Hochschule Bremen

Fakultät 2: Architektur, Bau und Umwelt
Internationaler Studiengang Umwelttechnik B. Sc.

Wärmerückgewinnung aus Abwasser im urbanen Raum

Ein strategischer Planungsansatz für Bremen

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B. Sc.)

Jonas Schubert
Matrikelnummer: 5016729
mail@jschubert.de

Erstprüfer:
Prof. Dr. Jürgen Knies
Hochschule Bremen
Neustadtswall 30, 28199 Bremen
juergen.knies@hs-bremen.de

Zweitprüferin:
Sandra Petersen
hanseWasser Bremen GmbH
Birkenfelsstraße 5, 28217 Bremen
petersen@hansewasser.de

Bremen, 23. Mai 2022

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form auch auszugsweise noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Jonas Schubert
Matrikelnummer: 5016729

Bremen, 23. Mai 2022	
Ort, Datum	*Unterschrift*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **vi**

Tabellenverzeichnis **vii**

Abkürzungsverzeichnis **viii**

Verzeichnis der Regelwerke, Richtlinien und Gesetze **x**

1 Problemstellung und Zielsetzung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Forschungsrichtung und Leitfragen 1

2 Abwasser als Wärmeenergiequelle **5**
2.1 Wärmesektor 5
2.2 Politisches und Gesetzliches 6
2.3 Abwassercharakteristik 7
2.4 Urbane Entwässerungssysteme 8

3 Technische Grundlagen **15**
3.1 Die Thermodynamik dahinter 15
3.2 Wärmeübertragertechnik 16
3.3 Wärmepumpentechnik 19
3.4 Anlagen der Abwasserwärmenutzung 22

4 Methodik **27**
4.1 Modellansatz 27
4.2 Datensammlung 30
4.3 Methodisches Vorgehen 32

5 Untersuchungsergebnisse **37**
5.1 Ergebnisse geeigneter Haltungen 37
5.2 Ergebnisse geeigneter Gebäude 39

6 Diskussion **43**
6.1 Evaluierung der Methodik 43
6.2 Bewertung der Untersuchungsergebnisse 45

7 Fazit und Ausblick **51**

Literaturverzeichnis **57**

Anhang A Datenübersicht **58**

A.1 Kanalisationsdaten 58

A.2 ALKIS-Daten 59

A.3 Wärmenetze in der Stadt Bremen 63

Anhang B Durchführung der Raumanalyse **65**

B.1 Code-Ausführungen in QGIS 65

Abbildungsverzeichnis

2.1 Energieverbrauch nach Anwendungsbereich für Wohnhaushalte im Jahr 2019 . 5
2.2 Querschnitte von Abwasserrohren in der Siedlungswasserwirtschaft 9
2.3 Schemata eines Misch- und eines Trennsystems 10

3.1 Schema eines Doppelrohrwärmeübertragers im Gegenstromprinzip 18
3.2 Schema, Komponenten und Energiefluss einer Wärmepumpe 20
3.3 Beispielhaftes Schema einer Abwasserwärmenutzungsanlage 23
3.4 Übersicht verschiedener Wärmeübertrager in der AWRG 25

4.1 Methodisches Vorgehen 27
4.2 Verfahrensmodell in der Raumanalyse 34

5.1 Histogramm der Haltungen bzgl. ihrer Bewertungspunkte 38
5.2 Potentialkarte der für AWRG-Anlagen geeigneten Haltungen in Bremen 40
5.3 Histogramm der Gebäude bzgl. ihrer Bewertungspunkte 41
5.4 Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Gebäude in Bremen 42

6.1 Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Gebäude in Bremen Mitte und Östliche Vorstadt 44
6.2 Potentialkarte der für AWRG-Anlagen geeigneten Haltungen in Bremen Mitte und Östliche Vorstadt 44
6.3 Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Haltungen und Gebäude in Bremen Vahr 48
6.4 Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Haltungen und Gebäude in Bremen Schwachhausen 48

Tabellenverzeichnis

2.1 Definition der Arbeitsprozesse im Kanalbetrieb 11
2.2 Nutzungsdauer von Kanalrohren nach Sanierungsverfahren 13

3.1 Übersicht der thermodynamischen Zustandsänderungen 16

4.1 Übersicht und Kategorisierung aller relevanten Parameter für Anlagen der AWN 29
4.2 Auf die Raumanalyse anwendbare Parameter für Anlagen der AWN 32

5.1 Anzahl der Haltungen im schrittweisen Analyseverlauf 38
5.2 Potentialklassen für geeignete Haltungen und ihre Anzahl 38
5.3 Anzahl der Gebäude im schrittweisen Analyseverlauf 39
5.4 Potentialklassen für geeignete Gebäude und ihre Anzahl 39

A.1 Datenstruktur der Kanalisationsdaten 58
A.2 Gebäudefunktionen in den ALKIS-Daten 59
A.3 Übersicht der Bremer Wärmenetze 63

Abkürzungsverzeichnis

ALKIS Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem

AWN Abwasserwärmenutzung

AWRG Abwasserwärmerückgewinnung

BDI Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.

BEHG Brennstoffemissionshandelsgesetz

BHKW Blockheizkraftwerk

BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

BMWK Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

BMUV Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

BremKEG Bremisches Klimaschutz- und Energiegesetz

COP Coefficient of Performance

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

DN Nennweite [mm]

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

EEWärmeG Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

EN Europäische Norm

EnEG Energieeinsparungsgesetz

EnEV Energieeinsparverordnung

GEG Gebäudeenergiegesetz

GFK Glasfaserkunststoff

GIS Geographisches Informationssystem

hanseWasser hanseWasser Bremen GmbH

HF Hilfsfrage

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

JAZ Jahresarbeitszahl

KSG Bundes-Klimaschutzgesetz

KWK Kraft-Wärme-Kopplung

LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt

PE Polyethylen

PEF Primärenergiefaktor

PP Polypropylen

PVC Polyvinylchlorid

WMTS Web Map Tile Service

Verzeichnis der Regelwerke, Richtlinien und Gesetze

Bremisches Klimaschutz- und Energiegesetz vom 27.03.2015 (Brem.GBl. S. 1172) – BremKEG.
Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3.11.2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist – BEHG.
Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18.08.2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist – KSG.
Gebäudeenergiegesetz vom 08.08.2020 (BGBl. I S. 1728) – GEG.
Merkblatt DWA-M 114:2020-04. Abwasserwärmenutzung. April 2020.
Merkblatt DWA-M 149-2:2013-12. Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion. Dezember 2013.
Norm DIN EN 1610:2015-12. Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Dezember 2015. https://dx.doi.org/10.31030/2307357.
Norm DIN EN 13508-2:2011-08. Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion. August 2011. https://dx.doi.org/10.31030/1733307.

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Motivation

> *Es ist eindeutig, dass der menschliche Einfluss die Atmosphäre, die Ozeane und das Land erwärmt hat.*

IPCC 2021, *Sechster Sachstandsbericht*, S. 4

Mit diesen Worten beginnt der Sechste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Der als Weltklimarat bekannte IPCC veröffentlicht alle paar Jahre seine Sachstandsberichte, in denen umfänglich alle Informationen zum Zustand des globalen Klimas gesammelt werden. Später heißt es dort: „Alle vier letzten Jahrzehnte waren nacheinander wärmer als jedes vorangegangene Jahrzehnt seit 1850“ (IPCC, 2021, S. 5). Diese Umstände sind keine Neuigkeiten mehr, sondern schon lange bekannt. So wurde auch das Wort *Klimakrise* bereits 2004 in den Duden aufgenommen (Duden, 2022). Dennoch verdeutlichen sie ein weiteres Mal unsere möglicherweise größte Herausforderung des angebrochenen Jahrzehnts und Jahrhunderts: Vermeidung einer zu starken Erwärmung unseres Planeten. Die Wege dahin können vielfältig sein. Es gibt notwendige Maßnahmen, etwa zur Reduktion von Rohstoffverbräuchen und Treibhausgasemissionen. Auf der anderen Seite gibt es sicherlich auch hinreichende (technische) Adaptationen mit den gleichen Zielen. Der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) sprach zur Erreichung der Klimaschutzziele, die sich Deutschland bis 2030 gesetzt hat, in einer Studie von erforderlichen „Mehrinvestitionen in Höhe von rund 860 Mrd. Euro“ (BDI, 2021, S. 14). Das seien – beginnend in diesem Jahr – ca. 100 Mrd. Euro je Jahr in den Branchen Industrie, Verkehr, Gebäude und Energie (BDI, 2021). Dieser signifikante monetäre Aufwand, den der BDI benennt, verdeutlicht die Größenordnung und Dringlichkeit des Problems und einen eminenten Handlungsbedarf.

1.2 Forschungsrichtung und Leitfragen

Für den Ausbau erneuerbarer Wärme im Gebäudesektor sieht der BDI 67 Mrd. Euro an Mehrinvestitionen vor. Das soll bspw. über Wärmepumpen umgesetzt werden (BDI, 2021), die in ihrer allgemeinen Funktion Umweltwärme jeglicher Art nutzbar machen. Diese Nutzbarmachung von Umweltwärme wird auch in den Statistiken des Bundesministeriums für Wirtschaft und

Klimaschutz (BMWK) explizit aufgelistet. Dort gibt es bei den Zahlen zum Endenergieverbrauch der Wärme eine eigene Kategorie „Geothermie, Umweltwärme“ (BMWi, 2020, S. 17). Die thermischen Energiemengen in dieser Kategorie werden u. a. in modernen Wärmerückgewinnungsanlagen erzeugt, die derzeit zahlreich geplant und realisiert werden. Als Beispiel ist die Überseeinsel in Bremen zu nennen, wo mit Hilfe von Flusswasserwärmetauschern und Wärmepumpen „die Weser als Wärmequelle“ dienen soll und so die dort „zu entstehenden Wohn- und Geschäftsquartiere klimaneutral“ konzeptioniert werden (PBS Energiesysteme GmbH, 2019). Weiterhin betreibt auch die Stadtwerke Aachen AG seit einigen Jahren eine Anlage, in der aus einem Umweltmedium Wärmeenergie entzogen und nutzbar gemacht wird. In dieser Aachener Anlage wird Kanalisationsabwasser als Umweltmedium eingesetzt. Zwei Wärmepumpen nutzen dadurch die Wärme des Abwassers und erhalten so ein Nahwärmenetz mit einer Temperatur von 55 °C aufrecht, das insgesamt 163 Wohneinheiten versorgt (Brinkmann & Sappa, 2017).

Die vorliegende Arbeit siedelt sich an dem Anwendungsfall des zweiten vorgestellten Wärmeversorgungssystems in Aachen an. In ihrem Prinzip heißt diese Technologie Abwasserwärmerückgewinnung (AWRG) oder verallgemeinert auch Abwasserwärmenutzung (AWN). Liegenschaften eignen sich unterschiedlich stark für eine Anlage der AWN. Parameter können sich positiv und negativ auf ihre Eignung auswirken. Aber auch mit Blick auf die Kanalisation und ihre Haltungen können verschiedene Parameter eine fördernde oder hemmende Wirkung auf die Rückgewinnung von Abwasserwärme haben. Sämtliche Parameter werden in dieser Arbeit definiert, bzgl. ihrer Relevanz eingeordnet und priorisiert. Auf Basis der Ausarbeitung der Parameter wird qualitativ ein Modell erstellt, mit Hilfe dessen eine Raumanalyse durchgeführt werden kann. Darin sollen exemplarisch für die Stadt Bremen Liegenschaften und Haltungen lokalisiert werden, die für eine Anlage der AWN geeignet sind.

Folgende zentrale Forschungsfrage kann also hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit formuliert werden:

> Wo ist die Installation einer Anlage zur Rückgewinnung und Nutzung von Abwasserwärme in der Stadt Bremen energetisch und strategisch sinnvoll?

An diese Forschungsfrage knüpfen zusätzlich die nachfolgenden Hilfsfragen (HF) an:

HF_1 Wie kann die Abwasserwärmerückgewinnung und Abwasserwärmenutzung thematisch eingeordnet werden?

HF_2 Wie können Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser in ein bestehendes oder neues Kanalnetz eingebaut werden?

HF_3 Welche (räumlichen) Faktoren beeinflussen die Standortwahl für diese Anlagen und welche Barrieren können auftreten?

HF_4 Gibt es Synergieeffekte, die ihre Installation begünstigen?

Die thematische Einordnung aus HF_1 ist in Kapitel 2 zu lesen, HF_2 wird in Kapitel 3 beantwortet. In Kapitel 4.1 sind die Ausarbeitungen in Bezug auf HF_3 und HF_4 zu finden.

Ob die zu Beginn dieser Einleitung angesprochenen globalen Herausforderungen der *Klimakrise* über Anlagen der AWN angegangen werden können, versucht die Arbeit nicht zu beantworten. Allerdings ist Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung jeglicher Art im Gegensatz zur konventionellen Wärmeerzeugung immer mit geringerer – im Idealfall aber sogar auch keiner – Emission von Treibhausgasen verbunden. So kann Abwasser möglicherweise als ein wichtiger von vielen Bausteinen in der Energiewende der Energie- wie auch Gebäudebranche betrachtet werden.

2 Abwasser als Wärmeenergiequelle

2.1 Wärmesektor

Der Wärmesektor steht gesamtgesellschaftlich und medial weniger stark im Mittelpunkt der Energiewende als die Stromerzeugung. Vielleicht gerade deshalb lag Deutschland im Jahr 2019 bei einem Erzeugungsanteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von 42,1 %, während der Anteil erneuerbarer Quellen am Endenergiewärmeverbrauch im selben Jahr bei lediglich 14,7 % lag. Die zeitliche Entwicklung zeigt hier eine starke Stagnation des Ausbaus seit 2012. Paradoxerweise betreffen die jeweiligen erneuerbaren Anteile ganz unterschiedliche absolute Größenordnungen: 2019 betrug der Bruttostromverbrauch 576 126 GW h und der Endenergieverbrauch an Wärme 1 221 633 GW h, also mehr als das doppelte. Die erneuerbar produzierte Menge an Wärmeenergie lag demnach bei 179 580 GW h. Davon haben 86,4 % ihren Ursprung in Biomasse, also der Verbrennung von bspw. Holzprodukten, Klärschlamm oder Biodiesel. Bei diesen Prozessen werden demnach Treibhausgase emittiert; weil sie aus nachwachsenden Rohstoffen stammen gelten sie gleichwohl als erneuerbar. Die emissionsfreien Wärmeerzeugungen sind nach der Kategorisierung des BMWi (2020) Solarthermie mit einem Anteil an der gesamten erneuerbaren Wärme von 4,7 % sowie Geothermie, Umweltwärme mit 8,9 %. Zweitere ist bereits aus dem vorigen Kapitel bekannt. Damit einhergehend fand über die vergangene Dekade ein relativ konstantes Wachstum des Wärmepumpenbestands statt (BMWi, 2020).

Das im obigen Paragraphen angesprochene Paradoxon wird untermauert durch den Umstand, dass im privaten Wohnbereich Raumwärme und Warmwasser mit 86 % einen Großteil am gesamten Energieverbrauch einnimmt, wie Abbildung 2.1 zeigt. Hier war über die letzten Jahre sogar auch in absoluten Werten eine Erhöhung des Wärmeverbrauchs zu verzeichnen (Destatis, 2021b). Das ist in erster Linie witterungsbedingt und somit nicht beeinflussbar (BMWi, 2020).

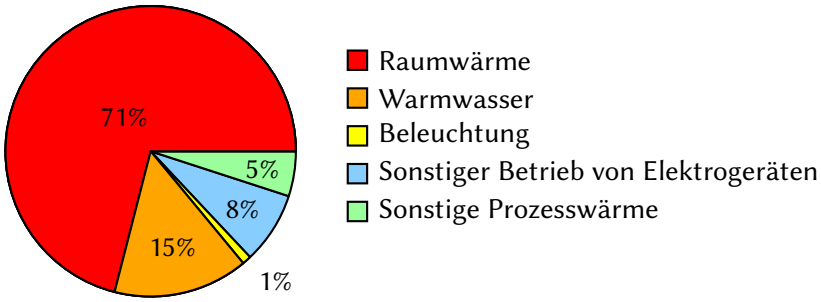


Abbildung 2.1: Energieverbrauch nach Anwendungsbereich für Wohnhaushalte im Jahr 2019 (Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis, 2021b, S. 11)

Ein kurzer Blick auf die europäische Ebene offenbart, dass die Entwicklung des Ausbaus erneuerbarer Wärmequellen in Deutschland kein Einzelfall ist. Der Großteil der europäischen Staaten hat in den Jahren 2016 bis 2018 diesbezüglich eine sehr schwache Zunahme oder sogar leichte Rücknahme zu verzeichnen (BMWi, 2020).

In der Freien Hansestadt Bremen wurden 2019 in den Bereichen „Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher“ (Statistisches Landesamt Bremen, 2021b, S. 9) 28 GW h Umweltwärme verbraucht. Davon können 25 GW h der Stadt Bremen und 3 GW h der Stadt Bremerhaven zugewiesen werden (Statistisches Landesamt Bremen, 2021b). Im Vergleich zum Vorjahr ist ein Wachstum erkennbar: Auf Landesebene waren es 2018 insgesamt 22,5 GW h, in der Stadt Bremen 20 GW h und in der Stadt Bremerhaven 2,5 GW h (Statistisches Landesamt Bremen, 2021a).

2.2 Politisches und Gesetzliches

Die derzeitigen politischen Vorsätze Deutschlands sind im Klimaschutzplan 2050 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) verankert und eine Reaktion auf das Übereinkommen von Paris aus 2015, das die Europäische Union nach der Klimakonferenz der Vereinten Nationen in Paris ratifizierte. Im Wesentlichen verkündet das Übereinkommen, die Erwärmung des Planeten signifikant unter 2 °C zum vorindustriellen Niveau und soweit möglich auf 1,5 °C zu beschränken. Im Klimaschutzplan 2050 sind daher Ziele und Meilensteine definiert um das zu erreichen. So soll Deutschland bis 2050 weitgehend neutral in seinen Treibhausgasemissionen sein und bis 2030 diese um mindestens 55 % im Vergleich zu 1990 reduziert haben (BMU, 2016). Eine gesetzliche Verpflichtung zu diese Zielen hielt die Bundesregierung drei bzw. fünf Jahre später im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) fest. Es enthält dabei sogar noch verschärfte Vorgaben: Die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 muss anstelle der 55 % bei mindestens 65 % liegen, die Treibhausgasneutralität muss fünf Jahre früher, also 2045, erreicht sein und 2050 müssen Deutschlands Emissionen im negativen Bereich liegen (§ 3 Abs. 1 Nr. 1 und Nr. 2, Abs. 2 KSG). Im gleichen Zuge wurde auch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) beschlossen, in dem eine allgemeine Bepreisung von CO_2-Äquivalenten festgelegt ist, bekannt unter der Bezeichnung *CO_2-Steuer*. Diese beträgt für das laufende Jahr 2022 30 € je Tonne (§ 10 Abs. 2 Nr. 2 BEHG).

Mit Inkrafttreten des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) am 1. November 2020, welches das Energieeinsparungsgesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) ersetzt, aktualisierte sich die Rechtslage in Bezug auf Abwasser als Energiequelle. Begrifflich wird Abwasserwärme nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 und Nr. 30 GEG als Abwärme und Umweltwärme definiert. Dadurch hat ihre Nutzung einen Primärenergiefaktor (PEF) von 0,0 und ist wie eine erneuerbare Energiequelle zu sehen. Der Betrieb wärmetechnischer Anlagen zur Energieversorgung von Gebäuden inklusive Nah- und Fernwärmenetze kann so mit Anteilen der Abwasserwärmenutzung auch aus gesetzlicher Sicht klimaneutraler gestaltet werden (BDEW, 2020). Das ermöglicht Beteiligten die Möglichkeit zur Bewerbung auf Förderprogramme mit vorgeschriebenem maximalen PEF bei entsprechender

Planung ihrer Anlage. Zur Rechtslage in Bezug auf das Eigentum der Wärme im Abwasser gibt es bisher keine abschließende verbindliche Aussagen bzw. Rechtsprechungen. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) äußert sich zu der Thematik wie folgt: „Durch die Einleitung in den Kanal gelangt das Abwasser in das Eigentum der Kommune. Sie kann über die Wärme im Abwasser frei verfügen“ (Bayerisches LfU, 2015, S. 10).

Die Freie Hansestadt Bremen hat zur Umsetzung der nationalen Forderungen ein Bremisches Klimaschutz- und Energiegesetz (BremKEG) verfasst. Darin ist u. a. zu lesen, dass „[z]ur Deckung des Bedarfs an Niedertemperaturwärme [...], soweit möglich, energetisch geringwertigere Umgebungs- oder Abwärme verwendet“ werden soll und „[d]ie Wärmeversorgung von Gebäuden [...] in zunehmendem Maße aus erneuerbaren Energien, aus Kraft-Wärme-Kopplung oder aus Abwärmenutzung“ (§ 2 Abs. 1 Nr. 4 und Nr. 5 BremKEG) erfolgen soll. Außerdem soll das Bundesland nach § 2 Abs. 1 Nr. 6 BremKEG bis 2050 seine gesamte Wärmeenergie auf erneuerbare Art erzeugen. Eine Überarbeitung des BremKEGs auf die nationalen Vorgaben, die im aktuellen KSG verankert sind, ist dementsprechend noch abzuwarten. Spezifische Handlungsempfehlungen und Vorschläge zu politischen Maßnahmen wurden allerdings bereits durch eine Enquetekommission für das Land Bremen erarbeitet. Auch eine Untersuchung von Abwasserwärmepotentialen ist dort explizit aufgelistet (Michalik, 2021).

2.3 Abwassercharakteristik

Abwasser wird entsprechend seines Ursprungs kategorisiert. Auf unterster Betrachtungsebene unterscheiden Förstner und Köster (2018) bei Schmutzwasser zwischen kommunal-häuslichem und industriell-gewerblichem Abwasser, das in seinen Charakteristika normalerweise stark voneinander abweicht. Häusliches Abwasser kommt vorwiegend aus Haushalten und entsteht dort aus verbrauchtem Trinkwasser, zum Großteil in Badezimmer, WC und Küche. Man kann also für jede:n Einwohner:in in etwa von 120 $\mathrm{L\,d^{-1}}$ ausgehen (Förstner & Köster, 2018). Dementsprechend ist sein Zustandekommen längerfristig relativ konstant, auch wenn es über den Tag verteilt eine typische Kurve gibt, die morgens zwischen 5 und 6 Uhr ihren Tiefpunkt und in der Mittagszeit ihr Maximum hat sowie auch am Abend noch einmal etwas höher liegt (Cipolla & Maglionico, 2014). Diese Tagesschwankungen haben kleinere Amplituden je mehr Menschen das Kanalnetz im betrachteten Einzugsgebiet versorgt. Die Merkmale gewerblichen Abwassers hängen substanziell vom Sektor ab, sind im Allgemeinen aber häufig vielfältiger und komplexer, weil auch synthetische oder giftige Inhaltsstoffe abgeleitet werden können. Auch seine Tagesgänge werden maßgeblich durch den Sektor bestimmt, so kann etwa am Wochenende wesentlich weniger Abwasser eingeleitet werden als unter der Woche. Als Fremdwasser wird „unplanmäßig in die Kanalisation eindringendes Wasser infolge von Undichtigkeiten oder Fehlanschlüssen“ (Förstner & Köster, 2018, S. 274) genannt.

Auf der nächsthöheren Ebene ergibt die Summe aus Schmutzwasser und Fremdwasser den Trockenwetterabfluss. Unter lokaler und zeitlicher Globalbetrachtung ist das für eine Kommune ein relativ kontinuierliches Abwasseraufkommen. Daneben gibt es das Niederschlagswasser aus Regen und Schneeschmelzen. Siedlungswasserwirtschaftlich handelt es sich dabei wei-

terhin um Abwasser, das in städtischen Gebieten wegen Flächenversiegelungen weniger bis kaum auf natürlichem Wege in den Boden abfließen kann und so in die Kanalisation gelangt. Offensichtlich ist die aufkommende Menge des Niederschlagswassers wetterabhängig und kann so zwischen keinem Regen und Starkregen beliebig variieren (Förstner & Köster, 2018).

Das gesamte jährliche Abwasseraufkommen in Deutschland hat – in Summe aus den oben aufgelisteten Abwasserarten, also häusliches und betriebliches Schmutzwasser, Fremdwasser und Niederschlagswasser – ein Volumen von $9\,581\,052 \cdot 10^3\,\mathrm{m}^3$. Für das Bundesland Bremen liegt dieser Wert bei $61\,522 \cdot 10^3\,\mathrm{m}^3$ (Destatis, 2018). Seine Zusammensetzung ist von organischen Fraktionen wie Exkrementen und Fetten sowie anorganischen Fraktionen wie Schwermetallen und Salzen, auch von Säuren und Laugen, geprägt. Außerdem gibt es mineralischen Sand, der häufig neben Mikroplastik über Reifenabrieb im Niederschlagswasser zu finden ist. Die Vielzahl an gelösten und ungelösten Bestandteilen macht Abwasser zu einer sehr heterogenen Substanz (Förstner & Köster, 2018). Diese Spezifik ist bei jeglicher Nutzung von Abwasser zu berücksichtigen.

Die Temperatur des Abwassers ist, wie Gleichung 3.3 im nächsten Kapitel zeigen wird, die maßgebende Variable zur Berechnung des Energiegehalts von Abwasser bei sonst gleichbleibenden Parametern. Die folgenden Informationen sind somit relevant für die gesamte Betrachtung der Thematik. An der Einleitstelle von Haushalten in die Kanalisation kann die Abwassertemperatur bis zu 27 °C erreichen (Frijns et al., 2013). Die mittleren Temperaturen in der Kanalisation liegen bei 10 °C bis 20 °C (Böge & Knies, 2017). Cipolla und Maglionico (2014) weisen darauf hin, dass auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen im geringen Minusbereich der Celsius-Skala das Abwasser 10 °C nicht unterschreitet. So werden im norditalienischen Winter in der Kanalisation mittlere Abwassertemperaturen von 11 °C bis 16 °C gemessen, stets weit über der Lufttemperatur (Cipolla & Maglionico, 2014). Golzar et al. (2020) entwickelten ein Prognosemodell auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes (ANN) zur Vorhersage der Einleittemperatur des Abwassers in die Kläranlage. Dazu nutzten sie Messdaten aus Stockholm. Demnach hat Abwasser selbst im schwedischen Winter mittlere Temperaturen von unter 10 °C nur an den wenigsten Tagen bei Außentemperaturen, die vereinzelt −20 °C unterschreiten. Auf der anderen Seite erreicht Stockholmer Abwasser bei seiner Einleitung in die Kläranlage im Sommer mittlere Temperaturen bis 21 °C (Golzar et al., 2020).

2.4 Urbane Entwässerungssysteme

Das gesamtheitliche Entwässerungssystem beginnt in den Grundstücksleitungen der Haushalte und setzt sich dann mit der Kanalisation über kumulierte 575 000 km bis zuletzt den Kläranlagen fort. In Deutschland sind Kanalisation und Kläranlage i. d. R. öffentlich, während die Hausanschlussleitungen privat sind. Es gibt vorwiegend zwei verschiedene Typen der Kanalisation: Misch- und Trennsystem unterscheiden sich entsprechend ihrer Bezeichnung darin, ob Schmutzwasser und Niederschlagswasser gemischt oder getrennt voneinander abgeleitet werden. In Abbildung 2.3 ist das veranschaulicht. Das Mischsystem weist dabei ein einzelnes und wegen der hohen potentiellen Schwankungen durch das Regenwasser großes Kanalrohr

auf. Die Möglichkeit dieser Schwankungen kann angepasste Rohrquerschnitte erfordern, bspw. mit eingelassenen Rinnen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die geringe Fließgeschwindigkeit des Trockenwetterabflusses keinen Abtransport des Abwassers gewährleisten kann. Hierfür ist ein sogenannter Trockenwetternachweis durchzuführen. Verschiedene Querschnitte von Kanalrohren sind in Abbildung 2.2 zu sehen. „[Z]ahlreiche Sonderbauwerke und Einrichtungen“ (Förstner & Köster, 2018, S. 282) erschweren insgesamt den Betrieb eines Mischsystems und seine Kontrolle. Dahingegen werden im Trennsystem ein vergleichsweise kleines Kanalrohr für den recht konstanten Schmutzwasservolumenstrom und ein größeres Rohr verwendet, das anfallendes Regenwasser ableiten kann. Diese beiden Rohrleitungen benötigen mehr Platz unter der Erde, was in eng bebauten Bereichen Schwierigkeiten mit sich ziehen kann. Zudem ist auch der Anschluss von Hausanschlussleitungen erschwert – Fehlanschlüsse sind möglich. Gleichzeitig wird die hydraulische und biologische Belastung der Kläranlage vermindert, weil Volumenstrom und Konzentrationen konstanter sind. Bei Starkregenereignissen findet eine Entlastung in den Vorfluter nur mit Niederschlagswasser und nicht mit belastetem Schmutzwasser statt, was die Gewässer schont (Förstner & Köster, 2018).

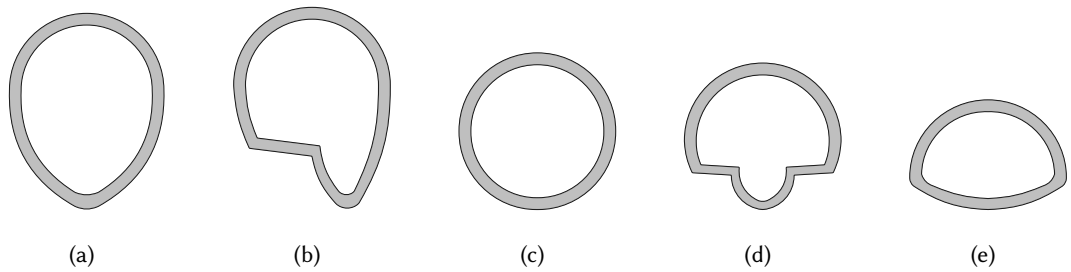
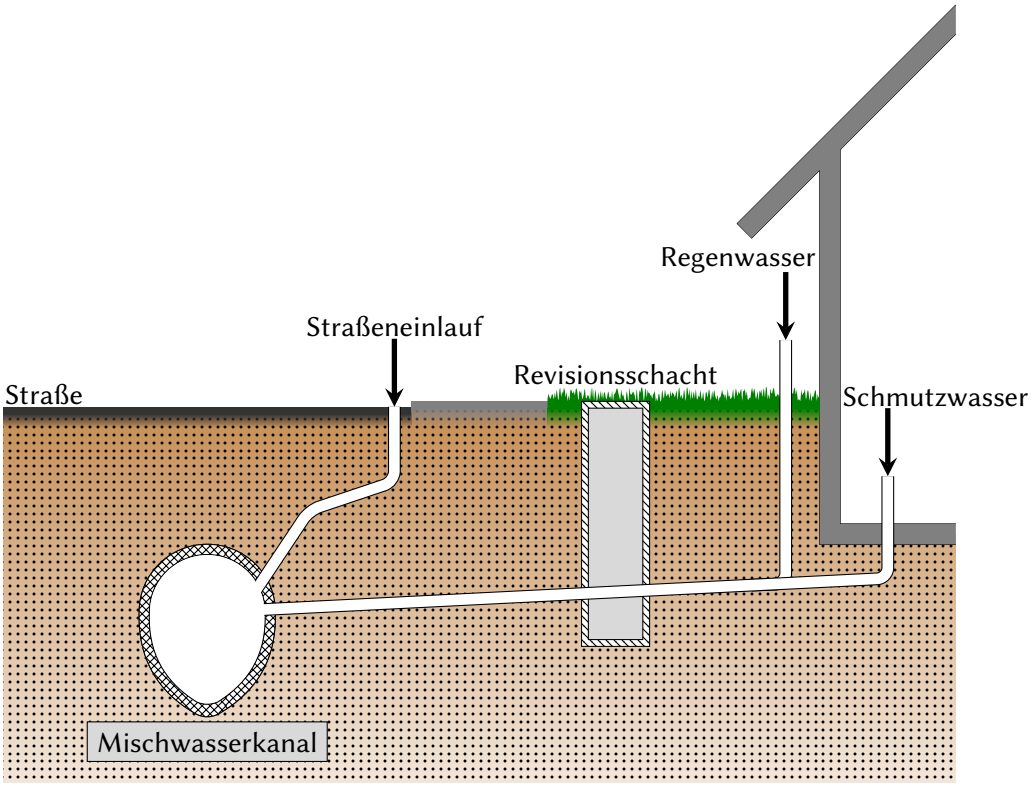


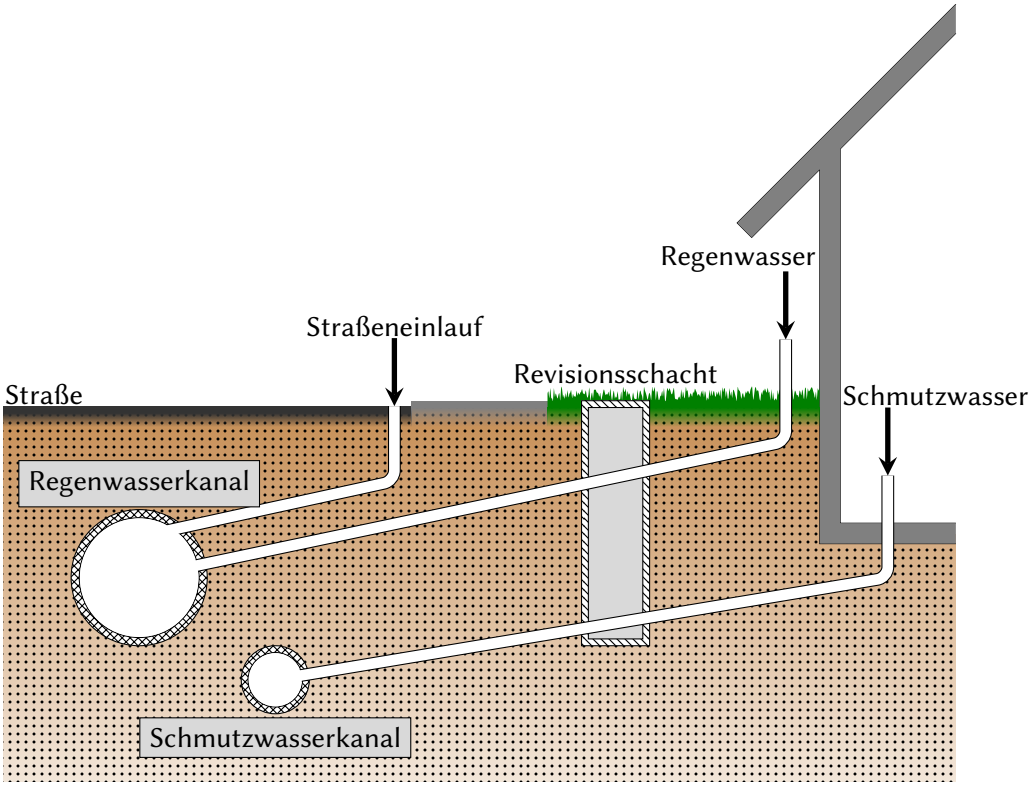
Abbildung 2.2: Querschnitte von Abwasserrohren in der Siedlungswasserwirtschaft, (a): Eiquerschnitt, (b): Rinnenquerschnitt mit einseitigem Auftritt, (c): Kreisquerschnitt, (d): Rinnenquerschnitt mit beidseitigem Auftritt, (e): Maulquerschnitt (Quelle: Eigene Darstellung nach Förstner & Köster, 2018, S. 291)

Beide Systeme werden in Deutschland überwiegend als Schwemmkanalisation betrieben. Sie definiert sich durch einen Freispiegelabfluss, der anaerobe Bedingungen verhindert, sodass keine korrosiven Nebenprodukte durch die biologische Aktivität in der Kanalisation entstehen können. Außerdem werden betriebliche Kontrollen und Instandhaltungsmaßnahmen erleichtert. Das Schwemmen bezeichnet den Abtransport des Abwassers und all seiner gelösten und ungelösten Inhaltsstoffe durch sich selbst. Ist die Schwemmkanalisation mit ausreichendem Gefälle gebaut, hat sie keinen Energiebedarf. Diesen gibt es dann lediglich bei Pumpwerken. Systemseitig sind neben der Schwemmkanalisation die Unter- und Überdruckentwässerung zu nennen. Sie kennzeichnen sich in ihrem Abwassertransport – entsprechend ihrer Benennung – durch Druckkräfte aus und sind deshalb in ihren jeweiligen Bilanzräumen als geschlossene Systeme zu betrachten (Förstner & Köster, 2018).

Bölke (2013) differenziert Kanalrohre zusätzlich nach ihrer Biegesteifigkeit, die materialbedingt ist. Als biegesteife Materialien kommen im Kanalbau Steinzeug, Stahlbeton, Faserzement, Beton und Polymerbeton zum Einsatz. Auch Verbundmaterialien wie Beton mit



(a)



(b)

Abbildung 2.3: Schemata eines Misch- (a) und eines Trennsystems (b) (Quelle: Eigene Darstellung nach Förstner & Köster, 2018, S. 282, 285)

Polyvinylchlorid (PVC), Beton mit Glasfaserkunststoff (GFK), Beton mit Polyethylen (PE) und Beton mit Steinzeug gelten als biegesteif. Dagegen sind gemauerte Kanäle, PE-Rohre, GFK-Rohre, PVC-Rohre und Rohre aus Polypropylen (PP) biegeweiche Rohrmaterialien (vgl. Bölke, 2013, S. 28f).

Die Kanalrohre selbst bezeichnet Bölke (2013) als ein Bauwerk der Abwasserableitung. Daneben gibt es weitere Bauwerke und Einbauten wie bspw. Pumpwerke, Schächte, Düker und Absturzbauwerke, aber auch Sonderbauwerke und -einrichtungen wie etwa Regenrückhalteanlagen (RRA) und Regenüberlaufbecken (RÜB). Pumpwerke sorgen dafür, dass ein Abtransport des Abwassers trotz Freispiegelabfluss mit natürlichem Gefälle auch in vertikale Richtung möglich ist. Des weiteren gibt es Schächte, die mit ihren Schachtdeckeln häufig das einzig sichtbare der Kanalisation sind. Sie dienen dem Zutritt durch Wartungsgeräte oder -personal. Eine Haltung bezeichnet dabei den Abschnitt zwischen zwei Schächten. Ein Düker wird eingesetzt, wenn tiefliegende Hindernisse den Freispiegelabfluss des Kanalrohr behindern und daher überwunden werden müssen. Er wird als Druckleitung betrieben. Absturzbauwerke erlauben wie Pumpwerke auch einen vertikalen Abwassertransport, allerdings nach unten und somit ohne energetischen Aufwand (Bölke, 2013; Förstner & Köster, 2018).

Der Betrieb der Kanalisation muss durch verschiedene Prozesse aufrechterhalten und gewährleistet werden. Dabei handelt es sich um die Wartung, Inspektion und Sanierung von Kanalrohren; sie sind in Tabelle 2.1 definiert. Die Verfahren der jeweiligen Arbeitsprozesse werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Die Anforderungen an die Abwasserleitung, die der Soll-Zustand der Kanalrohre natürlich erfüllen muss, können „in der hydraulischen Leistungsfähigkeit, der Dichtigkeit, der korrekten Anbindung der Anschlüsse und der Dauerhaftigkeit des verwendeten Baustoffes“ (Jung, 1998, S. 17) zusammengefasst werden.

Tabelle 2.1: Definition der Arbeitsprozesse im Kanalbetrieb (Bölke, 2013, S. 35)

Arbeitsprozess	Bedeutung
Inspektion	Feststellung des Ist-Zustands
Wartung	Erhalt des Soll-Zustands
Sanierung	Wiederherstellung des Soll-Zustands

Die Inspektion von Kanalrohren dient der Zustandserfassung, die mindestens 10-jährig geleistet werden muss. Sie wird inzwischen hauptsächlich als TV-Untersuchung durchgeführt, also mittels Kamerawagen, der die Haltung befährt. Vor der optischen Inspektion muss der Kanal allerdings hochdruckgespült werden; auch hierfür wird normalerweise ein ferngesteuerter Wagen genutzt (Jung, 1998). Laut Vogel (2007) findet lediglich bei Haltungen ab einer Nennweite (DN) von 1200 mm noch eine Begehung durch Personal statt. Ist die optische TV-Untersuchung nicht ausreichend, muss zusätzlich eine Dichtigkeitsprüfung erfolgen. Sofern sie nach den Vorgaben der DIN EN 1610 durchgeführt wird, erhöht sich der Untersuchungszeitraum auf 15 Jahre (Jung, 1998). Die Dokumentation der Schäden richtet sich nach der Norm DIN EN 13508-2 bzw. dem Merkblatt DWA-M 149-2. Demnach gibt es eine exakte Codierung, die die Schäden in den Leitungen charakterisiert und quantifiziert sowie „Lage und Umfang“ (Bölke, 2013, S. 170)

angibt.

Zur Wartung gehört nach Bölke (2013) in erster Linie die Reinigung von Kanal und Schacht sowie ferner auch von „Sandfänge[n], Schlammfänge[n] von Straßenabläufen, Regenüberläufe[n], Auslässe[n], Regenbecken[n], Pumpensümpfe[n] und Abscheider[n] für Leichtflüssigkeiten und Fette“ (Bölke, 2013, S. 35). Als Turnus für die Reinigung werden bei Schmutzwasserkanälen 6 bis 12 Monate, bei Mischwasserkanälen 12 bis 15 Monate und bei Regenwasserkanälen etwa 20 Monate angegeben. Das häufigste Verfahren der Kanalreinigung ist die (Hochdruck-) Spülung, wobei die Schwall- und Stauspülung nur noch selten angewendet werden. Bei der Hochdruckspülung dagegen tritt Wasser mit einem Druck von 80 bar bis 200 bar und einem horizontalen Winkel von 10° bis 60° aus einem Düsenkopf aus; der Volumenstrom liegt bei 300 L min^{-1} bis 700 L min^{-1}. So werden die Schmutzpartikel von der Kanalrohrwand losgelöst. Wasserdruck und Düsenwinkel müssen dabei je nach Art und Grad der Verschmutzung sowie je nach Rohrmaterial angepasst werden, sodass einerseits das Reinigungsergebnis zufriedenstellend ist aber gleichzeitig auch keine Schäden an der Rohrwand entstehen. Weiterhin gibt es mechanische Reinigungsverfahren, die aufgrund ihres höheren Aufwandes teurer als die Hochdruckspülung sind und seltener angewendet werden (Jung, 1998). Diese Verfahren reichen vor allem in begehbaren Haltungen „von Sandstrahlgeräten über Preßlufthämmer [*sic!*] bis zu Kleinbaggern“ (Jung, 1998, S. 42). Chemische und biologische Reinigungsverfahren werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die Sanierung eines Kanalrohrs findet im Bedarfsfall nach vorangegangener Inspektion und Schadensdetektion statt. Generell gilt, dass jegliche Sanierungsarbeiten während des regulären Kanalbetriebs einer Vorflutsicherung unterliegen. Sie ermöglicht Abwasser trotz teilweiser oder vollständiger Verschließung des Kanalrohrs abfließen zu können, sodass das entsprechende Sanierungsverfahren qualitativ gesichert durchgeführt werden kann. Je nach Bauzustand des Kanalrohrs wird eine der drei Maßnahmen Reparatur, Renovierung oder Erneuerung gewählt (Vogel, 2007). Die Verfahren dafür unterscheiden sich und werden nachfolgend prägnant vorgestellt.

Zur Reparatur gehören „Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden“ (Vogel, 2007, S. 52). Vor allem für nicht begehbare Kanalrohre bis DN 800 können Spachtelroboter punktweise und radiale Beschädigungen beheben, indem die betreffenden Stellen in folgender Reihenfolge herausgefräst, gebohrt, verpresst bzw. verspachtelt und zuletzt geschliffen werden. Die Verpressung bzw. Verspachtelung wird i. d. R. mit einem 2-Komponenten-Epoxidharz-Kleber durchgeführt. Ebenso Zulaufeinbindungen, also Schäden an den Zuläufen in die Leitung, werden häufig von Robotern umgesetzt (Vogel, 2007). Für kleinere axiale Beschädigungen in nicht begehbaren Kanalrohren kann im Kurzschlauchverfahren ein Partliner in die Leitung eingebracht werden. Das ist ein Glasfaserschlauch, der durch eine Reaktion mit Harz aushärten kann. Er wird vor Reaktionsbeginn an der betreffenden Stelle durch einen aufblasbaren Schlitten an die Rohrwandung gepresst. Die Schalendichtung ist ein Verfahren, bei dem eine Edelstahlschale an die Innenwand der Kanalleitung geklebt wird (Jung, 1998). Als weitere Reparaturmethode sind die Injektionsverfahren zu nennen, die es in unterschiedlicher Ausführung gibt. Generell wird dabei aber immer ein Reagenz in einen Injektionsraum und in den Boden

des unmittelbaren Rohrumfelds injiziert. Das Reagenz ist ein Gel wie z. B. 2-Komponenten-Polyurethanharz oder verschiedene Silikatgele. Die Reaktion dauert dann rund 15 s bis 30 s und lässt das Gel aufquellen. So wird eine Abdichtung an der Schadensstelle erzeugt. Vor allem die Abdichtung durch Injektion nach dem Janßen-Verfahren ist erwähnenswert, weil hier zusätzlich eine statische Wirkung erzeugt werden kann. Diese Verfahren können normalerweise bei Kanalrohren bis DN 700 angewendet werden (Vogel, 2007).

Die Renovierung von Kanalrohrschäden geht hinsichtlich Wirksamkeit und Beständigkeit weit über die gängigen Reparaturverfahren hinaus. Laut Vogel (2007) ist so nach Renovierung auch eine Verlängerung der Haltungsnutzung im Vergleich zur ursprünglichen Restnutzungsdauer möglich. Ein Überblick über die Nutzungsdauer von Kanalrohren nach verschiedenen Renovierungsverfahren gibt Tabelle 2.2. Auch ein Vergleich zu anderen Sanierungsverfahren ist dort zu finden.

Tabelle 2.2: Nutzungsdauer von Kanalrohren nach Sanierungsverfahren (Vogel, 2007, S. 81)

Sanierungsverfahren	Nutzungsdauer [a]
Reparaturverfahren:	
• Roboter, Zulaufeinbindung	15–20
• Kurzliner, Schalen	5–15
• Injektionsabdichtung (Janßen)	25–30
Renovierungsverfahren:	
• Schlauchlining	50
• Rohrstranglining	70
• Einzelrohrlining	70
• Montage	50
Erneuerungsverfahren	80–100

Unterschiedliche (Re-) Liningverfahren stellen inzwischen die konventionellsten Renovierungstechniken dar und bieten eine große Produktpalette. Ein Inliner bezeichnet das neue Rohr innerhalb des alten schadhaften; dieses wird in die Leitung eingebracht. In der Praxis ist das allerdings immer mit einer Querschnittsreduzierung des Kanalrohrs verbunden, die durchaus relevant sein kann. Es ist zu prüfen, ob die Hydraulik der Haltung nach Einbau des Inliners nach wie vor den rechtlichen Anforderungen genügt. Beim Rohrstranglining und Einzelrohrlining besteht der Inliner zumeist aus einem thermoplastischen Kunststoff, der nach Einbringung durch Heißdampfdruck in seine Ursprungsform gebracht wird. Diese Form entspricht der Form des Kanalrohrs. Das Schlauchverfahren verwendet Werkstoffmischungen mit Harz. Nachdem der Inliner hier in seine Zielform gebracht wurde, wir das Harz darin je nach Materialeigenschaft kalt, warm oder durch Ultraviolettlicht ausgehärtet. Zuletzt findet immer eine Abdichtung des Inliners zum Altrohr an den beiden Enden statt (Vogel, 2007). Weiterhin können Montageverfahren als Voll- oder Teilauskleidung zum Einsatz kommen. Dabei werden die Auskleidungen an die Schadensstellen verschraubt, verschweißt oder verklebt. Als Baumaterialien werden Steinzeug, GFK, PVC, kunststoffbeschichtete Stahlprofile u. v. m. verwendet. Möglichst großflächige Bauteile vermeiden außerdem schadensanfällige Fugen. Die Montage

ist nur in begehbaren Leitungen möglich, vor allem ab DN 1500 (Jung, 1998).

Eine Erneuerung bedeutet immer eine vollständige „Auswechslung von vorhandenen Kanälen“ (Vogel, 2007, S. 110). Es wird zwischen offener und geschlossener Bauweise unterschieden. Einen Rückbau, eine Verdämmung oder gar die Zerstörung der alten Kanalsubstanz haben jedoch beide Methoden gemein. Erneuerungsverfahren werden nicht nur bei sanierungsunfähigen Schäden durchgeführt, sondern auch, wenn die Querschnittsreduzierung durch das Sanierungsverfahren nicht zulässig ist sowie keine andere Sanierungsmethode in Frage kommt, eine Sanierung technisch gar nicht möglich oder wenn sie nicht wirtschaftlich ist. Zudem kann auch eine planerische Vergrößerung der Haltung zum Neubau führen, z. B. wenn ein neues Gebiet erschlossen wird (Jung, 1998).

Das letzte Element eines Entwässerungssystems ist immer die Abwasserreinigung, z. B. in einer Kläranlage. Sie gehört allerdings nicht mehr zur Abwasserableitung. Die Reinigung findet hier über verschiedene biologische, physikalische und chemische Prozesse statt. In Deutschland werden die meisten Kläranlagen nach dem Belebtschlammverfahren betrieben. Hierbei wird das Abwasser zunächst chronologisch durch Rechen, Sandfang und Vorklärung mechanisch gereinigt. Das Ziel der mechanischen Reinigung ist die Abtrennung fester, ungelöster Bestandteile aus dem Abwasser. Der Rechen besteht aus parallelen Stäben, die je nach Stababstand entsprechende Feststoffe vom Hindurchfließen zurückhalten. Sandfang und Vorklärung finden in Absetzbecken statt, in denen die jeweiligen Fraktionen durch Sedimentation abgetrennt werden. Darauf folgt die biologische Reinigung des Abwassers. Sie wird über die biologische Aktivität des Belebtschlamms realisiert. In aeroben und anaeroben bzw. anoxischen Bioreaktoren, die entsprechend belüftet oder unbelüftet sind, werden die im Abwasser gelösten Substanzen aus Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor zersetzt. Diese Zersetzung erlaubt das Wachstum der Mikroorganismen, sodass ein Überschussschlamm entsteht. Abschließend wird das Abwasser in der Nachklärung durch Absetzungsprozesse vom Überschussschlamm getrennt. Es handelt sich schließlich nicht mehr um Abwasser, das nun in den Vorfluter abgeleitet werden kann (Förstner & Köster, 2018).

3 Technische Grundlagen

Die Anlagenkomponenten und -apparate, die in Systemen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser eingesetzt werden, können sehr unterschiedlich sein. Die physikalischen Prozesse allerdings, auf denen die meisten dieser Technologien aufbauen, sind jeweils die selben. In diesem Kapitel wird daher zunächst grundlegendes thermodynamisches Basiswissen aufgeführt, bevor jene Komponenten sowie ihre physikalischen Funktionalitäten erläutert und anschließend verschiedene ganzheitliche Systeme der AWRG und AWN vorgestellt werden.

3.1 Die Thermodynamik dahinter

Die Thermodynamik hinter den physikalischen Prozessen der Wärmeübertragung lässt sich im Wesentlichen über die thermodynamischen Hauptsätze definieren. Der Energieerhaltungssatz ist stets zu beachten. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass in einem geschlossenen System die Änderung der thermischen Energie ΔQ wie folgt in Verbindung zur Änderung der inneren Energie ΔU des Systems und zur Arbeit ΔW, die auf das System wirkt resp. die das System verrichtet, steht (Stierstadt, 2010):

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \tag{3.1}$$

wobei: U = innere Energie [J]
Q = thermische Energie [J]
W = Arbeit [J]

Eine infinitesimale Betrachtung von Gleichung 3.1 führt zu:

$$dU = dQ + dW \tag{3.2}$$

$$(m \cdot c_v \cdot dT) = (m \cdot c_p \cdot dT) + (p \cdot dV) \tag{3.3}$$

wobei: m = Masse [kg]
p = Druck [Pa]
T = Temperatur [K]
V = Volumen [m^3]
c_v = Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$]
c_p = Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$]

Mit den drei Summanden aus Gleichung 3.3 lassen sich verschiedene Zustandsänderungen berechnen, die in Tabelle 3.1 zu sehen sind. Die Wärmeübertragung selbst kann über Wärme-

leitung, Konvektion und Wärmestrahlung stattfinden. Dabei handelt es sich um verschiedene Typen des Wärmetransports.

Tabelle 3.1: Übersicht der thermodynamischen Zustandsänderungen und ihre mathematischen Zusammenhänge in Bezug auf Gleichung 3.2 (Stierstadt, 2010)

Zustandsänderung	Bedeutung	math. Zusammenhang
isochor	keine Volumenänderung	$dW = 0$
isobar	keine Druckänderung	
isotherm	keine Temperaturänderung	$dU = dQ = 0$
adiabat	kein Wärmestrom	$dQ = 0$

3.2 Wärmeübertragertechnik

Ein Wärmeübertrager erlaubt eine geregelte Übertragung thermischer Energie von einem Fluid auf ein anderes. Die beiden Fluide sind i. d. R. durch eine Austauscheroberfläche voneinander getrennt, sodass keine Vermengung der Medien stattfinden kann. Die Wärmeübertragung findet über das physikalische Prinzip der Konduktion bzw. Wärmeleitung statt (Thulukkanam, 2013). Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass der Wärmetransport über molekulare Wechselwirkungen von angrenzender Atome und Moleküle stattfindet und in Metallen zusätzlich über freie Elektronen. Das Phänomen wurde maßgeblich von Fourier im Jahr 1822 mit den Zusammenhängen der folgenden vier Gleichungen ausgeführt. Dabei kann zwischen Wärmeleitung durch eine ebene Wand (Gleichung 3.4) sowie Wärmeleitung durch ein zylindrisches Rohr (Gleichung 3.5) unterschieden werden. Die darin vorkommende Wärmeleitfähigkeit λ ist temperatur- und materialabhängig und im Allgemeinen höher für Feststoffe als für Gase. So hat bspw. Kupfer bei einer Temperatur von 0 °C mit $\lambda = 401\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ eine der höchsten Wärmeleitfähigkeiten (VDI e. V., 2013).

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \qquad \Longrightarrow \qquad \dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \tag{3.4}$$

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot 2\pi r L \cdot \frac{dT}{dr} \qquad \Longrightarrow \qquad \dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dr} \tag{3.5}$$

wobei:
- $\dot{Q}$ = Wärmestrom [W]
- $\dot{q}$ = Wärmestromdichte [$\mathrm{W\,m^{-2}}$]
- λ = Wärmeleitfähigkeit [$\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$]
- A = Wärmeübertragungsoberfläche [$\mathrm{m^2}$]
- r = Rohrradius [m]
- L = Rohrlänge [m]
- dT = Temperaturdifferenz [K]
- dx = Räumliche Koordinate normal zur Wandoberfläche [m]
- dr = Räumliche Koordinate in Radiusrichtung [m]

Vor allem in unmittelbarer Nähe der Austauscheroberfläche, die Strömungsgrenzschicht oder thermische Grenzschicht genannt wird, ist der Mechanismus der Konvektion zu beobachten. Er setzt bei fließenden Fluiden ein (im Gegensatz zu statischen Fluiden bei der Wärmeleitung) und ist in mathematischer Schreibweise in den Gleichungen 3.6 und 3.7 abgebildet. Dadurch wird der Wärmetransport hier zusätzlich zu substanzbezogenen Parametern von Fließgeschwindigkeit, Turbulenzgrad und weiteren Faktoren bedingt. Der Wärmeübergangskoeffizient α vereint all diese Parameter und ist für viele Stoffe empirisch ermittelt worden (VDI e. V., 2013).

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \tag{3.6}$$

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \tag{3.7}$$

wobei: α = Wärmeübergangskoeffizient [$\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$]

Wärmeübertrager können durch direkten und indirekten Kontakt der beiden Fluide betrieben werden. Im Rahmen dieser Arbeit finden jedoch nur die indirekten Wärmeübertrager Verwendung. Ein Beispiel für einen Wärmeübertrager mit direktem Kontakt ist ein Kühlturm, da der heiße Dampf und die kalte Luft direkt aufeinander einwirken. Der Betrieb von Wärmeübertragern kann außerdem sowohl im Gleichstrom-, Gegenstrom-, seltener auch Kreuzstromverfahren laufen. Dadurch können z. B. Effizienzen und Temperaturziele prozessbezogener Vorgaben koordiniert werden. Die Vorteile von Gleichstromwärmeübertragern liegen z. B. bei sehr viskosen oder temperaturempfindlichen Fluiden und bei Fluiden in der Nähe ihres Gefrierpunkts. Sie werden daher seltener eingesetzt. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass das Gegenstromprinzip eine höhere Effizienz und einen geringeren thermischen Stress erzielt, weil die Temperaturunterschiede der beiden Fluide an jeder Stelle der Austauscheroberfläche geringer sind als in Gleichstromwärmeübertragern (Thulukkanam, 2013).

Thulukkanam (2013) zeigt verschiedenste Bauarten an Wärmeübertragern auf. Ein Typ ist der Doppelrohrwärmeübertrager, der aus einem inneren und äußeren Rohr besteht, wie in Abbildung 3.1 zu sehen, und oft in U-Form angeordnet ist. Bei der Verbauung mehrerer bzw. vieler Innenrohre anstelle des einen spricht man von einem Rohrbündelwärmeübertrager. Sie zeichnen sich durch einen Mantel aus, in dem ein Fluid durch Leitbleche unterbrochen fließt, während sich das andere Fluid in einem Bündel von Innenrohren befindet. Sie erlauben nicht so hohe Druck- und Temperaturwerte wie der Doppelrohrwärmeübertrager, können aber aufgrund ihrer großen Formenvielfalt, ihrer guten Reparaturfähigkeit und ihrer Wartungsfreundlichkeit für industrielle Prozesse interessant sein. Unter vielen anderen Typen kann ein weiterer aufgrund seiner häufigen Verwendung vorgestellt werden: Wendelrohrwärmeübertrager haben ein Innenrohr in Wendelstruktur. Sie werden vorwiegend für Niedertemperaturflüssigkeiten eingesetzt (Thulukkanam, 2013), z.B. bei solarthermischen Kollektoranlagen.

Verunreinigungen der Austauscheroberfläche führen zu einer starken Reduzierung der Wirksamkeit der Wärmeübertragung. Aus diesem Grund werden bei Bedarf Vorrichtungen in die Wärmeübertrager eingebaut, die Verschmutzungen an der Austauscheroberfläche reinigen. Sie können nach Thulukkanam in online und offline sowie mechanisch und chemisch unterteilt

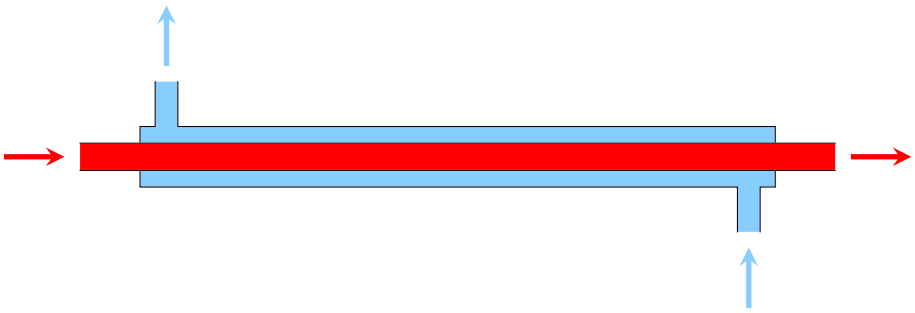


Abbildung 3.1: Schema eines Doppelrohrwärmeübertragers im Gegenstromprinzip (Quelle: Eigene Darstellung nach Thulukkanam, 2013, S. 7)

werden. Mechanische Online-Techniken sind u. a. der Einsatz von Stromschnellen bei geringen Durchflussmengen, Bürsten- und Käfigsystemen, bei denen grobe Bürsten in das Rohr eingeführt werden um von der Flüssigkeit mitgerissen zu werden, von einem Käfig aufgefangen und schließlich nach einer Umkehrung der Durchflussrichtung in den ersten Käfig zurückgeführt werden, oder Schleifkorn, das durch das Rohr getragen wird um die Verschmutzung abzutragen. Die Vorteile liegen darin, dass der Prozess nicht unterbrochen werden muss, die Installation einfacher ist und die Wartungshäufigkeit sinkt. Die Anschaffung und Installation ist allerdings teurer. Im Gegensatz dazu kann die mechanische Offline-Reinigung durch Hochdruckwasserspritzen auf Außenflächen, den Einsatz von langen Bürsten, wie man sie aus dem Haushalt kennt, oder das Abschießen von Projektilen mit ca. 1,3 MPa bis 2,0 MPa und 3 m s^{-1} bis 6 m s^{-1} zum Abschaben der Verschmutzungsschichten erfolgen. Bei all diesen mechanischen Verfahren ist die Möglichkeit der (teilweisen) Beschädigung von Oberflächen oder Rohren möglich und zu berücksichtigen. Sie müssen daher mit der Anlage abgestimmt werden. Chemische Verfahren wiederum haben eine breite Palette wie etwa die Säure- und Dampfphasenreinigung. Sie sind mit vertretbarem Aufwand, völlig gleichmäßigen Ergebnissen durchführbar. Außerdem gelangen sie an für mechanische Verfahren möglicherweise unerreichbare Stellen. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr von gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf Mensch und Material, z. B. in Form von Belastungen. Letztlich hängt die Wahl des Reinigungssystems von den Gegebenheiten der Anlage ab (Thulukkanam, 2013).

Für die Berechnung des Wärmetransports im Wärmeübertrager kann nach Thulukkanam (2013) Gleichung 3.8 herangezogen werden.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m = \frac{1}{R_0} \cdot \Delta T_m \tag{3.8}$$

wobei: k = Wärmedurchgangskoeffizient [W m^{-2} K^{-1}]
ΔT_m = Mittlere Temperaturdifferenz [K]
R_0 = Gesamtwärmedurchgangswiderstand [m^2 K W^{-1}]

Bei genauer Betrachtung ist ersichtlich, dass die gesamte Wärmeleitfähigkeit kA reziprok zum Gesamtwärmedurchgangswiderstand R_0 ist. Dieser ist wiederum die Summe aller einzelnen Wärmedurchgangswiderstände aus der laminaren Grenzschicht der Fluide, der eventuellen

Schmutzschichten an der Austauscheroberfläche und des Materials der Austauscheroberfläche selbst. Mit Blick auf das Fluid wird der Wärmetransport mit der folgenden Gleichung 3.9 berechnet (Thulukkanam, 2013).

$$\dot{Q} = C_h \cdot \left(T_{h,i} - T_{h,o}\right) = C_c \cdot \left(T_{c,i} - T_{c,o}\right) \tag{3.9}$$

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot \left(T_{h,i} - T_{c,o}\right) \tag{3.10}$$

wobei: $\dot{Q}$ und $\dot{Q}_{max}$ = (Maximaler) Wärmestrom [W]
C_h und C_c = Wärmekapazität des kalten (c) und heißen (h) Fluids [W K^{-1}]
$T_{h,i}$ und $T_{h,o}$ = Heiße (h) input (i) und output (o) Fluidendtemperaturen [K]
$T_{c,i}$ und $T_{c,o}$ = Kalte (c) input (i) und output (o) Fluidendtemperaturen [K]

Für Wärmeübertrager gibt es keinen Wirkungsgrad, stattdessen spricht man von der Effektivität ε. Gleichung 3.10 wird von der Effektivität ε wie folgt beeinflusst:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot \left(T_{h,i} - T_{c,o}\right) \tag{3.11}$$

wobei: ε = Effektivität [–]

Zur Berechnung der Effektivität ε gibt es verschiedene Methoden. In den kommenden Zeilen wird die ε-NTU-Methode auf Basis der Informationen von Thulukkanam (2013) vorgestellt. NTU steht für Anzahl der Übertragungseinheiten (number of transfer units). Die Effektivität ε ist dimensionslos und eine Funktion ϕ in Abhängigkeit von den drei Variablen $NTU = \begin{cases} \frac{k \cdot A}{C_{min}}, & \text{für } k = const. \\ \frac{1}{C_{min}} \int_A k \cdot dA, & \text{für } k \neq const. \end{cases}$, Wärmekapazitätsverhältnis $C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \leq 1$ und Fließverhalten (vgl. Gleichung 3.12).

$$\varepsilon = \phi\left(NTU, C^*, \text{Fließverhalten}\right) \tag{3.12}$$

Eine Vereinfachung der Funktion ϕ führt zu folgender Gleichung 3.13. Es ist ersichtlich, dass die Effektivität eines Wärmeübertragers das „Verhältnis des tatsächlichen Wärmestroms [...] zum thermodynamisch möglichen maximalen Wärmestrom“ (vgl. Thulukkanam, 2013, S. 43) ist.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{C_h \cdot \left(T_{h,i} - T_{h,o}\right)}{C_{min} \cdot \left(T_{h,i} - T_{c,i}\right)} = \frac{C_c \cdot \left(T_{c,i} - T_{c,o}\right)}{C_{min} \cdot \left(T_{h,i} - T_{c,i}\right)} \tag{3.13}$$

Eine tiefergehende Behandlung über verschiedene Ausführungen von Wärmeübertragern ist in Kapitel 3.4 zu lesen.

3.3 Wärmepumpentechnik

Eine Wärmepumpe ermöglicht den Wärmetransport von einem kalten zu einem warmen Fluid, „also entgegen der Tendenz des zweiten [thermodynamischen] Hauptsatzes“ (Stierstadt,

2010, S. 252). Dieser Prozess benötigt jedoch einen Energieaufwand, der in die Wärmepumpe mobilisiert werden muss. In der Bilanz stimmen dann auch wieder die physikalischen Gesetze der Thermodynamik und der Energieerhaltungssatz. Die aufgewendete Energie kann z. B. aus der Verbrennung von Gas oder durch elektrischen Strom selbst generiert werden. Ebenso benötigt der Prozess ein Umweltmedium, dem seine Wärmeenergie entzogen wird. Dafür können die Außenluft, das Erdreich oder auch ganz andere Wärmequellen eingesetzt werden. Das Umweltmedium dient also als Wärmequelle. Weiterhin kommt ein Arbeitsmittel zum Einsatz, für das in der Praxis verschiedene Kältemittel zur Verfügung stehen (R. Müller, 2016). Die Relation zwischen der Energie des Umweltmediums und der aufzubringenden Energie ist letztlich anwendungsspezifisch, aber immer sehr hoch. Ein exemplarisches Verhältnis des Energieflusses einer Wärmepumpe ist innerhalb Abbildung 3.2 visualisiert.

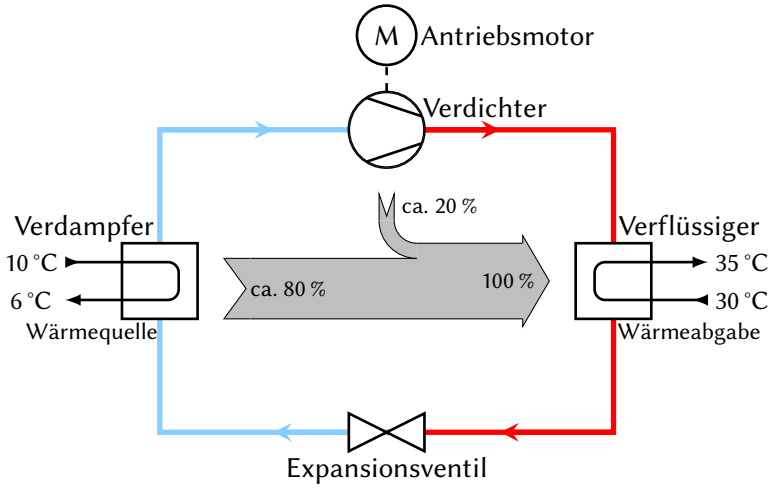


Abbildung 3.2: Schema, Komponenten und Energiefluss einer Wärmepumpe (Quelle: Eigene Darstellung nach Bonin, 2012, S. 10)

Die Komponenten einer Wärmepumpe, die diesen Wärmetransport ermöglichen, sind schematisch in Abbildung 3.2 gezeigt. Im darin abgebildeten Kreislauf wird das Kältemittel herumgeführt, dessen thermodynamische Zustände in den jeweiligen Komponenten verändert und genutzt werden. Der Kompressor bzw. Verdichter, der von einem Antriebsmotor betrieben wird, komprimiert das gasförmige Kältemittel adiabatisch. Bei diesem Prozess wird das Temperatur- und Druckniveau des Kältemittels angehoben. An dieser Stelle gelangt über den Antriebsmotor auch der Energieaufwand in den Kreislauf der Wärmepumpe. In der nächsten Komponente wird das Kältemittel isobar verflüssigt. Es ändert also seinen Aggregatzustand ohne eine Druckveränderung. Hierbei wird allerdings die Kondensationswärme freigesetzt, die wiederum über einen Wärmetauscher an das Zielmedium abgegeben wird. Anschließend sorgt das Expansionsventil für eine starke Temperatur- und Druckabnahme des Kältemittels. Je nach Kältemittel findet die Druckabnahme von bspw. 15 bar auf 4 bar statt, also einer sehr großen Differenz. Der Verdampfer sorgt für eine isobare und isotherme Aggregatzustandsänderung des Kältemittels, indem es über einen Wärmetauscher Wärmeenergie des Umweltmediums aufnimmt. Es ist nun wieder gasförmig und gelangt an den Anfang des Kreislaufs. Die beiden

verbauten Wärmetauscher, also der Verflüssiger und der Verdampfer, sind dementsprechend der Angelpunkt im Betrieb von Wärmepumpen: Hier findet letztlich die Wärmeübertragung statt, von einem kalten Umweltmedium auf ein warmes Zielmedium entgegengesetzt der natürlichen Wärmeübertragungsrichtung (Bonin, 2012; Stierstadt, 2010).

Die im oberen Abschnitt erläuterten Prozesse in einer Wärmepumpe basieren auf einem Kreisprozess, der Carnot-Prozess genannt wird. Das Arbeitsmittel ist am Ende des thermodynamischen Kreisprozesses nämlich wieder im Ursprungszustand. Jeder der vier Umwandlungsschritte des Arbeitsmittels wird dabei als ein reversibler Prozess betrachtet. Auf diese Weise lassen sich alle vier Umwandlungsprozesse berechnen (R. Müller, 2016).

Ähnlich wie bei Wärmeübertragern gibt es auch für Wärmepumpen keinen Wirkungsgrad in dem Sinne. Ein Vergleich unterschiedlicher Modelle kann hier über die Leistungszahl ϵ bzw. den Coefficient of Performance (COP) gemacht werden, wie sie in Gleichung 3.14 definiert sind (R. Müller, 2016).

$$\epsilon = \mathrm{COP} = \frac{|Q_H|}{W} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)^{-1} \tag{3.14}$$

wobei: ϵ = Leistungszahl [–]
COP = Coefficient of Performance [–]
Q_H = Von der Wärmepumpe abgebende Wärmeenergie [J]
W = Betriebsnotwendiger Energieaufwand [J]
T_c = Temperatur des kalten (c) Umweltmediums [K]
T_h = Temperatur des heißen (h) Zielmediums [K]

Anlagenbezogen findet ferner auch die Jahresarbeitszahl (JAZ) β als vergleichbare Effizienzgröße von Wärmepumpen Verwendung. Sie ist nach Bonin (2012) als das Verhältnis des Jahreswärmebedarfs der Wärmeabnehmer (z. B. ein Wohnhaus) zum Energieaufwand für den Betrieb der Heizungsanlage (inkl. Sensoren, Regler, Pumpen, etc.) wie in Gleichung 3.15 definiert. Somit ist sie aber auch immer eine Maßzahl, die nicht für eine spezifische Wärmepumpe gilt, sondern für die gesamte technische Heizanlage in Bezug auf ihre Wärmeabnehmer.

$$\beta = \frac{Q}{E} \tag{3.15}$$

wobei: β = Jahresarbeitszahl [–]
Q = Jahreswärmebedarf des Gebäudes [kW h a^{-1}]
E = Jahresenergieverbrauch aller elektronischen Komponenten [kW h a^{-1}]

Im Vergleich zu konventionellen (Wärme-) Energieerzeugern heben sich Wärmepumpen vor allem durch ihren nachhaltigeren Betrieb hervor. Diesbezüglich stellt sich nun allerdings die Frage, wie nachhaltig Wärmepumpenanlagen denn sind. Um diese beantworten zu können, kann man sich ihre Primärenergiebilanz anschauen. Primärenergie bezeichnet die Energiemenge, die ein Energieträger vor seiner technischen Nutzung beinhaltet (BDEW, 2020). Für Erdgas entspräche das dann dem chemischen Energiegehalt von Methan. Bei Wärmepumpen

jedoch gehen 70 % bis 80 % der Nutzenergie aus dem Umweltmedium hervor, die bei dieser Bilanzierung wegfallen. Lediglich für die aufzuwendende Energie, die der Antriebsmotor der Wärmepumpe zum Betrieb benötigt, kann die Primärenergie berechnet werden. Das wird vom eingesetzten Energieträger und seiner Nutzbarmachung, z. B. in einem Kraftwerk, bedingt. Der Wirkungsgrad des eingesetzten Kraftwerkstyps dient dazu als Kenngröße. Darüber hinaus ist die JAZ der Wärmepumpenanlage maßgeblich. Nimmt man auf dieser Grundlage also bspw. ein Kohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 35\,\%$ und eine Wärmepumpe mit einer JAZ von $\beta = 3,8$, so können aus 7519 kW h Primärenergie insgesamt 10 000 kW h Nutzenergie erzeugt werden. Diese Werte sind in der Bilanz positiv. Daher kann in diesem Beispiel von einem wirtschaftlichen Betrieb ausgegangen werden. Im Allgemeinen geht man bei Wärmepumpen ab einer JAZ von $\beta \geq 3$ von einer positiven Bilanz aus (R. Müller, 2016). Die Treibhausgasemissionen von Energieerzeugungsanlagen sind ein ebenso wichtiger Faktor zur Quantifizierung ihrer Nachhaltigkeit. Styczynski et al. (2014) zeigen aber auch hier, dass Wärmepumpen grundsätzlich deutlich weniger emittieren als ihre konventionellen Konkurrenten der fossilen Wärme wie Heiz- und Brennwertkessel mit Erdgas und Heizöl. Weil dieser Vergleich allerdings auf dem Bezug des allgemeinen deutschen Strommix für die Wärmepumpen basiert, ist von einem noch wesentlich größerem Unterschied auszugehen, sollte stattdessen erneuerbar produzierter Strom bezogen werden (Styczynski et al., 2014). Diese Annahme bekräftigt der BDEW (2020) in seiner Auflistung der PEF für verschiedene Energieträger nach Anlage 4 GEG. Demnach haben sowohl Umgebungswärme als auch gebäudenah erzeugter Strom aus Photovoltaik oder Windkraft einen PEF von $f_{\mathrm{PE}} = 0,0$ (BDEW, 2020). Insofern gälte eine Wärmepumpenanlage in dieser Konstellation aus gesetzlicher Sicht als vollständig emissionsfrei.

3.4 Anlagen der Abwasserwärmenutzung

Die Wärmerückgewinnung aus Abwasser kann grundsätzlich an drei Stellen im Entwässerungssystem stattfinden: In den Haushalten bzw. ihren Einleitstellen in die Kanalisation, im Kanalnetz selbst und in den Kläranlagen; hier vor allem über Biogasproduktion und Schlammverbrennung (Frijns et al., 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die zweitgenannte Stelle, die Kanalisation, betrachtet. Das Merkblatt DWA-M 114 setzt für diese Thematik substanzielle Grundlagen, Aspekte sowie Vorgaben und sollte daher in jedem Anwendungsfall herangezogen werden.

Ganzheitliche Anlagen der AWN bestehen aus kombinierten Wärmeübertragern und Wärmepumpen. Ihre Funktionsweisen wurden in den vorigen beiden Kapiteln 3.2 und 3.3 angeführt. Das Zusammenwirken dieser zwei Komponenten innerhalb eines integrierten Wärmeversorgungskonzepts wird in den kommenden Paragraphen vorgestellt.

Für solche Wärmeversorgungskonzepte, die in dieser Arbeit nun also betrachtet werden, dient das Abwasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Es ist das Umweltmedium, dem seine Wärmeenergie entzogen wird. Allerdings kann es aufgrund seiner inhomogenen Zusammensetzung nicht als direkter Vorlauf einer Wärmepumpe dienen. Nur vereinzelt werden inzwischen darauf spezialisierte Wärmepumpen eingesetzt, die mit unbehandeltem Abwasser umgehen

können (Ziegler, 2011); das ist jedoch nicht der Regelfall. Zusätzlich gibt es räumliche Barrieren, da die Kanalisation im Regelfall im Erdboden verläuft. Aus diesen Gründen werden die Fluide des Entwässerungssystems und des Heizkreislaufs über einen Wärmeübertrager hydraulisch voneinander getrennt. Man spricht von der Wärmegewinnungsanlage, die mittels Wärmeübertrager die im Abwasser befindliche Wärme rückgewinnt, und von der Wärmenutzungsanlage, die diese wiederum nutzbar macht. Gemeinsam ergeben sie die Abwasserwärmenutzungsanlage. Ein Schema solch einer Anlage ist in Abbildung 3.3 zu finden. Für die Wärmenutzungsanlage, die im Anlagenkontext häufig Heizzentrale genannt wird, sind verschiedene Konfigurationen und Betriebsweisen möglich. Eine monovalente Wärmepumpe in der Heizzentrale sorgt als einzige Komponente für die Wärmeversorgung. Sie muss entsprechend hoch dimensioniert werden, sodass keine Versorgungslücken entstehen können. Dahingegen ist im bivalenten Betrieb zusätzlich mindestens eine weitere Wärmeerzeugungskomponente in der Heizzentrale vorhanden, die Spitzenlasten abfedern soll. In der Regel sind dies konventionelle Heizkessel, die mit Gas oder Öl betrieben werden, oder Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wie etwa ein Blockheizkraftwerk (BHKW) (Merkblatt DWA-M 114).

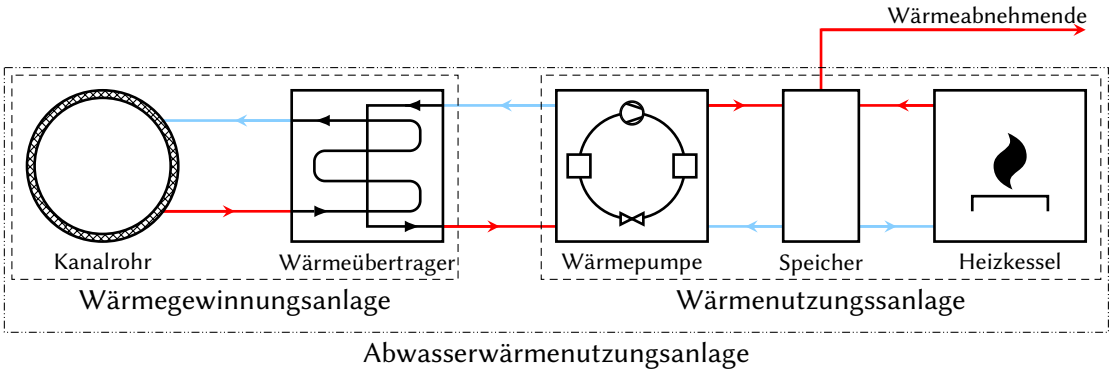


Abbildung 3.3: Beispielhaftes Schema einer Abwasserwärmenutzungsanlage (Quelle: Eigene Darstellung nach Merkblatt DWA-M 114, S. 15)

Die Wärmeabnahme bei der AWN ist nicht direkt auf Gebäude beschränkt. Die Technologie kann auch in Nah- und Fernwärmenetze integriert werden. Dies gilt sowohl für Nieder- als auch Hochtemperaturnetze, weil entsprechende Anlagen Einspeisetemperaturen von 80 °C bis 90 °C erreichen können. Bei der Einbindung müssen von planerischer Seite aus Vorprüfungen bzgl. der Netzhydraulik durchgeführt werden, da erhöhte Anforderungen durch Druck- und Strömungsveränderungen auftreten können (Stark et al., 2020). Als dezentrale Wärmequelle ergeben sich allgemein drei Möglichkeiten für die Integration in das Wärmenetz: Vom Rücklauf in den Vorlauf, von Rücklauf auf Rücklauf sowie von Vorlauf zu Vorlauf. Auch wenn sich durch grundsätzlich gute Bedingungen die erstgenannte Variante oft bewährt, besteht ebenso die Möglichkeit einer Rücklaufanhebung durch die AWN-Anlage. Dies entspricht dann der zweitgenannten Variante, einer Einspeisung in den Rücklauf des Wärmenetzes. Berücksichtigt werden sollte die Möglichkeit, wenn auch einzelne Wärmeabnehmer vom Rücklauf versorgt werden (Basciotti et al., 2017).

Für die AWRG-Anlage lässt sich der Einbau des Wärmeübertragers an zwei Stellen umsetzen:

Im Hauptstrom der Kanalisation und im Nebenstrom, einer separat gebauten Umgehungsleitung (Bypass). Beide Konfigurationen bieten inzwischen eine ausreichende Produktpalette verschiedener Hersteller. Die Wärmeübertrager im Hauptstrom können sowohl in der Kanalrohrwand integriert sein als auch in die Abflussrinne eingelegt sein. Dabei sind die integrierten Wärmeübertrager aus Chromstahlrohren in der Betonsohle eingebettet. Diese Rohrwärmeübertrager zeichnen sich durch suboptimale Wärmedurchgangswerte aus. Rinnenwärmeübertrager dagegen kennzeichnen sich durch bessere Werte, weil in die Sohle zusätzlich Edelstahlbleche eingelassen sind, die die Wärmeübertragung fördern. Zweifellos eignen sich die im Abwasserrohr integrierten Wärmeübertrager lediglich für den Kanalneubau bei neu zu erschließenden Einzugsgebieten oder infolge eines Erneuerungsverfahrens. Eine Nachrüstung ist nicht möglich. Bei in die Abflussrinne eingelegten Wärmeübertragern hingegen ist ein nachträglicher Einbau in Bestandsrohre möglich bzw. oftmals sogar vorgesehen. Sie werden als Einzelmodule in das Kanalrohr eingebracht und anschließend montiert sowie aneinander gekoppelt. Dadurch ist das System beliebig zu erweitern und auszutauschen sowie äußerst wartungsfreundlich. Der Betrieb ist immer mit einer Verringerung des Kanalquerschnitts verbunden, die wiederum die Hydraulik beeinflusst – Vorprüfungen sind notwendig. Sie werden genauso als Rinnenwärmeübertrager bezeichnet. In der Regel bieten alle Hersteller ihre Hauptstromwärmeübertrager auch als Varianten an, die in Druckentwässerungssystemen einsetzbar sind, dort werden allerdings bevorzugt Bypass-Lösungen angewendet (Hamann, 2015). Die mittlere Lebensdauer von Wärmeübertragern im Kanalrohr liegt bei etwa 30 bis 50 Jahren und ihr Einbau dauert je nach Dimensionierung ein bis zehn Tage (Buri & Kobel, 2005).

Im Bypass wird die AWRG vom eigentlichen Kanalbetrieb getrennt. Eine Förderpumpe beschickt die AWN-Anlage mit Abwasser, das zuvor gerecht bzw. gesiebt wurde. Das ermöglicht die Verwendung von normalen Wärmeübertragern aus der Industrie anstelle von hochspezialisierten, an das spezifische Kanalrohr angepassten. Hamann (2015) führt beispielhaft einen Doppelrohr- oder Rohrbündelwärmeübertrager an. Dieser befindet sich gemeinsam mit der Wärmepumpe in der Heizzentrale, die oberirdisch leicht zugänglich ist. Eine Wartung ist ohne den Einstieg in die Haltung möglich. Außerdem kann der Volumenstrom im Bypass von der Förderpumpe auf einem konstanten Niveau gehalten werden, sodass die Wärmeleistung der Anlage gleichförmiger ist. Gleichzeitig wird allerdings zusätzlicher Platz für den Zugangs- und Förderschacht sowie für den Wärmeübertrager in der Heizzentrale benötigt, der nun nicht mehr im Kanalrohr ist. Die Entsorgung des Rechen- bzw. Siebguts muss beachtet werden (Hamann, 2015); eine Rückgabe in die Kanalisation gemeinsam mit dem wärmeentzogenem Abwasser ist hierfür aber ein angewendetes Verfahren (HUBER SE, 2022).

In Abbildung 3.4 sind eine Vielzahl an Wärmeübertragern zu sehen, die alle für die AWRG konzipiert sind. Besonders erwähnenswert ist Unterabbildung (h). Sie zeigt ein PE-Rohr der FRANK GmbH, um das eine Art Wendelwärmetauscher gewickelt ist. Auf diese Weise wird nicht nur die im Abwasser enthaltene Wärmeenergie aufgenommen, sondern ebenso im Erdboden gespeicherte Geothermie (FRANK GmbH, 2021).

Die Zusammensetzung von Abwasser und seine Inhaltsstoffe sind durch die entsprechenden Abschnitte in Kapitel 2.3 bekannt. Diese Heterogenität wirkt sich auf die Oberfläche von Ka-

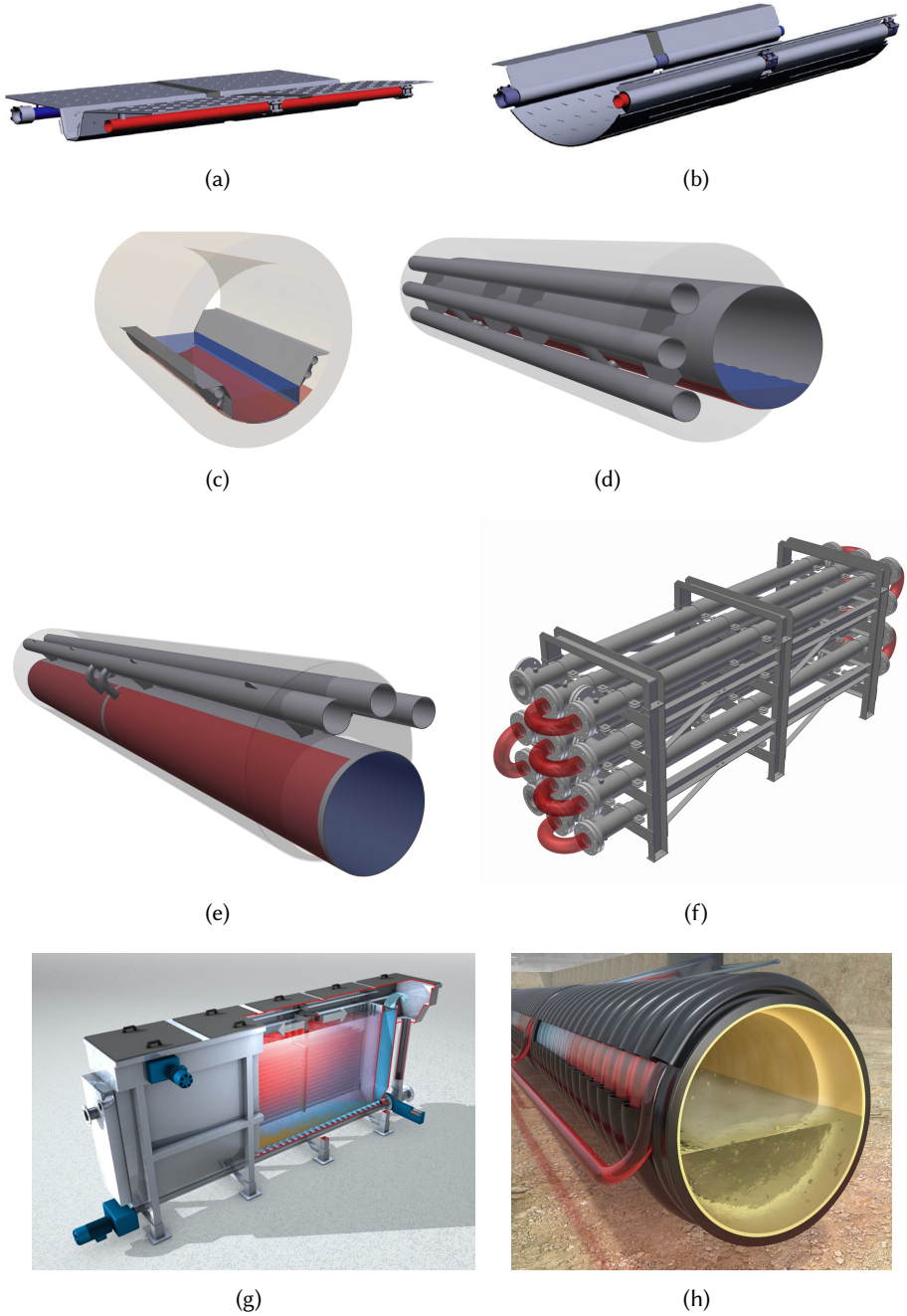


Abbildung 3.4: Übersicht verschiedener Wärmeübertrager in der AWRG, (a): Rinnenwärmeübertrager Therm-Liner Form A von Uhrig, (b): Rinnenwärmeübertrager Therm-Liner Form B von Uhrig, (c): Rinnenwärmeübertrager KASAGSewer von KASAG, (d): Rohrwärmeübertrager KASAGGrafitytube von KASAG, (e): Rohrwärmeübertrager für Druckentwässerungrohre KASAGPressurepipe von KASAG, (f): externer Doppelrohrwärmeübertrager KASAGDouble von KASAG, (g): externer Abwasserwärmetauscher RoWin von HUBER, (h): Rohrwärmeübertrager PKS-Thermpipe® von FRANK (Quelle: FRANK GmbH, 2021; Helmut Uhrig Straßen- und Tiefbau GmbH, 2022; HUBER SE, 2022; KASAG Swiss AG, 2022)

nalrohren aus und somit auch auf die von Wärmeübertragern. Ein Biofilm bzw. eine Sielhaut entsteht durch die Ansiedlung von Mikroorganismen angesichts ihres Zuwachses, den die im

Abwasser gelösten Nährstoffe beschleunigen. Doch auch die ungelösten Feststoffe führen zu Ablagerungen auf der Oberfläche des Wärmeübertragers. Aus Kapitel 3.3 ist bekannt, dass die Unbeschmutztheit der Austauscheroberfläche aber entscheidend ist für den Wärmedurchgang in einem Wärmeübertrager. An dieser Stelle sind auch verschiedene Reinigungsverfahren vorgestellt. Unterstützend zu in Wärmeübertragern integrierten Reinigungsmechanismen können Vorfiltrationen mithilfe von Siebfiltern, Beutelfiltern, Quarzsandfiltern oder Bernoullifiltern dienen, für die es wiederum automatisierte Selbstreinigungen gibt. Die Reinigungsintervalle der Wärmeübertrager lassen sich mit den Vorfiltrationen verlängern. Eine Vorfiltration ist allerdings nur im Bypass umsetzbar. Für Rinnenwärmeübertrager gibt es außer der Oberflächendesinfektion keine weiteren Präventivmaßnahmen. Es bedarf also einer regelmäßigen Reinigung, die wesentlich häufiger durchgeführt werden muss als die reguläre Kanalreinigung im Rahmen der vorgesehenen Wartungsarbeiten. Im Praxisfall ist das z. B. mit mechanischen Verfahren oder als Hochdruckspülung bzw. Schwallspülung bis zu ein Mal pro Monat umsetzbar. Allgemein wird der Einbau messtechnischer Vorrichtungen empfohlen. Mit ihnen lassen sich für die Wärmeübertrager Einbrüche im Wärmedurchgang oder zu geringe Temperaturdifferenzen bzw. Druckabfälle zwischen Vor- und Rücklauf detektieren, sodass zeitnah auf die Verschmutzungen reagiert werden kann (Wanner, 2009).

Die Kernaufgaben des Kanalbetriebs und der Kläranlagen dürfen von AWRG-Anlagen nicht negativ beeinträchtigt werden. Die AWN hat diesbezüglich zu jedem Zeitpunkt eine untergeordnete Priorität. Der ungestörte Abwasserabfluss darf durch Einbauten wie Wärmeübertrager oder eine zu hohe Abwasserumleitung in einen Bypass nicht behindert werden. Auch gehört die Verhinderung einer zu großen Abkühlung des Abwassers dazu. Die Mindesttemperatur für die biologische Aktivität in den Kläranlagen, insbesondere beim Abbau von Ammonium-Stickstoff, darf nicht unterschritten werden; sie liegt bei 12 °C (Merkblatt DWA-M 114). Gleichzeitig nimmt das Abwasser im weiteren Verlauf der Kanalisation durch Haushaltszuflüsse, Abwasserzusammenflüsse mit anderen Einzugsgebieten und durch das Erdreich wieder in seiner Temperatur zu, sodass eine zu große Wärmeentnahme je nach Distanz zwischen Entnahmestelle und Kläranlage unwahrscheinlich ist. Die Temperatur des Erdreichs liegt im Winter bei etwa 8 °C bis 12 °C (Buri & Kobel, 2005).

4 Methodik

Der strategische Planungsansatz, von dem im Titel dieser Arbeit zu lesen ist, soll eine Raumanalyse für die Stadt Bremen umfassen. Diese hat zum Ziel in Form von Kartenmaterial mit potentiellen Nutzungsschwerpunkten die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit aus Kapitel 1.2 zu beantworten, die da lautet: „Wo ist die Installation einer Anlage zur Rückgewinnung und Nutzung von Abwasserwärme in der Stadt Bremen energetisch und strategisch sinnvoll?“. In dem Zusammenhang dienen die kommenden Abschnitte der Methodenvorstellung. Eine erste Übersicht in Abbildung 4.1 zeigt, dass die Raumanalyse eine AWN-Potentialkarte zum Ziel hat – bzw. je eine Karte in Bezug auf Haltungen und in Bezug auf Gebäude. Es sollen nicht nur allgemein geeignete Haltungen und Gebäude als Wärmeabnehmer ermittelt werden, sondern mithilfe von definierten Potentialklassen auch entsprechende Eignungsstufen ersichtlich sein. Somit kann man im Rahmen dieser Arbeit von einer räumlich dedizierten Nutzwertanalyse sprechen. Zunächst wird nun also der für die Analyse erforderliche Modellierungsansatz vorgestellt sowie erklärt, wie die notwendigen (georeferenzierten) Daten akquiriert werden.

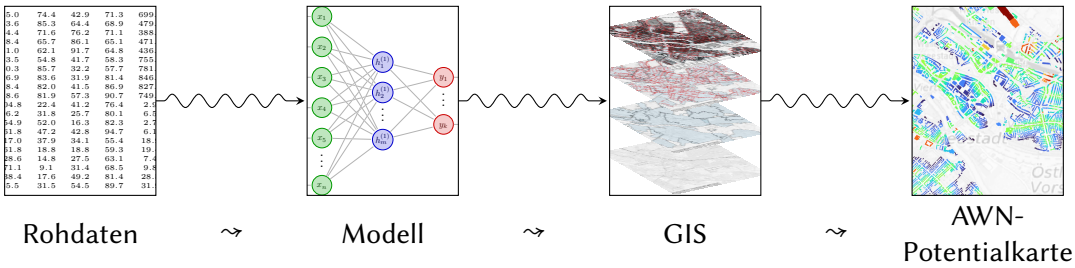


Abbildung 4.1: Methodisches Vorgehen (Quelle: Eigene Darstellung)

4.1 Modellansatz

Es ist davon auszugehen, dass die Eignung eines Standorts bzw. einer Lokalität für eine AWN-Anlage von verschiedensten Umständen bedingt wird. Grundsätzlich können diese Einflussfaktoren aber natürlich definiert und dann durch ihre gegenseitigen Vernetzungen in ein Modell abstrahiert werden, sodass nach diesem Schema eine Raumanalyse durchgeführt werden kann. Die Einflussfaktoren, nachfolgend Parameter genannt, sind vor dem thematischen Hintergrund in drei Relationen kategorisiert: Parameter beziehend auf die Liegenschaft, auf die Kanalleitung bzw. die Haltung und auf das Abwasser.

Die Liegenschaft bezeichnet im vorliegenden Kontext ein Gebäude unmaßgeblich seiner Nutzung. Sie stellen sich in ihrer Funktion als Wärmeabnehmende dar und bekommen in der

hiesigen Betrachtung die notwendige Heizzentrale der AWN-Anlage auf ihr Flurstück platziert. Bolle (2013) hebt hervor, dass ihre Entfernung zur Haltung einen wesentlichen Einfluss auf die Eignung der Anlage hat. Zwischen Heizzentrale und Wärmeübertrager in der Haltung dient eine Verbindungsleitung zur Beförderung der Wärmeenergie, dessen Länge und Zugänglichkeit in Bezug auf die Standortgeographie bzw. Bebauungsdichte die Baukosten bestimmen. Darüber hinaus ist mit einem Wärmeverlust zu rechnen, der sich proportional zur Länge der Verbindungsleitung verhält. Im urbanen Umfeld empfiehlt sich eine Entfernung von maximal 150 m bis 300 m (Merkblatt DWA-M 114). Der Wärmebedarf vonseiten der Liegenschaft sollte für einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe ganzjährig konstant sein und mindestens 100 kW betragen. Das entspricht in etwa 20 Wohneinheiten. Eine hohe Bebauungsdichte beeinflusst an dieser Stelle also in positiver Richtung (E. A. Müller et al., 2009). „Mehrfamilienhäuser und Wohnsiedlungen, Verwaltungsgebäude, Gewerbe- und Industriebauten, Schulhäuser und Heime, Sportanlagen und Schwimmbäder“ werden als geeignete Standorte genannt, nicht jedoch „einzelne Einfamilienhäuser sowie gewerbliche und industrielle Anwendungen, die hohe Temperaturen erfordern“ (E. A. Müller et al., 2009, S. 8). Demzufolge ist die Nutzungsart des Gebäudes ein weiterer relevanter Parameter. Im Kontrast zu den von E. A. Müller et al. (2009) genannten Industriebauten als geeignete Gebäudeart weist andere Literatur auf gegenteiliges hin. Laut E. A. Müller und Schmid (2005) kann Prozesswärme nicht gut von AWN-Anlagen angeboten werden. Im Industriesektor ist der Bedarf an Prozesswärme allerdings besonders hoch (Bauernhansl, 2014).

In Bezug auf eine Haltung ist ihre gute Zugänglichkeit nicht nur für den Einbau sondern auch für die während des Betriebs regelmäßig durchzuführenden Wartungsarbeiten obligat. Dieses Charakteristikum korreliert mit einem grundsätzlich ausreichenden Kanalquerschnitt. In der Literatur ist von Haltungen mit einem Querschnitt ab bspw. DN 800 zu lesen, darunter werden Anlagen im Bypass empfohlen. Schmutz- und Mischwasserkanäle eignen sich im Gegensatz zu Regenwasserkanälen des Trennsystems (Bolle, 2013). Die Zugänglichkeit einer Haltung steht im Rahmen dieser Arbeit also einerseits für die Standortgeographie bzw. Bebauungsdichte wie im obigen Paragraphen erwähnt, andererseits aber auch für ihre Begehbarkeit in Hinblick auf Nennweite und Schachtzugänge. Das Kanalgefälle der Haltung sollte zwischen 1 ‰ und 10 ‰ liegen (Hamann, 2015), während die lichte Höhe mindestens 1 m betragen sollte (Merkblatt DWA-M 114), damit der Erdboden als energetischer Pufferspeicher dienen kann. Gleichzeitig erschwert eine zu große Verlegungstiefe und ein kurvenreicher Kanalverlauf die baulichen Arbeiten (E. A. Müller & Schmid, 2005; E. A. Müller et al., 2009). Laut Hamann (2015, S. 29) führe ein der Wärmeentnahmestelle vorgelagertes Einzugsgebiet von mindestens 3000 EW bis 5000 EW zu grundsätzlich interessanten Standorten. Dieser Aspekt geht mit der Bebauungsdichte wie auch mit verschiedenen auf das Abwasser bezugnehmenden Parametern einher.

Diese sind ein ausreichender Abwasserdurchfluss von mindestens 10 $L\,s^{-1}$ bis 15 $L\,s^{-1}$ sowie eine Fließgeschwindigkeit von 0,2 $m\,s^{-1}$ bis 0,8 $m\,s^{-1}$ (Hamann, 2015). Diese beiden Parameter werden laut Buri und Kobel (2005) in der Praxis bei Haltungen ab DN 800 erfüllt. Dadurch „verfügen sie in der Regel über ein ausreichendes Wärmeangebot im Abwasser“ (Buri & Kobel, 2005, S. 14). Schließlich ist die Abwassertemperatur eine der elementarsten Parameter in der

Frage zur Standorteignung. Der entsprechende Abschnitt in Unterkapitel 2.3 in Verbindung mit den physikalischen Ausarbeitungen in Kapitel 3 hat die Zusammenhänge bereits hinreichend erläutert. E. A. Müller et al. (2009, S. 9) formulieren es wie folgt: „Eine hohe Temperatur des Abwassers erlaubt eine große Abkühlung und damit einen großen Energieentzug“. Wie allerdings schon erwähnt darf die Abwassertemperatur im Zulauf der Kläranlage 12 °C nicht unterschreiten (Merkblatt DWA-M 114).

Synergieeffekte bestehen bei einer zeitnah geplanten Sanierung der Heizzentrale und einer zeitnah geplanten Kanalsanierung (E. A. Müller et al., 2009). In Unterkapitel 3.4 wurde bereits aufgeführt, dass die aus dem Abwasser rückgewonnene Wärme auch in Nah- und Fernwärmenetze eingespeist werden kann. Somit ist auch das Vorhandensein eines Wärmenetzes ein zu berücksichtigender Parameter (Bolle, 2013). Ankerkunden können in der Rolle als Versorgungszentren im lokalen Direktumfeld neue Wärmenetze mitaufbauen (HIC Hamburg Institut Consulting GmbH, 2021) und aus diesem Grund gesondert berücksichtigt werden. Alle genannten Einflussfaktoren sind in Tabelle 4.1 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 4.1: Übersicht und Kategorisierung aller relevanten Parameter für Anlagen der Abwasserwärmenutzung

Nexus	Parameter	Quelle
Liegenschaft	Entfernung zur Kanalleitung (z. B. bis 200 m)	a, b, d, e, f
	Bebauungsdichte vor Ort	a, d, e
	konstanter Wärmebedarf vor Ort (z. B. ab 100 kW)	d, e
	tiefe Nutzungstemperaturen bei Wärmeabnehmern	d, e
	Gebäudenutzungsart	d, e
	zeitnah geplante Sanierung der Heizzentrale	a, d, e
Haltung	Zugänglichkeit des Kanals	a, b, d, e
	ausreichender Kanalquerschnitt (z. B. ab DN 800)	a, b, d, e, f
	Haltungslänge (z. B. min. 20 m)	c
	möglichst geradliniger Kanalabschnitt	d
	Kanalgefälle (1 ‰ bis 10 ‰)	a
	lichte Höhe min. 1 m, gleichzeitig nicht zu tief	e, f
	vorgelagertes Einzugsgebiet von min. 3000 EW bis 5000 EW	a
	Vorhandensein eines Nah-/Fernwärmenetzes	b
	zeitnah geplante Kanalsanierung	a, c, d, e
Abwasser	ganzjährig hohe Abwassertemperatur	a, b, d, e, f
	Abwasserdurchfluss min. 10 L s^{-1} bis 15 L s^{-1}	a, b, d, e
	Fließgeschwindigkeit (0,2 m s^{-1} bis 0,8 m s^{-1})	a
	hydraulische Kanalauslastung (5 % bis 40 %)	a

[a] Hamann (2015), [b] Bolle (2013), [c] Buri und Kobel (2005), [d] E. A. Müller und Schmid (2005), [e] E. A. Müller et al. (2009), [f] Merkblatt DWA-M 114

In einer Modellierung werden Prozessschritte festgelegt. Sie werden systematisch in eine zielorientierte Aufeinanderfolge gebracht und umfassen Filterprozesse sowie Aggregationsprozesse. Dabei sehen die Filterprozesse vor, die vorliegenden Daten nach den relevanten Parametern zu filtern und die Aggregationsprozesse eine Zusammenführung verschiedener Datensätze. Für

die Filterschritte können drei Arten von Filtern klassifiziert werden, die in dieser Arbeit Typ A, B und C genannt werden:

A Entfernen von Objekten, die innerhalb des jeweiligen Datensatzes als nicht geeignet für AWN-Anlagen gelten (Reduzierung des Datensatzes)

B Skalieren von Objekten, die innerhalb des jeweiligen Datensatzes zu einer gesteigerten oder verminderten Eignung für AWN-Anlagen führen (keine Reduzierung des Datensatzes)

C Kombination aus Filtertyp A und B (Reduzierung des Datensatzes)

Für die Filtertypen B und C, die beide eine Bewertungsskala bzgl. der Standortnutzung beinhalten und den Kern der Nutzwertanalyse bilden, muss eine Skalierungsgrundlage definiert werden. Ihre Skalierungsgrenzen können sich für die entsprechenden Parameter z. B. von null bis eins erstrecken. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass nach Betrachtung des vorliegenden Datenmodells in Verbindung mit den Definitionen für Skalenniveaus durch Backhaus et al. (2021) sowohl metrische als auch nichtmetrische Skalierungen angewendet werden müssen. Beispielhaft kann für den erstgenannten Parameter aus Tabelle 4.1 eine metrische Intervallskala herangeführt werden: Die Distanz zwischen Liegenschaft und Haltung sowie die (finanzielle und energetische) Wirtschaftlichkeit der entsprechenden AWN-Anlage wird eine Proportionalität aufweisen. Diese wird sich aus einer Funktion u. a. mit den Variablen Baukosten und Wärmeenergieverlusten je m Verbindungsleitung zusammensetzen und so empirisch zu ermitteln sein. Gleichzeitig ist als Beispiel für eine nichtmetrische Skalierung die Zugänglichkeit der Haltung zu nennen. Schließlich gibt es hier als Bewertung lediglich die Kategorien *gut* und *schlecht* sowie beliebig viele Rangwerte dazwischen, die wohl allerdings nicht in metrische Intervalle zu unterteilen sind.

Darauf folgend muss festgelegt sein, wie die einzelnen Bewertungsskalierungen der entsprechenden Parameter miteinander verknüpft werden. In dieser Arbeit wird dafür eine Art Summierungsbewertung genutzt, bei der die individuellen Punktzahlen der Einzelbewertungen zu einem Gesamtwert aufaddiert werden. Für eine präzisere Potentialbewertung können bestimmte Parameter zusätzlich durch einen Faktor gewichtet werden. Dadurch wird dem entsprechenden Parameter ein größerer oder kleinerer Einfluss beigemessen. Letztendlich können dann aus dem theoretisch erreichbaren Minimal- und Maximalwert Potentialklassen abgeleitet werden.

4.2 Datensammlung

Anhand der Parameter, die das vorangehende Unterkapitel 4.1 definiert, sowie deren Übersicht in Tabelle 4.1 können die für die Raumanalyse erforderlichen (Geo-) Daten ermittelt werden. Zunächst sind die Kanalisationsdaten beim örtlichen Abwasserbetrieb zur Verfügung zu stellen. Sie sollten möglichst umfangreich Attribute zu den Haltungen beinhalten. Für die vorliegende Arbeit wurden folgende Kanalisationsdaten des Stadtgebiets Bremen ab DN 400

von der hanseWasser Bremen GmbH (hanseWasser) als Shapefiles zur Nutzung überlassen: Haltungen mit den Attributen Kanalart, Entwässerungsverfahren, Material, Profiltyp, Profilhöhe, Profilbreite, Baudatum sowie Gefälle, Pumpwerke ohne weitere Attribute und Einzugsgebiete mit den Attributen des jeweiligen zugehörigen Pumpwerks sowie der Kläranlagenzugehörigkeit. Eine Strukturübersicht dieser Daten ist in Tabelle A.1 zu finden. Zusätzlich wurde ein Kanalisations-Datensatz ab DN 800 von hanseWasser zur Verfügung gestellt, der den Substanzstatus jeder Haltung enthält. Die Substanzklasse steht für einen theoretischen Abnutzungsvorrat α, der softwareseitig durch Inspektionsdaten berechnet wird. Er erstreckt sich über die Bereiche $\alpha < 0,5$ = Abnutzungsvorrat voll, $0,5 \leq \alpha < 1,5$ = Abnutzungsvorrat sehr hoch, $1,5 \leq \alpha < 2,5$ = Abnutzungsvorrat hoch, $2,5 \leq \alpha < 3,5$ = Abnutzungsvorrat mittel, $3,5 \leq \alpha < 4,5$ = Abnutzungsvorrat niedrig und $4,5 \leq \alpha$ = Abnutzungsvorrat aufgebraucht. Vor der Zusendung des Datensatzes wurden bereits alle Haltungen mit einem Abnutzungsvorrat $\alpha < 3,5$ durch hanseWasser herausgefiltert. Somit befinden lediglich diejenigen Haltungen im Datensatz, die einen niedrigen oder aufgebrauchten Abnutzungsvorrat haben und dementsprechend theoretisch in den kommenden zwei bis 15 Jahren saniert werden müssen. hanseWasser erläutert hierzu, dass der Haltungszustand durch das Ingenieurspersonal anders bewertet werden kann als es die Software vorgibt und aus diesem Grund eine Sanierung im entsprechenden Zeitraum nicht feststehend gegeben ist. Außerdem ist der Stand dieses Datensatzes Mitte 2021, weshalb die Sanierung einzelner Haltungen bereits abgeschlossen sein kann.

Des weiteren werden Liegenschaftsdaten benötigt, für die grundsätzlich zwei Quellen genutzt werden können. Die Daten des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems (ALKIS) sind bei den örtlichen Vermessungs- und Katasterämtern zu erfragen, im vorliegenden Fall beim Landesamt GeoInformation Bremen. Eine weitere Möglichkeit sind die freien Daten der OpenStreetMaps Foundation, die über verschiedene Wege bezogen werden können. Die Liegenschaftsdaten beider Bezugsmöglichkeiten beinhalten Nutzungsarten der Gebäude, wobei ein wesentlich höherer Richtigkeits- und Detailgrad bei den ALKIS-Daten zu erwarten ist. Sie umfassen bis zu 232 verschiedene Gebäudefunktionen (AdV, 2008), während es in den OpenStreetMap-Daten nur 117 sind (OpenStreetMap Wiki, 2022). Alle Gebäudenutzungsarten der ALKIS-Daten sind in Tabelle A.2 einsehbar.

Das Datenmaterial des Abwassers, also etwa Temperatur-, Durchfluss und Fließgeschwindigkeitswerte, muss durch den Abwasserbetrieb erhoben werden und ist für viele Kommunen oft nicht vorhanden (Merkblatt DWA-M 114). In diesen Fällen empfiehlt sich die Annahme von zu erwartenden Durchschnittswerten oder Erfahrungs- bzw. Messwerte aus anderen Kommunen, sofern vergleichbare Rahmenbedingungen vorliegen.

Informationen über Wärmenetze können bspw. bei den lokalen Energieversorgungsunternehmen erfragt werden. Die wesernetz Bremen GmbH legt die in der Freien Hansestadt Bremen betriebenen Nah- und Fernwärmenetze auf ihrer Webseite offen (wesernetz Bremen GmbH, n. d.). Sie wurden in ein für geographische Informationssysteme (GIS) kompatibles Format überschrieben und sind in Tabelle A.3 zu finden.

4.3 Methodisches Vorgehen

In der nun umzusetzenden Modellierung werden ausschließlich diejenigen Parameter berücksichtigt, für die Daten vorliegen und somit in der hiesigen Raumanalyse Anwendung finden können. Sie sind aus Tabelle 4.1 in Tabelle 4.2 extrahiert mit den zusätzlichen Angaben zum einzusetzenden Filtertyp sowie zur Skalierung und Gewichtung; beides ist in Kapitel 4.1 erläutert. Nach Betrachtung der vorliegenden Daten in Verbindung mit den bereits angesprochenen Definitionen für Skalenniveaus durch Backhaus et al. (2021) eignet sich dafür nämlich eine nichtmetrische, kategoriale Ordinalskala am besten. Demnach findet lediglich eine qualitative Skalierung statt, die sich durch eine nicht äquidistante Rangordnung auszeichnet (Backhaus et al., 2021). Schließlich lassen sich im Rahmen dieser Arbeit aufgrund von Vereinfachungen und Informationsdefiziten keine quantitativen Aussagen über die meisten relevanten Parameter formulieren. Zur weiteren Vereinfachung wird jeweils eine lineare Proportionalität zwischen der Skala (0 bis 1) und den in Tabelle 4.2 notierten Parametergrenzen genutzt.

Tabelle 4.2: Auf die Raumanalyse anwendbare Parameter für Anlagen der Abwasserwärmenutzung mit den Angaben zu ihrem Filtertyp, ihren Skalierungsgrenzen sowie ihrer Gewichtung in der Gesamtbewertung über einen Faktor

Parameter	Filtertyp	Skala $0 \longleftrightarrow 1$	Faktor
ausreichender Kanalquerschnitt	A	—	—
Kanalgefälle	A	—	—
Haltungslänge	A	—	—
zeitnah geplante Kanalsanierung[1]	B	$0 \leq \alpha \leq 5$	1,5
Gebäudenutzungsart (Ankerkunde)	C	*siehe Tabelle A.2*	1,0
Entfernung zur Kanalleitung	C	$200\,\mathrm{m} \geq d \geq 0\,\mathrm{m}$	2,0
Vorhandensein eines Nah-/Fernwärmenetzes	B	$200\,\mathrm{m} \geq d \geq 0\,\mathrm{m}$	1,0

[1] Die Bezeichnung dieses Parameters wurde aus Tabelle 4.1 und somit der Literatur übernommen. Insofern steht sie in keinem Zusammenhang mit hanseWasser und impliziert keine tatsächlich geplante Kanalsanierung vonseiten hanseWasser.

Die Raumanalyse wird mit QGIS[1] in der Version 3.24.2 „Tisler“ ausgeführt. Viele Prozessschritte werden dadurch mithilfe der Sprache SQL umgesetzt. Sie sind im Anhang auszugsweise in Programmausdrücken zu finden und werden an den entsprechenden Textstellen genannt. Zur Vorbereitung auf die Raumanalyse erfolgt zunächst eine Bereinigung des Kanalisationsdatensatzes. Sie umfasst die Löschung folgender irrelevanter Objekte, aufgeteilt nach Attribut:

- Kanalart: Entlüftungsleitung, Sickerleitung (Drainageleitung), fiktive Haltung, Entwässerungsrinne
- Entwässerungsverfahren: Regenwasser, verfüllt, außer Betrieb, abgemauert
- Einzugsgebiet: Nachbargemeinde als Kläranlagenzugehörigkeit (aus Gründen der Organisation), ohne Angabe

[1] https://www.qgis.org/

Die Umsetzung dieser Bereinigung geschieht über die Auswahl und anschließende Löschung der entsprechenden Haltungen wie im Programmausdruck B.1 formuliert. Infolgedessen befinden sich ebenso keine Haltungen mehr im Datensatz, die Kläranlagen von Nachbargemeinden zugehörig sind. Außerdem werden die Geodaten der Haltungen mit dem Attribut der Substanzklasse über das QGIS-Werkzeug *Join* erweitert. Alle Haltungen mit einem Abnutzungsvorrat $\alpha < 3,5$ bekommen den Wert `NULL` zugewiesen, weil die Substanzklassen dieser Haltungen wie im vorherigen Kapitel 4.2 erwähnt nicht übermittelt wurden.

Nun kann die tatsächliche Raumanalyse starten. Das Verfahren entspricht dem Fließschema in Abbildung 4.2, in dem alle Parameter aus Tabelle 4.2 chronologisch angeordnet sind. Zu Beginn werden die drei Datensätze soweit möglich alle einzeln bearbeitet, sodass erst später Datenzusammenführungen der verschiedenen Datensätze erfolgen.

Auf den Haltungsdatensatz von hanseWasser werden folgende Filterprozesse angewendet: Der *DN-Filter* hat das Ziel, alle Haltungen mit DN < 800 aus dem Datensatz zu entfernen (siehe Programmausdruck B.2). Für Druckrohrleitungen und Vakuumleitungen werden allerdings keine Mindestnennweite herangezogen, weil bei diesen Haltungen von konstanteren Werten bzgl. Abwasserdurchfluss, Fließgeschwindigkeit und hydraulischer Kanalauslastung auszugehen ist und Bypass-Bauweisen geeignet sind. Bei Haltungen mit einer unteren Verjüngung jeglicher Art kann angenommen werden, dass diese Formen für erhöhte Fließgeschwindigkeiten sorgen und so eine geringere Nennweite ausreichend ist. Im vorliegenden Datensatz handelt es sich dabei um verschiedene Eiprofile und das Ellipsenprofil. Die Begehbarkeit ist bei diesen Profilformen laut Horlacher und Helbig (2018) ab DN 700/1050 möglich, weshalb diese Grenzen gewählt werden. Im darauf folgenden Prozessschritt *Gefälle-Filter* werden nur die Haltungen mit einem Gefälle zwischen 1 ‰ und 10 ‰ im Datensatz behalten (siehe Programmausdruck B.3). Auch bei diesem Filterprozess werden Druckrohrleitungen und Vakuumleitungen aus den gleichen Gründen wie beim *DN-Filter* nicht mit einbezogen. Hierauf werden die Haltungen extrahiert, die eine Länge unter 20 m haben (siehe Programmausdruck B.4). Dafür wird dem Datensatz mit dem QGIS-Werkzeug *Field calculator* ein neues Attribut hinzugefügt, das die Länge jeder Haltung in Metern mit zwei Nachkommastellen berechnet. Der Ausführungscode im Feldrechner lautet `$length`. Der *Kanalsanierung-Filter* nimmt auf das zu Beginn hinzugefügte Attribut der Substanzklasse Bezug und bewertet jedes Objekt entsprechend seines Abnutzungsvorrats $\alpha = [0; 5]$ mit einer Punktzahl innerhalb der in Tabelle 4.2 angegebenen Skala zwischen null und eins. Wieder wird dazu das QGIS-Werkzeug *Field calculator* genutzt, mit dem die Punktzahl in einer neuen Attributspalte mithilfe des Programmausdrucks B.5 hinzugefügt wird.

Die ALKIS-Liegenschaftsdaten werden mit dem *Nutzungsart-Filter* verarbeitet. Als Filtertyp C werden sowohl nicht geeignete Objekte aus dem Datensatz entfernt (siehe Programmausdruck B.6 in Verbindung mit Tabelle A.2) als auch die geeigneten einer zusätzlichen Bewertung unterzogen (siehe Programmausdruck B.7 in Verbindung mit Tabelle A.2). Diese zusätzliche Bewertung vergibt Ankerkunden die Punktzahl eins auf der Bewertungsskala, während alle anderen Liegenschaften die Punktzahl null zugeteilt bekommen. Weil einzelstehende Einfamilienhäuser als nicht geeignet für Anlagen der AWN gelten, werden sie separat aus dem Datensatz gelöscht. Hierzu werden zunächst alle Gebäude ausgewählt, die sich mit anderen Gebäuden

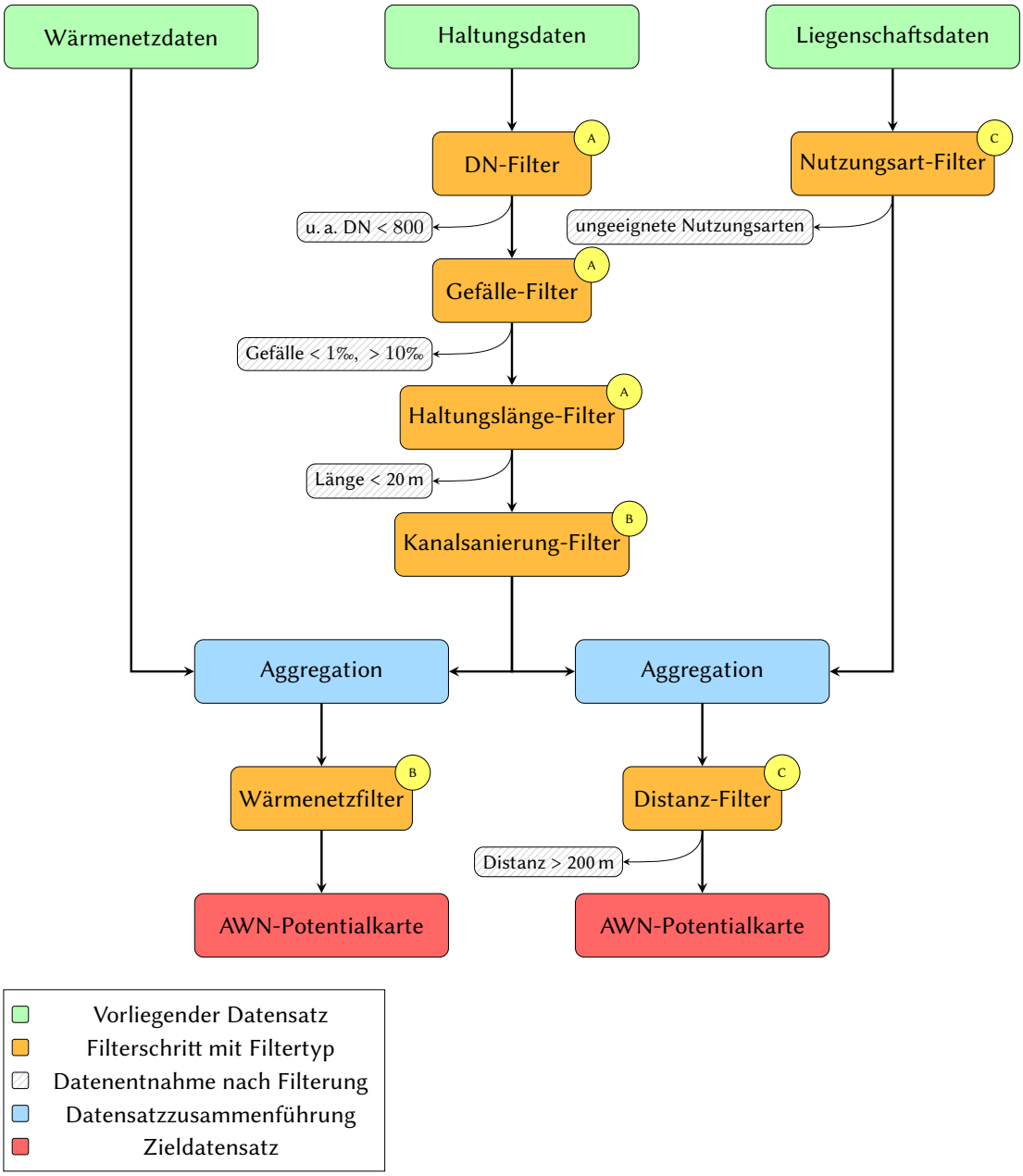


Abbildung 4.2: Verfahrensmodell der Raumanalyse (Quelle: Eigene Darstellung)

berühren oder überlappen. Anschließend wird die Auswahl invertiert, sodass nur noch einzelstehende Gebäude ausgewählt sind. Mit dem QGIS-Werkzeug *Select by expression* können alle Objekte von der jetzigen Auswahl ausgeschlossen werden, die weder die Gebäudefunktion 1000 (Wohngebäude) noch 1010 (Wohnhaus) haben, woraufhin nur noch einzelstehende Wohngebäude und Wohnhäuser ausgewählt sind. Nach visueller Betrachtung der jetzigen Objektauswahl fällt allerdings auf, dass teilweise auch sehr große einzelstehende Wohngebäude und Wohnhäuser in der Auswahl sind. Der Grund dafür ist, dass in den ALKIS-Daten manche Gebäude als einzelne Objekte erfasst sind, die jedoch aufgrund ihrer großen Grundfläche offenbar aus mehreren bzw. vielen Wohneinheiten bestehen dürften. Um dieses Problem zu lösen, wird an-

hand der Statistiken nach Destatis (2021a, S. 28) die durchschnittliche Wohnfläche einer bremischen Wohneinheit berechnet. Diese $23\,612 \cdot 10^3\,\mathrm{m}^2 \div 290\,477$ Wohnungen $\approx 81{,}2\,\mathrm{m}^2$/Wohnung können als Grundlage dienen, die Grundfläche eines Wohngebäudes mit bspw. mindestens vier Wohneinheiten zu ermitteln: $81{,}2\,\mathrm{m}^2$/Wohnung $\times$ 4 Wohnungen $= 324{,}8\,\mathrm{m}^2$. Weil davon auszugehen ist, dass Wohnungen in großen Wohneinheiten auf mehr als einem Stockwerk zu finden sind, ist bei einer Gebäudegrundfläche von $324{,}8\,\mathrm{m}^2$ aller Voraussicht nach mindestens die doppelte Anzahl an Wohnungen repräsentiert. Mit dem QGIS-Werkzeug *Select by expression* in der Ausführungsoption *Remove from current selection* können nun mithilfe des Programmausdrucks B.8 alle Gebäude mit einer Grundfläche ab $324{,}8\,\mathrm{m}^2$ aus der derzeitigen Auswahl entfernt werden. Dafür kann im Vorhinein mit dem QGIS-Werkzeug *Field calculator* ein neues Attribut hinzugefügt werden, das die Fläche jedes Gebäudes in Quadratmetern mit zwei Nachkommastellen berechnet. Der Ausführungscode im Feldrechner lautet `$area`. Zuletzt werden alle jetzigen ausgewählten Objekte aus dem Datensatz gelöscht.

Der *Distanz-Filter* stellt den ersten von zwei Datensatzzusammenführungen dar, der Austausch findet zwischen den Haltungsdaten von hanseWasser und den ALKIS-Daten statt. Als Filtertyp C werden zuerst alle Gebäude aus dem ALKIS-Datensatz entfernt, deren Distanz zur nächsten Haltung die Grenze von 200 m überschreitet. Die Umsetzung erfolgt über das QGIS-Werkzeug *Select within distance*. Nachfolgend wird mit dem QGIS-Werkzeug *Field calculator* eine neue Attributspalte hinzugefügt (siehe Programmausdruck B.9), die die Bewertung in Bezug auf die Distanz zwischen Gebäude und nächstgelegener Haltung innerhalb der in Tabelle 4.2 angegebenen Skala zwischen null und eins abbildet.

Mit dem *Wärmenetz-Filter* findet die zweite Datensatzaggregation statt; an dieser Stelle zwischen den Haltungsdaten von hanseWasser und den Wärmenetzdaten der wesernetz Bremen GmbH. Dafür wird auf den Haltungsdatensatz das QGIS-Werkzeug *Join attributes by nearest* angewendet, sodass er um die Attribute des nächstgelegenen Wärmenetzes sowie der Distanz zwischen einer Haltung und seinem nächsten Wärmenetz erweitert wird. Darauffolgend wird die Bewertung wie zuvor mit dem QGIS-Werkzeug *Field calculator* durchgeführt, indem eine neue Attributspalte hinzugefügt (siehe Programmausdruck B.10) wird. Sie gibt die Bewertung in Bezug auf die Distanz zwischen Haltung und nächstgelegenem Wärmenetz innerhalb der in Tabelle 4.2 angegebenen Skala zwischen null und eins an.

Die Raumanalyse findet ihren Abschluss in der Synchronisierung des Bewertungsattributs aus dem Abnutzungsvorrat, das sich bisher lediglich im Haltungsdatensatz befindet. Das QGIS-Werkzeug *Join attributes by field name* sorgt für einen Austausch des entsprechenden Attributs von der nächstgelegenen Haltung eines Gebäudes auf dieses. Die Gesamtpunktzahlen der einzelnen Gebäude und Haltungen können auf den beiden Datensätzen in einer neuen Attributspalte unter Berücksichtigung der in Tabelle 4.2 angegebenen Gewichtungen ermittelt werden (siehe Programmausdruck B.11 und B.12). Das Kartenmaterial kann erstellt werden; die Ergebnisse sind im kommenden Kapitel dargestellt.

5 Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der Raumanalyse zeigen geeignete Standorte für die AWN in Bremen auf. Dabei sollten Haltungen und Gebäude aufgrund der methodischen Durchführung und zugrundeliegenden Rohdaten separat betrachtet bzw. nur eingeschränkt miteinander verknüpft werden. Die Gründe dafür werden in Kapitel 6.1 beleuchtet. Es ist zu berücksichtigen, dass die hier präsentierten Untersuchungsergebnisse in keinem Zusammenhang mit hanseWasser stehen, insbesondere die auf die Haltungen bezugnehmenden Ergebnisse wie ihre Eignungsbewertungen und Potentialklassen. Sie sind ausschließlich das Resultat der in dieser Arbeit angewendeten Methoden und Analysen. hanseWasser stellte lediglich die georeferenzierten Rohdaten zu Verfügung. Dieser Hinweis gilt auch für die Diskussion in Kapitel 6.

Für die Visualisierung der Ergebnisse in Form der Kartenmaterialien wird als Hintergrundkarte die „WMTS TopPlusOpen“ verwendet, die vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bezogen werden kann und als Web Map Tile Service (WMTS) in die GIS-Software implementiert ist (BKG, 2022).

5.1 Ergebnisse geeigneter Haltungen

Einen ersten Einblick in die Ergebnisse liefert die Veränderung der Anzahl geeigneter Haltungen im Analyseverlauf. Sie ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Von ursprünglich 24 350 Haltungen in den durch hanseWasser übermittelten Rohdaten zeigen sich 1746 als grundsätzlich geeignet für AWRG-Anlagen. Sie haben eine Gesamtlänge von ca. 125,66 km, im Mittelwert 71,97 m und Median 51,17 m. Davon handelt es sich bei 1465 um Haltungen eines Mischsystems, während 281 als Schmutzwasserkanäle eines Trennsystems betrieben werden. Bei den separat berücksichtigten Druckrohrleitungen qualifizieren sich 567 Haltungen mit einer Gesamtlänge von fast 65,93 km als geeignet für eine AWRG-Anlage, Vakuumleitungen sind allerdings keine mehr im Datensatz vorhanden. Außerdem ist nach den Filterprozessen eine 36,68 m lange Dükerhaltung zwischen dem Stadtteil Findorff und dem Bürgerpark im Datensatz verbleibend. Weiterhin gibt es 6 Haltungen als Durchpressungen und 73 Doppelgraben-Haltungen; die Mehrheit bilden jedoch Einzelgräben mit einer Anzahl von 1099 Haltungen. In Bezug auf die Profilform finden sich 710 geeignete Haltungen mit Eiprofilen verschiedener Art, 12 mit Rinnenprofilen, 5 mit Maulprofilen und 3 mit Kastenprofilen. Den Großteil belegen 1000 Haltungen im Kreisprofil, 16 weitere weisen unterschiedliche Sonderformen auf.

Die Einzelbewertungen und ihre individuellen Gewichtungen sorgen bei den erzielbaren Punkten im Bereich der Nutzwertanalyse für eine Bandbreite von 0 bis 2,5. Daraus werden sechs Potentialklassen mit gleich großen Intervallen von der Größe 0,4167 definiert, wobei die

Tabelle 5.1: Anzahl der Haltungen mit der Eignung für AWRG-Anlagen im schrittweisen Analyseverlauf

Anzahl vorab	Filterprozess	Veränderung	Anzahl sodann
24 350	Bereinigung	−12 836	11 514
11 514	DN	−5582	5932
5932	Gefälle	−3012	2920
2920	Länge	−1174	1746

Potentialklasse mit dem Grad der Eignung steigt. Mit 1224 von insgesamt 1746 befinden sich etwa 70 % aller geeigneten Haltungen im unteren Sechstel, 6 Haltungen erzielen die höchste Potentialklasse. Eine genaue Übersicht bietet Tabelle 5.2. In dem Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 5.1 die Verteilung der Haltungen auf die farblich gekennzeichneten Potentialklassen. Der Mittelwert für alle Haltungsbewertungen liegt bei einer Punktzahl von $\bar{x}_H \approx 0,29$ und befindet sich demnach in der Potentialklasse 1, der Median liegt bei $\tilde{x}_H = 0$ und somit in derselben Potentialklasse.

Tabelle 5.2: Potentialklassen für AWRG-Anlagen geeignete Haltungen und ihre Anzahl

Potentialklasse	Punktintervall	Bedeutung	Anzahl
1	[0,000 000; 0,416 667)	schlechter	1224
2	[0,416 667; 0,833 333)	↓	125
3	[0,833 333; 1,250 000)		373
4	[1,250 000; 1,666 667)		8
5	[1,666 667; 2,083 333)		10
6	[2,083 333; 2,500 000)	besser	6

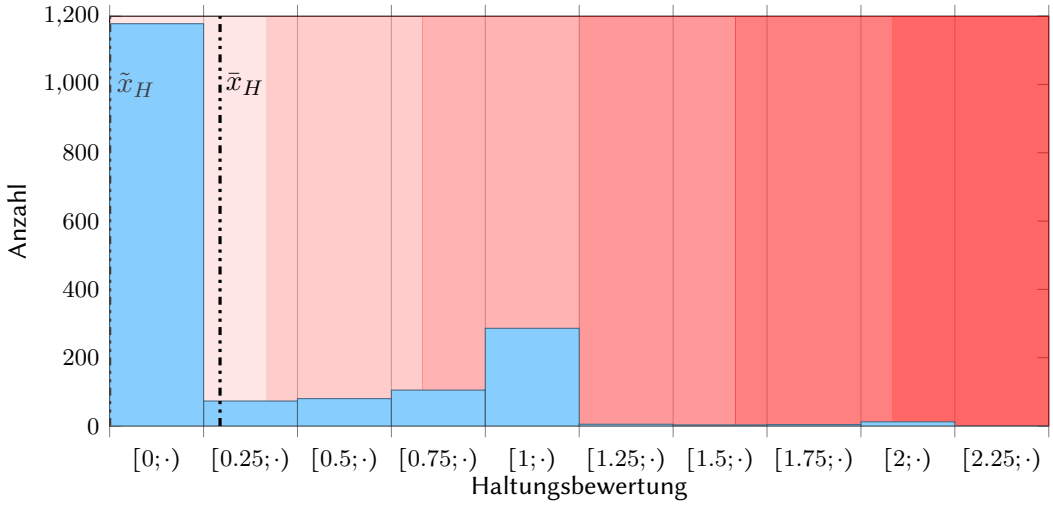


Abbildung 5.1: Histogramm der Haltungen bzgl. ihrer Bewertungspunkte sowie ihr Mittelwert $\bar{x}_H \approx 0,29$ und Median $\tilde{x}_H = 0$; die sechs Potentialklassen sind mit steigender Farbsättigung rötlich markiert (Quelle: Eigene Darstellung)

Einen räumlichen Überblick über die Ergebnisse dieses Unterkapitels bietet Abbildung 5.2.

Die Potentialklassen der Haltungen sind durch ihre Farbgebung zu erkennen.

5.2 Ergebnisse geeigneter Gebäude

Auch in diesem Unterkapitel soll die Ergebnisbetrachtung mit der Veränderung der Anzahl geeigneter Gebäude im Analyseverlauf beginnen. Sie ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Von ursprünglich 220 160 Gebäuden in den Rohdaten des ALKIS zeigen sich 48 493 als grundsätzlich geeignet für AWN-Anlagen. In Hinblick auf die Nutzungsart der geeigneten Gebäude kann aufgelistet werden: 38 475 Wohngebäude bzw. Wohnhäuser, 82 Wohnheime inklusive Kinder- und Seniorenheime sowie 5274 gemischt genutzte Gebäude mit Wohnen werden als grundsätzlich geeignet gewertet. Insofern befinden sich fast 90,4 % aller geeigneten Gebäude im Wohnungswesen. In den Wirtschafts- und Gewerbebereich fallen 3447 Gebäude, darunter 1571 in Gebäude für Handel und Dienstleistungen sowie 1508 in Gebäude für Gewerbe und Industrie. Weitere 1215 sind der Kategorie Gebäude für öffentliche Zwecke zugeordnet. Davon sind 163 Gebäude Bildungseinrichtungen wie Schulen und Hochschulen.

Tabelle 5.3: Anzahl der Gebäude mit der Eignung für AWN-Anlagen im schrittweisen Analyseverlauf

Anzahl vorab	Filterprozess	Veränderung	Anzahl sodann
220 160	Nutzungsart	−123 471	96 689
96 689	Distanz	−48 196	48 493

Für die Gebäude führen die Einzelbewertungen und ihre individuellen Gewichtungen bei den erzielbaren Punkten für eine Bandbreite von 0 bis 4,5. Auch hier werden sechs Potentialklassen mit gleich großen Intervallen von der Größe 0,75 und steigendem Eignungsgrad gebildet. Mit 47 239 von insgesamt 48 493 befinden sich über 97 % aller geeigneten Gebäude in der unteren Hälfte, 16 Gebäude erzielen die höchste Potentialklasse. Eine genaue Übersicht bietet Tabelle 5.4. In dem Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 5.3 die Verteilung der Gebäude auf die farblich gekennzeichneten Potentialklassen. Der Mittelwert für alle Gebäudebewertungen liegt bei einer Punktzahl von $\bar{x}_G \approx 1,13$ und befindet sich demnach in der Potentialklasse 2, der Median liegt bei $\tilde{x}_G = 1,14$ und somit in derselben Potentialklasse.

Tabelle 5.4: Potentialklassen für AWN-Anlagen geeignete Gebäude und ihre Anzahl

Potentialklasse	Punktintervall	Bedeutung	Anzahl
1	[0,00; 0,75)	schlechter	14 351
2	[0,75; 1,50)	↓	19 922
3	[1,50; 2,25)		12 966
4	[2,25; 3,00)		1003
5	[3,00; 3,75)		235
6	[3,75; 4,50)	besser	16

Die räumliche Übersicht über die für AWN-Anlagen geeigneten Gebäude ist in Abbildung 5.4 zu finden. Die Potentialklassen der Gebäude sind durch ihre Farbgebung gekennzeichnet.

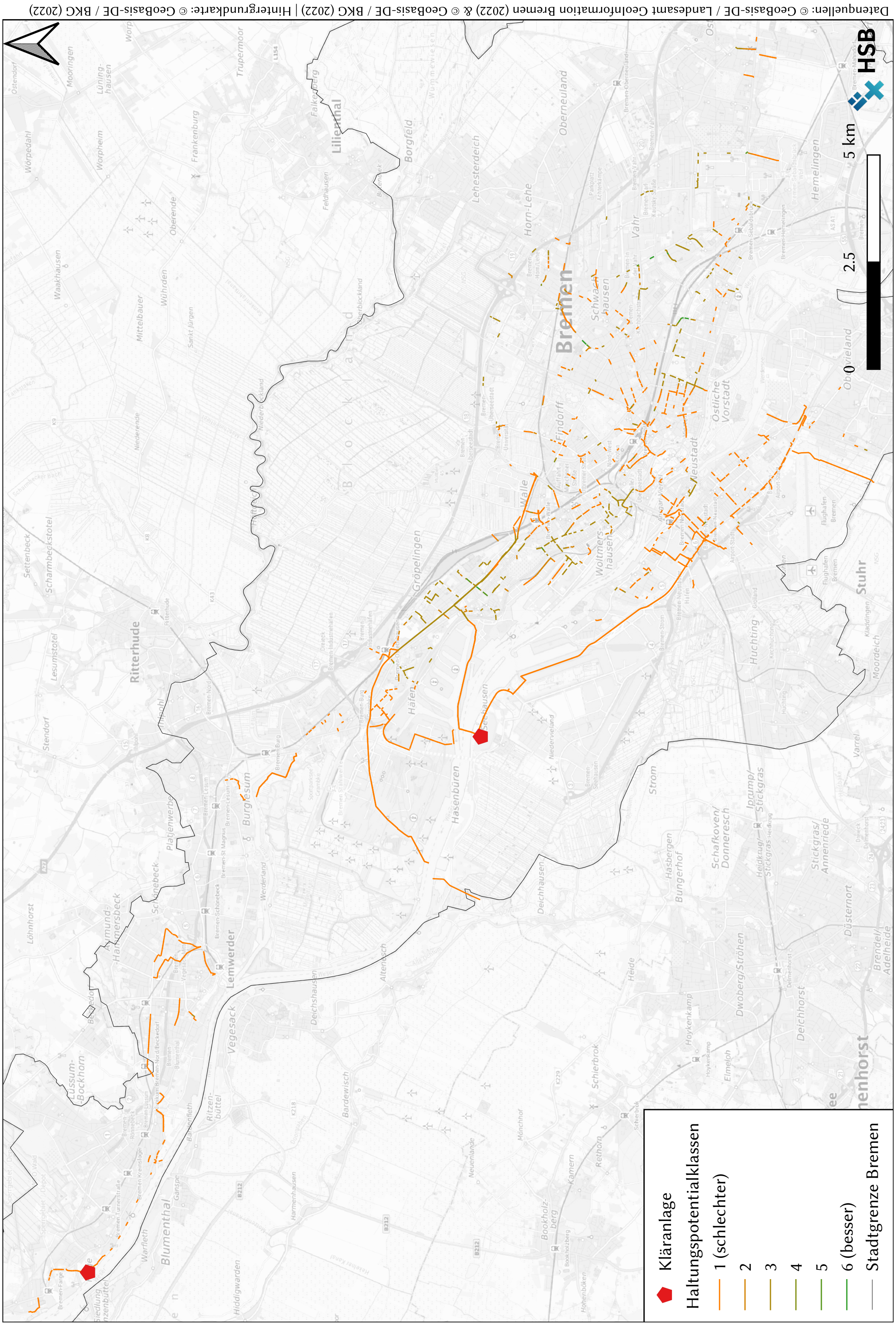


Abbildung 5.2: Potentialkarte der für AWRG-Anlagen geeigneten Haltungen im Stadtgebiet Bremen (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

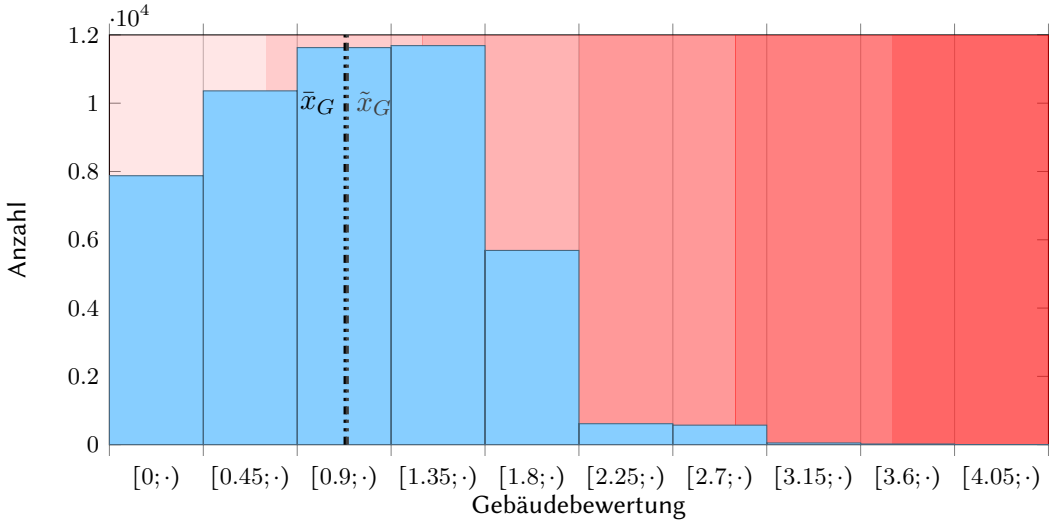


Abbildung 5.3: Histogramm der Gebäude bzgl. ihrer Bewertungspunkte sowie ihr Mittelwert $\bar{x}_G \approx 1,13$ und Median $\tilde{x}_G = 1,14$; die sechs Potentialklassen sind mit steigender Farbsättigung rötlich markiert (Quelle: Eigene Darstellung)

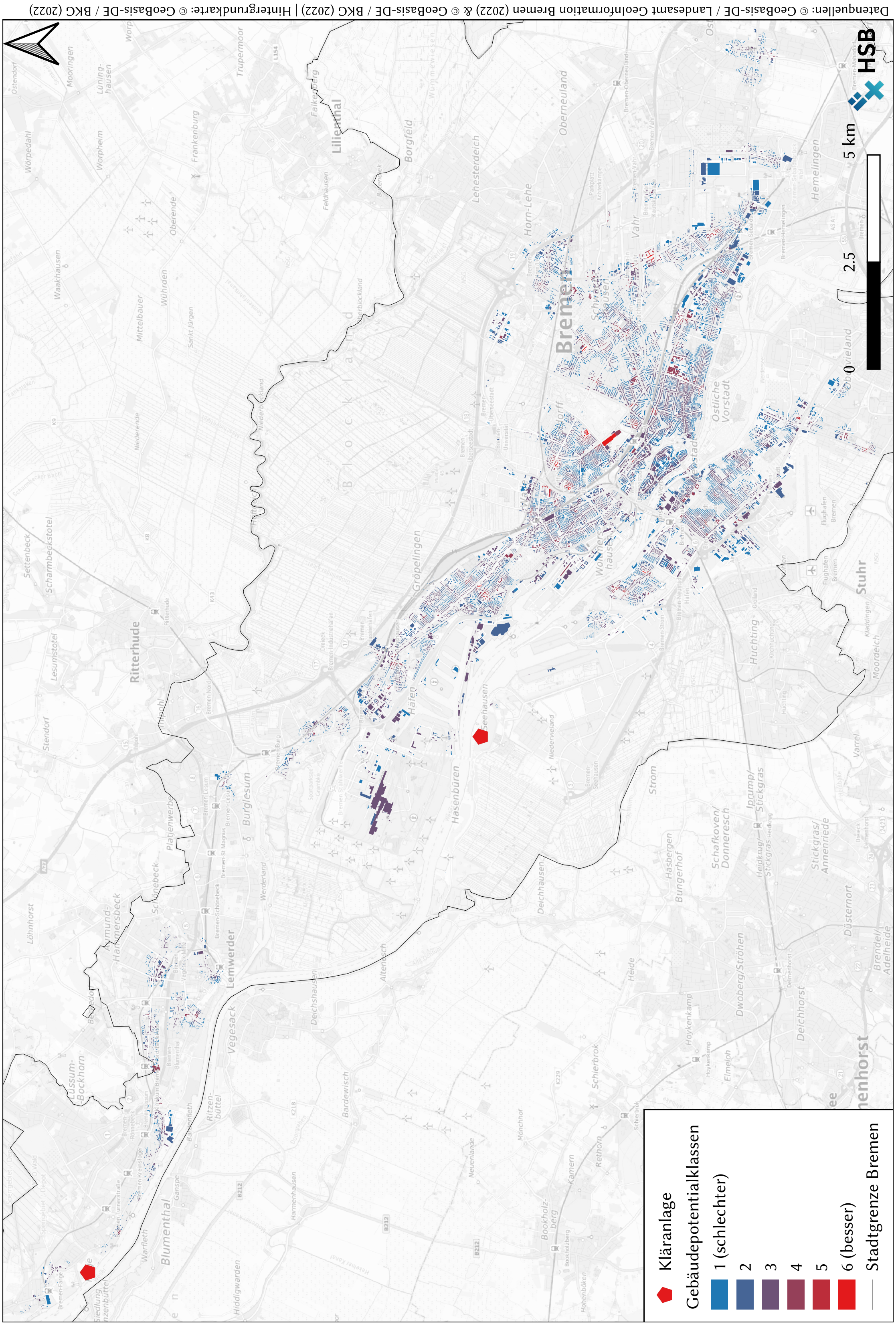


Abbildung 5.4: Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Gebäude im Stadtgebiet Bremen (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

6 Diskussion

6.1 Evaluierung der Methodik

Die soeben dargestellten Ergebnisse deuten auf eine grundsätzliche Beantwortung der zentralen Forschungsfrage dieser Arbeit aus Kapitel 1.2 hin. Gleichwohl sind sie unter einem gewissen Vorbehalt zu interpretieren. Der zugrunde liegende Modellansatz aus Kapitel 4.1 sieht die Integration aller aufgelisteten Faktoren und Parameter in das Modell vor, die auf die Standorteignung für AWN-Anlagen beeinflussend wirken. Aufgrund von Daten- und Informationsdefiziten war eine genauere Untersuchung nicht oder nur sehr eingeschränkt anwendbar. Das wirkt sich allerdings nur einseitig auf die Ergebnisse aus: Ungeeignet eingestufte Haltungen und Gebäude können ihre Eignung durch die Berücksichtigung von Einflussfaktoren, die in der Analyse ausgelassen wurden, nicht wiedererlangen, da es sich bei den Filtertypen A und C um definitive Ausschlusskriterien handelt. Somit ist allenfalls davon auszugehen, dass in den Ergebnissen Haltungen und Gebäude aufgelistet sind, die aufgrund nicht einbezogener Parameter eigentlich doch nicht für AWN-Anlagen in Betracht gezogen werden sollten.

Eine Veränderung von parameterbezogenen Aspekten wie Skalierungsgrenzen und Minimum- bzw. Maximalanforderungen der Einflussfaktoren hingegen kann für einen gegenteiligen Effekt sorgen wie auch für grundlegend abgewandelt Ergebnisse von den vorliegenden. Schließlich wird dadurch auch die Modellgrundlage modifiziert. Die Einflussfaktoren wurden in den entsprechenden Abschnitten in Kapitel 4.1 aus verschiedenen Literaturquellen in Tabelle 4.1 gesammelt und für die Analyseumsetzung auf spezifische Werte festgelegt (siehe Tabelle 4.2). Daher unterliegen sie aber auch gleichzeitig einem Spektrum an festlegbaren Werten. So unterbreiten E. A. Müller und Schmid (2005) bei der Distanz zwischen Gebäude und Haltung Werte von 100 m bis 300 m während im Merkblatt DWA-M 114 von 150 m bis 300 m zu lesen ist. Andererseits wird im selbigen Merkblatt ebenso auf eine mögliche Distanz von „wesentlich mehr als“ 300 m hingewiesen, wenn die AWRG-Anlage dem Abwasser mehr als 150 kW Wärmeenergie entzieht (Merkblatt DWA-M 114, S. 43). Für diese Fälle bedeutet das eine Qualifizierung von Gebäuden, die in den jetzigen Ergebnissen als ungeeignet bewertet sind.

Hinsichtlich der Durchführung der Analyse kann gesagt werden, dass die angewendeten Filterprozesse funktionieren. Die Reduzierung der Anzahl geeigneter Objekte ist wie Tabelle 5.1 und 5.3 zeigen im ersten Filterschritt größer und verkleinert sich mit jedem weiteren. Das ist insoweit kohärent, als vorherige Filterprozesse bereits Haltungen bzw. Gebäude entfernen, die auch in das Filterkriterium der darauffolgenden Analyseprozesse fallen würden. Auch in Bezug auf die Bewertungen als Teil der Nutzwertanalyse zeigt sich, dass sie wie nach Skalierung und Gewichtung intendiert eingreifen. Das wird am Beispiel der Distanz zwischen Gebäude

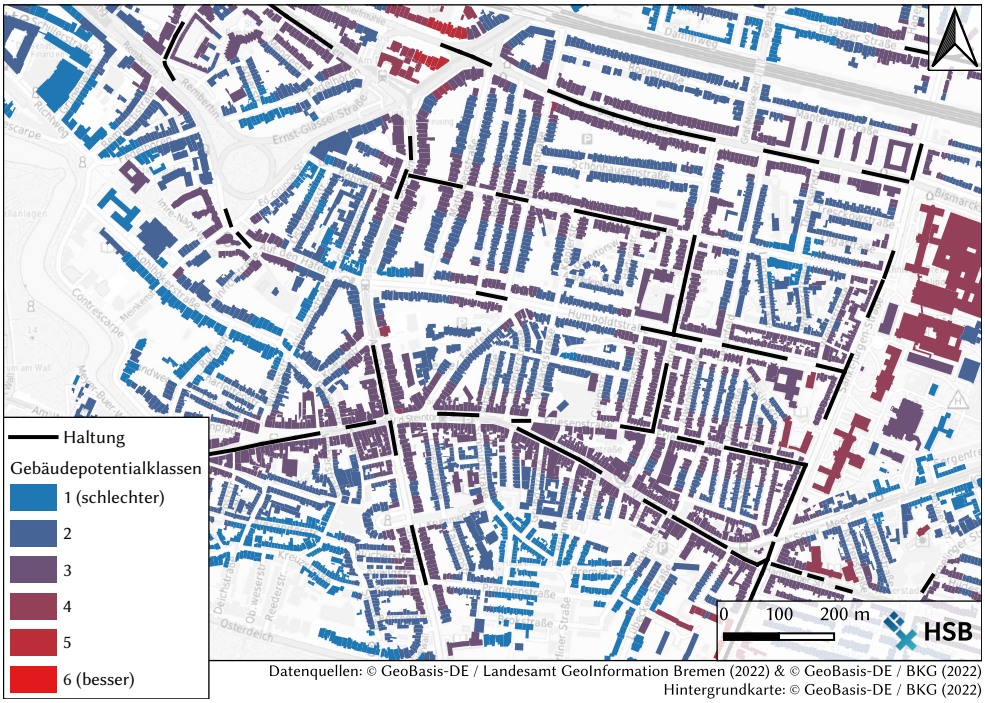


Abbildung 6.1: Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Gebäude in den Bremer Stadtteilen Mitte und Östliche Vorstadt sowie der Einfluss der Nähe einer Haltung auf die Potentialklasse eines Gebäudes (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

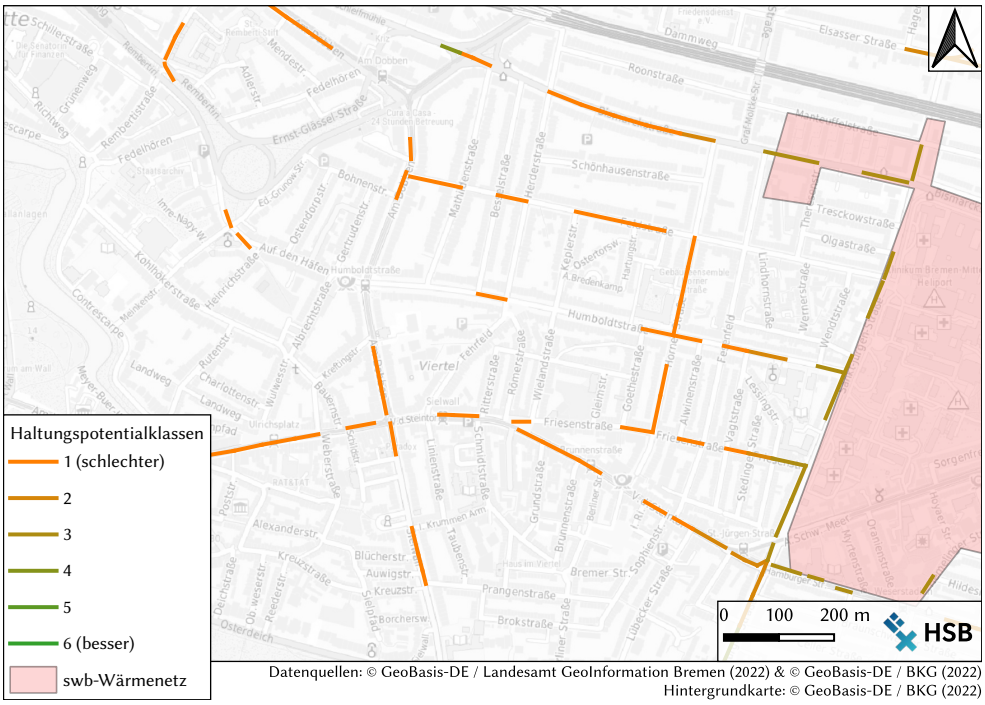


Abbildung 6.2: Potentialkarte der für AWRG-Anlagen geeigneten Haltungen in den Bremer Stadtteilen Mitte und Östliche Vorstadt sowie der Einfluss der Nähe eines Wärmenetzes auf die Potentialklasse einer Haltung (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

und Haltung deutlich, vermutlich auch weil dieser Parameter in der Durchführung mit einem Faktor 2,0 am stärksten gewichtet wurde. Wie in Abbildung 6.1 eindrucksvoll zu erkennen, erreichen die Gebäude nah an einer geeigneten Haltung durchweg höhere Potentialklassen. Gleiches ist auch beim Parameter der Distanz zwischen Haltung und Wärmenetz zu beobachten. Derselbe Kartenausschnitt in Abbildung 6.2 zeigt den Einfluss eines Wärmenetzes auf die Potentialklasse einer Haltung, die in unmittelbarer Nähe des Wärmenetzes höher ist.

Zu Beginn des Kapitels 5 wurde darauf hingewiesen, dass eine Verknüpfung der beiden Ergebnisteile Haltungen und Gebäude nur beschränkt durchgeführt werden sollte. Zumindest betrifft das die direkte Vernetzung in der Ebene, also z. B. nahegelegene sehr gut geeignete Haltungen und sehr gut geeignete Gebäude als ideale Standorte zu schlussfolgern. Die Ursachen hierfür liegen zum einen darin, dass der Parameter der potentiellen zeitnahen Kanalsanierung mithilfe des Abnutzungsvorrats α in die Bewertung von sowohl Haltungen als auch Gebäuden einfließt, also zwei Mal im Falle der direkten Vernetzung. Weiterhin ist nicht bekannt, ob ein Gebäude im Einzugsgebiet eines Wärmenetzes auch an dieses angeschlossen ist. Ohne dieses Wissen agieren Gebäude und Wärmenetze aus Sicht einer Haltung konkurrierend, weil beide die Rolle des Wärmeabnehmenden einnehmen können. Von planerischer Seite ist diese Problematik nur im Einzelfall zu lösen. Sinnvoll erscheint ein Anschluss des Gebäudes an das örtliche Wärmenetz und der Wärmetransport aus der AWN-Anlage in das Wärmenetz. Wie in Kapitel 3.4 erwähnt ist die Einbindung von AWN-Anlagen in Wärmenetze jedoch mit erhöhten Anforderungen verbunden (Stark et al., 2020) und somit nicht pauschal als umsetzbar darzustellen.

6.2 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Die Entwässerungsverfahren der für AWRG-Anlagen geeigneten Haltungen weisen dasselbe Verhältnis von ca. 1:4 zwischen Schmutzwasserkanälen und Mischwasserkanälen auf wie in den durch hanseWasser übermittelten Rohdaten. Dieser Umstand ist insofern zu nennen, als bei Schmutzwasserkanälen durchschnittlich geringere Nennweiten zu erwarten sind. Schließlich sind sie lediglich auf den Trockenwetterabfluss dimensioniert und Mischwasserkanäle auf den Mischwasserabfluss, der zusätzlich Niederschlagswasser inkludiert (Förstner & Köster, 2018). Dass sich das Verhältnis trotz Einfluss der Nennweite im *DN-Filter* nicht ändern scheint also unschlüssig. Zum Teil kann diese Auffälligkeit damit erklärt werden, dass das genannte Verhältnis der Entwässerungsverfahren bei Druckrohrleitungen weiter aufseiten der Schmutzwasserkanäle liegt, für die keine Mindestnennweite veranschlagt wurde. Allerdings ist der bereitgestellte Rohdatensatz bereits durch hanseWasser vorselektiert. Aus diesem Grund lassen sich an dieser Stelle über die Feststellungen hinaus keine signifikanten Interpretationen erlauben. Im Vergleich zum Rohdatensatz sind überdurchschnittlich viele Druckrohrleitungen in den geeigneten Haltungen enthalten. Die Ursachen hierfür liegen wie soeben erwähnt im Aussetzen des *DN-Filters* für Druckrohrleitungen aber auch des *Gefälle-Filters*.

Die Verteilung der geeigneten Haltungen auf die Potentialklassen ist eindeutig im unteren Bereich, immerhin liegt ihr Bewertungsmedian bei $\tilde{x}_H = 0$. Allerdings finden in das Bewer-

tungssystem der Haltungen auch nur zwei Parameter Eingang. Daher weist das Histogramm in Abbildung 5.1 hinter dem ersten blau gefärbten Intervall $[0; 0,25)$ sowie dem fünften Intervall $[1; 1,25)$ prägnante Einschnitte in der Anzahl geeigneter Haltungen auf. Die meisten Haltungen innerhalb dieses fünften Intervalls, nämlich 255 von 286, haben eine Bewertung von genau 1. Deshalb kommt dieser Einschnitt davon, dass nur wenige Haltungen mit einer Bewertung durch ihre Substanzklasse den Wert 1 überhaupt überschreiten können. Die Anzahl der Haltungen mit vorhandener Substanzklasse somit der Möglichkeit, eine Bewertung von 1 zu übersteigen, liegt bei 55.

Die Ergebnisse der Gebäude werden mithilfe wesentlich weniger Filterprozesse der Typen A und C gebildet, bei denen Objektlöschungen aus den Datensätzen vorkommen können. Gleichzeitig basiert die Gesamtbewertung der Gebäude im Rahmen der Nutzwertanalyse auf mehr Einzelbewertungen als es bei den Haltungen der Fall ist. Demzufolge können die Gebäudebewertungen theoretisch eine größere Streuung auf die Potentialklassen aufweisen. Dennoch sind auch hier hinter dem vierten blau gefärbten Intervall $[1,35; 1,8)$ sowie dem fünften Intervall $[1,8; 2,25)$ in Abbildung 5.3 prägnante Einschnitte zu verzeichnen. In dem Zusammenhang fällt jedoch auf, dass mit einer Anzahl von 2464 relativ wenige Gebäude in ihrer Bewertung durch eine Substanzklasse der nächstliegenden Haltung beeinflusst werden und noch weniger Gebäude als potentielle Ankerkunden agieren können, nämlich 404. Aufgrund dieser Tatsache kann abgeleitet werden, dass die Gesamtbewertung trotzdem nur durch größtenteils einen Parameter gebildet wird, wenngleich der Eignungsgrad eines Gebäudes durch einen Bewertungsparameter mehr gebildet wird als es bei den Haltungen der Fall ist (drei statt zwei). Dieser eine Parameter ist die Distanz zwischen Gebäude und Haltung. Er verursacht auf alle Gebäude summiert etwa 93,9 % der Bewertungspunkte.

Der herausragende Anteil an geeigneten Gebäuden im Nutzungsbereich des Wohnungswesens sticht hervor. Er deckt sich nicht mit dem Verhältnis in den unbearbeiteten Rohdaten des ALKIS. Diese auffällige Charakteristik lässt mit den damit erklären, dass von den wohnbezogenen Gebäudefunktionen in dieser Arbeit fast alle als grundsätzlich geeignet deklariert werden. Im Gegensatz dazu trifft diese Festlegung auf viele wirtschafts- und gewerbebezogene Gebäude nicht zu (siehe Tabelle A.2).

Die Abbildungen 5.2 und 5.4 zeigen, dass ein Großteil der geeigneten Haltungen und demnach auch Gebäude in dicht besiedelteren, zentraleren Bereichen Bremens aufzufinden ist. Die peripheren Stadtteile hingegen weisen weniger Objekte auf, vor allem die von Kläranlagen weit entfernten. Die Gründe dafür liegen in der Planung der Kanalisation in Bezug auf die Nennweiten der Haltungen. Sie werden aufgrund des erwartbaren kumulierten Abwasseraufkommens in Richtung der Kläranlage größer dimensioniert und erreichen somit dort eher die für die Raumanalyse festgelegten Mindestnennweiten. Jedenfalls könnte dieser Umstand eine Überprüfung des bisher nicht berücksichtigten Parameters eines vorgelagerten Einzugsgebiets von min. 3000 EW bis 5000 EW obsolet machen.

Außerdem fallen die sehr langen Druckrohrleitungen auf, die das Abwasser gesammelt zur Kläranlage in Bremen Seehausen transportieren. Auf der einen Seite stellen sie mit ihrem konstanten Abwasseraufkommen hinsichtlich Volumenstrom und Fließgeschwindigkeit

einen attraktiven Standort dar, andererseits werden sie aus Gründen der Redundanz in der Doppelrohrkonfiguration betrieben. Folglich handelt es sich um zwei parallel verlaufende Druckrohrleitungen, die das Abwasser alternierend zur Kläranlage befördern. Um Leerlaufzeiten zu vermeiden muss das Wärmeübertragersystem also mit beiden Druckrohrleitungen verbunden werden. Das ist z. B. über einen Bypass möglich, der das Abwasser aus dem entsprechenden Haltungsstrang zum externen Wärmeübertrager führt. Zwei einzelne in die Rohrleitungen integrierte bzw. nachträglich eingelegte Wärmeübertragereinheiten eignen sich wegen der damit einhergehenden sehr viel höheren finanziellen Investition wohl nicht. Alternativ kann die AWRG-Anlage auch in das zugehörige Pumpwerk integriert werden.

Das Gebäude mit der anhand seiner Bewertung im Rahmen der durchgeführten Nutzwertanalyse theoretisch höchsten Attraktivität ist die Paracelsus-Kurfürstenklinik im Bremer Stadtteil Vahr mit der Potentialklasse 6. Sie ist in Abbildung 6.3 gemeinsam mit dem gegenüberliegenden Polizeirevier, welches dieselbe Potentialklasse hat, dargestellt. Wie schon erwähnt ist nicht bekannt ob die genannten Gebäude mit dem abgebildeten Wärmenetz verbunden sind. Im Fall einer Wärmeversorgung durch das Wärmenetz ist ein Anschluss der Gebäude an die Abwasserwärme unsinnig und sie können auch nicht als Ankerkunden in Erscheinung treten. Gleichzeitig scheint sich die ortsansässige Haltung entsprechend ihrer Farbgebung allerdings auch gut für eine AWRG-Anlage zu eignen. Sie erreicht die höchste Potentialklasse 6 und hat eine Länge von 81,7 m. In ihrer Funktion kann die Anlage dann die rückgewonnene Abwasserwärme in das Wärmenetz speisen.

Eine zweite nennenswerte Örtlichkeit ist in Abbildung 6.4 gezeigt. Darin markiert ist die Grundschule am Baumschulenweg im Bremer Stadtteil Schwachhausen. Sie weist ebenfalls die höchste Potentialklasse 6 auf und kann aufgrund ihrer Gebäudefunktion nach Tabelle A.2 als Ankerkunde auftreten. Mehrere Mischwasserkanäle befinden sich in unmittelbarer Nähe ebenso wie ein Nahwärmenetz. Auch an diesem Standort kann das Gebäude über eine AWN-Anlage mit Wärmeenergie versorgt werden oder aber über das Wärmenetz, welches dann wiederum unterstützend mit Wärme aus der AWRG-Anlage in der Haltung beliefert wird. Für die zweite vorgestellte Variante müsste zunächst eine Erweiterung des Wärmenetzes vorgenommen werden.

In jedem Fall gilt für alle potentiellen Standorte, die für AWN-Anlagen in Betracht gezogen werden, die Durchführung intensiver Vorprüfungen und Machbarkeitsstudien, um detaillierte „technische Lösungen, Kosten und Wirtschaftlichkeit darzulegen“ (Merkblatt DWA-M 114, S. 42). Sie müssen ebenso die Frage klären, ob bei nachträglich eingebauten Wärmeübertragern wie etwa den Rinnenwärmeübertragern die damit einhergehende Querschnittsreduzierung der Haltung für hydraulische Probleme sorgen kann. Vogel (2007, S. 62) weist allerdings darauf hin, dass selbst eine Renovierung von Haltungen je nach Verfahren ein „reduziertes Abflussvermögen“ mit sich ziehen kann und dabei auch vorher geprüft wird, ob das relevant und zulässig ist. Wenn bei notwendigen Sanierungsmaßnahmen integrierte Systeme zur Wärmerückgewinnung eingesetzt werden führt das nicht zu einer nachträglichen Querschnittsreduzierung (Hamann, 2015). Die Synergieeffekte für diese Fälle wurden in Kapitel 4.1 aufgeführt und umfassen insbesondere auch nicht begehbare Kanäle.

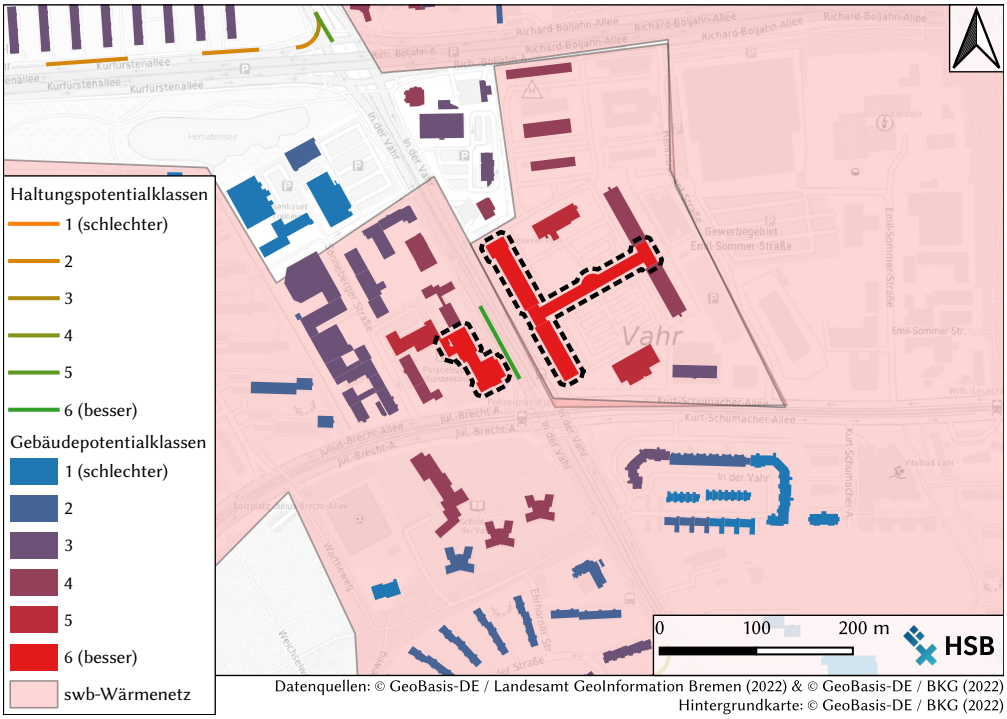


Abbildung 6.3: Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Haltungen und Gebäude im Bremer Stadtteil Vahr inklusive der markierten Paracelsus-Kurfürstenklinik (links) und dem gegenüberliegenden Polizeirevier (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

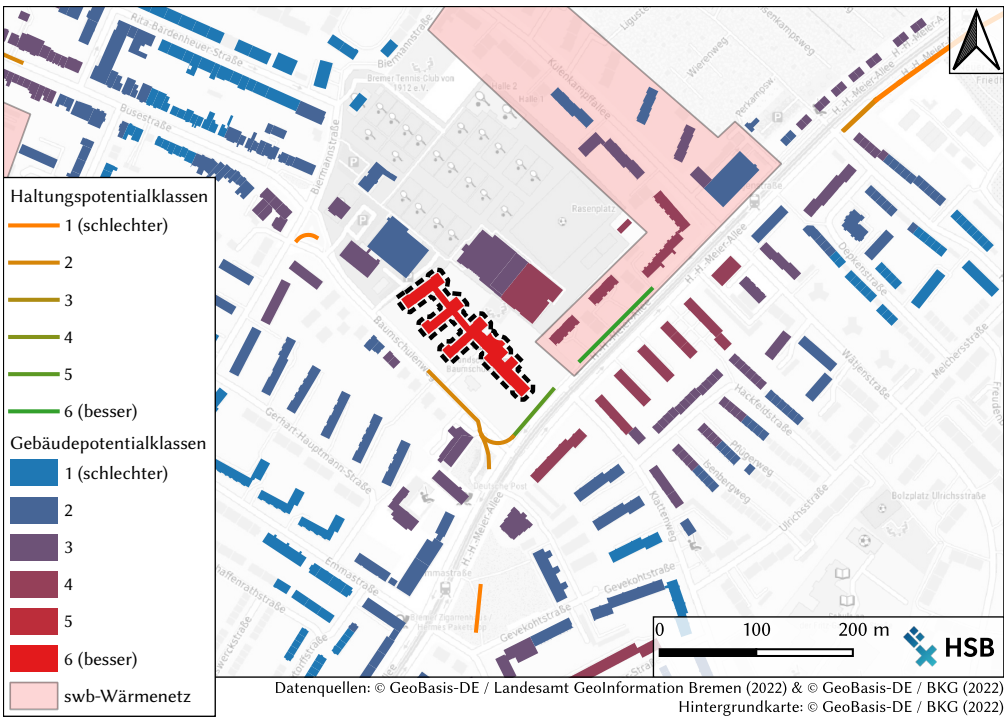


Abbildung 6.4: Potentialkarte der für AWN-Anlagen geeigneten Haltungen und Gebäude im Bremer Stadtteil Vahr inklusive der markierten Grundschule am Baumschulenweg (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Rohdaten der hanseWasser Bremen GmbH und wesernetz Bremen GmbH (n. d.))

Außerdem sollte geprüft werden, in welchem Ausmaß eine potentielle signifikante Reduktion des Abwasseraufkommens bzw. Reduktion der Abwassertemperatur in der Zukunft anzunehmen ist. Laut dem Merkblatt DWA-M 114 (S. 48f) kann dazu bspw. führen:

- „Abwanderung großer gewerblicher oder industrieller Einleiter,
- Verringerung des Fremdwasseranteils durch Kanalsanierungen (die damit verringerte Abwassermenge hat hingegen in der Regel eine Temperaturerhöhung zur Folge, die verringerte Abwassermenge wird dadurch mindestens teilweise kompensiert),
- Berücksichtigung regionaler Wanderungsprozesse/demografischer Wandel."

Gleichzeitig kann die mittelfristige Entwicklung auch andersherum, also positiv sein. Ist diese Chance absehbar, so kann bereits im Vorhinein eine größere Dimensionierung der Anlage vorgenommen werden (Merkblatt DWA-M 114).

7 Fazit und Ausblick

Abwasserwärme ist in erster Linie nicht nur eine erneuerbare energetische Ressource, sondern vor allem auch eine lokale. Sie stellt eine Quelle für Wärmeenergie dar, die kumuliert über immense Potentiale verfügt und als eine Möglichkeit für verschiedenste Abwärmenutzungskonzepte von Interesse sein kann. Ihre Rückgewinnung und Nutzung kann als wichtiger Baustein einer kommunalen energetischen Infrastruktur der Zukunft auftreten und sowohl in vergleichsweise ordinäre Gebäudeheizungen als auch in hochintegrierte kommunale Wärmeversorgungskonzepte implementiert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde für Anlagen der Rückgewinnung und Nutzung von Abwasserwärme eine thematische Einordnung gesetzt sowie ein technischer Überblick geschaffen. Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage dieser Arbeit wurde ein theoretischer Modellansatz erarbeitet, mithilfe dessen in einer räumlich dedizierten Nutzwertanalyse geeignete Standorte für AWRG- bzw. AWN-Anlagen in der Stadt Bremen identifiziert werden konnten. Dabei sind aussagekräftige Ergebnisse entstanden, die dennoch viel Raum für Erweiterungen bieten. Werden weitere im Modellansatz definierten Einflussfaktoren in die Analyse eingebaut, können genauere Standortuntersuchungen durchgeführt und zuverlässigere Ergebnisse erreicht werden. Dazu zählen etwa die abwasserbezogenen Parameter aus Tabelle 4.1. Gerade Abwasserdurchflusswerte können in Form des Trockenwetterabflusses in einer Analyseerweiterung Eingang finden, weil sie laut hanseWasser i. d. R. als modellierte Datensätze bei den Abwasserbetrieben häufig vorhanden sind; zumindest trifft das auf hanseWasser selbst zu.

Eine Erweiterung energetischer Gesichtspunkte ist u. a. über den Gebäudewärmebedarf möglich, der in Tabelle 4.1 ebenso explizit genannt ist. Er lässt sich aus Wärmeatlanten ableiten, die für immer mehr Kommunen zur Verfügung stehen. Für die Freie Hansestadt Bremen wurden bspw. Wärmedichtekarten mit den Wärmebedarfen von Gebäuden erstellt, die über tatsächliche Verbrauchsdaten, Baualtersklassen und weitere Gebäudemerkmale ermittelt wurden (Eikmeier et al., 2019). Ohnehin werden sich Gebäudetypologien und energetische Strukturmerkmale im Gebäudesektor über die kommenden Jahre weiter hin zu einer Niedertemperaturversorgung entwickeln und dadurch als Türöffner für die Nutzung von Niedertemperaturwärmenetzen aus „erneuerbaren Energien und Abwärmequellen“ dienen (Mellwig et al., 2021, S. 15).

Auch grundlegende finanzielle Entwicklungsprozesse können in der Zukunft für veränderte Rahmenbedingungen sorgen und die AWN attraktiver werden lassen. Eine maßgebliche politische Stellschraube dafür ist die im BEHG verankerte allgemeine Bepreisung von CO_2-Äquivalenten, die derzeit wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt bei 30 € je Tonne liegt. Eine detaillierte wirtschaftliche Betrachtung wird also erheblich in das Ergebnisbild dieser Arbeit eingreifen. Die Notwendigkeit einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, z. B. im Rahmen einer

Machbarkeitsstudie, wurde schon in Kapitel 6.2 angesprochen. Leider zeigen Fritz und Butz (2015) dahingehend, dass die meisten Machbarkeits- und Potentialstudien nicht zur Realisierung und Umsetzung einer AWN-Anlage führen. Das liegt möglicherweise an Hemmnissen wie „mangelnde[r] Wirtschaftlichkeit“, das Fehlen von „Initiatoren für einen Wärmeverbund“ sowie eine „Zurückhaltung beim Einsatz von nicht seit Jahrzehnten bewährter Technik“ (Gutzwiller et al., 2008, S. 65). Contracting-Verträge stellen jedoch ein interessantes Instrument für Projektrealisierungen dar, bei denen die Abwasserbetriebe selbst nicht zwingend als Contractor auftreten müssen (Hamann, 2015). Außerdem kann die funktionelle Erweiterung von AWN-Anlagen in Bereiche des Kältebedarfs wie etwa Raumkühlung wirtschaftliche Bewertungen verschieben (Merkblatt DWA-M 114).

Die vorliegende Arbeit umfasst ausschließlich die AWRG aus Haltungen der Kanalisation. Vor allem auch der Ablauf einer Kläranlage kann ein äußerst attraktiver Standort für die Rückgewinnung von Abwasserwärme sein und sollte daher explizit betrachtet werden. Dort ist nämlich eine Abkühlung bis auf einen technischen Grenzwert von 5 °C möglich (Bolle, 2013).

Literaturverzeichnis

AdV. (2008). *Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens*. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. Verfügbar 7. April 2022 unter https://www.adv-online.de/GeoInfoDok/GeoInfoDok-6.0/binarywriterservlet?imgUid=c9e63fd2-1153-911a-3b21-718a438ad1b2&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111

Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R., & Weiber, T. (2021). *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung* (16. Aufl.). Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-32425-4

Basciotti, D., Marguerite, C., Moser, M., Nagler, J., & Poier, H. (2017). *Bericht zu hydraulischen Schaltungen und netzseitigen Regelstrategien zur Integration dezentraler Erzeuger in Wärmenetze in verallgemeinerungsfähiger Form* (Endbrericht D5.3 – D5.4). Klima- und Energiefonds. Verfügbar 29. März 2022 unter https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/heat-portfolio-D5.3-D5.4.pdf

Bauernhansl, T. (Hrsg.). (2014). *Energieeffizienz in Deutschland – eine Metastudie*. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55173-4

Bayerisches LfU (Hrsg.). (2015). *Energie aus Abwasser. Ein Leitfaden für Kommunen* (2. unveränderte Auflage). Verfügbar 10. März 2022 unter https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_was_00083

BDEW. (2020). *Anwendungshilfe Gebäudeenergiegesetz (GEG). Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden*. Verfügbar 15. September 2021 unter https://www.bdew.de/service/publikationen/anwendungshilfe-gebaeudeenergiegesetz-geg/

BDI. (2021, 21. Oktober). *Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. Verfügbar 8. November 2021 unter https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/

BKG. (2022). *WMTS TopPlusOpen*. Verfügbar 23. Mai 2022 unter http://sgx.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/Datenquellen_TopPlusOpen_23.05.2022.pdf

BMU. (2016). *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin. Verfügbar 19. Januar 2022 unter https://www.bmuv.de/publikation/klimaschutzplan-2050/

BMWi. (2020). *Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin. Verfügbar 6. September

2021 unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2019.html

Böge, M., & Knies, J. (2017). Die Energie ist unter uns. Wie Abwasserwärme stärker genutzt werden kann. In M. Porth & H. Schüttrumpf (Hrsg.), *Wasser, Energie und Umwelt* (S. 75–80). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15922-1_10

Bölke, K.-P. (2013). *Kanalinspektion. Zustände erkennen und dokumentieren* (4., aktualisierte Auflage). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39221-4

Bolle, F.-W. (2013). *Potenziale und technische Optimierung der Abwasserwärmenutzung* (Aktenzeichen IV-7 – 042 600 003 C). Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. Aachen. Verfügbar 11. Oktober 2021 unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/kanal/Kurzbericht%20Abwasserwaerme_Nov_2013.pdf

Bonin, J. (2012). *Handbuch Wärmepumpen. Planung und Projektierung* (DIN, Hrsg.; 2., überarb. und erw. Aufl). Beuth.

Brinkmann, J., & Sappa, C. (2017). *Abschlussbericht zum Vorhaben: Realisierung einer Abwasserwärmenutzungsanlage im Wiesental Aachen*. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Verfügbar 10. Januar 2021 unter https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/20170222_uba_awna_abschlussbericht_stawag_energie_0.pdf

Buri, R., & Kobel, B. (2005). *Energie aus Kanalabwasser. Leitfaden für Ingenieure und Planer*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). Verfügbar 10. März 2022 unter https://www.kasag.com/fileadmin/user_upload/Erneuerbare%20Energien/3.0/DE_2005_Leitfaden_f%C3%BCr_Ingenieure_Planer_-_Deutschland__PDF__977_KB_.pdf

Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of bologna, italy. *Energy Procedia*, *45*, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.031

Destatis. (2018). *Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung - Fachserie 19 Reihe 2.1.2 - 2016*. Verfügbar 20. September 2021 unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/abwasser-oeffentlich-2190212169004.pdf

Destatis. (2021a). *Bestand an Wohnungen - Fachserie 5 Reihe 3 - 2020*. Verfügbar 12. Mai 2022 unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/bestand-wohnungen-2050300207004.pdf

Destatis. (2021b). *Private Haushalte und Umwelt. Berichtszeitraum 2000 - 2019*. Verfügbar 27. Oktober 2021 unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.pdf

Duden. (2022). Klimawandel. Bibliographisches Institut GmbH. Verfügbar 7. April 2022 unter https://www.duden.de/rechtschreibung/Klimawandel

Eikmeier, B., Janßen, K., Wassermann, T., & Meyer, B. (2019). *Erstellung eines Wärmeatlas für Bremen und Bremerhaven. Bericht Ist-Analyse*. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik

und Angewandte Materialforschung IFAM & Universität Bremen. Bremen. Verfügbar 19. Mai 2022 unter https://www.wesernetz.de/-/media/wesernetz/downloads/allgemeines/bericht_ist_analyse_wesernetz_15102019.pdf

Förstner, U., & Köster, S. (2018). *Umweltschutztechnik* (9. Auflage). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55163-9

FRANK GmbH. (2021). *PKS-Thermpipe®. Kostenlose Wärme aus Abwasser und Erdreich nutzen*. Verfügbar 30. März 2022 unter https://www.frank-gmbh.de/de-wAssets/docs/download-deutsch/abwasser/PKS-Thermpipe_Prospekt_deutsch_mail.pdf

Frijns, J., Hofman, J., & Nederlof, M. (2013). The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, *65*, 357–363. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.023

Fritz, S., & Butz, J. (2015). *Realisierte Abwasserwärmenutzungsanlagen. Recherche im Rahmen des Initialisierungsprogrammes in Baden-Württemberg*. Stuttgart. Verfügbar 21. Mai 2022 unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaermenutzung/Bericht_realisierte_Abwasserwaermeanlagen.pdf

Golzar, F., Nilsson, D., & Martin, V. (2020). Forecasting wastewater temperature based on artificial neural network (ANN) technique and monte carlo sensitivity analysis. *Sustainability*, *12*(16), 6386. https://doi.org/10.3390/su12166386

Gutzwiller, L., Lehmann, S., Müller, E. A., Kobel, B., Nietlisbach, A., Rognon, F., Wanner, O., & Wiederkehr, S. (2008). *Abwasserwärmenutzung. Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderung*. Bundesamt für Energie BFE. Bern. Verfügbar 23. Mai 2022 unter http://www.infrawatt.ch/sites/default/files/2008_EicherPauli_Abwasserw%C3%A4rmenutzung_Potenzial,%20Wirtschaftlichkeit%20und%20F%C3%B6rderung.pdf

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

Helmut Uhrig Straßen- und Tiefbau GmbH. (2022). *Produkt: Therm-Liner. So funktioniert das innovative Wärmetauschersystem von UHRIG*. Verfügbar 30. März 2022 unter https://www.uhrig-bau.eu/geschaeftsfeld/energie-aus-abwasser/produkt-therm-liner/

HIC Hamburg Institut Consulting GmbH. (2021). *Gutachten zur Analyse der zukünftigen CO2-neutralen Wärmeversorgungsoptionen und politisch-rechtlicher Handlungsoptionen im Land Bremen*. Hamburg. Verfügbar 14. Oktober 2021 unter https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/08/Gutachten_CO2-neutrale_Waermeversorgung.pdf

Horlacher, H.-B., & Helbig, U. (Hrsg.). (2018). *Rohrleitungen 2. Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation* (2. Aufl.). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50355-3

HUBER SE. (2022). *HUBER Abwasserwärmetauscher RoWin*. Verfügbar 30. März 2022 unter https://www.huber.de/de/produkte/energie-aus-abwasser/huber-abwasserwaermetauscher-rowin.html

IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell,

E. Lonnoy, J. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Hrsg.), *Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. Verfügbar 4. Januar 2022 unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Jung, P. (1998). *Kanalsanierung. Bestandsaufnahme, Planung, Ausführung* (1. Auflage). Vogel.

KASAG Swiss AG. (2022). *Energienutzung im Abwasserkanal. Wärmeübertragerlösungen zur Abwasserwärmenutzung im Abwasserkanal*. Verfügbar 30. März 2022 unter https://www.kasag.com/produkt/erneuerbare-energien-systeme-anlagen-waermetauscher-waerme-aus-abwasser-waermetauscherloesungen-abwasserkanal/

Mellwig, P., Pehnt, D. M., & Lempik, J. (2021). *Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Gebäudebereich*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu). Heidelberg. Verfügbar 9. Mai 2022 unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/landwirtschaft/pdf/_ifeu_2021__Energieeffizienz_als_T%C3%BCr%C3%B6ffner_f%C3%BCr_erneuerbare_Energien_im_Geb%C3%A4udebereich_Endbericht.pdf

Michalik, M. (2021). *Abschlussbericht der Enquetekommission „Klimaschutzstrategie für das Land Bremen“*. Bremische Bürgerschaft. Bremen. Verfügbar 3. Mai 2022 unter https://www.bremische-buergerschaft.de/presse/EK/Abschlussbericht_Enquetekommission_Bremen.pdf

Müller, E. A., & Schmid, F. (2005). *Heizen und Kühlen mit Abwasser. Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden* (EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Hrsg.). Bundesamt für Bauten und Logistik BBL. Verfügbar 10. März 2022 unter https://www.fws.ch/wp-content/uploads/2018/05/Heizen_Abwasser.pdf

Müller, E. A., Schmid, F., & Kobel, B. (2009). *Heizen und Kühlen mit Abwasser. Ratgeber für Bauträger und Kommunen* (Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) & Institut Energie in Infrastrukturanlagen, Hrsg.). Marketing + Wirtschaft Verlagsges. Flade + Partner. Verfügbar 10. März 2022 unter https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/bwp-Heizen_und_Kuehlen_mit_Abwasser.pdf

Müller, R. (2016). *Thermodynamik. Vom Tautropfen zum Solarkraftwerk* (2., überarbeite Auflage). De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110445336

OpenStreetMap Wiki. (2022). *Key:amenity*. Verfügbar 7. April 2022 unter https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:amenity

PBS Energiesysteme GmbH. (2019). *Quartiers- & Siedlungsprojekte*. Verfügbar 7. Januar 2022 unter https://www.pbs-energie.eu/projekte/quartiers-siedlungsprojekte/

Stark, S., Uthoff, F., & Miller, J. A. (2020). *Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung*. AGFW. Frankfurt am Main. Verfügbar 22. März 2022 unter https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf

Statistisches Landesamt Bremen. (2021a). *Energie- und CO2-Bilanzen des Landes Bremen 2018*. Bremen. Verfügbar 2. April 2022 unter https://www.statistik.bremen.de/sixcms/media.php/13/2018_Bilanz_EnergieCO2_pdfa.pdf

Statistisches Landesamt Bremen. (2021b). *Energie- und CO2-Bilanzen des Landes Bremen 2019*. Bremen. Verfügbar 2. April 2022 unter https://www.statistik.bremen.de/sixcms/media.php/13/2019_Bilanz_EnergieCO2_pdfa.pdf

Stierstadt, K. (2010). *Thermodynamik. Von der Mikrophysik zur Makrophysik*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05098-5

Styczynski, Z. A., Stötzer, M., & Lombardi, P. A. (2014). Wandlung von Primärenergie in Nutzenergie. In K.-H. Grote & J. Feldhusen (Hrsg.), *Dubbel* (S. 796–811). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0_75

Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook* (2. Auflage). Taylor & Francis.

VDI e. V. (Hrsg.). (2013). *VDI-Wärmeatlas* (11., bearbeitete und erweiterte Auflage). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3

Vogel, M. (2007). *Kanalinstandhaltung. Von der Zustandserfassung zur nachhaltigen Sanierung von Entwässerungssystemen* (2., neu bearb. und erw. Aufl). expert Verlag.

Wanner, O. (2009). *Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Wärmetauscherverschmutzung - Auswirkungen und Gegenmassnahmen* (Eawag, Hrsg.). Verfügbar 10. März 2022 unter https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung_Wissenstransfer/Publ_Praxis/Factsheets/schriftenreihe_19.pdf

wesernetz Bremen GmbH. (n. d.). *Wärmenetz*. Verfügbar 28. Januar 2022 unter https://www.wesernetz.de/ueber-uns/netzbeschreibung/waermenetz

Ziegler, C. (Hrsg.). (2011). *Energie aus Abwasser. Neue Ansätze, gesetzliche Regelungen und Fördermöglichkeiten; interessante Praxisbeispiele zu Biogasgewinnung, Trockenlegung von Klärschlamm und Wärmegewinnung aus Abwässern*. Oldenbourg Industrieverlag.

Anhang A Datenübersicht

A.1 Kanalisationsdaten

Tabelle A.1: Datenstruktur der Kanalisationsdaten und ihre Anzahl n, zur Verfügung gestellt durch die hanseWasser Bremen GmbH

Datentyp	Attribut	Option
Haltungen	Kanalart	Doppelgraben
$n = 24350$		Einzelgraben
		Entlüftungsleitung
		Dükerhaltung (Freigefälle)
		Sickerleitung (Drainageleitung)
		Druckrohrleitung (Einzelgraben)
		Druckrohrleitung (Mehrfachgraben)
		Durchpressung (Freigefälle)
		fiktive Haltung
		verrohrter Graben
		Vakuumleitung
		Entwässerungsrinne
	Entwässerungsverfahren	Mischwasserkanal
		Regenwasserkanal
		Schmutzwasserkanal
		verfüllt
		außer Betrieb
		abgemauert
		Sonstiges
	Material	Steinzeug[1]
		Kunststoff
		PE[1]
		Guss
		Mauerwerk
		Beton
		Asbestzement
		PP
		Stahl
		PVC
		Mauerwerk/Betonauskleidung
		Gewebeschlauch im Stahlrohr
		Schlauchliner
		GFK[1]
		Polymerbeton
		Sondermaterial.
		unbekannt
	Profiltyp	Kastenprofil[1]
		Kreisprofil[1]
		Eiprofil[1]
		Korbbogenprofil
		Maulprofil[1]

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.1 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

Datentyp	Attribut	Option
		Rinnenprofil[1]
		Haubenprofil
		Zweirinnenprofil
		Ellipsenprofil
		liegende Ellipse
		überhöhter Halbkreis
		Sonderprofil[1]
		Profil am Dobben[1]
		unbekanntes Profil
	Profilhöhe	
	Profilbreite	
	Baudatum	
	Gefälle	
Pumpwerke $n = 161$	—	
Einzugsgebiete $n = 115$	zugehöriges Pumpwerk	
	Kläranlagenzugehörigkeit	Kläranlage Seehausen
		Kläranlage Farge
		Nachbargemeinde

[1] in verschiedener Ausführung

A.2 ALKIS-Daten

Tabelle A.2: Gebäudefunktionen in den ALKIS-Daten (nach AdV, 2008) und ihre Bewertung über die Eignung zur Wärmeabnahme von Anlagen der Abwasserwärmenutzung sowie Funktion als Ankerkunde

ID	Gebäudefunktion	Eignung	Ankerkunde
1000	Wohngebäude	Ja	Nein
1010	Wohnhaus	Ja	Nein
1020	Wohnheim	Ja	Nein
1021	Kinderheim	Ja	Ja
1022	Seniorenheim	Ja	Ja
1023	Schwesternwohnheim	Ja	Ja
1024	Studenten-, Schülerwohnheim	Ja	Ja
1025	Schullandheim	Ja	Nein
1100	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnen	Ja	Nein
1110	Wohngebäude mit Gemeinbedarf	Ja	Nein
1120	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	Ja	Nein
1121	Wohn- und Verwaltungsgebäude	Ja	Nein
1122	Wohn- und Bürogebäude	Ja	Nein
1123	Wohn- und Geschäftsgebäude	Ja	Nein
1130	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	Ja	Nein
1131	Wohn- und Betriebsgebäude	Ja	Nein
1210	Land- und forstwirtschaftliches Wohngebäude	Ja	Nein
1220	Land- und forstwirtschaftliches Wohn- und Betriebsgebäude	Ja	Nein
1221	Bauernhaus	Ja	Nein
1222	Wohn- und Wirtschaftsgebäude	Ja	Nein
1223	Forsthaus	Ja	Nein
1310	Gebäude zur Freizeitgestaltung	Nein	—
1311	Ferienhaus	Nein	—
1312	Wochenendhaus	Nein	—
1313	Gartenhaus	Nein	—
2000	Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe	Ja	Nein

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.2 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

ID	Gebäudefunktion	Eignung	Ankerkunde
2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	Ja	Nein
2020	Bürogebäude	Ja	Nein
2030	Kreditinstitut	Ja	Nein
2040	Versicherung	Ja	Nein
2050	Geschäftsgebäude	Ja	Nein
2051	Kaufhaus	Ja	Nein
2052	Einkaufszentrum	Ja	Nein
2053	Markthalle	Nein	—
2054	Laden	Ja	Nein
2055	Kiosk	Nein	—
2056	Apotheke	Ja	Nein
2060	Messehalle	Ja	Nein
2070	Gebäude für Beherbergung	Ja	Nein
2071	Hotel, Motel, Pension	Ja	Nein
2072	Jugendherberge	Ja	Nein
2073	Hütte (mit Übernachtungsmöglichkeit)	Nein	—
2074	Campingplatzgebäude	Nein	—
2080	Gebäude für Bewirtung	Ja	Nein
2081	Gaststätte, Restaurant	Ja	Nein
2082	Hütte (ohne Übernachtungsmöglichkeit)	Nein	—
2083	Kantine	Ja	Nein
2090	Freizeit- und Vergnügungsstätte	Nein	—
2091	Festsaal	Nein	—
2092	Kino	Ja	Nein
2093	Kegel-, Bowlinghalle	Ja	Nein
2094	Spielkasino	Ja	Nein
2100	Gebäude für Gewerbe und Industrie	Ja	Nein
2110	Produktionsgebäude	Nein	—
2111	Fabrik	Nein	—
2112	Betriebsgebäude	Nein	—
2113	Brauerei	Nein	—
2114	Brennerei	Nein	—
2120	Werkstatt	Nein	—
2121	Sägewerk	Nein	—
2130	Tankstelle	Ja	Nein
2131	Waschstraße, Waschanlage, Waschhalle	Nein	—
2140	Gebäude für Vorratshaltung	Nein	—
2141	Kühlhaus	Nein	—
2142	Speichergebäude	Nein	—
2143	Lagerhalle, Lagerschuppen, Lagerhaus	Nein	—
2150	Speditionsgebäude	Nein	—
2160	Gebäude für Forschungszwecke	Ja	Nein
2170	Gebäude für Grundstoffgewinnung	Nein	—
2171	Bergwerk	Nein	—
2172	Saline	Nein	—
2180	Gebäude für betriebliche Sozialeinrichtung	Ja	Nein
2200	Sonstiges Gebäude für Gewerbe und Industrie	Ja	Nein
2210	Mühle	Nein	—
2211	Windmühle	Nein	—
2212	Wassermühle	Nein	—
2213	Schöpfwerk	Nein	—
2220	Wetterstation	Ja	Nein
2310	Gebäude für Handel und Dienstleistung mit Wohnen	Ja	Nein
2320	Gebäude für Gewerbe und Industrie mit Wohnen	Ja	Nein
2400	Betriebsgebäude zu Verkehrsanlagen (allgemein)	Ja	Nein
2410	Betriebsgebäude für Straßenverkehr	Ja	Nein
2411	Straßenmeisterei	Ja	Nein

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.2 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

ID	Gebäudefunktion	Eignung	Ankerkunde
2412	Wartehalle	Nein	—
2420	Betriebsgebäude für Schienenverkehr	Ja	Nein
2421	Bahnwärterhaus	Ja	Nein
2422	Lokschuppen, Wagenhalle	Nein	—
2423	Stellwerk, Blockstelle	Ja	Nein
2424	Betriebsgebäude des Güterbahnhofs	Nein	—
2430	Betriebsgebäude für Flugverkehr	Ja	Nein
2431	Flugzeughalle	Ja	Nein
2440	Betriebsgebäude für Schiffsverkehr	Ja	Nein
2441	Werft (Halle)	Nein	—
2442	Dock (Halle)	Nein	—
2443	Betriebsgebäude zur Schleuse	Ja	Nein
2444	Bootshaus	Nein	—
2450	Betriebsgebäude zur Seilbahn	Nein	—
2451	Spannwerk zur Drahtseilbahn	Nein	—
2460	Gebäude zum Parken	Nein	—
2461	Parkhaus	Nein	—
2462	Parkdeck	Nein	—
2463	Garage	Nein	—
2464	Fahrzeughalle	Nein	—
2465	Tiefgarage	Nein	—
2500	Gebäude zur Versorgung	Nein	—
2501	Gebäude zur Energieversorgung	Nein	—
2510	Gebäude zur Wasserversorgung	Nein	—
2511	Wasserwerk	Nein	—
2512	Pumpstation	Nein	—
2513	Wasserbehälter	Nein	—
2520	Gebäude zur Elektrizitätsversorgung	Nein	—
2521	Elektrizitätswerk	Nein	—
2522	Umspannwerk	Nein	—
2523	Umformer	Nein	—
2527	Reaktorgebäude	Nein	—
2528	Turbinenhaus	Nein	—
2529	Kesselhaus	Nein	—
2540	Gebäude für Fernmeldewesen	Ja	Nein
2560	Gebäude an unterirdischen Leitungen	Nein	—
2570	Gebäude zur Gasversorgung	Nein	—
2571	Gaswerk	Nein	—
2580	Heizwerk	Nein	—
2590	Gebäude zur Versorgungsanlage	Nein	—
2591	Pumpwerk (nicht für Wasserversorgung)	Nein	—
2600	Gebäude zur Entsorgung	Nein	—
2610	Gebäude zur Abwasserbeseitigung	Nein	—
2611	Gebäude der Kläranlage	Nein	—
2612	Toilette	Nein	—
2620	Gebäude zur Abfallbehandlung	Nein	—
2621	Müllbunker	Nein	—
2622	Gebäude zur Müllverbrennung	Nein	—
2623	Gebäude der Abfalldeponie	Nein	—
2700	Gebäude für Land- und Forstwirtschaft	Nein	—
2720	Land- und forstwirtschaftliches Betriebsgebäude	Nein	—
2721	Scheune	Nein	—
2723	Schuppen	Nein	—
2724	Stall	Nein	—
2726	Scheune und Stall	Nein	—
2727	Stall für Tiergroßhaltung	Nein	—
2728	Reithalle	Nein	—

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.2 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

ID	Gebäudefunktion	Eignung	Ankerkunde
2729	Wirtschaftsgebäude	Nein	—
2732	Almhütte	Nein	—
2735	Jagdhaus, Jagdhütte	Nein	—
2740	Treibhaus, Gewächshaus	Nein	—
2741	Treibhaus	Nein	—
2742	Gewächshaus, verschiebbar	Nein	—
3000	Gebäude für öffentliche Zwecke	Ja	Nein
3010	Verwaltungsgebäude	Ja	Ja
3011	Parlament	Ja	Ja
3012	Rathaus	Ja	Ja
3013	Post	Ja	Nein
3014	Zollamt	Ja	Nein
3015	Gericht	Ja	Ja
3016	Botschaft, Konsulat	Ja	Ja
3017	Kreisverwaltung	Ja	Ja
3018	Bezirksregierung	Ja	Ja
3019	Finanzamt	Ja	Ja
3020	Gebäude für Bildung und Forschung	Ja	Ja
3021	Allgemein bildende Schule	Ja	Ja
3022	Berufsbildende Schule	Ja	Nein
3023	Hochschulgebäude (Fachhochschule, Universität)	Ja	Ja
3024	Forschungsinstitut	Ja	Nein
3030	Gebäude für kulturelle Zwecke	Ja	Nein
3031	Schloss	Nein	—
3032	Theater, Oper	Nein	—
3033	Konzertgebäude	Nein	—
3034	Museum	Ja	Ja
3035	Rundfunk, Fernsehen	Ja	Nein
3036	Veranstaltungsgebäude	Nein	—
3037	Bibliothek, Bücherei	Ja	Ja
3038	Burg, Festung	Nein	—
3040	Gebäude für religiöse Zwecke	Ja	Nein
3041	Kirche	Ja	Nein
3042	Synagoge	Ja	Nein
3043	Kapelle	Nein	—
3044	Gemeindehaus	Ja	Nein
3045	Gotteshaus	Ja	Nein
3046	Moschee	Ja	Nein
3047	Tempel	Nein	—
3048	Kloster	Nein	—
3050	Gebäude für Gesundheitswesen	Ja	Nein
3051	Krankenhaus	Ja	Ja
3052	Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation	Ja	Nein
3053	Ärztehaus, Poliklinik	Ja	Ja
3060	Gebäude für soziale Zwecke	Ja	Nein
3061	Jugendfreizeitheim	Ja	Nein
3062	Freizeit-, Vereinsheim, Dorfgemeinschafts-, Bürgerhaus	Ja	Nein
3063	Seniorenfreizeitstätte	Ja	Nein
3064	Obdachlosenheim	Ja	Nein
3065	Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte	Ja	Ja
3066	Asylbewerberheim	Ja	Nein
3070	Gebäude für Sicherheit und Ordnung	Ja	Nein
3071	Polizei	Ja	Ja
3072	Feuerwehr	Ja	Ja
3073	Kaserne	Ja	Ja
3074	Schutzbunker	Nein	—
3075	Justizvollzugsanstalt	Ja	Nein

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.2 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

ID	Gebäudefunktion	Eignung	Ankerkunde
3080	Friedhofsgebäude	Nein	—
3081	Trauerhalle	Nein	—
3082	Krematorium	Nein	—
3090	Empfangsgebäude	Ja	Nein
3091	Bahnhofsgebäude	Nein	—
3092	Flughafengebäude	Nein	—
3094	Gebäude zum U-Bahnhof	Nein	—
3095	Gebäude zum S-Bahnhof	Nein	—
3097	Gebäude zum Busbahnhof	Nein	—
3098	Empfangsgebäude Schifffahrt	Ja	Nein
3100	Gebäude für öffentliche Zwecke mit Wohnen	Ja	Nein
3200	Gebäude für Erholungszwecke	Ja	Nein
3210	Gebäude für Sportzwecke	Ja	Nein
3211	Sport-, Turnhalle	Ja	Nein
3212	Gebäude zum Sportplatz	Nein	—
3220	Badegebäude	Ja	Nein
3221	Hallenbad	Ja	Ja
3222	Gebäude im Freibad	Nein	—
3230	Gebäude im Stadion	Nein	—
3240	Gebäude für Kurbetrieb	Ja	Nein
3241	Badegebäude für medizinische Zwecke	Ja	Nein
3242	Sanatorium	Ja	Nein
3260	Gebäude im Zoo	Ja	Nein
3261	Empfangsgebäude des Zoos	Ja	Nein
3262	Aquarium, Terrarium, Voliere	Ja	Nein
3263	Tierschauhaus	Nein	—
3264	Stall im Zoo	Nein	—
3270	Gebäude im botanischen Garten	Ja	Nein
3271	Empfangsgebäude des botanischen Gartens	Ja	Nein
3272	Gewächshaus (Botanik)	Nein	—
3273	Pflanzenschauhaus	Nein	—
3280	Gebäude für andere Erholungseinrichtung	Nein	—
3281	Schutzhütte	Nein	—
3290	Touristisches Informationszentrum	Ja	Nein
9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren	Nein	—

A.3 Wärmenetze in der Stadt Bremen

Tabelle A.3: Übersicht der Bremer Wärmenetze, ihre Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Primärenergiefaktoren (wesernetz Bremen GmbH, n. d.)

Name	Vorlauftemp. [°C]	Rücklauftemp. [°C]	PEF [–]
Alfred-Faust-Straße	70–110	50	1,30
Antwerpener Straße	70–110	50	0,17
Auf dem Kruge	70–110	45–50	0,70
Barenburg	70–110	45–50	0,22
Berufsbildungszentrum	70–110	45–50	0,22
Bremen-Ost	70–130	50	0,25
Carl-Hurtzig-Straße	70–110	50	0,22
Crüsemannallee[1]	70–110	50	1,29
Delfter Straße	70–110	50	0,37
Greifswalder Straße	70–100	45–50	0,22
Güstrower Straße	70–110	45–50	0,22
Heizkraftwerk Hafen	80–130	50	0,22
Horn-Lehe-West	70–90	50	0,25

Fortsetzung auf nächster Seite…

Tabelle A.3 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

Name	Vorlauftemp. [°C]	Rücklauftemp. [°C]	PEF [–]
Kaemena-Wiese	70–110	45	0,25
Klitzenburg	70–110	45–50	0,22
Kopernikusstraße	70–110	50	0,25
Kulenkampffallee	70–110	50	0,63
Landskronastraße	70–110	50	0,26
Lehe-Universität[2]			0,25
Neustadtswall	70–110	50	1,30
Oslebshauser Park	70–110	45-50	0,22
Pfandstätte	70–130	50	0,25
Polizeipräsidium	70–130	50	0,25
Posener Straße	70–110	45–50	0,22
Schaffhauser Straße	70–130	50	0,25
Seewenjestraße	70–110	45–50	0,70
Togostraße	70–110	45–50	0,22
Universität-Horn-Lehe	70–130	50	0,25
Weidedamm	70–110	45	0,25
Werschenreger Straße	70–110	45–50	0,22

[1] Primärenergiefaktor gerundet

[2] Vor- und Rücklauftemperaturen nicht angegeben

Anhang B Durchführung der Raumanalyse

B.1 Code-Ausführungen in QGIS

Programmausdruck B.1: SQL-Code in QGIS zur Auswahl der Haltungs-Objekte nach den zu bereinigenden Attributen bzgl. Kanalart und Entwässerungsverfahren

```
"KANALART" IS 4       -- 4 = Entlueftungsleitung
OR "KANALART" IS 6    -- 6 = Sickerleitung
OR "KANALART" IS 10   -- 10 = fiktive Haltung
OR "KANALART" IS 13   -- 13 = Entwaesserungsrinne
OR "ENTWKENNZ" IS 2   -- 2 = Regenwasser
OR "ENTWKENNZ" IS 5   -- 5 = verfuellt
OR "ENTWKENNZ" IS 6   -- 6 = ausser Betrieb
OR "ENTWKENNZ" IS 17 -- 17 = abgemauert
```

Programmausdruck B.2: SQL-Code in QGIS zur Auswahl der Haltungs-Objekte außerhalb der festgelegten Mindestnennweiten

```
NOT "KANALART" IS 7   -- 7 = Druckrohrleitung (Einzelgraben)
AND NOT "KANALART" IS 8 -- 8 = Druckrohrleitung (Mehrfachgraben)
AND NOT "KANALART" IS 12-- 12 = Vakuumleitung
AND (
(--
("PROFILTYP" IS 8  -- 8 = normales Eiprofil
OR "PROFILTYP" IS 9   -- 9 = umgekehrtes normales Eiprofil
OR "PROFILTYP" IS 10 -- 10 = ueberhoehtes Eiprofil
OR "PROFILTYP" IS 11 -- 11 = gedruecktes Eiprofil 1
OR "PROFILTYP" IS 12 -- 12 = gedruecktes Eiprofil 2
OR "PROFILTYP" IS 13 -- 13 = abgewandeltes Eiprofil
OR "PROFILTYP" IS 14 -- 14 = abgewandeltes Eiprofil 2
OR "PROFILTYP" IS 27) -- 27 = Ellipsenprofil
AND ( "PROFILHOEH" < 1050 OR "PROFILBREI" < 700 )
)--
OR
(--
(NOT "PROFILTYP" IS 8    -- 8 = normales Eiprofil
AND NOT "PROFILTYP" IS 9   -- 9 = umgekehrtes normales Eiprofil
AND NOT "PROFILTYP" IS 10 -- 10 = ueberhoehtes Eiprofil
AND NOT "PROFILTYP" IS 11 -- 11 = gedruecktes Eiprofil 1
AND NOT "PROFILTYP" IS 12 -- 12 = gedruecktes Eiprofil 2
AND NOT "PROFILTYP" IS 13 -- 13 = abgewandeltes Eiprofil
AND NOT "PROFILTYP" IS 14 -- 14 = abgewandeltes Eiprofil 2
AND NOT "PROFILTYP" IS 27) -- 27 = Ellipsenprofil
AND ( "PROFILHOEH" < 800 OR "PROFILBREI" < 800 )
)--
)
```

Programmausdruck B.3: SQL-Code in QGIS zur Auswahl der Haltungs-Objekte außerhalb des festgelegten Gefälle-Bereichs

```
NOT "KANALART" IS 7   -- 7 = Druckrohrleitung (Einzelgraben)
AND NOT "KANALART" IS 8 -- 8 = Druckrohrleitung (Mehrfachgraben)
AND NOT "KANALART" IS 12-- 12 = Vakuumleitung
AND (--
"GEFAELLE" < 1
OR
"GEFAELLE" > 10
)--
```

Programmausdruck B.4: SQL-Code in QGIS zur Auswahl der Haltungs-Objekte außerhalb der festgelegten Mindestlänge

```
"laenge_m" < 20
```

Programmausdruck B.5: Ausführungscode in QGIS zur Bewertung der Haltungs-Objekte bzgl. ihrer Substanzklasse

```
IF(--
"join_substanzklasse" IS NULL,
0,
"join_substanzklasse"/5
)--
```

Programmausdruck B.6: SQL-Code in QGIS zur Auswahl der Gebäude-Objekte mit ungeeigneten Gebäudefunktionen

```
"gebaeudefu" IS 1310     OR "gebaeudefu" IS 1311  OR "gebaeudefu" IS 1312
OR "gebaeudefu" IS 1313  OR "gebaeudefu" IS 2053  OR "gebaeudefu" IS 2055
OR "gebaeudefu" IS 2073  OR "gebaeudefu" IS 2074  OR "gebaeudefu" IS 2082
OR "gebaeudefu" IS 2090  OR "gebaeudefu" IS 2091  OR "gebaeudefu" IS 2110
OR "gebaeudefu" IS 2111  OR "gebaeudefu" IS 2112  OR "gebaeudefu" IS 2113
OR "gebaeudefu" IS 2114  OR "gebaeudefu" IS 2120  OR "gebaeudefu" IS 2121
OR "gebaeudefu" IS 2131  OR "gebaeudefu" IS 2140  OR "gebaeudefu" IS 2141
OR "gebaeudefu" IS 2142  OR "gebaeudefu" IS 2143  OR "gebaeudefu" IS 2150
OR "gebaeudefu" IS 2170  OR "gebaeudefu" IS 2171  OR "gebaeudefu" IS 2172
OR "gebaeudefu" IS 2210  OR "gebaeudefu" IS 2211  OR "gebaeudefu" IS 2212
OR "gebaeudefu" IS 2213  OR "gebaeudefu" IS 2412  OR "gebaeudefu" IS 2422
OR "gebaeudefu" IS 2424  OR "gebaeudefu" IS 2441  OR "gebaeudefu" IS 2442
OR "gebaeudefu" IS 2444  OR "gebaeudefu" IS 2450  OR "gebaeudefu" IS 2451
OR "gebaeudefu" IS 2460  OR "gebaeudefu" IS 2461  OR "gebaeudefu" IS 2462
OR "gebaeudefu" IS 2463  OR "gebaeudefu" IS 2464  OR "gebaeudefu" IS 2465
OR "gebaeudefu" IS 2500  OR "gebaeudefu" IS 2501  OR "gebaeudefu" IS 2510
OR "gebaeudefu" IS 2511  OR "gebaeudefu" IS 2512  OR "gebaeudefu" IS 2513
OR "gebaeudefu" IS 2520  OR "gebaeudefu" IS 2521  OR "gebaeudefu" IS 2522
OR "gebaeudefu" IS 2523  OR "gebaeudefu" IS 2527  OR "gebaeudefu" IS 2528
OR "gebaeudefu" IS 2529  OR "gebaeudefu" IS 2560  OR "gebaeudefu" IS 2570
OR "gebaeudefu" IS 2571  OR "gebaeudefu" IS 2580  OR "gebaeudefu" IS 2590
OR "gebaeudefu" IS 2591  OR "gebaeudefu" IS 2600  OR "gebaeudefu" IS 2610
OR "gebaeudefu" IS 2611  OR "gebaeudefu" IS 2612  OR "gebaeudefu" IS 2620
OR "gebaeudefu" IS 2621  OR "gebaeudefu" IS 2622  OR "gebaeudefu" IS 2623
OR "gebaeudefu" IS 2700  OR "gebaeudefu" IS 2720  OR "gebaeudefu" IS 2721
OR "gebaeudefu" IS 2723  OR "gebaeudefu" IS 2724  OR "gebaeudefu" IS 2726
OR "gebaeudefu" IS 2727  OR "gebaeudefu" IS 2728  OR "gebaeudefu" IS 2729
OR "gebaeudefu" IS 2732  OR "gebaeudefu" IS 2735  OR "gebaeudefu" IS 2740
OR "gebaeudefu" IS 2741  OR "gebaeudefu" IS 2742  OR "gebaeudefu" IS 3031
OR "gebaeudefu" IS 3032  OR "gebaeudefu" IS 3033  OR "gebaeudefu" IS 3036
OR "gebaeudefu" IS 3038  OR "gebaeudefu" IS 3043  OR "gebaeudefu" IS 3047
OR "gebaeudefu" IS 3048  OR "gebaeudefu" IS 3074  OR "gebaeudefu" IS 3080
OR "gebaeudefu" IS 3081  OR "gebaeudefu" IS 3082  OR "gebaeudefu" IS 3091
OR "gebaeudefu" IS 3092  OR "gebaeudefu" IS 3094  OR "gebaeudefu" IS 3095
OR "gebaeudefu" IS 3097  OR "gebaeudefu" IS 3212  OR "gebaeudefu" IS 3222
OR "gebaeudefu" IS 3230  OR "gebaeudefu" IS 3263  OR "gebaeudefu" IS 3264
OR "gebaeudefu" IS 3272  OR "gebaeudefu" IS 3273  OR "gebaeudefu" IS 3280
OR "gebaeudefu" IS 3281  OR "gebaeudefu" IS 9998
```

Programmausdruck B.7: Ausführungscode in QGIS zur Bewertung der Gebäude-Objekte bzgl. ihrer potentiellen Funktion als Ankerkunde

```
IF(--
("gebaeudefu" IS 1021    OR "gebaeudefu" IS 1022  OR "gebaeudefu" IS 1023
OR "gebaeudefu" IS 1024  OR "gebaeudefu" IS 3010  OR "gebaeudefu" IS 3011
OR "gebaeudefu" IS 3012  OR "gebaeudefu" IS 3015  OR "gebaeudefu" IS 3016
OR "gebaeudefu" IS 3017  OR "gebaeudefu" IS 3018  OR "gebaeudefu" IS 3019
OR "gebaeudefu" IS 3020  OR "gebaeudefu" IS 3021  OR "gebaeudefu" IS 3023
OR "gebaeudefu" IS 3034  OR "gebaeudefu" IS 3037  OR "gebaeudefu" IS 3051
OR "gebaeudefu" IS 3053  OR "gebaeudefu" IS 3065  OR "gebaeudefu" IS 3071
OR "gebaeudefu" IS 3072  OR "gebaeudefu" IS 3073  OR "gebaeudefu" IS 3221),
1,0
)--
```

Programmausdruck B.8: SQL-Code in QGIS zur Entfernung der Gebäude-Objekte aus der bisherigen Auswahl, die mindestens die festgelegte Grundfläche haben

```
1 "flaeche_m2" >= 324.8
```

Programmausdruck B.9: Ausführungscode in QGIS zur Bewertung der Gebäude-Objekte bzgl. ihrer Distanz zur nächsten Haltung

```
1 -1/200 * "dist_haltu" + 1
```

Programmausdruck B.10: Ausführungscode in QGIS zur Bewertung der Haltungs-Objekte bzgl. ihrer Distanz zum nächsten Wärmenetz

```
1 IF(--
2 "dist_waerm" > 200,
3 0,
4 -1/200 * "dist_waerm" + 1
5 )--
```

Programmausdruck B.11: Ausführungscode in QGIS zur Ermittlung der Gesamtbewertung der Gebäude-Objekte´

```
1 (1 * "pt_ankerku") + (2 * "pt_dist_ha") + (1.5 * "pt_substan")
```

Programmausdruck B.12: Ausführungscode in QGIS zur Ermittlung der Gesamtbewertung der Haltungs-Objekte

```
1 (1.5 * "pt_substan") + (1 * "pt_waermen")
```