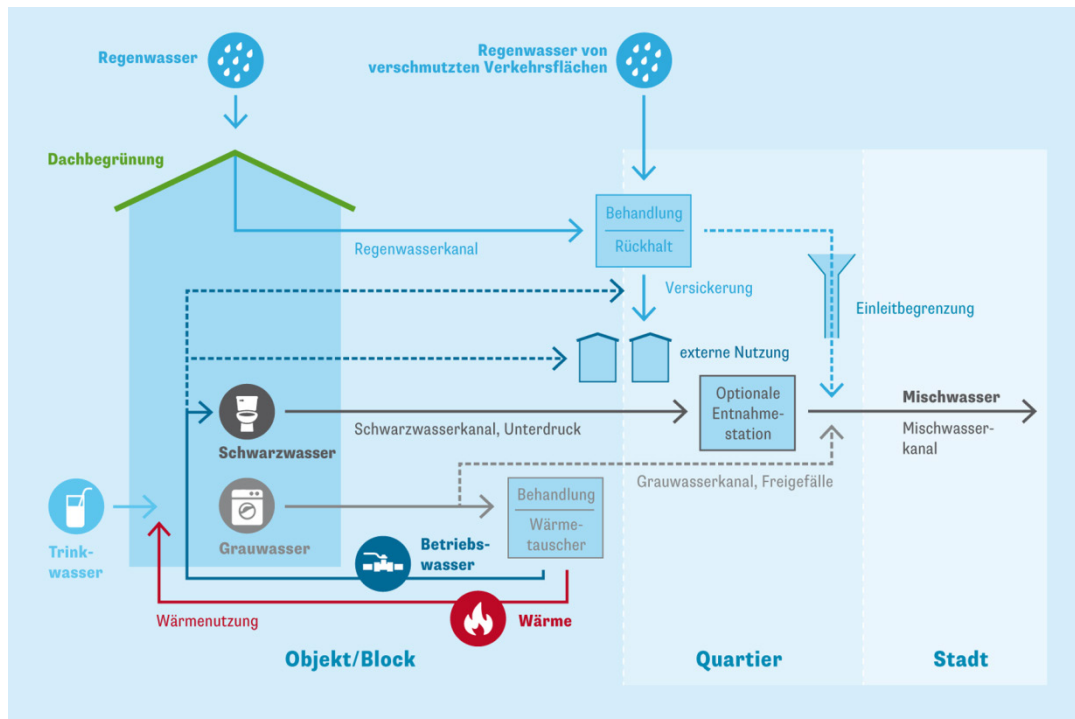


Abbildung 41: Systemvariante V3 des Modellgebiets E (Teilstromnutzung auf Blockebene)

8.3 Parameterliste für die Stoffstrommodellierungen (Wasser, Energie, Nährstoffe)

Tabelle 5: Überblick über die in der Stoffstrommodellierung eingesetzten Parameter in Hamburg und Frankfurt am Main. Mit *gekennzeichnete Werte zeigen Unterschiede für einzelne Systemvarianten auf.

Parameter	HH	FFM	Einheit	Standard-abw. [%]	Verteilung	Quelle
Einwohnerwert (Modellgebiet A)		3.000	E	1	lognormal	[43]
Einwohnerwert (Modellgebiet B)		4.400				[18]
Einwohnerwert (Modellgebiet C)	750					[1]
Trinkwasserbedarf: Baden, Duschen, Körperpflege	44	51	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
(Trink)wasserbedarf: Toilettenspülung *V2 und V3	33 (6)*	38	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf: Wäsche waschen	14	17	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf: Kleingewerbeanteil	0	13	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf: Raumreinigung, Garten	8	9	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf: Geschirrspülen	8	9	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf: Essen und Trinken	4	6	l/E*d	25	lognormal	berechnet nach [1], [6], [7]
Trinkwasserbedarf (gesamt)	111	143	l/E*d	25	lognormal	[1], [7]
Exfiltration-Trinkwasserleitung	4,2	6,5	%	3	tlognormal	[8], [9]
Niederschläge	750	642,5	mm/a	30	tlognormal	[10], [11]
Fläche (Modellgebiet A)		143.195	m ²	0	uniform	Berechnet mittels GIS-Analyse
Fläche (Modellgebiet B)		633.441				Berechnet mittels GIS-Analyse
Fläche (Modellgebiet C)	52.000					[1]

Abflussbeiwert (Modellgebiet A)		0,35	[-]	20	tlognormal	berechnet
Abflussbeiwert (Modellgebiet B)		0,3				berechnet
Abflussbeiwert (Modellgebiet C)	0,2					[1]
Infiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet A)		0	%	30	tlognormal	Annahme
Infiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet B)		30				Annahme auf Basis von
Infiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet C)	0					Gesprächen mit SEF
						Annahme
Infiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet A)		0	%	30	tlognormal	Annahme
Infiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet B)		30				Annahme auf Basis von
Infiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet C)	0					Gesprächen mit SEF*
						Annahme
Exfiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet A)		0	%	30	tlognormal	Annahme
Exfiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet B)		5				[3], [4]
Exfiltration-Schmutzwasserableitung (Modellgebiet C)	0					[1]
Exfiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet A)		0	%	30	tlognormal	Annahme
Exfiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet B)		5				[3], [4]
Exfiltration-Regenwasserableitung (Modellgebiet C)	0					[1]
Versiegelungsgrad (Modellgebiet A)		47	%	20	tlognormal	berechnet
Versiegelungsgrad (Modellgebiet B)		33				berechnet
Anteil der Regenwasserableitung in der Stadt	18,5	25	%	10	tlognormal	[1], [2], [30]
Klärschlammanteil pro m ³ Abwasser	1,5	1,5	%	35	tlognormal	[5], [2]
TR-Gehalt des Klärschlamm	6	3	%	35	tlognormal	[1], [2]
Infiltration GW-, SW-, BW-Ableitung	0	0	%	0	uniform	Annahme
Exfiltration GW-, SW-, BW-Ableitung	0	0	%	0	uniform	Annahme
Klärschlammanteil-GW-Behandlung	0,3	0,3	%	35	tlognormal	[40]
Klärschlammanteil-SW-Behandlung	3,2	3,2	%	35	tlognormal	[40], [41]
TR-Gehalt des Klärschlamm (GW)	3	3	%	35	tlognormal	[40], [41]

TR-Gehalt des Klärschlammes nach Eindickung (GW)	8	8	%	35	tlognormal	[40]
Co-Substrate (Rasenschnitt) (Modellgebiet A) *V3		0 (6)*	m ³ /d	20	tlognormal	[40]
Co-Substrate (Rasenschnitt) (Modellgebiet B)		0				
Co-Substrate (Rasenschnitt) (Modellgebiet C)	0					
Co-Substrate (Fettwasser) (Modellgebiet A) *V3		0 (20)*	m ³ /d	20	tlognormal	[40]
Co-Substrate (Fettwasser) (Modellgebiet B)		0				
Co-Substrate (Fettwasser) (Modellgebiet C)	105					Berechnet nach [1]
Strombedarf Trinkwasserbereitstellung	0,45	0,4	kWh/m ³	2	tlognormal	[8], [2]
Strombedarf Abwasserbehandlung / SW-Behandlung	0,4	0,46	kWh/m ³	20	lognormal	[1], [2]
Strombedarf Klärschlammbehandlung	0,12	0,17	kWh/m ³	20	lognormal	[1], [2]
Spezifische Faulgasproduktion-Klärschlamm	488	488	m ³ /t oTR	10	lognormal	[14]
oTR-Klärschlamm/TR-Klärschlamm	70	70	%	20	tlognormal	[37]
Faulgasverluste (Klärschlammbehandlung)	2,7		%	20	tlognormal	[8]
Aufbereitungsrate Biogas zu Biomethan (Klärschlamm, Co-Substrate)	7,5		%	10	tlognormal	[1]
Methan-Energiegehalt	9,97	9,97	kWh/m ³	0	uniform	[15]
Wärmeeigenbedarf-Verbrennung (bezogen auf die produzierte Wärmemenge)	97	30	%	10	tlognormal	[1], Annahme
Strombedarf Regenwasserableitung/-behandlung	0,5	0,5	kWh/m ³	30	normal	[19]
Klärschlammichte	0,72	0,72	t/m ³	10	tlognormal	[12]
TR-Fettwasser	3	3	%	20	tlognormal	[20]
oTR-Fettwasser	91	91	%	10	tlognormal	[20]
TR-Rasenschnitt	35	35	%	20	tlognormal	[20]
oTR-Rasenschnitt	80	80	%	10	tlognormal	[20]
Spezifische Faulgasproduktion-Fettwasser	1.000	1.000	m ³ /t oTR	10	lognormal	[20]
Spezifische Faulgasproduktion-Rasenschnitt	550	550	m ³ /t oTR	10	lognormal	[20]

Methananteil im Klärschlamm	65	65	%	10	tlognormal	[38]
Methananteil im Fettwasser	68	68	%	10	tlognormal	[20]
Methananteil im Rasenschnitt	53	53	%	10	tlognormal	[20]
Methananteil im Biomethan	98		%	5	tlognormal	[24]
Wirkungsgrad-elektrisch (Verbrennungsanlage)	30	8	%	30	tlognormal	berechnet nach [1], berechnet nach [17], [36]
Wirkungsgrad-thermisch (Verbrennungsanlage)	50	50	%	30	tlognormal	berechnet nach [1], [15]
Wirkungsgrad-elektrisch (Biogasanlage)	40	40	%	30	tlognormal	[15]
Wirkungsgrad-thermisch (Biogasanlage)	50	50	%	30	tlognormal	[15]
Dichte-Fettwasser	1	1	t/m ³	10	lognormal	Annahme
Dichte-Rasenschnitt	0,5	0,5	t/m ³	10	lognormal	[31]
Heizwert-Heizöl	10,6	10,6	kWh/l	0	uniform	[13]
Andere Energiebedarfe (z.B. Diesel)	15	15	kWh/t	20	normal	[13]
Heizwert-Klärschlamm (Verbrennung)	3,9	5	MWh/t TR	20	lognormal	[1], [2]
Energiebedarf zur Aufbereitung von Co-Substraten	3,1	3,1	kWh/t	60	tlognormal	[16]
Maximale Nutzlast LKW	22	22	t	10	lognormal	[21]
Transportstrecke	25	25	km	20	lognormal	Annahme
Kraftstoffbedarf/Diesel (vollgeladen/max. Nutzlast)	0,35	0,35	l/km	20	tlognormal	[21]
Kraftstoffbedarf/Diesel (leer)	0,24	0,24	l/km	20	tlognormal	[21]
Heizwert-Diesel	9,86	9,86	kWh/l	0	uniform	[21]
Temperaturabsenkung GW (Blockebene)		10	K	10	normal	Annahme
Temperaturabsenkung GW (Quartiersebene)	8	8				Annahme
Temperaturabsenkung Abwasser (Modellgebiet C)	1		K	10	normal	Annahme
Wärmeverluste Grauwasser	30	30	%	50	tlognormal	Annahme nach [42]
Wärmeverluste Abwasser	30		%	50	tlognormal	Annahme nach [42]

Energiebedarf Wärmerückgewinnung mit Wärmepumpe	0,39	0,39	kWh/m ³	10	tlognormal	[25]
Wärmenutzungspotenzial mit Wärmepumpe	1,55	1,55	kWh/m ³	10	tlognormal	[25]
Heizölmenge-Klärschlamm		70,19	l/t TS	10	normal	[17]
Strombedarf GW-Behandlung (Modellgebiet A)		2	kWh/m ³	20	lognormal	[1], [39]
Strombedarf GW-Behandlung (Modellgebiet B) *V3		1,15 (2)*				
Strombedarf GW-Behandlung (Modellgebiet C)	2					
Energiebedarf für Warmwasser	888	888	kWh/E*a	20	lognormal	[22]
Energiebedarf für Heizung	1.332	1.332	kWh/E*a	20	lognormal	[22]
Strombedarf SW-Ableitung (Modellgebiet A) *V3		0 (3,2)*	kWh/m ³	20	lognormal	[1]
Strombedarf SW-Ableitung (Modellgebiet B)		0				
Strombedarf SW-Ableitung (Modellgebiet C)	3,2					
Strombedarf SW-Behandlung (Modellgebiet A) *V3		0,46	kWh/m ³	20	lognormal	[1], [2]
Strombedarf SW-Behandlung (Modellgebiet B)		(4,4)*				
Strombedarf SW-Behandlung (Modellgebiet C)	0,4	0,46				
Wärmebedarf SW-Behandlung (Modellgebiet A) *V3		8,4*	kWh/m ³	20	lognormal	[34]
P im Trinkwasser	0,03	0,03	mg/l	50	tlognormal	[23]
P im Regenwasser	0,01	0,01	mg/l	50	tlognormal	[26]
P im Schwarzwasser (Modellgebiet A) *V3		20,6	mg/l	50	tlognormal	[32], [41]
P im Schwarzwasser (Modellgebiet B)		(175)*				
P im Schwarzwasser (Modellgebiet C)	175	20,6				
P im Grauwasser (Modellgebiet A) *V3		2,74	mg/l	50	tlognormal	[33], [41]
P im Grauwasser (Modellgebiet B)		(5,4)*				
P im Grauwasser (Modellgebiet C)	5,4	2,74				
P Betriebswasser (Modellgebiet A) *V3		0,32	mg/l	50	tlognormal	berechnet nach [40],
P Betriebswasser (Modellgebiet B)		(0,6)*				
P Betriebswasser (Modellgebiet C)	0,6	0,32				berechnet nach [41]
P im Grauwasserklärschlamm (bezogen auf GW-Input)	88	88	%	50	tlognormal	[40], [41]

P im Rasenschnitt	0,003	0,003	kg P/kg TS oder%	50	tlognormal	[20]
P im Fettwasser	165	165	mg/l	50	tlognormal	[20]
P-Feste Phase der Gärreste	99	99	%	50	tlognormal	[40]
N im Trinkwasser	0,41	0,41	mg/l	50	tlognormal	[35]
N im Regenwasser	1,47	1,47	mg/l	50	tlognormal	[26]
N im Schwarzwasser (Modellgebiet A) *V3		162	mg/l	50	tlognormal	[32], [41]
N im Schwarzwasser (Modellgebiet B)		(1469)*				
N im Schwarzwasser (Modellgebiet C)	1.459	162				
N im Grauwasser (Modellgebiet A) *V3		4,8	mg/l	50	tlognormal	[33], [41]
N im Grauwasser (Modellgebiet B)		(15,4)*				
N im Grauwasser (Modellgebiet C)	15,4	4,8				
N Betriebswasser (Modellgebiet A) *V3		1,47	mg/l	50	tlognormal	berechnet nach [40],
N Betriebswasser (Modellgebiet B)		(4,3)*				berechnet nach [41]
N Betriebswasser (Modellgebiet C)	4,3	1,47				
N im Grauwasserklärschlamm	15	15	%	50	tlognormal	[40]
N-Flüssige Phase der Gärreste		340	mg/l	50	tlognormal	[40]
N im Rasenschnitt	0,027	0,027	kg N/kg TS	50	tlognormal	[20]
N im Fettwasser	632	632	mg/l	50	tlognormal	[20]
N-Feste Phase der Gärreste		15	mg/l	50	tlognormal	[40]
P-Bemessungswert (Zulauf der Kläranlage)	1,8	1,8	g/(E*d)	20	lognormal	[27]
P-Primärschlamm	11	11	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[27]
P-Überschussschlamm	78	78	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[27]
P-Prozesswasser	5	5	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[29]
N-Bemessungswert (Zulauf der Kläranlage)	11	11	g/(E*d)	20	tlognormal	[28]
N-Reduktionsrate (gesamte Kläranlage)	81	81	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[28]

N-Primärschlamm	10	10	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[28]
N-Überschussschlamm	27	27	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[28]
N im Fettwasser	0,01	0,01	kg N / t TS	50	tlognormal	[20]
N im Rasenschnitt	0,03	0,03	kg N / t TS	50	tlognormal	[20]
N-Prozesswasser	20	20	% (v. Zulauf)	20	tlognormal	[29]

Quellen für die Parameter

- [1] Hamburg Wasser (2015): mündliche Auskunft von Thomas Giese
- [2] SEF – Stadtentwässerung Frankfurt (2015): Auskunft von Sebastian Meyer und Rolf Götz
- [3] Reynolds, J. H./M. H. Barret (2003): A review of the effects of sewer leakage on groundwater quality. *Water and Environment Journal*, 17 (1), 34-39
- [4] Ellis, J. B./D. M. Revitt/P. Lister/C. Willgress/A. Buckley (2003): Experimental Studies of sewer exfiltration. *Water Science and Technology*, 47 (4), 61-67
- [5] Hamburg Wasser (o.J.): Schlammbehandlung und Reststoffverwertung. <http://www.hamburgwasser.de/schlammbehandlung.html> (11.02.2016)
- [6] BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2015): Trinkwasserverwendung im Haushalt 2014. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/3852C5217E9FD4E1C125786C004274E7/\\$file/Trinkwasserverwendung%20im%20HH%202014-Anteile.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/3852C5217E9FD4E1C125786C004274E7/$file/Trinkwasserverwendung%20im%20HH%202014-Anteile.pdf) (11.02.2016)
- [7] Hessisches Statistisches Landesamt (2012): Statistische Berichte. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/HEHeft_derivate_00001260/QI1-3j10.pdf;jsessionid=B9D93EAE80AE296617E79DB4FFDBB162 (12.03.15)
- [8] Hamburg Wasser (2013): Umwelterklärung 2013. <http://www.hamburgwasser.de/umwelt/erklaerung.html> (11.02.2016)
- [9] ATT – Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e. V./BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V./DBVW – Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e. V./DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V./DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V./VKU – Verband kommunaler Unternehmen e. V. (Hg.) (2011): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011. Bonn. https://de.dwa.de/tl_files/media/content/PDFs/Abteilung_AuG/WEB-Branchenbild-dt-wasserwirtschaft-2011.pdf (16.04.2015)
- [10] BSU – Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Freie und Hansestadt Hamburg (2006): Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Hamburg
- [11] Stadt Frankfurt am Main (o.J.): Statistisches Porträt Frankfurt am Main 2012. http://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=2811&ffmpar%5b_id_inhalt%5d=7526 (05.03.2015)
- [12] Aqua Calc Sewage (2016): sludge density in 285 measurement units. <http://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/sewage-coma-and-blank-sludge> (11.02.2016)
- [13] Umweltbundesamt (2011): Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle. Wien

- [14] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2015): Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Arbeitsblatt DWA-A 216. Hennef
- [15] FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2013. Gülzow-Prüzen
- [16] Frankl, M./M. Tekneyan/M. Menner (2014): Energieeffiziente Zerkleinerung von pflanzlichen Großmarktabfällen als Substrat für den Biogasprozess. http://www.schlattmann.de/biogas/publikationen/material/netzsch-energieeffiziente_zerkleinerung_von_pflanzlichen_grossmarktabfaellen.pdf (02.03.2016)
- [17] SEF – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (2011): Informationsbericht ARA + SEVA. Betriebsjahr 2010. <https://www.yumpu.com/de/document/view/21084863/informationsuber-sicht-ara-seva-betriebsjahr-2010> (11.02.2016)
- [18] Forschungsverbund netWORKS 3 (2014): Gebietssteckbrief für das Modellgebiet B. Internes Projektdokument des Forschungsverbunds netWORKS 3 mit Unterstützung des Stadtplanungsamts Frankfurt am Main und der Stadtentwässerung Frankfurt am Main
- [19] Kluge, T./J. Libbe (Hg.) (2010): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Handreichung zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Berlin
- [20] Körner, I./S. Hertel/S. Deegener/K. Boltz (2013): Schwarzwasser von Vakuumtoiletten zur Biogaserzeugung – Aspekte zur Integration in ein Bauprojekt unter besonderer Berücksichtigung von Co-Substraten. In: Nelles, M. (Hg.): 7. Rostocker Bioenergieforum 20 - 21 Juni 2013, Tagungsband. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Bd. 36, Rostock, 483-492
- [21] Spedition Schwart GmbH (2012): Ökologische und ökonomische Vorteile des Lang-LKWs Einsatz von innovativen Fahrzeugkonzepten zur Optimierung des Transportvolumens und Reduzierung von Schadstoffemissionen. http://www.klok-ev.de/files/4._logbw-expertenworkshop_vortrag_schwarz.pdf (11.02.2016)
- [22] Statistisches Bundesamt (2014): Verbrauch von Haushaltsenergie erstmals seit 2005 gestiegen. Pressemitteilung vom 12. November 2014. https://www.destatis.de/DE/Presse-Service/Presse/Pressemitteilungen/2014/11/PD14_396_85pdf.pdf?__blob=publicationFile (11.02.2016)
- [23] Stadtwerke Ratingen (2013): Jahresdurchschnittsanalyse Trinkwasser 2013. http://www.stadtwerke-ratingen.de/fileadmin/Downloads/Broschueren/Wasser/Trinkwasseranalyse_2013.pdf (12.10.15)
- [24] Pinnekamp, J. (Hg.) (2011): 3. Aachener Kongress: Dezentrale Infrastruktur. Aachen

- [25] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2008): DWA Regelwerk. Merkblatt DWA-M114. Energie aus Abwasser – Wärme- und Lageenergie. Hennef
- [26] LANU – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (2007): Nährstoffkonzentrationen bzw. -einträge der Nassen Deposition. Mittelwert aus den Jahreswerten 2000-2005 des Niederschlags in Schleswig-Holstein. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/JahresbilanzNaehrstoffe.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (12.10.2015)
- [27] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011): Leitfaden Nr. 2-13 Betrieb von Abwasseranlagen. Die Phosphorbilanz im kommunalen Abwasser. [http://www.dwa.de/portale/lvbyern/lvbyern.nsf/C12572A70038506B/8E84B3C80DDF1002C1257849004EA95E/\\$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-13%20Phosphor.pdf](http://www.dwa.de/portale/lvbyern/lvbyern.nsf/C12572A70038506B/8E84B3C80DDF1002C1257849004EA95E/$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-13%20Phosphor.pdf) (11.02.2016)
- [28] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011): Leitfaden Nr. 2-14 Betrieb von Abwasseranlagen. Die Stickstoffbilanz im kommunalen Abwasser. [http://www.dwa.de/portale/lvbyern/lvbyern.nsf/C12572A70038506B/1050ABD1DDB5B845C1257849004EB42A/\\$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-14%20Stickstoff%202012.pdf](http://www.dwa.de/portale/lvbyern/lvbyern.nsf/C12572A70038506B/1050ABD1DDB5B845C1257849004EB42A/$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-14%20Stickstoff%202012.pdf) (11.02.2016)
- [29] Fimml, C. (2010): Oft ein Sorgenkind bei der Abwasserreinigung: Die Schlammwässer. KA Betriebsinfo 40. Nr. 4. Hennef
- [30] Dezernat Umwelt und Gesundheit der Stadt Frankfurt am Main (o.J.): European Green Capital Award – Bewerbung der Stadt Frankfurt am Main Umweltindikator 09 Abwasseraufbereitung. http://www.frankfurt-greencity.de/fileadmin/Redakteur_Dateien/04_gca_umwelt_indikatoren/ui_09_abwasseraufbereitung_frankfurt.pdf (13.08.2015)
- [31] Fricke, K./M. Niesar/W. Müller/U. Einzmann/T. Turk (2002): Abfallmengen und -qualitäten für biologische Verwertungs- und Behandlungsverfahren. In: ATV-DVWK (Hg.): ATV-Handbuch Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Berlin
- [32] Oldenburg, M./A. Albold/C. Wendland/R. Otterpohl (2008): Erfahrungen aus dem Betrieb eines neuen Sanitärkonzepts über einen Zeitraum von acht Jahren. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 55 (10), 1100-1105
- [33] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2008): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Hennef
- [34] Bestenlehner, D. (2015): Auskunft zum KREIS-Projekt. Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT)
- [35] Hessenwasser GmbH & Co. KG (2012): Trinkwasser für Frankfurt. Mittelwerte aus den Wasseranalysen der verschiedenen Versorgungsgebiete Frankfurts. <http://www.maingas.de/>

static/demainova/downloads/Info_Jahresmittelwerte_Trinkwasseranalysen_2011_Ffm.pdf
(12.05.2014)

- [36] SEF – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (o.J.): Energie aus Klärschlamm. SEVA – Schlamm-Entwässerungs- und -Verbrennungs-Anlage in Frankfurt am Main. <http://stadt.entwaesserung-frankfurt.de/images/stories/dateien/klaerschlam.pdf> (11.02.2016)
- [37] Haberkern, B./W. Maier/U. Schneider (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Dessau-Roßlau
- [38] DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011): Merkblatt DWA-M 361 Aufbereitung von Biogas. Hennef
- [39] Nolde und Partner (2013): Grauwasserrecycling mit Wärmerückgewinnung. <http://www.nolde-partner.de/node/32> (11.02.2016)
- [40] Hartmann, M. (2015): mündliche Auskunft zum Projekt KREIS. Bauhaus-Universität Weimar
- [41] Tolksdorf, J. (2015): mündliche Auskunft zum Projekt Semizentral. Technische Universität Darmstadt
- [42] Sievers, J./J. Londong/A. Stübler/D. Bestenlehner/H. Drück/W. Schönfelder (2014): Heat recovery potential of domestic grey water in the pilot project Jenfelder Au in Hamburg. 17th EWA Symposium during IFAT 2014, Munich, Germany, 5-9 May 2014. Water, Energy and Resources: Innovative Options and Sustainable Solutions Session 4: Energy and Resources in New Sanitation Approaches – Part Two. http://www.kreis-jenfeld.de/tl_files/content/mitgliederpublikationen%20oeffentlich/Manuscript_Londong.pdf (11.02.2016)
- [43] Forschungsverbund netWORKS 3 (2014): Gebietssteckbrief für das Modellgebiet A. Internes Projektdokument des Forschungsverbunds netWORKS 3 mit Unterstützung des Stadtplanungsamts Frankfurt am Main und der Stadtentwässerung Frankfurt am Main