



ISOE-Studientexte 26

Engelbert Schramm, Martina Winker,
Michaela Rohrbach, Martin Zimmermann, Christian Remy
Unter Mitarbeit von Christoph Meyer

Abschätzung theoretischer Trinkwassersubstitutionspotenziale in Frankfurt am Main

**Optionen der Betriebswassernutzung und deren ökonomische und
ökologische Auswirkungen im Betrachtungshorizont bis 2050**

ISOE-Studientexte, Nr. 26
ISSN 0947-6083

Engelbert Schramm¹, Martina Winker¹, Michaela Rohrbach¹,
Martin Zimmermann¹, Christian Remy²

Unter Mitarbeit von Christoph Meyer¹

1 ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt am Main

2 Kompetenzzentrum Wasser Berlin

Abschätzung theoretischer Trinkwassersubstitutionspotenziale in Frankfurt am Main

**Optionen der Betriebswassernutzung und deren ökonomische und
ökologische Auswirkungen im Betrachtungshorizont bis 2050**

Herausgeber:
Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH
Hamburger Allee 45
60486 Frankfurt am Main



Namensnennung – Weitergabe unter gleichen
Bedingungen 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 DE)

Titelbild: xyz+/stock.adobe.com

Frankfurt am Main, 2022

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 6 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| Abkürzungsverzeichnis | 10 |
| Begriffsbestimmungen | 11 |
| Editorial | 15 |
| Veranlassung des Auftraggebers | 17 |
| Zusammenfassung | 19 |
| 1. Rechtliche und wirtschaftliche Anforderungen | 23 |
| 1.1. Wasserversorgung als Aufgabe kommunaler Daseinsvorsorge | 23 |
| 1.2. Wasserversorgung im Krisenfall..... | 24 |
| 1.3. Löschwasservorhaltung..... | 25 |
| 1.4. Anforderungen an die Entnahme von Grundwasser | 25 |
| 1.5. Anforderungen an die Entnahme von Oberflächenwasser | 25 |
| 1.6. Qualitätsanforderungen an Trinkwasser und den Betrieb von Trinkwasserversorgungsanlagen ... | 26 |
| 1.7. Anforderungen an Betriebswasserqualität, den Betrieb bzw. die Nutzung von Betriebswasseranlagen | 27 |
| 1.8. Rechtliche Anforderung bei der Nutzung von Betriebswasser aus einer öffentlichen Versorgung..... | 31 |
| 1.9. Konzession | 32 |
| 1.10. Entgelte..... | 33 |
| 1.11. Schlussfolgerung | 39 |
| 2. Hintergrund und Vorgehensweise | 41 |
| 2.1. Vorgehensweise..... | 43 |
| 2.2. Konzept..... | 44 |
| 2.3. Erstellung der Vorausschau | 45 |
| 2.4. Verwendete Datengrundlagen zum Wasserverbrauch | 46 |
| 2.4.1. Pro-Kopf-Verbrauch in Frankfurt am Main | 46 |
| 2.4.2. Forschungsstand zu Teilwasserverbräuchen in Wohngebäuden..... | 48 |
| 2.4.3. Theoretisches Substitutionspotenzial in Wohngebäuden in Frankfurt am Main | 51 |
| 2.4.4. Datengrundlagen zu den spezifischen Wasserverbräuchen gesondert betrachteter Orte und zentralörtlicher Funktionen | 52 |
| 2.5. Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung | 54 |
| 2.6. Schlussfolgerung | 56 |
| 3. Potenzielle Betriebswasserressourcen | 57 |
| 3.1. Klimatische Standortbedingungen | 57 |
| 3.2. Oberflächenwasser | 57 |
| 3.3. Grund- und Quellwasser | 59 |
| 3.4. Regenwasser | 61 |
| 3.5. Grauwasser..... | 62 |
| 3.6. Klarwasser | 64 |
| 3.7. Schlussfolgerung | 65 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4. | Voraussetzungen zur Nutzung möglicher Betriebswasserpotenziale in Frankfurt am Main..... | 66 |
| 4.1. | Akteure und Technologieanbieter | 68 |
| 4.2. | Nachfragesteuerung | 71 |
| 4.3. | Koordinationsformen | 73 |
| 4.4. | Kooperationsmodelle..... | 74 |
| 4.5. | Schlussfolgerung | 78 |
| 5. | Bestimmung beispielhafter Substitutionspotenziale..... | 79 |
| 5.1. | Betrachtete Modell-Quartiere..... | 79 |
| 5.1.1. | Günthersburghöfe | 79 |
| 5.1.2. | Heimatsiedlung..... | 81 |
| 5.2. | Zentralörtliche Funktionen und gesondert betrachtete Orte | 84 |
| 5.2.1. | Trink- und Betriebswassernutzung am Flughafen Frankfurt am Main..... | 84 |
| 5.2.2. | Trink- und Betriebswassernutzung in Bildungseinrichtungen am Beispiel der Goethe-Universität Frankfurt am Main..... | 88 |
| 5.2.3. | Trink- und Betriebswassernutzung in Büro- und Verwaltungsgebäuden (einschließlich Bürotürme) | 93 |
| 5.2.4. | Trink- und Betriebswassernutzung in Gewerbegebieten..... | 98 |
| 5.2.5. | Trink- und Betriebswassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern | 101 |
| 5.2.6. | Trink- und Betriebswassernutzung in Wohnhochhäusern..... | 105 |
| 5.2.7. | Trink- und Betriebswassernutzung für öffentliche Grünflächen | 105 |
| 5.2.8. | Trink- und Betriebswassernutzung in Sporteinrichtungen | 107 |
| 5.3. | Schlussfolgerung | 112 |
| 6. | Wirkungsabschätzungen für die betrachteten Alternativen in den Quartieren..... | 114 |
| 6.1. | Sozio-ökonomische Analyse | 114 |
| 6.1.1. | Zielstellung..... | 114 |
| 6.1.2. | Übersicht über Rahmenbedingungen und Eingangswerte der Kostenanalyse..... | 114 |
| 6.1.3. | Vorgehensweise..... | 118 |
| 6.1.4. | Ergebnisse der Kostenanalyse für die Günthersburghöfe..... | 124 |
| 6.1.5. | Ergebnisse der Kostenanalyse für die Heimatsiedlung | 131 |
| 6.1.6. | Jahreskostenvergleich Günthersburghöfe und Heimatsiedlung | 138 |
| 6.1.7. | Sozio-ökonomische Analyse | 139 |
| 6.2. | Ökologische Auswirkungen | 142 |
| 6.2.1. | Methodik für die ökologischen Auswirkungen | 143 |
| 6.2.2. | Auswirkungen auf den CO ₂ -Fußabdruck..... | 145 |
| 6.2.3. | Ökologische Effekte der betrachteten Fallstudien..... | 151 |
| 6.3. | Schlussfolgerung | 153 |
| 7. | Ermitteltes Trinkwassersubstitutionspotenzial für die Stadt Frankfurt am Main..... | 157 |
| 7.1. | Szenarienentwicklung | 157 |
| 7.1.1. | Hintergrund | 157 |
| 7.1.2. | Vorgehensweise bei der Entwicklung der Szenarien | 158 |
| 7.1.3. | Ergebnisse der Szenarioentwicklung..... | 160 |
| 7.2. | Projektion der beiden Modell-Quartiere auf das Stadtgebiet..... | 163 |
| 7.3. | Differenzierung und Ergänzung durch die gesondert betrachteten Orte und zentralörtlichen Funktionen..... | 166 |
| 7.4. | Projektion der möglichen Betriebswassernutzung auf das Stadtgebiet..... | 168 |
| 7.5. | Bandbreiten der Trinkwassersubstitution 2050 | 169 |
| 7.6. | Sensitivitätsbetrachtung und weitere Diskussion der Ergebnisse..... | 174 |
| 7.7. | Schlussfolgerung | 175 |
| 8. | Konsequenzen für das Arbeitsgebiet..... | 178 |
| 9. | Fazit und Ausblick | 181 |
| 10. | Literaturverzeichnis | 187 |

| | |
|---|------------|
| Anhang | 195 |
| Anhang 2.4. Forschungsstand zu Teilwasserverbräuchen in Wohngebäuden | 195 |
| Anhang 3.2.1. Rationelle Wasserverwendung in Frankfurt am Main, Teil 1: Haushalte und Kleingewerbe, 1991 (Cichorowski et al. 1991)..... | 195 |
| Anhang 3.2.2. Rationelle Wasserverwendung in Frankfurt am Main, Teil 2: Öffentliche Einrichtungen, Industrie und gewerbliche Großabnehmer, 1991 (Cichorowski et al. 1991) | 196 |
| Anhang 3.2.3. Marktpotenzial für Brauchwasser im Gewerbegebiet Ost der Stadt Frankfurt am Main, 1994 (Cichorowski et al. 1994b)..... | 198 |
| Anhang 3.2.4. Konzeption und Umsetzungsmaßnahmen zur Rationellen Wasserverwendung in der Stadt Frankfurt am Main, 1997 (Cichorowski und Rührich 1997)..... | 199 |
| Anhang 3.2.5. Brauchwasserinseln in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski 1998)..... | 200 |
| Anhang 3.2.6. Brauchwasserversorgung im Gewerbegebiet Oberhafen in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski et al. 1998a)..... | 201 |
| Anhang 3.2.7. Einsatzmöglichkeiten von Brauchwasser in der Bürostadt Niederrad in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski et al. 1998b)..... | 202 |
| Anhang 3.2.8. Rationelle Energie- und Wasserverwendung in Frankfurter Hochhäusern (Cichorowski 1999) | 203 |
| Anhang 3.2.9. Umsetzungsmaßnahmen zur Substitution von Trinkwasser in Frankfurt am Main, 2000 (Cichorowski und Heinzmann-Ekoos 2000) | 204 |
| Anhang 3.2.10. Konzeption zur Umsetzung der Regenwasserbewirtschaftung in Erschließungsgebieten der Stadt Frankfurt am Main, 2005 (AG Regenwasserbewirtschaftung 2005) ... | 205 |
| Anhang 3.2.11. Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region: Fortschreibung, 2016 (Roth 2016)..... | 206 |
| Anhang 3.3.1. Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main | 208 |
| Anhang 3.3.2. Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main | 209 |
| Anhang 3.3.3. Grundwasserentnahme für nicht-öffentliche Zwecke in Frankfurt am Main | 209 |
| Anhang 3.3.4. Einleitung von Brunnenwasser in die Kanalisation von Frankfurt am Main (nach Angaben der Gebührenabteilung Stadtentwässerung Frankfurt am Main 2018) ... | 211 |
| Anhang 3.3.5. Stillgelegte Brunnen in Frankfurt am Main | 212 |
| Anhang 5.2.2. Vorgehensweise Goethe-Universität Frankfurt am Main | 212 |
| Anhang 5.2.3. Vorgehensweise Büro- und Verwaltungsgebäude..... | 212 |
| Anhang 5.2.4. Vorgehensweise Gewerbegebiete | 213 |
| Anhang 5.2.5. Vorgehensweise Ein- und Zweifamilienhäuser..... | 214 |
| Anhang 5.2.7. Vorgehensweisen öffentliche Grünflächen | 214 |
| Anhang 5.2.8. Vorgehensweise Sporteinrichtungen..... | 215 |
| Anhang 6.1. Daten und Annahmen der sozio-ökonomischen Analyse | 215 |
| Anhang 6.1.1. Allgemeine Parameter und Annahmen | 215 |
| Anhang 6.1.2. Daten der Kostenanalyse für die Günthersburghöfe..... | 216 |
| Anhang 6.1.3. Daten der Kostenanalyse für die Heimatsiedlung..... | 224 |
| Anhang 6.1.4. Sozioökonomische Analyse | 231 |
| Anhang 6.2. Definitionen und Eingabedaten für den CO ₂ -Fußabdruck | 234 |
| Anhang 6.2.1. Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen | 234 |
| Anhang 6.2.2. Eingabedaten für die Bilanzierung | 238 |
| Anhang 7.1.1. Partizipative Ausgestaltung der beiden Szenarien..... | 246 |
| Anhang 7.1.2. Konsistenzbetrachtung..... | 247 |
| Anhang 7.5. Berechnung des Substitutionspotenzials im Szenario „Besondere Anstrengungen“ 2050 bei unterschiedlicher Bevölkerungsentwicklung..... | 248 |
| Anhang 7.6. Eingeschätzte Wahrscheinlichkeiten der Szenario-Maßnahmen..... | 252 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 1: Trinkwasserverbrauch in Haushalten (Kreisdiagramm) und theoretisches Substitutionspotenzial (Balkendiagramm)..... | 50 |
| Abbildung 2: Grundwasserergiebigkeit von Frankfurt am Main..... | 59 |
| Abbildung 3: Kooperationsmanagement einer dezentralen Versorgung mit Betriebswasser..... | 75 |
| Abbildung 4: Kooperationsmanagement der Mehr-Ebenen-Versorgung mit Betriebswasser | 76 |
| Abbildung 5: Darstellung des städtebaulichen Entwurfs „Die Günthersburghöfe“ | 80 |
| Abbildung 6: Auszug der Heimatsiedlung aus dem Liegenschaftskataster..... | 82 |
| Abbildung 7: Schema der Betriebswasserversorgung am Frankfurter Flughafen | 86 |
| Abbildung 8: Systemskizze des Referenzsystems der konventionellen Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung..... | 115 |
| Abbildung 9: Systemskizze der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ | 116 |
| Abbildung 10: Systemskizze der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ | 117 |
| Abbildung 11: In der Kostenanalyse berücksichtigte Systemkomponenten der betrachteten Varianten und jeweilige Übergabestellen zwischen öffentlichem und privatem Bereich..... | 122 |
| Abbildung 12: Spezifische Systemkosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m ³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in den Günthersburghöfen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung..... | 127 |
| Abbildung 13: Spezifische wasserbezogene Kosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m ³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in den Günthersburghöfen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung..... | 127 |
| Abbildung 14: Spezifische Systemkosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m ³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in der Heimatsiedlung in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung..... | 134 |
| Abbildung 15: Spezifische wasserbezogene Kosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m ³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in der Heimatsiedlung in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung..... | 134 |
| Abbildung 16: Systemgrenzen der Bilanzierung für den CO ₂ -Fußabdruck..... | 144 |
| Abbildung 17: CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe .. | 146 |
| Abbildung 18: CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe, aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen..... | 147 |
| Abbildung 19: Sensitivität des CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe für verschiedene Strommixe | 148 |
| Abbildung 20: CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimatsiedlung | 149 |
| Abbildung 21: CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimatsiedlung, aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen..... | 150 |
| Abbildung 22: Sensitivität des CO ₂ -Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimatsiedlung für verschiedene Strommixe..... | 151 |
| Abbildung 23: Darstellung unterschiedlicher Szenarien..... | 158 |
| Abbildung 24: Übersicht der Szenarioentwicklung und Quantifizierung, partizipative Elemente in blau..... | 159 |
| Abbildung 25: In beiden Szenarien realisierbares Betriebswasserpotenzial für das Jahr 2050 in beiden Bevölkerungsvarianten (niedrig, hoch)..... | 170 |
| Abbildung 26: Betriebswasserpotenzial für Wohngebäude im Stadtgebiet Frankfurt am Main in unterschiedlichen demographischen Entwicklungsvarianten, 2050 | 173 |
| Abbildung 27: Teilgebietliche Abschätzung des Betriebswasserpotenzials für 2050 | 174 |
| Abbildung 28: Lage der Rohrleitungen im öffentlichen Raum (Anschlussleitungen) in den Günthersburghöfen | 216 |
| Abbildung 29: Lage der Transportleitung MWA-Günthersburghöfe..... | 219 |
| Abbildung 30: Lage der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich (Anschlussleitungen) in der Heimatsiedlung | 224 |
| Abbildung 31: Lage der Transportleitung MWA-Heimatsiedlung | 227 |
| Abbildung 32: Systemgrenzen der Bilanzierung für den CO ₂ -Fußabdruck..... | 235 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 1: | Zuordnung des durchschnittlichen Tagesverbrauchs nach DVGW-Arbeitsblatt W 410 | 48 |
| Tabelle 2: | Tagesverbrauch und Veränderungen gegenüber DVGW-Arbeitsblatt W 410 | 49 |
| Tabelle 3: | Aktualisierte Trinkwasserverbräuche in Wohngebäuden | 51 |
| Tabelle 4: | Pro-Kopf-Wasserverbrauch der unterschiedlichen Nutzungen in Wohngebäuden in Frankfurt am Main für das Jahr 2017 | 51 |
| Tabelle 5: | Frankfurt-am-Main-spezifische Kenngrößen und Literaturwerte, die verwendet wurden ... | 53 |
| Tabelle 6: | Bandbreite einer möglichen Bevölkerungsentwicklung, die der Studie zugrunde gelegt wurde, mit Quellenangaben | 55 |
| Tabelle 7: | Zusammenstellung potenziell möglicher Betriebswassernutzungen in vier technischen Szenarien | 63 |
| Tabelle 8: | Schlüsselakteure bei der Substitution von Trinkwasser nach gebietlicher Ebene in verschiedenen Sektoren..... | 70 |
| Tabelle 9: | Weitere bei der Trinkwassersubstitution beteiligte Akteure und deren mögliche Positionen zum Thema | 71 |
| Tabelle 10: | Jährliche Trink- und Betriebswasserbedarfe sowie Trinkwassersubstitutionspotenziale in den Günthersburghöfen..... | 80 |
| Tabelle 11: | Jährliche Trink- und Betriebswasserbedarfe sowie Trinkwassersubstitutionspotenziale in der Heimatsiedlung | 83 |
| Tabelle 12: | Kenngrößen zum Wasserverbrauch an den verschiedenen Standorten bei 150 Vorlesungstagen | 89 |
| Tabelle 13: | Grundwassernutzung für Betriebswasser an Standorten der Goethe-Universität | 89 |
| Tabelle 14: | Berechnung der Trinkwasserverbrauchsstellen im Seminargebäude | 90 |
| Tabelle 15: | Berechnung der Trinkwasserverbrauchsstellen in der Kantine (2017)..... | 91 |
| Tabelle 16: | Berechnung des Pro-Kopf-Substitutionspotenzials für Seminargebäude und Kantine..... | 92 |
| Tabelle 17: | Substitutionspotenzial an Bildungseinrichtungen im Stadtgebiet Frankfurt am Main | 93 |
| Tabelle 18: | Berechnung der anteiligen Wasserverbräuche in einem Verwaltungsgebäude (PA-Gebäude)..... | 95 |
| Tabelle 19: | Substitutionspotenzial in Büro- und Verwaltungsgebäuden in Frankfurt am Main..... | 98 |
| Tabelle 20: | Kennzahlen zur Regenwassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern in den Untersuchungsquartieren | 102 |
| Tabelle 21: | Deckungsgrade der Regenwassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern aufgeschlüsselt nach spezifischen Anwendungen | 102 |
| Tabelle 22: | Kennzahlen zur Bewässerung von Grünland, Beeten und Bäumen | 106 |
| Tabelle 23: | Bewässerung von Sportplätzen, eigene Berechnungen gemäß Expertenangaben und Literaturwerten..... | 109 |
| Tabelle 24: | Eigene Berechnungen des Bewässerungsbedarfs von Sportplätzen mit Hilfe von Kenngrößen..... | 111 |
| Tabelle 25: | Kenngrößen der Quartiere Günthersburghöfe und Heimatsiedlung..... | 115 |
| Tabelle 26: | Ökonomische Grundlagen zur Kostenkalkulation..... | 118 |
| Tabelle 27: | Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ für die Günthersburghöfe | 125 |
| Tabelle 28: | Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Günthersburghöfe | 126 |
| Tabelle 29: | Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Günthersburghöfe | 129 |
| Tabelle 30: | Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen | 130 |
| Tabelle 31: | Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ für die Heimatsiedlung | 131 |
| Tabelle 32: | Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Heimatsiedlung..... | 133 |
| Tabelle 33: | Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Heimatsiedlung..... | 136 |
| Tabelle 34: | Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in der Heimatsiedlung | 137 |
| Tabelle 35: | CO2-Fußabdruck für die Fallstudien Neubau und Bestandsgebiet..... | 152 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 36: | Die beiden Szenarien und ihre Schlüsselfaktoren (Ergebnis des Stakeholder-Workshops vom 4. Juli 2019) | 160 |
| Tabelle 37: | Trinkwasser-Substitution für das Jahr 2050, in Mio. m ³ pro Jahr | 172 |
| Tabelle 38: | Pro-Kopf-Wasserverbrauch in der Küche..... | 195 |
| Tabelle 39: | Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main (Angaben in 1000 m ³)..... | 208 |
| Tabelle 40: | Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main (Angaben in 1000 m ³ nach der Landesstatistik)..... | 209 |
| Tabelle 41: | Entnahmemengen der nicht-öffentlichen Betreiber im Jahr 2016 (Angaben der Oberen Wasserbehörde) | 209 |
| Tabelle 42: | Stillgelegte Brunnen in Frankfurt am Main | 212 |
| Tabelle 43: | Wasserverbrauch der DZ-Bank am Standort Frankfurt am Main | 213 |
| Tabelle 44: | Beschäftigte in Büro- und Verwaltungsgebäuden in Frankfurt am Main | 213 |
| Tabelle 45: | Beschäftigte in Gewerbe und Handel, inklusive verarbeitendes Gewerbe in Frankfurt am Main (Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2018c) | 214 |
| Tabelle 46: | Annahmen für Rohrleitungen: Durchmesser, Materialien und spezifische Kosten..... | 215 |
| Tabelle 47: | Länge der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich in den Günthersburghöfen | 217 |
| Tabelle 48: | Annahmen für Trink- und Schmutzwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Günthersburghöfe | 217 |
| Tabelle 49: | Annahmen für Betriebs- und Grauwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Günthersburghöfe | 218 |
| Tabelle 50: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen (außerhalb des öffentlichen Leitungsnetzes) | 218 |
| Tabelle 51: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz des konventionellen Systems in den Günthersburghöfen | 218 |
| Tabelle 52: | Länge der Transportleitung MWA-Günthersburghöfe | 219 |
| Tabelle 53: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasser- versorgung sowie Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen..... | 220 |
| Tabelle 54: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in den Günthersburghöfen und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem | 220 |
| Tabelle 55: | Spezifische und Gesamt-Betriebskosten für eine semizentrale Wasserwieder- verwendungsanlage mit Membran-Bioreaktoren (MBR) für die Günthersburghöfe | 221 |
| Tabelle 56: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasserversor- gung sowie Grau- und Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen | 221 |
| Tabelle 57: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in den Günthersburghöfen und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem | 222 |
| Tabelle 58: | Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen | 223 |
| Tabelle 59: | Länge der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich in der Heimatsiedlung | 225 |
| Tabelle 60: | Annahmen für Trink- und Schmutzwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Heimatsiedlung..... | 225 |
| Tabelle 61: | Annahmen für Betriebs- und Grauwasserleitungen in Wohnungen der Heimatsiedlung ... | 226 |
| Tabelle 62: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung in der Heimatsiedlung (außerhalb des öffentlichen Leitungsnetzes) | 226 |
| Tabelle 63: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz des konventionellen Systems in der Heimatsiedlung | 226 |
| Tabelle 64: | Länge der Transportleitung MWA-Heimatsiedlung..... | 227 |
| Tabelle 65: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasser- versorgung sowie Schmutzwasserbeseitigung in der Heimatsiedlung | 228 |
| Tabelle 66: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in der Heimatsiedlung und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem | 228 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 67: | Spezifische und Gesamt-Betriebskosten für eine semizentrale Wasserwiederverwendungsanlage mit Membran-Bioreaktoren (MBR) für die Heimsiedlung..... | 228 |
| Tabelle 68: | Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasserversorgung sowie Grau- und Schmutzwasserbeseitigung in der Heimsiedlung | 229 |
| Tabelle 69: | Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in der Heimsiedlung und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem | 229 |
| Tabelle 70: | Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in der Heimsiedlung | 230 |
| Tabelle 71: | Matrix der möglichen und wahrscheinlichen Umlagenstrukturen | 231 |
| Tabelle 72: | Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Betriebswasser aus Mainwasser Günthersburghöfe | 231 |
| Tabelle 73: | Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Betriebswasser aus Grauwasser Günthersburghöfe | 232 |
| Tabelle 74: | Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Betriebswasser aus Mainwasser Heimsiedlung | 233 |
| Tabelle 75: | Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Betriebswasser aus Grauwasser Heimsiedlung..... | 233 |
| Tabelle 76: | Varianten für die Bilanzierung des CO ₂ -Fußabdrucks für das Bestandsgebiet (Heimsiedlung, 29900 m ³ /a) und das Neubaugebiet (Günthersburghöfe, 46100 m ³ /a)..... | 236 |
| Tabelle 77: | Datenqualität für den CO ₂ -Fußabdruck..... | 237 |
| Tabelle 78: | Stromverbrauch der bilanzierten Prozesse..... | 239 |
| Tabelle 79: | Verbrauch an Betriebsmitteln (Chemikalien und Brennstoffe/Wärme) und Anfall von Abfällen..... | 241 |
| Tabelle 80: | Materialverbrauch der bilanzierten Prozesse | 243 |
| Tabelle 81: | Datensätze für die Hintergrundprozesse | 245 |
| Tabelle 82: | Verteilung der Bevölkerung in unterschiedlichen Gebäudetypen 2030 und 2050..... | 248 |
| Tabelle 83: | Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante hoch, Wohnen..... | 249 |
| Tabelle 84: | Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante niedrig, Wohnen | 249 |
| Tabelle 85: | Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante hoch, Mehrfamilienhäuser Neubau.. | 250 |
| Tabelle 86: | Substitutionspotenzial gesondert betrachtete Orte, „Besondere Anstrengungen“ | 250 |
| Tabelle 87: | Betriebswassernutzung bei Waschmaschinen aufgrund sich entwickelnder „Betriebswasser-Kultur“ (ausschließlich im Szenario „Besondere Anstrengungen“) | 250 |
| Tabelle 88: | Auswertung der Konsistenzbewertung | 252 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|--|
| a | Jahr |
| BDEW | Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| D | Tag |
| DIN | Deutsches Institut für Normung, Berlin |
| DVGW | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn |
| E | Einwohner*innen |
| GG | Grundgesetz |
| GrwV | Grundwasserverordnung |
| GWM | Grundwassermessstelle |
| HLNUG | Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden |
| HSL | Hessisches Statistisches Landesamt |
| HW | Hessenwasser GmbH & Co. KG, Groß-Gerau |
| HWG | Hessisches Wassergesetz |
| IWRM | Integriertes Wasser-Ressourcen-Management Rhein-Main |
| l | Liter |
| MWA | Mainwasseraufbereitungsanlage der Hessenwasser GmbH & Co. KG |
| NRM | Netzdienste Rhein-Main GmbH, Frankfurt am Main |
| TrinkwV | Trinkwasserverordnung |
| WasSiG | Wassersicherstellungsgesetz |
| WasSV | Wassersicherstellungsverordnung |
| WE | Wohneinheit |
| WEP | Wohnungsbauentwicklungsprogramm |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |
| WHR | Wasserverband Hessisches Ried, Groß-Gerau |
| WRM | Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main, Groß-Gerau |
| WW | Wasserwerk zur Trinkwassergewinnung, Hessenwasser GmbH & Co. KG |

Begriffsbestimmungen

| | |
|-------------------------------------|--|
| Beregnung | Traditionelle Form (offenes Versprühen) einer künstlichen Bewässerung von Kulturland bzw. Sportstätten |
| Betreiber | Der Betreiber ist eine juristische oder natürliche Person, die unter Berücksichtigung der rechtlichen, wirtschaftlichen und tatsächlichen Umstände über die Beschaffenheit und den Betrieb einer Wasserversorgungsanlage bzw. der zugehörigen Netze bestimmt und damit den evtl. öffentlichen Versorgungsverpflichtungen nachkommt. |
| Betriebsführer | Der Betriebsführer ist eine juristische oder natürliche Person, die sich im Auftrag des Eigentümers oder des Betreibers sowohl mit sämtlichen Aufgaben, die für einen technisch einwandfreien Zustand und Betrieb der Anlagen und Netze maßgeblich sind, befasst (technische Betriebsführung) als auch mit der wirtschaftlichen Führung der Betriebsstelle oder des Betriebes (wirtschaftliche Betriebsführung). Es lässt sich, z. B. in der Aufbauphase einer neuartigen Anlage, auch nur die technische Betriebsführung an ein bereits sachkundiges Konsortium, zeitweise auslagern. |
| Betriebswasser ^[1] | Gewerblichen, industriellen, landwirtschaftlichen oder ähnlichen Zwecken dienendes Wasser mit unterschiedlichen Güteeigenschaften. Dieser Begriff wird in Ergänzung zur vorgenannten Definition auch für haustechnische Zwecke dienendes Wasser, das nicht der Trinkwasserqualität entsprechen muss, herangezogen. Synonym wird auch Wasser, das zur Deckung des Wasserbedarfes von Nutz- und Zierpflanzen in der Landwirtschaft, im Gartenbau, in Sportstätten oder Zier- und Nutzgärten eingesetzt wird. Gleichlautend wird der Begriff Brauchwasser verwendet. |
| Bevölkerungsentwicklung | Entwicklung der Bevölkerungszahlen in einem definierten zurückliegenden oder künftigen Zeitraum |
| Bevölkerungsprognose | Eine über einen definierten Zeitraum erfolgte Abschätzung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung über verschiedene statistische Berechnungsansätze |
| Bewässerung | Wasser, das neben der Niederschlagsspende zur Deckung des Wasserbedarfes von Nutz- und Zierpflanzen in der Landwirtschaft, im Gartenbau, in Sportstätten sowie zur Unterhaltung von Grünanlagen, Straßenbäumen oder Zier- und Nutzgärten eingesetzt wird |
| Contracting | Das Contracting ist eine vertraglich vereinbarte Kooperationsform zwischen einem Anbieter (Contractor) und einem Kunden, bei der bestimmte Wasser- bzw. Energiedienstleistungen vom Contractor erbracht werden (z. B. Aufbau und Betriebsführung einer Regenwasseranlage oder eines Brunnens inkl. der häuslichen Betriebswasserversorgung oder Restwärmeabschöpfung aus einem Abwasserteilstrom). Evtl. übernimmt der Contractor auch die Finanzierung der neuen Anlagentechnik (Investitionsmodell). |
| Dezentrale Anlagen | Grundstücksbezogene Ver- bzw. Entsorgungsanlage |
| Druckerhöhungsanlage ^[1] | Anlage mit Pumpen zur Wasserversorgung von Gebieten oder Gebäuden, die mit dem vorhandenen Netzdruck nicht ausreichend oder nicht ständig ausreichend versorgt werden können |

| | |
|---|---|
| Eigengewinnung | Wasservolumen pro Zeiteinheit, die ein Wasserversorgungsunternehmen aus den eigenen Anlagen gewinnt |
| Grauwasser | Teilstrom des häuslichen Abwassers ohne Teilströme aus Toiletten und Urinalen als Ressource z. B. für Wasser- und Energiewiederverwendung. Grauwasser ist hinsichtlich seiner Zusammensetzung nicht mit häuslichem Schmutzwasser gleichzusetzen. |
| Grundwasser ^[i] | Unterirdisches Wasser, das Hohlräume im Untergrund zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird |
| Grundwasseranreicherung ^{[i][iii]} | Erhöhung einer Grundwasseroberfläche bzw. des Grundwasserdargebots infolge technischer Maßnahmen |
| Grundwasserqualität | Die Beschaffenheit des Grundwassers, das durch seine Verweilzeit im Untergrund, die durchflossenen Böden und geologischen Formationen oder durch in das Grundwasser eingebrachte Stoffe bestimmt wird |
| Infiltration ^[iii] | Oberflächiger Zugang von Wasser in den Grundwasserkörper durch natürliche Prozesse oder technische Maßnahmen (siehe Grundwasseranreicherung) |
| Institutionelle Arrangements | Institutionelle Arrangements regeln wirtschaftliche Austauschbeziehungen zwischen Wirtschaftspartnern; sie lassen sich auf grundlegend unterschiedliche Formen wie anonyme Marktbeziehungen, netzwerkbasierte Vertragsbeziehungen oder langfristige vertragliche Festlegungen (z. B. Gebietsmonopole) zurückführen. |
| Klarwasser | Behandeltes kommunales Abwasser (in der Abwassertechnik Kläranlagenablauf genannt) |
| Kläranlagenablauf | Kläranlagenablauf ist das gereinigte kommunale Abwasser, das nach ordnungsgemäßer Behandlung aus einer Kläranlage abgegeben wird (auch Klarwasser genannt). |
| Kooperationsmanagement | Unter Kooperationsmanagement wird zunächst ein analytisches Instrument verstanden, das erlaubt, die Zusammenarbeit zwischen verschiedenartigen Handelnden bei einer Aufgabe (z. B. Hauseigentümer, Kommune, Wasserversorger) möglichst zu verbessern. Es kann Hinweise für eine möglichst unaufwendige Abstimmung zwischen diesen Akteuren geben und ein faktisches Management dieses Netzwerks ermöglichen/verbessern. |
| Konzession ^[i] | Langfristige Verträge zwischen Kommune und Versorgungsunternehmen über die Erbringung von Dienstleistungen sowie die Einräumung von Wegenutzungsrechten für die Wasserversorgungsnetze (auch für Strom, Gas, Fernwärme) |
| Löschwasser ^[i] | Wasser zu Löschzwecken, das überwiegend aus dem öffentlichen Trinkwassernetz zur Bekämpfung von Bränden entnommen wird |
| Oberirdische Gewässer | Gewässer, die ständig oder zeitweilig in Betten fließen oder stehen oder aus Quellen wild abfließendes Wasser |
| Pro-Kopf-Bedarf ^[i] | Planungswert für das in einer bestimmten Zeitspanne für eine Person voraussichtlich benötigte Wasservolumen |
| Ressource | Eine zur Verfügung stehende Menge eines Guts unabhängig von Art und Qualität |

| | |
|--|--|
| Rohwasser ^[i] | Wasser, das mit einer Wassergewinnungsanlage der Ressource entnommen und unmittelbar zu Trink- oder Betriebswasser aufbereitet oder ohne Aufbereitung als Trink- oder Betriebswasser verteilt werden soll |
| Semizentrale Anlagen | Quartiersbezogene Ver- bzw. Entsorgungsanlagen |
| Trinkwasser ^[vi] | Alles Wasser, das im ursprünglichen Zustand oder nach Aufbereitung zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen und Getränken oder insbesondere zu anderen häuslichen Zwecken für den menschlichen Gebrauch geeignet ist |
| Trinkwasserverordnung ^[vi] | Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV) |
| Trockenjahr | Ein Trockenjahr wird hydrometeorologisch meist so definiert, dass innerhalb eines Jahres weniger als 80 % des langjährigen Durchschnittsniederschlags fällt. |
| Verbundsystem ^[iii] | Rohrnetze, die über Transportleitungen miteinander verbunden sind und abgestimmt bewirtschaftet werden |
| Wasseraufbereitung ^[iii] | Verfahren zur Aufbereitung von Wasser zur Erreichung der benötigten Qualität |
| Wasseraufkommen | Verfügbare Gesamtmenge einer Wassermenge. Bei Trinkwasser ist dies die verfügbare Trinkwassermenge eines Wasserversorgungsunternehmens oder einer Kommune die sich durch Mengenanteilen aus Eigengewinnung und Bezug in einer definierten Zeitspanne zusammensetzt. |
| Wasserbedarf ^[i] | Planwert für das in einer definierten Zeitspanne für die Wasserversorgung unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und möglicher Einflüsse voraussichtlich benötigte Wasservolumen (Trink-, Löschwasser etc.) |
| Wasserbehälter (Behälter) ^[i] | Künstlicher Speicherraum, dessen Wasserspiegel über dem des Wasserversorgungsgebiets liegt. Sein Wasserspiegel beeinflusst den Druck im zugehörigen Wasserversorgungsgebiet. |
| Wasserbezug | Wasservolumen pro Zeiteinheit, die ein Wasserversorgungsunternehmen von anderen Unternehmen bezieht |
| Wasserdargebot ^[iii] | Wassermenge, die in einem Gebiet in Form von Oberflächen-, Grund- und Regenwasser in einer definierten Zeitspanne zur Verfügung steht |
| Wasserkonzept | Konzept zur Sicherung der Wasserversorgung mit regelmäßiger Anpassung an sich ändernde Rahmenbedingungen (Bevölkerung, Klimawandel etc.). Übersicht über den Stand der öffentlichen und nichtöffentlichen Wasserversorgung zum Zeitpunkt der Erstellung und im Vorblick, inklusive der erforderlichen Maßnahmen und der Bewertung zur Beherrschung von Änderungen |
| Wasserrecht | Gesamtheit der Rechtsnormen, die den Wasserhaushalt, den Zustand der Gewässer und ihre Nutzung regeln |
| Wasserschutzgebiet ^[iii] | Gebiete, in denen zum Schutz der Gewässer Handlungen verboten oder zu dulden sind. Diese werden durch eine Rechtsverordnung von den zuständigen Behörden festgesetzt. |

| | |
|--|---|
| Wasserversorgung ^[i] | Bereitstellung des erforderlichen Wasserbedarfs in Abhängigkeit von der Wassernutzung (Trink- und Betriebswasser) |
| Wasserversorgungsanlagen ^{[ii][vi]} | Anlagen, die einzeln oder in ihrer Gesamtheit zu Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung, Transport und Verteilung von Wasser dienen |
| Wasser(verteil)netz ^[ii] | Wird auch als Rohrnetz bezeichnet und besteht aus Haupt- und Versorgungsleitungen in einem Versorgungsgebiet. Von den Versorgungsleitungen zweigen die Anschlussleitungen zu den Verbrauchern ab. |
| Wasserwerk ^[i] | Betriebseinheit, die aus Anlagen zur Gewinnung, Aufbereitung, Förderung und Speicherung bestehen kann |
| Zisterne | Eine Zisterne bezeichnet einen meist unterirdischen Tank für die Speicherung von Regenwasser. |

[i] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg., 1983): DIN 4046, Wasserversorgung; Begriffe, Technische Regeln, September 1983, Berlin.

[ii] Mutschmann und Stimmelmayer (2014): Taschenbuch der Wasserversorgung, 16. Auflage, Wiesbaden.

[iii] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg., 1994): DIN 4049-3, Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Oktober 1994, Berlin.

[iv] Institut für Energie- und Wettbewerbsrecht in der Kommunalen Wirtschaft e. V. (Hrsg., 2016): Heller, H. (2016): Wasserkonzessionen nach der Vergaberechtsform, in: EWeRK 3/2016, S. 210–216, Baden-Baden.

[v] DVGW Deutscher Verband des Gas- und Wasserfaches (2008): Technische Regel, Arbeitsblatt W 405, Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung, Bonn.

[vi] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg., 2020): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I, S. 459), zuletzt geändert durch Artikel 99 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I, S. 1328), Berlin.

Editorial

In der öffentlichen Wahrnehmung und der politischen Debatte nimmt in den zurückliegenden Jahren der Klimawandel und seine Auswirkungen einen immer größeren Raum ein. Im Zuge der verstärkten Beobachtung der Folgen des Klimawandels, insbesondere vor dem Hintergrund der Extremsommer, werden Ideen und Konzepte zum „sparsamen“ Umgang mit der Ressource Wasser in die öffentliche und politische Diskussion wieder verstärkt eingeführt.

Klimawandel, Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und ein noch stärkeres Bewusstsein für Ressourcenschonung stellen eine zunehmende Herausforderung für die Wasserversorgung und deren nachhaltige Weiterentwicklung dar. Hinzu kommt ein zunehmend kritisches Bewusstsein über die Grenzen der Verfügbarkeit von Ressourcen. Dies gilt auch für die Kreislaufressource Wasser in Deutschland.

Die kostenintensive technische Infrastruktur hat eine sehr lange Lebensdauer, so dass neue Investitionen für eine generationsübergreifende Auslegung des Trinkwassernetzes frühzeitig und sorgfältig abgewogen werden müssen. Integrierte Systemlösungen von Trink- und Betriebswassernetzen beschränken sich derzeit lokal begrenzt auf Neubaugebiete oder Innovationsquartiere.

Eine nachhaltige und resiliente öffentliche Trinkwasserversorgung ist die Voraussetzung für den Bestand und die weitere Entwicklung menschlicher Ansiedlungen ganz generell. Eine Substitution von Trinkwasser kann nur in einigen definierten Anwendungsfällen erfolgen. Die Trinkwasserverordnung definiert Trinkwasser als „Wasser für den menschlichen Gebrauch“. Dies umschreibt das gesamte Spektrum an menschlichen Nutzungen für die eine entsprechende Trinkwasserqualität zur Sicherung der Hygiene unabdingbar ist. Eine Substitution von Trinkwasser kann nur in einigen definierten Anwendungsfällen erfolgen. Statistisch stehen maximal bis zu einem Drittel des täglichen Trinkwasserverbrauchs der Bevölkerung zur Trinkwassersubstitution zur Verfügung.

Im Zusammenhang mit der Nutzung von Betriebswasser im Haushalt ergibt sich neben der hygienisch unabdingbaren Bereitstellung von Trinkwasser die Notwendigkeit eines zweiten Leitungssystems zur Betriebswasserversorgung. Bei der Wassergewinnung ergeben sich Potenziale zur Substitution von Grundwasser nur dann, wenn als Ressource für die Betriebswasserversorgung z. B. auf Oberflächenwasser, Regenwasser oder Grauwasser zurückgegriffen wird.

Eine Substitution von Trinkwasser durch Betriebswasser, in welcher Form und Güte auch immer, kann unter bestimmten Umständen einen Beitrag für eine nachhaltige und ressourcenschonende Bereitstellung von Trinkwasser liefern. Eine deutliche Reduzierung oder eine Trendumkehr zur Deckung des aufgrund der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung weiter ansteigenden Trinkwasserbedarfs kann entgegen optimistischen Erwartungen von Dritten aber nicht ohne weiteres unterstellt werden. Hierfür sind differenzierte Untersuchungen erforderlich.

Der nachhaltigste Umgang mit Wasser, ist mit Blick auf den damit verbundenen ökologischen Fußabdruck, unabhängig davon ob Trink- oder Betriebswasser genutzt wird, eine möglichst effiziente Nutzung der Ressource. Im Hinblick auf die Begrenztheit aller Ressourcen ist ein möglichst sparsamer Umgang mit den dafür erforderlichen Materialien und der Energie zur Versorgung mit Trink- und Betriebswasser notwendig.

Bei der Bewertung der Potenziale und verschiedener Varianten der Betriebswassernutzung sind daher Aspekte zu beachten, die weit über die Frage der eigentlichen Trinkwassersubstitution hinausgehen.

Um in Würdigung der vorgenannten Rahmenbedingungen dazu beizutragen eine informierte Diskussion zum Thema Substitution von Trinkwasser zu ermöglichen, haben wir uns entschlossen, die vorliegende Studie zu beauftragen.

Elisabeth Jreisat
Geschäftsführerin Hessenwasser

Veranlassung des Auftraggebers

Die öffentliche Wasserversorgung ist eine Aufgabe der Daseinsvorsorge und umfasst damit alle Maßnahmen bzw. Dienstleistungen, die für das Leben und Zusammenleben der Bürger*innen in der örtlichen Gemeinschaft existenziell notwendig sind. Der Gesamtprozess der öffentlichen Wasserversorgung beinhaltet neben den Teilbereichen der Gewinnung, der Aufbereitung, des Transports und der Verteilung von Trink- und Betriebswasser auch noch weitere Aufgaben, unabhängig davon, ob die Wasserversorgung nur im Gemeindegebiet oder auch z. B. die Wassergewinnung auf Gemarkungen anderer Gemeinden stattfindet. Von Seiten der Stadt Frankfurt am Main wurde der Gesamtprozess auf die Mainova AG und die Hessenwasser GmbH & Co. KG übertragen.

Die Hessenwasser, als Auftraggeber der vorliegenden Studie, ist verantwortlich für die Beschaffung und Bereitstellung von Trink- und Betriebswasser an die Mainova, der die Versorgung der Stadt Frankfurt am Main obliegt. Über den regionalen Leitungsverbund der Hessenwasser werden die Großstädte Frankfurt, Wiesbaden und Darmstadt sowie weitere 50 Kommunen und Verbände in der Region ganz oder teilweise mit Trinkwasser beliefert. Jährlich stellt die Hessenwasser rund 112 Millionen Kubikmeter Trinkwasser für nahezu 2,4 Millionen Menschen bereit.

Die Wasserversorgung in der Metropolregion Frankfurt Rhein-Main basiert auf einem Zusammenwirken zwischen örtlicher und regionaler Wassergewinnung verbunden durch Wasserversorgungsstrukturen, die sich in den vergangenen 100 Jahren historisch entwickelt und bewährt haben. Im Zentrum dieses Verbundsystems befindet sich mit den großen Städten Frankfurt am Main, Offenbach, Darmstadt, Wiesbaden und Mainz der Kernbereich der „Bedarfsregion“. Die umgebenden dünner besiedelten Teile der Region, weisen teilweise ein unverzichtbares Wasserressourcenpotenzial auf, über das die Metropolregion maßgeblich versorgt wird. Dazu zählen die Wasservorkommen im Hessischen Ried und im Vogelsberg. Die großen Wasserwerke der regionalen Verbundunternehmen bilden zusammen mit einer Vielzahl lokaler kommunaler Wasserwerke das Rückgrat der öffentlichen Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region.

In einer Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region (Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main -WRM-, Fortschreibung Juli 2016) wurde dazu ausgeführt, dass das komplexe System der Mengenvorhaltung zur flexiblen Grundwasserbewirtschaftung in Verbindung mit den bestehenden Rahmensetzungen – u. a. durch den Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried und den Leitfaden zur umweltschonenden Wassergewinnung im Vogelsberg und dem damit verbundenen regionalweiten nachhaltigen Ressourcenmanagement – resilient gegenüber äußeren Einflüssen ist.

Die zukünftige Sicherstellung der Wasserversorgung der Metropolregion steht jedoch durch den Klimawandel und das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen.

Im Jahr 2018 hat die Hessenwasser aufbauend auf der Situationsanalyse der WRM den zukünftigen Handlungsbedarf bis in das Jahr 2030 in ihrem Verantwortungsbereich in

einem „Regionalen Wasserbedarfsnachweis“ konkretisiert. Nach der aktuellen Wasserbedarfsprognose bis 2030 ist aufgrund des erwarteten Bevölkerungswachstums mit hoher Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, dass der Wasserbedarf in den nächsten Jahren weiter ansteigen wird. Zur Abdeckung des zusätzlichen Wasserbedarfs sollen insbesondere der Erhalt und die Stärkung der ortsnahen Wassergewinnung und der Ausbau des Instruments der Grundwasseranreicherung durch Infiltration von aufbereitetem Oberflächenwasser aus dem Rhein und Main als Basis für eine umwelt- und klimagerechte dynamische und flexible Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen beitragen.

Die Hessenwasser bzw. deren Gründungsunternehmen und der Wasserverband Hessisches Ried, mit Sitz in Biebesheim, haben sich schon frühzeitig den Fragen einer resilienten und zukunftsfähigen Ausgestaltung der Trink- und Betriebswasserversorgung gestellt. Durch die in den letzten Jahrzehnten umgesetzten Maßnahmen werden jährlich über 40 Mio. m³ Betriebswasser zur Substitution sowie zum Schutz der natürlichen Grundwasserressourcen als auch zur Betriebswasserversorgung von Direktabnehmern zur Verfügung gestellt. Die bereitgestellten Betriebswassermengen entsprechen rund 50 % der Eigengewinnung der Hessenwasser und zeigen das bereits aktuell realisierte Ausmaß an nachhaltiger und effizienter Grundwasser- und Trinkwassersubstitution im Ballungsraum auf. Mit dem Ausbau der bestehenden regionalen und örtlichen Betriebswasserinfrastruktur zur Substitution von natürlich gebildeten Grundwasser durch die Infiltration von aufbereitetem Oberflächenwasser würde sich das vorhandene Potenzial deutlich vergrößern, sodass der erwartete zukünftige Trinkwassermehrbedarf damit weitgehend abgedeckt werden könnte, ohne dass zusätzliche neue Infrastruktursysteme geschaffen werden müssten.

Neben der Stärkung der umweltschonenden Wassergewinnung durch den Ausbau der vorhandenen zentralen Strukturen zur Grundwasser- und Trinkwassersubstitution im Stadtgebiet von Frankfurt am Main (Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main, 2021) werden entsprechende Trinkwassersubstitutionspotenziale auf lokaler Ebene durch objektbezogene sowie quartiersbezogene Betriebswassersysteme im Siedlungsbereich gesehen. Ziel der Studie ist es, diese aufzuzeigen und im Hinblick auf eine mögliche Umsetzung bis zu Jahre 2050 zu bewerten.

Die Studieninhalte gehen dabei weit über eine reine Abschätzung des Trinkwassersubstitutionspotenzials hinaus. Untrennbar verbunden mit der verstärkten Nutzung von Betriebswasser sind sozio-ökonomische und ökologische Fragestellungen, die sich aus den erforderlichen Aufwendungen für den Bau der Betriebswasserinfrastruktur und den Betrieb der Aufbereitungs- und Verteilungsinfrastruktur ergeben und die mit in die Bewertung des Trinkwassersubstitutionspotenzials eingehen müssen.

Hessenwasser GmbH & Co. KG

Zusammenfassung

Mit der Studie wurde das Ziel verfolgt, das Trinkwassersubstitutionspotenzial inkl. der damit einhergehenden Aufwendungen unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer als auch ökologischer Aspekte der Stadt Frankfurt am Main bis zum Jahre 2050 aufzuzeigen und zu bewerten.

Aufbauend auf umfangreichen Erhebungen zur Thematik Trinkwasserbedarf und -substitution inkl. Auswertung aktueller und früherer Gutachten zur Abschätzung des Potenzials zur Betriebswassernutzung in der Stadt Frankfurt am Main erfolgte anhand zwei unterschiedlicher Quartiere eine sozio-ökonomische und eine ökologische Bewertung möglicher Trinkwassersubstitutionspotenziale. Die Erhebung von (z.T. in Frankfurt am Main bereits realisierten) Substitutionsmöglichkeiten weiterer städtischer Strukturen erlaubte eine Extrapolation auf die Gesamtstadt. Zukunftsaussagen wurden aufbauend auf szenarischen Betrachtungen möglich: Zur Reduzierung der Unsicherheiten bei der Projektion des Trinkwassersubstitutionspotenzials wurden die Szenarien „Trend“ und „Besondere Anstrengung“ mit unterschiedlichen strategischen Gestaltungsoptionen entlang von technischen und politischen Maßnahmen entwickelt. Die Szenarien wurden durch die im Vorausblick erforderliche Einbeziehung der Bevölkerungsentwicklung in Form einer Minimal- und Maximalbetrachtung, zur Extrapolation auf den Prognosehorizont 2050 ergänzt. Das Szenario „Trend“ ist konservativ angelegt und schreibt die aktuellen Entwicklungen im Rahmen der Umsetzung wassersparender und trinkwassersubstituierender Techniken fort. Das Szenario „Besondere Anstrengungen“ setzt von Seiten der Kommune eine politische Entscheidung für eine öffentliche Betriebswasserversorgung durch lokale Betriebswassernetze insbesondere auch im Wohnungsbestand und deren Mitgestaltung voraus.

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse, die im Rahmen der Studie gewonnen wurden, dargestellt:

- Betriebswasser steht in der Stadt Frankfurt am Main gebietsabhängig in unterschiedlicher Quantität und Qualität zur Verfügung. Die Herausforderung bei der Nutzung von Betriebswasser besteht darin, den zur Trinkwassersubstitution erforderlichen gebietsspezifischen Ressourcenmix (Regen-, Oberflächen-, Grund- und Grauwasser) so zu gestalten, dass dieser den möglichen Bedarf immer in der erforderlichen Menge und gewünschten Güte abdecken kann.
- Ausgehend von einem Trinkwasserbedarf der Haushalte (inkl. Kleingewerbe) von 118 l/Einwohner*innen (E) und Tag (d) bezogen auf die Einwohner*innen besteht die Möglichkeit, dass im häuslichen Bereich ca. 39 l(E*d) des täglichen Trinkwasserbedarfs durch die Nutzung von Betriebswasser für die Toilettenspülung, die Raumreinigung und Gartenbewässerung substituiert werden können. Dabei sind eine Schädigung der menschlichen Gesundheit oder nachteilige Einflüsse auf die menschliche Gesundheit bei sachgemäßem Einsatz von Betriebswasser nicht zu besorgen. Bei der Projektion des Trinkwassersubstitutionspotenzials wurde in Abhän-

gigkeit verschiedener Wohnformen anteilmäßig auch die Nutzung von Betriebswasser zum Wäsche waschen (ca. 8 l/Einwohner*innen (E) und Tag (d)) mit einberechnet.

- In der Projektion für das Jahr 2050 wurde ein Trinkwassersubstitutionspotenzial zwischen 0,5 Mio. m³/a (Szenario „Trend“) und 6,6 Mio. m³/a (Szenario „Besondere Anstrengungen“, einschließlich Gewerbe etc.) in Abhängigkeit von der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung und der Umsetzungsintensität ermittelt.
- Das Trinkwassersubstitutionspotenzial im Jahr 2050 wird maßgeblich durch die Betriebswassernutzung in den Wohngebäuden bestimmt. Zur raschen Ausschöpfung des maximal möglichen Einsparpotenzials im häuslichen Bereich von 5,6 Mio. m³/a wäre es u. a. erforderlich, weitgehend eine „wassersensitive“ Regenwassernutzung im Wohnbestand zur Gartengestaltung und klimaadaptiven Verdunstung umzusetzen.
- Bei der Extrapolation der Szenarien wurde keinesfalls von einer maximalen Umsetzung der ermittelten theoretischen Potenziale ausgegangen, da einerseits die Möglichkeit der technischen Realisierung derzeit noch nicht genau abgeschätzt werden kann und offene Fragen zur Qualitätssicherung der herangezogenen Datensätze im Rahmen dieses Gutachtens nicht in ausreichender Tiefe beantwortet werden konnten.
- Bei den integrierten Bewertungsgrundlagen sollte berücksichtigt werden, dass bei einer Transformation realistisch nur eine Transformationsquote (Umbau auf Betriebswassernutzung) im häuslichen Bereich von schätzungsweise max. 90 % zu veranschlagen sind.
- Unter der Annahme, dass die Stadt Frankfurt am Main aktiv den Ausbau semizentraler und grundstücksbezogener Betriebswasseranlagen mitgestaltet und fördert, lässt sich eine flächendeckend anteilige Substitution von Trinkwasser in allen Frankfurter Stadtteilen unter vollständiger Ausschöpfung des theoretischen Substitutionspotenzials für 2050 voraussichtlich frühestens 2080 erreichen.
- Die mit Hilfe der Szenarien übergreifend ermittelten Trinkwassersubstitutionspotenziale dürfen daher keinesfalls als Vorhersagen verstanden werden. Zudem wandeln sich Entwicklungsmuster, wie die Covid-19-Pandemie 2020/21 deutlich gezeigt hat.
- Die zur Hebung des ausgewiesenen Trinkwassersubstitutionspotenzials im Szenario „Besondere Anstrengungen“ notwendigen Aktivitäten sind auf folgende Handlungsfelder adressiert:
 - Durch einen Masterplan Betriebswasserversorgung inkl. der Einrichtung einer Koordinationsstelle zur Abstimmung zwischen Stadtplanung, Wasserversorgung, Stadtentwässerung und Wohnungswirtschaft und das Satzungsrecht kann die Kommune steuernd bei der Ausgestaltung der Betriebswasserversorgungsstrukturen in der Stadt mitwirken.
 - Bei einer wohnblockübergreifenden Versorgung verbunden mit der Nutzung öffentlichen Raumes haben sich zudem Konzessionsverträge als weiteres Instrument der kommunalpolitischen Steuerung bewährt.
 - Sobald Grauwasser eine wichtige Substitutionsquelle wird (was mit einer dezentralen Abschöpfung der Abwärme einhergehen sollte), ist es aus Effizienzgründen

- wünschenswert, dass dessen semizentrale Aufbereitungsanlagen koordiniert bzw. zentralisiert betrieben werden.
- Eine Versorgung mit Betriebswasser kann durch Grundstücks- und Hauseigentümer, aber auch durch unterschiedliche Versorgungsunternehmen betrieben werden.
 - Das Hessische Wassergesetz privilegiert neben der öffentlichen Trinkwasserversorgung auch eine öffentliche Betriebswasserversorgung. Voraussetzung für eine wirkungsvolle Substitution von Trinkwasser ist eine politische Entscheidung der Kommune unter Beachtung bestehender rechtlichen Vorgaben, die Betriebswasserversorgung und -nutzung zu stärken.
 - Grundsätzlich sollte in künftigen Neubaugebieten (und möglichst auch bei Nachverdichtungen) eine Betriebswasserversorgung vorgesehen werden.
 - Im Unterschied zu Wassersparen erfordert die Substitution von Trinkwasser durch alternative Wasserquellen in der Regel den Bau und Betrieb zusätzlicher Infrastrukturen, entweder auf einer Grundstücks- oder einer (teil-)gebietlichen Ebene und bei innerhäuslicher Substitution auch ein zweites Verteilungsnetz im Gebäude.
- Produktion und Bereitstellung von Betriebswasser zur Substitution von Trinkwasser inkl. der dazugehörigen Infrastruktur weisen gegenüber dem bestehenden konventionellen Trinkwasser- und Abwasserinfrastruktursystem einen höheren CO₂-Fußabdruck auf. Der ökologische Fußabdruck des eingesetzten Betriebswassersystems wird maßgeblich von der Einwohnerdichte und dem Bebauungsgrad beeinflusst. Nur in Neubaugebieten mit hohen Einwohnerdichten nähert sich der CO₂-Fußabdruck der eingesetzten Betriebswasserressource dem des konventionellen Trinkwasser- und Abwasserinfrastruktursystems an.
 - Zur Abschätzung zukünftig anfallender Kosten für die Versorgung mit Betriebswasser wurden in ausgewählten Quartieren die Jahressystemkosten für das konventionelle Trinkwasser- und Abwasserinfrastruktursystem den Jahressystemkosten für die Bereitstellung von Betriebswasser aus aufbereitetem Oberflächenwasser des Mains und aufbereitetem Grauwasser gegenübergestellt. Die Jahressystemkosten der Betriebswasservarianten werden bestimmt durch Einwohnerdichte und Gebäudestruktur. Mehrgeschossig ausgeführte kompakte Wohneinheiten weisen gegenüber großräumig, mit bis zu dreigeschossig ausgeführten Gebäuden einen erheblichen Kostenvorteil auf. In Abhängigkeit von den gewählten Betriebswasservarianten nähern sich die Kosten für das bereitgestellte Wasser unter Berücksichtigung der Abwasserkosten denen der konventionellen Trinkwasser- und Abwasserinfrastruktursystem an.
 - Das im Szenario „Besondere Anstrengung“ maximal mögliche Trinkwassersubstitutionspotenzial könnte evtl. dazu führen, dass sobald die Substitutionsrate deutlich über dem Trinkwassermehrbedarf liegt, theoretisch die Fixkosten für Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Speicherung und Verteilung des Trinkwassers pro Kubikmeter ansteigen.

Für den Dateninput danken wir der Hessenwasser, aber auch den beteiligten Mitarbeitenden unterschiedlicher Ämter der Stadt Frankfurt am Main, Mainova, NRM und der Nassauischen Heimstätte. Akteure aus Frankfurter Institutionen, insbesondere mehrere hier ansässige Banken, Fraport und die Goethe-Universität sowie der Landessportbund Hessen, lieferten uneigennützig Informationen, die uns bei der Abschätzung des Betriebswasserbedarfs und der Abschätzung realisierbarer Substitutionswege halfen.

Nicht nur bei der Erstellung der Szenarien, sondern auch für viele weitere Einschätzungen und Kontakte hat uns ein Begleitkreis bestehend aus Mitarbeitenden verschiedener Ämter und Institutionen der Stadt Frankfurt am Main, der Mainova und der NRM mit wertvollen Hinweisen unterstützt.

1. Rechtliche und wirtschaftliche Anforderungen

Die in den folgenden Unterkapiteln dargelegten Ausführungen zu den rechtlichen und wirtschaftlichen Anforderungen ergänzen teilweise die im Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main beschriebenen rechtlichen Prämissen. Im Gesamtkontext spiegeln die Ausführungen im Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main und die im Weiteren dargelegten Sachverhalte den Rahmen der heutigen rechtlichen und wirtschaftlichen Anforderungen an die öffentliche Wasserversorgung wider.

1.1. Wasserversorgung als Aufgabe kommunaler Daseinsvorsorge

Die öffentliche Wasserversorgung mit ihren Teilbereichen der Gewinnung, der Aufbereitung, des Transports und der Verteilung von Wasser zählt zu den im Rahmen der Daseinsvorsorge wahrzunehmenden öffentlichen Aufgaben der Kommune. Nach § 30 HWG haben die Gemeinden in ihrem Gebiet die Bevölkerung und die gewerblichen und sonstigen Einrichtungen ausreichend mit Trink- und Betriebswasser zu versorgen.

Die Aufgabe der Wasserversorgung hat die Kommune im Rahmen der ihr nach Art. 28 Abs. 2 GG zustehenden Selbstverwaltungsgarantie zu erfüllen. Die Aufgabenwahrnehmung obliegt daher der jeweiligen Gemeinde, wobei ihr ein weiter Spielraum zukommt. Im Ergebnis muss allerdings eine sichere Wasserversorgung gewährleistet werden. Hierzu hat die Gemeinde im Rahmen der bestehenden gesetzlichen Vorgaben und nach den von ihr festzulegenden Maßstäben die Selbstverwaltungsaufgaben selbstständig, ggf. gemeinsam mit ihren Wasserbeschaffungs- und dem Wasserversorgungsunternehmen bzw. durch diese, im Rahmen ihrer Konzeption und Planung auch zukünftige veränderte Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Solche geänderten Rahmenbedingungen können sich z. B. aus dem Klimawandel oder aus der demographischen Entwicklung ergeben. Die Gemeinde ist mit Blick auf die zentrale Bedeutung der Wasserversorgung gesetzlich verpflichtet, die Versorgung im erforderlichen Umfang dauerhaft und auch in Notsituationen in ausreichender Qualität und Quantität zu gewährleisten. Eine perspektivische Planung auf Grundlagen von Prognosen ist erforderlich, um Versorgungsausfälle durch eine angepasste Ausrichtung der Bedarfsplanung zu vermeiden.

Zur Aufgabenerfüllung ist die Gemeinde hinsichtlich der Wassergewinnung nicht auf das Gemeindegebiet beschränkt. Nach dem Grundsatz der ortsnahen Wasserversorgung ist der Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung vorrangig aus ortsnahen Wasservorkommen zu decken, soweit überwiegende Gründe des Wohls der Allgemeinheit dem nicht entgegenstehen. Der Bedarf darf ausnahmsweise dann mit Wasser aus ortsfernen Wasservorkommen gedeckt werden, wenn eine Versorgung aus ortsnahen Wasservorkommen nicht in ausreichender Menge oder Güte bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand sichergestellt werden kann. Ortsnähe bedeutet in diesem Zusammenhang nicht örtlich und lässt sich räumlich nicht scharf abgrenzen. Ortsnah sind Gewinnungsgebiete jedenfalls dann, wenn sie einem wasserwirtschaftlichen Kriterium folgenden räumlichen (örtlichen oder regionalen) Zusammenhang zum Versorgungsgebiet stehen.

Zum Schutz der bestehenden und künftigen öffentlichen Wasserversorgung vor nachteiligen Einwirkungen ist insbesondere die Möglichkeit der Festsetzung von Wasserschutzgebieten zu nutzen. Eine Ausweisung von Wasserschutzgebieten erlaubt, die gefährdete Ressource Wasser, speziell das für die Trinkwasserversorgung besonders zentrale Grundwasser, schon im Vorfeld konkreter Gefährdungen vor Beeinträchtigungen in ihrem Bestand (Qualität und Quantität) zu bewahren und nicht erst durch künstliche Aufbereitungsmaßnahmen trinkbar zu machen.

1.2. Wasserversorgung im Krisenfall

Kann der Wasserversorger die von ihm für die Kommune betriebene öffentliche Trinkwasserversorgung (Quantität und Qualität des Trinkwassers) in einem Krisenfall nicht aufrechterhalten, so können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden.

Zum einen ist bereits vor Eintritt dieser Situation bei einem konkret drohenden Ausfall der leitungsgebundenen öffentlichen Wasserversorgung der Erlass einer Gefahrenabwehrverordnung auf der Grundlage des Hessischen Gesetzes über die öffentliche Sicherheit und Ordnung (HSOG) möglich. Damit kann die Verwendung von Trinkwasser für bestimmte Zwecke (z.B. Bewässerung) untersagt oder eingeschränkt werden mit dem Zweck, einen Ausfall der öffentlichen Wasserversorgung zu vermeiden.

Soweit eine gegenwärtige Gefahr für die öffentliche Sicherheit abgewehrt werden kann, kann das Versorgungsunternehmen entsprechend § 8 Abs. 2 Satz 1 WHG handeln, sofern dessen Voraussetzungen vorliegen. Auch wenn das erteilte Wasserrecht ausgeschöpft ist und die zugelassenen maximalen Entnahmemengen erreicht sind, kann auf dieser rechtlichen Grundlage eine weitergehende Inanspruchnahme des Gewässers erfolgen, auch mit einer Menge, die über die zugelassene Entnahmemenge hinausgeht. Voraussetzung ist allerdings, dass der drohende Schaden schwerer wiegt als die mit der Benutzung verbundenen nachteiligen Veränderungen von Gewässereigenschaften. Auch ist die zuständige Behörde unverzüglich über die weitergehende Förderung zu informieren. Diese eher sehr restriktiv nutzbare Rechtsgrundlage entbindet die Kommune und ihre Wasserversorgungsunternehmen nicht von einer tragfähigen Planung, die gerade auch die sich ändernden Bedarfe und Dargebote unter dem Aspekt des Klimawandels und demographischen Wandels berücksichtigt. Die Verpflichtung, ausreichend Vorsorge zu treffen gilt nach wie vor. § 8 Abs. 2 Satz 1 WHG ist nur anwendbar, wenn es sich um unvorhersehbare Notsituationen handelt, die trotz ausreichender Planung und Versorgung eintreten.

Nur im Verteidigungsfall greift das Wassersicherstellungsgesetz (WaSiG). Mit in diesem Zusammenhang vorzuhaltenden Notbrunnen soll eine Grundversorgung mit Wasser aufrechterhalten werden. Diese umfasst die Deckung des lebensnotwendigen Bedarfs an Trinkwasser, die Versorgung mit Betriebswasser im unentbehrlichen Umfang und die Deckung des Bedarfs an Löschwasser. Eine Diskussion über eine Erweiterung oder Neukonzeption des Wassersicherstellungsgesetzes, um die Wasserversorgung auch in anderen Krisenfällen wie Naturkatastrophen entsprechend der gesetzlichen Regelung im Wassersicherstellungsgesetz zu gewährleisten, steht bisher aus.

1.3. Löschwasservorhaltung

Zusätzlich zu dieser wasserrechtlichen Versorgungspflicht der hessischen Gemeinden sind die Gemeinden Aufgabenträger nach § 2 des Hessischen Gesetzes über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (HBKG). Sie haben zur Erfüllung ihrer Aufgaben im Brandschutz und in der Allgemeinen Hilfe „für eine den örtlichen Verhältnissen angemessene Löschwasserversorgung zu sorgen“ (§ 3 Abs. 1 Nr. 4 HBKG). Diese unterschiedlichen kommunalen Aufgaben sind rechtlich nicht integriert, sondern additiv gefasst (vgl. § 30 Abs. 2 HWG).

Im Rahmen des Brandschutzes und der allgemeinen Hilfe im Katastrophenfalle greift die Kommune auf das bestehende Trinkwasserverbundnetz mit den dort angeschlossenen Hydranten sowie im Falle der Stadt Frankfurt am Main auf die Oberflächengewässer Main und Nidda zurück.

Wenn das Löschwasser über das Leitungsnetz der öffentlichen Trinkwasserversorgung bezogen wird, sind Anforderungen aus dem technischen Regelwerk des DVGW zu berücksichtigen

1.4. Anforderungen an die Entnahme von Grundwasser

Die rechtliche Grundlage der Wasserversorgung von Frankfurt am Main sind die Wasserrechte zur Entnahme von Wasser, um dieses dann zu Trink- oder Betriebswasser aufzubereiten und über Transport- sowie Verteilleitungen den Einwohner*innen oder Dritten leitungsgebunden zur Verfügung zu stellen. Die Inhaberin der Rechte zur Gewinnung von Grund- und Oberflächenwasser ist die Hessenwasser GmbH & Co. KG, die mit den entsprechenden Anlagen die Kommunen in der Metropolregion Frankfurt Rhein-Main mit Trink- und Betriebswasser versorgt. Die öffentliche Wasserversorgung genießt den Vorrang vor anderen Benutzungen des Grund- und Oberflächenwassers. Dabei sind die Vorgaben der gesetzlichen Regelwerke bei jeder wasserrechtlichen Vorhabenzulassung im Einzelfall strikt zu beachten.

Ausnahmen von der Zulassungserfordernis bei Grundwasserentnahmen bestehen für kleinere Entnahmemengen. Nach § 29 HWG in Verbindung mit § 45 Abs. 1 ist eine wasserrechtliche Bewilligung nicht erforderlich, „soweit eine Entnahme, Zutageförderung, Zutageleitung oder Ableitung von Grundwasser für gewerbliche Betriebe, für die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft oder den Gartenbau jeweils in einer Menge von bis zu 3600 m³ pro Jahr erfolgt.“ Auch die Entnahme zur Versorgung des eigenen Haushalts (einschließlich der Bewässerung des Hausgartens) ist zulassungsfrei. Die Nutzung ist der Wasserbehörde einen Monat vor Beginn der Entnahme anzuzeigen.

1.5. Anforderungen an die Entnahme von Oberflächenwasser

Neben den allgemeinen wasserrechtlichen Anforderungen zur Erlangung einer Genehmigung zur Entnahme von Oberflächenwasser sind insbesondere die Mindestwasserführung nach § 33 WHG sowie das Verschlechterungsverbot nach § 27 WHG einzuhalten.

Insbesondere die Anforderungen der Mindestwasserführung nach § 33 WHG wird bei einer stärkeren Inanspruchnahme von Oberflächengewässern relevant werden. Diese Anforderungen werden nicht gerade für Main und Rhein relevante Beschränkungen mit sich führen. Für kleinere Oberflächengewässer im Sinne von kleinen Flüssen und Bächen wird sich bei einer Inanspruchnahme verstärkt die Frage stellen, ob gerade in Trockenjahren die Mindestwasserführung bei gleichzeitiger Entnahme von Wasser aus dem Oberflächenwasser gewährleistet sein kann. Gerade bei quellwassergespeisten kleineren Fließgewässern geht die Wassermenge in den trockenen Phasen erheblich zurück und zugleich ist in diesen Zeiten mit der höchsten Entnahme aus dem Oberflächengewässern zu rechnen. Gerade bei der Förderung von Betriebswasser aus Oberflächengewässern ist daher für Trockenperioden die Anforderung der Mindestwasserführung im Hinblick auf das Dargebot für die Betriebswassernutzung in Trockenperioden genau zu betrachten.

1.6. Qualitätsanforderungen an Trinkwasser und den Betrieb von Trinkwasserversorgungsanlagen

Die Trinkwasserverordnung (TrinkwV) regelt die Qualität des Trinkwassers für den menschlichen Gebrauch und bezweckt neben dem Schutz der menschlichen Gesundheit vor nachteiligen Einflüssen, wie etwa der Verunreinigung durch Krankheitserreger oder Stoffe in gesundheitsgefährdender Konzentration, auch die Genussstauglichkeit und Reinheit des Trinkwassers. In der TrinkwV wird neben den speziellen Anforderungen an die Qualität auch die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik bei der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung verlangt. Diese können insbesondere in technischen Normen und Vorschriften des Deutschen Institut für Normung und des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. enthalten sein.

In der TrinkwV werden die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse in Bezug auf die stetig steigenden Qualitätsanforderungen dynamisch berücksichtigt und detaillierte Vorgaben zur Trinkwasseraufbereitung und zum Desinfektionsverfahren getroffen. Zudem legt sie den Unternehmern und sonstigen Inhabern einer Wasserversorgungsanlage zum Zweck der Kontrolle der Einhaltung der Anforderungen durch das zuständige Gesundheitsamt, umfangreiche Anzeige-, Untersuchungs-, Dokumentations- und Informationspflichten auf.

Zur Erfüllung der Anforderungen erfolgt neben der Endkontrolle des Trinkwassers am Wasserwerksausgang auch eine systemische Untersuchung ausgehend vom Grundwasser über die Aufbereitung und den Transport bis zur Übergabestelle zum Verbraucher, um jederzeit eine einwandfreie Beschaffenheit garantieren zu können. Dem zuständigen Gesundheitsamt werden regelmäßig entsprechende Analysenberichte zur Verfügung gestellt. Ab der Übergabestelle, formal nach der Hauptabsperrarmatur, de facto ab dem Wasserzähler, geht die Verantwortung für die Trinkwasserqualität auf den Hauseigentümer über.

Trinkwasser dient nach Definition der TrinkwV zum Verzehr, zur Zubereitung von Speisen und Getränken, zur Körperpflege und -reinigung sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen und die bestimmungsgemäß nicht nur vorübergehend mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen. Der größte Teil des täglich verbrauchten Trinkwassers wird für die Körperpflege und für sanitäre Anlagen aufgewendet.

Kleinanlagen zur Eigenversorgung mit Trinkwasser, ihre Eigner und ihre Nutzer sind aus Gründen der hygienischen Vorsorge nach § 13 Abs. 3 TrinkwV in Verbindung mit § 13 Abs. 1 TrinkwV in Deutschland grundsätzlich anzuzeigen. Nach § 13 Abs. 4 TrinkwV muss der Betreiber oder Inhaber auch jede Betriebswasserversorgung, die im Haushalt zusätzlich zu den Trinkwasserversorgungsanlagen besteht, der Gesundheitsbehörde anzeigen, damit diese einen entsprechenden Überblick hat und in einer Gefährdungslage überprüfen kann, ob evtl. auftretende Infektionen auf Fehlgebrauch bzw. Fehlanlüsse zurückzuführen sind. Für Betriebswasserversorgungsanlagen, die nicht im Haushalt installiert sind, weil sie z.B. alleine der Gartenversorgung dienen, besteht hingegen keine Anzeigepflicht.

1.7. Anforderungen an Betriebswasserqualität, den Betrieb bzw. die Nutzung von Betriebswasseranlagen

Im Unterschied zu Trinkwasser gibt es weder im deutschen Recht noch im europäischen Gemeinschaftsrecht umfassendere Regelungen für die Gewinnung, Speicherung und Verteilung von Betriebswasser. Die Nutzung von Wasser in Betriebswasserqualität, insbesondere für häusliche Zwecke, erfährt eine gewisse rechtliche Rahmensetzung durch pauschale Zielsetzungen auf der europa- und nationalrechtlichen Ebene mit fehlendem unmittelbarem Verbindlichkeitsgrad bis hin zu ebenfalls eher pauschalen Ansätzen im Hessischen Wassergesetz, wird aber der Sache nach bislang insbesondere hinsichtlich beschränkter Einsatzmöglichkeiten vor allem für häusliche Zwecke in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) und im Infektionsschutzgesetz (IfSG), auch nicht unmittelbar mitgeregelt.

So wird zwar in § 36 HWG die Verwertung von Betriebswasser und Niederschlagswasser sowie der Verweis von gewerblichen Wassernutzungen auf Betriebswasser besonders betont, aber unter den Vorbehalt bestehender technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten gestellt. Der Verbindlichkeitsgrad ist hier ebenfalls nicht vorhanden, da lediglich darauf hingewirkt werden soll.

Nach § 3 Abs. 2 TrinkwV gelten die Regelungen der TrinkwV grundsätzlich nicht für Betriebswasseranlagen. Sind solche Anlagen jedoch anstelle von Trinkwasserversorgungsanlagen vorgesehen, dann gelten die Anforderungen der TrinkwV dennoch.

Die TrinkwV regelt damit konkret die Anforderungen an die Qualität von Wasser, das für den menschlichen Gebrauch bestimmt ist. Damit ist entscheidend, dass verordnungsrechtlich eine bestimmte Qualität des Wassers immer dann vorgeschrieben ist, wenn dieses Wasser für den menschlichen Gebrauch bestimmt ist, wozu nicht nur die

Nutzung als Trinkwasser im Sinne eines engen Verständnisses des Trinkens zu zählen ist. Vielmehr kommt es darauf an, ob das Wasser unmittelbar in Kontakt mit dem menschlichen Körper selbst kommt oder aber Gegenständen, die selbst nicht nur vorübergehend mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen. Alleine die Rechtsgrundlage zum Erlass der TrinkwV, § 38 IfSG, macht deutlich, dass es hier um den hygienischen, insbesondere den seuchenhygienischen Schutz geht. Vor diesem rechtlich insgesamt recht rudimentär normativ geregelten Bereich der Betriebswassernutzung ergibt sich, dass es nicht grundsätzlich ausgeschlossen ist, Betriebswasser für die Toilettenspülung und für Bewässerungszwecke im Garten, ggf. auch Dritten (z. B. Mieter*innen in einem Mehrfamilienhaus oder in einem Büro) zur Verfügung zu stellen.

Eine Verpflichtung zur Nutzung von Betriebswasser für diese Nutzungszwecke besteht für den Betreiber einer Hauswasseranlage unmittelbar nicht und kann je nach Nutzung nur aufgrund weitergehender rechtlicher Grundlagen begründet werden. Zudem können die zuständigen Gesundheitsbehörden die Verwendung von Betriebswasser zu solchen beispielhaft erwähnten Nutzungen einschränken, insbesondere in Kindergärten, Schulen, Heimen oder Ferienlagern.

Umstritten ist, ob Betriebswasser zum Wäschewaschen genutzt werden darf. § 3 Nr. 1 Buchstabe a TrinkwV verlangt hingegen für die Reinigung von Gegenständen, die bestimmungsgemäß nicht nur vorübergehend mit dem menschlichen Körper in Kontakt (etwa für das Waschen von Kleidung, Hand- und Spültüchern) oder die bestimmungsgemäß mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, ausdrücklich „Trinkwasser“. Die Qualitätsanforderungen der TrinkwV gelten jedoch § 2 Abs. 2 TrinkwV zur Folge nicht für Anlagen und Wasser aus Anlagen, die zur Entnahme oder Abgabe von Wasser bestimmt sind, dass keine Trinkwasserqualität hat, aber in Haushalten zusätzlich zu Trinkwasserversorgungsanlagen vorhanden sind. Entsprechend wird zum Teil gefolgert (so durch das Verwaltungsgericht Arnberg in seiner Entscheidung vom 4. April 2005, Az. 14 K 2304/04 oder das Verwaltungsgericht Weimar in seiner Entscheidung vom 13. Juli 2005, AZ 6 K 938/02), dass die Bestimmungen der TrinkwV auf Betriebswassernutzungsanlagen (und auf Wasser aus solchen Anlagen) grundsätzlich nicht anwendbar seien, wenn eine solche Anlage zusätzlich zu einem Anschluss an die Trinkwasserversorgung betrieben würde. Dies entspricht auch den Motiven des Gesetzgebers, die in der Begründung zur Trinkwasserverordnung deutlich werden: „Aus dem Schutzzweck der Vorschrift ergibt sich, dass in diesem Zusammenhang neben der Reinigung der Kleidung auch die von Hand- und Spültüchern betroffen ist. Daraus folgt, dass in jedem Haushalt die Möglichkeit bestehen muss, zum Waschen der Wäsche Wasser mit der Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (also Trinkwasser, d. Verf.) zu nutzen. Ob daneben ein Anschluss besteht und genutzt wird, der Wasser geringerer Qualität liefert, bleibt der eigenen Verantwortung und Entscheidung des Verbrauchers überlassen.“ (Korthals und Roth 2003: 31ff.). Entsprechend dieser Sicht besteht (auch für das Umweltbundesamt) Rechtssicherheit, wenn in den Wohnungen für die Waschmaschine und die Geschirrspülmaschine doppelte Anschlüsse vorhanden sind, so dass die Nutzer*innen hier eine Wahlfreiheit zwischen Betriebswasser und Trinkwasser vorfinden (Ginzky et al. 2005: 32)

Auch wenn das Bundesverwaltungsgericht (BVerwG) eine freiwillige Verwendung von Niederschlagswasser zum Wäschewaschen in Betracht kommen lässt, so dürfte vor dem Hintergrund der vorangehenden Ausführungen jegliche rechtliche Verpflichtung zur Nutzung zum Wäschewaschen oder auch zum Geschirrspülen nicht zulässig sein.

Einer aktiven infektionshygienischen Überwachung durch das Gesundheitsamt unterliegen nach § 36 IfSG sog. Gemeinschaftseinrichtungen, in denen überwiegend Säuglinge, Kinder oder Jugendliche betreut werden (z. B. Kinderkrippen und -gärten, Schule, Heime, Ferienlager), Krankenhäuser sowie Seniorenheime und Justizvollzugsanstalten. Die Einrichtungen müssen in Hygieneplänen innerbetriebliche Verfahrensweisen zur Infektionshygiene festlegen.

Auch bei Gaststätten prüft die zuständige Behörde nach den seuchenhygienischen Bestimmungen vorsorgend, welche Verwendungen von Betriebswasser im Einzelfall akzeptabel sind. Zu beachten ist hier vor allem die besondere Vulnerabilität der jeweiligen Personengruppe. In der Regel wird die Nutzung von Betriebswasser für WC-Spülungen in Krankenhäusern und Seniorenheimen wegen der besonderen infektionshygienischen Anforderungen daher nur in Ausnahmen erlaubt werden, während der Einsatz von Betriebswasser in Toiletten von z. B. Gaststätten unproblematisch sein dürfte (Ginzky et al. 2005: 31).

Wegen der Verwechslungsgefahr mit Trinkwasserleitungen schreibt § 17 Abs. 6 der TrinkwV vor, dass Betriebswasserleitungen farblich anders gekennzeichnet sind; zudem sind die Entnahmestellen von Betriebswasser deutlich zu markieren. Nach § 17 Abs. 6 der TrinkwV dürfen Betriebswasseranlagen zudem nur bei einer Rückflusssicherung mit Trinkwasserleitungen verbunden werden. Diese Anforderungen werden in der DIN-Norm 1988 (Technische Regeln für die Trinkwasserinstallation), der DIN-Norm 1989 (Regenwassernutzungsanlagen), der DIN EN 1717 (Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigungen in Trinkwasserinstallationen) und dem DVGW-Arbeitsblatt W 555 zur „Nutzung von Regenwasser (Dachablaufwasser) im häuslichen Bereich“ weiter konkretisiert. Beispielsweise darf den DIN-Normen zufolge eine Trinkwasserleitung überhaupt nicht mit einer Regenwasseranlage verbunden werden (es ist nur ein „freier Ausfluss“ von Trinkwasser in diese gestattet). In diesen technischen Regeln sind auch Einzelheiten zur Inspektion und Wartung von Zisternen bzw. Regenwassernutzungsanlagen vorgeschrieben; hierbei ist der Aufwand für Mehrfamilienhäuser wesentlich höher als für Einfamilienhäuser. Auch das neue Merkblatt DWA-M 277 ist einschlägig, das gemeinsam mit anderen wasserwirtschaftlichen Interessenten (z. B. dem Fachverband Betriebs- und Regenwassernutzung (fbr)) entstanden ist; es gibt „Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen“ (so der Titel) und deckt somit auch qualitativ-hygienische Anforderungen an Betriebswasser ab (Schramm und Zimmermann 2018).

Mittels von Ausführungshinweisen des Landes Baden-Württemberg können sich Interessierte, z. B. die (potenziellen) Betreiber häuslicher Betriebswasserversorgungen, über den damit verbundenen Aufwand informieren, auch wenn die Ausführungen z. T. vage bleiben (MLR BW 2018). Für das Bundesland Hessen fehlt eine entsprechende, den

aktuellen Stand von Recht und Normung umfassende Informationsgrundlage, die sich an den Laien wendet. Checklisten bzw. damit verknüpfte Meldeformulare für private Betreiber von Regenwasserversorgungen, die von der Aufmachung her mustergültig sind, haben auch zahlreiche Städte und Gemeinden vorgelegt; teilweise sind dort jedoch noch veraltete Regelungen oder rechtliche Bezugspunkte aufgeführt.

Im Versorgungsgebiet der Hessenwasser haben zahlreiche Kommunen (z. B. Oberursel, Dietzenbach) in ihren Satzungen für die Kommune oder entsprechend geeignete Baugebiete den Bau und die Nutzung von Zisternen vorgeschrieben. Aufbauend auf § 37 Abs. 4 HWG kann satzungsrechtlich eine Verwertung von Regenwasser auf dem Grundstück vorgeschrieben werden, sofern hier gesundheitliche oder wasserwirtschaftliche Belange nicht entgegenstehen. Entsprechend können auch dezentrale Anlagen zum Sammeln oder Verwenden von Niederschlagswasser und sogar zum Verwenden von Grauwasser vorgeschrieben werden. Soweit weitergehend eine verpflichtende Nutzung zur innerhäuslichen Betriebswasserversorgung vorgesehen ist, ist eine solche Satzungsvorschrift rechtlich fragwürdig; Kommunen wie Frankfurt am Main sind der Ansicht, dass für das Vorschreiben dieser Nutzungsform der grundstücksbezogenen Bewirtschaftung des Niederschlags über eine kommunale Satzung keine ausreichende Rechtssicherheit besteht.

Über andere Rechtsinstrumente (z. B. öffentlich-rechtlicher Vertrag) ist die Durchsetzung einer Bewirtschaftung von Regenwasser in einer Eigenwasseranlage für Ein- und Zweifamilienhäuser sicherlich möglich. Dies bedingt aber die Zustimmung der Hauseigentümer*innen als Vertragspartner. Der Vertrag kann auf die örtlichen Bedingungen genau zugeschnitten werden (Trapp und Winker 2017; Hanke 2016).

In Bezug auf die Bewirtschaftung der Niederschläge mit Versickerungsanlagen (z. B. Rigolen) sowie auf die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser als Betriebswasser ist es die Sache der Wasserbehörden, entsprechende Entnahmen sowie ggf. Einleitungen durch das Versickern nach dem HWG zu gestatten. Anlagen zur Herstellung von Betriebswasser aus Grauwasser bedürfen keiner wasserrechtlichen Gestattung, da hierdurch kein Gewässer unmittelbar genutzt wird. Aus den Verboten einer Wasserschutzgebietsverordnung können sich besondere Anforderungen ergeben. Auch dann können dezentrale Anlagen, soweit sie z. B. in Wohn- oder Bürogebäude integriert sind und mit Schutzwanne versehen werden, errichtet werden. Dies ist dann aber abhängig von einer Prüfung im Einzelfall und Entscheidung durch die Wasserbehörden. Bei größeren Anlagen zur Betriebswasseraufbereitung aus Grauwasser sind die Aspekte des Nachbarnschutzes- und Immissionsschutzes (Lärm- und Geruchsbeeinträchtigungen) zu prüfen, die eine Genehmigung durch das RP Darmstadt erfordern. Ggf. sind solche Anlagen zusätzlich nach Baurecht genehmigen zu lassen.

1.8. Rechtliche Anforderung bei der Nutzung von Betriebswasser aus einer öffentlichen Versorgung

Nach § 30 HWG haben die Gemeinden in ihrem Gebiet die Bevölkerung und die gewerblichen und sonstigen Einrichtungen ausreichend mit Trink- und Betriebswasser zu versorgen. Die Kommune kann entsprechend, wenn sie es geprüft hat und möchte, neben einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung auch eine öffentliche Betriebswasserversorgung aufbauen. Eine Versorgungspflicht besteht nicht für Grundstücke im Außenbereich, gewerbliche oder andere Verbraucher mit hohem oder stark schwankendem Wasserbedarf sowie die Versorgung mit Betriebswasser, wenn und soweit es dem Verbraucher zumutbar ist, diesen Bedarf einzuschränken oder anderweitig zu decken. Insofern ist es möglich, bestimmte Teilgebiete der Kommune aus der öffentlichen Betriebswasserversorgung auszunehmen, z. B., weil dort die Nachfrage nach Betriebswasser zu gering ist oder dort leicht Eigenversorgungen aufgebaut werden können (z. B. durch Gewerbe und Industrie). Wählt eine Gemeinde diesen Weg, so kann sie die spezifische Pflichtaufgabe entweder selbst erfüllen oder sich dabei Dritter bedienen.

Mit kommunalem Satzungsrecht kann die Kommune auch für eine von ihr aufgebaute bzw. von ihr oder in ihrem Auftrag betriebene Betriebswasserversorgung den Anschluss der Grundstücke vorschreiben. Allerdings sind bisher keine rechtlichen Instrumente entwickelt worden, die vorschreiben, dass und in welchem Umfang und zu welchem Zweck z. B. der Betriebswasseranschluss genutzt wird. Die Nutzung ist daher freiwillig. Eine inhäusige Nutzung ist in bestimmten Einrichtungen nach TrinkwV nicht zulässig (siehe hierzu Ausführungen in Kapitel 1.7). Innerhäusliche Betriebswasseranlagen sind dem Gesundheitsamt anzuzeigen.

Rechtliche Instrumente, die regeln, ob eine Nachspeisung fast leerer Zisternen mit Trinkwasser auch zu den Zeiten stattfinden kann, wenn in der Versorgung der Kommune jahreszeitliche Bedarfsspitzen in der Trinkwasserversorgung erreicht werden (Roth et al. 2016) und wie hier Auswege geschaffen werden können, existieren bisher nicht (siehe hierzu auch Kapitel 4.2).

Soweit Anlagen zum Verteilen, Behandeln und Speichern von Betriebswasser entsprechend der kommunalen Versorgungspflicht durch die Kommune bzw. in ihrem Auftrag betrieben werden, gelten sie als Teil der öffentlichen Wasserversorgung und sind nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik so zu betreiben, „dass die öffentliche Sicherheit und die Ordnung des Wasserhaushalts gewährleistet ist“ (§ 31 Abs. 1 HWG). Entsprechende Bestandspläne sind der Wasserbehörde auf Anforderung vorzulegen (§ 31 Abs. 2 HWG).

Es besteht somit die Möglichkeit für die Kommunen, eine einheitliche öffentliche Betriebswasserversorgung für das gesamte Gemeindegebiet (mit Ausnahme von Außenanlagen) zu konzipieren und zu betreiben. Soweit rechtlich kein Nutzungszwang herstellbar ist, ist nur mit Hilfe von vorherigen sozialwissenschaftlichen Erhebungen bei den

Nutzenden ermittelbar, ob der Nutzungsgrad der Anlagen im Betrieb zu einer Rentabilität der Anlagen für den Betreiber führen wird bzw. welches unternehmerische Risiko hier besteht.¹

1.9. Konzession

Die Gemeinden haben in ihrem Gebiet nach § 30 HWG, wie bereits erwähnt, die Bevölkerung und die gewerblichen und sonstigen Einrichtungen ausreichend mit Trink- und Betriebswasser zu versorgen. Sie können diese Verpflichtung zur Wasserversorgung auf andere Körperschaften des öffentlichen Rechts oder auf private Dritte übertragen oder sich dieser bei der Erfüllung ihrer Aufgaben bedienen. Die Übertragung der Verpflichtung auf private Dritte erfolgt durch einen Vertrag, der zu befristen und mit einem Widerrufsvorbehalt zu versehen ist. Daher verbleibt bei der Gemeinde insofern immer die Gewährleistungsverantwortung. Dies ist bei einer Pflichtenübertragung auf Körperschaften des Öffentlichen Rechts ggf. anders.

Bedient sich die Gemeinde zur Erfüllung der Aufgabe eines privaten Dritten, werden zwischen ihr als Auftraggeber und dem mit der Leistungserbringung beauftragten Dritten regelmäßig langfristige Verträge über die Versorgung mit den entsprechenden Wasserdienstleistungen im Zusammenhang mit der Einräumung von ausschließlichen Wegenutzungsrechten für die Benutzung der öffentlichen Straßen und Wege zur Verlegung und zum Betreiben der Leitungen abgeschlossen. Es handelt sich um einen entgeltlichen Vertrag zwischen einem Konzessionsgeber und einem Konzessionsnehmer, der dem Konzessionsnehmer das Recht zubilligt, seine erbrachten Leistungen, die Versorgung mit Wasserdienstleistungen, zu verwerten. Der Konzessionsnehmer zahlt dem Konzessionsgeber eine Konzessionsabgabe. Mit der Zahlung einer Konzessionsabgabe erhält der von Seiten des öffentlichen Auftraggebers beauftragte Dritte das ausschließliche Recht der Nutzung der öffentlichen Verkehrsflächen und letztlich das Recht zur Versorgung mit Trink- bzw. Betriebswasser. Die Laufzeit eines Konzessionsvertrages ist zeitlich befristet. Für den Konzessionsnehmer muss eine Amortisierung der zu tätigen Investitionen im Rahmen der Erfüllung der Aufgaben möglich sowie eine angemessene Verzinsung des eingesetzten Kapitals gewährleistet sein. Mit der Vergabe einer Konzession schafft der öffentliche Auftraggeber die Möglichkeit, dass das Risiko der Investitionen bei einem Dritten liegt und das Know-how in öffentliche Infrastrukturen und Dienste fließen, ohne die öffentliche Verschuldung zu erhöhen. Der Konzessionsnehmer trägt gegenüber dem Konzessionsgeber das alleinige Verlustrisiko z. B. bei den getätigten Investitionen im Rahmen der Erfüllung seiner Aufgaben.

¹ Es ist noch zu klären, ob die gesetzliche Vorschrift auch so zu interpretieren ist, dass die Kommunen bereits dann „aus der Pflicht“ kommen, wenn und solange stattdessen auch eine Versorgung mit Trinkwasser möglich ist bzw. nur jene Gewerbe und Bewohner*innen Betriebswasser benötigen, die dafür bereits eine Eigenversorgung aufgebaut haben oder diese aufbauen möchten.

Die Gemeinde hat allerdings, wenn sie Konzessionen für Betriebswasserdienstleistungen vergibt, auf dem Markt für Wegenutzungsrechte eine Monopolstellung inne. Wo es sich nicht um sog. Inhouse-Geschäfte handelt, sind Konzessionen für Wasserdienstleistungen nach den Grundsätzen der Wettbewerbsfreiheit, der Dienstleistungsfreiheit und der Nichtdiskriminierung zu vergeben. Folglich wird der Konzessionär in einem transparenten und diskriminierungsfreien Verfahren ermittelt. Zu beachten ist, dass Konzessionen für die öffentliche Versorgung mit Betriebswasser derzeit der Konzessionsvergabeverordnung vom 12. April 2016 (BGBl. I S. 624, 683), die zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (BGBl. I S. 1117) geändert worden ist, unterliegen. Hingegen sind Konzessionen für die Bereitstellung und den Betrieb zur Versorgung der Allgemeinheit mit Trinkwasser von der Vorschrift einer europaweiten Ausschreibung nach Art. 12 der Richtlinie 2014/23/EU bzw. Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen § 149 Nr. 9 (GWB) ausgenommen. Es wäre mit der EU-Kommission zu erörtern, ob dieses Privileg nicht gleichermaßen bei der öffentlichen Betriebswasserversorgung greifen müsste. Andernfalls müsste, sofern hier Dritte in Betracht kommen, eine öffentliche Betriebswasserversorgung mit Unternehmen aufgebaut werden, die hierzu ohne Konzessionsvertrag verpflichtet werden. (Dies ist unter Umständen auch realistischer, sofern der Betreiber kein Monopol zur Betriebswasserversorgung erhalten muss.)

1.10. Entgelte

Die von den Kommunen in eigener Verantwortung oder durch einen beauftragten Dritten erbrachten Leistungen für die kommunale Pflichtaufgabe der öffentlichen Wasserversorgung können privatrechtlich in Form von Preisen oder öffentlich-rechtlich in Form von Gebühren umgelegt werden. Beide Systeme stehen selbständig nebeneinander und sind in Hinblick auf den Verbraucherschutz mit funktionierenden öffentlich-rechtlichen Kontrollgremien (z. B. Behörden, Gerichte) ausgestaltet.

Die grundlegende ökonomische Strukturierung in der deutschen Siedlungswasserwirtschaft geschieht über das Kostendeckungsprinzip, nach dem die Kommunen (bzw. Leistungsersteller) die Kosten in voller Höhe mit Hilfe von Gebühren auf die Bürger/Verbraucher*innen umlegen (vgl. Gawel 2015). Sofern Wasserversorgungsunternehmen mit der Versorgung betraut wurden, dürfen sie, durch das Kartellrecht beschränkt, nur sehr begrenzt Gewinne erwirtschaften. Im Rahmen der üblicherweise erhobenen Konzessionsabgabe können aber Mittel in den Kommunalhaushalt der versorgten Gemeinde abfließen. Das Kostendeckungsprinzip des Gebührenrechts funktioniert, wenn die vorgehaltenen Anlagen und Netze mindestens einen mittleren Auslastungsgrad aufweisen.

Im Wasserpreis bzw. in der Wassergebühr sind die materiellen (z. B. Anlagen, Netze), institutionell-regulatorischen (z. B. Normen) und personellen Aufwände (z. B. Anzahl und Qualifikation der Mitarbeiter*innen) enthalten. Preisbildend wirken hier auch strukturelle Rahmenbedingungen, die von dem Versorgungsunternehmen nicht zu beeinflussen sind, wie z. B. die topografischen Gegebenheiten, die Wasserverfügbarkeit,

die Siedlungsstruktur, Demografie und die Urbanität im Versorgungsgebiet. Daneben gehen auch die zukünftigen Anforderungen an die Infrastruktur zur Minimierung der Risiken in den Wasserpreis mit ein. Sämtliche Kalkulationen des Wasserpreises stehen unter der Annahme, dass zukünftig keine Abstriche bei der Wasserqualität und der heute bestehenden Versorgungssicherheit gemacht werden.

Verbrauchsrückgänge wirken sich kaum auf die Gesamtkosten aus, denn die erforderlichen Anlagen und deren personelle Ausstattung zur Aufrechterhaltung der leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung sind unabhängig von der genutzten Menge weiterhin erforderlich. Bei zurückgehendem Trinkwassergebrauch werden die Fixkosten auf eine geringere Abgabemenge umgelegt, dies führt unweigerlich zu steigenden Wasserpreisen.

Die Dynamik der Kräfte hat sich jedoch in Deutschland seit den 1990er Jahren verändert: Einerseits ist die Leistungsfähigkeit der Unternehmen gestiegen, andererseits haben sich die Anforderungen an die Qualifikation und die Organisation von Trinkwasserversorgern stark geändert (entsprechend DVGW W 1000). Die gestiegenen Anforderungen und die Kostensteigerungen beim Einkauf der erforderlichen Betriebsmittel, den Investitionsaufwendungen für eine proaktive Erweiterung und Erneuerung der Anlagen und den Personalkosten haben dazu geführt, dass trotz gesteigerter Leistungsfähigkeit diese Aufwendungen an die Kunden zwangsläufig weitergegeben werden mussten (Scheele 2006).

Den steigenden Kosten für den Betrieb und die Erhaltungs- und Modernisierungsinvestitionen standen jedoch sinkende Einnahmen (durch rückläufige Verbrauchsmengen, initiiert sowohl durch zunächst demographische bzw. ökonomische Veränderungen als auch durch Sparmaßnahmen u. a. aufgrund gewachsenen Umweltbewusstseins bzw. Wirtschaftlichkeitserwägungen) gegenüber. Diese sinkenden Einnahmen konnten nur z.T. durch Wasserpreiserhöhungen kompensiert werden, zumal normative Regelungen bei der Preiskalkulation der Unternehmen eine Rolle spielen (Kluge 2005; Pawlowski 2009).

Bekanntlich kann der Mechanismus der Preissteigerung zu einer positiven (also verstärkenden und damit u.U. problematischen) Rückkopplung führen: Sobald steigende Konsumentenpreise zu spezifischem Kostenbewusstsein führen, wie dies vor 30 Jahren in den Neuen Bundesländern der Fall war, kommt es zu sinkenden Verbrauchsmengen; für die Versorgungsunternehmen sind massive Ergebniseinbrüche die Folge, die damit das Problem weiter verschärfen (Kluge 2005: 8ff.). Eine mangelnde Kostenkompensation kann letztlich zu Investitionsrückgängen in den Erhalt des Netzes und die Qualität der Ressource führen. So verstärkt sich das Risiko, Wasser nicht weiterhin dauerhaft in der gewohnten Qualität und zu vertretbaren Kosten zur Verfügung stellen zu können. Damit können sich auf Dauer erhebliche Nachhaltigkeitsrisiken für die siedlungswasserwirtschaftlichen Unternehmen entwickeln (ebd; Beck et al. 2016). Allerdings hat in Frankfurt am Main in den letzten Jahren die Bevölkerung zugenommen; nach zwanzigjährigem Rückgang steigt nun auch die Nachfrage nach Wasser wieder deutlich.

Im Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main wird der Thematik Wasserpreis ein eigenes Kapitel gewidmet. Dort ist zu entnehmen, dass 2018 der Wasserpreis unter Berücksichtigung der allgemein gültigen Inflationierung auf Basis des Verbraucherpreisindex des statistischen Bundesamtes, für einen Frankfurter Einfamilienhaushalt mit 4 Personen dem von 1995 entspricht, inflationsbedingt sogar deutlich darunterliegt.

Wenn Trinkwasser in erheblichem Umfang substituiert wird, können die beschriebenen Risiken für die Versorgungsunternehmen weiter zunehmen, wenn das Einsparpotenzial nicht durch einen erhöhten Bedarf durch Bevölkerung, Industrie, Gewerbe und respektive Bewässerung aufgebraucht wird (Geyler und Krohn 2015). Auch in Frankfurt am Main würde bei Einführung und Akzeptanz einer flächendeckenden Betriebswasserversorgung langfristig (vermutlich allerdings erst jenseits von 2050) der Trinkwasserverbrauch nicht mehr durch das demographische Wachstum weiter ansteigen, sondern zukünftig auf einem gegenüber heute höheren Niveau kompensiert werden. Dies könnte unter der skizzierten Annahme voraussichtlich ab 2050, bei einem stagnierenden Bevölkerungszuwachs und fortschreitender Substitution von Trinkwasser durch Betriebswasser (Prognose verschiedener Bevölkerungsvorausberechnungen) zu langfristig ansteigenden Kosten in der Trinkwasserversorgung (oder eine Veränderung in ihrem Leistungsspektrum) führen. Bisher ist nicht untersucht, unter welchen Voraussetzungen angesichts der oben angesprochenen Problematik der hohen Fixkosten ein Wasserversorgungsunternehmen zusätzlich eine zweite Infrastruktur aufbauen kann, selbst wenn für das zweite System zunächst eine starke Wachstumsphase gesichert angenommen werden kann und damit das neue Netz voraussichtlich rentabel ist.

Als Ausweg aus dem beschriebenen Dilemma für die Trinkwasserversorgung wird häufig eine Umgestaltung der Tarife für Trinkwasser diskutiert. Vorherrschend ist hierbei insbesondere eine Anpassung an die Kostenstruktur der Versorger (Pawlowski 2009), bei denen die Fixkosten je nach Ressourcensituation zwischen 60 und 80 % betragen (Michel 1997). Eine derartige Tarifstruktur wird bereits seit 1959 für die öffentliche Wasserversorgung diskutiert (vgl. Magazowski 2017: 102ff.). Eine aktuelle Erhebung zeigt, dass bereits häufig zweiteilige Tarife bestehen, die Grundentgelt und Arbeitsentgelt unterscheiden und generell den Versorgungsunternehmen einen „höheren Kostendeckungsgrad“ im Vergleich zu einer einfachen linearen Tarifstruktur erlauben (ebd.: 109). Bereits heute wird eine große Vielfalt von Tarifmodellen in der Wasserversorgung praktiziert. Nur selten kam es bisher aber zu einer dramatischen Erhöhung des Grundentgelts und dem Senken des Arbeitsentgelts, wie das die dargestellte Kostenstruktur der Unternehmen naheliegen würde. Verschiebungen im Verhältnis von Grund- und Arbeitsentgelt entsprechend der Kostenstruktur können sozialpolitisch unter Umständen zu einer erheblichen Benachteiligung einkommensschwacher Gruppen (z. B. verwitwete Rentner*innen in Ein-Personen-Haushalten) bzw. auch zu einer Bevorzugung einkommensstarker Gruppen führen (Krauß 2015).

Gleichzeitig führen Veränderungen in der Struktur der Trinkwassertarife (hin zu einem entsprechend dem Fixkosten-Anteil hohen Grundpreis) zu einer komplexen Veränderung der Trinkwasserkosten. Würde der veränderte neue Tarifmechanismus von allen verstanden und wäre er tatsächlich für sie handlungsbegründend, könnte – rationales Verhalten vorausgesetzt – nun die Bereitschaft bei den Kund*innen sinken, Trinkwasser durch weitere Sparanstrengungen und einen Aufbau „eigener“ Betriebswasserversorgungen zu substituieren.

Hier ist aber zu beachten, dass mit einem steigenden Trinkwasserverbrauch zugleich auch mehr für Abwasser zu zahlen ist. Soweit zukünftig eine öffentliche Betriebswasserversorgung aufgebaut würde, wären auch deren Entgelte noch in die Kostenbetrachtung einzubeziehen.

Der Aufbau von Eigenversorgungen mit Betriebswasser kann partiell auch durch Tarifstrukturen im Abwasserbereich „gesteuert“ werden. Wo noch einheitliche Abwassertarife vorliegen und die Abwassergebühren über das Volumen des Trinkwasserbezuges berechnet werden, kann z. B. Betriebswassernutzung attraktiv für Grundstücksbesitzer werden, die Abwassergebühren sparen wollen.²

Die Einführung der gesplitteten Abwassergebühr mit ihrer Unterscheidung einer speziellen Niederschlagsgebühr von der Schmutzwassergebühr kann die Einführung von Anlagen zur Nutzung von Betriebswasser in Form Niederschlag tendenziell verstärken. 2012 verfügten nach einer Tarifierhebung durch Magazowski (2017: 111f.) bereits 50 % der 300 von ihm betrachteten Abwasserunternehmen über eine gesplittete Abwassergebühr; Angaben der DWA zufolge hatten 2014 bereits 73 % der etwa 500 von ihr befragten Unternehmen das Gebührensplittung eingeführt (ebd.: 118). Zunächst zielt es darauf, dass Regenwasser aus der Kanalisation abgekoppelt wird. Die Schmutzwassergebühr berechnet sich wie im einheitlichen Tarif nach der Volumenmenge an (genutztem) Trinkwasser und umfasst die Kosten für den Transport und die Behandlung des Schmutzwassers. Hinzu kommt bei diesem Modell die Niederschlagswassergebühr: Sie deckt die Kosten für die Einleitung von Regenwasser in die öffentliche Kanalisation und berechnet sich nach der Größe und Versiegelungsart der versiegelten (also befestigten oder überbauten) Flächen, von denen aus Regenwasser in die Kanalisation eingeleitet wird (mit der Anzahl versiegelter Grundstücksquadratmeter als Maßstab).

Ebenso wie die Versickerung des Niederschlags auf dem eigenen Grundstück oder die Verdunstung des Niederschlags über ein Gründach kann auch die Nutzung des (gespeicherten) Regenwassers als Betriebswasser für die Gebührenpflichtigen zu einer Verminderung der Niederschlagsgebühr führen. Als Folge des 2019 in Frankfurt am Main

² Dies gilt stärker im gewerblichen und industriellen Bereich. Private Grundstücksbesitzer verhalten sich teilweise nur bedingt nach einer ökonomischen Logik, wie empirische Untersuchungen in Ostdeutschland gezeigt haben (vgl. Geyley und Krohn 2015).

eingeführten Gebührensplittings wird erwartet, dass sich vor allem im Bereich der Gewerbe- und Industrieflächen, aber auch der Ein- und Zweifamilienhäuser der Umgang mit Regenwasser verändert. Wenn die Niederschlagsgebühr auch die Nutzung privilegiert, führt eine Nutzung des Regenwassers zu finanziellen Einsparungen für den Gebührenpflichtigen, die doppelte Wirkung entfalten könnten: Neben einer verringerten Niederschlagsgebühr kommt es aufgrund der Substitution von Trinkwasser auch zu reduzierten Trinkwasserkosten. In Fällen, bei denen die Schmutzwassergebühren alleine über das Volumen des Trinkwasserbezuges berechnet wird, sparen die Nutzer*innen beim Einsatz von Regenwasser als innerhäusliches Betriebswasser auch noch die für die substituierte Trinkwassermenge erforderlichen Abwassergebühren.

In Abhängigkeit von der Entscheidung für eine bestimmte Betriebswasserstrategie könnte es evtl. sinnvoll sein, wenn die Stadt Frankfurt am Main Eigentümer von Gewerbegrundstücken, von Ein- und Zweifamilienhäusern und evtl. auch von mehrgeschossigen Wohnhäusern deutlich auf die Möglichkeiten der Trinkwassersubstitution hinweist und zu einem proaktiven Handeln auffordert.

Der Aufbau von Eigenversorgungen mit Betriebswasser kann aber partiell auch durch Tarifstrukturen im Abwasserbereich gehemmt werden. Dies kann bei den bereits diskutierten einheitlichen Abwassertarifen dann sein, wenn das innerhäuslich genutzte Substitutionswasser aus der Regenwasserzisterne gleichfalls in Anschlag gerät. Je nach der Ausgestaltung kann sich die Betriebswassernutzung aufgrund entstehender Kostenstrukturen nun als wirtschaftlich wenig lukrativ erweisen: Wenn im Tarif für Ab- bzw. Schmutzwasser bei zusätzlicher Nutzung von Betriebswasser (neben Trinkwasser) vorgesehen ist, die als Betriebswasser eingesetzten Mengen mit Wasseruhren genau zu ermitteln, so entsteht hierdurch ein höherer Betriebs- und Kostenaufwand. Volumen- oder Durchflussmessgeräte sind zwar im Siedlungsabwasserbereich keinesfalls bundesrechtlich eichpflichtig (vgl. Eichordnung Anhang A Nr. 15 in Verbindung mit § 8 Eichgesetz); dennoch kann die Kommune für die genaue Erfassung von Betriebswasser im Sinne der weiteren Abrechnung als Abwasser geeichte Messgeräte in der Satzung vorschreiben.³ Für die Nutzer*innen von Betriebswasser sind bei derartigen Tarifausgestaltungen Mehrkosten für Anschaffung und Einbau sowie für eine Eichung bzw. den Austausch der Wasserzähler in regelmäßigen Abständen die Folge.⁴ Subjektiv kann dies in Verbindung mit der erforderlichen Wartung der Betriebswasseranlage dazu führen,

³ Dabei sind nach Anlage 1 der Mess- und Eichverordnung (Nr. 5 c) auch Volumenmessgeräte für Betriebswasser nicht eichpflichtig. Entsprechend werden dann Trinkwassermessgeräte zur Messung des Betriebswasserstroms verwendet. In den Satzungen wird häufig auch noch vorgeschrieben, dass diese „nach Eichgesetz turnusmäßig gewechselt“ werden sollen. Nach § 34 Abs. 1 in Verbindung mit Anlage 7 Nr. 5.5.1, 5.5.2 Mess- und Eichverordnung sind Trinkwasserzähler alle sechs Jahre zu wechseln (aus Sicht des Verbraucherschutzes und des GdW Bundesverbandes deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen ist das übrigens zu häufig, volkswirtschaftlich nicht verhältnismäßig. Denn die Kosten für den Zähleraustausch seien wesentlich höher als die für Fehlmessungen (vgl. Maaß et al. 2017).

⁴ Auch für die Kommunen ist dieses Tarifmodell mit einem nicht unerheblichen Personal- und Verwaltungsaufwand verbunden, vgl. N.N. 2004.

dass eine Eigenversorgung mit Niederschlagswasser evtl. nicht mehr wirtschaftlich erscheint.

Der Regelungsrahmen der Finanzierung kommunaler Wasserinfrastrukturen bzw. damit erbrachter Leistungen unterliegt dem Kommunalabgabenrecht und fällt in Deutschland in den Kompetenzbereich der Bundesländer. Damit finden sich die rechtlichen Grundlagen für die Entgeltberechnungen in den unterschiedlich ausgestalteten Kommunalabgabengesetzen der Länder. In einigen anderen Bundesländern (z. B. Rheinland-Pfalz) sind insbesondere bei einer Nutzung von Grauwasser zur Betriebswasserversorgung erhebliche rechtliche und kalkulatorische Anpassungserfordernisse absehbar (vgl. SinOptiKom 2016; Breitenbach und Ehre 2018).

Tarifliche Anreize zur Substitution von Trinkwasser

Wenn kommunale Unternehmen sowohl Trinkwasser als auch Betriebswasser anbieten, kann eine Signalwirkung hinsichtlich der Betriebswasserversorgung dann erreicht werden, wenn das Betriebswasser pro Volumeneinheit günstiger abgegeben werden kann als das Trinkwasser. Die Aussage steht unter dem Vorbehalt, dass zur Versorgung mit Betriebswasser auf vorhandene Strukturen zurückgegriffen werden kann. Zusätzlich wäre kartellrechtlich zu klären, ob bei getrennten Tarifen für Betriebs- und Trinkwasser jeweils die reale Kostenstruktur vom Unternehmen abgebildet werden muss oder es ausreichend ist, wenn die realen Gesamtkosten in sauberer Weise erfasst und umgelegt werden und grundsätzlich tariflich eine Anreizstruktur zur Betriebswassernutzung gegeben wird. Die Orientierung an niedrigeren Betriebswasserkosten würde evtl. auch erfordern, dass bei der Betriebswasserversorgung stärker Kosten gespart werden (z. B. durch geringeres Qualitätsmanagement, verminderten Aufwand bei der Aufbereitung von Mainwasser, höhere Toleranz bei Leitungsverlusten) oder von vornherein weniger Kosten entstehen (z. B. Konzessionsgebühr durch die Kommune nicht erhoben werden). Andernfalls müsste eine politische Subventionierung der Entgelte in der öffentlichen Betriebswasserversorgung erfolgen. Sinnvoll wäre hier auch eine einheitliche Veranlagung bei der Mehrwertsteuer (reduzierter Satz auch für Betriebswasser).

Bei Einführung einer Grauwasserableitung könnten auf Dauer für den Abwasserbereich noch weitere Tarifstrukturen diskutiert werden (vgl. Breitenbach und Ehre 2018); neben der Maßzahl Trinkwasserverbrauch wird z. B. über den Energie- und den Nährstoffgehalt des Abwassers als Maßstab nachgedacht (Magazowski 2017: 181ff.).

Die überwiegende Zahl der Menschen in Frankfurt am Main wohnen zur Miete: In Frankfurt am Main waren in der Wohnungs- und Gebäudezählung 2011 etwa 80 % der Wohnungen vermietet, und 87,3 % der Wohnungen befinden sich in Mehrfamilienhäusern. Für Bewohner*innen von Mehrfamilienhäusern greifen jedoch die beschriebenen Auswirkungen der Tarifmechanismen auf Spar- und Substitutionsverhalten in der Regel nicht direkt, da in den dort (wie auch in Büro- bzw. Gewerbegebäuden mit mehreren Mietparteien) der Verbrauch nur für die Immobilie insgesamt gemessen und tariflich bewertet wird. Die Kosten werden dann nach abstrakten Schlüsseln (z. B. gemietete Fläche oder Zahl der Personen im Mietobjekt) weiter verteilt. Damit die Tarife auf das

Verhalten (ökonomisch rationales Handeln vorausgesetzt) durchschlagen können, wäre es sinnvoll, Wohnungswasserzähler (auch für Betriebswasser) einzuführen. Das eröffnet evtl. auch die Möglichkeit für direkte Kundenbeziehungen (vgl. Brinkmeier 2002), führt aber aufgrund des im Trinkwasserbereich erforderlichen Zähleraustauschs (Zählereichung) u.U. zu weiteren Erhöhungen der Wasserkosten.

1.11. Schlussfolgerung

Die öffentliche Wasserversorgung mit ihren Teilbereichen der Gewinnung, der Aufbereitung, des Transports und der Verteilung zählt zu den im Rahmen der Daseinsvorsorge wahrzunehmenden öffentlichen Aufgaben der Kommune, für die diese auch gesetzlich verpflichtet sind. Unabhängig ob die Wasserversorgung durch die Kommune selbst erfolgt oder ein Wasserversorgungsunternehmen diese durchführt, und auch unabhängig davon, ob die Wasserversorgung im Gemeindegebiet oder auch z. B. die Wassergewinnung auf Gemarkungen anderer Gemeinden stattfindet. Das Hessische Wassergesetz führt dazu aus, dass „die Gemeinden in ihrem Gebiet die Bevölkerung und die gewerblichen und sonstigen Einrichtungen ausreichend mit Trink- und Betriebswasser zu versorgen haben“.

Um die Aufgaben der Versorgung der Bevölkerung sowie von gewerblichen und sonstigen Einrichtungen mit Trink- und Betriebswasser vom öffentlichen Auftraggeber an einen privaten Dritten übertragen, hat sich der Abschluss langfristiger Konzessionsverträge bewährt. Konzessionsverträge regeln die Einräumung von Wegennutzungsrechte für die Benutzung der öffentlichen Straßen und Wege zur Verlegung und zum Betreiben der Leitungen.

Die Trinkwasserverordnung regelt die Qualität des Trinkwassers für den menschlichen Gebrauch und dient zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Der größte Teil des täglich verbrauchten Trinkwassers wird im Haushalt für die Körperpflege und für Sanitär Dienstleistungen aufgewendet. Die Möglichkeit einer Reduzierung des Trinkwasserverbrauchs bietet sich vor allem für die Verbrauchssektoren Sanitäreanlagen, Reinigung von Gegenständen, die nicht mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen und zur Bewässerung an. Für diese Verbrauchssektoren können Hauswasserversorgungen mit Betriebswasser betrieben werden; für den Einsatz in Wasch- und Geschirrspülmaschinen besteht Wahlfreiheit. In der TrinkwV wird auch die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik verlangt.

Der Gesetzgeber hat bei der Setzung des Rechtsrahmens das gesundheitliche Vorsorgeprinzip betont; damit spielt für die Betriebswasserversorgung die Einbindung der Gesundheitsbehörden eine besondere Rolle. Inhäusige Betriebswasserversorgungsanlagen sind anders als die für Gärten anzeigepflichtig. Die Nutzung von Betriebswasser für die Toilettenspülung ist in Haushalten, in Büros und Sportstätten gestattet. Betriebswasser kann innerhäuslich Mietern und weiteren Dritten für Waschmaschine und Geschirrspülmaschine angeboten werden, wenn diese für den Anschluss der Maschine wahlweise auch Trinkwasser verwenden können (also doppelte Anschlüsse vorhanden sind).

In Einrichtungen, die einer infektionshygienischen Überwachung durch die Gesundheitsbehörde unterliegen, ist die Nutzung von Betriebswasser kritischer und erfordert eine Einzelfallprüfung. Jedoch ist sie auch hier grundsätzlich möglich.

Bei der Umsetzung von Betriebswassernetzen ist zur Vermeidung von Fehlan schlüssen zwischen Trink- und Betriebswassernetz frühzeitig ein umfassendes Qualitätsmanagement aufzubauen, das für die Planungsphase auch die Fachplaner und für die Bauphase die zu beauftragenden Unternehmen des Tief- und Wohnungsbaus umfasst. Eine wichtige Voraussetzung besteht darin, frühzeitig die Mitarbeitenden der wasserwirtschaftlich zertifizierten Fachunternehmen im Installationsbereich, aber auch Fachplaner für häusliche Infrastrukturen bezogen auf die Besonderheiten und zum Vermeiden von hygienischen Risiken der Betriebswasserversorgung weiterzubilden.

Eine gezielte Substitution von Trinkwasser kann in der Stadt Frankfurt am Main auf kommunaler Ebene gefördert und steuernd gestaltet werden. Der Aufbau einer eigenständigen öffentlichen Betriebswasserversorgung ist in Hessen gesetzlich privilegiert. Die Verwertung von anfallendem Niederschlagswasser und die Wasserwiederverwendung ist ebenso wie die Versorgung von gewerblichen Großverbrauchern mit Betriebswasser nach § 36 HWG landespolitisch erwünscht.

2. Hintergrund und Vorgehensweise

Damit ein einheitliches Verständnis für das Thema Betriebswasser vorliegt, ist der Studie ein kurzer Hinweis zu den Begriffen Betriebs- und Brauchwasser voranzustellen. Oft werden die beiden Begriffe synonym verwendet. In der politischen Diskussion in der Region wird bisher von Brauchwasser gesprochen. In der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) von 1975 wurde zuletzt der Begriff Brauchwasser benutzt, in der aktuellen TrinkwV ist hingegen von Wasser, das keine Trinkwasserqualität hat, die Rede (§ 13 (4) TrinkwV; in der DIN 4046 und dem DVGW-Regelwerk (W 555) wird der Begriff Betriebswasser verwendet). Betriebswasser ist laut DIN 4046:1983-09, „gewerblichen, industriellen, landwirtschaftlichen oder ähnlichen Zwecken dienendes Wasser mit unterschiedlichen Güteeigenschaften, worin Trinkwassereigenschaft eingeschlossen sein kann“. Gemäß der Definition in der DIN wird im Weiteren der Begriff Betriebswasser angewandt.

Gegenstand der Studie ist die prognostizierende Darstellung der theoretischen Substitutionspotenziale für Trinkwasser durch die Nutzung von Betriebswasser für den Zeitraum 2017 bis 2050 im Versorgungsgebiet der Hessenwasser GmbH & Co. KG mit Fokus auf Frankfurt am Main. Dieses Betriebswasser kann aus Regen-, Oberflächen- oder Grundwasser gewonnen werden, aber auch aus leicht verschmutztem Abwasser („Grauwasser“). Grundsätzlich könnte auch sehr gut gereinigtes Schmutzwasser verwendet werden, das aber lokal nur in wenigen Fällen verfügbar ist (vgl. Schramm und Zimmermann 2018).

Im ersten Schritt wurden frühere einschlägige Gutachten und Analysen gesichtet, die sich mit der Substitution von Trinkwasser in der Rhein-Main-Region beschäftigt haben. Es handelt sich um dabei in der Mehrzahl um ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen aus den 1990er Jahren, die im Auftrag der Stadtwerke Frankfurt am Main entstanden sind und zumeist als Konzept- oder Machbarkeitsstudien für einzelne Gebiete oder Situationen in der Stadt technische und hydrologische Bedingungen der Versorgung mit Betriebswasser untersuchten.

Die Überlegungen zur Substitution konzentrierten sich in den 1990er Jahren in erster Linie auf Großgewerbe und öffentliche Einrichtungen. Das Ausmaß der damals für diesen Sektor erstellten Studien mit ihren vielen interessanten Ideen und Umsetzungsvorschlägen für Frankfurt am Main verblüfft; entsprechende Untersuchungen liegen unseres Wissens für keine andere Stadt vor.

Cichorowski und Rührich (1997) betonen für das Dargebot das Potenzial zahlreicher innerstädtischer Grundwasservorkommen, welche keine Trinkwasser-, aber akzeptable Betriebswasserqualität aufweisen. Die Entnahme, Aufbereitung und Verteilung von Oberflächenwasser für Betriebswasserzwecke in Frankfurt am Main wurde gleichfalls behandelt (Cichorowski et al. 1991; Cichorowski et al. 1994a; Cichorowski und Rührich 1997).

Die Betriebswasserleitungen, die zunächst zum Transport von aufbereitetem Mainwasser aus der Anlage in Niederrad zu den Infiltrationsanlagen im Stadtwald errichtet

worden waren, versorgen seitdem auch den Flughafen für Betriebswasserzwecke, Golfclub zur Grünberegnung und den Waldfriedhof in Goldstein. Weiterhin wurden sog. Brauchwasserzapfstellen errichtet, die für städtische Institutionen gedacht waren wie die Beregnungseinheiten des Grünflächenamtes, die Kanalspülung der Stadtentwässerung oder die Straßensprengung zur Staubniederschlagung, aber auch von privaten Interessenten genutzt werden sollten (Cichorowski und Rührich 1997). Leider ist jedoch festzustellen, dass ab der Mitte der 1990er Jahre in Frankfurt am Main nur wenige weitere Ideen aufgegriffen wurden, z. B. die Gebäude in der Bürostadt Niederrad mit Betriebswasser zu versorgen, was ebenfalls über die bereits verlegten Leitungen transportiert werden könnte (Cichorowski et al. 1998b).

Nach Cichorowski (1998) konnte durch Anstrengungen der Stadt Frankfurt am Main in den 1990er Jahren mit 1 Mio. m³/a ein Teil des vorhandenen Substitutionspotenzials verwirklicht werden. Damit schätzte Cichorowski (1998) weiterhin in Frankfurt am Main ein umsetzbares Substitutionspotenzial von 7 Mio. m³/a, davon 6,5 m³/a im Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen und 0,5 m³/a in damals geplanten Neubausiedlungen, z. B. auf dem Rebstockgelände.

Beim Umgang mit Niederschlagswasser stand im Fokus des kommunalpolitischen Handelns in Frankfurt am Main in den beiden letzten Jahrzehnten eine vermehrte Versickerung zur Grundwasserneubildung, nicht aber die Nutzung des Niederschlags durch den Betreiber (AG Regenwasserbewirtschaftung 2005). Die Nutzung als Betriebswasser kann unter Umständen jedoch interessant für die Bauherren und die Betreiber des Gebäudes sein, die in Regenwasserbewirtschaftungsanlagen investieren müssten.

Für die vorgeschriebene Umsetzung von Regenwasserbewirtschaftung z. B. in Gewerbegebieten müssen Bauherren bereits nicht unerhebliche Investitionen einkalkulieren. Anstelle ausschließlich auf Versickerungsanlagen zu setzen, könnte auch in Lösungen zur Regenwassernutzung investiert werden, die sich unter Umständen auch betriebswirtschaftlich amortisieren können (AG Regenwasserbewirtschaftung 2005).

Roth (2016) beschäftigt sich in seiner Fortschreibung der Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM) mit der Entwicklung des Wasserverbrauchs bis zum Jahr 2030. Er diskutiert die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in der Rhein-Main-Region bzw. dem Regierungsbezirk Darmstadt. Die Versorgungssicherheit der kommenden Dekade soll hierbei durch Kapazitätsausbau im Verteilungsnetz und ein integriertes, regionales Ressourcen-Management sichergestellt werden. Das Rückgrat der Versorgung mit Trinkwasser bilden im Versorgungsraum der Hessenwasser das Hessische Ried und der Vogelsberg.

Im Versorgungsgebiet Frankfurt am Main und Umland reichen die örtlichen Trinkwasservorkommen nicht aus; Gründe dafür sind die intensive Flächennutzung und hydrogeologische Gegebenheiten (Roth 2016). Im Jahr 2014 wurde in der Stadt Frankfurt am Main (inkl. Flughafen) knapp 50 Mio. m³ Trinkwasser verbraucht, 11 Mio. m³ wurde

von Wasserwerken in Frankfurt am Main gefördert. Die Gewinnungsanlagen im Stadtwald und das Wasserwerk Praunheim II unterliegen infolge intensiver Flächennutzung erheblicher Gefährdung, sind allerdings für Spitzenbelastung unverzichtbar; das Wasserwerk Hattersheim wird zur zeitweisen Spitzenlastabdeckung und zur Beherrschung von Notfällen im Leitungsverbund betriebsbereit gehalten. Die Mainwasseraufbereitungsanlage in Niederrad stand bei der Erstellung des Gutachtens zur Erneuerung an.

Während das Gewinnungsgebiet im Hessischen Ried und im Frankfurter Stadtwald durch infiltrationsgestützte Grundwasserbewirtschaftung abgesichert werden kann, sind die im Vogelsberg geförderten Liefermengen in Trockenjahren zum Teil gefährdet (Roth 2016). Für Frankfurt am Main betrachtet Roth (2016) auch die Substitution von Trinkwasser, die er allerdings im Zeitraum bis 2030 für eher randständig hält; Sparpotenziale im Haushaltsbereich seien weitgehend ausgeschöpft.

Die Studien für die Stadt Frankfurt am Main wurden vor allem bezüglich Annahmen und Methodik zu Substitutionspotenzial und zu Betriebswassernutzung der verschiedenen Verbrauchergruppen, außerdem auf relevante inhaltliche Ergebnisse (z. B. organisatorische oder Kostenannahmen) ausgewertet, etwa den Vorschlag von Cichorowski und Rührich (1997), eine neue Institution zu gründen, das „Wasserbüro Frankfurt“, die auch Aufgaben des Wissenstransfers übernehmen könnte.

2.1. Vorgehensweise

Die Ermittlung des Trinkwassersubstitutionspotenzials geschieht zunächst über die Erhebung von zwei exemplarisch ausgewählten Wohngebieten, die mit zentralörtlichen Funktionen und Einzelkonstellationen dann auf das Stadtgebiet hochgerechnet werden. Bei der Auswahl dieser Beispiele muss auf eine gute Übertragbarkeit geachtet werden, um durch die Extrapolation auf das gesamte Stadtgebiet Aussagen über das Substitutionspotenzial machen zu können.

Aufbauend auf rechtlichen und organisatorischen Hintergründe und Rahmenbedingungen werden in einem weiteren Schritt potenzielle Umsetzungsmöglichkeiten für das Jahr 2050 mit Hilfe von Szenarien ermittelt. Mit der Methode der Szenarioentwicklung werden mögliche Entwicklungskorridore erarbeitet und beschrieben, um eine Basis für langfristige Strategie-Entscheidungen zu schaffen.

Die exemplarischen Gebiete und Gebäude setzen sich aus zwei Wohnquartieren zusammen, die im Zusammenwirken mit den Akteuren aus den städtischen Ämtern und in Frankfurt am Main tätigen gemeinwirtschaftlichen Wohnungswirtschaftsunternehmen identifiziert und genauer untersucht werden. Darüber hinaus werden zentralörtliche Funktionen und weitere gesondert betrachtete Orte einbezogen, um spezifische Substitutionspotenziale abzuschätzen. Kriterien für das Auswahlverfahren und verwendete Datengrundlagen, die Vorgehensweise sowie mögliche Ausrichtungen für die Entwicklung der Szenarien werden im Folgenden aufgelistet; ergänzende Hinweise zur Vorgehensweise finden sich für einzelne Kapitel wie weiteres Material im Anhang (mit einer

auf die Dezimal-Nummerierung des Haupttextes verweisenden Nummer; Tabellen und Abbildungen sind hingegen durchgehend nummeriert).

Für die Studie wurde ein kommunaler Begleitkreis eingerichtet, dem Akteure unterschiedlicher Ämter, der Mainova, der NRM und der Stadtentwässerung angehörten und der mehrfach über die Studie und die erzielten Fortschritte informiert wurde.

2.2. Konzept

Gemeinsam mit diesem kommunalen Begleitkreis wurden zwei Wohnquartiere gesucht, wobei folgende Eigenschaften bei der Quartiersauswahl betrachtet werden (um deren Potenzial für die spätere Extrapolation auf das Gebiet von Frankfurt am Main möglichst sicherzustellen):

1. Neubau/Bestand (Alter der Gebäude)
2. Nachverdichtungs- bzw. Modernisierungspotenzial
3. Art der Gebäude (z.B. Ein- oder Mehrfamilienhäuser, alleinstehend/in Reihe, Blockrandbebauung, Wohnhochhäuser)
4. Baustruktur (einheitlich oder gemischt)
5. Art der Eigentümer
6. Raum für Infrastruktur (insbesondere für Speicher oder Aufbereitungsanlagen)

Nach Möglichkeit sollten ein Neubaugebiet (in der Größenordnung 750-1500 Wohneinheiten) und ein Bestandsgebiet ausgewählt werden; beim Bestandsgebiet sollte möglichst eine Nachverdichtung derzeit in Planung sein.

Für beide ausgewählten Gebiete wurde das realisierbare Substitutionspotenzial erhoben und mit dem lokalen Dargebot der unterschiedlichen verfügbaren Betriebswasserressourcen abgeglichen. Bei der Extrapolation auf das Stadtgebiet wurde der bereits realisierte Substitutionsanteil (wenn möglich) berücksichtigt.

Frankfurt am Main ist ein zentraler Ort in Hessen. Aufgrund der zentralörtlichen Funktionen ist es erforderlich, einige Besonderheiten zu beachten, die exemplarisch betrachtet wurden. Vorgeschlagen und mit den Beteiligten aus den Frankfurter Ämtern diskutiert, wurden die folgenden Örtlichkeiten:

- Halte-, Umschlags- oder Abfertigungspunkte (Personenverkehr und Waren, z.B. Flughafen, Großmarkthalle, Messe)
- Bürohochhäuser, Wohnhochhäuser
- Verwaltung/Öffentliche Einrichtungen (insb. Schulen, Hochschulen, Krankenhäuser)
- Gewerbegebiete
- Parks und weitere Grünflächen (einschl. Zoo, botanische Gärten, Friedhöfe)
- Sporteinrichtungen

Bei diesen Örtlichkeiten zeichnete sich im Laufe der Datenrecherche ab, dass für einige Beispiele eine gute Datenverfügbarkeit vorliegt, und sie sich somit für die weitere Betrachtung gut eignen. Andere mussten pragmatisch ausgeklammert werden, wie z.B. der Frankfurter Hauptbahnhof, das Messegelände, Hotel- und Gastronomiebetriebe,

Zoos und botanische Gärten, und Sportplätze die von privaten Vereinen betrieben werden. Aus untersuchungspragmatischen Gründen werden zusätzlich noch Ein- und Zweifamilienhäuser betrachtet. Angesichts der Heterogenität der Siedlungsstruktur in Frankfurt am Main ist es notwendig, neben Geschoßbebauung und Wohnhochhäusern auch Ein- und Zweifamilienhäuser – und somit Wohngebäude drei verschiedener Strukturtypen zu betrachten. Je nach Strukturtyp verlaufen Substitution unterschiedlich, so bietet sich für Ein- und Zweifamilienhäuser insbesondere die Regenwassernutzung an, während in Mehrfamilienhäusern vermutlich weitere alternative Wasserressourcen eine wichtige Rolle bei der Trinkwassersubstitution spielen. Bei der szenarischen Extrapolation wurde berücksichtigt, dass für den Betrieb von Regenwasserzisternen je nach Niederschlagsereignissen eine Wassernachspeisung erforderlich sein kann, die zumeist aus dem Trinkwassernetz erfolgt.

Neben der Ermittlung des realisierbaren Substitutionspotenzials bei Einzelbetrachtungen (Kapitel 5 und 6) war nach Klärung institutioneller Voraussetzungen (Kapitel 4) die Frage leitend, diesen Bedarf mit dem Betriebswasserdargebot im Stadtgebiet zu decken (Kapitel 3, 6 und 7); anschließend wurden Ergebnisse unter der Verwendung der Szenarien auf das Stadtgebiet extrapoliert (Kapitel 8).

2.3. Erstellung der Vorausschau

Der Zeitraum bis 2050 birgt ebenso wie das Thema Trinkwassersubstitution in Frankfurt am Main prognostische Unsicherheiten im Wissen. Aufgrund ihrer Zukunftsbezogenheit, aber auch wegen unvollkommenen Informationen und subjektiven Erwartungen wird es nicht möglich sein, eine echte Vorhersage zu erstellen. Es ist mit Hilfe der im Kapitel 2.4 dargestellten Daten, soweit diese als Prädiktoren fungieren, dem im ISOE vorhandenen Erfahrungswissen und den durchgeführten Extrapolationen jedoch sehr wohl möglich, eine Vorausschau zu erarbeiten. Mit Hilfe der Szenarien kann es gelingen, den komplexen Sachverhalt so zu durchdringen, dass strategische Gestaltungsoptionen erkannt werden. Ggf. wird es auch möglich, festzustellen wo zusätzlicher Wissenserwerb zukünftige Entscheidungen absichern könnte.

Nach Möglichkeit soll für die zu erstellende Vorausschau der substituierbaren Trinkwassermengen mit den gleichen Daten und Annahmen für die Stadtentwicklung gearbeitet werden (z.B. Demographie, Neubaugebiete, Wirtschaftsentwicklung), die die Kommunalpolitik im Magistrat und die städtische Verwaltung ihrem Handeln zugrunde legt. Der in der Studie gewählte Zeitraum bis 2050 überstieg die vorliegenden Planungen vieler Ämter der Stadt Frankfurt am Main, wo der Planungshorizont häufig 2030 oder 2040 war. Daher wurden folgende Vorgehensweisen ergänzend festgelegt:

- Da es noch keine ausgearbeiteten Prognosen für die Entwicklung der Stadt Frankfurt am Main bis zum Jahr 2050 gab, wurde hier teils mit einer (linearen) Fortführung der bereits von Politik und Verwaltung erarbeiteten Zukunftsbilder (zumeist 2030) gearbeitet, teils wurde durch die Zusammenschau verschiedener Prognosen eine eigene Abschätzung angefertigt. Diese Ergebnisse wurden wo möglich durch Gespräche mit Experten überprüft. Durch eine später erscheinende Veröffentlichung

der Hessenagentur (HessenAgentur 2019) zur Bevölkerungsvorausschätzung konnte die so ermittelte Einwohnerzahl validiert werden, da sie nur gering abweicht.

- Das Nachverdichtungspotenzial auf Gesamtstadtebene wird mit Hilfe einer überschlüssigen Berechnung abgeschätzt.

Für die Entwicklung des zweiten Szenarios „Besondere Anstrengungen hinsichtlich einer Betriebswassernutzung“ ist es notwendig, Maßnahmen zu berücksichtigen, die sich positiv auf die Betriebswassernutzung in der Stadt auswirken. Diese Maßnahmen könnten zukünftig in einem weiteren Schritt mit der sog. Backcasting-Methode, die in der Energiewirtschaft verbreitet ist, identifiziert und in eine Abfolge gebracht werden. Dieses Backcasting unterscheidet von der üblichen Szenario-Methode dadurch, dass von einem konkreten Ziel oder einer Vision für die Zukunft in die Gegenwart gedacht wird.⁵

Insbesondere für die Ein- und Zweifamilienhäuser war es im Rahmen des Vorhabens sehr schwierig, hier die bereits praktizierte Substitution gut zu erfassen. Es wurde daher versucht, mit Hilfe von zwei Masterarbeiten, die vom ISOE mit betreut wurden, in Quartieren von Frankfurt am Main mit Ein- bzw. Zweifamilienhäusern Potenziale der Regenwasser- und die faktische Nutzung zu erheben; dabei wurde auch der Frage nachgegangen, inwieweit die (in den 1990er Jahren teilweise praktizierte) Verankerung von Zisternen in kommunalen Satzungen zu einer Trinkwassersubstitution führte (vgl. Schramm et al. 2020). Eine weitere Masterarbeit, die das ISOE mit betreute, konnte zur Ermittlung Frankfurt-spezifischer Wasserverbräuche in öffentlichen Einrichtungen und Bürogebäuden herangezogen werden.

Abschließend werden die Szenarien gemeinsam genutzt, um am Beispiel der Stadt Frankfurt am Main Auswirkungen und Konsequenzen für das Versorgungsgebiet aufzuzeigen.

2.4. Verwendete Datengrundlagen zum Wasserverbrauch

2.4.1. Pro-Kopf-Verbrauch in Frankfurt am Main

Der Trinkwasserverbrauch in Frankfurt am Main betrug im Jahr 2016 148 Liter pro Einwohner und Tag (Regierungspräsidium Darmstadt 2018). Pro-Kopf-Verbräuche in Stadtgebieten sind relativ hoch, da für Berechnungen der Trinkwasserverbrauch durch die dort gemeldeten Einwohner – meist Hauptwohnsitz – geteilt wird. In dem berechneten Pro-Kopf-Verbrauch pro Einwohner ist der Trinkwasserverbrauch des Kleingewerbes enthalten. Nicht enthalten in dem Pro-Kopf-Verbrauch sind die Abgaben an Industrie und Großgewerbe (ebd.). Wasserverbräuche von einpendelnden Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern, deren Trinkwasserverbrauch statistisch ihrer Wohnge-
meinde zugeschlagen wird, als auch der Trinkwasserverbrauch von einpendelnden

⁵ In einem partizipativen Backcasting-Prozess ist somit Kreativität und eine Verständigung der Beteiligten auf eine gemeinsame Vision erforderlich. Backcasting erfordert einen konsequenten Perspektivwechsel und ausreichend Zeit oder Vorarbeiten (vgl. Kerber et al. 2017).

Schüler*innen und Studierenden sowie von durchreisenden und Übernachtungsgästen werden im Gesamtverbrauch der Stadt Frankfurt am Main ausgewiesen. (Abschätzungen der Trinkwasserverbräuche von Übernachtungsgästen z.B. in Hotels können aus dem Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main entnommen werden.)

Der Frankfurter Trinkwasserverbrauch (einschließlich Eigenbedarf und Wasserverluste) im Jahr 2017 belief sich insgesamt auf 52,2 Mio. m³; der Pro-Kopf-Verbrauch wird angegeben mit 123 Liter pro Einwohner und Tag (Regierungspräsidium Darmstadt 2019) und hat sich somit im Vergleich zu 2016 statistisch bereinigt um 25 Liter verringert. Der deutlich gesunkene Pro-Kopf-Verbrauch in 2017 erfolgte durch eine Neubewertung der Verbrauchskategorie Haushalte/Kleingewerbe entsprechend der Definition des Statistischen Bundesamtes durch die Mainova. Unter Kleingewerbe werden Friseursalons, Arztpraxen oder Kitas sowie Kioske oder Läden des täglichen Bedarfs verstanden; diese befinden sich häufig in Wohngebäuden; eine Differenzierung der Verbräuche ist aufgrund der bestehenden Zähler- und Abrechnungsstruktur schwierig (Ausnahme: Hamburg). Verbrauchstypen, die nicht der Definition des Statistischen Bundesamtes Haushalte/Kleingewerbe entsprechen, wurden in Abhängigkeit von der Verbrauchsmenge dem Verbrauchstyp Industrie und Großgewerbe zugeordnet.

Neben der Anpassung der Berechnungsmethode wirken sich auch Schwankungen des Jahresverbrauchs (z.B. Hitzeperioden, Trockenheit) auf den Pro-Kopf-Verbrauch aus (Regierungspräsidium Darmstadt 2019, Lobüscher 2019 fernmündlich). Für die Ermittlung des Substitutionspotenzials kann für das Frankfurter Stadtgebiet gemäß der Angaben der Mainova (Becker 2019) von einem durchschnittlichen häuslichen Pro-Kopf-Trinkwasserverbrauch von 118 Liter pro Tag ausgegangen werden. In dieser Zahl ist in der innerhäuslichen Abgabemenge auch die Abgabe an das sogenannte Kleingewerbe, in der redigierten Fassung, enthalten. Die Abweichungen zwischen dem Tagesverbrauch pro Einwohner resultieren einzig auf unterschiedlichen statistischen Bezügen zum Bevölkerungsstand. Das Regierungspräsidium bezieht sich auf Angaben des Statistischen Landesamt Hessen, in denen Einwohner mit Nebenwohnsitz nicht berücksichtigt werden.

Messungen der Trinkwasserverbräuche im Kleingewerbe, die das DVGW-Technologiezentrum in der Form von Stichproben in Deutschland durchführte, deuten darauf hin, dass sich dort der Trinkwasserverbrauch erhöht. Wohngebäude mit Kindertagesstätten lagen im oberen Tagessummenverbrauch verglichen mit anderen Wohngebäuden. Gebäude mit Zahnarztpraxen oder mit einer Werkstatt hatten einen höheren Tagessummenverbrauch als reine Wohngebäude (Martin et al. 2017). Messungen in Gebäuden mit gastronomischen Betrieben hat das DVGW-Technologiezentrum nicht durchgeführt, wobei diese vermutlich den Trinkwasserverbrauch in Wohngebäuden ebenfalls ansteigen lassen. Wasserverbräuche in den verschiedenen Gewerben die in Wohngebäuden angesiedelt sind, liegen nicht vor; zudem ist eine Ermittlung ihrer Beschäftigtenzahlen nur auf der Basis von Annahmen möglich.

2.4.2. Forschungsstand zu Teilwasserverbräuchen in Wohngebäuden

Zur besseren Einordnung des im Kapitel 2.4.1 als Ausgangsbasis für die Trinkwasser-substitution festgelegten Pro-Kopf-Verbrauchs der Frankfurter Bevölkerung von $118 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$ werden im Folgenden die Datengrundlagen und der aktuelle Forschungsstand zu statistischen Wasserverbräuchen in Wohngebäuden Deutschlands dargestellt.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 410 (DVGW 2008) stellt eine (statistisch orientierte) Grundlage dar, mit der üblicherweise der Wasserbedarf in Wohngebäuden bzgl. der unterschiedlichen Nutzungsbereiche ermittelt wird. Erste Erhebungen aus den Jahren 1972 bis 1976 wurden 1980 bis 1982 ergänzt, basierend auf insgesamt 5 auswertbaren Messobjekten. Eine erste Anpassung dieser Wasserdatenerhebung an reduzierte Wasserverbräuche folgte 1995. Aktuell wird eine Überarbeitung aus dem Jahr 2008 verwendet (DVGW 2008). Ökologisches und Kostenbewusstsein, technische Entwicklungen und demografischer Wandel führten seit Beginn der 1990er Jahre zu Rückgängen beim Gesamt- und beim Pro-Kopf-Verbrauch. Im Datenblatt werden im Bereich der Haushalte verschiedene Verbrauchszwecke unterschieden, die in unterschiedlicher Weise von Einsparungen betroffen waren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zuordnung des durchschnittlichen Tagesverbrauchs nach DVGW-Arbeitsblatt W 410

| | $\text{l}/(\text{E} \cdot \text{d})$ | % |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| Baden, Duschen, Körperpflege | 43 | 36 |
| Toilettenspülung | 32 | 27 |
| Wäsche waschen | 15 | 12 |
| Geschirr spülen | 7 | 6 |
| Raumreinigung, Autopflege, Garten | 7 | 6 |
| Essen und Trinken | 5 | 4 |
| Kleingewerbe | 11 | 9 |
| Summe | 120 | 100 |

Es besteht die Frage, ob die 2008 erhobenen Teilverbräuche noch aktuell sind. Der Abschlussbericht einer neueren Studie aus dem DVGW-Technologiezentrum Wasser, „Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs“, liefert weit aktuellere empirische Daten zum Wasserverbrauch in Haushalten; er basiert auf 156 Messobjekten in 12 Städten und weist weitere Trinkwassereinsparungen auf (Martin et al. 2017). Messungen im häuslichen Bereich wurden dabei für die Wasserverbräuche beim Duschen, Toilettenspülung, Waschmaschinen und Geschirrspülmaschinen zwischen Juli 2013 und Mai 2016 durchgeführt (vgl. Tabelle 2). Aufgrund dieser operativen Beschränkung sind jedoch die entsprechenden Gruppen (z. B. „Baden, Duschen, Körperpflege“ oder „Wäsche waschen“ des DVGW-Arbeitsblatts) nur noch zum Teil erfasst.

Tabelle 2: Tagesverbrauch und Veränderungen gegenüber DVGW-Arbeitsblatt W 410

| | I/(E*d) | Veränderung zu DVGW in % |
|----------------------|---------|---------------------------|
| Duschen | 25 | -42 ohne Badewanne |
| Toilettenspülung | 29 | -11 |
| Waschmaschine | 7 | -53 ohne Waschen per Hand |
| Geschirrspülmaschine | 1 | -85 ohne Spülen per Hand |

Eine Anpassung der Trinkwasserverbräuche im häuslichen Bereich ist auf der Grundlage des Berichts aber lediglich für die Kategorie Toilettenspülung möglich. Im Bereich Körperpflege wurden Messungen nur zum Gebrauch von Duschen durchgeführt; die Verbräuche in Badewannen und Waschbecken wurden nicht erhoben, so dass eine Anpassung der Gesamtmenge im Bereich „Baden, Duschen, Körperpflege“ nicht möglich ist. Auch im Bereich Wäschewaschen wurden lediglich Verbräuche durch Waschmaschinen gemessen; das Waschen per Hand ist nicht berücksichtigt. Ebenso wurde für die Kategorie Geschirrspülen lediglich der Verbrauch durch Geschirrspülmaschinen gemessen; Wasserverbräuche, die beim Spülen mit der Hand anfallen, wurden nicht berücksichtigt.

Für die Nutzungsbereiche Wäsche waschen und Geschirrspülen können weitere empirische Studien herangezogen werden, durch die ein umfassenderes Bild entsteht. Die Arbeitsgruppe von Prof. Stamminger an der Universität Bonn beschäftigte sich zunächst intensiv mit dem Einsatz von Waschmaschinen und Geschirrspülmaschinen im Haushaltsalltag, hat aber für den Bereich des Geschirrspülens in den letzten Jahren auch die ergänzenden Tätigkeiten „von Hand“ in den Blick genommen. Hierbei sind insbesondere im internationalen Vergleich interessante Unterschiede im Geschirrspülverhalten festgehalten worden (Maitra et al. 2017; Belke et al. 2018). Hingegen blieb bei den empirischen Erhebungen der Gewohnheiten beim Wäschewaschen die Handwäsche bisher ausgeklammert (vgl. Kruschwitz et al. 2014). Zudem haben sich Untersuchungen aus dieser Arbeitsgruppe (z. T. mit dem Öko-Institut) auch mit den Fragen der Programmnutzung beim Maschinenwaschen und der Auswirkung der Wahl zeitsparender Programme (vgl. Graulich et al. 2017) sowie dem Auslastungsgrad der Waschmaschinen (Schmitz et al. 2016) beschäftigt. In den letztgenannten Untersuchungen zur Maschinenwäsche fehlen jedoch Aussagen zur im Alltag eingesetzten Wassermenge, so dass es aktuell geraten scheint, mit den in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnissen von Martin et al. (2017) zu operieren.

Basierend auf aktuellen Datenerhebungen (ebd.; Richter und Stamminger 2012) wird der durchschnittliche Tagesverbrauch (DVGW 2008) teilweise aktualisiert. (Detailliertere Angaben zu den einzelnen Pro-Kopf-Verbräuchen in der Küche sind im Anhang 2.4 dokumentiert.)

Abbildung 1 zeigt die Substitutionspotenziale in Prozent, die sich aus den Messungen des DVGW-Technologiezentrums ableiten lassen (Martin et al. 2017), ergänzt durch Substitutionspotenziale im Bereich Raumreinigung/Autopflege/Garten (DVGW 2008).

Für den Wasserverbrauch an der Zapfstelle Küche wurde zudem Richter und Stamminger (2012) herangezogen, die Gesamtmenge von 11 Litern entspricht in etwa den Angaben der DVGW (2008), wonach für Geschirrspülen und Essen und Trinken 12 l pro Einwohner und Tag verbraucht werden. Der Verbrauch der Spülmaschine pro Einwohner und Tag gemäß Martin et al. (2017) beläuft sich auf 1 Liter. Somit beträgt der Gesamtverbrauch der Küche, Zapfhahn (Richter und Stamminger 2012) und Spülmaschine (Martin et al. 2017) 12 Liter, was auch den Werten der DVGW (2008) für Geschirrspülen und Essen/Trinken entspricht. Eine vollständige Aktualisierung aller Verbrauchszwecke ist nicht möglich. Aktuell gemessene Daten zu Wasserverbräuchen im Bereich Baden bzw. Körperpflege (ohne Dusche), Raumreinigung/Autopflege/Garten, Kleingewerbe und Waschen per Hand liegen nicht vor.

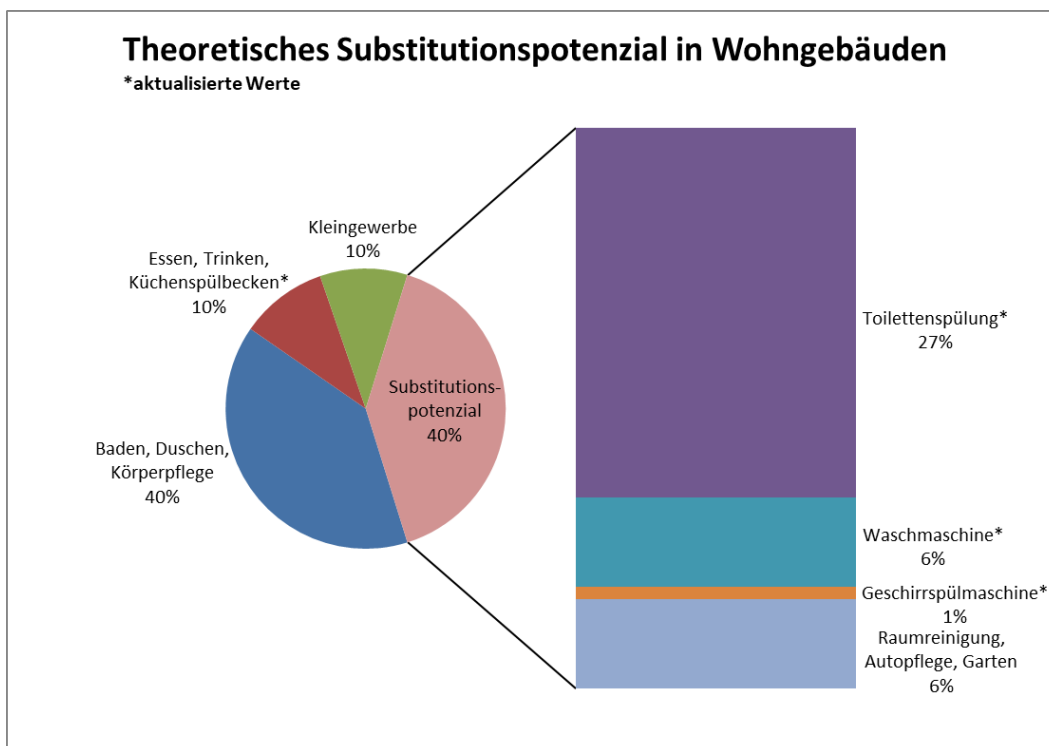


Abbildung 1: Trinkwasserverbrauch in Haushalten (Kreisdiagramm) und theoretisches Substitutionspotenzial (Balkendiagramm)

Beim häuslichen Trinkwasserverbrauch konnte die Gesamtsumme von im Bundesdurchschnitt 120 Liter pro Einwohner und Tag (DVGW 2008) reduziert werden auf 109 Liter pro Einwohner und Tag – ohne Kleingewerbe (siehe dazu Tabelle 1) –, wobei im Vergleich eine Verringerung des Verbrauchs sowohl für die Toilettenspülung (-3 Liter) als auch im Bereich Wäsche waschen (-8 Liter) auffällt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Aktualisierte Trinkwasserverbräuche in Wohngebäuden

| | I/(E*d) | % |
|--|------------|------------|
| Baden, Duschen, Körperpflege ^[2] | 43 | 40 |
| Essen, Trinken, Küchenspülbecken* ^[3] | 11 | 10 |
| Kleingewerbe ^[2] | 11 | 10 |
| Toilettenspülung ^[1] | 29 | 27 |
| Waschmaschine ^[1] | 7 | 6 |
| Geschirrspülmaschine ^[1] | 1 | 1 |
| Raumreinigung, Autopflege, Garten ^[2] | 7 | 6 |
| Summe | 109 | 100 |

[1] Martin et al. (2017), [2] DVGW (2008), [3] Richter und Stamminger (2012)

2.4.3. Theoretisches Substitutionspotenzial in Wohngebäuden in Frankfurt am Main

Basierend auf dem im Kapitel 2.4.1 abgeleiteten Pro-Kopf-Verbrauch von 118 Litern pro Tag für das Jahr 2017 ergibt sich unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.4.2, Tabelle 3 abgeleiteten prozentualen Wasserverbräuche ein durchschnittlicher häuslicher Pro-Kopf-Verbrauch an Trinkwasser in Frankfurt am Main für die in Tabelle 4 unterschiedenen Nutzungen für das Jahr 2017. Daraus lässt sich ein maximales mengenmäßiges Substitutionspotenzial für die unterschiedlichen Nutzungen in Wohngebäuden von 40 % des Trinkwasserverbrauchs (z.B. Toilettenspülung, Wasch- und Geschirrspülmaschine, Raumreinigung) ableiten; Voraussetzung ist, dass aktuell nur in einem sehr geringen Umfang im Haushaltsbereich Trinkwasser substituiert wird.

Tabelle 4: Pro-Kopf-Wasserverbrauch der unterschiedlichen Nutzungen in Wohngebäuden in Frankfurt am Main für das Jahr 2017

| | %-Anteil aus Tab. 3 | I/(E*d) |
|-------------------------------------|---------------------|------------|
| Baden, Duschen, Körperpflege | 40 | 47 |
| Zapfstelle Küche | 10 | 12 |
| Kleingewerbe | 10 | 12 |
| Toilettenspülung | 27 | 31 |
| Waschmaschine | 6 | 8 |
| Geschirrspülmaschine | 1 | 1 |
| Raumreinigung, Autopflege, Garten | 6 | 8 |
| Pro-Kopf-Angabe in der Summe | 100 | 118 |

Es wird davon ausgegangen, dass – wenn Betriebswasser in entsprechender Qualität häuslich zur Verfügung steht – bei den folgenden Nutzungen Trinkwasser durch Betriebswasser substituierbar ist:

- Toilettenspülung
- Gartenbewässerung
- verschiedene Reinigungszwecke
- Waschmaschinen (in Abhängigkeit von der Akzeptanz durch die Haushalte)
- Geschirrspülmaschinen (in Abhängigkeit von der Akzeptanz durch die Haushalte)

Insbesondere für die drei letztgenannten Nutzungen sind einerseits rechtliche und technische Regelungen zu beachten (vgl. Kapitel 1.7); es besteht jedoch auch keine durchgehende Bereitschaft zur Substitution. Für den häuslichen Bereich wurde daher in den empirischen Kapiteln durchgängig darauf verzichtet, die Verwendung in Geschirrspül- und Waschmaschinen anzunehmen; in Abhängigkeit vom Gebäudetyp wurde im Szenario „Besondere Anstrengungen“ vor allem für den Zeitraum 2030 bis 2050 (nach sozio-kultureller Etablierung einer „Betriebswasser-Kultur“) anteilmäßig eine (eingeschränkte) Verwendung von Betriebswasser für Waschmaschinen veranschlagt. Im gewerblichen Bereich bestehen hier z. T. andere technische Möglichkeiten (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Auswahl der zu substituierenden Verbrauchszwecke und Berechnungen auf der Basis zweier Modellquartiere folgen in Kapitel 5.1.

Für die Berechnung zukünftiger Wasserverbräuche bezogen auf die differenzierten Teilnutzungen auf Haushaltsebene für Deutschland liegen bisher keine validen Prognosen vor. Daher wurden die empirisch in Tabelle 4 abgeleiteten Nutzungsmengen ohne Änderung fortgeschrieben und in den Szenarien auch für die Ermittlung der künftig möglichen Trinkwasser-Substitution verwendet.

Auch der Wasserbedarf für andere Nutzungen (z. B. die Bewässerung von öffentlichem Grün) wurde einfach aus der Gegenwart in die Zukunft verlängert. Teilweise wurden Realverbräuche in die Zukunft fortgeschrieben; Bezugsjahr ist 2017, soweit Daten für dieses Jahr erhältlich waren. Teilweise wurde hier mit den gängigen Faustzahlen gearbeitet (z. B. Wasserverbräuche in den Büros).

2.4.4. Datengrundlagen zu den spezifischen Wasserverbräuchen gesondert betrachteter Orte und zentralörtlicher Funktionen

Andere Vorgehensweisen zur Ermittlung von Wasserverbräuchen in zentralörtlichen Einrichtungen, Gewerbe- und Bürogebäuden und Flächen unterschiedlicher Nutzungen wurden für die theoretische Ermittlung des dortigen Trinkwassersubstitutionspotenzials (Kapitel 5.2) getroffen. Erläuterungen hierzu befinden sich in Anhang 5.2.

Tabelle 5: Frankfurt-am-Main-spezifische Kenngrößen und Literaturwerte, die verwendet wurden

| Kapitel | Bezeichnung | Kennzahl | Einheit | Quelle |
|---------|--|----------|--------------------------|------------------------------------|
| 5.2.2 | 1. Toilettenspülung, Schulen | 6 | l/Pers*d | (DVGW 2008) |
| | 2. Toilettenspülung, Schulen | 6 | l/Pers*d | (DIN 1989-1:2002-04) |
| | Reinigung Sanitärbereich | 100 | l/Sanitärbereich*d | Eigene Schätzung |
| | Reinigung Böden | 0,125 | l/m ² *d | (BMU 2017) |
| | Klimaanlage | 170 | l/d (Mai-August) | Erhebung (Messung) |
| | Vorlesungsgebäude, Substitutionspotenzial | 7,2 | l/Pers*d | Erhebung und Berechnung |
| | Mensa, Umkehrosrose Spülmaschine | 9,5 | l/Essen | Erhebung und Berechnung |
| | Mensa, Substitutionspotenzial | 1,4 | l/Pers*d | Erhebung und Berechnung |
| 5.2.3 | Toilettenspülung in Bürogebäuden | 12 | l/Pers*d | (DIN 1989-1:2002-04) |
| | Toilettenspülung, Reinigungsarbeiten, Klimaanlagen | 16,3 | l/Pers*d | Erhebung und Berechnung |
| 5.2.7 | Bewässerung, Baum | 150-250 | l/Baum/Bewässerungswoche | Erhebung (Expertenangabe) |
| 5.2.8 | Naturrasenplatz | 950 | m ³ /Platz/a | (Amt für Bau und Immobilien 2018b) |
| | Kunstrasenplatz | 1.260 | m ³ /Platz/a | Erhebung (Expertenangabe) |
| | Hartplatz | 750 | m ³ /Platz/a | Empfehlung der Stadt |

d: Bezogen auf ein Jahr werden je nach Bereich eine unterschiedliche Anzahl an Tagen für die Berechnungen verwendet (190 Schultage, 150 Vorlesungstage, 250 Arbeitstage im Bürobereich etc.), Vorgehen und Betrachtungsweise der ermittelten Kennzahlen (Kapitel 5) und der Szenarientwicklung (Kapitel 7)

In Kapitel 6 wurden für gesondert betrachtete Orte in Frankfurt am Main spezifische Zahlen erhoben. Um das Substitutionspotenzial zu ermitteln, musste teils auf weitere Werte aus der Literatur zurückgegriffen werden. Teilweise konnten keine validen Aussagen zum Substitutionspotenzial gemacht werden, weil es im Rahmen der Studie nicht möglich war, die notwendigen Daten für Berechnungen zu erheben oder in der Literatur zu finden. In diesem Fall wurde teils mit Schätzungen gearbeitet, zum Teil wurden auf der Basis der Frankfurter Personenzahlen einzelne Literaturwerte hochgerechnet, z. B. für die Toilettenspülung, um eine Größenordnung eines minimalen Substitutionspotenziales zu erhalten. Teils wurde auch der Jahres-Trinkwasserverbrauch herangezogen, wenn die Tätigkeit in der Einrichtung auf eine Substituierbarkeit des Trinkwasserverbrauchs schließen lässt oder diese sogar angegeben werden konnte (Beispiele Grünflächenamt: Bewässerungswasser, Sporteinrichtungen). Manche der erhobenen

Daten konnten zwar hochgerechnet werden, sind aber aufgrund fehlender Informationen zur technischen Umsatzbarkeit und der dafür notwendigen Voraussetzungen mit großer Unsicherheit belastet (z. B. gewerbliche Spülmaschinen, Klimaanlage). Für die Szenarienbetrachtungen in Kapitel 8 wurde deshalb häufig von Minimalwerten für eine Extrapolation auf das Stadtgebiet ausgegangen.

2.5. Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung

Für die Bevölkerungs- und auch für die Wohnungsentwicklung konnte weitgehend auf den städtischen Statistiken und Prognosen aufgebaut werden. Bis zum Jahr 2030 wird nach dem Integrierten Stadtentwicklungskonzept und der aktuellen Bevölkerungsvorausberechnung in Frankfurt am Main ein Anstieg der Bevölkerung auf 810 000 Einwohner erwartet. Heruntergebrochen auf den aktuellen Einwohnerbestand bei Erstellung der Studie (Stand 31.12.2019) entspricht dies einem Bevölkerungszuwachs von rund 52 000 zusätzliche Bewohner*innen). Zur Befriedigung des heute bereits bestehenden Nachholbedarfs, ergibt sich nach einer Prognose des Instituts Wohnen und Umwelt für die Stadt Frankfurt am Main ein Bedarf nach 90 000 Wohnungen bis zum Jahr 2030 (Stadtplanungsamt Frankfurt am Main 2019: 18). Die Gesamtzahl der im Integrierten Stadtentwicklungskonzept Frankfurt 2030+ genannten neu zu schaffenden 90 000 Wohnungen jedoch ist politisch aktuell extrem umstritten.

Gemäß des Wohnbauentwicklungsprogrammes 2015 sind bis spätestens 2025 flächenmäßig über 30 000 Wohnungen realisierbar und können Baureife erlangen. In Frankfurt am Main gibt es nur noch wenige Konversionsflächen, auch die Umnutzung von gewerblichen Flächen zu Wohnflächen wurde im öffentlich beschlossenen Masterplan Industrie als sehr kritisch für den Wirtschaftsstandort befunden. Möglichkeiten für die Innenentwicklung sind somit Umbau, Nachverdichtung und Anpassung bzw. Transformation von bestehenden Siedlungsbeständen. Da zum Zeitpunkt der Berechnungen keine Bevölkerungsprognosen bis 2050 für das Stadtgebiet Frankfurt vorlagen, wurde mit Hilfe von rechnerischen Annäherungen gearbeitet, ein Experteninterview geführt und weitere Informationen beim Bürgeramt, Statistik und Wahlen telefonisch eingeholt. Auf diesem Wege kam es zu der Annahme, dass bis zu 40 000 weitere Wohnungen geschaffen werden können. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass mit Hilfe von Nachverdichtungsprojekten 10 000 zusätzliche Wohnungen geschaffen werden können. Unter Berücksichtigung einer Verdichtung in den Altbeständen durch den Ersatz bestehender Wohnungen kann angenommen werden, dass insgesamt bis in 2030+ max. 70 000 Wohnungen neu geschaffen werden können.

Für das Jahr 2030 wird davon ausgegangen, dass in Frankfurt 810 000 Menschen leben werden (Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2015). Die weitere Vorausschau gestaltet sich aktuell schwierig, da unklar ist, ob die Frankfurter Entwicklung bei der Ausweisung von Bauland an Grenzen des Wachstums stößt. Um für 2050 eine mögliche Bandbreite des Substitutionspotenzials zu veranschaulichen, wurden zwei unterschiedliche Entwicklungen der städtischen Bevölkerung als mögliche Varianten betrachtet. Als minimale Bevölkerungsentwicklung für das Jahr 2050 wird von

einer Gesamteinwohnerzahl von 817 000 Menschen ausgegangen, womit die Umsetzung des in der Wohnbaulandbereitstellung 2025 (Stadtplanungsamt Frankfurt am Main 2015) berechneten Wohnungspotenzials und eine Nachverdichtung von 10 000 Wohneinheiten bei gleichbleibender Zahl der Personen pro Wohneinheit umgesetzt sind (siehe Tabelle 6). Für die maximale Bevölkerungsentwicklung wurden mit Hilfe einer Annäherung und Schätzungen, validiert durch Experten, gearbeitet, wonach 885 000 Einwohner in Frankfurt am Main leben werden. Die Prognose der Hessenagentur, die bei dieser Erarbeitung noch nicht veröffentlicht war, wonach in Frankfurt am Main im Jahr 2050 880 000 Menschen leben werden, hat diese Zahl annähernd bestätigt (HessenAgentur 2019).

Im Rahmen des Gutachtens wurde mit einer hohen und einer niedrigen Bevölkerungsvariante gearbeitet. Durch die Ausschöpfung des im WEP dargestellten Wohnungspotenzials ist die Entwicklung in beiden bis 2030 gleich. Bei der niedrigen Variante werden bis 2050 lediglich weitere 5 000 WE durch Nachverdichtung geschaffen. In der hohen Variante kommt es zwischen 2030 und 2050 zu weiteren 36 000 Wohneinheiten, und zusätzlich einer Steigerung der Haushaltsmitglieder von derzeit 1,9 Personen zu 2,2 Personen.

Tabelle 6: Bandbreite einer möglichen Bevölkerungsentwicklung, die der Studie zugrunde gelegt wurde, mit Quellenangaben

| | niedrig | | hoch | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | bis 2030 | bis 2050 | bis 2030 | bis 2050 |
| Wohneinheiten (WE) | | | | |
| Neue Wohneinheiten (WE) nach WEP, IStEK | 29.000 | 1.000 | 29.000 | 30.000 |
| Neue WE durch Nachverdichtung ^[1] | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 6.000 |
| Summe neue WE | 34.000 | 6.000 | 34.000 | 36.000 |
| Neue Einwohner | | | | |
| 1,9 E/WE | 64.600 | 11.400 | 64.600 | |
| 2,2 E/WE ^[2] | | | | 79.200 |
| Einwohner insgesamt ^[3] | 810.000 | 817.093 | 805.693 | 884.893 |

[1] Angelehnt an die Schätzung von Experten aus dem Stadtplanungsamt Frankfurt am Main

[2] derzeit wohnen in Frankfurt am Main durchschnittlich 1,9 Menschen in einer Wohneinheit. In der hohen Bevölkerungsvariante wird davon ausgegangen, dass nach 2030 durch nicht näher spezifizierte Maßnahmen (z. B. Mieterhöhung oder Wohnraumbewirtschaftung) entsprechend die Bevölkerung in Frankfurt am Main weiter wächst und dadurch auch die Anzahl der Bewohner*innen, die in einem Haushalt leben, gegenüber 2017 steigt.

[3] Einwohner am 31.12.2017: 741.093 (Quelle Statistisches Jahrbuch Frankfurt am Main 2018)

2.6. Schlussfolgerung

Trinkwasserverbrauch und -substitution sind in ihrem Ausmaß von der Bevölkerungsentwicklung abhängig. In der Variante 1 wird davon ausgegangen, dass die Bevölkerung der Stadt Frankfurt am Main in 2030 auf 810 000 Einwohner*innen ansteigt (Neubaugebiete inkl. Nachverdichtung), bis 2050 erfolgt nur ein leichter Anstieg der Frankfurter Bevölkerung entsprechend der Prognose von Dobroschke und Gebhardt (2015) auf 817 000 Einwohner*innen. In der Variante 2 wird davon ausgegangen, dass die Bevölkerung ab 2030 ausgehend von 810 000 Einwohner*innen auf 885 000 Einwohner*innen in 2050 ansteigt. Dazu wurde mit einer verstärkten Schaffung von Wohnraum und einer höheren Belegungsdichte in den Wohneinheiten kalkuliert.

In der Stadt Frankfurt am Main wurden in 2016 pro Einwohner und Tag ca. 148 Liter verbraucht (Regierungspräsidium Darmstadt 2018). Die Pro-Kopf-Verbräuche in Stadtgebieten sind relativ hoch, da für Berechnungen der Trinkwasserverbrauch durch die gemeldeten Einwohner*innen geteilt wird. Somit werden Wasserverbräuche von einpendelnden Arbeitnehmer*innen, Schüler*innen und Student*innen sowie von Übernachtungsgästen und Besucher*innen, auf den Pro-Kopf-Verbrauch der in Frankfurt am Main gemeldeten Einwohner*innen umgerechnet. Unter Berücksichtigung genauerer Untersuchungen zum Wasserverbrauch wurde für die weiteren Berechnungen des Trinkwassersubstitutionspotenzials ein faktischer Pro-Kopf-Verbrauch von 118 Litern pro Tag angenommen.

Unter Berücksichtigung des täglichen Pro-Kopf-Bedarfs an Trinkwasser ergibt sich ein maximales Substitutionspotenzial in Wohngebäuden von 40 % des Trinkwasserverbrauchs unter Berücksichtigung des Einsatzes von Betriebswasser für Geschirrspül- und Waschmaschinen (insgesamt 7 %). Die Ausschöpfung des maximalen Einsparpotenzials ist dabei einerseits von der Qualität des zur Verfügung gestellten Wassers als auch vom Verbraucherverhalten respektive dessen Akzeptanz gegenüber Betriebswasser unmittelbar abhängig. Daher wird in den weiteren Berechnungsansätzen ein mögliches Trinkwassersubstitutionspotenzial von ca. 33 %, dies entspricht in etwa 39 l E/d, für die Nutzung in der Toilette und für Raumreinigung und Garten berücksichtigt.

Ein kommunaler Begleitkreis bestehend aus Akteuren aus dem Planungs- und Umweltsamt, der Mainova, der NRM und der Stadtentwässerung Frankfurt am Main wurde in das Vorhaben involviert.

3. Potenzielle Betriebswasserressourcen

Zur Substitution von Trinkwasser wird auf Wasser anderer Qualität zurückgegriffen. Neben Grau- und Regenwasser lassen sich auch herkömmliche Wasserressourcen als Betriebswasser einsetzen.

3.1. Klimatische Standortbedingungen

Klimatisch kann Hessen dem warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Breiten zugeordnet werden (HLUG 2014). Das lokale Klima Frankfurts wird grundsätzlich durch die Lage des Stadtgebiets im Rhein-Main-Becken, angrenzend an das nördliche Ende der Oberrheinischen Tiefebene, und die benachbarten Naturräume Wetterau und Taunus geprägt. Kennzeichnend sind vergleichsweise milde Temperaturen, geringe Jahresniederschläge, häufige windarme und austauscharme Wetterlagen sowie Strahlungswetterlagen im Sommer. Darüber hinaus beeinflusst der durch Hochhausbebauung stark verdichtete Innenstadtbereich sowie weitere dichtbebaute Stadtteile das Stadtklima mit der Folge von Überwärmung und eingeschränkter Belüftung oder Windböigkeit. Vorherrschende Windrichtungen sind Südwest und Nordost (Stadt Frankfurt am Main – Umweltamt 2014: 1; Stadt Frankfurt am Main 2016: 4, o. J.).

Bezüglich Klimaänderungen ist für Hessen ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um $0,8^{\circ}\text{C}$ im Vergleich vom Zeitraum 1901–1930 zu 1981–2010 festgestellt worden. Die interpolierte Zeitreihe von 1827–2015 der Jahresmitteltemperatur der Station Frankfurt/Main-Flughafen verzeichnet einen Anstieg des linearen Trends um fast 2°C , was einem mittleren Temperaturanstieg von $1,1^{\circ}\text{C}$ pro 100 Jahren entspricht (HLNUG 2016: 5ff.). Der Niederschlag ist zeitlich und räumlich sehr variabel; allerdings ist ein leichter Anstieg seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu beobachten (ebd.)(HLNUG 2016: 8ff.).

In Hessen haben seit Mitte des letzten Jahrhunderts Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) und heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) zugenommen sowie Frost- ($T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) und Eistage ($T_{\max} \leq 0^{\circ}\text{C}$) abgenommen. In zukünftigen Klimaprojektionen für das Stadtgebiet von Frankfurt am Main ist bei gleichbleibender Landnutzung eine Zunahme der Anzahl an Sommertagen wahrscheinlich (Früh et al. 2011: 55f.). Die Zunahme von Extremereignissen wie Starkregen oder Dürren gilt noch nicht als eindeutig statistisch belegbar, ist jedoch physikalisch plausibel (HLUG 2014: 16ff.). Ab 2050 ist gemäß der von HLNUG und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführten „Klimaanalyse und -projektion für das erweiterte Stadtgebiet Wiesbaden und Mainz“ in den Jahren 2050/2060/2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010, dessen Ergebnisse grundsätzlich auf das Stadtgebiet von Frankfurt am Main übertragbar sind, z. B. eine Verdopplung der Sommer- und Hitzetage sowie Tropennächte zu erwarten.

3.2. Oberflächenwasser

Flusswasser wird hauptsächlich in der Industrie als Betriebswasser verwendet, zum Beispiel als Kühlwasser für thermische Kraftwerke, aber auch für zahlreiche Produktionsprozesse. Seit dem 19. Jahrhundert wurde in Frankfurt am Main Wasser aus dem Main

von den Stadtwerken gefördert und über eine innerstädtische Betriebswasserleitung, die sog. Gießwasserleitung, für industrielle Zwecke und die Grünpflege zur Verfügung gestellt; nach der Bombardierung der Innenstadt, die auch diese Leitung zerstörte, wurde diese Betriebswasserversorgung nach Ende des 2. Weltkrieges eingestellt (Kluge/Schramm 1988).

Mainwasser wird derzeit von der Hessenwasser linksmainisch im Stadtteil Niederrad bei Flusskilometer 30,3 aus der fließenden Welle etwa 1,5 m unterhalb der Wasseroberfläche entnommen und zu Betriebswasser aufbereitet. Das Oberflächenwasser des Mains durchläuft dabei mehrere Aufbereitungsschritte. Dazu gehört die mechanische Vorreinigung, die Voroxidation mittels Kaliumpermanganat und der Einsatz von Fällungs- und Flockungshilfsmitteln (Aluminiumsulfat, aktivierte Kieselsäure), um Partikel und flockbare Inhaltsstoffe zu aggregieren. Die Flockungsprodukte werden in Kies- und Sandfiltern abfiltriert; gleichzeitig wird auf diesen Filtern Ammonium biologisch oxidiert. Als Abschluss der Aufbereitung erfolgt eine Filtration über Aktivkohle zur adsorptiven Elimination organischer Inhaltsstoffe. Das so aufbereitete Wasser wird zur Infiltration eingesetzt, aber auch als Betriebswasser an Dritte abgegeben.

In den späten 1990er Jahren waren in Frankfurt am Main 30 Entnahmerechte für Flusswasser, für insgesamt 800 Mio. m³ gewährt (Cichorowski und Rührich 1997). Im Jahr 2016 wurden nach den aktuellen Erhebungen des Statistischen Landesamtes Hessen 322,6 Mio. m³ Oberflächenwasser in Frankfurt am Main gefördert, davon 315,7 Mio. m³ von Gewerbe und Industrie (inklusive 2,6 Mio. m³ Uferfiltrat) und 6,9 Mio. m³ für die öffentliche Wasserversorgung (HSL 2018a, 2018b). Die häufigste industrielle Nutzung von Mainwasser in Frankfurt am Main ist sein Einsatz als Kühlwasser; nach der Nutzung wird das Kühlwasser wieder eingeleitet.

Im Gespräch mit der Oberen Wasserbehörde wurde deutlich, dass bei der Nutzung von Mainwasser der baldige gebietliche Ausgleich eine wichtige Rolle spielt. Das entnommene Wasser soll nah an der Entnahmestelle wieder eingeleitet werden, unter Einhaltung der vorgeschriebenen Qualitätsmerkmale. Kommunales Abwasser wird prinzipiell in Kläranlagen gereinigt und anschließend in Vorfluter geleitet und damit in ein Fließgewässer. Somit könnte also auch Mainwasser als Betriebswasser in privaten Haushalten genutzt werden, da hier ebenfalls der Grundsatz des gebietlichen Ausgleiches eingehalten werden kann, wenn das als Betriebswasser genutzte Mainwasser nach der Nutzung und Reinigung in der Kläranlage wieder in den Main gelangt. Da es sich beim Main um ein Gewässer mit künstlich gesteuerten Wasserpegel handelt, ist nach Ansicht der Oberen Wasserbehörde generell nicht davon auszugehen, dass die Schifffahrt durch Betriebswasserentnahmen beeinträchtigt wird (Geselle 2018 mündlich).

Die aus der Nidda für Entnahmen zur Verfügung stehende Wassermenge ist im Vergleich zum Main sehr gering; Insbesondere die Anforderungen der Mindestwasserführung nach § 33 WHG werden bei einer stärkeren Inanspruchnahme von Oberflächenwassern vor allem in Trockenjahren bei gleichzeitiger Entnahme von Oberflächenwasser relevant werden. Bewertungen der Möglichkeiten von Wasserentnahmen könnten im Rahmen eines gesondert zu erstellenden Bewirtschaftungsplanes möglich sein.

Innerhalb der Städte sind zudem zahlreiche Bäche verrohrt. Sofern es sich nicht aus stadtökologischen Gründen empfiehlt, die Stadtbäche zu renaturieren (Düchs 2014), kann auf sie, solange das Wasser getrennt von der Schmutzwasserkanalisation geführt wird, zurückgegriffen werden. Ähnliches gilt für Drainagen aus landwirtschaftlichen Flächen, die z.T. gleichfalls in die Kanalisation eingeleitet werden.

3.3. Grund- und Quellwasser

Grundwasserführende Schichten sind in der Stadt Frankfurt am Main sehr unterschiedlich ausgeprägt (vgl. Abbildung 2); sie finden sich insbesondere im Bereich der Mainterrassen und im Stadtwald, aber mit geringerer Ergiebigkeit auch im westlichen Stadtbereich und entlang der Nidda. Nur geringfügige Grundwasservorkommen finden sich heute im Bereich des Frankfurter Horstes, auf dem die gründerzeitlichen Stadtviertel Nordend und Ostend (zum Teil) sowie Bornheim und weitere sich nach Norden anschließende Stadtteile wie Dornbusch, Eckenheim oder Preungesheim liegen und im Bereich des Sachsenhäuser Berges; vor der mit dem Siedlungsbau einhergehenden Versiegelung konnten dort aber dauerhaft Brunnen betrieben werden, die z.T. mehrere Jahrhunderte lang für die historische Wasserversorgung genutzt wurden (z.B. Brunnen innerhalb der Warten für die Versorgung der Sachsenhäuser und der Friedberger Warte; mehrere Brunnen im Friedberger Feld im heutigen östlichen Nordend und im Knoblauchsfeld im heutigen westlichen Nordend wurden ab dem 17. Jahrhundert bzw. dem frühen 19. Jahrhundert für die städtische Wasserversorgung genutzt (Rödel 1983: 78). Die Seehofquelle, die traditionell von Sachsenhäuser Gärtnern genutzt worden war, diente im 20. Jahrhundert als Betriebswasserquelle für den historischen Schlachthof (ebd.; Kluge und Schramm 1988), bevor sie in den 1990er Jahren für die Betriebswasserversorgung im Deutschherrnviertel verwendet wurde.

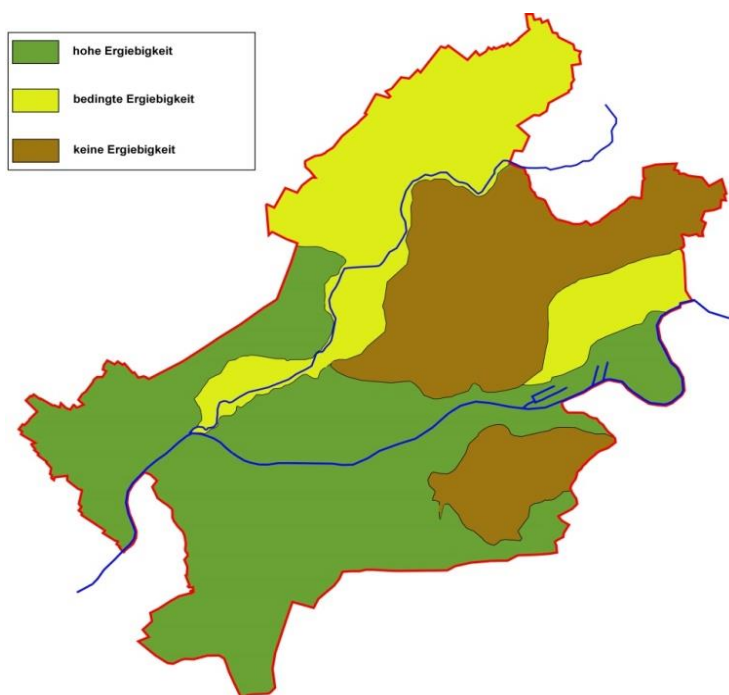


Abbildung 2: Grundwasserergiebigkeit von Frankfurt am Main

Quelle: Nach Hessenwasser (2019)

Nach den aktuellen Erhebungen des Statistischen Landesamtes Hessen wurden 2016 10,7 Mio. m³ Grund- bzw. Quellwasser in Frankfurt am Main gefördert, davon 5,6 Mio. m³ von Gewerbe und Industrie und 5,1 Mio. m³ für die öffentliche Wasserversorgung (ohne angereichertem Grundwasser) (HSL 2018a, 2018b). Hinzu kommt die Entnahme von weiteren 2,6 Mio. m³ Uferfiltrat durch Gewerbe und Industrie) (HSL 2018a, 2018b). Uferfiltrat und angereichertes Grundwasser, welches für Zwecke der öffentlichen Wasserversorgung entnommen wird, wird statistisch nicht gesondert ausgewiesen. Die Entnahmen liegen laut dem Cooperative-Gutachten aus dem Jahr 1991 weit unterhalb des in Frankfurt am Main zum Zeitpunkt der Datenerhebung verfügbaren Dargebotes an Grundwasser. Im Stadtgebiet betragen die Grundwasserentnahmerechte damals 45 Mio. m³ (Cichorowski et al. 1991). Darin waren 8,6 Mio. m³ Oberflächenwasser (angereichertes Grundwasser) enthalten (vgl. Anhang 3.2.1). Es ist davon auszugehen, dass zwischenzeitlich einige der damals genehmigten Entnahmerechte nicht verlängert oder den aktuellen Verhältnissen angepasst wurden.

Gemäß den Angaben der Oberen Wasserbehörde belaufen sich gewerbliche und industrielle Grundwasserentnahmerechte im Jahr 2016 auf 2,5 Mio. m³, plus eine Erlaubnis mit unbegrenzter Entnahmemenge. Die tatsächlichen Entnahmen dieser Gruppe beliefen sich nach den Meldungen bei der Oberen Wasserbehörde auf maximal 1,1 Mio. m³, (Anhang 3.2.3).

Einen Hinweis auf potenziell nutzbare Grundwasservorkommen geben weiterhin die Grundwasserhaltungen aufgrund von Baustellen. Nach Angaben der unteren Wasserbehörde waren 2016 dort 32 Wasserhaltungen mit einer Gesamtfördermenge von 2 268 000 m³ Grundwasser genehmigt (Stadt Frankfurt am Main, Mainova, Hessenwasser 2021); möglicherweise wurden die erteilten Wasserrechte aber nur zu einem kleinen Teil ausgeschöpft. Gegenüber 2016 reduzierten sich die Wasserhaltungen in 2018 auf ca. 1 145 000 m³, mit sinkender Tendenz. Dies gilt auch für die Ableitungen in die Kanalisation; von Seiten der Behörde wird eine Wiederversickerung des geförderten Grundwassers bevorzugt. Im Jahr 2016 wurden in Frankfurt am Main 385 000 m³ Grundwasser aus 26 Baustellen in die Kanalisation geleitet (Anhang 3.2.4).

Die Grundwassernutzung hat sich in Frankfurt am Main verändert. Bei Hochhäusern in Bereichen mit anstehendem Grundwasser ist z.T. eine dauerhafte Grundwasserhaltung erforderlich, die auch mit geothermischen Nutzungen gekoppelt wird. Entnahmen von Grundwasser für die Nutzung sind in Frankfurt am Main sowohl aufgrund von lokalen Qualitätsverschlechterungen (z.B. Havarien im Bereich von Gleisanlagen, Altlasten, Verunreinigungen durch den Flughafenbetrieb usw. (Magistrat der Stadt Frankfurt am Main 2014)) zurückgegangen als auch aufgrund von wirtschaftlichen Veränderungen und Neubewertungen. Seit dem Jahr 2005 wurden 25 Brunnen im Frankfurter Stadtgebiet stillgelegt, mit einer jährlich genehmigten Entnahmemenge von 3,7 Mio. m³ pro Jahr (Anhang 3.2.5).

Auf Empfehlung der beteiligten städtischen Akteure im Rahmen dieser Studie werden Entnahmen mit geringen Förderraten die bei der Unteren Wasserbehörde geführt werden, nicht ermittelt. Eine Befragung aller Akteure mit Entnahmerechten empfiehlt sich

vermutlich nicht: Bei einer Auswertung der Fluss- und Grundwasser- sowie Betriebswasserverteilung im Jahr 1997 stellten die Ingenieure der Cooperative fest, dass bei der Auswertung der zur Verfügung gestellten Unterlagen „keine Vollständigkeit erzielbar ist“ (Cichorowski et al. 1997).

Im Rahmen der Bewertung verschiedener potenzieller Betriebswasserressourcen ist zu berücksichtigen, dass nach der aktuellen Rechtsbesprechung viele der vormals bestehenden Entnahmerechten heute nicht mehr bestehen oder nur noch stark eingeschränkt sind. Entnahmen aus Bauwasserhaltungen stehen nur diskontinuierlich zur Verfügung und sind als Potenzial zur Substitution von Trinkwasser somit nur eingeschränkt nutzbar. Auch die Ausweisung von Landschaftsschutzgebieten und Vorgaben zur Mindestwasserführung von Fließgewässern führen dazu, dass vormals zur Wassergewinnung herangezogene Areale heute und zukünftig zur Bereitstellung von Betriebswasser nur noch eingeschränkt genutzt werden können oder sogar ausscheiden.

Wasseruntersuchungen, die regelmäßig im Rahmen der Notwasserversorgung durchgeführt werden, erlauben aufgrund der räumlichen Verteilung der Notwasserbrunnen über das Stadtgebiet ein ungefähres Bild der Grundwasserbelastung. Aus Geheimhaltungsgründen war es jedoch nicht möglich, einen Überblick über Belastungen und den möglichen Behandlungsaufwand zu erhalten. Über das gesamte Stadtgebiet verteilt wurden im Rahmen von Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen eine Vielzahl von Grundwassermessstellen abgeteuft und betrieben. Über deren Lage und den ordnungsgemäßen Ausbau, der für qualitative Aussagen unerlässlich ist, als auch über die dort erhobenen Messwerte liegen derzeit keine Informationen vor.

Ähnlich wie Stadtbäche wird auch das Wasser aus auf dem Stadtgebiet befindlichen Quellen ungenutzt in die Kanalisation eingeleitet. Diese Quellen können, wenn die Wasserqualität es zulässt oder eine lokale Behandlung möglich ist, jeweils örtlich als Betriebswasser genutzt oder in ein entsprechendes öffentliches Versorgungsnetz eingeleitet werden. Auch hier ist zu beachten, dass zur Realisierung entsprechender Trinkwassersubstitutionspotenziale Betriebswasser von den Quellen kontinuierlich zur Verfügung stehen sollte.

3.4. Regenwasser

Die Stadt kann insbesondere hin zum Taunusrand eine jährliche Niederschlagsmenge vorweisen, die theoretisch in Einfamilienhäusern für eine Substitution des Trinkwassers ausreichend wäre; der Niederschlag nimmt jedoch über den Main hin bis zum Flughafen um ein Siebtel ab, so dass dort die Ausbeute niedriger ist. Allerdings kann sowohl zum Taunusrand bis südlich des Mains in Trockenzeiten eine Nachspeisung erforderlich werden. Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt im Frankfurter Westend durchschnittlich etwa 660 Millimeter. Im Februar ist lediglich eine Menge von 41 Millimetern Niederschlag zu erwarten. Bisher war der Juni der niederschlagsreichste Monat, in dem bis zu 80 Millimeter fallen (vgl. Warczok 2019).

Niederschlagswasser aus der Trennkanalisation

Auch das Wasser, das als Dachablauf, Hofablauf und Straßenablauf in einer Trennkanalisation gesammelt wird, kann als mögliche Quelle zur Betriebswasserherstellung dienen (SenS 2007). „Das Niederschlagswasser aus dem Regenwasserkanal wird über einen vorgeschalteten Schlamm- und Sandfang, der auch als Ölabscheider fungiert, in den Regenwasserspeicher geleitet. Im Anschluss an die biologische Aufbereitung und eine UV-Desinfektion wird das Betriebswasser für die WC-Spülung sowie zur Bewässerung von Freiflächen eingesetzt“ (ebd.: 16).

In Teilen von Frankfurt am Main, insbesondere in den Stadtteilen nördlich der Nidda, aber z. B. auch in Goldstein, besteht eine Trennkanalisation, die möglicherweise an geeigneten Stellen Potenziale für eine Betriebswassernutzung bietet, die sich allerdings nur mit Hilfe von Zisternen oder anderen Vorratsspeichern realisieren lassen. Die Potenziale sind bisher für Frankfurt am Main nicht untersucht.

3.5. Grauwasser

Gemäß dem DWA-Regelwerk Merkblatt DWA-M 277 ist Grauwasser definiert als „Teilstrom des häuslichen Abwassers ohne Teilströme aus Toiletten und Urinalen, teilweise unterschieden in stark und schwach belastet, als Ressource für Wasser- und Energiewiederverwendung; Grauwasser ist hinsichtlich seiner Zusammensetzung nicht mit häuslichem Schmutzwasser gleichzusetzen.“ (2017: 9). Grauwasser lässt sich nach seiner Belastung unterscheiden:

- Schwach belastetes Grauwasser aus Haushalten stammt in der Regel aus dem Bad (Dusche und Waschbecken); auch Waschmaschinenabwasser wird häufig miterfasst (Davoudi et al. 2016: 26). Nach getrennter Ableitung kann es entsprechend DWA-M 277 mit vergleichsweise einfachen technischen Mitteln so aufbereitet werden, dass es als Betriebswasser wiederverwendet werden kann
- Stark belastetes Grauwasser enthält auch Grauwasser aus der Küche. Daher sind nicht nur Reste gut abzuscheiden (z. B. Öle). Es sind hier in einem erheblichen Umfang Kohlenstoffverbindungen abzubauen. Je nach späterer Nutzung ist auch Phosphat zu eliminieren (vgl. DWA 2017).

Grundsätzlich stehen zur Behandlung von Grauwasser Verfahren wie SBR (Sequencing Batch Reactor), MBR (Membranbioreaktor), bei schwächerer Belastung auch Pflanzenkläranlagen und biologisch aktive Filter sowie Rotationstauchkörper zur Verfügung (Tolksdorf 2017). Kompakte geschlossene Systeme wie Biofilm- oder Membranverfahren erfüllen die Anforderungen an eine geringe Flächeninanspruchnahme im urbanen Raum.

Bei einer geringen Belastung des Grauwassers mit Nährstoffen ist das Reinigungsziel der Behandlung im Wesentlichen die Kohlenstoffelimination. Die Wasserwiederverwendung erfordert darüber hinaus eine hohe hygienische Ablaufqualität. Insbesondere biologische Verfahren (u. a. Wirbelbettreaktoren) weisen dabei eine gute Elimination von Pathogenen auf. Mit Ausnahme von MBR-Reaktoren sind aktuell die Verfahren

auf einer Quartiersebene jedoch nur bedingt geeignet, Standards für die Wasserwiederverwendung einzuhalten (ebd.). Die Membran eines MBR stellt in Kombination mit einer Hygienisierung eine zusätzliche Barriere für mikrobiologische Kontaminationen des Betriebswassers dar. Gemäß eines Multi-Barrieren-Ansatzes kann für die Behandlung von schwach belastetem Grauwasser daher eine derartige Kombination herangezogen werden.

Organische Inhaltsstoffe werden bei einem MBR hauptsächlich durch biologischen Abbau eliminiert und in einem geringeren Maß durch den Rückhalt an der Membran. Der zusätzliche Rückhalt ist jedoch dann nützlich, wenn kurzzeitige Schwankungen der Abbauleistung oder Schmutzfracht auftreten (ebd.). Im Gegensatz zu anderen Verfahren (insbesondere zur konventionellen Nachklärung) können Feststoffe durch einen MBR gut zurückgehalten werden. Die genannten Aspekte können nicht zuletzt auch einen positiven Effekt auf die ästhetische Qualität des Betriebswassers haben (z. B. Färbung, Trübung), was eine nicht unerhebliche Rolle bei der Nutzerakzeptanz spielen kann.

Aufgrund der biologischen Verfahren wird neben dem Produkt Betriebswasser als Nebenprodukt Schlamm entstehen, der entnommen und weiterbehandelt werden muss; insbesondere beim Einsatz von Filterverfahren werden hier auch Filtrate anfallen.

Bei einer Nutzung von Grauwasser sind im Vorgriff jeglicher Planungen und Umsetzungsgedanken die für den prognostizierten Bedarf zur Verfügung stehenden Ausgangsmengen zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 7). Die Bedarfs- und Ausgangsmengen basieren auf den Angaben in Tabelle 4 im Kapitel 2.4.3.

Tabelle 7: Zusammenstellung potenziell möglicher Betriebswassernutzungen in vier technischen Szenarien

| Möglichkeiten der Betriebswassernutzungen | l/(E*d) | Szenario A | Szenario B | Szenario C | Szenario D |
|---|-----------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Toilette | 31 | (+) | (+) | (+) | (+) |
| Raum reinigen, Garten | 8 | (+) | (+) | (+) | (+) |
| Waschmaschine | 8 | (-) | (-) | (+) | (+) |
| Geschirrspülmaschine | 1 | (-) | (+) | (-) | (+) |
| Betriebswassermenge | 48 | 39 | 40 | 47 | 48 |
| Grauwasser (aus Körperpflege) | 47 | + 9 l/(E*d) | + 8 l/(E*d) | 0 l/(E*d) | - 1 l/(E*d) |

(+) Versorgung mit Betriebswasser, (-) keine Versorgung mit Betriebswasser

Geht es alleine um die Trinkwassersubstitution in Siedlungen für innerhäusliche Verwendungen (also ohne einen Einsatz für Gärten, Balkons und Terrassen), reicht es nach Modellbetrachtungen für Frankfurt am Main aus, auf das mengenmäßig geringere Volumen an schwach belastetem Grauwasser zurückzugreifen. Wird auf den Einsatz für Wasch- und Geschirrspülmaschinen verzichtet, so steht auch ausreichend Wasser für die Grünpflege zur Verfügung (Davoudi et al. 2016: 42). Diese Variante führt zudem

zu wenigen Berührungspunkten im Alltag und erfordert nur geringe Verhaltensänderungen auf Seiten der Bewohner*innen; auch wird dieser Einsatz von einigen privaten Investoren diskutiert und wurde bereits kleinräumig im Versuch umgesetzt (vgl. Davoudi et al. 2016: 26). In Frankfurt am Main wird eine derartige Realisierung – Grauwassernutzung für Toilette und Reinigung und Garten – in einem Wohngebäude in der Salvador-Allende-Straße betrieben (Nolde 2019).

3.6. Klarwasser

Betriebswasser aus dem Kläranlagenablauf wurde in den vorliegenden Cooperative-Gutachten aus 1991 und 1997 bereits als mögliche Quelle für Betriebswasser erwähnt, aber in der kommunalpolitischen Diskussion bisher trotz der Größenordnung des Aufkommens nicht beachtet.

Die öffentliche Abwasserentsorgung in Frankfurt am Main meldete für das Jahr 2016 insgesamt 104,2 Mio. m³. Davon waren 20,4 Mio. m³ Niederschlagswasser, 20,5 Mio. m³ Fremdwasser (z. B. Oberflächenwasser, Grundwasser, Fehlanlüsse) und 61,2 Mio. m³ Schmutzwasser (HSL 2018b). Im Jahr 2016 belief sich das Abwasser aus Produktionsanlagen und Kühlsystemen von Industrie und Gewerbe auf 282,1 Mio. m³ (ebd.). Die beiden kommunalen Klärwerke in Frankfurt am Main haben 2015 in Niederrad/Griesheim einen durchschnittlichen Auslauf von 220 000 m³/d (entspricht 80,3 Mio. m³/a) und in Sindlingen durchschnittlich 50 000 m³/d (entspricht 18,3 Mio. m³/a) gemessen (Stadtentwässerung Frankfurt am Main o. J.).

International wird für die Verwendung von Kläranlagenablauf großes Potenzial erkannt (Becker et al. 2017). In Verbindung mit einer weitergehenden Aufbereitung kann eine Qualität sichergestellt werden, mit der auch für häusliche und gewerbliche Nutzungszwecke ein Einsatz als Betriebswasser möglich wird (Schramm und Zimmermann 2018). Allerdings müsste hier das Betriebswasser von den beiden Kläranlagenstandorten aus verteilt werden; der Standort in Niederrad/Griesheim ist dabei unter der Annahme, dass das Klarwasser vor Nutzung als Betriebswasser in einer weiteren Verfahrensstufe weiter aufbereitet wird, aber auch hinsichtlich des Verteilungsnetzes in räumlicher Konkurrenz mit der Mainwasseranlage zu sehen. Aus untersuchungspragmatischen Gründen wurde daher diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt. Der Standort Sindlingen liegt am westlichen Rand der Stadt. Von dort aus könnte evtl. auch die Versorgung des Main-Taunus-Zentrums oder der Bürogebäude in Eschborn mit Betriebswasser möglich werden. Für behandeltes Abwasser aus der Industrie müsste untersucht werden, ob dort eine Aufbereitung zur Betriebswassernutzung wirtschaftlich sein kann; evtl. ist dies bei Chemieparcs (bei denen mehrere Wasserarten eingesetzt werden) z. B. für Wasser, die eine Trinkwasser-ähnliche Beschaffenheit haben, der Fall. Allerdings kann auch hier in Bezug auf die Verteilung des theoretisch verfügbaren Betriebswassers eine Konkurrenzsituation entstehen, z. B. beim Chemiepark Höchst in Frankfurt am Main mit der Kläranlage in Sindlingen. Anders könnte die Situation beim Chemiepark in Fechenheim sein.

Wasser aus der Brunnenförderung der Industrie, das nach Nutzung in die Kanalisation geleitet wird, wird bei der Gebührenstelle der Stadtentwässerung (SEF) gemeldet. Gemäß einer Auskunft der SEF wurde 2016 Wasser aus 52 Brunnen, zur Bauwasser- und ständigen Grundwasserhaltungen zur Sicherung der Gebäudesubstanz, in die Kanalisation geleitet, insgesamt 0,3 Mio. m³ (vgl. Anhang 3.3.4). Inwieweit sich dieses Wasser qualitativ auch für eine Verwendung als Betriebswasser eignet, müsste überprüft werden, genauso wie die genaue örtliche Verteilung. Zur weiteren Verfolgung dieser und weiterer Optionen wäre abschließend zu prüfen, ob die hier genannten Abschlagsmengen in die Kanalisation nicht bereits in den Angaben der Unteren Wasserbehörde der Stadt Frankfurt am Main enthalten ist. Aufgrund der hohen Anzahl an Grundwasserfassungen und der damit einhergehenden geringen Abschlagsmenge wurde auf die Klärung des Sachverhaltes in Abstimmung mit dem Auftraggeber verzichtet.

3.7. Schlussfolgerung

Die verschiedenen Wasserressourcen in Frankfurt am Main reichen insgesamt nach den bisherigen Erhebungen pauschal aus, um den Betriebswasserbedarf von Frankfurt am Main zu decken. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Ressourcen räumlich ungleich verteilt sind, so dass das Dargebot zu einer dezentralen Versorgung und Bedarfsdeckung aus den verschiedenen Ressourcen häufig nicht ausreichen wird, sondern ergänzend (Teil-)Netze zur Betriebswasserversorgung aufgebaut werden müssen, um eine unterstützende (semi-)zentrale Versorgung zu gewährleisten.

4. Voraussetzungen zur Nutzung möglicher Betriebswasserpotenziale in Frankfurt am Main

In der Metropolregion Frankfurt Rhein-Main bestehen gute institutionelle Voraussetzungen dafür, dass die Nutzung von Regenwasser und anderen Wasserarten als Betriebswasser dort erfolgt, wo sie sich aufgrund einer Win-win-Situation für einzelne Akteure einzelwirtschaftlich rechnet. Bisher treten jenseits von Industrieparks aber nur vereinzelt Akteure auf, die viele weitere Akteure mit Betriebswasser versorgen.

Damit eine Substitution von Trinkwasser nicht nur nach dem Zufallsprinzip erfolgt, ist es von Seiten der Kommune erforderlich, möglichst steuernd zu gestalten. Die Möglichkeiten, die der Gesetzgeber hierzu den Kommunen und ihren öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen mit der Betriebswasserversorgungspflicht in § 30 Abs. 1 HWG eingeräumt hat, werden allerdings bisher von den Kommunen noch nicht aktiv aufgenommen. Der Aufbau einer eigenständigen öffentlichen Betriebswasserversorgung ist in Hessen gesetzlich privilegiert; die Verwertung von anfallendem Betriebs- und Niederschlagswasser ebenso wie die Versorgung von gewerblichen Großverbrauchern mit Betriebs- bzw. Oberflächenwasser ist nach § 36 HWG landespolitisch erwünscht.

Auf Grundlage der in den §§ 30 und 36 HWG vom Gesetzgeber eingeräumten Versorgungsauftrag besteht für die Kommune die Möglichkeit, in Fragen der Betriebswasserversorgung initiiierend und weiterhin steuernd tätig zu werden. Ein Kooperationsmanagement kann z. B. ausreichend berücksichtigen, dass andere Akteure, mit denen in Bezug auf die Betriebswasserversorgung zusammengearbeitet werden sollte, z. T. gegenläufige Interessen haben. Wichtige Bedenken der Gesundheitsbehörde, z. B. was Fehlanlüsse angeht, können systematisch aufgenommen werden. Zentralakteure, die die Betriebswasserversorgung im kommunalen Auftrag vor Ort umsetzen, würden nicht nur durch Akteure aus der Kommune unterstützt, sondern auch von solchen aus Wasserlieferregionen, die von einer verringerten Trinkwasserförderung profitieren können.

Besondere institutionelle Arrangements wären erforderlich, wenn in der Kommune eine tendenziell flächendeckende Betriebswasserversorgung erreicht werden soll (vgl. erläuternd Kapitel 4.3). Durch eine Monopolvergabe der Kommune oder Wahl einer hierarchisch geprägten Netzwerk-Koordination könnten hier deutlich geringere Abstimmungskosten zwischen Akteuren entstehen. Wird beispielsweise die Entscheidung über eine kommunale Betriebswasserversorgung von der Kommune gefällt, kann diese über das zu implementierende System entscheiden und es möglichst gemäß ihrem kommunalpolitischen Zielsystem umsetzen. Entsprechend wird es nicht erforderlich, dass viele verschiedene Akteure potenzielle eigene Pläne zur Betriebswasserversorgung nebeneinander verfolgen und miteinander koordinieren, sondern sie können sich ebenso wie Nutzer*innen sowie Architekten, Handwerk, Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden an den Zielvorgaben der Kommune orientieren.

Die frühzeitige kommunalpolitische Zuordnung der Systementscheidung an einen bestimmten Akteur, z. B. das kommunale Trinkwasserunternehmen, könnte auch vermeiden, dass es auf dem Gemeindegebiet an Gunststellen zu einer Vielzahl von Eigenversorgungen und einem evtl. Aufbrauchen der geeigneten Ressourcen kommt, so dass eine kommunale Betriebswasserversorgungsstruktur durchlöchert wird. Dieses „Rosinenpicken“ könnte vermieden werden bzw. die Kommune könnte frühzeitig selbst einen bewussten Umgang damit finden. Zur Substitution von Trink- durch Betriebswasser empfiehlt es sich daher, rechtzeitig die Entwicklung geeigneter institutioneller Arrangements vorzubereiten: Sie betreffen einerseits Betreiber- und Betriebsführungsmodelle, die auf verschiedenen räumlichen Ebenen und für unterschiedliche Wasserarten eingeführt werden können, und andererseits die Etablierung eines Qualitätsmanagements, mit dem sich insbesondere bauliche Fehllanschlüsse zwischen Betriebswasser- und Trinkwasserversorgung vermeiden lassen, wie sie vor allem während der Bauphase, aber (bei Reparaturen und Modernisierungen) auch in der Betriebsphase entstehen können.

Der Gesetzgeber hat bei der Setzung des Rechtsrahmens das gesundheitliche Vorsorgeprinzip betont; damit spielt für die Betriebswasserversorgung die Einbindung der Gesundheitsbehörden eine besondere Rolle. Innerhäusliche Betriebswasserversorgungsanlagen sind ihr anders als die für Gärten anzuzeigen. Die Nutzung von Betriebswasser für die Toilettenspülung ist in Haushalten, in Büros und Sportstätten gestattet. Es besteht Rechtssicherheit bei der Bereitstellung von Betriebswasser für Wasch- und Geschirrspülmaschine an Mieter und weitere Dritte, wenn ein Anschluss sowohl an die Trinkwasser- als auch an die Betriebswasserleitung vorhanden ist). Bei Einrichtungen, die einer infektionshygienischen Überwachung durch die Gesundheitsbehörde unterliegen, ist die Nutzung von Betriebswasser hingegen jeweils einzelfallbezogen mit dieser zu klären.

Fehllanschlüsse von Betriebswasser an Trinkwasserversorgungen sind unbedingt zu vermeiden (§17 Abs. 6 TrinkwV): Bei der Umsetzung von Betriebswassernetzen wird zur Vermeidung von Fehllanschlüssen zwischen Trink- und Betriebswassernetz empfohlen, frühzeitig ein umfassendes Qualitätsmanagement aufzubauen, das für die Planungsphase auch die Fachplaner und für die Bauphase die zu beauftragenden Unternehmen des Tief- und Wohnungsbaus umfasst. Eine wichtige Voraussetzung besteht darin, frühzeitig die Mitarbeitenden der wasserwirtschaftlich zertifizierten Fachunternehmen im Installationsbereich, aber auch Fachplaner für häusliche Infrastrukturen bezogen auf die Besonderheiten und zu vermeidenden hygienischen Risiken der Betriebswasserversorgung weiterzubilden.

Technische Regeln zur Betriebswasserversorgung bestehen in ausreichender Dichte und sind unterschiedlichen Dokumenten zu entnehmen: DIN-Norm 1988, DIN-Norm 1989, DIN EN 1717, dem DVGW-Arbeitsblatt W 555 und dem Merkblatt DWA-M 277. Die Kommunen im Arbeitsgebiet verwenden Satzungen sehr unterschiedlich, um damit z. B. den Aufbau und Betrieb einer Regenwasserversorgung vorzuschreiben. Für die geord-

nete Umsetzung von Betriebswasserversorgung eignen sich städtebauliche oder öffentlich-rechtliche Verträge und das satzungsrechtliche Instrument des Anschluss- und Benutzungszwangs.

Im Gesamtprozess ist zu berücksichtigen, dass von Seiten der Nutzer*innen auch die Akzeptanz bestehen muss, Betriebswasser einzusetzen. Entscheidend für eine Akzeptanz könnten neben der preislichen Ausgestaltung das visuelle Erscheinungsbild, die organoleptische Wahrnehmung und bei einem ansteigenden Anteil der Nutzer*innen auch die damit einhergehende ökologische und regionalpolitische Wirkung sein, aber auch soziokulturelle Momente.

4.1. Akteure und Technologieanbieter

Zentrale Akteure bei der Einrichtung und dem Betreiben von Betriebswasserversorgungen sind einerseits entweder Hauseigentümer oder die Betriebswasser nutzenden Unternehmen selbst (bei dezentraler Anlage). Andererseits können sowohl städtische oder privatwirtschaftliche Akteure diese Aufgabe übernehmen. Auf (kommunal)politischer Ebene kann es für eine effiziente Umgestaltung sinnvoll sein, hier eine Koordinationsfunktion aktiv einzunehmen.

Darüber hinaus sind Kooperationen zwischen unterschiedlichen Akteuren im Bereich der Planung, Implementierung und dem Betrieb nötig; diese können durch die Politik proaktiv gestaltet werden. Potenziell begünstigende Instrumente sind Netzwerkstrukturen, die das gemeinsame Lernen der an der Substitution beteiligten Unternehmen im Arbeitsgebiet der Hessenwasser begünstigen sowie ein Kooperations- und Innovationsmanagement zur Unterstützung der Substitution.

Ergänzend bieten auch neue Geschäftsmodelle und Kooperationen institutionelle Arrangements, die eine Substitution von Trinkwasser beeinflussen können an; evtl. bieten sie für Versorgungsunternehmen auch strategische Möglichkeiten angesichts der bestehenden Herausforderungen (PricewaterhouseCoopers 2017) an. Bereits Geiler (2003) sah für die Versorgungsunternehmen die Möglichkeit, an den derzeitigen Trinkwasserspar- und -substitutionsstrategien zu partizipieren. Folglich müssten die Unternehmen selbst zum Anbieter intelligenter Wasserspar- und Substitutionstechnologien werden und über ein Contracting eine Beeinflussung und Steuerung der Nachfrage bewirken. § 36 HWG sieht vor, dass die Träger der öffentlichen Wasserversorgung und von ihnen beauftragte Dritte im Rahmen bestehender technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten auf die rationelle Wasserversorgung hinwirken und dabei auch „die Verwertung von Betriebswasser und Niederschlagswasser“ anstreben.

Sieht man von einer älteren Studie von Sartorius (2007) für das Umweltbundesamt ab, fehlen genauere Marktübersichten über den Betriebswassermarkt in Deutschland. Mit Sartorius (2007: 27ff.) ist davon auszugehen, dass entsprechende Technologieanbieter „aus einer Vielzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen“ bestehen, aber auch umsetzende Ingenieurbüros werden sich stark für eine Trinkwassersubstitution aussprechen. Die häuslichen Abnehmer*innen von Betriebswasser, z. B. Mietparteien, aber

auch Eigentümer von Ein- bis Zweifamilienhäuser haben vermutlich ebenso wie zahlreiche Betreiber von entsprechenden Eigenversorgungen für Betriebswasser im Industrie- und Gewerbebereich eine sehr hohe Akzeptanz für Substitutionslösungen, soweit die sich ohne Komforteinbuße (z.B. starke Färbung oder Geruch des Betriebswassers) erreichen lassen, vgl. Schramm et al. (2020). Vorbehalte gibt es hingegen teilweise bei Investoren von größeren Bauobjekten (vgl. Bieker und Tolksdorf 2018). Innerhalb der Wohnungswirtschaft gibt es nach eigener Kenntnis Akteure, die selbst eine semizentrale Betriebswasserversorgung eingerichtet haben und betreiben, weil sie an der Einführung von Warmmietenmodellen (mit festen Nebenkostenblöcken) Interesse haben.

Sehr unterschiedliche Akteure können derzeit in Frankfurt am Main Lösungen im Bereich Betriebswasser anbieten. Einerseits können Unternehmen und Hauseigentümer eine Eigenversorgung aufbauen und dabei auf unterschiedliche Ressourcen zurückgreifen; dabei wird bisher zumeist an Einzelgebäude gedacht, nur selten an die Versorgung ganzer Wohnquartiere. Andererseits können verschiedene städtische und evtl. auch privatwirtschaftliche Akteure die Versorgung mit Betriebswasser flächendeckend (oder überwiegend) für bestimmte Quartieren anbieten (vgl. Tabelle 8). Neben den Grundstückseigentümern/der Wohnungswirtschaft (z.B. ABG und Tochter FAAG Technik) könnte die Versorgung der Kunden mit Betriebswasser folglich durch unterschiedliche Akteure stattfinden, die der Kommunalwirtschaft (Stadtentwässerung und Mainova) oder der Privatwirtschaft zuzurechnen sind (z.B. Veolia oder Industrieparkdienstleister wie Infraserb Höchst oder Allessa). Mit der ABGnova ist zudem ein gemeinsames Tochterunternehmen von kommunaler Wohnungswirtschaft und Mainova vorhanden, was eventuell gleichfalls in diesem Geschäftsfeld aktiv werden könnte. Diese Aufgabe könnte zudem für Unternehmen interessant werden, die sich in der Region im Bereich des Facility Managements engagieren, so dass hier evtl. auch Firmen wie WISAG ein neues Geschäftsfeld finden können.

Werden jenseits einer grundstücksbezogenen on-site-Versorgung mit Betriebswasser Versorgungsleitungen bzw. (Teil-)Netze aufgebaut, an die die Kund*innen in den Quartieren, Industriegebieten usw. angeschlossen werden, so können diese vom (z.B. kommunalen) Eigentümer selbst betrieben werden; daneben sind auch Betriebsführungsmodelle denkbar, bei denen beispielsweise die bereits genannten Akteure tätig werden könnten.

Tabelle 8: Schlüsselakteure bei der Substitution von Trinkwasser nach gebietlicher Ebene in verschiedenen Sektoren

| Ebene/Funktion | Wohnhäuser | Öffentliche Einrichtungen | Gewerbe/Industrie |
|-------------------------|---|---|---|
| Haus-/Grundstücks-ebene | Eigentümer Fremder Betriebsführer (z. B. Facility Management) Mieter als Betriebsführer | Kommune (z. B. Sportamt), sofern Eigentümer Kommunalwirtschaftlicher oder privater Betreiber oder Betriebsführer | Eigentümer Fremder Betriebsführer Mieter als Betriebsführer |
| Quartier | Genossenschaft der Eigentümer als Eigentümer/Betreiber Facility Manager des Eigentümers Fremder Betreiber Fremder Betriebsführer | Kommune oder Kommunalunternehmen als Eigentümer/Betreiber Fremder Betreiber Fremder Betriebsführer | Gemeinsames Unternehmen oder Genossenschaft der Eigentümer als Eigentümer/Betreiber Industriepark-Betreiber Fremder Betreiber Fremder Betriebsführer |
| Gesamtstadt | (un-)koordinierte Vielfalt von Akteuren oder wenige koordinierte Akteure | (un-)koordinierte Vielfalt von Akteuren oder wenige koordinierte Akteure | (un-)koordinierte Vielfalt von Akteuren oder wenige koordinierte Akteure |

Vor dem Aufbau von Betriebswasserversorgungen auf dem Gemeindegebiet kann es sinnvoll sein, dass sich die kommunalpolitischen und -wirtschaftlichen Akteure in der Gemeinde koordinierend abstimmen. In Anerkennung der politischen Gestaltungshoheit könnten sie eine Einigung darüber erzielen, wer bei dieser Aufgabe aktiv tätig werden sollte und wie gegebenenfalls die Arbeitsteilung zwischen verschiedenen kommunalwirtschaftlichen Akteuren verläuft (z. B. Aufbereitung von Mainwasser durch Hessenwasser, Aufbereitung von Grauwasser oder geklärtem Schmutzwasser durch die Stadtentwässerung und Verteilung durch die NRM).

Tabelle 8 macht deutlich, dass es sich um eine Vielzahl von potenziellen Schlüsselakteuren handelt, die bei freier Entwicklung evtl. nebeneinander auftreten und handeln können. Diese haben es mit weiteren Akteuren zu tun (vgl. Tabelle 9), die die Betriebswasserversorgung befördern oder behindern können, sofern sie ihr nicht neutral gegenüberstehen. Bestimmte Akteursgruppen sind auch sehr heterogen z. B. eine Landesverwaltung, zu der neben befürwortenden Ressorts auch hemmende und sogar generell skeptische Ressorts (z. B. Kartellbehörde) gehören können. Um sie gut mit einzubinden und um ggfs. auch zu erforderlichen Absprachen zu kommen, kann ein Kooperationsmanagement sinnvoll sein (vgl. Kapitel 4.4).

Tabelle 9: Weitere bei der Trinkwassersubstitution beteiligte Akteure und deren mögliche Positionen zum Thema

| Befördernd | Neutral | Beeinträchtigt | Unbekannte/mehrdeutige Haltung |
|--|---|----------------------|--|
| Umwelt-NGOs | Konsument*innen | Gesundheitswesen | Bundes- und Landesbehörden |
| Fachverbände für Betriebswasser, spezialisierte Ingenieurbüros | Verbraucherschutz | | Bezirks-, Regional- und Kommunalverwaltung |
| Technologieanbieter, Innovationsträger | Feuerwehr | | Architekten, Wohnbaugesellschaften |
| Forschungseinrichtungen | Versorgungsunternehmen | | Infrastrukturplaner, Baufirmen |
| Einzelpersonen und Gruppen mit starker ökologischer Prägung | In eigenen Häusern lebende Eigentümer*innen | Immobilienwirtschaft | Installateure |

Voreingeschätzt, bisher nicht empirisch unterfüttert

Fast alle der in Tabelle 9 gelisteten potenziellen Schlüsselakteure, die auf der Quartiers- und der gesamtstädtischen Ebene tätig sein können, sind bisher nicht im Bereich der Betriebswasserversorgung in Siedlungen unterwegs; Installateure beschränken sich in Frankfurt am Main bei der Trinkwassersubstitution zumeist auf die Integration von Regenwasser in Hauswasseranlagen. Dennoch ist es denkbar, dass aufgrund von landes- oder kommunalpolitischen Anreizen hier ohne Absprache mehrere Akteure nebeneinander beginnen, im Bereich der Betriebswasserversorgung zu agieren, sofern dies für sie erfolgsversprechend scheint. Für einen solchen Fall ist zu überlegen, ob es aus Sicht der Kommune nicht politisch opportun ist, hier den im HWG verankerten Versorgungsauftrag als kommunalpolitische Herausforderung anzunehmen und durch entsprechende Rahmensetzungen (und/oder Vereinbarungen) eigene Vorgaben einzutragen. Andernfalls kann es zu erheblichen Konkurrenzsituationen und auch zu Irritationen kommen, z.B. wenn unkoordiniert verschiedene Akteure nebeneinander beginnen, Betriebswasser Dritten zur Substitution von Trinkwasser anzubieten. Zudem ist zu erwarten, dass bei einem gleichzeitigen dezentralen Agieren (Aufbau von Eigenversorgungen) und (semi-)zentralen Agieren (Versorgung ganzer Quartiere) durch das freie Spiel der dezentralen Akteure viele Gelegenheiten wahrgenommen werden, die – wenigstens in bestimmten Teilräumen – ein gesamtstädtisches Agieren erschweren, weil „Rosinen“ schon von Einzelakteuren aufgenommen wurden und nicht mehr für die Gesamtlösung verwendet werden können.

4.2. Nachfragesteuerung

Im Unterschied zu einer reinen „Versorgungs-Orientierung“, bei dem versucht wird, einen wachsendem Bedarf durch zusätzliche Wassermengen (oder auch durch optimierte Nutzung von Wasserspeichern) zu befriedigen, zielt eine bewusste Beeinflussung der Nachfragesituation auf ein Auskommen mit dem vorhandenen Dargebot durch eine

Verringerung des Trinkwasserbedarfs.⁶ Unter „Demand-Oriented-Management“ versteht man die Steuerung der Nachfrage nach netzgebundenen Dienstleistungen bei den Abnehmern; es kommt so zu einer gezielten zeitlichen Verschiebung oder einer Verringerung der Nachfrage, z. B. in Spitzenlastzeiten, so dass es nicht nötig wird, das Angebot zu erhöhen (z. B. durch Erhöhung der Trinkwasserproduktion, weiteren Zukauf von Trinkwasser oder Schaffung zusätzlicher Speicherkapazitäten). Diese Idee ist nicht neu und in der Energiewirtschaft erprobt: So ist bereits seit 1953 in Zürich eine Rundsteuerung in Betrieb, die eine sehr robuste und einfache Nachfragesteuerung zur täglichen Absenkung der Spitzenlast in der Stromerzeugung ermöglicht, obgleich es sich um eine Vielzahl privater Anlagen und Vorrichtungen zu deren Aussteuerung handelt. Mittels der Signale der Rundsteuerung werden nachts die energieintensiven Warmwasserboiler gestaffelt ein- und wieder ausgeschaltet. Ähnlich können auch Angebote zur Substitution von Trinkwasser durch Bereitstellung von Betriebswasser in Strategien zum Demand-Oriented-Management eingepasst werden (Michel 1997).

In den letzten Jahren sind flexibilisierte Nutzungen und Ergänzungen der Leistungsfähigkeit von wasserwirtschaftlichen Anlagen und Einrichtungen in den Blick geraten, die ebenfalls nachfragesteuernd zum Lastenmanagement beitragen können, wenn das Unternehmen hier digitalisierte Steuerungstechnik auch an der Schnittstelle zum Kunden anbietet. Um Trinkwasser-Spitzen (z. B. an heißen Sommertagen) zu kappen, könnte dann die Zusp eisung von Trinkwasser für Betriebswasserzwecke – wo erforderlich – unterbunden werden. Stattdessen würde dort der Verbrauch über Blockchains (vgl. Yildiz und Ansmann 2018) bzw. über zentrale Steuerungseinrichtungen dokumentiert und Trink- bzw. Betriebswasser rechtzeitig vor einem kritischen Leerstand in die Zisternen nachgeliefert. Voraussetzung dafür wäre, dass entsprechende Verträge zwischen Kund*innen und dem Versorgungsunternehmen abgeschlossen würden und von der Kommune vorgeschrieben wird, dass immer über eine Zisterne oder andere Tankvorrichtung in die Anlagen zur Regenwasserversorgung eingespeist wird und nicht z. B. an der Toilette sowohl ein Trink- als auch ein Betriebswasseranschluss vorhanden ist. Das Versorgungsunternehmen müsste bei den Verbrauchern Smart-Meter installiert haben, die über das Internet mit ihm kommunizieren. Die intelligenten Sensoren bzw. Sensorenetzwerke erfassen nicht nur die Daten des Wasserverbrauchs und der Systemleistung, sondern speisen diese in die zentralen Steuerungseinrichtungen des Versorgers ein, wo sie gespeichert werden. Damit lassen sich Aussagen und Prognosen über den Wasserverbrauch treffen. Über die Daten zu dem absehbaren Bedarf an Wasser und das Speichervolumen bei den einzelnen Kund*innen und die wahrscheinlichen Spitzenlasten lassen sich in der Folge Lieferungen so vornehmen, dass sich sowohl die Spitzenereignisse im Wasser- und im Abwassernetz reduzieren lassen als auch das Versorgungsgebiet als Ganzes eine optimale Rate bei der Trinkwassersubstitution erreicht.

⁶ Bei einem Überangebot an verfügbaren Trinkwasserressourcen macht ein restriktives, mengenorientiertes Lastenmanagement zur Verringerung der Nachfrage ökonomisch keinen Sinn (vgl. Michel 1997)

4.3. Koordinationsformen

Bei einer Erweiterung der öffentlichen Wasserversorgung um eine Betriebswasserversorgung ergeben sich zwischen den unterschiedlichen Akteuren, die an den Veränderungsprozessen beteiligt sind, Notwendigkeiten, sich über die von ihnen eingenommenen Rollen abzustimmen. Derartige Abstimmungen und sich ergebende institutionelle Arrangements erlauben es, sowohl mögliche Konflikte zu verringern bzw. zu vermeiden als auch den Aufwand der Akteure zu reduzieren. Bestenfalls lassen sich die Abläufe so gestalten, dass z.B. Doppelarbeit vermieden wird und sich eine optimale Reihenfolge realisieren lässt. Auch kann es darum gehen, die Kosten für diese Abstimmung möglichst gering zu halten.

Zur Implementierung einer Betriebswasserversorgung in Frankfurt am Main können der Theorie nach drei deutlich unterscheidbare Koordinationsformen genutzt werden – marktliche, hierarchische sowie gemischte Formen:

- In der Koordinationsform „Markt“ findet die Koordination idealerweise selbstabgestimmt zwischen den Akteuren statt. Der Theorie nach passen dabei die verschiedenen Marktakteure ihre (voneinander unabhängigen) Handlungen so aneinander an, dass sich die gegenseitigen Erwartungen bestätigen und keiner der Beteiligten sich durch einseitiges Abweichen von der so angepassten Handlungsweise besserstellen kann.
- Monopole erlauben z.B., dass nur ein einziges Unternehmen Aufgaben der gebietlichen Versorgung mit Betriebswasser übernimmt. Ein weiteres Beispiel für die Koordinationsform „Hierarchie“ ist es, wenn ein Produkt in einem Unternehmen ausschließlich erstellt werden kann, d.h. dazu keine externen Vorlieferanten benötigt werden, sondern eine Stelle im Unternehmen den Beteiligten aus dem Unternehmen alle Vorgaben in Form von Weisungen erteilen kann.
- Netzwerke (z.B. strategische Allianzen, aber auch Kartelle) können Vorteile von Markt und Hierarchie vereinen: Hier erlaubt der Austausch zwischen den Akteuren ein rasches Entstehen einer Transparenz. Die Planbarkeit ist besser als beim Markt und die Flexibilität höher als bei der Hierarchie. Zu den gemischten Formen zählt die Institutionenökonomie auch längerfristige Verträge, mit denen sich Akteure gegenseitig binden (z.B. Konzessionsverträge, die die Kommune mit mehreren Betriebswasserlieferanten abschließt).

Nur im einfachsten Fall einer Betriebswasserversorgung ist es nicht erforderlich, möglichst vorab zu Abstimmungen und neuen Arrangements zu kommen, nämlich bei der Eigenversorgung mit Regenwasser in Ein-Familien-Häusern und Gewerbeunternehmen. Bereits in Ein-Familien-Häusern können jedoch (ebenso wie im Zwei-Familien-Haus) Mietparteien wohnen, so dass Vertragsverhältnisse zwischen dem Eigentümer als Inhaber und Betreiber der häuslichen Regenwasserversorgung und der nutzenden Mietpartei entstehen; Wartungspflichten für die Zisterne usw. sind entsprechend zu regeln, aber evtl. auch Betriebs- und Trinkwasseranschlüsse für Wasch- und Geschirrspülautomaten zu legen. Auch ist Einigung zu erzielen, ob die Versorgung mit Betriebswasser kostenlos ist bzw. wie die Wartungs-, Inspektions- und Kapitalkosten umzulegen sind.

Der nächstkomplexere Fall ist eine gemeinsam betriebene Regenwasserversorgung für benachbarte Reihenhäuser. Organisatorische Betriebsführungs- und Betreibermodelle zu einer gemeinsam betriebenen Speicherung und Verteilung von Regenwasser, z. B. in Reihenhaussiedlungen oder auch in Gewerbegebieten, sind bisher nicht entwickelt bzw. hinsichtlich der damit verbundenen Regelungen ausformuliert.

Mehrere grundsätzlich denkbare Modelle zur Betriebswasserversorgung mittels Sammlung und Aufbereitung von Grauwasser in einzelnen Quartieren sind bei Schramm et al. (2016) bzw. Kerber et al. (2017) diskutiert. Beispielsweise könnten sich die Wohnungseigentümer (evtl. auch die Mietparteien) genossenschaftlich zusammenschließen. Sie könnten für den Betrieb der Anlagen und die Versorgung auch auf ein Kommunalunternehmen zurückgreifen oder einen Dritten beauftragen.

Zur Koordinierung von Aktivitäten im Bereich der Betriebswasserversorgung bietet es sich für die Kommunen an, eine Stelle damit zu beauftragen. Dies kann ein kommunales Amt sein, aber auch ein kommunalwirtschaftlicher Akteur. Evtl. könnte es sinnvoll sein, von anderen Sektoren wie dem Verkehrsbereich zu lernen, wo seit der Einrichtung von TraffIQ in der Stadt Frankfurt am Main in der kommunalen Verkehrswirtschaft sauber zwischen dem Besteller der Dienstleistungen/Koordinator des Angebots und den kommunalwirtschaftlichen oder dritten Anbietern der Dienstleistungen unterschieden werden kann. Bezüglich weiterer Aufgaben könnte hier auch an den älteren Vorschlag eines „Frankfurter Wasserbüros“ von Cichorowski und Rührich (1997) angeschlossen werden.

Erfahrungsbasiert wurden Grundsätze für den Aufbau und Betrieb von dualen Netzen zur Wasserversorgung bzw. zur Ableitung von Schwarz- und Grauwasser bisher für den Wohnbereich zumeist im Rahmen von Modellvorhaben entwickelt. Nur in Ausnahmefällen umgreifen diese ein Wohnquartier in Gänze oder eine ganze Stadt (Hongkong). Hier kann allerdings auf jahrzehntelange Erfahrungen von Betreibern nebeneinander bestehender Mehrfach-Netze zur Wasserversorgung in Chemieparcs zurückgegriffen werden (vgl. Salonen 2010).

4.4. Kooperationsmodelle

Kooperationsmodellen erlauben, die notwendigen Abstimmungsbedarfe frühzeitig zu identifizieren und zu überlegen, welche Mechanismen bzw. Instrumente besonders geeignet sind, um zu den erforderlichen Abstimmungen zu kommen.

Eine proaktiv betriebene Koordination von Abstimmungserfordernissen erlaubt günstigenfalls, das Risiko für alle beteiligten Akteure zu mindern; hierbei kommt es häufig auf die rechtzeitige Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren in der jeweiligen Kommune an. So kann z. B. ein gemeinsamer Überblick entstehen, in welchen Gebieten welcher Bedarf an Betriebswasser besteht, wieweit es den Verbraucher*innen zumutbar ist, diesen Bedarf einzuschränken oder anderweitig zu decken bzw. wieweit anderweitig angebotene Lösungen auch von den potenziellen Nutzer*innen akzeptiert werden. Ein weiteres Ziel von Kooperationen kann es sein, Vertrauen in die Innovation

Betriebswasserversorgung zu schaffen. Aufbauend auf vorhandenem Vertrauen kann die Substitution von Trinkwasser einfacher realisiert werden. Das Vertrauen erleichtert das Zusammenspiel der verschiedenen Akteure und stellt damit sicher, dass die mit der Substitution verbundenen betrieblichen Neuerungen (z. B. hinsichtlich des Aufbaus dualer Versorgungsleitungen) ohne große zeitliche Verzögerungen umgesetzt werden können.

Das Instrument Kooperationsmanagement dient dazu, die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren möglichst zu verbessern; auch können sich (personeller und finanzieller) Aufwand, den der Innovationsführer bei der für Koordination der weiteren Akteure hat, deutlich verringern. Diese Methode wurde anhand anderer wasserwirtschaftlicher Lösungen in den letzten Jahren entwickelt (vgl. Kerber et al. 2017).

Dabei wird wie folgt verfahren: Entlang der Rollen, die die unterschiedlichen Akteure haben, und der Kooperationsbeziehungen, die die Neuerung (z. B. Aufbau und Betrieb von Betriebswasserversorgungen in neuen oder modernisierten Stadtteilen) und damit die Substitution von Trinkwasser befördern, lassen sich strategische Kooperationsmodelle aufstellen, um sowohl Idealfälle der Kooperation als auch Hindernisse, die der Betriebswasserlösung entgegenstehen, zu identifizieren.

Akteure, die bei Konzentration auf dezentrale Betriebswasserversorgung zu berücksichtigen sind

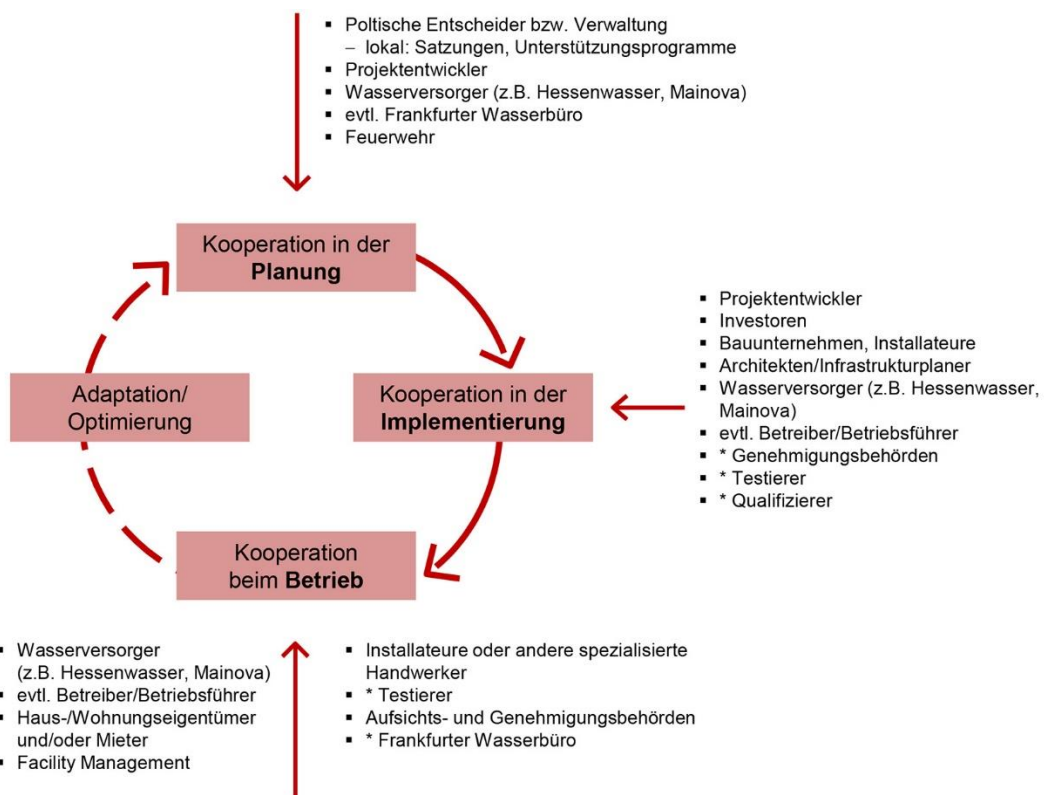


Abbildung 3: Kooperationsmanagement einer dezentralen Versorgung mit Betriebswasser

Je nachdem, ob nur eine Ebene beschränkt wird (z. B. Konzentration auf ein Aufbauen von dezentralen Eigenversorgungen), oder ob gleichzeitig auf mehrere Ebenen ange-
 setzt wird, verändert sich die Zahl der Akteure, die bei einem Kooperationsmanagement
 berücksichtigt werden müssen. Dabei lassen sich unterschiedliche Phasen abgrenzen
 (z. B. Planung, Bau und Betrieb), für die die einzubeziehenden Akteure identifiziert
 werden können. Zusätzlich zu den unbedingt notwendigen Akteuren sind noch weitere
 Akteure benannt (in den Abbildungen mit * bezeichnet), die dann involviert werden
 sollten, wenn es sich zeigt, dass sich so Kooperationsbeziehungen verbessern lassen.
 Einige Akteure sollten für eine verbesserte Kooperation (vgl. Abb. 4) bereits während
 der Planung eingeführt werden, z. B. Architekten und deren Fachplaner (für die Infra-
 struktur in den Häusern), oder bereits zu Beginn der Implementierung Angebote zur
 Weiterbildung erhalten z. B., das Bau- und Installationshandwerk.

Akteure, die bei der Betriebswasserversorgung im Mehr-Ebenen-System zu berücksichtigen sind

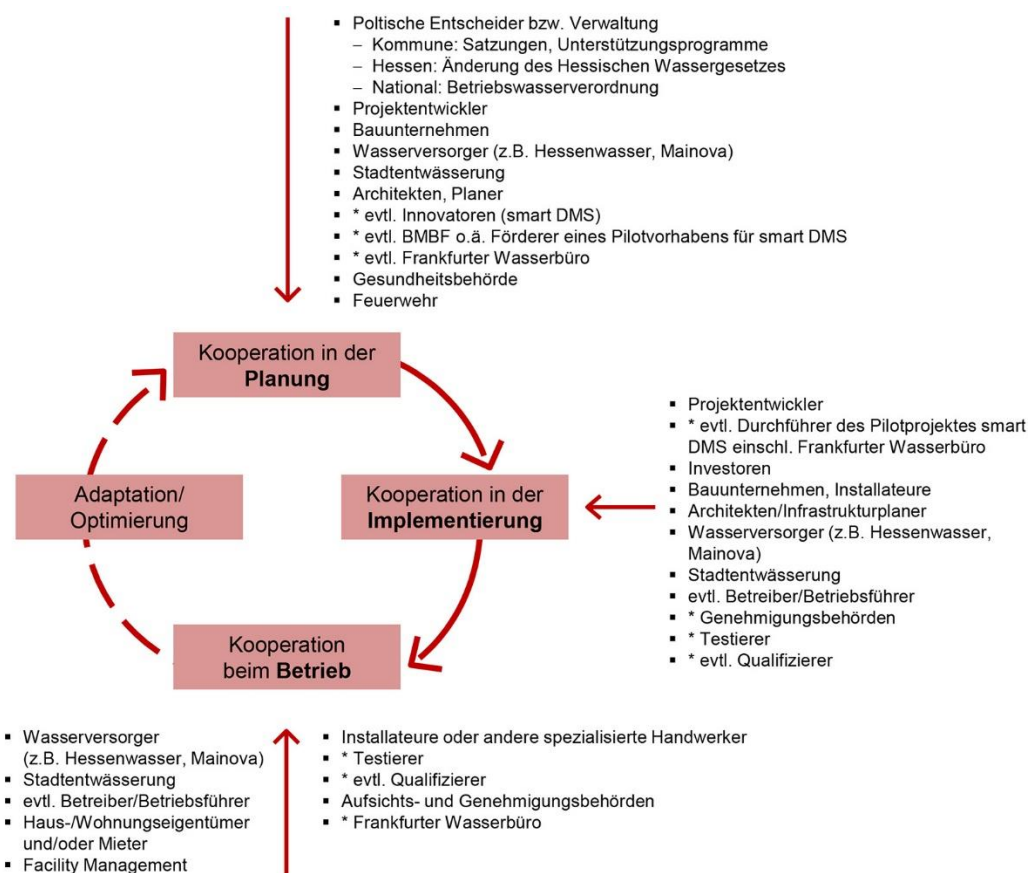


Abbildung 4: Kooperationsmanagement der Mehr-Ebenen-Versorgung mit Betriebswasser

Stellt man derartige Kooperationsmodelle auf, so wäre zunächst zu klären, wieweit es sinnvoll ist, einen einheitlichen Versorgungsweg mit Betriebswasser aufzubauen. Dieser hätte den Vorteil, dass grundsätzlich größere Mengen an Betriebswasser abgesetzt werden könnten bzw. mehr Nutzer*innen versorgt werden könnten. Allerdings wird in den für Frankfurt am Main bereits vorliegenden Gutachten davon ausgegangen, dass der Aufbau eines einzigen, flächendeckenden Versorgungsnetzes mit hohen Kosten

verbunden sein wird. Es könnte entsprechend sinnvoll sein, mehrere Versorgungsoptionen gleichzeitig zu verwirklichen: Einerseits (Teil-)Netze zur Versorgung von Teilen der Kommune mit Betriebswasser öffentlich zu betreiben. Komplementär dazu könnten dezentrale Versorgungsanlagen z. B. im Bereich von Ein- und Zweifamilienhäusern, gewerblichen und industriellen Versorgern aufgebaut werden. Eines der resultierenden Probleme dieses Ansatzes wäre, dass bei konventioneller Lösung nun einerseits Gebiete mit (Teil-)Netzen bestehen, die aus Effizienzgründen darauf angewiesen sind, dass möglichst auch Großverbraucher (z. B. Bürohochhäuser, Siedlungen mit Mehrfamilienhäusern) aus ihnen ihren Bedarf an Betriebswasser beziehen, andererseits aber dezentrale Eigenversorgungsanlagen mit Betriebswasser so attraktiv sein sollten, dass sich gerade auch Großverbraucher selbst versorgen möchten.

Um eine gute Zusammenarbeit zwischen den Akteuren für den Aufbau einer Betriebswasserversorgung zu erreichen, ist es günstig, Netzwerke zu nutzen; diese erlauben weiterhin auch den gemeinsamen Austausch von Erfahrungen und ein gemeinsames Lernen. Gegebenenfalls ist es auch möglich, bei einem siedlungswasserwirtschaftlichen Unternehmen ein Innovationsmanagement hinsichtlich Betriebswasserversorgung einzuführen.

Entsprechend den Festlegungen des Hessischen Gesetzgebers zur Versorgungspflicht der Gemeinden sollte die Kommune darauf achten, nach Möglichkeit die aufzubauenen (Teil-)Netze zur Versorgung der potenziellen Abnehmer in der Kommune mit Betriebswasser öffentlich zu betreiben. §§ 30, 36 des HWG machen deutlich, dass eine öffentliche Betriebswasserversorgung grundsätzlich erwünscht ist; sie ist zumindest soweit sinnvoll, wie sie öffentliche Funktionen übernimmt; das kann auch die dezentrale Versorgung mit Löschwasser in entsprechend versorgten Stadtvierteln sein. Andernfalls spräche wenig dagegen, dass sie von privatwirtschaftlichen Akteuren finanziert, aufgebaut und betrieben würden. Allerdings werden in dem Fall, dass es sich tatsächlich um private Netze handelt, Möglichkeiten der kommunalen Beeinflussung von vornherein ausgeschlossen. Sind die Netze im öffentlichen Eigentum oder werden sie zumindest satzungsrechtlich zu öffentlichen Einrichtungen gemacht, besteht gleichfalls die Möglichkeit, in den Schranken, die hier § 30 Abs. 2 HWG vorgibt, privatwirtschaftliche Partner zu wählen, z. B. als Finanziere für die Implementierung und/oder als Betriebsführer für ihren Betrieb. Wie bereits bei der Diskussion der rechtlichen Instrumente erwähnt, ist es möglich, auch private Anlagen zur Grau- oder Regenwasserbewirtschaftung bzw. Betriebswasserversorgung als öffentliche Einrichtungen zu widmen. Insofern bestünde die Möglichkeit einer gemeinsamen Bewirtschaftung durch die Kommune bzw. einen durch sie beauftragten Dritten. Entsprechende Kooperationsmodelle, die die genannten Bedingungen berücksichtigen, können aufgebaut werden, wenn es sich für die Stadt Frankfurt am Main zeigen sollte, dass die genannten Rahmenüberlegungen in dieser oder ähnlicher Weise für eine zukünftige Betriebswasserversorgung gestaltet werden sollen.

4.5. Schlussfolgerung

Zentrale Akteure bei der Einrichtung und dem Betreiben von Betriebswasserversorgungen sind einerseits entweder Hauseigentümer oder die Betriebswasser nutzenden Unternehmen selbst (bei dezentraler Anlage). Andererseits können sowohl städtische oder privatwirtschaftliche Akteure diese Aufgabe übernehmen. Auf (kommunal)politischer Ebene kann es für eine effiziente Umgestaltung sinnvoll sein, hier eine Koordinationsfunktion aktiv einzunehmen.

Die frühzeitige kommunalpolitische Zuordnung der Systementscheidung an einen bestimmten Akteur könnte vermeiden, dass es auf dem Gemeindegebiet an Gunststellen zu einer Vielzahl von Eigenversorgungen und einem evtl. Aufbrauchen der geeigneten Ressourcen kommt, sodass eine kommunale Betriebswasserversorgungsstruktur durchlöchert wird.

Verfolgt die Kommune das Ziel der Umsetzung einer tendenziell flächendeckenden kommunalen Betriebswasserversorgung ohne einen Hauptakteur, so sind zumindest institutionellen Arrangements zum Aufbau erforderlich. Durch die Entscheidung für eine hierarchische Koordinationsform (z.B. Monopol mit Hilfe eines Konzessionsvertrags) könnten deutlich geringere Abstimmungskosten zwischen den Akteuren entstehen.

Die Einführung von Wohnungswasserzählern in Mehrfamilienhäusern auch für eine Betriebswassernutzung kann eine Voraussetzung zur Förderung von Spar- bzw. Substitutionsverhalten von Mieter*innen sein. Dabei ist allerdings der Aufwand für die Auswechslung der Wasseruhren nach Anlauf der Eichfrist, der sich monetär niederschlagen und damit die Anreize zur Substitution minimieren kann, zu berücksichtigen (vgl. auch Kapitel 6.1.6).

Eine Synchronisierung der Regenwassernutzung mit einer zentralen Spitzenlaststeuerung ist institutionell möglich: Maßnahmen eines Demand-Side-Managements erlauben es, sowohl Spitzenlastereignisse für die Trinkwasserversorgung abzumildern als auch optimale Substitutionsleistungen zu erzielen.

Über ein Kooperationsmanagement können gegenläufige Interessen verschiedener Akteure im Rahmen der Umsetzung und der Nutzung von Betriebswasserversorgungsanlagen frühzeitig identifiziert und aufeinander abgestimmt werden.

Darüber hinaus sind Kooperationen zwischen unterschiedlichen Akteuren im Bereich der Planung, Implementierung und dem Betrieb nötig; diese können durch die Politik proaktiv gestaltet werden. Potenziell begünstigende Instrumente sind Netzwerkstrukturen, die das gemeinsame Lernen der an der Substitution beteiligten Unternehmen begünstigen sowie ein Kooperations- und Innovationsmanagement zur Unterstützung der Substitution.

5. Bestimmung beispielhafter Substitutionspotenziale

5.1. Betrachtete Modell-Quartiere

Exemplarisch wurden ein Neubaugebiet und ein Bestandsgebiet ausgewählt, die es erlauben, Aussagen zur Trinkwassersubstitution und dem damit verbundenen Aufwand zu extrapolieren und auf andere Gebiete in Frankfurt am Main auszuweiten (vgl. Kapitel 2.2). Dafür wurden Quartiere betrachtet, in denen aktuell Umsetzungen stattfinden bzw. in Planung sind. Die ausgewählten Gebiete sind z. T. kleiner als gewünscht; auch ist es für das Bestandsgebiet leider nicht gelungen, ein Quartier zu nutzen, in dem gleichzeitig eine Nachverdichtung stattfindet.

5.1.1. Günthersburghöfe

Das als Neubauvorhaben betrachtete Projektgebiet *Günthersburghöfe* liegt in Frankfurt am Main östlich der Friedberger Landstraße, südlich des Wasserparks; im Osten liegen private Grünflächen (vgl. Abbildung 5). Südlich wird das Projektgebiet begrenzt durch die nördlich der Münzenberger- und der Butzbacher Straße gelegenen Baugrundstücke. Das Bebauungsplanverfahren Nr. 880 sieht im nördlichen Gebietsteil sechs gleichwertige Wohnblöcke mit Innenhöfen vor. Am nördlichen Quartierseingang ist ein 16-stöckiges Hochhaus gegenüber der Einmündung der Gießener Straße geplant. Die weiteren Wohngebäude sollen in Blockrandbebauung entstehen. Insgesamt sollen 20 Gebäude neu gebaut werden. Erschlossen wird das Gebiet über drei Straßen, die in West-Ost-Richtung von der Friedberger Landstraße abzweigen. Diese vereinen sich am Quartiersplatz, von wo aus der östliche Gebietsteil erschlossen wird.

Das Quartierszentrum ist der angesprochene Quartiersplatz im südöstlichen Quartiersbereich. Im Gebiet ist neben einem Wohnturm mit 16 Stockwerken vor allem eine sechs- bis achtstöckige Bebauung mit durchmischtem Wohnraum und unterschiedlichen Wohnungsstrukturen und -größen geplant; daneben entsteht eine schulische Einrichtung und Kindertagesstätten im nordöstlichen Teil, die im Weiteren nicht gesondert betrachtet werden.

Die Erdgeschosshöhe ist im gesamten Quartier auf 4,50 m festgelegt. Für die weiteren Kalkulationen wird von 1 510 Wohneinheiten im Gebiet ausgegangen, 30 % davon im Sozialen Wohnungsbau und 15 % für genossenschaftliche und gemeinschaftliche Baugruppen. Es wird angenommen, dass sich die Wohneinheiten in 463 Ein-Personen-Wohnungen, 706 Zwei-Personen-Wohnungen und 341 Vier-Personen-Wohnungen aufgliedern. 3 329 Bewohner*innen werden nach der Realisierung in den Günthersburghöfen leben.

Die Gebäudedachflächen sollten begrünt werden und somit den Regenwasserabfluss drosseln. Sie sind als Verdunstungsflächen geplant und bieten einen Mehrwert für das Mikroklima im Quartier. Grünelemente im Straßenraum sollen der Versickerung dienen.



Abbildung 5: Darstellung des städtebaulichen Entwurfs „Die Günthersburghöfe“

Copyright: Stadtplanungsamt Frankfurt

Ausgehend von den Kapitel 2.4.3 in Tabelle 4 dargestellten Pro-Kopf-Wasserverbräuchen nach Verwendungszwecken ist in den Günthersburghöfen mit einem Gesamttrinkwasserbedarf von ca. 139 500 m³ im Jahr zu rechnen. Mit einem Trinkwassereinsparpotenzial bzw. Betriebswasserbedarf zum Zweck der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung von ca. 46 100 m³ pro Jahr sinkt der Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung auf ca. 93 400 m³ pro Jahr. Der Grauwasseranfall aus Badezimmern und Duschen (Körperpflege) beläuft sich auf ca. 55 800 m³ im Jahr.

Tabelle 10: Jährliche Trink- und Betriebswasserbedarfe sowie Trinkwassersubstitutionspotenziale in den Günthersburghöfen

| Jährlicher Bedarf Günthersburghöfe | [m ³ /a] |
|--|---------------------|
| Trinkwasserbedarf (konventionelles System) | 139.504 |
| Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung (Toilette) | 101.790 |
| Trinkwassersubstitutionspotenzial bzw. Betriebswasserbedarf (Toilette) | 37.713 |
| Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung (Toilette + Reinigung/Bewässerung) | 93.397 |
| Trinkwassersubstitutionspotenzial bzw. Betriebswasserbedarf (Toilette + Reinigung/Bewässerung) | 46.107 |
| Grauwasseranfall (Körperpflege) | 55.801 |

Die in den Günthersburghöfen betrachteten Wasserinfrastrukturvarianten, die der konventionellen zentralen Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung gegenübergestellt werden, umfassen zum einen die Betriebswassernutzung aus aufbereitetem Mainwasser und zum anderen die Betriebswassernutzung aus einer Grauwasserwiederverwendung.

Bei der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ wird angenommen, dass in der Mainwasseraufbereitungsanlage am Schwanheimer Mainufer Betriebswasser hergestellt und über eine entsprechend noch zu bauende Transportleitung dem Einzugsgebiet der Günthersburghöfe zugeführt werden kann. Dort kann das Betriebswasser dann über ein getrenntes Verteilnetz zum Zweck der Toilettenspülung sowie zur Reinigung und Bewässerung eingesetzt und damit Trinkwasser eingespart werden.

Bei der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ wird angenommen, dass Grauwasser aus Badewannen und Duschen im Stadtquartier semizentral behandelt und wiederverwendet wird, um es dann vor Ort zum Zweck der Toilettenspülung sowie zur Reinigung und Bewässerung zu verwenden. Als Verfahren zur semizentralen Grauwasserwiederverwendung wurde ein in der Praxis bereits bewährtes System mittels Membran-Bioreaktoren (MBR) gewählt (Tolksdorf et al. 2019). Dazu muss das Grauwasser in einem getrennten Leitungssystem gesammelt und das Betriebswasser über eine ebenfalls separate Betriebswasserleitung verteilt werden. Die semizentrale Aufbereitungs- bzw. Wiederverwendungsanlage kann beispielsweise unter dem Quartiersplatz der Günthersburghöfe verortet werden.

Darüber hinaus in Erwägung gezogen, aber nicht weiter betrachtet wurden die Betriebswassernutzungsvarianten mittels Regenwasser und ortsnahem Grundwasser. Im Fall der Regenwassernutzung erwies sich der Deckungsgrad der durch die hohen Geschossflächenzahlen (sechs Geschosse und mehr) begrenzten Dachflächen als unzureichend. Im Fall der Grundwassernutzung wurde das Untersuchungsgebiet aus hydrogeologischer Sicht unter der Prämisse einer jährlichen Entnahme von ca. 46 100 m³ Grundwasser bewertet. Aufgrund der nur geringen Mächtigkeit der in einer nahegelegenen Bohrung aufgeschlossenen Kalksteinlagen wurde eine Gewinnung von Grundwasser in größeren Mengen bis zur erkundeten Tiefe als nicht möglich erachtet. Für eine Beurteilung von stärker Grundwasser führenden Schichten wären vertiefende Untersuchungen vor Ort (u. a. Bohraufschlüsse) durchzuführen.

5.1.2. Heimatsiedlung

Als Bestandsquartier wird die *Heimatsiedlung* betrachtet. Dieses Wohnquartier im Südwesten des Frankfurter Stadtteils Sachsenhausen-Nord entstand als westlicher Teil der Siedlung Riedhof, die im Zuge des „Neuen Frankfurt“ in mehreren Bauabschnitten zwischen 1927 und 1934 geplant wurde. Sie liegt in einem Areal zwischen Kennedyallee und Mörfelder Landstraße, einem Bahndamm und der Stresemannallee (vgl. Abbildung 6). Bauträger war die zum Gewerkschaftsbund der Angestellten gehörende Gemeinnützige Bau- und Siedlungs-AG. „Heimat“, die hier zwischen 1927 und 1930 eine Muster-siedlung für ihre Mitglieder errichtete.

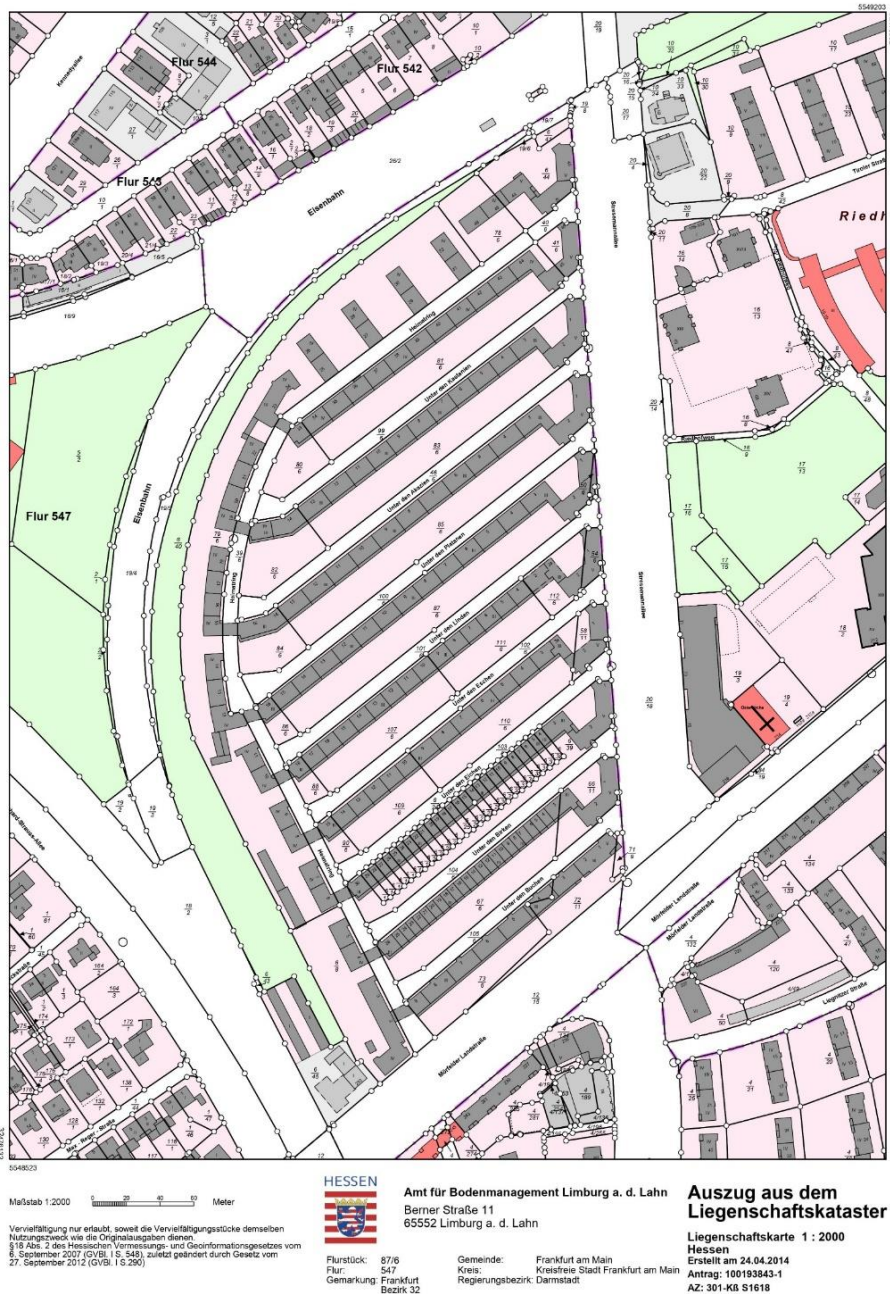


Abbildung 6: Auszug der Heimsiedlung aus dem Liegenchaftskataster

Copyright: Amt für Bodenmanagement Limburg a. d. Lahn

Ausführender Architekt war Franz Roeckle (1879–1953). Die Siedlung, die sich durch großzügigere Wohnungszuschnitte und Wintergärten von den sparsameren Typenwohnungen des Neuen Frankfurt unterscheidet, verbindet Elemente der Blockrandbebauung mit der modernen Zeilenbauweise: Die Randbebauung besteht aus vierstöckigen Gebäuden, die den inneren Teil der Siedlung durch ihre Höhe abzuschirmen scheinen. Im Inneren besteht die Heimsiedlung aus mehreren dreistöckigen Häuserzeilen. Jede Zeile hat einen kleinen Hintergarten, der an der Straße der nächsten Zeile liegt. Geplant waren ursprünglich 850 Wohneinheiten, davon etwa 250 in Zeilen mit Einfamilienreihenhäusern, die aufgrund der einsetzenden Wirtschaftskrise überwiegend zu Mehrfa-

milienhäusern umgeplant wurden. Auf dem über die eigentliche Heimatsiedlung hinausgehenden Siedlungsgebiet (Siedlung Riedhof) wurden letztlich 1072 Wohneinheiten und 26 Einfamilienhäuser gebaut.

Zum Zeitpunkt des Bezugs der Heimatsiedlung waren alle Mieter Mitglieder im Gewerkschaftsbund der Angestellten und Aktionäre des Wohnungswirtschaftsunternehmens. Zu den Bewohner*innen dieser modernen Siedlung für den Mittelstand gehörten zunächst auch Journalisten, Redakteure oder Schauspieler wie Paul Verhoeven.

Aufgrund des Konkurses des gewerkschaftlichen Siedlungswirtschaftsunternehmens Neue Heimat Ende der 1980er Jahre ging die die Heimatsiedlung ins Eigentum der Nassauischen Heimstätte über. Seit dieser Zeit werden die Wohnungen nur noch als Sozialwohnungen vermietet, was zu einer starken Veränderung in der Bewohnerstruktur führte. Die 26 Einfamilienhäuser wurden privatisiert. In ihnen wohnen mittlerweile tendenziell junge Familien des Mittelstandes.

Seit 1989 steht die Siedlung unter Denkmalschutz. Eine Nachverdichtung wie in der benachbarten Fritz-Kissel-Siedlung ist hier nicht möglich. Die umfassende, aber denkmalgetreue Modernisierung des Quartiers begann 2018.

Ausgehend von den in Tabelle 4 dargestellten Pro-Kopf-Wasserverbräuchen nach Verwendungszwecken und 992 Wohneinheiten bzw. 2098 Einwohnern ist in der Heimatsiedlung mit einem Gesamttrinkwasserbedarf von ca. 90 400 m³ im Jahr zu rechnen (vgl. Tabelle 11). Mit einem Trinkwassereinsparpotenzial bzw. Betriebswasserbedarf zum Zweck der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung von ca. 29 900 m³ pro Jahr sinkt der Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung auf ca. 60 500 m³ pro Jahr. Der Grauwasseranfall aus Badewannen und Duschen (Körperpflege) beläuft sich auf ca. 36 100 m³ im Jahr.

Tabelle 11: Jährliche Trink- und Betriebswasserbedarfe sowie Trinkwassersubstitutionspotenziale in der Heimatsiedlung

| Jährlicher Bedarf Heimatsiedlung | [m ³ /a] |
|--|---------------------|
| Trinkwasserbedarf (konventionelles System) | 90.361 |
| Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung (Toilette) | 65.933 |
| Trinkwassersubstitutionspotenzial bzw. Betriebswasserbedarf (Toilette) | 24.428 |
| Trinkwasserbedarf bei Betriebswassernutzung (Toilette + Reinigung/Bewässerung) | 60.496 |
| Trinkwassersubstitutionspotenzial bzw. Betriebswasserbedarf (Toilette + Reinigung/Bewässerung) | 29.865 |
| Grauwasseranfall (Körperpflege) | 36.144 |

Die in der Heimatsiedlung betrachteten Wasserinfrastrukturvarianten, die der konventionellen zentralen Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung gegenübergestellt werden, umfassen wie im Fall der Günthersburghöfe zum einen die Betriebswassernutzung aus aufbereitetem Mainwasser und zum anderen die Betriebswassernutzung aus einer Grauwasserwiederverwendung (vgl. Abschnitt 5.1.1). Ebenfalls

nicht weiter betrachtet wurden die Betriebswassernutzungsvarianten, die auf Regenwasser und ortsnahem Grundwasser als Ressource aufbauen. Die Wahrscheinlichkeit zur ortsnahen Grundwassergewinnung von ca. 29 900 m³ pro Jahr wird aus hydrogeologischer Sicht als gering erachtet. Im Bereich des Sachsenhäuser Berges haben Erkundungen für eine dort entstandene geothermische Anlage gezeigt, dass in Frage kommende Schichten nicht wasserführend sind. Für sichere Prognosen zum Potenzial der Wassergewinnung in westlicher Richtung davon sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

5.2. Zentralörtliche Funktionen und gesondert betrachtete Orte

Frankfurt am Main übernimmt als sog. Hauptort über die Versorgung der eigenen Bevölkerung hinaus entsprechend der jeweiligen Funktion im zentralörtlichen System überörtliche Versorgungsaufgaben für die Bevölkerung seines Verflechtungsbereiches (vgl. HMWVL 2000). Dies sind Aufgaben etwa im Kultur- und Bildungswesen (z. B. Theater, Goethe-Universität, Berufsschulen, Palmengarten, Zoo) und im Gesundheitswesen (z. B. Universitätsklinikum, niedergelassene Fachärzte) ebenso wie im Verkehrswesen (z. B. Fraport, Hauptbahnhof), Handel (z. B. Messen, große Kaufhäuser und Fachgeschäfte des „gehobenen“ sowie des „spezialisierten, höheren“ Bedarfs, Kleinmarkthalle, Frischezentrum), Finanz- und Versicherungswesen (Börse, Sitz von Geschäftsbanken und Versicherungen), Verwaltung und Sport (Austragungsort von mehreren Bundesligen, DFB-Akademie, Sport- und Hallenbäder, Eissporthalle). Im Rahmen einer funktionsräumlichen Arbeitsteilung werden vielfältige Aufgaben für die Bewohnerschaft anderer Kommunen in Hessen und sogar bundesweit übernommen. Mit der Bereitstellung dieser zentralörtlichen Funktionen ist auch eine teilweise überdurchschnittlich hohe Nachfrage nach Trinkwasser verbunden.

Jenseits der zentralörtlichen Funktionen gibt es mit kleineren Sportstätten und den öffentlichen Grünflächen und Friedhöfen weitere Funktionen, die zur kommunalen Daseinsvorsorge zählen, sich aber durch einen jeweils spezifischen Trinkwasserverbrauch und auch durch eigene Substitutionspotenziale auszeichnen.

Zur Ermittlung von bereits realisierten und weiterhin bestehenden Substitutionspotenziale für die jeweils anhand exemplarischer Beispiele betrachteten Funktionen (z. B. Flughafen für das Verkehrswesen) wurden zumeist aufbauend auf einer Analyse der Fachliteratur Experteninterviews durchgeführt; darauf aufbauend wurden Möglichkeiten zur Trinkwassersubstitution ermittelt. Weitergehende Hinweise finden sich im Anhang. Auch Ein- und Zweifamilienhäuser wurden hier gesondert hinsichtlich ihrer Trinkwassersubstitution betrachtet.

5.2.1. Trink- und Betriebswassernutzung am Flughafen Frankfurt am Main

Der Flughafen Frankfurt am Main liegt im Südwesten der Stadt Frankfurt am Main und hat eine Fläche von 2 284 ha, wovon 1 092 ha befestigt sind. 2017 zählte der Flughafen 64,5 Millionen Passagiere. Am Flughafen arbeiten ca. 81 000 Arbeitnehmer, wovon ca. 19 500 direkt bei Fraport AG angestellt sind. (Fraport 2018, 2017) Neben

den drei großen Terminals befinden sich ca. 100 Gebäude auf den Flughafengelände (Inside Out 2016), die zu einem großen Teil anderen Unternehmen (z.B. Fluggesellschaften) gehören bzw. von diesen ausschließlich genutzt werden. Neben Trinkwasser wird seit Anfang der 1990er Jahre von der Fraport AG Betriebswasser auf dem Flughafengelände genutzt.

Das vom Unternehmen genutzte Betriebswasser setzt sich aktuell aus aufbereitetem Mainwasser (ca. 15 %), Regenwasser (Anteil größer als 25 %) und Grundwasser, das mit flughafeneigenen Brunnen gefördert wird (etwa 60 %) zusammen. Das Schema der Betriebswasserversorgung ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Speichersysteme wurden im ursprünglichen Konzept mit (aufbereitetem) Mainwasser (im Schema als „Brauchwasser“ bezeichnet), Regen- und Trinkwasser gespeist.

Betriebswasser wurde zunächst für die Spülung von Toiletten und Urinalen sowie für die Speisung von Feuerlöschkästen und Sprinkleranlagen verwendet (Pfeiffenberger 1995). So gibt es innerhalb von Terminal 2 und in der 2013 eröffneten Erweiterung des Terminals 1, dem sog. Flugsteig A-Plus, die Nutzung von Betriebswasser im Sanitärbereich. Die Spülungen werden über Betriebswasserleitungen versorgt. Die Leitungen werden vorrangig mit Betriebswasser aus der Mainwasseraufbereitungsanlage gespeist. Eine Notfallspeisung kann bspw. beim Ausfall der Aufbereitungsanlage oder bei Wartungsarbeiten mit Trinkwasser erfolgen. (Scheuring 2018 fernmündlich). Ca. 60 % des aufbereiteten Mainwassers werden die sanitären Einrichtungen in Terminal 1 und 2 verwendet. Die verbliebenen 40 % des aufbereiteten Mainwassers werden im Heiz- und Kältewerk der Mainova am Flughafen benutzt (Stadt Frankfurt am Main, Mainova, Hessenwasser 2021). Das verwendete aufbereitete Mainwasser wird über Hessenwasser bezogen und beläuft sich auf ein Volumen von bis zu 200 000 m³/a (Inside Out 2016). Der Einspeisepunkt der Mainwasserleitung befindet sich in der Nähe der Großkälteanlagen und Kühltürme im zentralen Flughafenbereich (Pfeiffenberger 1995).

Grund- und Regenwasser wird aktuell für die Bewässerung der Grünanlagen, die Löschwasservorhaltung und abhängig vom gebäudeinternen Ausbaugrad für die Toiletten-spülung verwendet. Insgesamt sind das Terminal 2 sowie 70 % des Terminals 1 und der benachbarten Bürogebäude an das Betriebswassernetz angeschlossen (Fraport 2017).

2017 wurden auf dem gesamten Flughafengelände insgesamt 1,873 Mio. m³ Wasser verbraucht (+ 5,1 % im Vergleich zu 2016). Davon sind 1,461 Mio. m³ Trinkwasser, wovon Fraport 0,615 Mio. m³ Trinkwasser und Dritte 0,846 Mio. m³ Trinkwasser beziehen. (Fraport 2018) Inside Out (Hessenwasser, 2016) berichtet von ca. 20 % Betriebswasseranteil auf dem gesamten Flughafengelände. Aktuell wird nur in den Liegenschaften der Fraport AG Betriebswasser verwendet. Im Detail weist Fraport (2018) eine Betriebswassernutzung von 48 % (entspricht 0,41 Mio. m³) in eigenen Gebäuden aus und steigerte damit die Betriebswassernutzung im Vergleich zu 2016 (0,310 Mio. m³, Fraport 2017). Im Zeitraum von 2001 bis 2012 wurde der Anteil des Betriebswassers am Gesamtwasserverbrauch um 24 % gesteigert. Gleichzeitig wurde der Trinkwasserbezug um 20 % verringert (Mediathek Hessen 2012). Insgesamt fallen am Flughafen 1,97 Mio. m³ Abwasser (2017) an (Fraport 2018).

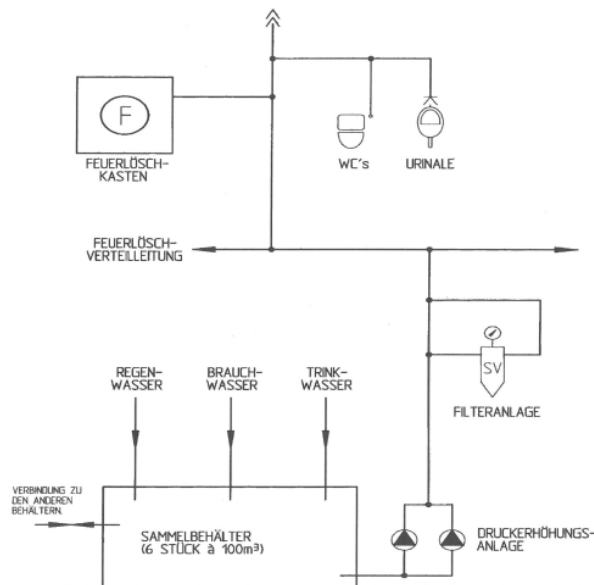


Abbildung 7: Schema der Betriebswasserversorgung am Frankfurter Flughafen

Quelle: Pfeiffenberger (1995: 81)

Auf dem Flughafengelände wird im Niederschlagsfall bis zu $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ in Regenrückhaltebecken abgeleitet. Das aufgefangene Regenwasser des Flughafens wird in 23 Regenrückhaltebecken gesammelt. Das Niederschlagswasser aus zwei Regenrückhaltebecken in der CargoCity Süd wird wiederaufbereitet. Das aufbereitete Niederschlagswasser hat Trinkwasserqualität und wird direkt in das Betriebswassersystem eingespeist. In zwei Regenrückhaltebecken an der Landebahn Nordwest versickert das Regenwasser direkt in den Boden. Gefiltert wird es während der Passage der Sandfläche, auf der Weidelgras gepflanzt ist (Mediathek Hessen 2012; Ferch und Beltyukov 2020; Scheuring 2018 fernmündlich). Insgesamt weisen alle 23 Rückhaltebecken ein Gesamtvolumen von $222\,500 \text{ m}^3$ auf (Ferch und Beltyukov 2020; Fraport o.J.).

Insgesamt existieren auf dem Flughafengelände fünf Brunnen, von denen praktisch maximal drei in Betrieb sind. Fraport darf rechtlich bis zu $330\,000 \text{ m}^3/\text{a}$ Grundwasser fördern. In den letzten Jahren wurde diese bewilligte Menge nie ausgeschöpft, da der Betreiber mit ungefähr der Hälfte des geförderten Grundwassers den Bedarf decken könnte (Inside Out 2016).

Identifizierte Substitutionspotenziale bei der Fraport AG

In dem im November 2018 geführten Expertengespräch (Scheuring 2018 mündlich) wurde deutlich, dass am Flughafen Frankfurt am Main weiteres Trinkwasser durch Betriebswasser diverser Herkunft substituiert werden könnte. Das Potenzial der Trinkwassersubstitution gilt zwar im Unternehmen selbst sehr weit ausgeschöpft. Bisher denkt Fraport nach den erteilten Auskünften nicht darüber nach, den Anteil des von der Mainwasseraufbereitung in der Niederrad gelieferten Betriebswassers zu erhöhen.

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, Trinkwasser in Toiletten- und Urinalspülungen durch Betriebswasser zu ersetzen. Obgleich es in den Terminals 1 und 2 ca. 800 Toiletten gibt, wird diese Substitutionsmöglichkeit im Unternehmen derzeit kaum verfolgt.

Nur innerhalb von Terminal 2 und in der 2013 eröffneten Erweiterung des Terminals 1, dem sog. Flugsteig A-Plus, erfolgt eine Nutzung von Betriebswasser im Sanitärbereich. Der Grund liegt im Verhältnis des Wasserverbrauchs für Toilettenspülungen im Vergleich zur Vorhaltung des Löschwasservorrats. Der Löschwasservorrat des Flughafens ist Voraussetzung für die Betriebsgenehmigung. In warmen Sommermonaten kann es erforderlich werden, hier auch Trinkwasser nachzuspeisen. Wirtschaftlich macht eine weitere Substitution keinen Sinn für den Flughafenbetreiber, da das Trinkwasser im Verhältnis billiger als eine weitere Betriebswassernutzung sei.

Im Gespräch bestätigte sich das Ergebnis der Vorabrecherche, dass lediglich Fraport Betriebswasser in seinen Liegenschaften verwendet. Dritte Unternehmen verwenden ausschließlich Trinkwasser, sodass dort Substitutionspotenzial zumindest für die Grünpflege und in sanitären Bereichen vorhanden ist. Dieses Potenzial könnte durch einen Anschluss der jeweiligen Gebäude theoretisch erschlossen werden. Für Fraport bestehen Zweifel, ob die vorhandenen lokalen Betriebswasserreserven, die bereits heutzutage im Sommer ein limitierender Faktor sind, für die Erschließung weiterer Gebäude genügen.

Grundsätzlich ist durch die Verwendung des anfallenden Regenwassers eine Erhöhung des verfügbaren Betriebswassers und dadurch eine weitere Substitution von Trinkwasser denkbar, da lediglich vier Regenrückhaltebecken das aufgefangene Regenwasser in die Aufbereitung leiten bzw. es in den Untergrund versickern. Der Großteil der Regenrückhaltebecken führt das aufgefangene Regenwasser in städtische Kläranlagen ab. Das abgeführte Volumen ist eine potenzielle Betriebswasserquelle, die sich nach einer technischen Aufbereitung oder einer örtlichen Versickerung mit anschließender Grundwasserförderung verwenden ließe. Eine Realisierung dieses Potenzials ist jedoch nicht vorgesehen, da vorhandene Altlasten auf dem Flughafengelände eine Infiltration des Regenwassers aufgrund der im Flughafenuntergrund vorhandenen Konzentrationen an Schadstoffen nicht ermöglichen.

Im Zuge der Altlastensanierung reinigte Fraport im Jahr 2018 300 m³/h Grundwasser. Zukünftig ist für die Altlastensanierung eine Grundwasserreinigung von 340 m³/h nötig. Anschließend an die Aufbereitung erfolgt die Versickerung des gereinigten Grundwassers im Stadtwald, die Teil des Bilanzausgleichs im Vorfeld des Wasserwerks Hinkelstein ist. Die Versickerung ist zugleich eine Schutzinfiltration, die belastete Grundwasserströme vom Flughafengelände abdrängt und somit eine Verunreinigung des Grundwassers, das im Wasserwerk gefördert wird, verhindert (Ferch und Beltyukov 2020).

Identifizierte Substitutionspotenziale bei dritten Unternehmen auf dem Flughafengebiet

Nach einer vorläufigen Einschätzung bestehen bei dritten Unternehmen Substitutionspotenziale, die sich allerdings vermutlich nur zu einem geringen Anteil mit lokal anfallendem Betriebswasser befriedigen lassen (sondern im Wesentlichen nur mit Betriebswasser aus der Mainwasseraufbereitungsanlage, an die Fraport bereits angeschlossen ist). Der jährliche Trinkwasserbedarf Dritter auf dem Flughafengelände liegt

bei 0,85 Mio. m³. Grob geschätzt ist dort wenigstens ein Drittel substituierbar – für Bürogebäude insbesondere für Toiletten, für gewerbliche Betriebe Wasser für Reinigungszwecke und für alle eventuell auch Kühlwasser.

Zur Erkundung wurden keine eigenen Erhebungen im Gebiet durchgeführt. Daher ist möglich, dass einzelne Unternehmen bereits eine Betriebswassernutzung vornehmen.

5.2.2. *Trink- und Betriebswassernutzung in Bildungseinrichtungen am Beispiel der Goethe-Universität Frankfurt am Main*

Öffentliche Bildungseinrichtungen mit originärem Bildungsauftrag wie Kindergärten, Schulen, Hochschulen sowie weitere Institutionen des Tertiären Bildungsbereiches (z. B. Berufsakademie) und der Erwachsenenbildung (wie Volkshochschulen) sind in der Regel in eigenen Gebäuden untergebracht. Je nach Art der Einrichtung werden sie ganztags oder kürzer besucht und verfügen teilweise auch über eigene Mensen zur Verpflegung. In den Ferienzeiten ist ein Teil der Einrichtungen geschlossen, andere werden zur Ferienbetreuung genutzt oder (z. B. Hochschulen) sind in einem Teilbetrieb.

Beschreibung der Standorte der Universität in Frankfurt am Main

Der Goethe-Universität Frankfurt am Main waren im Jahr 2017 insgesamt 48 107 Studierende zugeordnet. Die Zahl der Mitarbeiter, z. B. Verwaltungsangestellte, Professoren und Wissenschaftliche Mitarbeiter belief sich im Jahr 2017 auf 5 458 Vollzeitäquivalente (Die Präsidentin der Goethe-Universität Frankfurt am Main 2018). Die Universitätsgebäude sind auf fünf Standorte verteilt: Campus Westend, Campus Riedberg, Campus Bockenheim, Campus Ginnheim und Campus Niederrad. Unter Verwendung der Angaben im Jahrbuch 2017 der Goethe-Universität werden Studierende und Angestellten der Fachbereiche den unterschiedlichen Standorten zugewiesen (vgl. ebd.). Der Gesamt-Wasserverbrauch an den Standorten (ohne Campus Niederrad/Universitätsklinikum) beläuft sich 2017 auf über 260 000 m³, davon sind ca. 10 000 m³ Brunnenwasser. Die in Tabelle 12 enthaltenen Kenngrößen zum Wasserverbrauch basieren auf 150 Vorlesungstagen im Jahr (Fleege 2019) und variieren hinsichtlich der unterschiedlichen Standorte, was sich durch die unterschiedliche thematische Ausrichtung und Gebäudeausstattung, aber auch durch Gebäudealter erklären lässt.

Zu einem geringen Anteil werden die Gebäude der Universität auch für Veranstaltungen genutzt, die nichts mit dem Universitätsbetrieb zu tun haben (z. B. solche der Akademie der Arbeit), wodurch sich der Wasserverbrauch erhöht. Dennoch sind die Wasserverbräuche an der Goethe-Universität niedrig im Vergleich zu Werten aus der Literatur (Rautenberg et al. 2014).

Trinkwassernutzung an den Standorten der Goethe-Universität findet bisher generell in den Sanitärräumen und bei der Gebäudekühlung, in Kantinen und Cafés sowie in Kaffeeküchen statt. Spezielle Einrichtungen wie Labore benötigen zum Teil große Mengen an Wasser (z. B. für Kühlzwecke oder zur Herstellung von Vakuum), wofür bisher Trinkwasser verwendet wird.

Tabelle 12: Kenngrößen zum Wasserverbrauch an den verschiedenen Standorten bei 150 Vorlesungstagen

| Campus | Studierende ^[1] | Beschäftigte | Personengesamt | Trinkwasserverbrauch 2017 [m ³] | Wasserverbrauch [(Pers.*d)] ^[2] |
|------------|----------------------------|----------------------|----------------|---|--|
| Westend | 30.558 ^[3] | 2.493 ^[3] | 33.051 | 103.307 | 21 |
| Riedberg | 6.800 | 1.099 | 7.899 | 98.669 | 83 |
| Bockenheim | 5.304 ^[3] | 175 ^[3] | 5.479 | 42.664 | 52 |
| Ginnheim | 1.176 | 74 ^[4] | 1.250 | 8.000 | 43 |
| Niederrad | 3.927 | 1.616 | 5.543 | k.A. ^[5] | k.A. ^[5] |

[1] Studierende mit Zuordnung, [2] 150 Vorlesungstage pro Jahr

[3] Kulturwissenschaften teils auch Campus Bockenheim wurden dem Campus Westend zugewiesen, da nur eine Gesamtzahl für Sprach- und Kulturwissenschaften bekannt ist und Sprachwissenschaften am Campus Westend untergebracht sind.

[4] Angestellte bei Sportwissenschaften und Psychologie (147,7) wurden je zur Hälfte dem Campus Ginnheim (Sportwissenschaften) und dem Campus Westend (Psychologie) zugewiesen.

[5] Der Campus Niederrad enthält auch das Universitätsklinikum mit 365 Betriebstagen und ist mit diesem z. T. sehr eng baulich verwoben. Eine getrennte Erhebung des Wasserverbrauchs für die dortigen Bildungseinrichtungen bzw. die Berechnung eines getrennten spezifischen Verbrauches ist bisher nicht möglich.

Realisierte Trinkwassersubstitution

Grundwasser wird aktuell auf dem Campus Westend für die Toilettenspülung im I.G.-Farben-Haus sowie für den Betrieb eines Zierbrunnens und in der Kantine verwendet. Am Campus Ginnheim wird Grundwasser für die Bewässerung von Sportplätzen verwendet (Tabelle 13). Für 2017 ergibt sich aus diesen Grundwassernutzungen eine Summe von 9 962 m³.

Tabelle 13: Grundwassernutzung für Betriebswasser an Standorten der Goethe-Universität

| Campus | Betriebswassernutzung und Trinkwasser-Einsparungen | m ³ im Jahr 2017 (max. erlaubte Fördermenge pro Jahr) |
|---------------|--|--|
| Westend | I.G.-Farben-Haus Grundwassernutzung | 1.837 (8.800) |
| Westend | Kantine Casino Grundwassernutzung | 412 |
| Ginnheim | Bewässerung Sportplätze | 7.563 (10.000) |
| Gesamt | | 9.812 |

Abschätzung der weiter möglichen Trinkwassersubstitution in einem Vorlesungsgebäude

Betrachtet wird das sog. Seminarhaus auf dem Campus Westend, das 2015 fertiggestellt wurde. Es wird für Vorlesungen und Seminare genutzt. Laut Hörsaalverwaltung werden die 51 Vorlesungsräume in unterschiedlicher Größe mit einer Gesamtkapazität von 2 740 Seminarraumplätzen in der Vorlesungszeit meist durchgehend genutzt (Mo-Sa, 8:00-20:00 Uhr), mit 75 %iger Ausnutzung der Raumkapazität; zudem sind 6 Mitarbeiter in dem Gebäude beschäftigt (Fleege 2019). Dies ergibt 2 061 Gebäudenutzer*innen pro Vorlesungstag im Seminarhaus.

Trinkwasser wird überwiegend in Sanitäreinrichtungen verbraucht, außerdem für Reinigungsarbeiten. Weitere Wasserverbrauchsstellen sind eine Cafeteria und die Gebäudekühlung, diese beiden Verbrauchsstellen kamen im Jahr 2017 insgesamt auf 334 m³ Trinkwasser bei einem Gesamtverbrauch im Gebäude von 3 782 m³ Trinkwasser (vgl. ebd.). Somit verbleiben 91 % des Verbrauchs für Gebäudereinigung und im Sanitärbereich (Toilettenspülung und Handwaschbecken), vgl. Tabelle 14. Grundsätzlich besteht ein Substitutionspotenzial für Trinkwassernutzungen in den Bereichen Toilettenspülung, Reinigungsarbeiten und Gebäudekühlung.

Der Wasserverbrauch für Toilettenspülung im Seminarhaus wird ebenso wie der in den Bildungseinrichtungen von Frankfurt am Main anhand der folgenden Faustzahlen angesetzt: Der Wasserverbrauch für Toilettenspülung an Schulen wird in dem DVGW-Arbeitsblatt 410 beziffert mit sechs Litern pro Person (Schüler und Lehrer) und Schultag (DVGW 2008). Für die Bemessung von Regenwassernutzungsanlagen an Schulen wird ebenfalls auf einen Betriebswasserbedarf von sechs Litern pro Person und Tag verwiesen (DIN 1989-1:2002-04). Wird für das Seminarhaus von sechs Litern pro Vorlesungstag und Gebäudenutzer für die Toilettenspülung ausgegangen ergibt sich bei einer 75 %igen Auslastung des Gebäudes ein Wasserverbrauch von jährlich 1 855 m³ (Tabelle 14).

Tabelle 14: Berechnung der Trinkwasserverbrauchsstellen im Seminargebäude

| | Wasserverbrauch [m ³ /a] | Wasserverbrauch [%] |
|---|-------------------------------------|---------------------|
| Cafeteria* | 197 | 5 |
| Gebäudekühlung* | 137 | 4 |
| Toiletten, 6l/Gebäudenutzer/d | 1.855 | 49 |
| Reinigung Sanitärbereich 100 l/Stockwerk/d (Schätzung) | 90 | 2 |
| Reinigung Böden 0,125 l/m ² /d | 140 | 4 |
| Verbleibend für Waschbecken | 1.363 | 36 |
| Gesamt 2017 | 3.782 | 100 |

*Messwert Wasserzähler

Der aus den Verbrauchszahlen und den Gebäudenutzer*innen (2061 Pers.*d) errechnete Pro-Kopf-Trinkwasserverbrauch von 12,2 Litern pro Person und Vorlesungstag im Seminarhaus liegt damit deutlich unter dem durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch am Campus Westend, der 21 Liter pro Kopf und Tag beträgt. Da sich im Seminarhaus lediglich eine kleine Cafeteria befindet, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Aufenthaltsdauer der studentischen Gebäudenutzenden dort kurzzeitig ist. Als Pro-Kopf-Verbrauch für Gebäudekühlung und Cafeteria kann gemäß Tabelle 14 ein Liter pro Besuchende und Tag angenommen werden; der Bedarf lediglich für Reinigungsarbeiten und im Sanitärbereich beträgt folglich 11,2 Liter pro Tag.

Für Reinigungsarbeiten (Boden wischen) werden Verbräuche von 0,125 Liter pro m² angegeben (BMU 2017). Böden werden täglich gereinigt, die Nettogrundfläche beträgt 7 447 m² (Fleege 2019). Für die Reinigung der Sanitäreinrichtungen werden 100 Liter pro Stockwerk angesetzt, für sechs Stockwerke, Reinigung während der Vorlesungszeit täglich. Kenngrößen oder Messungen für den Wasserverbrauch an Waschbecken liegen nicht vor, die Verwendung von Wasserhähnen und somit der Wasserverbrauch ist stark vom Individuum abhängig (Martin 2017). Da es in dem Gebäude keine weitere Wassernutzung gibt, werden die verbleibenden 1 363 m³ den Waschbecken in den Sanitärbereichen zugeschrieben (Tabelle 14).

Für die Substitution von Trinkwasser geeignet sind die Toilettenspülung und der Wassereinsatz für Reinigungsarbeiten und Gebäudekühlung. Aus Tabelle 14 ergibt sich für diese Nutzungen ein Substitutionspotenzial von 59 %, dies entspricht 7,2 Litern pro Gebäudenutzer und Tag. Für andere Gebäude mit höherer Aufenthaltsdauer und höherem Pro-Kopf-Verbrauch kann davon ausgegangen werden, dass die genutzte Trinkwassermenge in den Sanitäreinrichtungen höher ist. Dagegen sind Wasserverbräuche für die Gebäudekühlung und für Reinigungsarbeiten von der Fläche abhängig.

Abschätzung einer weiter möglichen Trinkwassersubstitution in großen Kantinen

Die Kantine/Mensa im I.G.-Farben-Haus hat eine Fläche von 4 160 m² und 40 Beschäftigte, und gehört damit zu den großen gastronomischen Betrieben in der Goethe-Universität, Betreiber ist das Studentenwerk. Die regelmäßigen Öffnungszeiten sind Montag bis Freitag 11:00-15:00 Uhr. Die Küche verfügt über sechs Spülmaschinen, die mit Umkehrosmose-Wasser betrieben werden, im Jahr 2017 verbrauchten diese 2 781 m³ Wasser. Umkehrosmose-Wasser, welches sich aus Betriebswasser herstellen lässt, beträgt einen Anteil am Gesamtverbrauch in der Kantine von 43,5 % (Tabelle 15). Im Jahr 2017 wurden 290 805 Essen verkauft, pro verkauftes Essen können also 9,5 Liter substituiert werden.

Tabelle 15: Berechnung der Trinkwasserverbrauchsstellen in der Kantine (2017)

| | Wasserverbrauch [m ³ /a] | Wasserverbrauch [%] |
|---|-------------------------------------|---------------------|
| Weichwasser (Umkehrosmose) | 2.781 | 43,5 |
| Grundwasser | 412 | 6,5 |
| Verbleibend für Speisezubereitung und Reinigung | 3.205 | 50 |
| Gesamt 2017 | 6.398 | 100 |

Im Jahr 2017 wurden an den Mensen am Campus Westend (Mensa Casino, Mensa Anbau Casino, Casino Cafeteria, Cafeteria Dasein) 739 454 Mittagessen verkauft (Studentenwerk Frankfurt am Main 2019). Bei 9,5 Litern, die pro Essen substituiert werden können, ergibt sich ein Trinkwassersubstitutionspotenzial von 7 025 m³ pro Jahr an den Mensen am Campus Westend. Im Schnitt nutzen Studierende und Angestellte das

Mittagsangebot in den Mensas jährlich 22,3 Mal, womit sich ein Pro-Kopf Wasserverbrauch von 3,26 Litern pro Vorlesungstag und ein Pro-Kopf-Substitutionspotenzial von 1,4 Litern pro Vorlesungstag ergibt. Die Gesamtsumme des Substitutionspotenzials in Kantine und Vorlesungsgebäude beträgt 8,6 Liter pro Person und Tag, 55 % des Pro-Kopf Gesamt-Wasserverbrauchs (Tabelle 16).

Tabelle 16: Berechnung des Pro-Kopf-Substitutionspotenzials für Seminargebäude und Kantine

| | [(/)(Pers*d)] | [%] |
|---|---------------|-------------|
| Pro-Kopf-Wasserverbrauch Seminargebäude | 12,2 | |
| Pro-Kopf-Wasserverbrauch Kantine | 3,26 | |
| Gesamt-Wasserverbrauch pro Kopf | 15,5 | 100 |
| Pro-Kopf-Substitutionspotenzial Vorlesungsgebäude | 7,2 | |
| Pro-Kopf-Substitutionspotenzial Kantine | 1,4 | |
| Gesamt-Substitutionspotenzial pro Kopf | 8,6 | 55,5 |

Identifizierte Substitutionspotenziale

Gemäß dem Statistischen Jahrbuch 2018, Bildung (Kapitel 4) waren in Frankfurt am Main im Wintersemester 2017/2018 66 673 Studierende registriert; darüber hinaus waren 2017 5 738 Personen an den Hochschulen tätig als wissenschaftliches und künstlerisches Personal. An den beruflichen Schulen (Berufsschulen, Berufsfachschulen, Fachoberschulen, Fachschulen und berufliches Gymnasium) in Frankfurt am Main waren 2017 27 309 Schüler und 1 130 Lehrer. Davon waren ca. die Hälfte (13 544) sozialversicherungspflichtige Auszubildende, die ein bis zwei Berufsschultage in der Woche haben. An allgemeinbildenden Schulen waren 68 427 Schüler und 5 678 Lehrer (Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2018) (Tabelle 17).

Von den 170 Schulen in Frankfurt am Main werden 135 mit warmen Mahlzeiten versorgt. Weitere Informationen konnten im Rahmen der Studie nicht in Erfahrung gebracht werden, weshalb auf die Berechnung des Substitutionspotenziales für die Kantinenversorgung an Schulen hier verzichtet wird. Lediglich für Studierende und Angestellte an Hochschulen kann dies aufgrund guter Datenlage berücksichtigt werden. Geht man von den oben beschriebenen Substitutionspotenzialen aus, ergibt sich für Bildungseinrichtungen in Frankfurt am Main ein Trinkwassersubstitutionspotenzial von 221 013 m³ pro Jahr.

Tabelle 17: Substitutionspotenzial an Bildungseinrichtungen im Stadtgebiet Frankfurt am Main

| | Personen 2017 | Substitutionspotenzial [l/(Pers*d)] | Substitutionspotenzial [m³/a] |
|---|----------------|--|----------------------------------|
| Studierende und Angestellte an Hochschulen ^[1] | 72.411 | 7,2 + 1,4 | 93.410 |
| Schüler und Lehrer an beruflichen Schulen ^[2] | 14.895 | 7,2 | 20.376 |
| Sozialversicherte Auszubildende ^[3] | 13.544 | 7,2 | 5.851 |
| Schüler und Lehrer an allgemeinbildenden Schulen ^[2] | 74.105 | 7,2 | 101.376 |
| Gesamt | 174.955 | | 221.013 |

[1] 150 Vorlesungstage, [2] 190 Unterrichtstage, [3] 60 Unterrichtstage

5.2.3. Trink- und Betriebswassernutzung in Büro- und Verwaltungsgebäuden (einschließlich Bürotürme)

In einer Dienstleistungsgesellschaft nimmt der Anteil an verwaltenden und anderen Bürotätigkeiten zu. Es bietet sich an, entsprechende Büros gebäudeweise zusammenzufassen. Neben Büroräumen sind die Gebäude mit Sanitäreinrichtungen und in der Regel mit Kaffeeküchen ausgestattet. Typische Bürogebäude sind 250 Arbeitstage pro Jahr geöffnet. Kernarbeitszeiten für die beschäftigten Angestellten sind meist zwischen 7.00 Uhr und 18.00 Uhr. Die Gebäudereinigung findet in den Randzeiten statt.

In diesen Gebäuden wird Wasser alleine für die folgenden Zwecke verwendet: Belegschafftwasser (Toiletten, Handwaschbecken), Wasser zur Getränkezubereitung, für die Gebäudereinigung und (im Folgenden vernachlässigt) für Zimmerpflanzen. Je nach Größe des Gebäudes ist die Kantine ausgelagert. Eventuell spielt zusätzlich Wasser für Kühlzwecke eine Rolle (Gebäudekühlung, evtl. auch Kühlung von Rechenanlagen) und Wasser für die Außenbewässerung. Gemäß Kenngrößen aus der Literatur werden in Büro- und Verwaltungsgebäuden zwischen 40 Litern (bei einfacher Ausstattung) und 140 Litern (mit Kantine und gehobener Ausstattung) pro Arbeitstag und Person verbraucht (Rautenberg et al. 2014). In der für Hamburg Wasser durchgeführten Wasserbedarfsprognose wurde 2007 ein aktueller spezifischer Wasserverbrauch von 49,6 Liter pro Person und Arbeitstag zugrunde gelegt (Kluge et al. 2008).

Als Finanzdienstleistungsmetropole zeichnet sich Frankfurt am Main durch einen sehr hohen Anteil an Kreditinstituten aus. Die Frankfurter Wertpapierbörse ist die wichtigste deutsche Börse. Die Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht hat einen ihrer beiden Hauptsitze in Frankfurt am Main. Alle großen Banken Deutschlands haben hier ihren Hauptsitz, zu einem großen Teil konzentriert im sogenannten Bankenviertel, dem am höchsten verdichteten Raum im Arbeitsgebiet der Hessenwasser (Müller-Raemisch 1998). Dort finden sich auch Versicherungen und andere Finanzinstitutionen.

Exemplarische Betrachtung A) Öffentliche Einrichtungen

Exemplarisch wurde das Verwaltungs- und Präsidiumsgebäude der Goethe-Universität Frankfurt betrachtet (sog. PA-Gebäude). Es ist ein fünfstöckiges Bürogebäude, in dem rund 350 Beschäftigte, Verwaltungsangestellte und die Hochschulpräsidenten, untergebracht sind. Es hat eine typische Gebäudestruktur für Bürogebäude. Die Gebäudegrundfläche beträgt 2 454 m², die Nettogrundfläche beträgt 8 775 m². 2017 wurden 2 548 m³ Trinkwasser verbraucht.

Im PA-Gebäude befinden sich 47 Waschbecken, 64 Toiletten, 25 Urinale und 3 Duschen. Die Toiletten werden täglich gereinigt, der Boden wird zweimal pro Woche gewischt (Fleege 2019). Der Wasserverbrauch der Klimaanlage wird über den Zähler eines benachbarten Gebäudes gemessen und daher im Wasserverbrauch des PA-Gebäudes nicht mit erfasst (ebd.). Aus diesem Grund wird der Trinkwasserverbrauch für die Klimaanlage aus einem nebenstehenden Gebäude mit ähnlicher Größe herangezogen. Dadurch ergibt sich ein (bereinigter) Gesamtverbrauch von insgesamt 2 685 m³ pro Jahr, und bei 350 Beschäftigten und 250 Arbeitstagen ein Pro-Kopf-Verbrauch von täglich 30,7 Litern. Hierin nicht berücksichtigt ist z. B. der Wasserverbrauch in Kantinen und Rechenzentren.

Im PA-Gebäude werden derzeit weder wasserlose Urinale eingesetzt noch wird Trinkwasser substituiert. Da für das PA-Gebäude der Goethe-Universität lediglich für die Gebäudekühlung Messwerte herangezogen werden können, werden die anderen Verbrauchsstellen mittels Kenngrößen ermittelt (vgl. Fleege 2019). Für Toilettenspülung in Bürogebäuden werden 12 Liter pro beschäftigte Person und Tag angesetzt (DIN 1989-1:2002-04). Für das Bodenwischen wird ein Wasserverbrauch von 0,125 l/m² angegeben (BMU 2017). Für die tägliche Reinigung der Sanitäranlagen wird von 100 Liter pro Stockwerk ausgegangen. Für Toilettenspülung, Reinigungsarbeiten und Klimaanlage ergibt sich ein Substitutionspotenzial von 16,3 Litern pro Person und Tag, das sind 53 % des gesamten Trinkwasserverbrauchs im PA-Gebäude, 14,4 Liter pro Person und Tag würden somit auf Kaffeeküchen und Waschbecken im Sanitärbereich anfallen (vgl. Tabelle 18).

Weiteres Potenzial ergibt sich beim Wasserverbrauch in Kantinen. Substitutionspotenzial in Großküchen ist vor allem hinsichtlich der Spülmaschinen vorhanden, diese werden teils mit enthärtetem Wasser betrieben. Die Herstellung dieses enthärteten Wassers geschieht durch Umkehrosmose; eingesetzt werden kann Betriebswasser. Bei ausreichender Weichheit und hygienischer Unbedenklichkeit kann Betriebswasser ohne Aufbereitung mittels Umkehrosmose in Spülmaschinen eingesetzt werden. An dem Beispiel einer Großküche an der Goethe-Universität ergab sich ein Substitutionspotenzial von 9,5 Litern pro Essen im Bereich Spülmaschine (siehe Kapitel 5.2.2).

Tabelle 18: Berechnung der anteiligen Wasserverbräuche in einem Verwaltungsgebäude (PA-Gebäude)

| | Anteiliger Wasserverbrauch [m³/a] | Anteiliger Wasserverbrauch [%] |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| Gebäudekühlung, 0,17 m³/d (Mai-August) ^[1] | 137 | 5 |
| Toiletten, 12 l/(Pers.*d) ^[2] | 1.050 | 39 |
| Reinigung Sanitärbereich ^[3] | 125 | 5 |
| Reinigung Böden ^[4] | 114 | 4 |
| Verbleibend für Kaffeeküchen und Waschbecken im Sanitärbereich | 1.169 | 47 |
| Gesamtverbrauch | 2.595 | 100 |

[1] Messwert, Wasserzähler Nebengebäude (Fleege 2019)

[2] Für Toilettenspülung in Bürogebäuden werden 12 Liter pro beschäftigte Person und Tag angesetzt (DIN 1989-1:2002-04)

[3] Für die Reinigung von Toiletten und Waschbecken werden 100 l/Stockwerk pro Arbeitstag angenommen, siehe Kapitel 5.2.2

[4] Für die Reinigung von Böden werden 0,125 l/m² pro Arbeitstag herangezogen gemäß (BMU 2017)

Exemplarische Betrachtung B) Banken

Die Europäische Zentralbank (EZB) hat ihren Hauptsitz in Frankfurt am Main. 2017 arbeiteten an drei Standorten 4981 Mitarbeiter, wovon 2902 ihren Arbeitsplatz im neuen Hauptgebäude im Frankfurter Ostend und 2079 ihren Arbeitsplatz im Eurotower und Japan Center in der Frankfurter Stadtmitte hatten. Im Unternehmen besteht Bedarf an Frischwasser sowohl für (gebäude-)technische Zwecke (Rückkühlwerke und Befeuchtung der Lüftungsanlagen) sowie für die Versorgung der Mitarbeitenden (Sanitäranlagen, Büroküchen, Kantine) und die Grünflächenbewässerung. 2017 hatte die EZB im Stadtzentrum einen Frischwasserverbrauch von 42 282,8 m³, der sich aus dem Bedarf für technische Zwecke (16 285,5 m³) und dem Bedarf für Sanitäranlagen, Büroküchen und Kantine (25 997,3 m³) zusammensetzt. Der Frischwasserverbrauch pro Beschäftigtem insgesamt liegt bei 84,4 l/d (Europäische Zentralbank 2018).

Für die Regenwassernutzung wurde bei der EZB eine 250 m³ große Zisterne als Speicher im südlichen Bereich des Hauptgebäudes im Ostend installiert. Als Auffangfläche dienen die Dachfläche des Hauptgebäudes und Teil des Großmarkthallendachs, d. h. 13 000 m², sowie die Dach- und Fassadenflächen des EZB-Hochhauses. Niederschlagswasser der Fassadenflächen kann ebenfalls aufgefangen werden (Europäische Zentralbank 2014).

In den Innenstadtstandorten der EZB wird ausschließlich Trinkwasser verwendet. Am neuen Standort in Ostend wird Regenwasser zur Substitution von Trinkwasser sowohl für die Toilettenspülung als auch zur Grünbewässerung eingesetzt; aufgrund der aufgefangenen Mengen geschieht die Substitution nur anteilig. Eine Ausweitung der Betriebswassernutzung – z.B. für den erhöhten Bewässerungsbedarf im Sommer – ist nicht geplant, da das Fassungsvermögen der Zisterne der limitierende Faktor ist. Die getrennte Abführung und Aufbereitung von Grauwasser ist aus Platzgründen nicht vorgesehen.

Die hauseigene Umwelterklärung bescheinigt den beiden EZB-Gebäuden in der Stadtmitte (Eurotower und Japan-Center) hohen Handlungsbedarf bei der Wassernutzung (Europäische Zentralbank 2018). Im Zuge einer Generalsanierung könnten Leitungen für eine Betriebswassernutzung neu verlegt werden; jedoch ist die EZB nur Mieterin und nicht Eigentümerin der Gebäude und hat entsprechend auf die Entscheidungen nur geringen Einfluss. Des Weiteren müsste für eine Betriebswassernutzung im Stadtzentrum ein Betriebswassernetz vorhanden sein, da das Regenwasser der Dachflächen – wie bei fast allen als Hochhäusern dieser Art – bei Weitem nicht den Bedarf abdecken kann. In diesem Sinne ist das EZB-Hauptgebäude durch die großen Dachflächen der ehemaligen Großmarkthalle ein Sonderfall im Bürohochhausbau (Schneider 2019 mündlich).

Die Deutsche Bundesbank nennt als wesentliche Wasserverbraucher neben den Bereichen Sanitär, Klimatisierung, Gastronomie die vergleichsweise ausgedehnten Außenanlagen; dort wird teilweise Trinkwasser durch auf dem Dach aufgefangenes Niederschlagswasser substituiert; es existieren zwei Zisternen mit einem Gesamtvolumen von 305 m³. Zusätzlich zum aufgefangenen Regenwasser wurden 2017 13 361 m³ Frischwasser für die Grünflächenbewässerung verwendet (2018: 17 480 m³). Im Bezugsjahr 2017 war der Bundesbank-Campus Arbeitsplatz für 4 980 Arbeitnehmer (2018: 4 980, Deutsche Bundesbank 2019a, Deutsche Bundesbank Kommunikation 2019). Pro Vollzeitkraft betrachtet ergab sich 2017 über alle Standorte ein Wasserverbrauch von 110 Liter pro Tag (27,7 m³/a, Deutsche Bundesbank 2019).

Durch Bau weiterer Zisternen kann der Deckungsgrad der Substitution von Trinkwasser für die Außenbewässerung noch weiter gesteigert werden. Bei der Deutschen Bundesbank wird zudem ein Potenzial in der Benutzung von Betriebswasser in der Toilettenspülung gesehen, die bislang ausschließlich über Frischwasser erfolgt.

Die KfW-Bank hat einen deutlich niedrigeren Pro-Kopf-Verbrauch von 14,6 m³ im Jahr 2017 (63 l pro Beschäftigter und Tag, eigene Umrechnung). Für die Toilettenspülung wird am Frankfurter Standort (anders als in früheren Jahren) nur Trinkwasser verwendet; für die Bewässerung der Außenanlagen wird Niederschlagswasser verwendet (KfW 2018: 78). Das Unternehmen konnte uns auf Nachfrage die verwendete Menge nicht mitteilen. Bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau, die in der Vergangenheit auch am Standort Frankfurt am Main (wie bis heute am Standort Bonn (KfW 2018a) Erfahrungen mit der Substitution von Trinkwasser für die Toilettenspülung gemacht hat, wurde vergeblich versucht, weitere Substitutionspläne oder die Gründe für die Änderung an der Wasserinfrastruktur in Erfahrung zu bringen.

Die Commerzbank nutzt in ihrer Zentrale im Commerzbank-Tower zur Kühlung wasserdurchflossene Decken. Das im Umlauf im Kühlkreislauf nicht mehr einsetzbare Wasser wird nicht ungenutzt in die Kanalisation geleitet, sondern für die Toilettenspülung wiederverwendet (der Turm hat seit 1998 für die Toilettenspülung ein separiertes Netz); es „trägt etwa 95 % des Wasserbedarfs zum Spülen der WC-Anlagen der oberen Hälfte des Commerzbank-Hochhauses bei.“ (Commerzbank 2011: 113) Bei der Commerzbank erlaubt die bereits im Gebäude vorhandene Betriebswasserleitung für die

Toilettenspülung (Commerzbank o.J.), die Trinkwassersubstitution in diesem Bereich zu verdoppeln, wenn über eine öffentliche Leitung Betriebswasser angeliefert wird.

Die DZ Bank (Deutsche Zentral-Genossenschaftsbank) mit Sitz in Frankfurt am Main ist innerhalb des genossenschaftlichen Finanzsektors als Zentralinstitut für rund 850 deutsche Kreditgenossenschaften zuständig. Darüber hinaus betreut sie als Geschäftsbank Firmenkunden und institutionelle Anleger. Der Großteil der Belegschaft arbeitet im Frankfurter Westend. In zwei Bürotürmen waren 2017 3392 Arbeitsplätze angesiedelt. Tabelle 43 im Anhang 5.2.3 zeigt die Wasserverbräuche der letzten Jahre. Der spezifische Wasserverbrauch für 2017 liegt bei 79,57 l/Beschäftigte pro Tag. Der Rückgang des Wasserverbrauchs der DZ Bank am Frankfurter Standort von 2016 (72 390 m³) auf 2017 (67 203 m³) ist durch die Umrüstung einzelner Klimaanlage von Wäscherbefeuchtung auf Hochdruckbefeuchtung zu erklären (Bind 2019).

Für die Trinkwassersubstitution eignen sich Wasserverbräuche für Toilettenspülung, Reinigungsarbeiten und Gebäudekühlung sowie für die Bewässerung des Umgebungsgrüns. Generell wird in den Gebäuden der DZ Bank ausschließlich Trinkwasser verwendet (DZ Bank 2018). Eine Einspeisung von Betriebswasser ist in den Gebäuden der DZ Bank in Frankfurt am Main aktuell nicht möglich und perspektivisch vom Unternehmen nicht vorgesehen oder geplant (Bind 2019).

Identifizierte Substitutionspotenziale

Laut dem Statistischen Jahrbuch 2018, Kapitel 6, waren in Frankfurt am Main im Jahr 2017 237 159 Menschen in Berufsgruppen beschäftigt, die einer Tätigkeit in Büro- und Verwaltungsgebäuden zugeordnet werden (Anhang 5.2.3, Tabelle 44).

Mit der ermittelten beschäftigtenbezogenen Kenngröße für Bürogebäude von 16,3 Litern (siehe Kapitel 5.2.2 und 5.2.3) ergibt sich bei jährlich 250 Arbeitstagen ein Trinkwassersubstitutionspotenzial von 966 423 m³ pro Jahr für Toilettenspülung, Gebäudereinigung und Gebäudekühlung (Tabelle 19). Weiteres Potenzial ergibt sich in Großküchen durch die Substitution von Trinkwasser in Spülmaschinen in Großküchen, die mit enthärtetem Wasser betrieben werden. Gemäß einer repräsentativen Umfrage haben bundesweit 43 % der Beschäftigten Zugang zu einer Kantine, die von 33 % der Beschäftigten genutzt wird (DEHOGA 2017). Geht man davon aus, dass auch 33 % der Beschäftigten in Bürogebäuden in einer Kantine zu Mittag essen, in der die Spülmaschinen mit enthärtetem Wasser betrieben werden, würde sich in Frankfurt am Main ein weiteres Substitutionspotenzial von 185 873 m³ pro Jahr ergeben.

Unschärfen ergeben sich bzgl. Beschäftigter, die aufgrund der Branchenzugehörigkeit des Unternehmens einem anderen Sektor zugeordnet werden, aber Verwaltungstätigkeiten ausüben. Die Zahl der Beschäftigten in Büro- und Verwaltungsgebäuden ist folglich größer als in der soeben vorgestellten Kalkulation angenommen; somit ist auch das tatsächliche Substitutionspotenzial in den Bürogebäuden in Frankfurt am Main höher als hier ermittelt.

Tabelle 19: Substitutionspotenzial in Büro- und Verwaltungsgebäuden in Frankfurt am Main

| Beschäftigte in Büro- und Verwaltungsgebäuden | Substitutionspotenzial Bürogebäude (Toilettenspülung, Reinigungsarbeiten, Gebäudekühlung) | | Substitutionspotenzial in Kantinen (Spülmaschine) ^[4] | |
|---|---|---------------------|--|-------------------|
| | l/(Pers*d) | [m ³ /a] | l/Essen | m ³ /a |
| 237.159 ^[1] | 16,3 ^[2] | 966.423 | 9,5 ^[3] | 185.873 |

[1] siehe Anhang 5.2.3, Tabelle 44

[2] Das Substitutionspotenzial von 16,3 Litern pro Arbeitstag wurde anhand der beispielhaften Berechnungen für ein Bürogebäude der Goethe-Universität festgestellt, siehe Kapitel 5.2.2 und 5.2.3

[3] Substitutionspotenziale von 9,5 Litern pro Kantinenmahlzeit wurden anhand der beispielhaften Berechnung für Kantinen am Campus Westend der Goethe-Universität festgestellt, siehe Kapitel 5.2.2

[4] Fallbeispiel: Wasserenthärtung durch Umkehrosmose in Großkantinen. In diesen Prozess kann auch Betriebswasser eingespeist werden.

5.2.4. Trink- und Betriebswassernutzung in Gewerbegebieten

Beschreibung des Gewerbegebietes Fechenheim Nord/Seckbach

Aus einem Gutachten des Büros Cooperative aus 1994, das sich mit dem Gewerbegebiet Ost befasste geht hervor, dass dort damals Betriebswasser eingesetzt wurden, hauptsächlich Mainwasser; im Bereich Fechenheim Nord wurde hingegen Betriebswasser aus Grundwasser gewonnen. Die damaligen Erhebungen in den Betrieben ergaben für das Teilstück Fechenheim Nord 7 000 m³ Betriebswasser, (während im angrenzenden Gebiet südlich des Güter- bzw. Übergabebahnhofs über 15 Mio. m³ Betriebswasser aus Mainwasser Verwendung fand) (Cichorowski et al. 1994b).

Gemäß einer Standortanalyse (Wolf 2019) besteht das heutige Gewerbegebiet Fechenheim Nord/Seckbach aus den beiden Flächentypen Gewerbe- und Industriegebiet und Gewerbemischgebiet. Die Gesamtfläche beträgt ca. 185 ha, die 368 bis 550 Unternehmen mit 5 000 bis 7 000 Beschäftigten weisen eine große Branchenvielfalt auf. (Kompetenzzentrum Industrie Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH 2020; Wolf 2019) Über 20 % der Unternehmen sind mit Handel und Instandhaltung von Fahrzeugen beschäftigt, 15 % sind im verarbeitenden Gewerbe angesiedelt, gefolgt von 13 % im Dienstleistungssektor (Wolf 2019). Die Analyse des Standortes im Rahmen des neu erarbeiteten Klimaschutzkonzeptes ergab außerdem, dass sich neben vielen kleinen und mittelständischen Betrieben, Gastgewerbe, Gesundheits- und Bildungseinrichtungen sowie Kulturbetrieben auch große Rechenzentren und (noch) ein großer fleischverarbeitender Betrieb dort befinden sowie Chemiebetriebe. Darüber hinaus befinden sich dort fünf Unternehmen der Umweltbranche, die auch im Bereich Wasserversorgung und Abwasserentsorgung tätig sind (ebd.).

Aktuell wird im Rahmen eines fünfjährigen Projektes zum experimentellen Städtebau die Orientierung zu einem „Nachhaltigen Gewerbegebiet“ unternommen. Ein Schwerpunkt liegt derzeit auf der Entwicklung eines Energiekonzeptes. Weitere Potenziale des Gebietes und Möglichkeiten der effizienten Ressourcennutzung sollen ermittelt werden. Bisher wurde ein nachhaltiges Wasserkonzept in diesem Projekt nicht in Angriff genommen.

Realisierte Trinkwassersubstitution

Zwei von den vier Unternehmen, die den Fragebogen ausgefüllt haben, haben sich bereits mit Trinkwassereinsparung bzw. -substitution beschäftigt. Die Menge an eingesetztem Betriebswasser kann nicht erhoben werden, da für die Regenwassernutzung keine Zähler verwendet werden. Einsparung durch Kreislaufführung von Prozesswasser wurde für 2016 mit ca. 320 m³ und für 2017 mit ca. 380 m³ angegeben. Eine Betriebswasser-Gesamtmenge im Gewerbegebiet Fechenheim Nord/Seckbach konnte im Rahmen der Studie nicht ermittelt werden, es wird jedoch davon ausgegangen, dass das derzeit realisierte Substitutionspotenzial nur einen minimalen Anteil des theoretischen Potenzials darstellt. Auch die Grundwasserentnahmen in Fechenheim deuten nicht auf umfangreiche gewerbliche Nutzung von Grundwasser als Betriebswasser hin. So bestehen nach den Informationen der Oberen Wasserbehörde zur Grundwasserentnahme lediglich zwei Entnahmerechte in Fechenheim, eine für Gartenbau und eine für gewerbliche Nutzung. Die max. Entnahmemenge beträgt jährlich 30 000 m³. Zu Regenwassernutzungen liegen keine flächendeckenden Informationen vor.

Abschätzung der weiteren Trinkwassersubstitution

2017 wurden im Gewerbegebiet Fechenheim Nord/Seckbach insgesamt knapp 740 000 m³ Trinkwasser verbraucht (ebd.). Aus den beantworteten Fragebögen geht beispielhaft hervor, dass – sowohl im verarbeitenden Gewerbe als auch für Unternehmen, deren Trinkwasserverbrauch sich hauptsächlich auf Sanitäreinrichtungen und Reinigungsarbeiten beschränkt – ein hohes Trinkwassersubstitutionspotenzial vorliegt. (Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Trinkwassersubstitutionspotenzials ist in Anhang 5.2.4 beschrieben)

Es wird deutlich, dass sich bisher die kleinen und mittleren Unternehmen nicht systematisch mit ihren Wasserverbräuchen beschäftigt haben; neben Spar- können sich auch Substitutionsmaßnahmen zum nachhaltigeren Wirtschaften anbieten, sofern dies die Eigentums- oder Mietverhältnisse der Gebäude erlauben. Soweit es um Produktionswasser geht, könnten bereits für die jeweilige Branche bestehende Lösungen in Zusammenarbeit mit entsprechenden Anbietern realisiert werden; entsprechend wurden z. T. bereits Kreislaufführungen etabliert. Vermutlich sind diese in vielen Fällen nicht auf die Ressource „Regenwasser“ abzustellen, die derzeit aufgrund des Gebührensplittings bei den Unternehmen ins Visier kommt. Auch für Dienstleistungsunternehmen und wasserextensive Handwerksbetriebe (z. B. Kfz-Werkstätten) ist – soweit das Betriebsgrundstück im Besitz ist – eine selbständige Substitution von Toilettenspülwasser möglich; auch könnte Wasser zur Grünpflege ersetzt werden. Bei den Unternehmen, die bereits zur Substitution beitragen ist das Substitutionspotenzial noch nicht ausgeschöpft; beispielsweise fängt ein Unternehmen nur auf einer Teilfläche den Niederschlag auf, um ihn als Betriebswasser für die Toilettenspülung in einem der Betriebsgebäude zu verwenden. Durch Kooperationen mit benachbarten Unternehmen, könnte dieses Wasser auch von Nachbarbetrieben verwendet werden. Auch in großen Industrie-Unternehmen, in denen die wassersparende Technik in der Produktion bereits weit

fortgeschritten ist, bieten Belegschaftstoiletten weiteres Trinkwassersubstitutionspotenzial.

Es ist möglich, dass die veränderten Regenwassergebühren hier einen Anreiz für das Gewerbe bieten, Regenwasser als Betriebswasser einzusetzen und somit auch die Abwassergebühr zu sparen. Bei einer deutschlandweiten Befragung von Bauunternehmen zum Thema Regenwasserzisternen zeigte sich, dass ein Großteil der Zisternen von privaten Bauherren in Auftrag gegeben wurden; 40 % der Zisternen wurden im Bereich Gewerbe und Industrie eingebaut (Mall GmbH 2018). Da sich Gewerbegebiete häufig durch große Dachflächen bzw. versiegelte Fläche auszeichnen, könnte evtl. sogar an eine Betriebswasser-Versorgung angrenzender Wohngebiete gedacht werden. Das Regenwasseraufkommen auf der Gesamtfläche des Gewerbegebietes beträgt 1.17 Mio. m³/a, das Regenwasseraufkommen von den Dachflächen 412 000 m³/a (Wolf 2019). Für niederschlagsarme Zeiten muss die Möglichkeit einer Nachspeisung der Zisternen aus anderen Betriebswasserquellen gesichert sein. Eine Detailplanung ist im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich, es empfiehlt sich, die Potenziale im Einzelnen zu erheben und – unter Einbezug der Grundstückseigner – ein Konzept zur Betriebswasserversorgung für das Gewerbegebiet Fechenheim Nord/Seckbach und die angrenzenden Gebiete in einer gesonderten Studie zu erarbeiten. Hier muss auch geklärt werden, unter welchen Bedingungen z.B. Betriebswasser aus der Zisterne von einem Unternehmen an seine Nachbarn übergeben oder eine Zisterne gemeinsam genutzt werden kann.

Identifizierte Substitutionspotenziale

Große Unternehmen, die „wasserintensiv“ produzieren, also bei ihrer Tätigkeit viel Wasser verbrauchen, haben oft eine eigene (Betriebs-)Wasserversorgung bzw. Produktionsprozesse, die hinsichtlich des Wasserverbrauchs optimiert sind. Im Jahr 2017 wurden durch die öffentliche Trinkwasserversorgung 3,8 Mio. m³ Trinkwasser an Industrie und Großgewerbe in Frankfurt am Main geliefert (ebd.). Darüber hinaus gibt es auch weitere Wasserversorger, die – wie z.B. InfraserV – andere Unternehmen in Gewerbegebieten (bisher wenn es sich um abgeschlossene Industrieparks handelt) mit Wasser auch unterschiedlicher Qualität beliefern (vgl. Salonen 2010).

Gemäß dem „Räumlich-funktionalen Entwicklungskonzept Gewerbe Frankfurt am Main“ stand im Jahr 2013 in den Gewerbegebietsstandorten in Frankfurt am Main 1504 ha nutzbare Gebäudefläche zur Verfügung. Auf knapp 40 % der Fläche waren Büros und Dienstleistungsunternehmen untergebracht, 13 % der Fläche war ungenutzt. Knapp die Hälfte der Gebäudefläche wurde von Betrieben des verarbeitendem Gewerbes, Logistikgewerbe, Baugewerbe, Großhandel, Kfz-Reparatur, Rechenzentren und Ver- und Entsorgung genutzt (Luipold et al. 2015). In diesen letztgenannten Unternehmen, Gewerbe und Handel, waren in 2017 insgesamt rund 190 000 Personen beschäftigt, davon ca. 50 000 in Teilzeit (ebd.).

Aufgrund der stark abweichenden Tätigkeiten in den unterschiedlichen Unternehmen kann im Rahmen der Studie keine Erhebung und Extrapolation des Substitutionspotenzials auf die Industrie- und Gewerbegebiete in Frankfurt am Main durchgeführt werden. Eine überschlägige Berechnung des Substitutionspotenzials für Belegstoftoiletten auf der Basis der Arbeitsplätze lässt auf ein Trinkwassersubstitutionspotenzial (bei 12 l/(Pers.*d), vgl. Tab. 4 in DIN 1989-1:2002-04: 24, Bürobereich) und 250 Arbeitstagen auf ca. 0,5 Mio. m³/a schließen.

5.2.5. Trink- und Betriebswassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern

Ein- und Zweifamilienhäuser stellen, in Abgrenzung zu Mehrfamilienhäusern, Wohngebäude mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Bewohner*innen unter einem Dach dar. Dieser Gebäudetyp kann im Gegensatz zu anderen Hausformen ausschließlich über den dezentral gesammelten Niederschlag mit Betriebswasser versorgt werden (Schramm et al. 2020). Als Substitutionspotenziale sind insbesondere bei der Gartenbewässerung, aber auch bei den häuslichen Nutzungszwecken Toilettenspülung und Wäschewaschens realisierbar.

Exemplarische Betrachtung

Für die beiden Gebiete „Nördlich der Anne-Frank-Siedlung“ in Eschersheim (Bebauungsplan B451) und „Kalbach-Nord“ (Bebauungsplan B469) existieren baurechtliche Auflagen, die ein Nutzvolumen von 30 bzw. 20 l/m² angeschlossener und waagrecht projizierter Dachfläche vorsehen. In den beiden B-Plänen, die 1997 bzw. 1996 in Kraft traten, wurde seitens der Stadtplanung der Wille zur Umsetzung einer Politik der rationalen Wassernutzung bekräftigt (Warczok 2019: 28f.). Die ausgewählten Quartiere zeichnen sich durch eine gemischte Bebauung mit Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern aus. Abfragen beim Stadtplanungsamt, deren Erkenntnisse durch Begehungen der Untersuchungsgebiete konkretisiert wurden, lassen darauf schließen, dass in B451 insgesamt 960 Menschen leben, davon 315 in Ein- und Zweifamilienhäusern. In B469 leben insgesamt 400 Menschen, davon 106 in den hier fokussierten Gebäudetypen (Näherungen auf dem Stand des Jahres 2017). Alle Wohnhäuser verfügen über zugehörige Grünflächen.

Abschätzung der weiteren Trinkwassersubstitution

Um das Potenzial der Trinkwassersubstitution in den Untersuchungsgebieten „Nördlich der Anne-Frank-Siedlung“ und „Kalbach-Nord“ zu beschreiben, werden Aussagen über den Betriebswasserbedarf der Quartiere, den Regenertrag sowie den Deckungsgrad der beiden genannten Kennwerte getroffen. In der durchgeführten Potenzialanalyse kommt zum personenbezogenen Betriebswasserbedarf aus den Anwendungen Toilettenspülung und evtl. auch Waschmaschinennutzung noch flächenbezogener Betriebswasserbedarf hinzu, der, wenn von Wasser für Reinigungszwecken abgesehen wird, für die Gartenbewässerung verwendet wird (ebd.: 43f.). Der Regenertrag (die theoretisch speicherbare Regenwassermenge in einem definierten Zeitraum unter Zugrundelegung der Niederschlagsdaten der Wetterstation Frankfurt/Main-Westend) ergibt sich nach der

DIN 1989-1 aus der Multiplikation der Dachflächengröße mit der Niederschlagshöhe (ebd.: 44). Der quartiersbezogene Betriebswasserbedarf und der Regenertrag sind für die hier fokussierten Ein- und Zweifamilienhäuser in Tabelle 20 dargestellt; allerdings kalkulierte Warczok (2019) nicht mit den durch aktuellere Messungen bereinigten Ansätzen (vgl. Tabelle 4, Kapitel 2.4), sondern verwendete die in der Literatur üblichen Faustzahlen.

Tabelle 20: Kennzahlen zur Regenwassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern in den Untersuchungsquartieren

| | Betriebswasserbedarf [m³/a] | Regenertrag⁷ [m³/a] |
|---|--|---|
| „Nördlich der Anne-Frank-Siedlung“ (B451) | 5.030 | 3.980 – 4.076 |
| „Kalbach-Nord“ (B469) | 1.793 | 1.745 – 1.754 |

Quelle: Warczok 2019: 57ff.

Tabelle 21 zeigt die Deckungsgrade, die mit einer Regenwassernutzung bei der Substitution von Trinkwasser erreichbar sind, aufgeschlüsselt nach verschiedenen Verwendungszwecken. Der Deckungsgrad „Gesamt“ umfasst dabei die kombinierte Anwendung zur Toilettenspülung, zum Wäschewaschen und zum Bewässern häuslicher Grünflächen. Insbesondere im Quartier „Kalbach-Nord“ ergibt sich für die Ein- und Zweifamilienhäuser ein hoher Deckungsgrad, der selbst bei der kombinierten Anwendung nur zu sehr geringen Trinkwassernachspeisungen führen würde (ebd.).

Tabelle 21: Deckungsgrade der Regenwassernutzung in Ein- und Zweifamilienhäusern aufgeschlüsselt nach spezifischen Anwendungen

| | Deckungsgrad Toilette + Waschmaschine [%] | Deckungsgrad Toilette + Bewässerung [%] | Deckungsgrad Gesamt [%] |
|------|--|--|------------------------------------|
| B451 | ~ 96 | ~ 96 | ~ 80 |
| B469 | ~ 125 | ~ 115 | ~ 97 |

Quelle: Warczok 2019: 57ff.

Die gesonderte Betrachtung der Gebäudetypen Ein- und Zweifamilienhäuser macht deutlich, dass die Regenwassernutzung hier ein deutlich höheres Substitutionspotenzial erlaubt als für die Gesamtquartiere, d. h. unter Einbezug der dort gleichfalls vorhandenen Mehrfamilienhäuser. Für die Gesamtquartiere fallen der erreichbare Deckungsgrad von rund 80 % bzw. rund 97 % auf jeweils rund 50 %. Um möglichst hohe Deckungsgrade zu erreichen, müssen die vorhandene Sammelfläche und das vorhandene Zister-

⁷ Die Spannweite der Werte erklärt sich mit unterschiedlichen Näherungen zur Größe der Sammelfläche; die höchsten Werte werden erzielt, wenn diese aus der maximal angenommenen Dachfläche plus Balkonfläche gebildet wird.

nenvolumen so dimensioniert sein, dass sie die Sammlung einer Menge an Niederschlag ermöglichen, die dem jeweiligen Betriebswasserbedarf angemessen ist. Die über die Satzungen von der Stadt vorgegebenen Parameter von 30 bzw. 20 l/m² Nutzvolumen einer waagrecht projizierter Dachfläche weisen für die Ein- und Zweifamilienhäuser der Untersuchungsgebiete durchaus vertretbare Deckungsgrade auf (wenngleich jener von 80 % in B451 durchaus höher sein könnte); für Mehrfamilienhäuser zeigt sich hingegen, dass der aufgrund der höheren Personenanzahl steigende Betriebswasserbedarf auch bei maximaler Zisternengröße nicht mehr mit dem Regenwasseraufkommen gedeckt werden kann, so dass hier Nachspeisungen aus einer anderen Wasserquelle erforderlich werden (Warczok 2019).

Im Untersuchungsgebiet „Nördlich der Anne-Frank-Siedlung“ konnten sichtbare Hinweise auf die tatsächliche Nutzung von Regenwasser in Form von doppelten Anschlüssen für die Gartenbewässerung bzw. von Schwengelpumpen (zur Förderung von Grundwasser oder Regenwasser aus einem Vorratsbehälter) in Vorgärten identifiziert werden; vergleichbare visuelle Elemente wurden bei Begehungen in „Kalbach-Nord“ nicht vorgefunden. Mit Ausnahme eines Interviews fielen die Bewertungen der Zisternen, deren Einbau verpflichtend war, positiv aus. Die zum Zeitpunkt der Befragung zwischen fünf und 17 Jahre alten Zisternen waren alle nach wie vor in Gebrauch. Am Ausgangszustand wurden jedoch diverse Veränderungen vorgenommen; hier wurde überwiegend der Einbau von Überläufen genannt, die in Reaktion auf Starkregenereignisse und damit verbundene Wasserschäden installiert wurden. Die Zufriedenheit mit den Zisternen hängt nach Aussage der Befragten maßgeblich von der Ergonomie der Nutzung ab. Je mehr diese der Nutzung von Trinkwasser ähnelt, d. h. je geringer die Umstellungen in der Handhabung sind, desto besser fügen sich entsprechende Anlagen in den Alltag ein. Technisierungen der Zisterne, die z. B. bei Extremereignissen deren Überlaufen verhindern, wirken hier erleichternd. Dass die Trinkwassersubstitution, insbesondere zur Gartenbewässerung, grundsätzlich positiv aufgenommen wird, ist darüber hinaus auf ökologische Abwägungen bei den meisten Nutzenden zurückzuführen. Unsicherheit herrscht hingegen bezüglich der Kostenfrage; es fällt den Befragten schwer, die finanziellen Auswirkungen der Regenwassernutzung konkret abzuschätzen. Von kommunaler Seite, die letztlich für die Verpflichtung zum Einbau verantwortlich zeichnet, wünschen sich die Befragten mehr fachliche Unterstützung; generell existiert der Wunsch nach einer Ansprechstelle und einem erhöhten Maß an Betreuung seitens der Stadt (Klein 2019).

Um die tatsächliche Nutzung festzustellen, erfolgten Anfragen bei der Stadtentwässerung Frankfurt am Main zur getrennten Niederschlagsgebühr für Ein- und Zweifamilienhäuser in zwei Quartieren in Frankfurter Norden, in denen eine Zisternennutzung obligatorisch ist (vgl. Schramm et al. 2019). Im einen der beiden Gebiete ergab die Akteneinsicht für 70 (von 150) Reihen- bzw. Ein- und Zweifamilien-Häuser Angaben der Bewohner zur Speichergröße, der Art der Betriebswassernutzung sowie zur jeweiligen Grundstücksgröße. Die Summe der Angaben zum vorhandenen Speichervolumen beträgt 216 m³ (Warczok 2019: 62). Dies entspricht 83 % bzw. 90 % des Potenzials für das Speichervolumen der Reihen- und Ein-/Zweifamilienhäuser, je nachdem ob das

Potenzial mittels Regenertrag oder Angaben des B-Plans mit der Dachfläche inklusive oder exklusive Balkonflächen bestimmt wurde. Die Angaben zum Speichervolumen bezüglich der Abfrage zur getrennten Gebühr variieren von 1 m³ bis 13 m³. 17 % der Befragten gaben dabei eine innerhäusliche Betriebswassernutzung bei Speichervolumen von 2 m³ bis 5 m³ an. In einigen Fällen meldeten die Bewohner*innen der Stadtentwässerung sehr hohe Speichervolumen von 7 m³ bis 13 m³. Warczok (2019: 63) konnte in diesem Gebiet allerdings keinen statistischen Zusammenhang zwischen Grundstücksfläche und dem angegebenen Zisternenspeichervolumen herstellen. Vermutlich haben die Befragten hier z.T. fehlerhafte Angaben zu den Volumina gemacht. Im zweiten Gebiet lieferte die Abfrage der SEF zur getrennten Niederschlagsgebühr Angaben zu 69 % der Gebäude (Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt und SEF 2019). In diesem Gebiet beziehen sich die Angaben allerdings sowohl auf Reihen- und Ein-/Zweifamilienhäuser als auch auf Mehrfamilienhäuser des Quartiers, so dass Warczok (2019: 64) die summierten Angaben zum Zisternenvolumen mit den errechneten Potenzialen für das gesamte Quartier verglich. Auch in diesem Gebiet deckte das Speichervolumen der 69 % der Gebäude des Quartiers bereits 88 % bis 89 % des mittels des Regenertrags errechneten Potenzials ab. Das Speichervolumen des Ist-Zustandes bezogen auf die 69 % der Gebäude übersteigt bereits das im B-Plan mit 20 l/m² projizierter Dachfläche festgesetzte Speichervolumen um 25 %.

Die hier dargestellten Ergebnisse von Warczok (2019) beruhen auf der Datenlage am 15. Januar 2019 und damit noch auf einem unvollständigen Rücklauf der Meldungen zum Gebäuhrensplitting. Im Herbst 2019 wurde daher der Stadtentwässerung vorgeschlagen, aufbauend auf den nun vollständigen Meldungen die Ergebnisse für die beiden Gebiete zu komplettieren; zusätzlich sollte auch in weiteren vergleichbaren Gebieten mit Einfamilienhäusern im Frankfurter Norden die Zisternennutzungen erhoben werden. Aus Kapazitätsgründen konnte die Anfrage von der Gebührenstelle der Stadtentwässerung Frankfurt am Main erst mit deutlicher Verspätung bearbeitet werden, so dass eine Auswertung und Integration der Ergebnisse in die vorliegende Studie nicht mehr möglich war. Unklar ist dahingehend, ob die Nutzung vorhandener Zisternen und damit eine Substitution von Trinkwasser durch Regenwasser tatsächlich so weitgehend stattfindet, wie nach den hier wiedergegebenen Daten zu vermuten ist.

Identifizierte Substitutionspotenziale

Wie bereits dargestellt, zeichnen sich die betrachteten Ein- und Zweifamilienhäuser durch ein für die Regenwassernutzung günstigeres Verhältnis von Sammelfläche (Dachfläche) zu Wasserverbrauch (abhängig von der Zahl der Bewohner*innen) aus. Insofern kann für das Szenario abgeleitet werden, dass für die Versorgung von Ein- und Zweifamiliengebieten dezentral auf Regenwasser zurückgegriffen werden kann und keine Betriebswasserversorgung mit einem öffentlichen Netz aufgebaut zu werden braucht.

Nach dem Statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt am Main existierten 2017 stadtweit 38 755 Ein- und Zweifamilienhäuser. Neben 28 181 Wohneinheiten als Einfamilienhäuser bestanden 21 148 Wohneinheiten in Zweifamilienhäusern (Stadt Frankfurt

am Main 2018: 71). Näherungsweise⁸ lebten 51 853 Einwohner*innen in Einfamilienhäusern und 38 912 Einwohner*innen in Zweifamilienhäusern. Addiert man diese Zahlen, so erhält man als Ergebnis 90 765 Frankfurter*innen, die in den hier betrachteten Gebäudetypen leben, was rund 12 % der Stadtbevölkerung entspricht.

5.2.6. Trink- und Betriebswassernutzung in Wohnhochhäusern

In Frankfurt am Main sind bereits in den 1950er Jahren erste Wohngebäude mit zehn oder mehr Geschossen entstanden. Frankfurt am Main war deutscher Vorreiter auch im Bereich des Baus von Wohnhochhäusern. In den 1960er und 1970er Jahren sind zahlreiche Wohntürme im Stadtgebiet (angefangen zunächst in der Nordweststadt, wenig später auch im Komfortbereich am Sachsenhäuser „Sonnenhügel“) entstanden; seit ungefähr 20 Jahren nimmt das Interesse der Bauherren, Wohntürme zu errichten, wieder zu.

In Wohnhochhäusern sind üblicherweise die Wasserleitungen in Versorgungsschächten zusammengefasst, so dass sie evtl. auch austauschbar sind, ohne flächig in gekachelte Wände der Badezimmer usw. eingreifen zu müssen. Aufgrund der in Wohntürmen zusammengefassten Zahl von Wohneinheiten und Bewohnenden ist z. B. eine Grauwasserbehandlung pro Turm realisierbar, über die Betriebswasser für die Toilettenspülung und evtl. auch weitere häusliche Nutzungen sowie die Grünflächenpflege zur Verfügung gestellt werden kann. Hier kann auch auf Erfahrungen aus dem Bereich der Kreuzfahrtschiffe zurückgegriffen werden.

5.2.7. Trink- und Betriebswassernutzung für öffentliche Grünflächen

In diesem Kapitel wird der Bewässerungsbedarf von Parks, Beeten, Bäumen und Friedhöfen näher betrachtet, die sich auf öffentlichen Flächen befinden bzw. vom Grünflächenamt bewirtschaftet werden. Für die Bewässerung dieser Flächen kommt es häufig zum Einsatz von Trinkwasser; dabei ist der Bewässerungsbedarf stark witterungsbedingt. Bewässerung findet teils durch Mitarbeitende des Grünflächenamtes statt, teils auch durch Subunternehmen.

Exemplarische Betrachtung spezifischer Wasserverbräuche

Da für das Jahr 2017 die Zahlen nicht vorliegen, wird im Folgenden bzgl. der Wasserverbräuche des Grünflächenamtes auf das Jahr 2018 Bezug genommen, wobei es durch extreme Trockenheit zu höheren Trinkwasserverbräuchen für die Bewässerung kam. Stadtweit werden ca. 4000–5000 Jungbäume bewässert, pro Woche und Baum werden 150–200 Liter verwendet (Schmidt 2018). 2018 wurden vom Grünflächenamt insgesamt 167 400 m³ Trinkwasser für die Bewässerung auf Friedhöfen, von Grünflächen und von Bäumen verwendet (Roser 2019). In Tabelle 22 werden Literaturwerte und Frankfurt-

⁸ Ermittelt durch Multiplikation dieser Zahlen mit der 2017 für Frankfurt am Main durchschnittlichen Haushaltsgröße von 1,84.

spezifische Angaben zur Bewässerungspraxis gelistet. Neben Angaben des Grünflächenamtes befinden sich für Vergleichszwecke auch Angaben des Grünflächenmanagement der Goethe-Universität in Tabelle 22.

Tabelle 22: Kennzahlen zur Bewässerung von Grünland, Beeten und Bäumen

| Flächentyp | Quelle | Menge |
|--|---|---|
| Bepflanzte Beete | Goethe-Universität (Anton 2019 fernmündlich) | 400 l/m ² /a ^[1] |
| Bäume, 1–5 Jahre, 250 l pro Baum und Woche | Goethe-Universität (ebd.) | 7.000 l/Baum/a ^[1] |
| Bäume, 1–5 Jahre, 150–200 l pro Baum und Woche | Grünflächenamt (Roser 2019 mündlich) | 1.750 l/Baum/a ^[2] |
| Bewässerung für Grünland – bei leichtem Boden – bei schwerem Boden | Regenwassernutzungsanlagen DIN 1989-1 (DIN 1989-1:2002-04) | 100–200 l/m ² /a 80–150 l/m ² /a |

eigene Zusammenstellung

[1] Im Grünflächenmanagement der Goethe-Universität wird von 30 Berechnungsgaben pro Jahr ausgegangen (Anton 2019 fernmündlich).

[2] Für die Berechnung der Jahresmenge wurde auf Empfehlungen für Liegenschaften der Stadt Frankfurt am Main zurückgegriffen; hier wird von zehn Berechnungsgaben pro Jahr ausgegangen (Amt für Bau und Immobilien 2018b).

Exemplarische Betrachtung: Goethe-Universität

Aufgrund guter Datenverfügbarkeit wird hier nochmals auf die Bewässerungspraxis der Goethe-Universität eingegangen. Eine Extrapolation der Daten für die Bewässerung von halböffentlichen Grünflächen auf das Stadtgebiet war jedoch aufgrund mangelnder Flächendaten, aber auch einer anders motivierten Bewässerungsleistung nicht möglich.

Am Campus Riedberg gibt es neben einem klassischen botanischen Garten und Versuchsflächen, die intensiver bewässert werden, Grünflächen in der Form von Beeten, Wiesen und begrüntem Innenhöfen. Bewässert werden Beete und mehrjährige Pflanzen, die von Bewässerung abhängig sind, wie z. B. neu gepflanzte Bäume. Wiesen werden nicht bewässert. Im Jahr 2017 wurde eine Fläche von 4000 m² über Wasserhydranten bewässert, der Verbrauch belief sich auf 1600 m³ Trinkwasser. Neu gepflanzte Bäume werden in den ersten fünf Jahren mittels Tankwagen bewässert, hierbei werden pro Baum und Woche 250 Liter verbraucht. Dadurch ergaben sich am Riedberg weitere 200 m³ im Jahr 2017, und somit insgesamt 1800 m³. Begrünte Innenhöfe werden über Tropfbewässerung im Sommer 2- bis 3-mal pro Woche beregnet, Verbrauchswerte können hier nicht beziffert werden (Anton 2019 fernmündlich).

Realisierte Trinkwassersubstitution

Seit 1993/94 existieren in der Nähe der Leitung, über die aufbereitetes Mainwasser in den Stadtwald bzw. an den Flughafen und den Golfplatz als Betriebswasser transportiert wird, sog. Betriebswasserzapfstellen (Cichorowski und Rührich 1997). Ein Gespräch am Frankfurter Grünflächenamt (Roser 2019 mündlich) ergab Folgendes zum aktuellen Betriebswassereinsatz für die Bewässerung: Die Brauchwasserzapfstellen

werden vom Grünflächenamt für die Befüllung der Tankwägen für die Baumbewässerung bei entsprechenden Routen herangezogen, im Stadtgebiet gibt es davon derzeit 20. Weiterhin existieren einige Brunnen, die für die Bewässerung von Friedhöfen und Parkanlagen verwendet werden können. Sowohl am Hauptfriedhof als auch am Waldfriedhof in Goldstein wird bereits Trinkwasser für die Grabpflege und Bewässerung substituiert. Die Menge an Betriebswasser, das über die Brauchwasserzapfstellen bezogen wird, an Regenwasser und an Grundwasser, das zur Pflege des Stadtgrüns eingesetzt wurde, kann das Grünflächenamt für die vergangenen Jahre nicht ermitteln, auch weil entsprechende Messeinrichtungen nicht vorhanden sind.

Abschätzung der weiteren Trinkwassersubstitution

Das Trinkwasser-Substitutionspotenzial seitens des Grünflächenamtes in Frankfurt am Main liegt (in einem trockenen Jahr) bei 177 400 m³, dies war der Trinkwasserverbrauch für Bewässerungszwecke 2018. Ungeklärt ist, wie hoch das zusätzliche Trinkwassersubstitutionspotenzial auf Betriebshöfen des Grünflächenamtes ist, z. B. für Reinigungsarbeiten und Toilettenspülung.

Identifizierte Substitutionspotenziale

Die Substitutionsmenge von Trinkwasser für die Bewässerung von Grünflächen im Frankfurter Stadtgebiet konnte lediglich für öffentliche Grünflächen, betrieben durch das Grünflächenamt, ermittelt werden und beträgt dort 177 400 m³. Unklar ist hier, welche Betriebswasserquellen herangezogen werden können.

Für das Substitutionspotenzial bei der Bewässerung von halb-öffentlichen und privaten Flächen können einerseits keine generell gültigen Angaben gemacht werden, da sich Bewässerungspraktiken je nach individuellen Entscheidungen und Bepflanzung unterscheiden. Zudem konnten Flächen des halb-öffentlichen und privaten Grüns im Rahmen dieses Gutachtens nicht ermittelt werden. Das aktuelle BMBF-Vorhaben INTERESS-I erarbeitet diese Daten, so dass eine Extrapolation zukünftig möglich wird.

Dennoch besteht im Bereich der Bewässerung von Außenanlagen und Grünflächen in privatem Besitz ein enorm großes Betriebswasserpotenzial, welches auch zukünftig aufgrund vermehrter Trockenheit ansteigen wird.

5.2.8. Trink- und Betriebswassernutzung in Sporteinrichtungen

Zu den Sportstätten gehören neben eher zentralörtlichen Tennishallen, Hallen- und Freibädern, Eissporthallen und Stadien für Großereignisse mit hohem Publikumsandrang auch Sportplätze und Turn-, Reit- und Mehrzweckhallen (Kuhn et al. 2002). Mit mehr als 235 000 Mitgliedern, die in 420 Vereinen 410 Sportarten ausüben, gilt der Sport als größte Personenvereinigung in Frankfurt am Main.

Eine Reduktion des Verbrauchs an Wasser, aber auch von Energie und anderen Rohstoffen kann in erster Linie bei Sanierungsmaßnahmen bestehender Sportstätten angegangen werden. Ein großer Teil der Sportanlagen wird zukünftig sanierungs- oder er-

weiterungsbedürftig sein; zudem steigt der Bedarf an neu zu errichtenden Sportanlagen. In der Vergangenheit wurden sowohl durch das Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main als auch durch den Landessportbund Hessen die Potenziale an Ressourcen, Schadstoff- und Kosteneinsparung im Sportstättenbereich oft mit Beratungstools wie "Öko-Check im Sportverein" erschlossen; über diesem Tool kann auch die Substitution von Trinkwasser durch Betriebswasser als eine weitere, evtl. umweltentlastende Maßnahme verfolgt werden.

Für die Ermittlung von Substitutionspotenzialen sind verschiedene Sportstätten nach ihrer Trinkwassernutzung zu unterscheiden:

- Bewässerung von Flächen: Für Sportplätze besteht aus unterschiedlichen Gründen ein stark witterungsbedingter Bewässerungsbedarf, der aktuell in Frankfurt am Main wesentlich durch Einsatz von Trinkwasser befriedigt wird.
- Wasser als Medium: Je nach Zweck können Schwimmbäder und Eissportanlagen statt mit Trinkwasser auch aus anderen Wasserquellen bespeist werden, wobei auf die spezifische hygienische Qualität geachtet werden muss.
- Sanitäreinrichtungen: Bei Hallen und Plätzen mit starkem Publikumsandrang (z. B. den Sportstätten, die von den Frankfurter Bundesligavereinen genutzt werden), besteht Potenzial bei der Substitution von Toilettenspülwasser, sofern es nicht zum Einbau wasserloser Urinale kommt.

Weitere Potenziale bestehen auf Sportplätzen, die im Sommer ebenfalls bewässert werden wie Hartplätze (z. B. Tennisanlagen), Reitplätze, aber hinsichtlich von Sanitäreinrichtungen evtl. auch bei Bootshäusern, Schießplätzen und Kegelbahnen.

Exemplarische Betrachtung spezifischer Wasserverbräuche

Viele Sportplätze in Frankfurt am Main werden vom Sportamt bewirtschaftet; aber auch Vereine betreiben teils eigene Sportplätze. Sowohl Rasenplätze als auch Kunstrasen- und Aschenplätze müssen bewässert werden. Über das Sportamt wurden 2017 insgesamt 111 000 m³ Trinkwasser verbraucht (Amt für Bau und Immobilien 2018a). Hierbei handelt es sich aber nicht nur um Bewässerungszwecke, sondern auch um den Wasserverbrauch im Sanitärbereich. Die Beregnungsintensität ist abhängig von der vorherrschenden Temperatur und dem vorhandenen Niederschlagsangebot und variiert. Bei einem Niederschlag zwischen 500 und 700 mm pro Jahr werden gemäß DIN 150 bis 250 l/m² angesetzt (DIN 18035-2:2003-07). Gemäß Empfehlungen der Stadt Frankfurt am Main zur Senkung von Wasserkosten in städtischen Liegenschaften wird von zehn Beregnungsgaben in einem typischen Jahr ausgegangen, zu je 95 m³ für einen Rasenplatz und 75 m³ für einen Hartplatz (Amt für Bau und Immobilien 2018b). Gemäß Angaben des Landessportbundes Hessen wird die Wassermenge für die Befeuchtung von Kunstrasenplätzen auf ca. 3,5 m³ pro Beregnungsgang geschätzt, dies ist abhängig von der Art des Kunstrasens, insbesondere der Menge des Materials, das befeuchtet werden muss und dauert ca. 3 bis 5 Minuten (Prüller 2020 fernmündlich, 2018 fernmündlich), die Beregnungshäufigkeit ist stark von Niederschlag und Temperaturen abhängig. Je nach Nutzung des Platzes wird in Hitzeperioden 3-5 mal täglich

berechnet. Bleibt natürlicher Niederschlag weitestgehend aus, kann von April bis September von täglicher Beregnung ausgegangen werden.

Beim Kunstrasen ist es nicht erforderlich, die Vegetation mit derartigen Wasserspenden zu erhalten (vgl. Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main 2021). Gemäß Prüller (2020 fernmündlich) sind in Frankfurts Kunstrasenplätzen keine Beregnungsanlagen eingebaut, obwohl dies sinnvoll wäre, da Beispielbarkeit und Materiallebensdauer dadurch verbessert werden. Für den Spielbetrieb werden die Kunstrasenplätze in Frankfurt am Main beregnet; für die Bewässerung der Kunstrasenplätze lässt sich ein Wasserverbrauch von jährlich ca. 1260 m³ auf der Basis der genannten Zahlen abschätzen (ebd.).

Rasen-Sportplätze der Goethe-Universität (Beispiel: Sportcampus Ginnheim) werden ca. 30 Wochen lang bewässert, mit jeweils 20 Liter pro m². Hier ergab sich über die Sommermonate 2017 ein Gesamtverbrauch von ca. 6300 m³ für Sportplatz (8000 m²) und Wurffeld (6000 m²) (Anton 2019 fernmündlich).

Tabelle 23: Bewässerung von Sportplätzen, eigene Berechnungen gemäß Expertenangaben und Literaturwerten

| Flächentyp | Quelle | Menge |
|-------------------------|---|--|
| Sportplätze, Rasen | Stadt Frankfurt am Main (Amt für Bau und Immobilien 2018b) | 950 m ³ /Platz/a |
| | Goethe-Universität (Anton 2019 fernmündlich) | 3.000 m ³ /Platz/a |
| | (DIN 18035-2:2003-07) | 150–250 l/m ² /a |
| Sportplätze, Kunstrasen | Hessischer Landessportbund (Prüller 2020 fernmündlich) | 1.260 m ³ /Platz/a ^[1] |
| Sportplätze, Hartplatz | Stadt Frankfurt am Main (ebd.) | 750 m ³ /Platz/a |
| Stadien und Rennbahnen | (DVGW 2008) | 50–80 l/m ² /a |

[1] Berechnung unter der Annahme, dass 2 Monate im Jahr aufgrund hoher Temperaturen viermal täglich beregnet wird, und weitere 4 Monate im Jahr aufgrund mangelnden Niederschlags einmal täglich beregnet wird; pro Beregnungsgang (3–5 Minuten) werden 3,5 m³ benötigt.

Als weiterer großer Trinkwasserverbraucher ist die Eissporthalle Am Bornheimer Hang zu erwähnen, die ebenfalls vom Sportamt betrieben wird. Auch haben die Frankfurter Frei- und Hallenbäder einen hohen Wasserverbrauch.

Bestehende Substitutionen

Nach Angaben des Sportamtes Frankfurt am Main werden auch Regenwasserzisternen für die Bewässerung von Rasen-Sportplätzen eingesetzt. Angaben über Wassermengen können nicht gemacht werden. In der Commerzbank Arena wird für Bewässerung und Toilettenspülung ebenfalls Regenwasser verwendet. Einsparungen belaufen sich jährlich auf ca. 6000 m³ (Stadion Frankfurt Management GmbH o. J.).

Wo anstelle von Trinkwasser andere Wasserarten verwendet werden, ist das nach Ansicht des Landessportbundes Hessen häufig auch Brunnenwasser (Prüller 2018 fernmündlich).

Für die Bewässerung der Sportplätze des Sportcampus Ginnheim wird Betriebswasser aus einer Brunnenanlage verwendet; 2017 wurden 7 653 m³ entnommen, bei einer maximalen Entnahmemenge von 10 000 m³ (Fleege 2019). Der Schwedlersee im Frankfurter Osthafen, seit 1920 ein Privatbad des Ersten Frankfurter Schwimmclubs 1891, wird durch Grundwasser gespeist.

Identifizierte Substitutionspotenziale

Im Aufgabenbereich des Sportamtes Frankfurt am Main gab es 2019 insgesamt ca. 119 Sportplätze, es komme hier durch andere Nutzungen zu Schwankungen (Benthien 2019 fernmündlich), weshalb diese Zahl nur unter Vorbehalt verwendet werden kann. Von diesen ca. 119 Sportplätzen sind 44 Kunstrasenplätze, die mit Trinkwasser bewässert werden, weitere 15 Sportplätze sind Aschenplätze, die erdfeucht gehalten werden müssen. Bei der Kunstrasenpflege war das Potenzial der Trinkwassersubstitution umstritten (vgl. aber Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main, 2021, wo die einschlägige DIN 18035-2 besonders betont wird). Nach Ansicht des Sportamtes kann der Einsatz von Regenwasser problematisch sein; es wird darauf verwiesen, dass bei Kunstrasen ein Veralgungsproblem besteht, wenn mit Regenwasser aus Zisternen bewässert wird (ebd.). Nach Ansicht des Landessportbunds Hessen ist hingegen eine Beregnung mit Betriebswasser prinzipiell möglich (Prüller 2018 fernmündlich); allerdings kann bei Nutzung von gespeichertem Regenwasser dessen mögliche Verkeimung (Pseudomonaden, Legionellen) in Kombination mit der Aerosolbildung bei der Bewässerung und eine Aufnahme der Bakterien über die Atemwege zu einem Gesundheitsrisiko für die Beschäftigten und Spieler führen. Einzelne Sportplätze, z.B. der Sportplatz Goldstein im Einzugsbereich der Betriebswasserleitung von Niederrad in den Stadtwald, könnten auch ihre Kunstrasenflächen mit Betriebswasser aus Mainwasser-Herkunft bewässern.

Für Schwimmbäder könnte insbesondere für einige Freibäder das Potenzial bestehen, anstelle von Trinkwasser Grundwasser (z.B. im Riedbad Bergen-Enkheim oder im Brentanobad) einzusetzen. Hier sind jedoch zunächst mit dem Gesundheitsamt evtl. hygienische Bedenken zu klären. Daher wurden hier keine Substitutionspotenziale ermittelt.

In Frankfurt am Main gibt es ca. 60 Rasenplätze, 15 Hartplätze und 44 Sportplätze mit Kunstrasen (Benthien 2019 fernmündlich), weitere Kunstrasenplätze sind in Planung. Kunstrasenplätze in Frankfurt am Main verfügen nicht über fest installierte Beregnungsanlagen (Prüller 2020 fernmündlich), die Beregnungspraxis ist unklar. Darüber hinaus ist die Eissporthalle ein wichtiger Wasserverbraucher.

Für die Berechnungen in Tabelle 24 wird von zehn Beregnungsgaben pro Jahr ausgegangen, dies entspricht Angaben zur Senkung der Wasserkosten in öffentlichen Ge-

bäuden der Stadt Frankfurt am Main (Amt für Bau und Immobilien 2018b). Rein rechnerisch ergibt sich so für die Bewässerung von Rasen-, Kunstrasen und Aschenplätzen, die vom Sportamt betrieben werden, eine Gesamtsumme von jährlich 123 690 m³.

Tabelle 24: Eigene Berechnungen des Bewässerungsbedarfs von Sportplätzen mit Hilfe von Kenngrößen

| Art der Sportplätze, die vom Sportamt betrieben werden | Anzahl Plätze | Bewässerungswasser m ³ /a pro Platz | Gesamtverbrauch m ³ /a |
|--|---------------|--|-----------------------------------|
| Rasenplätze | 60 | 950 | 57.000 |
| Kunstrasenplätze | 44 | 1.260 | 55.440 |
| Aschenplätze | 15 | 750 | 11.250 |
| Summe | | | 123.690 |

Gemäß der Auswertung der Wasserverbräuche belief sich der Gesamtwasserverbrauch für Sportplatz-Außenanlagen des Sportamtes im Jahr 2017 auf 111 000 m³ (Amt für Bau und Immobilien 2018a), wobei nicht abschließend geklärt werden konnte, ob es sich bei diesem Wert um eine vollständige Erhebung handelt. Aufgrund der Dusch- und Kantineneinrichtungen kann keinesfalls der gesamte Trinkwasserverbrauch durch andere Wasserarten substituiert werden.

Angesichts der Bedenken gegen eine Bewässerung von Kunstrasen mit Regenwasser, das in Zisternen gesammelt wird (Prüller 2018 fernmündlich), bietet es sich an, das Regenwasser vor der Nutzung nochmals zu hygienisieren (Simperler et al. 2018; DIN 18035-2:2003-07; Stadtentwicklung Berlin o. J.). Die Hessische Bereitschaftspolizei bewässert ihren Kunstrasenplatz in Mülheim am Main mit Regenwasser, auch der Kunstrasen in der Commerzbank Arena wird mit Regenwasser bewässert (Klapproth 2017). Zudem wird zur Bewässerung von Kunstrasen oftmals auch Brunnenwasser eingesetzt.

Als weiteres Substitutionspotenzial ist auf die Eissporthalle zu verweisen, der Trinkwasserverbrauch betrug im Jahr 2017 21 000 m³ (Amt für Bau und Immobilien 2018a).

Sportentwicklung in Frankfurt am Main

Gemäß der Magistratsvorlage zur Sportentwicklung aus dem Jahr 2017 sollten in den nächsten fünf Jahren 27 Mio. EUR investiert werden, um auf jeder städtischen Sportanlage einen Kunstrasenplatz zu bauen (Magistrat der Stadt Frankfurt a. M. 2017). Die Magistratsvorlage zur Sportentwicklung aus dem Jahr 2019 bestätigt die Fertigstellung weiterer vier Kunstrasenplätze (Magistrat der Stadt Frankfurt a. M. 2019).

Weitere Potenziale, die im Rahmen dieser Studie nicht genauer betrachtet wurden, sind z. B. die Umstellung von privat betriebenen Sportanlagen mit Publikumsverkehr (z. B. PSD Bank Arena „Stadion am Bornheimer Hang“ oder das Stadion am Brentanobad) für die Toilettenspülung oder Schwimmbäder.

5.3. Schlussfolgerung

Als Oberzentrum übernimmt Frankfurt am Main über die Versorgung der eigenen Bevölkerung hinaus überörtliche Funktionen (z. B. Universität, Zoo, Messe, Flughafen) für die Bevölkerung des Umlandes, anderer Kommunen in Hessen und bundesweit. Mit der Bereitstellung dieser zentralörtlichen Funktionen ist auch eine teilweise überdurchschnittlich hohe Nachfrage nach Trinkwasser verbunden.

Um belastbare Aussagen zur Trinkwassersubstitution zu generieren, wurden die exemplarischen Quartiere, das in Planung befindliche Neubaugebiet Günthersburghöfe und das Bestandsgebiet Heimatsiedlung ausgewählt, die es erlauben, Aussagen zur Trinkwassersubstitution und dem damit einhergehenden ökologischen Fußabdruck bei der Nutzung von Betriebswasser in Verbindung mit sozioökonomischen Auswirkungen einer Betriebswassernutzung auf andere Gebiete in Frankfurt am Main zu extrapolieren. Die stark differenzierte Ausgestaltung der beiden Quartiere bietet zudem zusätzlich die Möglichkeit, dass die Ergebnisse in hoher Detailtiefe auf andere Standorte in Frankfurt am Main übertragbar sind.

Ca. ein Drittel des Trinkwasserverbrauchs der Stadt Frankfurt am Main entfällt auf die in der Stadt ansässigen Industrie-, Handel- und Gewerbebetriebe. Unter dem Begriff Industrie, Handel und Gewerbe zählen auch in Abhängigkeit vom Verbrauch weitere zentralörtliche Funktionen wie z.B. Krankenhäuser, Schwimmbäder, die öffentliche Verwaltung und öffentliche Bildungseinrichtungen. Exemplarisch erfolgte im Rahmen der Studie eine Dokumentation der dortigen Betriebswassernutzungen z.B. zur Gebäudekühlung, zur Bewässerung, der Reinigung und im sanitären Bereich. Erkennbar ist, dass in der Stadt Frankfurt am Main, die Substitution von Trinkwasser eine lange Tradition hat und sektorabhängig stark variiert. Abschätzungen des Trinkwassersubstitutionspotenzials weisen auch innerhalb eines Clusters starke Abweichungen auf.

Um das tatsächliche Trinkwassersubstitutionspotenzial der Bürger*innen der Stadt Frankfurt am Main abschätzen zu können, wurden Untersuchungen möglicher Betriebswasserpotenziale an verschiedenen Gebäudetypen (Ein- und Zweifamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Wohnhochhäusern) vorgenommen. Exemplarische Abschätzungen des Potenzials einer Regenwassernutzung wurden auf Grundlage eigener Erhebungen in Eschersheim und Kalbach Nord durchgeführt. Deutlich wird bei den Erhebungen, dass eine Regenwassernutzung bei Ein- und Zweifamilienhäuser ein deutlich höheres Substitutionspotenzial erlaubt als bei Mehrfamilienhäusern. Die jährliche Niederschlagshöhe, in Verbindung mit der vorhandenen Dachfläche bei Mehrfamilienhäusern reicht auch bei maximaler Zisternengröße nicht aus, um den erforderlichen Betriebswasserbedarf bei höheren Personenzahlen abzudecken. Zu berücksichtigen ist bei Überlegungen zum Ausbau der Regenwassernutzung, dass sich ohne die Einführung einer zentral gesteuerten Nachspeiseeinrichtung für Trinkwasser das Verhältnis zwischen Grund- und Spitzenlast in der Trinkwasserversorgung in regenlosen Hitzeperioden gegenüber heute vergrößern kann.

Im Rahmen einer Erhebung des Bewässerungsbedarfs für öffentliche Grünflächen und Sportanlagen erfolgte der Versuch einer Abschätzung des Trinkwassersubstitutionspotenzials. Allgemeingültige Angaben zur Bewässerung von privaten und halböffentlichen Grünflächen konnten nicht abgeleitet werden, da die Bewässerungspraktiken von der Bepflanzung und der individuellen Entscheidung unmittelbar abhängig sind. Bei Sportflächen besteht zum größten Teil nicht die Möglichkeit, das abgenommene Trinkwasser den Bereichen Bewässerung, Reinigung und sanitäre Nutzung eindeutig zuzuordnen. Auch hier variieren die Abnahmemengen zur Bewässerung erheblich und sind unmittelbar vom Betreiber, der Ausstattung des Platzes (Hart-, Kunst- und Naturrasen) und dem Spielbetrieb abhängig.

6. Wirkungsabschätzungen für die betrachteten Alternativen in den Quartieren

6.1. Sozio-ökonomische Analyse

6.1.1. Zielstellung

Ziel der sozio-ökonomischen Analyse ist die Ermittlung und der Vergleich der Investitionen, der kalkulatorischen Abschreibungen und der Betriebskosten ausgewählter siedlungswasserwirtschaftlicher Varianten für die beiden Quartiere Günthersburghöfe und Heimatsiedlung. Zudem sollen die akteursbezogenen Kosten für die öffentlichen und privaten Akteure ermittelt werden. Die betrachteten Varianten umfassen neben der konventionellen Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung als Referenzsystem das vorhandene Wasserdargebot und zum einen die Betriebswasserversorgung aus Mainwasser sowie zum anderen die Betriebswasserversorgung durch Wiederverwendung von Grauwasser. Varianten zur Gewinnung von Betriebswasser aus Regenwasser oder Grundwasser wurden aus unterschiedlichen Gründen nicht mit einbezogen. Insbesondere im Quartier Günthersburghöfe reicht die potenziell nutzbare Regenmenge aufgrund vergleichsweise hoher Geschossflächenzahlen und damit der relativ kleinen Dach- bzw. Sammelflächen zur geplanten Einwohnerdichte nicht aus, um eine uneingeschränkte Betriebswasserversorgung zu ermöglichen (vgl. Kapitel 5.1). Grundwasser steht aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse in den Günthersburghöfen nicht und in der Heimatsiedlung vermutlich nicht in der erforderlichen Menge zur Verfügung. (vgl. Kapitel 3.3 und 5.1). Die sozio-ökonomische Analyse der betrachteten Varianten zur Betriebswasserversorgung ermöglicht letztendlich die Identifikation kostengünstiger Wasserinfrastrukturvarianten sowie die Analyse der Gründe etwaiger Mehr- oder Minderkosten.

6.1.2. Übersicht über Rahmenbedingungen und Eingangswerte der Kostenanalyse

Quartiers- und Verbrauchskenngrößen

Die für die Kostenanalyse relevanten Kenngrößen der betrachteten Quartiere Günthersburghöfe und Heimatsiedlung im Hinblick auf Siedlungsstruktur und Wasserbedarf können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 25: Kenngrößen der Quartiere Günthersburghöfe und Heimatsiedlung

| Position | Günthersburghöfe | Heimatsiedlung |
|--|------------------|----------------|
| Einwohner | 3.239 | 2.098 |
| Wohneinheiten | 1.510 | 992 |
| Trinkwasserbedarf gesamt [L/(EW*d)] | 118 | 118 |
| Trinkwasserbedarf gesamt [m³/a] | 139.500 | 90.360 |
| Betriebswasserbedarf für Toilette sowie Reinigung und Bewässerung [L/(EW*d)] | 39 | 39 |
| Betriebswasserbedarf für Toilette sowie Reinigung und Bewässerung [m³/a] | 46.100 | 29.900 |
| Grauwasseranfall Körperpflege [L/(EW*d)] | 47,2 | 47,2 |
| Grauwasseranfall Körperpflege [m³/a] | 55.800 | 36.140 |

Technische Angaben zur Infrastruktur

Die drei je Quartier untersuchten Varianten umfassen (1) die konventionelle Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung (Referenzsystem), (2) die Betriebswasserversorgung aus Mainwasser und (3) die Betriebswasserversorgung durch Wiederverwendung von Grauwasser. Das Referenzsystem beinhaltet den Anschluss an das konventionelle Wasserver- und -entsorgungssystem einschließlich benötigter Installationen für Trink- und Schmutzwasser zum Zweck der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung (vgl. Abbildung 8).

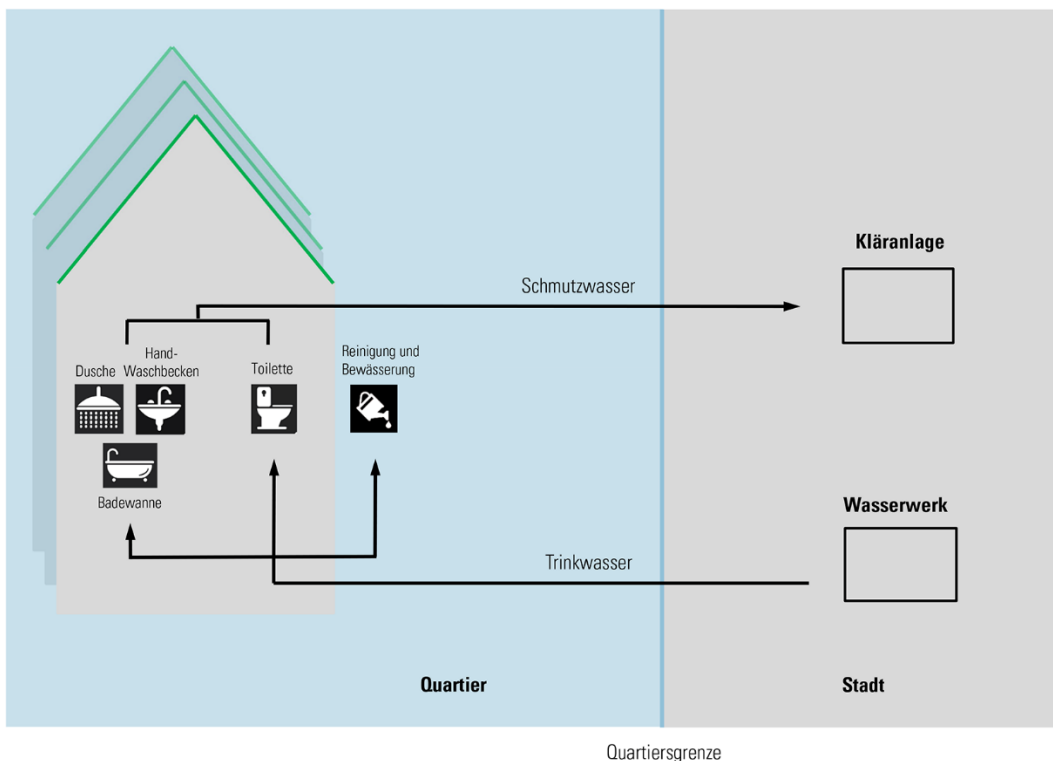


Abbildung 8: Systemskizze des Referenzsystems der konventionellen Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung

Die Variante zur Betriebswasserversorgung aus aufbereitetem Mainwasser umfasst den Anschluss an Trink- und Betriebswasserleitungen sowie das bestehende Abwasserentsorgungssystem einschließlich benötigter Installationen für Trink- und Schmutzwasser mit zusätzlicher Betriebswasserleitung zum Zweck der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung (vgl. Abbildung 9).

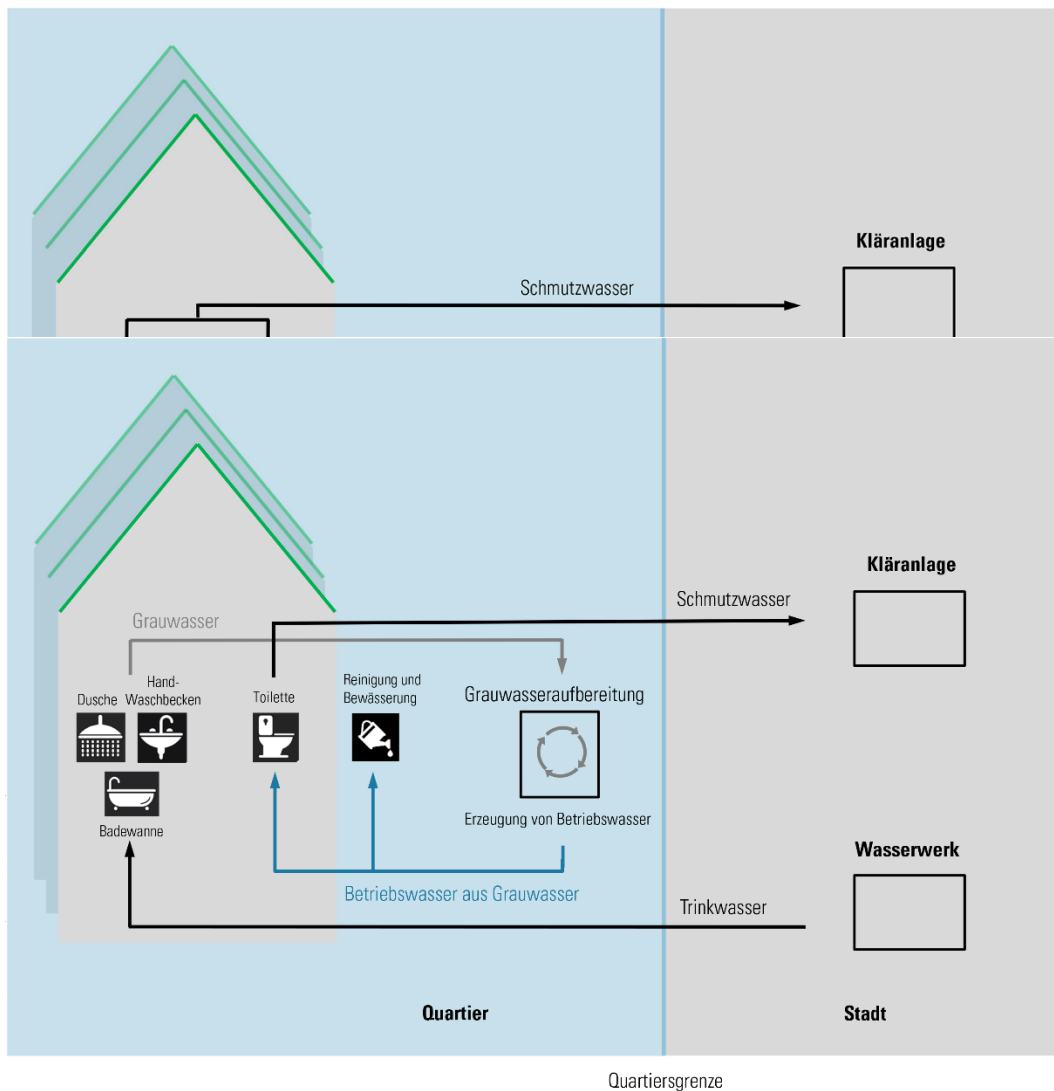


Abbildung 10). Die Grauwasserableitung erfolgt an Bad/Dusche und Handwaschbecken und ersetzt dort Schmutzwasserleitungen. Sonstiges Schmutzwasser (insbesondere aus Toiletten) wird konventionell entsorgt.

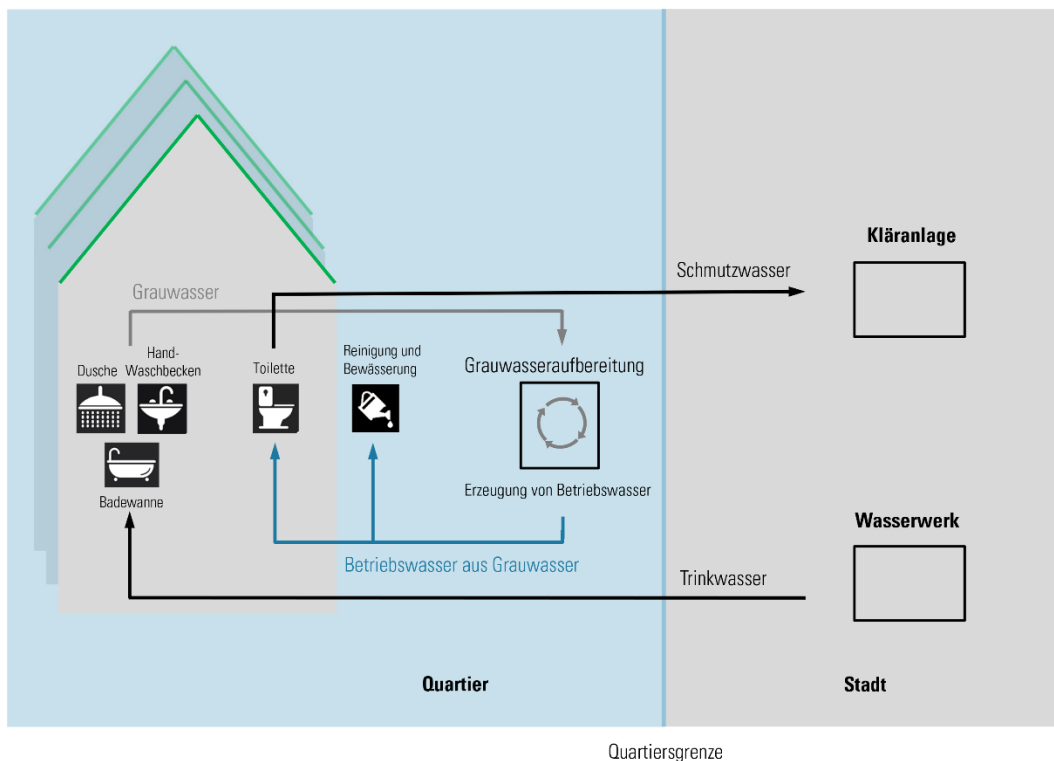


Abbildung 10: Systemskizze der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“

Technische Angaben zu den Quartieren

Zur Versorgung mit Trink- und Betriebswasser sind in den Günthersburghöfe bedingt durch die Gebäudehöhen separate Druckerhöhungsanlagen (DEA) erforderlich.

Übergabestellen zwischen öffentlichem und privatem Bereich

- Übergabestelle für Trink- und Betriebswasser: Wasserzähler
- Übergabestelle für Schmutz-/Grauwasser: Grundstücksgrenze

Ökonomische Grundlagen zur Kostenkalkulation

Ökonomische Grundlagen zur Kostenkalkulation einschließlich Preise, Gebühren und durchschnittlichen Nutzungsdauern können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 26: Ökonomische Grundlagen zur Kostenkalkulation

| Position | Wert | Anmerkung |
|---|--------|--|
| Trinkwasserpreis [EUR/m ³] | 1,79 | Nettopreis (brutto: 1,92 EUR, einschl. 7 % USt) |
| Betriebswasserpreis Mainwasser-aufbereitungsanlage (MWA) [EUR/m ³] | 0,53 | Nettopreis am Ausgang der MWA |
| Abwassergebühr [EUR/m ³] | 1,45 | Brutto = netto |
| Strompreis [EUR/kWh] (Gewerbekunden) | 0,21 | Nettopreis (ohne 19 % USt) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (größer DN 200) | 3,33 % | 30 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Transportleitung MWA, anteilig | 2,50 % | 40 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Druckerhöhung für Transportleitung MWA, anteilig | 5,56 % | 18 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Aufbereitungsanlagen | 5,00 % | 20 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | 5,56 % | 18 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Jährlicher Kalkulationszins | 3,00 % | Durchschnittlicher jährlicher Kalkulationszins bezogen auf Investitionen und durchschnittliche Nutzungsdauer |

Stand 2019

In der Kostenanalyse sind in Bezug auf Investitionen und Betriebskosten ausschließlich Nettopreise berücksichtigt worden. Dadurch ist die Vergleichbarkeit aller betrachteten Varianten gegeben. Beim angesetzten Strompreis wurden 19 % Umsatzsteuer abgezogen, d. h. weitere Abzüge (wie z. B. Stromsteuer, EEG-Umlage) wurden nicht vorgenommen. Die in den Abschnitten 6.1.4 ff. dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf Nettopreise, d. h. ein Vergleich auf Basis von Bruttopreisen ergäbe zwar nominell entsprechend andere Kosten und Kostendifferenzen zwischen den Vergleichsalternativen, beträfe jedoch nicht das Verhältnis der Ergebnisse zueinander.

6.1.3. Vorgehensweise

Die Systemgrenzen der betrachteten Varianten umfassen die Gewinnung, Aufbereitung und den Transport von Trink- bzw. Betriebswasser zum Zweck der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung in dem jeweiligen Quartier einschließlich Abwasserbeseitigung. Darüber hinaus sind die je nach Variante und Quartier benötigten Rohrleitungen für Trink-, Betriebs-, Schmutz- oder Grauwasser im öffentlichen und privaten Bereich (einschließlich Gebäude) berücksichtigt worden.

Kostenvergleichsrechnung

Zum Vergleich der Investitionsalternativen wurde die Methode der Kostenvergleichsrechnung als statisches Verfahren der Investitionsrechnung gewählt (vgl. z.B. Becker 2018). In Bezug auf die betrachteten Wasserinfrastrukturvarianten für die beiden Quartiere wurden dazu jeweils die Investitionen und die jährlichen Kosten in Form von Jahreskosten ermittelt. Das Verfahren ermöglicht so den direkten Vergleich der Varianten untereinander, wobei die Variante mit den geringsten Jahreskosten als die wirtschaftlich vorteilhafteste erachtet werden kann. Von einer dynamischen Investitionsrechnung wurde aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit und des erhöhten Rechenaufwands abgesehen.

$$K_{gesamt} = K_f + k_v \cdot x + \underbrace{\frac{I_0 - L_T}{n}}_{\text{kalk. Abschreibungen}} + \underbrace{\frac{I_0 + L_T}{2} \cdot i}_{\text{kalk. Zinsen}}$$

| | |
|--------------------|---|
| mit K_{gesamt} : | Gesamtkosten bzw. Jahreskosten |
| K_f : | Gesamte Fixkosten (Anteil Betriebskosten) |
| k_v : | Durchschnittliche variable Stückkosten |
| x : | Durchschnittliche Menge |
| I_0 : | Anfangsinvestitionen |
| L_T : | Restwert am Ende der Nutzungsdauer |
| n : | Durchschnittliche Nutzungsdauer |
| i : | Kalkulationszins |

Die Jahreskostenberechnung umfasst kalkulatorische Abschreibungen, wobei bei der Nutzungsdauer nach Rohrleitungen und Anlagentechnik unterschieden wurde, Betriebskosten (u. a. für Wasseraufbereitung, Wassertransport), jährliche Kalkulationszinsen sowie eventuelle wasserbezogenen Einsparungen. Dabei wurde ein durchschnittlicher jährlicher Kalkulationszins i von 3 % bezogen auf Investitionen und durchschnittliche Nutzungsdauern angesetzt. Restwerte zum Ende der Nutzungsdauer L_T wurden grundsätzlich mit Null kalkuliert.

Planungskosten zur Anbindung der Gebäude an die öffentliche Infrastruktur, für die Errichtung einer Grauwassernutzungsanlage oder für die Gebäudeinfrastruktur wurden in die Berechnung nicht mit aufgenommen. Planungskosten fallen bei allen betrachteten Varianten an und haben in Anbetracht der gewählten Nutzungsdauer der Systeme keinen gravierenden Einfluss auf die Jahreskosten. Ferner wurden etwaige kalkulatorische Gewinne bei den Varianten zur Betriebswasserversorgung nicht berücksichtigt, auch wenn diese im Falle des konventionellen Systems in Trinkwasserpreis und Abwassergebühr enthalten sein können, da diesbezüglich keine fundierten Annahmen hätten getroffen werden können.

Die durch zusätzliche Installationen erhöhten Investitionen und Kosten der Vergleichsvarianten wurden als Mehrkosten gegenüber dem konventionellen System (Referenzsystem) dargestellt. Hierzu gehören insbesondere zusätzlich Leitungen für Betriebs- und Grauwasser im Quartier, Transportleitungen für Betriebswasser aus Mainwasser von der Mainwasseraufbereitungsanlage zum Quartier und spezifische Wasseraufbereitungskosten für Mainwasser und Grauwasser. Kosteneinsparungen gegenüber dem

Referenzsystem wurden gegengerechnet. Diese umfassen insbesondere variable Kosten die sich aus einer Trinkwassereinsparungen durch die Nutzung von Betriebswasser und ggf. einer reduzierten Abwassereinleitungen ergeben können. Die Jahreskosten und Jahresmehrkosten wurden schließlich in spezifische Kosten umgerechnet, indem sie auf Wohneinheiten, Einwohner und Kubikmeter Wasser bezogen wurden.

Kosten für Gewinnung, Behandlung und Transport von Wasser

Zur Berücksichtigung der Kosten für die Gewinnung, Aufbereitung und den Transport von Trinkwasser auf der einen Seite und Abwasser auf der anderen Seite wurde der ortsübliche verbrauchsabhängige Trinkwasserpreis und die Abwassergebühr herangezogen. In Bezug auf verbrauchsunabhängige Grundgebühren wurde die Annahme getroffen, dass diese bei den Betriebswasservarianten identisch sind. Analog wurde bei Einsparung bezüglich Trinkwasser und Abwasser verfahren. Im Fall der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser wurden neben den Entstehungskosten zusätzlich Investitionen und Betriebskosten für eine Transportleitung von der Mainwasseraufbereitungsanlage (MWA) in Frankfurt-Niederrad in die jeweiligen Quartiere einbezogen.

Hinsichtlich der Betriebswasserversorgung aus Grauwasser wurden Investitionen und Betriebskosten für eine semizentrale Grauwasserwiederverwendungsanlage (Tolksdorf et al. 2019) im jeweiligen Quartier einkalkuliert. Dabei handelt es sich um eine Membran-Bioreaktor-Anlage (MBR, vgl. Kapitel 3.5). Die Berechnung erfolgte auf Basis von Angaben zu Einwohner-spezifischen Kosten dieser Anlage. In Bezug auf die Betriebskosten sind die Literaturwerte zu Schlammmentsorgung und Strom an die örtlichen Gegebenheiten angepasst worden. So sind zum einen die spezifischen Kosten der Schlammmentsorgung von 1,00 EUR auf 0,30 EUR pro Einwohner und Jahr reduziert worden. Dies ist dadurch begründet, dass die herangezogene Vergleichsanlage (Tolksdorf et al. 2019) analog zum Grauwasser- mit einem Schwarzwassermodul ausgestattet ist, dessen Kosten auf diese Weise herausgerechnet wurden. Zum anderen sind die Stromkosten von 1,00 EUR auf 6,93 EUR pro Einwohner und Jahr erhöht worden, um ortsübliche Stromkosten abzubilden und den Parameter mit der Ökobilanzierung abzugleichen (vgl. Tabelle 55 bis Tabelle 57 in Anhang 6.1.2 und Tabelle 67 bis Tabelle 69 in Anhang 6.1.3). Da sich die herangezogene Vergleichsanlage in China befindet, waren entsprechende Anpassung im Sinne der Übertragbarkeit erforderlich.

Für die Betriebswassertransportleitung von der MWA in das jeweilige Quartier und die Rohrleitungen für die Wasserver- und -entsorgung im öffentlichen und privaten Bereich (einschließlich Gebäude) der Quartiere wurden hinsichtlich der Investitionen Kennwerte aus der Vorplanung (u. a. Rohrleitungslängen, Anlagenteile), Einheitspreise für urbane Bauverhältnisse nach Erfahrungswerten und sonstige Planungsgrundlagen aus der Literatur berücksichtigt (Hamburg Wasser 2016). Angesetzte Kosten, für die keine Erfahrungswerte abgeleitet werden konnten, wurden abgeschätzt und sind entsprechend kenntlich gemacht.

Übergabestellen zwischen öffentlichem und privatem Bereich

Zur Ermittlung der Leitungslängen und Kosten sind Übergabestellen für Trink-, Betriebs-, Schmutz- und Grauwasser zwischen öffentlichem und privatem Bereich definiert worden (vgl. Abbildung 11). Für Trink- und Betriebswasser entspricht die Übergabestelle formal der Hauptabsperreinrichtung und de facto dem Wasserzähler. Für die Kostenbetrachtung wurde der Wasserzähler der Gebäudegrenze zugeordnet. Im Falle des Schmutz- und Grauwassers besteht zwischen dem Anschlussnehmer (Verursacher des Abwassers) und dem Betreiber der öffentlichen Abwasserbeseitigungsanlage die Möglichkeit, als Übergabestelle sowohl Bauwerke (z.B. Übergabeschacht) als auch rechtliche Regelungen zu definieren. Zur überschlägigen Berechnung der anfallenden Kosten wird im vorliegenden Falle die Grundstücksgrenze als Übergabestelle angesehen. In den anschließenden Kostenbetrachtungen wurden abgesehen davon Zählergebühren nicht berücksichtigt, da angenommen wurde, dass neben dem konventionellen System auch bei den betrachteten Betriebswasservarianten Wasserzähler zur Gebührenabrechnung in den Gebäuden eingesetzt werden. Es kann hierbei davon ausgegangen werden, dass die Kosten nicht grundlegend voneinander abweichen.

Die Übergabestelle bestimmt so auch den Verantwortungsbereich der öffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung und damit den Geltungsbereich des Trinkwasserpreises und der Abwassergebühr. Im Fall der Mainwasservariante setzen sich die Gesamtjahreskosten (s.o.) der Betriebswasserversorgung entsprechend aus den Kosten für Betriebswasser bezogen auf den Ausgang der Mainwasseraufbereitungsanlage (ermittelt über den dazu gehörigen Betriebswasserpreis), den Jahreskosten des Betriebswassertransports zum Quartier sowie den Jahreskosten der Anschlussleitungen im öffentlichen Bereich des Quartiers zusammen. Die Gesamtjahreskosten der Grauwasservariante zur Betriebswasserversorgung bestehen aus den Jahreskosten der Grauwasseraufbereitung sowie der Anschlussleitungen im öffentlichen Bereich des Quartiers. Die jeweiligen Jahressystemkosten aller Varianten umfassen darüber hinaus noch die Jahreskosten der privaten Gebäudeinstallationen.

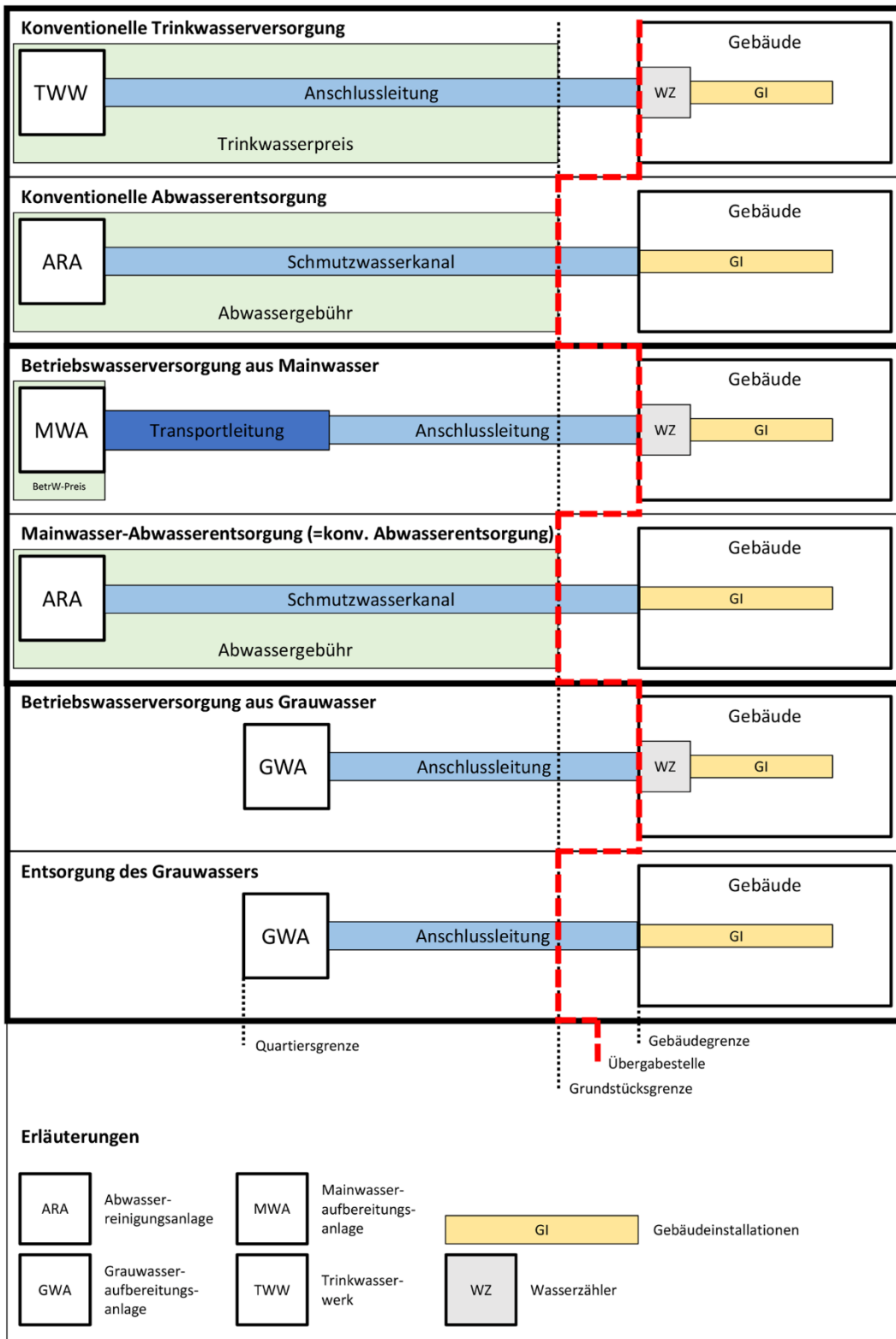


Abbildung 11: In der Kostenanalyse berücksichtigte Systemkomponenten der betrachteten Varianten und jeweilige Übergabestellen zwischen öffentlichem und privatem Bereich

Leitungen im öffentlichen Bereich

Die Leitungslängen im öffentlichen Bereich und in den Gebäuden (Wohnungen, Steigleitungen bzw. Fallrohre) des jeweiligen Quartiers wurden auf Basis von Plänen und Rahmendaten (im Falle der Günthersburghöfe des städtebaulichen Entwurfs) ermittelt.

Für die Rohrleitungen im öffentlichen Bereich (Straße) wurden Annahmen hinsichtlich ihrer Lage im Quartier getroffen und Leitungslängen ausgemessen (vgl. Abbildung 28 und Tabelle 47, Anhang 6.1.2 sowie Abbildung 30 und Tabelle 59, Anhang 6.1.3). Im Falle der Gebäude wurden u. a. Gebäudegrundrisse, Geschossflächenzahlen und die Anzahl an Wohneinheiten im Quartier herangezogen. Daneben wurden zur Versorgung mit Trink- und Betriebswasser auch die hydraulischen Verhältnisse im bestehenden Versorgungsnetz und im projektierten Betriebswassernetz berücksichtigt (einschließlich topographischer Höhenunterschiede, Distanzen). Im Bereich der Günthersburghöfe wird ein Mindestflussdruck an den Verbraucherstellen für Trink- und Betriebswasser von 1,5 bar ab dem dritten Stockwerk unterschritten, so dass in den Gebäuden eigenständige Druckerhöhungsanlagen eingeplant werden mussten. Im Bereich der Heimatsiedlung, ist durch die Nähe des Wohngebietes zur MWA der Vordruck zur Versorgung der Gebäude mit Betriebswasser ausreichend. Eine gebäudeinterne Druckerhöhungsanlage für Trink- und Betriebswasser entfällt daher. Im Falle der Günthersburghöfe ist mit 1510 Wohneinheiten bzw. 3239 Einwohnern und entsprechend einem Betriebswasserbedarf für Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung von 46 100 m³/a kalkuliert worden (vgl. Kapitel 5.1.1), im Falle der Heimatsiedlung mit 992 Wohneinheiten bzw. 2 098 Einwohnern und einem Betriebswasserbedarf von 29 900 m³/a (vgl. Kapitel 5.1.2).

In Bezug auf Rohrleitungen im öffentlichen Bereich und in Gebäuden sind entsprechend des Wasserbedarfs und aufbauend auf Erfahrungswerten Annahmen für Rohrlitungsdurchmesser, -materialien und spezifische Kosten getroffen worden (vgl. Anhang 6.1.1). Dabei wurden Schmutz- und Grauwasserleitungen sowie Trink- und Betriebswasserleitungen in drei Größenklassen (Straße, Steigleitung bzw. Fallrohr, Wohnung) unterschieden. Im Falle von doppelter Leitungsführung im öffentlichen Bereich wurde darüber hinaus ein spezifischer Aufschlag für Ver- und Entsorgungsleitungen angesetzt. Im Falle doppelter Leitungsführung in Bestandsgebäuden (Heimatsiedlung) wurde ein monetärer Aufschlag von pauschal 50 % für den Mehraufwand einkalkuliert. Alle spezifischen Kosten umfassen neben den Materialkosten auch die Kosten für Einbau bzw. Verlegung der Leitungen. Bei den angegebenen Kosten handelt es sich um Nettokosten bzw. -preise.

Leitungen im privaten Bereich

Als Kalkulationsgrundlage für Leitungslängen von Wasserver- und -entsorgungsleitungen in den Wohnungen wurden für jedes Quartier Annahmen für deren Lage anhand eines generischen Wohnungsgrundrisses getroffen. Dabei wurden Leitungslängen für Trink- und Schmutzwasserleitungen sowie für Betriebs- und Grauwasserleitungen jeweils für Ein- bis Zwei-Zimmer-Wohnungen und Drei- bis Vier-Zimmer-Wohnungen unterschieden (vgl. Tabelle 49f., Anhang 6.1.2 und Tabelle 60f., Anhang 6.1.3). Im Fall der konventionellen Wasserinfrastruktur kommen ausschließlich Leitungslängen für Trink- und Schmutzwasser zur Anwendung. Im Fall der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser ersetzen Betriebswasserleitungen entsprechende Trinkwasserleitungen zur

Toilettenspülung. Im Fall der Betriebswasserversorgung aus Grauwasser gilt dies analog. Darüber hinaus ersetzen Grauwasserleitungen entsprechende Schmutzwasserleitungen von Duschen, Badewannen und Waschbecken.

Abschreibungen

Die Abschreibungen sind entsprechend der Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter (AfA) des Bundesfinanzministeriums kalkuliert worden, die die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer für Anlagegüter ausweisen (§ 7 Abs. 1 S. 2 EStG), die nicht branchenspezifisch genutzt werden. Dementsprechend wurde für PE-Rohre im häuslichen Bereich eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen. Für Leitungen bis einschließlich DN 200 im öffentlichen Bereich wurde ebenfalls eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt, da davon ausgegangen werden kann, dass Druckbelastungen auf diese Leitungsabschnitte nicht so hoch sein werden. Für Leitungen mit einem Durchmesser von größer als DN 200 wurde eine reduzierte Nutzungsdauer von 30 Jahren angesetzt. Für Transportleitungen im Straßenkörper, wie sie in der Variante für Betriebswasser aus Mainwasser eingeplant sind, wurde (gleichgesetzt mit Stadtnetz Gusseisen) mit einer Lebensdauer von 40 Jahren kalkuliert. Für Wasseraufbereitungsanlagen wurde gemäß AfA-Tabelle ein Zeitraum von 20 Jahren veranschlagt, für Druckerhöhungsanlagen (Gebäude und MWA-Transport) 18 Jahre. Eine Übersicht über alle Eingangsparameter der Kostenvergleichsrechnung befindet sich im Anhang (Tabelle 58 und Tabelle 70).

6.1.4. Ergebnisse der Kostenanalyse für die Günthersburghöfe

Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ in den Günthersburghöfen

In Tabelle 27 sind die Jahreskosten (gesamt, pro Wohneinheit, pro Einwohner, pro Kubikmeter) des konventionellen Systems der zentralen Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung für die Günthersburghöfe als Systemkosten aufgeführt. Die Jahressystemkosten setzen sich aus öffentlichen wasserbezogenen Jahreskosten sowie privaten infrastrukturbezogenen Kosten zusammen. Die wasserbezogenen Jahreskosten umfassen die Bereitstellung von Trinkwasser für Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung in den Günthersburghöfen einschließlich der entsprechenden Abwasserbeseitigung bis zur jeweiligen Übergabestelle (vgl. Abbildung 11). Die privaten infrastrukturbezogenen Jahreskosten beinhalten die kalkulatorischen Abschreibungen und jährlichen Kalkulationszinsen für Gebäudeinstallationen (vgl. Tabelle 50f., Anhang 6.1.3).

Tabelle 27: Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ für die Günthersburghöfe

| | Einheit | Konventionelles System | | |
|--|-----------------------|------------------------|--------------|-----------------------------|
| | | Gesamtkosten | | |
| | | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten |
| Investitionen Gebäudeinstallationen (TrinkW, AbW) | [EUR] | 2.066.713 | | 2.066.713 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | [EUR/a] | 41.334 | | 41.334 |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 31.001 | | 31.001 |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 82.721 | 82.721 | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 66.845 | 66.845 | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | 221.901 | 149.566 | 72.335 |
| pro WE | [EUR/a] | 147 | 99 | 48 |
| pro EW | [EUR/a] | 69 | 46 | 22 |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m ³] | 4,81 | 3,24 | 1,57 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in den Günthersburghöfen

In Tabelle 28 sind die Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ sowie die Mehrkosten im Vergleich zum konventionellen System dargestellt. Im Unterschied zur Referenzvariante wurden über die Trink- und Schmutzwasserleitungen hinaus Investitionen für Betriebswasserleitungen im Quartier Günthersburghöfe berücksichtigt (vgl. Abbildung 29 und Tabelle 52ff., Anhang 6.1.3). In den Wohnungen werden die Toiletten mit Betriebswasserleitungen ausgestattet. Für die Betriebswasserversorgung sind im Quartier darüber hinaus zusätzliche Steigleitungen in den Gebäuden sowie Anschlussleitungen notwendig. Die Mehrinvestitionen der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ im Vergleich zum konventionellen System setzen sich somit aus diesen beiden Leitungskategorien (Betriebswasserleitungen als Steigleitungen und Anschlussleitungen) zusammen.

Für den Transport des Betriebswassers wurden Kosten veranschlagt, die auf einer hypothetischen Transportleitung vom Mainwasserwerk zu den Günthersburghöfen basieren. Die Leitungslänge beträgt schätzungsweise 8,41 km (vgl. Abbildung 29 und Tabelle 52ff., Anhang 6.1.3). Mit einer PE-Leitung, DN 300, und spezifischen Kosten von 1 500,- EUR/m für Material und Verlegung belaufen sich die Investitionen für die Transportleitung auf ca. 12,61 Mio. EUR. Bei einer vertretbaren Durchflussgeschwindigkeit von 1,5 m/s beträgt der Auslastungsgrad der Leitung in der Tagesspitze zur Versorgung des Quartiers ca. 3 %. Daher wurden lediglich 3 % der Investitionen der Transportleitung (378 420,- EUR) für die Betriebswasserversorgung der Günthersburghöfe zugerechnet, da mit der Leitung potenziell noch weitere Gebiete versorgt werden können. Ein geringerer Auslastungsgrad führt folglich zu einer Verteuerung des Betriebswassers (vgl. Abbildung 12).

Abgesehen davon sind zusätzliche Druckerhöhungsanlagen bzw. entsprechende kalkulatorische Abschreibungen und anteilige Betriebskosten (Wartung, Reparatur, Strom) für die Betriebswasserversorgung in den Gebäuden sowie für den Transport von der MWA zu den Günthersburghöfen berücksichtigt worden. Abschließend wurden Kosten

für die Gewinnung und Aufbereitung des Betriebswassers in der MWA über den entsprechenden Betriebswasserpreis sowie Trinkwassereinsparungen (Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung) einkalkuliert.

Tabelle 28: Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Günthersburghöfe

| | Einheit | Betriebswasser aus Mainwasser | | | | | | Private Infrastruktur- kosten |
|---|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Gesamtkosten | | | Mehrkosten ggü. Referenz | | | |
| | | System- kosten | Wasser- kosten | Private Infrastruktur- kosten | System- kosten | Wasser- kosten | Private Infrastruktur- kosten | |
| Investitionen Gebäudeeinrichtungen (TrinkW, BetrW, AbW) | [EUR] | 2.359.980 | 312.060 | 2.359.980 | 293.267 | 312.060 | 293.267 | |
| Investitionen Anschlussleitungen (TrinkW, BetrW, AbW) | [EUR] | 312.060 | 312.060 | | | 312.060 | | |
| Investitionen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR] | 22.000 | | 22.000 | | 22.000 | | 22.000 |
| Investitionen Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | [EUR] | 378.420 | 378.420 | | | 378.420 | | |
| Investitionen Druckerhöhung für Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | [EUR] | 18.000 | 18.000 | | | 18.000 | | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeeinrichtungen | [EUR/a] | 47.200 | | 47.200 | 5.865 | | | 5.865 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | [EUR/a] | 6.241 | 6.241 | | 6.241 | 6.241 | | |
| Kalkulatorische Abschreibungen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR/a] | 1.222 | | 1.222 | | | | 1.222 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Transportleitung MWA, anteilig | [EUR/a] | 9.461 | 9.461 | | 9.461 | 9.461 | | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Druckerhöhung für Transportleitung MWA, anteilig | [EUR/a] | 1.000 | 1.000 | | 1.000 | 1.000 | | |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 46.357 | 10.627 | 35.730 | 15.356 | 10.627 | | 4.729 |
| Betriebskosten zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR/a] | 1.150 | | 1.150 | 1.150 | | | 1.150 |
| Betriebskosten MainW-Transport (Wartung, Reparatur), anteilig | [EUR/a] | 270 | 270 | | 270 | 270 | | |
| Betriebskosten MainW-Transport (Strom), anteilig | [EUR/a] | 3.932 | 3.932 | | 3.932 | 3.932 | | |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | | -82.721 | | |
| Betriebswasser aus MWA (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 24.433 | 24.433 | | 24.433 | 24.433 | | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 66.845 | 66.845 | | | | | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | 208.111 | 122.809 | 85.302 | -13.781 | -26.757 | | 12.967 |
| pro WE | [EUR/a] | 138 | 81 | 56 | -9,13 | -18 | | 9 |
| pro EW | [EUR/a] | 64 | 38 | 26 | -4,26 | -8 | | 4 |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m ³] | 4,51 | 2,66 | 1,85 | -0,30 | -0,58 | | 0,28 |

WE=Wohninheit; EW=Einwohner; Kosten zur Bereitstellung von Betriebswasser aus Mainwasser nur gültig bei einem Auslastungsgrad der Transportleitung von annähernd 100 %

Zur Analyse der Sensitivität wurden unterschiedliche Auslastungsgrade der MWA-Transportleitung kalkuliert. Die spezifischen Systemkosten steigen dabei nicht-linear von 4,51 EUR/m³ bei einem Auslastungsgrad von 100 % auf 5,59 EUR/m³ bei 25 % (Abbildung 12).

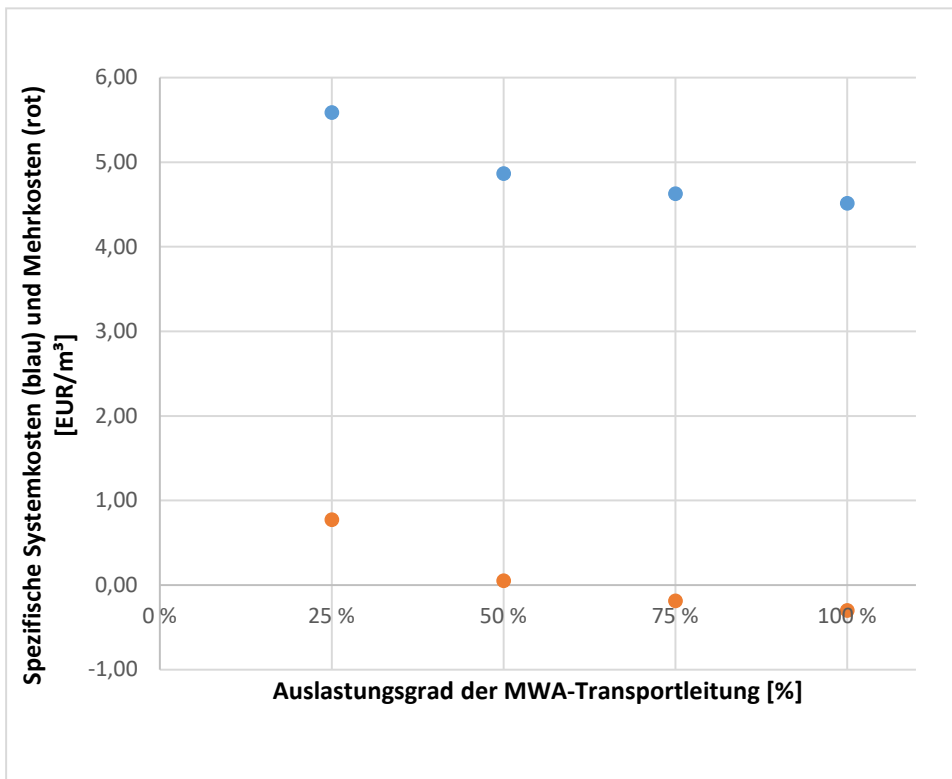


Abbildung 12: Spezifische Systemkosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in den Günthersburghöfen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung

Die spezifischen wasserbezogenen Kosten steigen ebenfalls nicht-linear von 2,66 EUR/m³ bei einem Auslastungsgrad von 100 % auf 3,74 EUR/m³ bei 25 % (Abbildung 13).

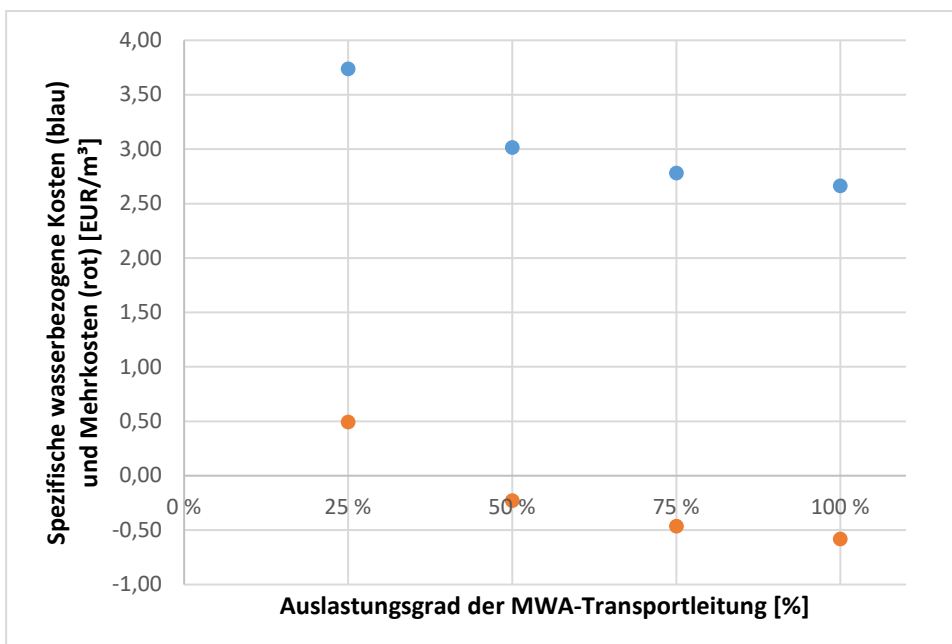


Abbildung 13: Spezifische wasserbezogene Kosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in den Günthersburghöfen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung

Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in den Günthersburghöfen

In Tabelle 29 sind die Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ sowie die Mehrkosten im Vergleich zum konventionellen System aufgeführt. Im Unterschied zur Referenzvariante wurden über die Investitionen für Trink- und Schmutzwasserleitungen hinaus Investitionen für Betriebs- und Grauwasserleitungen im Quartier Günthersburghöfe berücksichtigt (vgl. Tabelle 55ff., Anhang 6.1.2). In den Wohnungen werden die Toiletten mit Betriebswasserleitungen, die mit aufbereitetem Grauwasser beschickt werden, ausgestattet. Außerdem erhalten Waschbecken, Duschen und Badewannen Grauwasserleitungen. Bei diesen Sanitäranlagen entfällt im Gegensatz zu dem konventionellen System und einer Betriebswassernutzung über aufbereitetes Mainwasser die Schmutzwasserleitung. Für die Betriebswasserversorgung und die Grauwasserabführung und -aufbereitung sind im Quartier darüber hinaus zusätzliche Steigleitungen bzw. Fallrohre in den Gebäuden sowie Anschlussleitungen notwendig.

Die Investitionen für die MBR-Anlage zur Grauwasserwiederverwendung belaufen sich auf etwa 304 466 EUR. Die entsprechenden Betriebskosten können Anhang 6.1.2 (Tabelle 55ff.) entnommen werden. Abgesehen davon sind zusätzliche Druckerhöhungsanlagen bzw. entsprechende kalkulatorische Abschreibungen und Betriebskosten für die Betriebswasserversorgung in den Gebäuden berücksichtigt worden. Die entsprechenden Investitionen belaufen sich auf 22 000 EUR.

Die Mehrinvestitionen der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ im Vergleich zum konventionellen System basieren auf den zusätzlichen Steig- und Anschlussleitungen und den Investitionen für die MBR-Anlage. Abschließend wurden Trinkwassereinsparungen (Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung) und vermiedene Abwassergebühren (Grauwasser aus Waschbecken, Duschen und Badewannen) einkalkuliert.

Tabelle 29: Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Günthersburghöfe

| | Einheit | Betriebswasser aus Grauwasser | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------|
| | | Gesamtkosten | | | Mehrkosten ggü. Referenz | | |
| | | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten |
| Investitionen Gebäudeinstallationen (TrinkW, BetrW, AbW, GrauW) | [EUR] | 3.100.251 | 837.180 | 3.100.251 | 1.033.538 | 837.180 | 1.033.538 |
| Investitionen Anschlussleitungen (TrinkW, BetrW, AbW, GrauW) | [EUR] | 837.180 | 837.180 | | 837.180 | 837.180 | |
| Investitionen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR] | 22.000 | | 22.000 | 22.000 | | 22.000 |
| Investitionen Aufbereitungsanlagen (GrauW, BetrW) | [EUR] | 304.466 | 304.466 | | 304.466 | 304.466 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | [EUR/a] | 62.005 | | 62.005 | 20.671 | | 20.671 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | [EUR/a] | 6.241 | 6.241 | | 6.241 | 6.241 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (größer DN 200) | [EUR/a] | 17.504 | 17.504 | | 17.504 | 17.504 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR/a] | 1.222 | | 1.222 | 1.222 | | 1.222 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Aufbereitungsanlagen | [EUR/a] | 15.223 | 15.223 | | 15.223 | 15.223 | |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 63.958 | 17.125 | 46.834 | 32.958 | 17.125 | 15.833 |
| Betriebskosten zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | [EUR/a] | 1.150 | | 1.150 | 1.150 | | 1.150 |
| Betriebskosten GrauW-Sammlung, -Aufbereitung, -Verteilung | [EUR/a] | 68.764 | 68.764 | | 68.764 | 68.764 | |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | -82.721 | -82.721 | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | -66.845 | -66.845 | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | 236.068 | 124.857 | 111.211 | 14.167 | -24.709 | 38.876 |
| pro WE | [EUR/a] | 156 | 83 | 74 | 9 | -16 | 26 |
| pro EW | [EUR/a] | 73 | 39 | 34 | 4 | -8 | 12 |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m ³] | 5,12 | 2,71 | 2,41 | 0,31 | -0,54 | 0,84 |

WE=Wohninheit; EW=Einwohner

Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen

Das Ergebnis des Kostenvergleichs der Referenzvariante mit den Vergleichsvarianten „Betriebswasser aus Mainwasser“ und „Betriebswasser aus Grauwasser“ für die Günthersburghöfe kann Tabelle 30 entnommen werden. Der Kostenvergleich zeigt, dass die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ mit spezifischen Systemkosten von

4,51 EUR/m³ geringfügig günstiger (6,2 %) als das konventionelle Referenzsystem (4,81 EUR/m³) ist. Die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ ist mit spezifischen Systemkosten von 5,12 EUR/m³ ca. 6,4 % teurer als das konventionelle Referenzsystem.

Tabelle 30: Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen

| | Systemkosten | | Wasserkosten | | Private Infrastrukturkosten | |
|--|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | | Verhältnis ggü. Referenz | | Verhältnis ggü. Referenz | | Verhältnis ggü. Referenz |
| Konventionelles System | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 221.901 | | 149.566 | | 72.335 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 4,81 | 100,0 % | 3,24 | 100,0 % | 1,57 | 100,0 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 67,4 % | | 32,6 % | |
| Betriebswasser aus Mainwasser* | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 208.111 | | 122.809 | | 85.302 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 4,51 | 93,8 % | 2,66 | 82,1 % | 1,85 | 117,9 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 59,0 % | | 41,0 % | |
| Betriebswasser aus Grauwasser | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 236.068 | | 124.857 | | 111.211 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 5,12 | 106,4 % | 2,71 | 83,5 % | 2,41 | 153,7 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 52,9 % | | 47,1 % | |

Kosten zur Bereitstellung von Betriebswasser aus Mainwasser nur gültig bei einem Auslastungsgrad der Transportleitung von annähernd 100 %

Wasserbezogene Jahreskosten umfassen die Bereitstellung des Trink- bzw. Betriebswassers zum Zwecke der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung einschließlich der Abwasserbeseitigung an der Übergabestelle (Gebäude- bzw. Grundstücksgrenze) in den Günthersburghöfen ausschließlich der privaten Infrastrukturkosten (Gebäudeinstallationen). Diesbezüglich ist die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ um 17,9 % (2,66 EUR/m³) und die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ um 16,5 % (2,71 EUR/m³) günstiger als das konventionelle Referenzsystem (3,24 EUR/m³). Die spezifischen wasserbezogenen Kosten von 3,24 EUR/m³ des konventionellen Referenzsystems setzen sich aus dem Netto-Trinkwasserpreis von 1,79 EUR/m³ und der Abwassergebühr von 1,45 EUR/m³ zusammen.

Hinsichtlich der privaten Infrastrukturkosten, die die Gebäudeinstallationen im Quartier Günthersburghöfe umfassen, zeigt sich, dass die Vergleichsvarianten aufgrund zusätzlich benötigter Leitungen ausnahmslos teurer sind als das konventionelle Referenzsystem. Im Fall der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ sind die entsprechenden Kosten beispielsweise um 17,9 % höher (Steigleitungen für Betriebswasser in Gebäuden). Im Fall der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ sind die Kosten im privaten Bereich um 53,7 % höher (Steigleitungen und Fallrohre für Betriebswasser und Grauwasser).

Der Anteil der wasserbezogenen Jahreskosten an den Jahressystemkosten beläuft sich im Fall des konventionellen Systems auf 67,4 %. Aufgrund der niedrigeren wasserbezogenen und höheren infrastrukturbezogenen Jahreskosten bei den Vergleichsvarianten betragen die entsprechenden Anteile bei der Mainwasservariante 59,0 % und bei der Grauwasservariante 52,9 %.

Abschließend sei angemerkt, dass bei der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ der potenzielle Betriebswasserüberschuss von 9 700 m³/a, der sich aus der Differenz von Grauwasseranfall und Betriebswasserbedarf in den Günthersburghöfen ergibt, bei der Ermittlung der Jahreskosten unberücksichtigt geblieben ist. Dieses überschüssige Betriebswasser könnte prinzipiell verkauft oder anderweitig (z.B. zur Bewässerung) eingesetzt werden. Zu bedenken wäre dabei jedoch, dass hierfür weitere Leitungen und u.U. Druckerhöhungsanlagen notwendig sein könnten. Zur Bewässerung von Gärten und Grünflächen im Siedlungsbereich könnte ergänzend zum bzw. anstelle des Betriebswassers aus Grauwasser auch Regenwasser verwendet werden.

6.1.5. Ergebnisse der Kostenanalyse für die Heimatsiedlung

Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ in der Heimatsiedlung

In Tabelle 31 sind die Jahreskosten (gesamt, pro Wohneinheit, pro Einwohner, pro Kubikmeter) des konventionellen Systems der zentralen Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung für die Heimatsiedlung als Systemkosten aufgeführt. Die Jahressystemkosten setzen sich aus öffentlichen wasserbezogenen Jahreskosten sowie privaten infrastrukturbezogenen Kosten zusammen. Die wasserbezogenen Jahreskosten umfassen die Bereitstellung von Trinkwasser für Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung in der Heimatsiedlung einschließlich der entsprechenden Abwasserbeseitigung bis zur jeweiligen Übergabestelle (vgl. Abbildung 11). Die infrastrukturbezogenen Jahreskosten beinhalten die kalkulatorischen Abschreibungen und jährlichen Kalkulationszinsen für Gebäudeinstallationen (vgl. Tabelle 62ff., Anhang 6.1.4).

Tabelle 31: Jahreskosten der Referenzvariante „Konventionelles System“ für die Heimatsiedlung

| | Einheit | Konventionelles System | | |
|--|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|
| | | Gesamtkosten | | |
| | | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten |
| Investitionen Gebäudeinstallationen (TrinkW, AbW) | [EUR] | 1.354.945 | | 1.354.945 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | [EUR/a] | 27.099 | | 27.099 |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 20.324 | | 20.324 |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 53.652 | 53.652 | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 43.355 | 43.355 | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | 144.430 | 97.007 | 47.423 |
| pro WE | [EUR/a] | 146 | 98 | 48 |
| pro EW | [EUR/a] | 69 | 46 | 23 |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m ³] | 4,83 | 3,24 | 1,59 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in der Heimatsiedlung

In Tabelle 32 sind die Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ sowie die Mehrkosten im Vergleich zum konventionellen System dargestellt. Im Unterschied zur Referenzvariante wurden über die Trink- und Schmutzwasserleitungen hinaus Investitionen für Betriebswasserleitungen im Quartier Heimatsiedlung berücksichtigt (vgl. Abbildung 31 und Tabelle 64ff., Anhang 6.1.3). Da es sich um ein Bestandsgebiet handelt, wurden bei Leitungen in Gebäuden pauschal 50 % Zusatzkosten für den Einbau der Leitungen im Bestand beaufschlagt. In den Wohnungen werden die Toiletten mit Betriebswasserleitungen ausgestattet. Für die Betriebswasserversorgung sind im Quartier darüber hinaus zusätzliche Steigleitungen in den Gebäuden sowie Anschlussleitungen zu den Gebäuden notwendig. Die Mehrinvestitionen der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ im Vergleich zum konventionellen System setzen sich somit aus diesen beiden Leitungskategorien (Betriebswasserleitungen als Steigleitungen und Anschlussleitungen) zusammen.

Für den Transport des Betriebswassers wurden Kosten veranschlagt, die auf einer hypothetischen Transportleitung vom Mainwasserwerk zur Heimatsiedlung basieren. Die Leitungslänge beträgt schätzungsweise 4,59 km (vgl. Abbildung 31 und Tabelle 64ff., Anhang 6.1.3). Mit einer PE-Leitung, DN 300, und spezifischen Kosten von 1 500,- EUR/m für Material und Verlegung belaufen sich die Investitionen für die Transportleitung auf ca. 6,89 Mio. EUR. Es werden jedoch lediglich 2 % der Investitionen der Transportleitung (1 37 828,- EUR) für die Betriebswasserversorgung der Heimatsiedlung zugerechnet, da mit der Leitung potenziell noch weitere Gebiete versorgt werden können. Ein geringerer Auslastungsgrad führt folglich zu einer Verteuerung des Betriebswassers (vgl. Abbildung 14).

Abgesehen davon sind eine Druckerhöhungsanlage bzw. entsprechende kalkulatorische Abschreibungen und anteilige Betriebskosten (Wartung, Reparatur, Strom) für den Transport von der MWA zur Heimatsiedlung berücksichtigt worden. Abschließend wurden Kosten für die Gewinnung und Aufbereitung des Betriebswassers in der MWA über den entsprechenden Betriebswasserpreis sowie Trinkwassereinsparungen (Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung) einkalkuliert.

Tabelle 32: Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Heimatsiedlung

| | Einheit | Betriebswasser aus Mainwasser | | | | | |
|---|----------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------|
| | | Gesamtkosten | | | Mehrkosten ggü. Referenz | | |
| | | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten |
| Investitionen Gebäudeinstallationen (TrinkW, BetrW, AbW) | [EUR] | 1.620.618 | | 1.620.618 | 265.673 | | 265.673 |
| Investitionen Anschlussleitungen (TrinkW, BetrW, AbW) | [EUR] | 3.330.060 | 3.330.060 | | 3.330.060 | 3.330.060 | |
| Investitionen Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | [EUR] | 137.828 | 137.828 | | 137.828 | 137.828 | |
| Investitionen Druckerhöhung für Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | [EUR] | 11.000 | 11.000 | | 11.000 | 11.000 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | [EUR/a] | 32.412 | | 32.412 | 5.313 | | 5.313 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | [EUR/a] | 66.601 | 66.601 | | 66.601 | 66.601 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Transportleitung MWA, anteilig | [EUR/a] | 3.446 | 3.446 | | 3.446 | 3.446 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Druckerhöhung für Transportleitung MWA, anteilig | [EUR/a] | 611 | 611 | | 611 | 611 | |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 76.493 | 52.183 | 24.309 | 56.168 | 52.183 | 3.985 |
| Betriebskosten MainW-Transport (Wartung, Reparatur), anteilig | [EUR/a] | 165 | 165 | | 165 | 165 | |
| Betriebskosten MainW-Transport (Strom), anteilig | [EUR/a] | 1.485 | 1.485 | | 1.485 | 1.485 | |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | -53.652 | -53.652 | |
| Betriebswasser aus MWA (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 15.847 | 15.847 | | 15.847 | 15.847 | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | 43.355 | 43.355 | | | | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | 240.415 | 193.693 | 56.722 | 95.984 | 86.686 | 9.299 |
| pro WE | [EUR/a] | 242 | 185 | 57 | 97 | 87 | 9 |
| pro EW | [EUR/a] | 115 | 88 | 27 | 46 | 41 | 4 |
| pro m³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m³] | 8,04 | 6,14 | 1,90 | 3,21 | 2,90 | 0,31 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner; Kosten zur Bereitstellung von Betriebswasser aus Mainwasser nur gültig bei einem Auslastungsgrad der Transportleitung von annähernd 100 %

Zur Analyse der Sensitivität wurden unterschiedliche Auslastungsgrade der MWA-Transportleitung kalkuliert. Die spezifischen Systemkosten steigen dabei nicht-linear von 8,04 EUR/m³ bei einem Auslastungsgrad von 100 % auf 8,68 EUR/m³ bei 25 % (Abbildung 14).

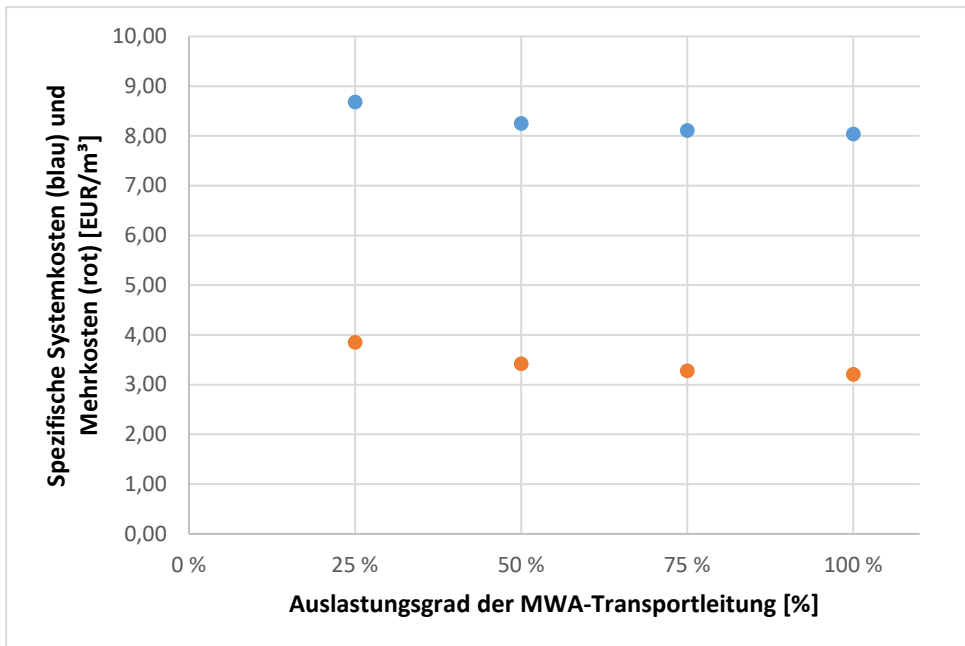


Abbildung 14: Spezifische Systemkosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in der Heimsiedlung in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung

Die spezifischen wasserbezogenen Kosten steigen ebenfalls nicht-linear von 6,14 EUR/m³ bei einem Auslastungsgrad von 100 % auf 6,78 EUR/m³ bei 25 % (Abbildung 15).

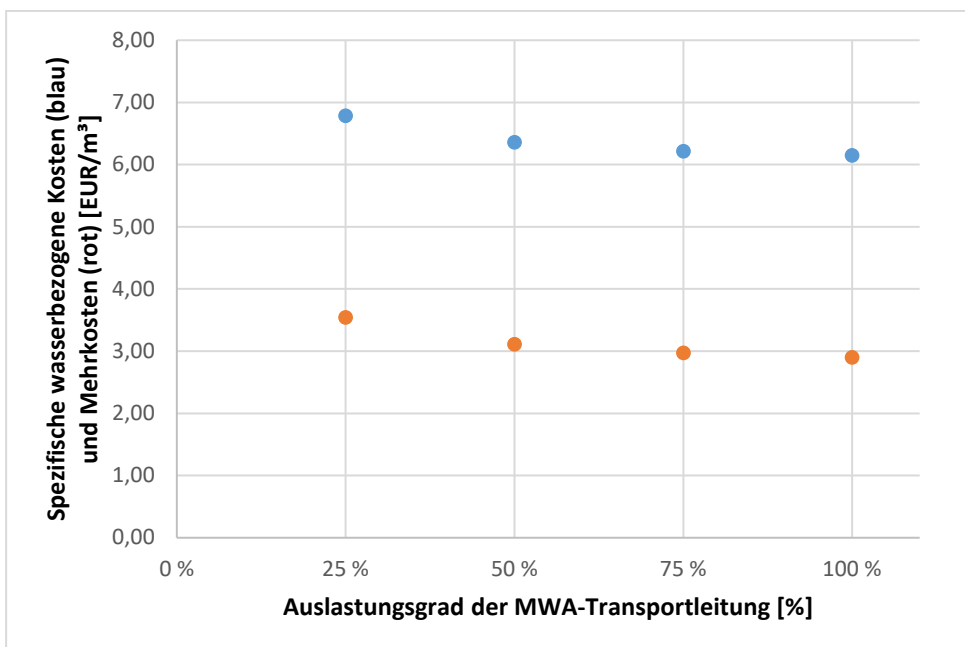


Abbildung 15: Spezifische wasserbezogene Kosten (blau) und Mehrkosten (rot) [in EUR/m³] der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser in der Heimsiedlung in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der MWA-Transportleitung

Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in der Heimatsiedlung

In Tabelle 33 sind die Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ sowie die Mehrkosten im Vergleich zum konventionellen System aufgeführt. Im Unterschied zur Referenzvariante wurden über die Investitionen für Trink- und Schmutzwasserleitungen hinaus Investitionen für Betriebs- und Grauwasserleitungen im Quartier Heimatsiedlung berücksichtigt (vgl. Tabelle 67ff., Anhang 6.1.3). Da es sich um ein Bestandsgebiet handelt, wurden zu den entsprechenden Investitionen wie im Fall der Mainwasservariante pauschal 50 % Zusatzkosten für die Installation der Gebäudeleitungen im Bestand beaufschlagt.

In den Wohnungen werden die Toiletten mit Betriebswasserleitungen ausgestattet. Außerdem erhalten Waschbecken, Duschen und Badewannen Grauwasserleitungen. Für die Betriebswasserversorgung und die Grauwasseraufbereitung sind im Quartier darüber hinaus zusätzliche Steigleitungen bzw. Fallrohre in den Gebäuden sowie Anschlussleitungen zu den Gebäuden notwendig. Die Mehrinvestitionen der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ im Vergleich zum konventionellen System ergeben sich somit aus den zusätzlichen Rohrleitungen in diesen beiden Leitungskategorien (Steig- und Anschlussleitungen).

Die Investitionen für die MBR-Anlage zur Grauwasserwiederverwendung belaufen sich auf etwa 197 212 EUR. Die entsprechenden Betriebskosten können Tabelle 67ff. (Anhang 6.1.3) entnommen werden. Abgesehen davon wurden Trinkwassereinsparungen (Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung) und vermiedene Abwassergebühren (Grauwasser aus Waschbecken, Duschen und Badewannen) einkalkuliert.

Tabelle 33: Jahreskosten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ und Mehrkosten im Vergleich zur Referenzvariante für die Heimatsiedlung

| | Einheit | Betriebswasser aus Grauwasser | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| | | Gesamtkosten | | | Mehrkosten ggü. Referenz | | |
| | | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten | Systemkosten | Wasserkosten | Private Infrastrukturkosten |
| Investitionen Gebäudeinstallationen (TrinkW, BetrW, AbW, GrauW) | [EUR] | 2.366.065 | | 2.366.065 | 1.011.120 | | 1.011.120 |
| Investitionen Anschlussleitungen (TrinkW, BetrW, AbW, GrauW) | [EUR] | 4.083.078 | 4.083.078 | | 4.083.078 | 4.083.078 | |
| Investitionen Aufbereitungsanlagen (GrauW, BetrW) | [EUR] | 197.212 | 197.212 | | 197.212 | 197.212 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | [EUR/a] | 47.321 | | 47.321 | 20.222 | | 20.222 |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | [EUR/a] | 66.601 | 66.601 | | 66.601 | 66.601 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (größer DN 200) | [EUR/a] | 25.101 | 25.101 | | 25.101 | 25.101 | |
| Kalkulatorische Abschreibungen Aufbereitungsanlagen | [EUR/a] | 9.861 | 9.861 | | 9.861 | 9.861 | |
| Jährlicher Kalkulationszins | [EUR/a] | 99.695 | 64.204 | 35.491 | 79.371 | 64.204 | 15.167 |
| Betriebskosten GrauW-Sammlung, -Aufbereitung, -Verteilung | [EUR/a] | 44.541 | 44.541 | | 44.541 | 44.541 | |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | -53.652 | -53.652 | |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/a] | | | | -43.355 | -43.355 | |
| Jahreskosten | [EUR/a] | <u>293.120</u> | <u>210.307</u> | <u>82.812</u> | <u>148.689</u> | <u>113.300</u> | <u>35.389</u> |
| pro WE | [EUR/a] | 295 | 212 | 83 | 150 | 114 | 36 |
| pro EW | [EUR/a] | 140 | 100 | 39 | 71 | 54 | 17 |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) | [EUR/m ³] | 9,80 | 7,03 | 2,77 | 4,97 | 3,79 | 1,18 |

WE= Wohneinheit; EW=Einwohner

Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in der Heimsiedlung

Das Ergebnis des Kostenvergleichs der Referenzvariante mit den Vergleichsvarianten „Betriebswasser aus Mainwasser“ und „Betriebswasser aus Grauwasser“ für die Heimsiedlung kann Tabelle 34 entnommen werden. Der Kostenvergleich zeigt, dass die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ mit spezifischen Systemkosten von 8,04 EUR/m³ deutlich (66,5 %) teurer als das konventionelle Referenzsystem (4,83 EUR/m³) ist. Die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ ist mit spezifischen Systemkosten von 9,80 EUR/m³ sogar 102,9 % teurer als das konventionelle Referenzsystem. Damit sind beide Vergleichsvarianten deutlich teurer als das Referenzsystem.

Tabelle 34: Jahreskostenvergleich der betrachteten Varianten in der Heimsiedlung

| | Systemkosten | | Wasserkosten | | Private Infrastrukturkosten | |
|--|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | | Verhältnis ggü. Referenz | | Verhältnis ggü. Referenz | | Verhältnis ggü. Referenz |
| Konventionelles System | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 144.430 | | 97.007 | | 47.423 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 4,83 | 100,0 % | 3,24 | 100,0 % | 1,59 | 100,0 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 67,2 % | | 32,8 % | |
| Betriebswasser aus Mainwasser* | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 240.415 | | 183.693 | | 56.722 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 8,04 | 166,5 % | 6,14 | 189,4 % | 1,90 | 119,6 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 76,4 % | | 23,6 % | |
| Betriebswasser aus Grauwasser | | | | | | |
| Jahreskosten [EUR/a] | 293.120 | | 210.307 | | 82.812 | |
| pro m ³ (Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung) [EUR/m ³] | 9,80 | 202,9 % | 7,03 | 216,8 % | 2,77 | 174,6 % |
| Anteile von Wasser- und Infrastrukturkosten an Systemkosten [%] | 100,0 % | | 71,7 % | | 28,3 % | |

* Kosten zur Bereitstellung von Betriebswasser aus Mainwasser nur gültig bei einem Auslastungsgrad der Transportleitung von annähernd 100%

Wasserbezogene Jahreskosten umfassen die Bereitstellung des Trink- bzw. Betriebswassers zum Zwecke der Toilettenspülung sowie Reinigung und Bewässerung einschließlich der Abwasserbeseitigung an der Übergabestelle (Gebäude- bzw. Grundstücksgrenze) in der Heimsiedlung ausschließlich der privaten Infrastrukturkosten (Gebäudeinstallationen). Diesbezüglich ist die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ um 89,4 % (6,14 EUR/m³) und die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ um 116,8 % (7,03 EUR/m³) teurer als das konventionelle Referenzsystem (3,24 EUR/m³). Die spezifischen wasserbezogenen Kosten von 3,24 EUR/m³ des konventionellen Referenzsystems setzen sich aus dem Netto-Trinkwasserpreis von 1,79 EUR/m³ und der Abwassergebühr von 1,45 EUR/m³ zusammen.

Hinsichtlich der privaten Infrastrukturkosten, die die Gebäudeinstallationen im Quartier Heimsiedlung umfassen, zeigt sich, dass die Vergleichsvarianten aufgrund zu-

sätzlich benötigter Leitungen ausnahmslos teurer sind als das konventionelle Referenzsystem. Die entsprechenden Kosten sind wie im Fall der Günthersburghöfe höher als beim Referenzsystem (Mainwasservariante: 19,6 %; Grauwasservariante: 74,6 %).

Der Anteil der wasserbezogenen Jahreskosten an den Jahressystemkosten beläuft sich im Fall des konventionellen Systems auf 67,2 %. Die entsprechenden Anteile betragen bei der Mainwasservariante 76,4 % und bei der Grauwasservariante 71,7 %.

Abschließend sei angemerkt, dass bei der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ der potenzielle Betriebswasserüberschuss von 6 200 m³/a, der sich aus der Differenz von Grauwasseranfall und Betriebswasserbedarf in der Heimatsiedlung ergibt, bei der Ermittlung der Jahreskosten unberücksichtigt geblieben ist. Dieses überschüssige Betriebswasser könnte prinzipiell verkauft oder anderweitig (z. B. zur Beregnung) eingesetzt werden. Zu bedenken wäre dabei jedoch, dass hierfür weitere Leitungen und u. U. Druckerhöhungsanlagen notwendig sein könnten. Zur Bewässerung von Gärten und Grünflächen im Siedlungsbereich könnte ergänzend zum bzw. anstelle des Betriebswassers aus Grauwasser auch Regenwasser verwendet werden.

6.1.6. Jahreskostenvergleich Günthersburghöfe und Heimatsiedlung

Die Jahressystemkosten einschließlich aller öffentlichen und privaten Investitionen und Ausgaben zur Substitution von Trinkwasser mit Betriebswasser zum Zweck der Toilettenspülung und Reinigung bzw. Bewässerung sind für die betrachteten Vergleichsvarianten (Betriebswasser aus Mainwasser, Betriebswasser aus Grauwasser) etwas geringer (6,2 %, Mainwasser, Günthersburghöfe) bis deutlich höher (102,9 %, Grauwasser, Heimatsiedlung) als im Fall des Referenzsystems. Insbesondere die Mainwasser- und die Grauwasservariante im Fall der Günthersburghöfe können aus Kostengesichtspunkten Alternativen zur konventionellen Wasserinfrastruktur darstellen.

Die Systemkosten sind stark abhängig von den vorzufindenden siedlungsstrukturellen Eigenschaften der betrachteten Quartiere, insbesondere Bevölkerungsdichte bzw. Geschossflächenzahl und räumliche Verteilung der Gebäude. Das generell höhere Niveau der Jahreskosten im Fall der Heimatsiedlung im Vergleich zu den Günthersburghöfen ist im Wesentlichen auf diese Faktoren zurückzuführen. Trotz geringerer Einwohnerzahl ist in der Heimatsiedlung ein deutlich längeres Rohrleitungsnetz zum Anschluss an die Transportleitung für das Mainwasser bzw. die Verbindungsleitungen für das Grauwassersystem im öffentlichen Bereich erforderlich.

Die höheren Jahressystemkosten der Grauwasservariante gegenüber der Mainwasservariante (13,4 bis 21,9 %) sind durch höhere öffentliche und private Infrastrukturkosten (Anschlussleitungen, Gebäudeinstallationen) begründet. Bei Überlegungen zur Übertragung und Verallgemeinerung der quartiersspezifischen Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Eignung der semizentralen Grauwasserwiederverwendung für einen flächendeckenden Einsatz zu prüfen ist. Die Mainwasservariante könnte in diesem Zusammenhang u. a. aus hydrogeologischen Gründen (Nicht-Verfügbarkeit von Grund-

wasser) für große Kernbereiche der Stadt Frankfurt am Main eine Option für die Betriebswasserversorgung darstellen. Der Frage, ob und inwieweit eine Nachrüstung von Bestandsgebieten mit Betriebswasserleitungen gelingen kann, muss in weiterführenden Untersuchungen nachgegangen werden.

Eine Entscheidung für oder gegen eine Betriebswasserversorgung sollte nicht ausschließlich unter Kostengesichtspunkten getroffen werden. Darüber hinaus gehende Aspekte wie soziale und ökologische Kosten und Vorteile, die durch eine Kostenvergleichsrechnung nicht oder nur unzureichend erfasst werden können, sind in einer übergreifenden Bewertung zusätzlich zu berücksichtigen.

6.1.7. Sozio-ökonomische Analyse

Grundsätzlich ergibt sich, dass eine Trinkwassersubstitution aufgrund der nun „parallelen“ Aufbereitung von verschiedenen Ressourcen und einer doppelten Zuleitung (Leitungen als auch die Transportenergie für das Produkt betrifft) zu einem höheren Aufwand und häufig zu entsprechend höheren Kosten führt. Im Kapitel 7.2 wird deutlich, dass sich ein höherer materiell-energetischer Aufwand auch ökologisch negativ in der Bilanz niederschlagen kann.

Erhöhte Kosten führen in einer sozio-ökonomischen Analyse keinesfalls automatisch dazu, dass diese als negativ zu werten sind. Ein höherer Aufwand kann z. B. volkswirtschaftlich zu Beschäftigungs- und evtl. auch zu Wachstumseffekten führen, die politisch befürwortet werden. Weiterhin ist bekannt, dass die Bewertung entscheidend vom gebietlichen Fokus abhängen kann; hier sind z. B. teilgebietliche, gesamtstädtische und regionale Betrachtungsebenen möglich (vgl. Felmeden et al. 2016: 32).

In eine sozio-ökonomische Analyse lassen sich sehr unterschiedliche Bewertungsdimensionen einziehen. So lassen sich beispielsweise Dimensionen wie die Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Effizienz, Verbesserung der Umweltqualität, Förderung der Regionalentwicklung und Verbesserung des sozialen Wohlbefindens (vgl. Grambow 2013: 135) berücksichtigen.

Diese Untersuchung greift kürzer und konzentriert sich vor allem auf innergesellschaftliche Verteilungs- bzw. Kosteneffekte, die aufgrund der Trinkwassersubstitution entstehen können. Hier wird insbesondere das Problem betrachtet, dass Wasser, sowohl Trink- als auch Betriebswasser, für alle bezahlbar sein sollte.

Die Mieter bzw. Eigentümer einer Wohneinheit in einem der betrachteten Quartiere haben keineswegs den ermittelten Systempreis aus Kapitel 6.1.4 oder 6.1.5 zu zahlen. Insbesondere in Mietverhältnissen ist nur ein Teil dieser Kosten anrechenbar. Für die künftige Entwicklung der Kosten, die die Endverbraucher*innen zu zahlen haben, wird es entscheidend darauf ankommen, ob die Stadt Frankfurt am Main regulierend Vorgaben (z. B. zu einer ausschließlich öffentlichen Versorgung bzw. zur Abrechnung mit Wasserzählern) zur Betriebswasserversorgung erlässt.

In Abhängigkeit von der Betriebswasserherkunft kommen in den betrachteten Quartieren unterschiedliche Betreiber der Versorgung in Betracht:

- Das aufbereitete Mainwasser wird durch einen öffentlichen Betreiber (Konzessionär Mainova) im Quartier angeliefert. Dieser stellt auch die anfallenden Kosten in Rechnung.
- Wird das Betriebswasser innerhalb eines Quartiers aus Grauwasser gewonnen, sind, wenn kein öffentlicher Grund für Leitungssysteme genutzt werden muss, zwei Alternativen denkbar, entweder ein öffentlich beauftragter Betreiber (z.B. ABGnova) oder ein privater Betreiber. Als privater Betreiber denkbar ist z.B. das zuständige Unternehmen der Wohnungswirtschaft (z.B. Nassauische Heimstätte) bzw. die Grundstücksgemeinschaft oder ein Unternehmen, das den Betrieb von der Wohnungswirtschaft oder von der Grundstücksgemeinschaft pachtet oder anders beauftragt wird.
- Würde das Betriebswasser aus Grundwasser gewonnen (bzw. anteilig aus Regenwasser) wären die gleichen Akteurskonstellationen denkbar wie bei der Grauwasservariante. Vorausgesetzt, die Versorgung mit Betriebswasser erfolgt ohne Nutzung öffentlichen Grundes oder der Konzessionsvertrag lässt dies zu.

Zur Auswahl stehen in den Quartieren verschiedene Abrechnungsmodelle:

- eine Bruttomiete, die Pauschalkosten für die Nebenkosten insgesamt umfasst (sog. Flatrate)
- die jährliche Umlage anfallender Kosten im Rahmen der Mietnebenkosten, im Regelfall mit monatlichen Vorauszahlungen

Die jährliche Umlage der anfallenden Kosten kann nach sehr unterschiedlichen Modellen z.B. mit einer Differenzierung nach Grund- und Arbeitstarif (vgl. Tabelle 71 im Anhang 6.1.4, vgl. Kapitel 1.10) erfolgen. Die Einführung von nach Grund- und Arbeitsentgelt unterscheidenden Tarifmodellen wird (aufgrund von möglichen, aber nicht-beabsichtigten Effekten hinsichtlich sozio-ökonomischer Umverteilungen, vgl. (Krauß 2015) im Folgenden zur Vereinfachung der Darstellung nicht betrachtet. Bestimmende Größe in den Abrechnungen kann z.B. die Zahl der Personen in einem Haushalt oder deren Wasserverbrauch sein, aber auch die (derzeit für die Umlagenabrechnung weniger übliche) Wohnfläche des Haushalts.

Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Günthersburghöfe

Für die Mieter kann die Betriebswasserversorgung auf Basis von Mainwasser oder Grauwasser in den Günthersburghöfen kostenmäßig eine Alternative zur konventionellen Wasserinfrastruktur darstellen.

Im Neubauquartier sind die Kosten für die zusätzlichen Leitungen und die weiteren Druckerhöhungsanlagen in den Gebäuden nicht umlagefähig, sondern in der Miete enthalten.

Überwiegend (70 %) werden in den Günthersburghöfen sozial privilegierte Schichten Wohneigentum erwerben. Aufgrund der Auflagen der Stadt Frankfurt am Main wird jedoch zu 30 % geförderter Wohnungsbau erfolgen (je zur Hälfte wird das Klientel des

Mittelschichtensprogramm berücksichtigt werden und die Klientel des sozialen Wohnungsbaus).

In mehreren Kostenrechnungen wurden exemplarisch zwei Fälle betrachtet:

- ein 3-Personenhaushalt (Mittelschicht, 2 Erwachsene mit Kleinkind)
- ein sozial schwacher 5-Personenhaushalt (2 Erwachsene, 3 schulpflichtige Kinder)

Anhand der Beispielsrechnungen in Anhang 6.1.4 (Tabelle 72 bis Tabelle 75) wird deutlich, dass es sehr entscheidend vom jeweils gewählten Umlagenschlüssel abhängt, wie hoch die Kosten für die Betriebswasserversorgung sind. Für die Günthersburghöfe etwa wird der 3-Personenhaushalt jährlich bei personen- bzw. flächenbezogener Abrechnung insgesamt € 403,65 für Wasser/Abwasser zu zahlen haben, bei verbrauchsbezogener Abrechnung nur € 298,92, wenn Mainwasser als Betriebswasser geliefert wird. Wird die Betriebswasserversorgung über Grauwasser sichergestellt, so erniedrigen sich die Kosten auf € 343,48 bei personen- bzw. flächenbezogener Abrechnung; verbrauchsbezogen betragen sie € 321,55. Der betrachtete 5-Personenhaushalt würde bei Grauwasser verbrauchsbezogen jährlich eine Nebenkostenabrechnung für Wasser/Abwasser über insgesamt € 321,55 erhalten, bei personenbezogener Abrechnung hingegen 572,47 und bei verbrauchsbezogener Abrechnung € 523,11.

Eine Abrechnung nach der tatsächlich im Haushalt verbrauchten Menge an Trink- und an Betriebswasser erscheint zunächst als besonders gerechte Lösung. Solange Gebühren für die zusätzlichen Zähler in der aktuellen Höhe anfallen, wird die gebrauchsgerechte Abrechnung mit diesen „unproduktiven“ Zusatzkosten jedoch möglicherweise abgelehnt werden (vgl. Maaß et al. 2017). Aus den beiden betrachteten Gebieten alleine lässt sich noch kein eindeutiges Bild gewinnen: Teilweise erhöhen sich bei einer Betriebswasserversorgung die Nebenkosten für Wasser/Abwasser, im Grauwasserfall können sie sich aber auch verringern. Auch der derzeit höhere Mehrwertsteuersatz für Betriebswasser, der in den Modellrechnungen ausgeklammert wurde, kann zu Mehrbelastungen der Haushalte führen.

Die Miete, aber auch große Teile der Nebenkosten (z. B. Wasser) werden bei den sozial schwachen Haushalten im Allgemeinen von der Allgemeinheit getragen, entweder über das Sozialamt oder (bei Empfänger*innen von Hartz IV) über das Jobcenter (das Wasserkosten ebenso wie die Miete, anders als z. T. die Energiekosten, begleicht). Eine Kostenverringerung bei den Wasserkosten für diese Haushalte, die Folge einer Realisierung der Betriebswasserversorgung sein könnten, würde vermutlich von den Steuerzahler*innen begrüßt werden.

Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Heimatsiedlung

Nach Auskunft des Siedlungsträgers wird der Wohnraum in der Heimatsiedlung mittlerweile überwiegend als Sozialwohnungen genutzt. Für die betroffenen Haushalte wird die Miete (wie die zuvor abgehandelten Teile der Nebenkosten) weitgehend von der Allgemeinheit getragen.

Aufgrund der möglichen „Modernisierungsumlage“, die das BGB in § 559 regelt, sind im Wohnungsbestand Investitionen für die Hausinstallation/Grauwasseraufbereitung auf die Miete aufschlagbar. Umgelegt werden könnten folglich:

- bis zu 8 % dieser Kosten im Jahr
- soweit mit einer Instandsetzung verknüpft, werden 30 % davon abgezogen

Grundsätzlich bietet es sich für die Wohnungswirtschaft an, sich die investierten Kosten für die zusätzlich installierte Betriebswasserversorgung mit Hilfe der Modernisierungsumlagen mit der Mietzahlung (soweit wie gesetzlich zulässig) von den Mietparteien zurückzahlen zu lassen. Diese Kosten werden in der Heimatsiedlung für die Unterkunft von den Stellen übernommen, die nach Sozialgesetzbuch zuständig sind.

Die hohen Investitionskosten für Grauwasser würden besonders erheblich zu einem Mietanstieg beitragen, der so nur neu einziehende Mietparteien betrifft. Bei bereits bestehenden Mietverhältnissen kann die Nettomiete über die Modernisierungsumlage um etwa 20 Euro monatlich steigen könnte). Hinsichtlich der vollen Umlegung der Investitionskosten auf die Miete (bei neu abzuschließenden Mietverträgen) könnte evtl. seitens des Vermieters überlegt werden, damit die finanzielle Belastung neu einziehender, sozial schwächerer Mietparteien nicht über ein vertretbares Maß ansteigt, die mit dem Grauwasserpfad einhergehenden Transformationskosten gegebenenfalls innerbetrieblich „quer“ zu subventionieren. Andernfalls würde aufgrund wesentlich höherer Mieten, die evtl. vom Sozialamt nicht mehr bezahlt werden, der quartiersbezogene Aufbau der Betriebswasserversorgung unter Rückgriff auf Grauwasser dazu führen, dass sich die derzeit recht homogene soziale Zusammensetzung in der Siedlung verändert. Es wurde nicht untersucht, ob hier evtl. Konflikte auftreten können, z.B. weil dann ein Teil der alten Mietparteien befürchtet, dass es zu einer Gentrifizierung kommen könnte, also einer Attraktivitätssteigerung zugunsten zahlungskräftigerer Mieter*innen und deren anschließende Dominanz in der Heimatsiedlung. Die Versorgung mit Betriebswasser aus der Mainwasseraufbereitung hingegen ist für die betrachteten Beispielhaushalte trotz einer Erhöhung der Miete um bis zu 8 % im Saldo insbesondere bei Nutzung eines flächenbezogenen Umlagenmodells ausgeglichen.

Wenn zahlreiche Siedlungen entsprechend eine Betriebswasserinfrastruktur aufweisen und Betriebswasser zur Normalität in Frankfurt am Main wird, wäre eine Akzeptanz für sozial Schwache, die in freie Wohnungen ziehen möchten, hingegen gegeben. Wenn die Wohnungen im Pool der Sozialwohnungen bleiben, werden sie auch bei höherer Miete vergeben werden.

6.2. Ökologische Auswirkungen

Die Bereitstellung von Trink- oder Betriebswasser erfordert Aufwendungen für den Bau der erforderlichen Infrastruktur (z.B. Leitungsnetze) und den Betrieb der Aufbereitungs- und Verteilungsanlagen. Diese Aufwendungen sind immer auch mit Umweltauswirkungen verbunden, die durch die Bereitstellung der Betriebsmittel (z.B. Strom, Chemikalien), die Entsorgung anfallender Abfälle sowie die Produktion der benötigten Materialien für die Infrastruktur entstehen. Daher sollte beim Vergleich verschiedener

Varianten der Wasserversorgung dieser ökologische „Aufwand“ mit betrachtet werden. Dabei entsteht ein Großteil dieser Umweltwirkungen nicht direkt im Wasserwerk oder im Verteilsystem, sondern in vorgelagerten und nachgelagerten Prozessen, z.B. im Kraftwerk (Stromerzeugung), bei der Gewinnung von Rohstoffen (z.B. Erdölförderung für Produktion von Plastikrohren) oder bei der Abfallentsorgung (Verbrennung). Daher ist eine übergreifende Betrachtung der technischen Systeme mitsamt der relevanten vor- und nachgelagerten Prozesse notwendig, um alle möglichen Umweltfolgen zu erfassen.

Eine geeignete Methodik zur systematischen Erfassung dieser Umweltwirkungen ist die Ökobilanz. Sie ermöglicht eine definierte Vorgehensweise nach ISO-Standard (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006) und bietet durch die weite Fassung der Systemgrenzen die Möglichkeit, vor- und nachgelagerte Prozesse hinreichend genau zu erfassen. Darüber hinaus liefert sie eine sehr gute Vergleichbarkeit von verschiedenen Systemvarianten über den quantitativen Bezug aller Umweltwirkungen auf eine gemeinsame funktionelle Einheit. In Verbindung mit den wissenschaftlich abgeleiteten Indikatorsystemen zur Bewertung verschiedener Umweltwirkungen liefert die Ökobilanz damit eine gute Grundlage für den Vergleich der Umweltwirkungen technischer Systeme. Einschränkend ist anzumerken, dass die Ökobilanz per Definition eine globale Bewertung aller potenziellen Umweltwirkungen anhand von allgemein gültigen Umweltindikatoren vornimmt und daher nicht für die lokale Betrachtung von tatsächlichen Umweltfolgen geeignet ist.

In der nachfolgenden Studie werden die Umweltwirkungen der verschiedenen Varianten zur Wasserversorgung in den zwei Fallstudien Neubaugebiet (Günthersburghöfe) und Bestandsgebiet (Heimatsiedlung) anhand einer Ökobilanz ermittelt und verglichen. Als Indikator dient dafür der CO₂-Fußabdruck, der die Emission von Treibhausgasen abbildet und damit stellvertretend für den Aufwand an fossilen Energieträgern steht. Die Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist vorrangiges Ziel der EU und der Bundesregierung und bildet damit einen wichtigen Aspekt der übergeordneten Umweltpolitik ab. Weitere Wirkungskategorien werden in dieser Ökobilanz nicht betrachtet.

Nachfolgend wird die Methodik der Studie kurz zusammengefasst und die Ergebnisse erläutert. Eine detaillierte Beschreibung des methodischen Ansatzes angelehnt an die Vorgaben des ISO-Standards und eine Auflistung aller Eingabedaten ist im Anhang zu finden (Anhang 6.2).

6.2.1. Methodik für die ökologischen Auswirkungen

Diese Ökobilanz erhebt den CO₂-Fußabdruck der verschiedenen Varianten der Wasserversorgung in den zwei Fallgebieten. Die Systemgrenzen der Studie enthalten die Aufwendungen für Förderung, Aufbereitung und Verteilung des Wassers sowie die Entsorgung dabei anfallender Abfälle und zusätzlich benötigte Infrastruktur (Abbildung 16). Dabei wird für jedes Gebiet eine Referenzvariante (Trinkwasser) mit zwei Varianten zur Betriebswasserversorgung (Mainwasser bzw. Grauwasser) verglichen. Bei der Be-

trachtung der Grauwasservariante beinhaltet die Bilanz auch die vermiedenen Aufwendungen der Behandlung des Grauwassers im Abwassersystem (Kanalnetz und Klärwerk), die dieser Variante als Gutschrift abgezogen werden.

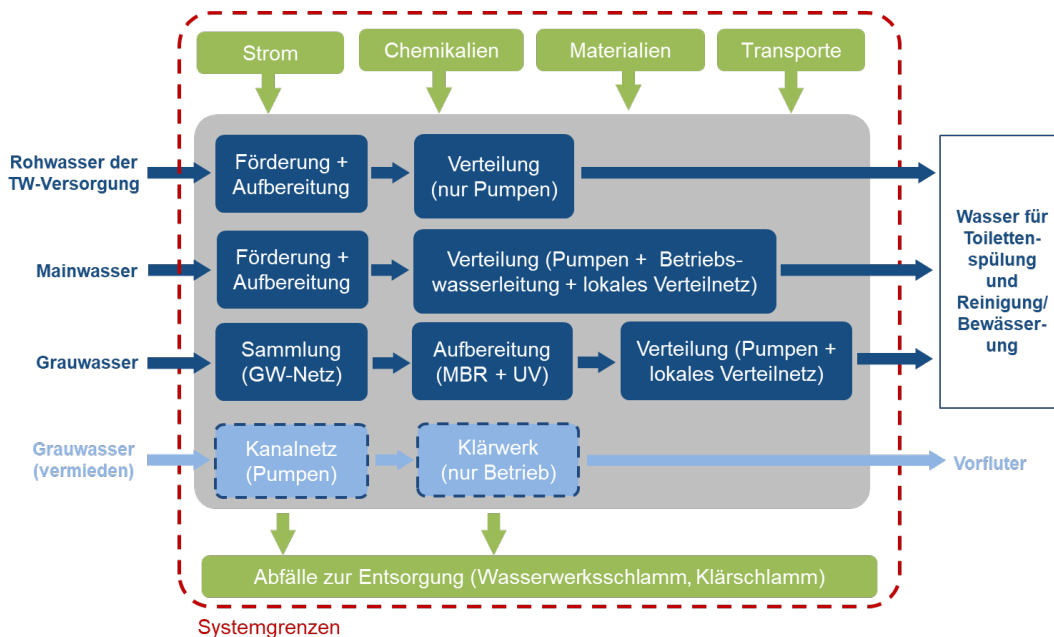


Abbildung 16: Systemgrenzen der Bilanzierung für den CO₂-Fußabdruck

TW: Trinkwasser, GW: Grauwasser, MBR: Membranbioreaktor; UV: UV-Desinfektion

Folgende Eingabedaten wurden für die Studie verwendet (Anhang 6.2.2):

- Daten für die Referenzvariante „Trinkwasser“ wurden vom Wasserversorger erhoben und bilden die Betriebsdaten des Jahres 2018 ab. Dabei werden hier nach Vorgabe des Versorgers für beide Gebiete die Wasserwerke Goldstein und Hinkelstein sowie eine Einspeisung von Wasser aus dem Hessischen Ried umfänglich bilanziert, inklusive der Verteilung bis zu den Gebieten. Berücksichtigt wird auch die Infiltration von aufbereitetem Oberflächenwasser des Mains und des Rheins im Vorfeld der Wasserwerke und die damit in Verbindung stehenden Aufwendungen für die Oberflächenwassergewinnung, Aufbereitung, Transport und Infiltration. Mögliche zukünftige Erweiterungen der Trinkwasseraufbereitung bzw. des Verteilungsnetzes wurden hier nicht betrachtet.
- Die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ bildet die Mainwasseraufbereitungsanlage Niederrad ab (Betriebsdaten 2018), eine neue Betriebswasserleitung zum Gebiet (anteilig) und das neu zu errichtende lokale Verteilnetz vor Ort. Die Auslegung des neuen Leitungsnetzes beruht auf Planungen des ISOE (vgl. Kapitel 5.1 und 6.1). Dabei sind auch mögliche Einsparungen im Trinkwassernetz auf Gebäudeebene berücksichtigt. Für den Umbau der Leitungssysteme im Bestand (Heimatsiedlung) wird aufgrund des höheren Aufwands ein pauschaler Aufschlag von 20-30 % erhoben (siehe Anhang).

- Die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ beinhaltet die Sammlung des Grauwassers vor Ort, die Aufbereitung (Verfahren: Membranbioreaktor mit UV-Desinfektion) und die Verteilung im Gebiet. Dabei werden sowohl das Grauwasser-Sammelnetz als auch das Verteilnetz für Betriebswasser auf Grundlage von Planungsdaten des ISOE bilanziert (vgl. Kapitel 6.1, 7.1), ebenfalls unter Berücksichtigung möglicher Einsparungen im Trink- und Abwassernetz und mit einem prozentualen Aufschlag im Bestandsgebiet. Annahmen zu Betriebsdaten der Grauwasseraufbereitung wurden anhand einer vergleichbaren Großanlage zum Grauwasserrecycling getroffen (Kocks Consult GmbH 2018). Die Einsparungen im Abwassersystem wurden angelehnt an den Betrieb des Klärwerks Niederrad der Stadtentwässerung Frankfurt am Main bilanziert (Theilen und Eichenauer 2016). In den Varianten wird der CO₂-Fußabdruck in seiner Gesamtheit abzüglich der Einsparung im Abwassersystem dargestellt und in kg CO₂-eq/m³ angegeben.
- CO₂-Emissionen bei der Stromproduktion wurden nach Angaben des Versorgers auf Basis des eingekauften Strommix 2018 erfasst. Weitere Hintergrunddaten zur Bereitstellung von Chemikalien, Material, zur Entsorgung von Abfällen und zu anfallenden Transporten sind einer Ökobilanz-Datenbank entnommen (Ecoivent 2017).

Als Indikator wird hier das Treibhauspotenzial nach den Faktoren der IPCC über einen Zeithorizont von 100 Jahren verwendet (IPCC 2014). Die Bilanzierung erfolgte mit der Ökobilanz-Software UMBERTO® LCA+ (IFU 2018).

6.2.2. Auswirkungen auf den CO₂-Fußabdruck

Die Auswertung der Ergebnisse für den CO₂-Fußabdruck erfolgt getrennt für die beiden Fallstudien und beinhaltet jeweils die drei betrachteten Varianten sowie eine Sensitivitätsanalyse zum verwendeten Strommix.

Neubaugebiet (Günthersburghöfe)

Der CO₂-Fußabdruck der Referenzvariante Trinkwasser beträgt für das Neubaugebiet 0,23 kg CO₂-eq/m³ (Abbildung 17). Dieser Aufwand setzt sich zusammen aus 49 % für den Stromverbrauch in der Aufbereitung sowie 30 % Strom für Verteilung und 21 % für die Betriebsmittel und die Entsorgung anfallender Abfälle.

Die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ hat einen CO₂-Fußabdruck von 0,44 kg CO₂-eq/m³ (+92 % gegenüber der Referenz). Davon entfällt 20 % auf den Stromverbrauch in der Aufbereitung sowie 29 % Strom für Verteilung, 26 % für Betriebsmittel und Abfallentsorgung und 24 % für das neu zu errichtende Betriebswassernetz. Auffallend neben dem höheren Gesamtstromverbrauch dieser Variante durch die aufwändige Verteilung mit Druckerhöhungsanlage vor Ort sind die hohen Aufwendungen für Betriebsmittel, vor allem durch die relativ CO₂-intensive Behandlung mit Aktivkohlefiltration in der MWA Niederrad. Darüber hinaus trägt auch der zusätzliche Materialverbrauch für das Leitungsnetz deutlich zum gesamten CO₂-Fußabdruck bei.

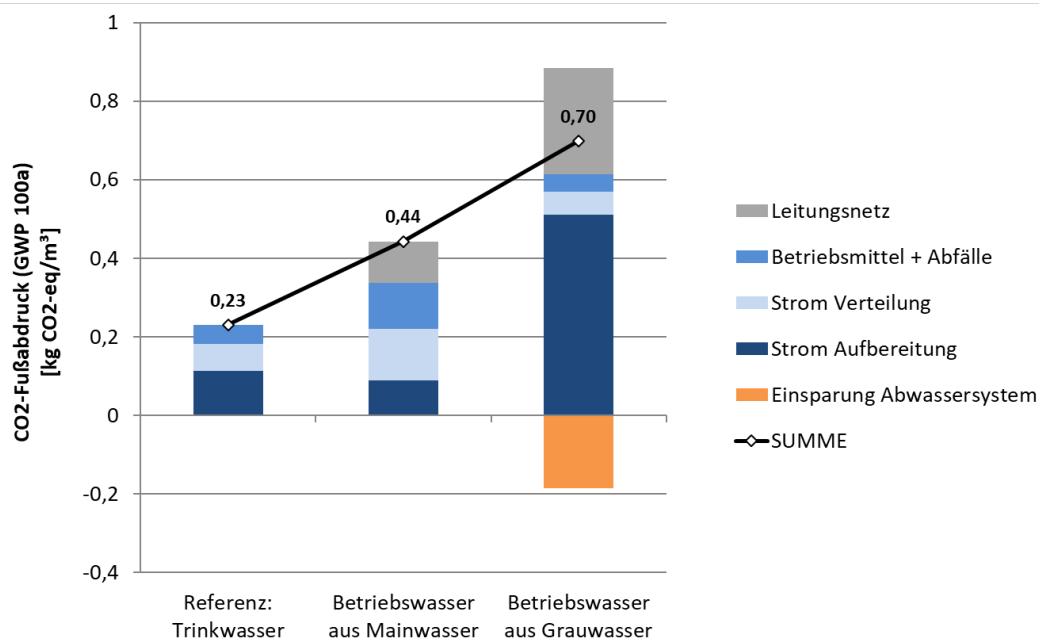


Abbildung 17: CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe

Die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ hat mit 0,70 kg CO₂-eq/m³ den höchsten Umweltaufwand aller Varianten (+202 % gegenüber der Referenz). Dazu trägt vor allem der hohe Stromverbrauch der Grauwasseraufbereitung bei (58 % des gesamten CO₂-Fußabdrucks) sowie das sehr materialintensive Leitungsnetz für Grauwassersammlung und Betriebswasserverteilung (31 %). Strom für Verteilung (7 %) und Betriebsmittel bzw. Abfallentsorgung (5 %) spielen nur eine untergeordnete Rolle. Den hohen Aufwendungen steht eine deutliche Gutschrift im Abwassersystem gegenüber, die den gesamten CO₂-Fußabdruck von 0,88 kg CO₂-eq/m³ um 21 % absenken kann und damit den hohen Stromverbrauch der Grauwasseraufbereitung teilweise kompensiert. Trotzdem entsteht bei der Grauwassernutzung auch in der Summe der höchste CO₂-Fußabdruck aller betrachteten Varianten.

Der CO₂-Fußabdruck lässt sich auf die Einzelprozesse weiter aufschlüsseln (Abbildung 18). Für die Referenzvariante kommt der größte Beitrag vom Wasserwerk Hinkelstein, gefolgt vom Wasserwerk Goldstein und der jeweilig vorgeschalteten Vorbehandlung von Infiltrationswasser in der MWA Niederrad. Das Riedwasser hat nur einen geringen Anteil am hier dargestellten Umweltaufwand. Die Verteilung des Trinkwassers ins Stadtgebiet bildet den größten Einzelposten im CO₂-Fußabdruck dar.

Für die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ ist zu erkennen, dass die Aufbereitung in der MWA Niederrad in der Summe aufwändiger ist als die hier angenommene Aufbereitung des Trinkwassers in der Referenzvariante. Der Grund liegt hier in den Betriebsmitteln der MWA Niederrad, speziell in der dort vorgenommenen Aktivkohlefiltration, die mit 39 % zum Betriebsmittelaufwand beiträgt, aber auch im Fällmittelverbrauch (26 %) und dem Wärmebedarf (23 %). Auch die Verteilung ist deutlich aufwändiger durch den großen Höhenunterschied zwischen MWA und Gebiet und die notwendige Druckerhöhung vor Ort.

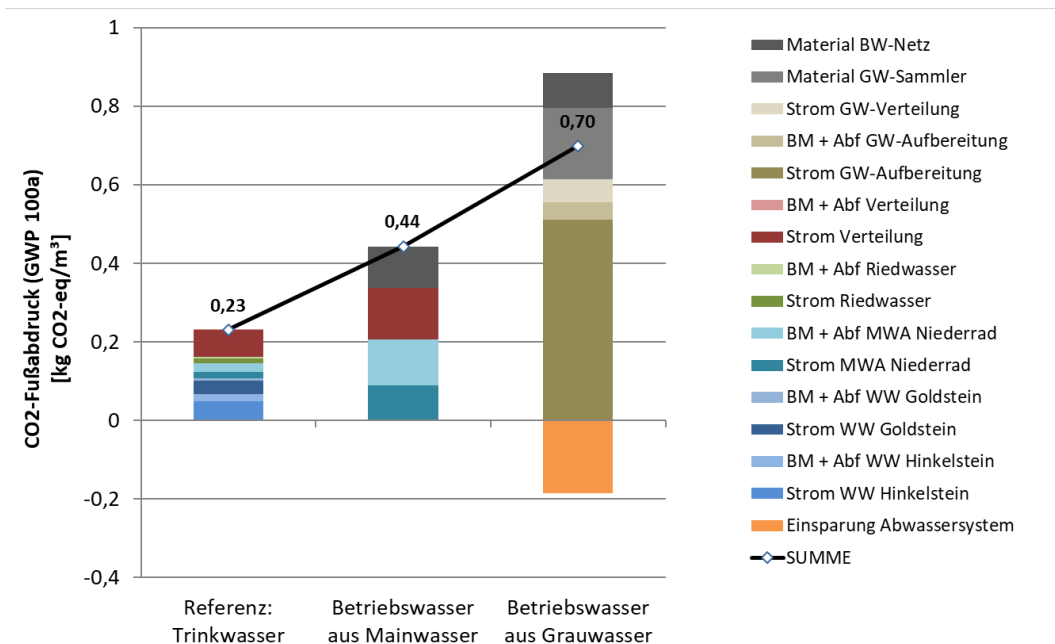


Abbildung 18: CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe, aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen

WW: Wasserwerk, MWA: Mainwasseraufbereitung, BW: Betriebswasser, GW: Grauwasser, BM: Betriebsmittel, Abf: Abfallentsorgung

Für die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ zeigt die Analyse, dass der gesamte Materialaufwand des Leitungsnetzes zu 69 % vom Grauwassersammler kommt und nur zu 31 % vom Betriebswasser-Verteilungsnetz. Letzteres ist etwas weniger aufwändig als in der Variante aus Mainwasser, was vor allem durch die nicht benötigte Transportleitung ins Gebiet zu begründen ist.

Sensitivitätsanalyse des Strommix

Durch den hohen Beitrag des Stromverbrauchs zum gesamten CO₂-Fußabdruck hat der jeweilig angenommene Strommix einen hohen Einfluss auf das Ergebnis dieser Betrachtung. Daher wird in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet, inwiefern die Berechnung mit einem anderen Strommix das Ergebnis beeinflussen kann.

Bei der Verwendung des CO₂-intensiveren durchschnittlichen bundesdeutschen Strommix 2018 nach Daten des BDEW (421 g CO₂/kWh) zeigt sich, dass alle Varianten einen deutlich höheren CO₂-Fußabdruck haben (Abbildung 19). Trotzdem hat weiterhin die Referenz den geringsten Aufwand (0,31 kg CO₂-eq/m³), gefolgt von der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ mit 0,54 kg CO₂-eq/m³ (+71 % gegenüber der Referenz) und der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ mit 0,89 kg CO₂-eq/m³ (+184 % zur Referenz). Obwohl der Strom anteilig eine höhere Bedeutung gewinnt und damit der zusätzliche Aufwand an Betriebsmitteln bzw. Material geringer angerechnet wird, ist die Gesamtaussage des Vergleichs nicht anders als vorher.

Auch im Szenario 2030 mit dem zukünftig prognostizierten Strommix liegt der CO₂-Fußabdruck aller Varianten nur geringfügig unter dem Ergebnis mit dem Strommix

2018 der Hessenwasser. Tatsächlich hat der eingekaufte Strommix 2018 der Hessenwasser schon einen vergleichsweise niedrigen CO₂-Faktor (296 g CO₂/kWh) gegenüber der bundesdeutschen Prognose für 2030 (265 g CO₂/kWh). Auch zukünftig wird bei Hessenwasser der Abschluss von Stromlieferverträgen unter besonderer Berücksichtigung des CO₂-Fußabdruckes erfolgen, so dass zu erwarten ist, dass in 2030 der eingesetzte Strommix unter dem Prognosewert für das Jahr 2030 liegen wird. Die möglichen Einsparungen für diesen strombedingten Teil des Aufwands könnten dadurch höher ausfallen. Die Aussage der Studie bleibt jedoch auch für diesen Fall vergleichbar.

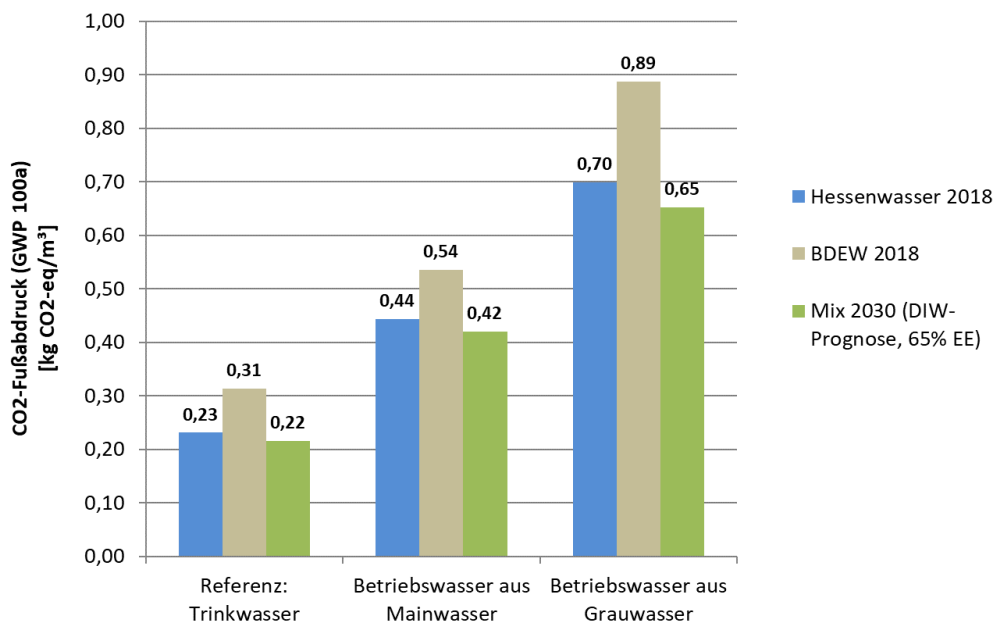


Abbildung 19: Sensitivität des CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Neubaugebiet Günthersburghöfe für verschiedene Strommixe

Bestandsgebiet: Heimsiedlung

Auch für das Bestandsgebiet beträgt der Aufwand in der Referenzvariante 0,23 kg CO₂-eq/m³ (Abbildung 20). Für beide Fallstudien werden in dieser Variante die gleichen Annahmen getroffen, daher ist der CO₂-Fußabdruck für Trinkwasser folgerichtig gleich.

Die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ liegt im Bestandsgebiet bei 0,42 kg CO₂-eq/m³ (+83 % gegenüber der Referenz). Dazu trägt neben dem oben diskutierten Betriebsmittelverbrauch der MWA Niederrad (u. a. Aktivkohle) vor allem das aufwändigere lokale Leitungsnetz zur Betriebswasserverteilung im Gebiet und in den Gebäuden bei. Durch den Neubau bzw. Umbau der Leitungen im Bestand ergibt sich hier ein höherer Aufwand als im Neubaugebiet, so dass das zusätzliche Leitungsnetz 38 % zum gesamten CO₂-Fußabdruck beiträgt. Damit wird deutlich, dass die Varianten mit zusätzlichem Leitungsnetz gerade in Bestandsgebieten einen erheblichen Mehraufwand bedeuten können. Zu beachten ist hier, dass dieser Mehraufwand beim Umbau im Bestand in dieser Studie pauschal abgeschätzt wurde (+20–30 %) und ggf. in detaillierteren Untersuchungen zu bestätigen ist. Der Transport und die Verteilung des Betriebswassers ins Gebiet ist sogar energetisch günstiger als beim Trinkwasser durch den

geringen Höhenunterschied zwischen MWA und Heimsiedlung. Dabei wurde für Trinkwasser hier der durchschnittliche Energiebedarf der Verteilung für die Stadt Frankfurt am Main angenommen, der ggf. bei Lieferung des Trinkwassers in die Heimsiedlung real geringer ausfällt aber nicht gesondert erhoben wurde.

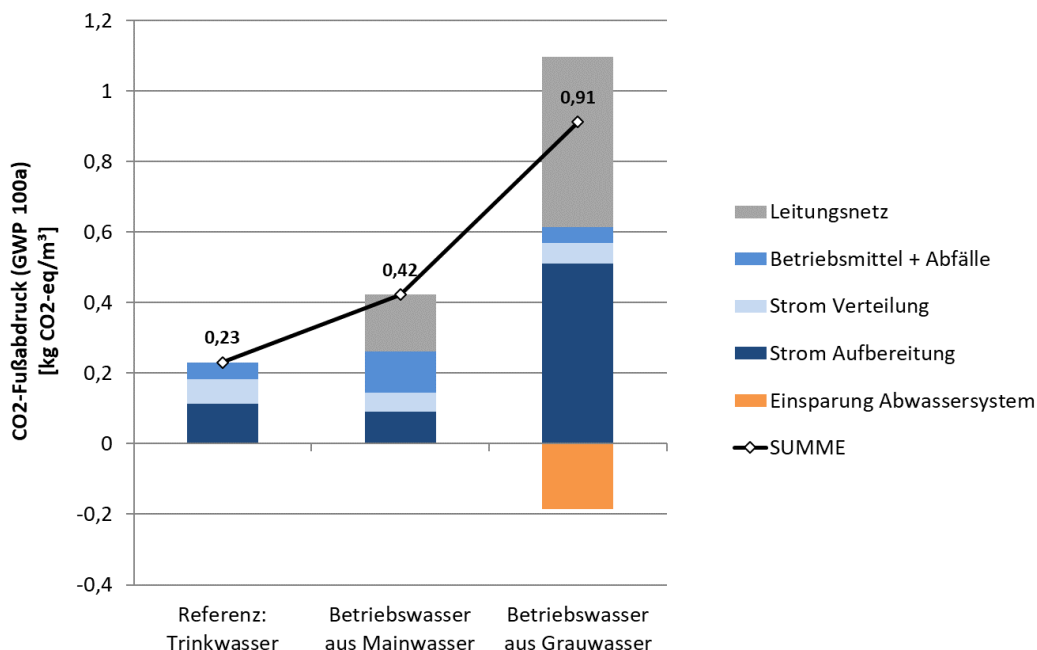


Abbildung 20: CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimsiedlung

Die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ liegt mit einem CO₂-Fußabdruck von 0,91 kg CO₂-eq/m³ auch hier deutlich am höchsten im Vergleich aller betrachteten Varianten (+295 % gegenüber der Referenz). Auch hier ist die Aufbereitung vergleichbar mit dem Neubaugebiet, aber die Aufwendungen für die Leitungsnetze liegen im Bestand erheblich höher. Hier macht das Leitungsnetz 44 % des gesamten CO₂-Aufwands dieser Variante aus, was wiederum an dem Aufschlag für den Umbau im Bestand begründet ist. Durch den ohnehin schon hohen Materialaufwand dieser Variante macht sich dieser Aufschlag im Bestandsgebiet deutlich bemerkbar. Auch hier ist zu beachten, dass der Mehraufwand beim Umbau im Bestand in dieser Studie pauschal abgeschätzt wurde und ggf. in weiteren Untersuchungen zu bestätigen ist. Durch Einsparungen im Abwassersystem lässt sich hier der gesamte CO₂-Fußabdruck von 1,1 kg CO₂-eq/m³ um 17 % absenken und somit teilweise kompensieren.

Die Betrachtung der Einzelprozesse zeigt von der Tendenz her ähnliche Aufteilungen des CO₂-Fußabdrucks wie im Neubaugebiet (Abbildung 21). Sichtbar sind wiederum die hohen Betriebsmittelaufwendungen in der MWA Niederrad, aber auch die hohen Aufwendungen für Infrastruktur in beiden Varianten mit Betriebswassernutzung. Gerade der materialintensive Grauwassersammler kommt durch den pauschalen Aufschlag für Umbau im Bestand auf einen sehr hohen Beitrag.

Interessant ist auch der relative Vergleich der Materialintensität zwischen Neubau- und Bestandsgebiet: Im Bestand ist auch ohne den „Umbau-Aufschlag“ von 20-30 % in dieser Studie mehr Material notwendig, um neue Leitungsnetze zu bauen. Dies liegt unter anderem an der unterschiedlichen Bebauungs- und Einwohnerdichte pro Fläche in den Gebieten. So liegt im Neubaugebiet trotz höherer Einwohnerzahl (3238 Einwohner) die Gesamtlänge des Verteilnetzes im öffentlichen Raum (Straße) bei 2080 m, während sie im Bestandsgebiet (2098 Einwohner) bei 3330 m liegt (Tabelle 80). Diese längere große und damit auch materialintensive Rohrleitung im öffentlichen Raum in Verbindung mit dem pauschalen Aufschlag für den Umbau bedingt, dass die Betriebswasservarianten im Bestandsgebiet einen deutlich höheren Aufwand für den Netzbau haben. Ausgeglichen wird dies bei der Variante Betriebswasser durch den geringeren Aufwand bei der Verteilung, da das Bestandsgebiet günstiger zur MWA liegt und damit weniger Energie beim Transport benötigt wird. Daher ist bei einer Übertragung dieser Ergebnisse auf größere Stadträume auf jeden Fall die Einwohnerdichte sowie die Lage zur MWA mit einzubeziehen.

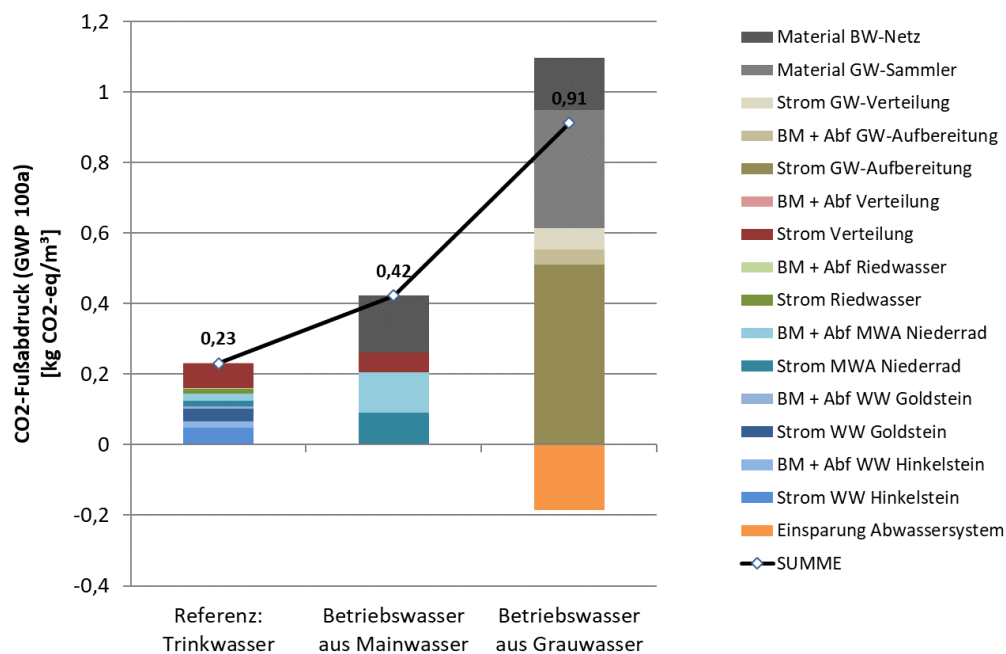


Abbildung 21: CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimatsiedlung, aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen

WW: Wasserwerk, MWA: Mainwasseraufbereitung, BW: Betriebswasser, GW: Grauwasser, BM: Betriebsmittel, Abf: Abfallentsorgung

Sensitivitätsanalyse des Strommix

Die Sensitivitätsanalysen für den Strommix zeigen insgesamt eine geringere Schwankung als beim Neubaugebiet (Abbildung 22). Durch den höheren Einfluss der Infrastruktur im Bestand ist die Bedeutung des Strommix nicht ganz so entscheidend für den gesamten CO₂-Fußabdruck wie im Neubaugebiet. Mit dem BDEW-Strommix 2018 liegen die Betriebswasservarianten um +55 % (Mainwasser) bzw. +252 % (Grauwasser)

über der Referenz. Mit dem Strommix 2030 aus der DIW-Prognose beträgt der Mehraufwand +90 % (Mainwasser) bzw. +302 % (Grauwasser). In beiden Fällen ändert sich die Grundaussage des Vergleichs für dieses Gebiet nicht.

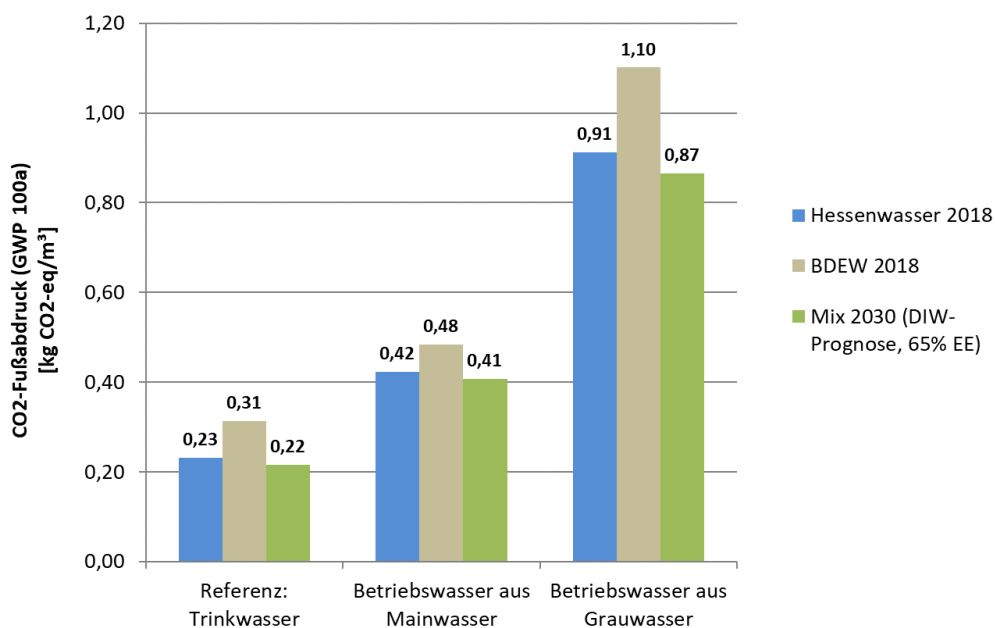


Abbildung 22: Sensitivität des CO₂-Fußabdruck der betrachteten Varianten für das Bestandsgebiet Heimatsiedlung für verschiedene Strommixe

6.2.3. Ökologische Effekte der betrachteten Fallstudien

Bei der Versorgung mit Betriebswasser ist unabhängig von den betrachteten Fallstudien und Varianten unter den getroffenen Annahmen in dieser Studie mit einem höheren Aufwand und damit mit einem höheren CO₂-Fußabdruck des Systems zu rechnen. Im Einzelnen liegt der Mehraufwand bei den Treibhausgasemissionen beim Neubaugebiet zwischen +92 % und +202 % im Vergleich zur Referenzvariante Trinkwasser, im Bestand bei +83 % bis zu +295 % (Tabelle 35). Dabei ist die Variante der Betriebswasserversorgung aus Mainwasser über die MWA Niederrad gerade im Bestand im Vergleich deutlich günstiger einzuschätzen als die lokale Sammlung und Aufbereitung von Grauwasser. Das liegt vor allem an der deutlich aufwändigeren Infrastruktur der Grauwasservariante, vor allem am Abwassernetz zur Sammlung des Grauwassers. Im Neubaugebiet ergeben sich dagegen nur geringe Unterschiede zwischen Mainwasser und Grauwasser, da es weiter von der Mainwasseraufbereitung entfernt ist und vor allem höher gelegen ist (+50 m) und daher sowohl der Aufwand für den Leitungsbau als auch die notwendige Energie zur Verteilung größer ist.

Tabelle 35: CO₂-Fußabdruck für die Fallstudien Neubau und Bestandsgebiet

| Varianten | | Referenz: Trinkwasser | Betriebswasser aus Mainwasser | Betriebswasser aus Grauwasser |
|------------------------------------|---|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Neubaugebiet (Günthersburghöfe) | kg CO ₂ -eq/m ³ | 0,23 | 0,44 (+92 %) | 0,70 (+202 %) |
| <i>Strommix 2030</i> | <i>kg CO₂-eq/m³</i> | <i>0,22</i> | <i>0,42 (+95 %)</i> | <i>0,65 (+203 %)</i> |
| Bestandsgebiet (Heimatsiedlung) | kg CO ₂ -eq/m ³ | 0,23 | 0,42 (+83 %) | 0,91 (+295 %) |
| <i>Strommix 2030</i> | <i>kg CO₂-eq/m³</i> | <i>0,22</i> | <i>0,41 (+86 %)</i> | <i>0,87 (+302 %)</i> |

Im Einzelnen können aus der Betrachtung des CO₂-Fußabdrucks folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Versorgung mit Trinkwasser hat auf Basis der Betriebsdaten von 2018 und der angesetzten Wasserwerke, Infiltrationsanlagen und Verteilsysteme einen CO₂-Fußabdruck von 0,23 kg CO₂-eq/m³ für Strom, Betriebsmittel und die Entsorgung von Abfällen aus der Aufbereitung. Diese Werte werden als Referenz angesetzt unter der Annahme, dass sich die Trinkwasserversorgung der Gebiete auch in Zukunft mit diesen Betriebsaufwendungen realisieren lässt. Ein ggf. notwendiger Ausbau der Trinkwasserversorgung bei steigendem Wasserbedarf ist in dieser Analyse nicht berücksichtigt.
- Die Versorgung mit Betriebswasser aus der MWA Niederrad ist insgesamt aufwändiger in der Aufbereitung, vor allem durch den Einsatz von Aktivkohlefiltration. Zudem trägt die zusätzlich erforderliche Transportleitung und das zusätzliche lokale Verteilnetz sowie je nach Lage des Quartiers der Energieverbrauch für die Verteilung erheblich zum CO₂-Fußabdruck bei. Damit liegt der CO₂-Fußabdruck für Betriebswasser aus Mainwasser bei 0,44 kg CO₂-eq/m³ im Neubau- und 0,42 kg CO₂-eq/m³ im Bestandsgebiet.
- Die Versorgung mit Betriebswasser aus lokalem Grauwasserrecycling ist deutlich aufwändiger im Stromverbrauch der Aufbereitung. Durch Einsparungen im Abwassersystem können diese Aufwendungen jedoch teilweise kompensiert werden. Der hohe Materialaufwand des Leitungsnetzes besonders für die Sammlung des Grauwassers im Gebiet führt jedoch insgesamt zu einem hohen CO₂-Fußabdruck dieser Variante. Er liegt für die Versorgung mit Betriebswasser aus Grauwasser bei 0,70 kg CO₂-eq/m³ im Neubau- und 0,91 kg CO₂-eq/m³ im Bestandsgebiet.
- Im Vergleich zum Neubaugebiet mit verhältnismäßig geringem Aufwand für den Aufbau weiterer Leitungsnetze (reiner Materialaufwand für zusätzliche Rohre) liegen die Aufwendungen für den Umbau im Bestand auch im CO₂-Fußabdruck deutlich höher. Dieser Mehraufwand wurde hier pauschal mit 20-30 % abgeschätzt (siehe Anhang) und erhöht damit den CO₂-Fußabdruck der Infrastruktur erheblich. Gerade für die materialintensive Variante der Grauwassernutzung steigt damit der Aufwand der Infrastruktur deutlich an. Die Annahmen für den Aufwand eines Umbaus im Bestand sind ggf. in weiteren Untersuchungen zu überprüfen.

- Die Einwohnerdichte hat einen direkten Einfluss auf den relativen Materialaufwand pro Einwohner für notwendige zusätzliche Leitungsnetze. Dazu ist die Lage des Quartiers relativ zur Mainwasseraufbereitung von Bedeutung, die den Transportaufwand für das Betriebswasser aus Mainwasser bestimmt. Daher ist bei der Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete sowohl die Einwohnerdichte und als auch die Lage des Quartiers zu berücksichtigen.
- **Sensitivitätsanalysen hinsichtlich des verwendeten Strommix ergeben keine anderen Aussagen des Vergleichs.** Auch im Hinblick auf das Jahr 2030 und einen erhöhten Anteil erneuerbarer Energien liegen die Varianten im Vergleich ähnlich wie für das Basisjahr 2018. Dazu ist anzumerken, dass der eingekaufte Strommix des Wasserversorgers bereits heute im Vergleich zum bundesdeutschen Durchschnitt nach BDEW einen niedrigen CO₂-Faktor aufweist. Tendenziell werden die Betriebswasservarianten mit sinkendem CO₂-Fußabdruck des Strommixes aufwendiger als die Versorgung mit Trinkwasser, da Betriebsmittel und Infrastruktur relativ an Gewicht gewinnen.

Die Untersuchung zeigt, dass eine alternative Betriebswasserversorgung im betrachteten Neubau- bzw. Bestandsgebiet in Frankfurt am Main den Energie- und Materialbedarf und damit auch die Treibhausgasemissionen für diesen Teil der Wasserversorgung deutlich erhöht im Vergleich zur bestehenden zentralen Trinkwasseraufbereitung und -verteilung. Das liegt vor allem an dem dafür benötigten Leitungsnetz und dem Energiebedarf zur Verteilung, aber auch auf der relativ aufwändigen Aufbereitung der alternativen Wasserquellen (Mainwasser bzw. Grauwasser) im Vergleich zur Aufbereitung von Grundwasser in der Trinkwassergewinnung. Ein zukünftiger Ausbau der bestehenden Trinkwasserversorgungsanlagen wurde dabei nicht berücksichtigt. Weitere ökologische Auswirkungen der Betriebswasserversorgung im Vergleich zur zentralen Trinkwasserversorgung in Frankfurt am Main (z.B. Auswirkungen auf den lokalen Wasserhaushalt oder Auswirkungen von Vorhaltemengen aus dem Trinkwassernetz für Nachspeiseeinrichtungen) waren nicht Teil dieser Studie.

6.3. Schlussfolgerung

Die gebietsräumlichen Untersuchungen der Auswirkungen der Substitution von Trinkwasser für die Toilette und die Reinigung von Gegenständen, die bestimmungsgemäß nicht mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen, sowie die Bewässerung durch die Nutzung von Betriebswasser aus Mainwasser bzw. Grauwasser aus leicht verschmutzten Abwasser im Vergleich zu den konventionellen Kosten der Trinkwasserver- und der Abwasserentsorgung haben ergeben, dass der Ersatz des Trinkwassers durch Betriebswasser in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen des jeweiligen Quartiers zu einer geringen Ersparnis bis hin zu einer deutlichen Verteuerung führen kann. Diese reichen von 94 % der Systemkosten des konventionellen Systems bei der Nutzung von Mainwasser in den Günthersburghöfen auf bis zu 203 % bei der Nutzung von Grauwasser in der Heimatsiedlung.

Die Kosten der Wasserver- und Abwasserentsorgung eines Quartiers sind bei den betrachteten Varianten von den räumlichen Strukturen (Bebauung, Geschosszahl, Einwohnerzahl/Quartier etc.) unmittelbar abhängig. Hinsichtlich der Variante „Mainwasser“ spielt daneben auch die Entfernung des Quartiers zur Produktionsstätte und der Auslastungsgrad der zur Belieferung notwendigen Transportleitung neben den oben bereits angeführten Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle. Im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurde aufgezeigt, dass die spezifischen Systemkosten in hohem Maße abhängig vom Auslastungsgrad der Transportleitung sind. Unberücksichtigt hierbei bleiben mögliche Zusatzkosten (z.B. Spülaufwand) bei einer zu geringen Auslastung der Transportleitung.

Rückschlüsse auf die Kostenentwicklung des bestehenden Trinkwassersystems bei einem flächendeckenden Ersatz von Trink- durch Betriebswasser können nur eingeschränkt gezogen werden. Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bei einem Ersatz des Trinkwassers für Toilette, Reinigung und Bewässerung eine Ersparnis in Form des aktuell gültigen Trinkwasserpreises erfolgt.

In den Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass bei einem großräumigen Ersatz über das gesamte konventionelle Trinkwassersystem sich allerdings eine solche, auf Quartiersebene berechnete Einsparung nicht ergeben würde, da durch die Reduktion der abgegebenen Trinkwassermengen die Fixkosten für Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Speicherung und Verteilung des Trinkwassers auf eine kleinere Abgabemenge verteilt und somit der Wasserpreis voraussichtlich ansteigen würde. Der Gesamteffekt, welcher sich hierdurch systemseitig ergibt, müsste, falls eine flächendeckende Betriebswassernutzung in Betracht gezogen wird, zusätzlich untersucht werden.

Je nach verwendetem, in der Regel (miet-)vertraglich mit den Haushalten vereinbartem Umlageschlüssel kann eine Betriebswassernutzung in günstigen Konstellationen zu einer Einsparung bei den umgelegten Nebenkosten in den Haushalten führen. Es hängt jedoch von Einzelfällen ab, inwieweit hier soziale Härten entstehen. Bei den Empfängern von Sozialhilfe bzw. Hartz IV (durchgehend in der Heimatsiedlung) werden die Kosten für Wasser durch das Sozialamt bzw. Jobcenter übernommen, so dass individuelle Härten ausgeglichen werden.

Aus sozio-ökonomischen Gründen haben aktuell 49 % der Frankfurter Miethaushalte Anspruch auf eine geförderte Wohnung – entweder aus dem klassischen Sozialwohnungsbau oder aus dem städtischen Mittelschichtprogramm, das als „Frankfurter Programm für familien- und senioren-gerechten Mietwohnungsbau“ als zweiter Förderweg etabliert worden ist. Eventuell könnte für die in den Quartieren wohnende Mittelschicht eine Mieterhöhung um 8 % aufgrund der Modernisierungsumlage eine finanzielle Herausforderung darstellen, wenn gleichzeitig auch eine energetische Modernisierung stattfindet. Neuzuzügler*innen müssten hingegen bei Abschluss eines Vertrags eine nicht bei 8 % gedeckelte höhere Miete in Kauf nehmen, die den Anteil der gestiegenen Systemkosten des Gebäude- bzw. Quartiereigners widerspiegelt.

Ein neben der konventionellen Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung zu betreibendes Betriebswassersystem (aufbereitetes Main- oder Grauwasser) erfordert bei Neu- und in Bestandsbauten einen höheren Emissionsaufwand als das bestehende konventionelle Referenzsystem. Der höhere Emissionsaufwand der Betriebswasservarianten basiert auf der zusätzlich benötigten Infrastruktur und dem erforderlichen Energieaufwand für deren Betrieb (materieller und energetischer Aufwand). Vorteilhaft stellt sich bei den untersuchten Varianten eine Betriebswassernutzung aus aufbereitetem Mainwasser dar. Dies resultiert auf dem deutlich geringeren Infrastrukturaufwand in den untersuchten Quartieren gegenüber einer Betriebswasserversorgung aus aufbereitetem Grauwasser, da hier noch ein zusätzliches Infrastrukturnetzwerk zur Sammlung und Aufbereitung des Grauwassers erforderlich ist. Unter besonderer Berücksichtigung siedlungsstruktureller Eigenschaften in den Quartieren nähern sich mit zunehmender Entfernung des Quartiers zur MWA die Emissionen der MWA- und der Grauwasservarianten durch den höheren Aufwand für den Leitungsbau und die eingesetzte Energie zum Transport des aufbereiteten Mainwassers an.

Bei der Berechnung der CO₂-Emissionen für das konventionelle Trinkwasserversorgungssystem wurden auch anteilmäßig die Aufwendungen für die Infiltration im Hessischen Ried, die Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Speicherung und Verteilung des Trinkwassers und die Entsorgung von Reststoffen berücksichtigt. Für die eingesetzten Betriebswasserarten wurden die mit ihrer Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Transport und Verteilung eingesetzten Betriebsmittel gleichfalls berücksichtigt. Zusätzlich wurde auch die Abwasserbeseitigung aus den Quartieren quantifiziert und einberechnet. Mit der dezidierten Aufwandsberechnung für die Einzelprozesse im konventionellen Trinkwasserversorgungs- und Abwasserbeseitigungssystem können in Verbindung mit den Einzelprozessen in der Betriebswasserversorgung die die CO₂-Emissionen bestimmende Kenngrößen herausgefiltert werden.

Das konventionelle Trinkwasserversorgungs- und Abwasserbeseitigungssystem liefert mit einer CO₂-Emission von 0,23 g CO₂/kWh gegenüber der Mainwasservariante von 0,42 g CO₂/kWh und der Grauwasservariante von 0,91 g CO₂/kWh für die Fallstudie Neubau (Günthersburghöfe) einen sehr positiven Ansatz. Bei der Grauwasservariante wurde in den Berechnungen das verminderte Abwasseraufkommen berücksichtigt.

Der von Hessenwasser in 2018 eingesetzte Strommix weist mit 296 g CO₂/kWh gegenüber dem Bundesdurchschnitt im Jahr 2018 (421 g CO₂/kWh) einen sehr geringen CO₂-Fußabdruck auf. Der bezogene und in die Berechnung eingehende Strommix hat durch den hohen Anteil des Strombedarfs an der Trink- und Betriebswasserversorgung unmittelbar Einfluss auf die Ökobilanz. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse konnte nachgewiesen werden, dass sich die Treibhausgasemissionen der Betriebswasservarianten verschlechtern, wenn sich der CO₂-Fußabdruck des eingesetzten Strommixes reduziert, da gegenüber Trinkwasser sich die zusätzlich erforderlichen Betriebsmittel und die Infrastruktur verstärkt niederschlagen.

Eine allgemeingültige Aussage darüber, welche Betriebswasservariante unter ökologischen Gesichtspunkten zur Substitution von Trinkwasser besser geeignet ist, ist von der Ausgestaltung des Quartiers und seiner räumlichen Lage zu den Produktionsstätten der Betriebswassererzeugung abhängig. Weitere ökologische Auswirkungen der Betriebswasserversorgung im Vergleich zum bestehenden Referenzsystem in der zentralen Trinkwasserversorgung der Stadt Frankfurt am Main (z. B. Auswirkungen von Vorhaltenmengen aus dem Trinkwassernetz für Nachspeiseeinrichtungen) waren nicht Teil dieser Studie.

7. Ermitteltes Trinkwassersubstitutionspotenzial für die Stadt Frankfurt am Main

7.1. Szenarienentwicklung

7.1.1. Hintergrund

Die Technik der Szenarienentwicklung wird in dieser Studie verwendet, um eine transparente und ganzheitliche Betrachtung zukünftiger Betriebswasserpotenziale zu ermöglichen. Bei der Entfaltung der Szenarien wurde darauf geachtet, dass innerhalb eines Szenarios keine Widersprüche auftreten, Entwicklungen sich nicht gegenseitig aufheben, diese konsistent in ihrer Ausprägung sind und eine größtmögliche Übereinstimmung aufweisen. Um Aussagen zur langfristigen Realisierung des theoretischen Betriebswasserpotenziales zu machen, wurden mit dem Auftraggeber Szenarien entwickelt, die gemeinsam mit den Praxispartnern aus den Frankfurter Ämtern und Wasserunternehmen präzisiert und weiter ausgestaltet wurden.

Für das Jahr 2050 wurden zwei kontrastierte Entwicklungspfade abgebildet:

- Das Szenario „Trend“: schätzt die vermutete Trinkwassersubstitution ein unter den aktuell zu erwartenden/angelegten Entwicklungen
- Das Szenario „Besondere Anstrengungen“: schätzt die vermutete Trinkwassersubstitution ein unter Annahme besonderer Handlungsmaximen und höheren Aufwendungen aller öffentlicher und privater Akteure.

Beide Szenarien stellen eine mögliche zukünftige Entwicklung entlang von technischen und (ordnungs-)politischen Maßnahmen dar. Einvernehmlich war, dass ein Szenario „Status quo“ basierend auf den aktuellen Aktivitäten zum Thema Betriebswassernutzung in 2018 nicht erforderlich ist. Der Status quo beschreibt vielmehr den aktuellen Ausgangszustand, von dem aus die alternativen Szenarien fortentwickelt werden. Häufig werden drei Grundtypen von Szenarien entwickelt, mit deren Hilfe unterschiedlich ausgeprägte, denkbare und empirisch wahrscheinliche Szenarien (z. B. Best case, Worst case und Trend) beschrieben.

Abbildung 23 veranschaulicht das Verhältnis der gewählten Szenarien hinsichtlich der Zeitachse und des Entwicklungsraums; der sich in die Zukunft öffnende Trichter ist ein Symbol für die zunehmende Unsicherheit der Aussagen, aber auch die größer werdende Komplexität. Grundvoraussetzung ist, dass alle Rahmenbedingungen zum Ausgangspunkt definiert sind. Dabei unterscheiden sich die Szenarien „Trend“ und „Besondere Anstrengungen“ sehr bewusst recht grundlegend: Das „Trendszenario“ ist explorativ angelegt und schreibt die vorfindlichen Entwicklungen im Sinne einer Trendverlängerung fort; es trägt insofern eher konservative Züge und entspricht dem Entwicklungstrend in der Vergangenheit. Das Szenario, das gemäß den voraussichtlich aktuellen Aktivitäten zur stärkeren Nutzung von Betriebswasser zu erwarten ist, ist folglich der „Trend“ und liegt entsprechend in der Mitte des Trichters.

Wird gegenüber dem Ausgangspunkt der Status quo (2018) als Beharrungszustand angesehen, so läge die Entwicklung unterhalb der Mitte des Trichters und beschriebe ein Worst-case-Szenario, also die ungünstigste zukünftige Entwicklung. Als Worst-case-

Fall könnte angenommen werden, dass der Betrieb der Mainwasseraufbereitung bzw. die daraus stattfindende aktuelle zentrale Versorgung mit Betriebswasser für ausgewählte Nutzer ebenso aufgegeben wird wie dezentrale Regen- und Grundwassernutzungen usw. Mit dem Auftraggeber besteht Einigkeit, dass die Untersuchung eines derartigen Falls „Ausstieg aus dem Betriebswasser“ nicht instruktiv ist; er wird in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Das Szenario „Besondere Anstrengungen“ (ein Best-case-Szenario) zeichnet sich hingegen dadurch aus, dass dort verstärkte Bemühungen um eine Betriebswasserversorgung in Frankfurt am Main bewusst ins Zentrum gestellt sind. Die Substitution von Trinkwasser wird in diesem Szenario selbst als eine wünschenswerte Entwicklung betrachtet; folglich spiegelt dieses Szenario, das eher am Rand des Trichters liegt, die Frage nach einer bestimmten Ausformung einer „wünschbaren Zukunft“ wider und nimmt insofern spezifische Werte und Interessen auf; es ist als tendenziell normativ verfasst einzuordnen. Mit seiner Hilfe kann herausgearbeitet werden, wie ein bestimmter Zustand in der Zukunft erreicht werden kann. Normative Szenarien werden üblicherweise eingesetzt, um aufzuzeigen, wie bestimmte Ziele erreicht werden können. Sie haben damit eine Funktion für die Strategieentwicklung und erfordern nicht, dass das betrachtete Ziel und die dahinter liegenden Werte und Interessen geteilt werden.

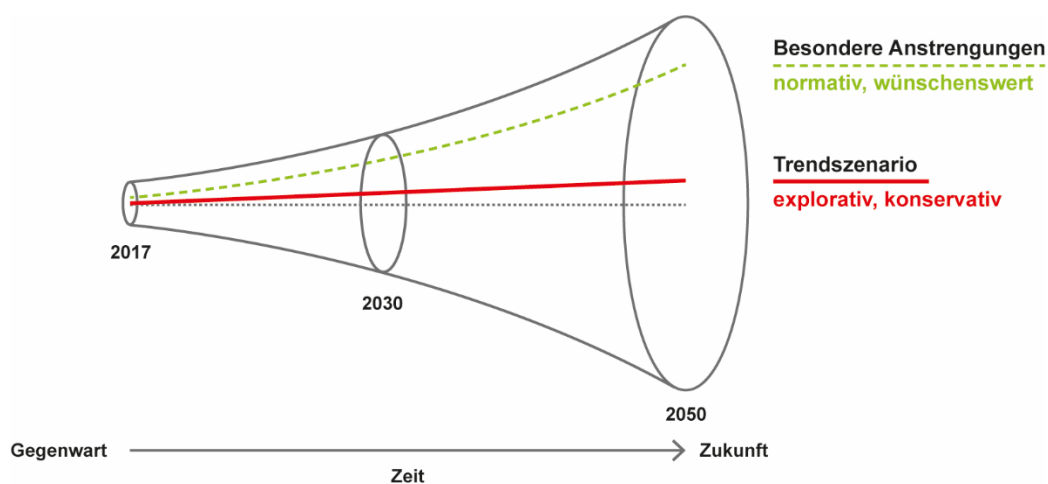


Abbildung 23: Darstellung unterschiedlicher Szenarien

Quelle: Angepasst aus Kerber et al. (2014)

7.1.2. Vorgehensweise bei der Entwicklung der Szenarien

Das Ziel der Szenarioentwicklung war die Erstellung, Überprüfung und Modifikation von zwei kontrastierenden Szenarioentwürfen, mit denen sich das bis 2050 aktivierbare Betriebswasserpotenzials in Frankfurt am Main abschätzen lässt. Die Vorgehensweise orientierte sich an folgenden Phasen zur Szenariokonstruktion nach ebd. (2014): Szenariofeldbestimmung, Bestimmung von Schlüsselfaktoren, Konsistenzanalyse, Szenarioentwicklung. Abbildung 24 gibt eine Übersicht über den Prozess der Szenarioentwicklung und der anschließenden Quantifizierung der beiden sich ergebenden Szenarien.

Aus pragmatischen Gründen konnte im Rahmen des Projektes nur ein Stakeholder-Workshop für die Entwicklung dieser Szenarien genutzt werden (und nicht vier, wie für das partizipative Szenarioverfahren eigentlich von ebd. (2014) vorgeschlagen wird. Daher wurde zunächst Material für die Szenarientwicklung in Abstimmung mit dem Auftraggeber vorbereitet und dieses vorbereitete Material dann gemeinsam mit den Praxisakteuren diskutiert. Während des Workshops wurde besonderes Augenmerk auf die Diskussion möglicher Maßnahmenbündel und deren Ausprägungen gerichtet. Des Weiteren wurden Erfahrungswerte der Praxisakteure ausgetauscht, die Rahmenbedingungen und Restriktionen für die Entwicklung der Szenarien darstellen (vgl. Anhang 7.1.1). Im Anschluss an den Workshop wurden die Maßnahmenbündel gemäß der Diskussion modifiziert und im Rahmen der Konsistenzanalyse von den Workshop-Teilnehmern schriftlich bewertet. Die Bewertung bezog sich auf die Wahrscheinlichkeit der formulierten Maßnahmen, womit die Konsistenz der beiden so entstandenen Szenarien überprüft wurde (vgl. Anhang 7.1.2). Zudem hatten die Praxispartner nochmals die Möglichkeit, eine individuelle Einschätzung abzugeben.

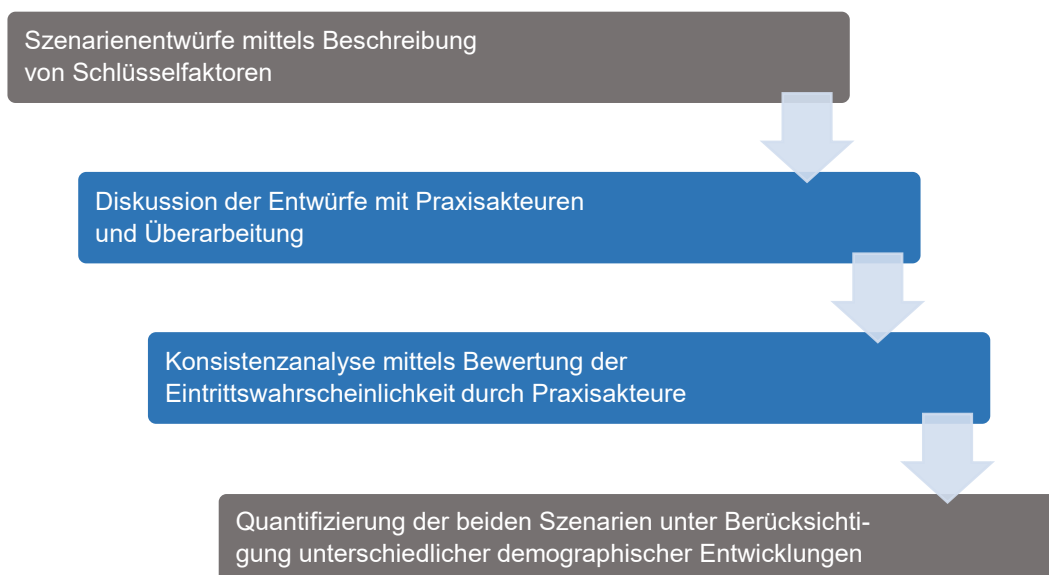


Abbildung 24: Übersicht der Szenarioentwicklung und Quantifizierung, partizipative Elemente in blau

Quelle: Nach Kerber et al. (2014), eigene Darstellung

Die beiden Szenarien wurden anschließend quantitativ zunächst auf die näher betrachteten Quartiere (vgl. Kapitel 7.2) und dann ergänzend auf die unterschiedlichen zentralörtlichen Funktionen bzw. weitere besonders betrachtete Orte und die dort realisierbaren Substitutionspotenziale bezogen (vgl. Kapitel 7.3). Diese Betrachtungen wurden für eine rechnerische Abschätzung des in der Stadt Frankfurt am Main insgesamt zum Einsatz kommenden Betriebswassers für die Jahre 2030 und 2050 genutzt. Dabei wurden auch Varianten in der demographischen Entwicklung einbezogen (Kapitel 7.5). Die Ergebnisse wurden noch einer Sensitivitätsbetrachtung unterzogen (vgl. Kapitel 7.6).

7.1.3. Ergebnisse der Szenarioentwicklung

Tabelle 36 präsentiert die Ergebnisse der partizipativen Szenarioentwicklung.

Tabelle 36: Die beiden Szenarien und ihre Schlüsselfaktoren (Ergebnis des Stakeholder-Workshops vom 4. Juli 2019)

| Schlüssel-faktoren | „Trendszenario“ | „Besondere Anstrengungen“ |
|--|---|---|
| Kommunalpolitik | <p>Die in der Stadtverordnetenversammlung vertretenen politischen Parteien befürworten, in Neubaugebieten zukünftig zusätzlich eine Betriebswasserversorgung einzurichten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Auf dieser Maxime aufbauend entsteht ein Mindsetting für die an der Stadtentwicklung und Wasserversorgung beteiligten Kommunalakteure; dabei wird die Frage der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen betont. ● Initiativen zur Substitution sollten und können vorrangig in jenen Gebieten stattfinden, in denen sich entsprechende Maßnahmen wirtschaftlich tragen. ● Die Stadt bekräftigt für den Bereich der Zisternenbewirtschaftung ihre Haltung gegen eine Verpflichtung zu einer Regenwassernutzung. ● Aus Gründen der Rechtssicherheit wird auch für weitere Anwendungen vermieden, verbindlich mit juristischen Instrumenten den Gebrauch von Betriebswasser vorzuschreiben. | <p>Die politischen Organe der Stadt (Stadtverordnetenversammlung und Magistrat) sprechen sich für eine Priorisierung des Aufbaus einer Betriebswassernutzung aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Das Prinzip eines forcierten Aufbaus einer kommunalen Betriebswasserversorgung für alle (versorgbaren) Stadtteile wird in ein verbindliches Planungsinstrument übersetzt. ● Ein*e Dezernent*in wird als „Kümmerer“ für den Aufbau der Betriebswasserversorgung anerkannt und schafft eine Stabsstelle, die bei der Aufgabe unterstützt („Frankfurter Wasserbüro“). ● Im Gesundheitsamt wird eine Stelle zur Risikovorsorge bei Betriebswasser geschaffen. ● Eine Satzung erlaubt es, mit entsprechend mittelfristiger Fristsetzung auch im Bestand eine Betriebswasserversorgung flächendeckend aufzubauen. ● Die Stadt bzw. ein von ihr ausgewählter Akteur wird der Betreiber eines zunächst semizentral organisierten Betriebswasser-Versorgungsnetzes, das stufenweise nach Gesichtspunkten des Spitzenlastmanagements aufgebaut wird und Wasser aus der Anlage zur Mainwasseraufbereitung sowie aus weiteren Quellen aufnimmt. |
| Strategie zur Betriebswasserbewirtschaftung | <ul style="list-style-type: none"> ● Nach technischer Anpassung der Mainwasseraufbereitung an den bestehenden Betriebswasserbedarf kann unter Berücksichtigung der den zugrundeliegenden wasserrechtlichen Vorgaben in deren unmittelbarem gebietlichem Umkreis mehr Betriebswasser als bisher an private bzw. öffentliche Abnehmer abgegeben werden. ● Unter Berücksichtigung der aktuell gültigen rechtlichen Vorgaben In Abhängigkeit des räumlichen Betriebswasserbedarfs erfolgt womöglich eine Ertüchtigung stillgelegter Brunnen und Quellen | <ul style="list-style-type: none"> ● Nach einem weiteren Ausbau der Mainwasseraufbereitung kann unter Berücksichtigung der den zugrunde liegenden wasserrechtlichen Vorgaben Betriebswasser für eine öffentliche Versorgung, ggfs. auch nordmainisch, geliefert werden. Eine nordmainische Versorgung mit Betriebswasser kann evtl. auch durch zusätzliche Anlagen zur Aufbereitung von Flusswasser realisiert werden. ● Systematischer Ausbau unterschiedlicher Betriebswasserressourcen unter Berücksichtigung rechtlicher, technischer und wirtschaftlicher Aspekte (stillgelegte Brunnen und |

| Schlüssel-faktoren | „Trendszenario“ | „Besondere Anstrengungen“ |
|--|--|---|
| | | <p>Quellen, neue Grundwasserbrunnen, evtl. aufbereitetes Grau- und Abwasser und zur Betriebswasser aufbereitetes Oberflächenwasser)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kooperationen mit Industrieunternehmen, die Betriebswasser erzeugen bzw. potenzielle Abnehmer sind, werden eingegangen um die Versorgung mit Betriebswasser kostengünstig auf- und auszubauen |
| Begleitende Maßnahmen | <ul style="list-style-type: none"> • An einer Hochschule wird ein Studierenden-Wettbewerb zur optimierten Planung doppelter Netze in Frankfurter Neubaugebieten durchgeführt. • Start einer zielgruppenspezifischen Ansprache für folgende Gruppen: Besitzer und Bewohner von Ein- und Zweifamilienhäusern, Gewerbetreibende (mit eigenen Gewerbegebäuden). • Für die Fachplanung wird auf bestehende Leitfähden und die bestehenden Fachverbände verwiesen. • Installateure werden wiederholt auf die Fortbildungsmöglichkeit durch DVGW und andere Verbände hingewiesen. | <ul style="list-style-type: none"> • Es wird ein Praktiker-Wettbewerb zur optimierten Planung doppelter Netze in Frankfurter Quartieren durchgeführt und fachöffentlich ausgewertet. • Eine Informations- und Werbekampagne (Stadtmarketing) hat zum Ziel die Bevölkerung und Unternehmen in Frankfurt am Main über Hintergründe und Lösungsansätze aufzuklären und zum Mitmachen (Wassersparen, Wasser substituieren) anzuregen. • Es entstehen Frankfurter Leitfähden, um a) Architekten und Fachplanern realistische „Faustzahlen“ für die Auslegung von doppelten Netzen an die Hand zu geben, b) das Baugewerbe und das Sanitergewerbe zu schulen (Vermeidung von Fehllanschlüssen) und c) das Facility Management zu schulen (sicherer Betrieb von Betriebswassernetzen). |
| Bestandsgebiete Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude | <ul style="list-style-type: none"> • Für zwei Quartiere mit Nachverdichtung kommt es zu Pilotprojekten. • Beratung bei Hochhausbau in Hinblick auf doppelte Leitungsnetze und Betriebswassernutzung/Hochhäuser mit vorhandenen doppelten Leitungsnetzen können aus Kostengründen von der Stadt nicht in ihren Bemühungen, Trinkwasser zu substituieren, unterstützt werden. | <ul style="list-style-type: none"> • Die Stadt bemühet sich aktiv darum, dass über die Bundes-Stadtebaumittel Zuschüsse für den Bestandsumbau bereitgestellt werden. • Die Unternehmen der Wohnungswirtschaft gründen eigene Arbeitsgruppen zum Thema Betriebswasserversorgung. • Gebäude mit vorhandenen doppelten Leitungsnetzen werden, sofern hier Unterversorgungen bestehen, baldmöglichst mit Betriebswasser versorgt. • Neue Bürogebäude und Wohntürme werden nur noch genehmigt, wenn sie mit doppelten Netzen ausgerüstet werden. • Bei Generalsanierungen von Gebäuden werden gedeckt durch entsprechende teilgebietliche Satzungen doppelte Leitungen verlegt. In den entsprechenden Gebieten wird sukzessiv eine öffentliche Betriebswasserversorgung aufgebaut. |

| Schlüssel-faktoren | „Trendszenario“ | „Besondere Anstrengungen“ |
|--|--|---|
| Neubaugebiete | <ul style="list-style-type: none"> • Die Stadt sorgt dafür (z. B. durch Änderung des Konzessionsvertrags), dass Neubaugebiete zusätzlich eine Betriebswasserversorgung erhalten, soweit dafür ausreichend Wasserressourcen wirtschaftlich zur Verfügung stehen. • Der Stadt/dem Versorgungsträger gelingt es, die meisten Grundstücksentwickler/Großinvestoren in den Neubaugebieten davon zu überzeugen, dass doppelte Leitungen in den Wohnhäusern verlegt werden. | <ul style="list-style-type: none"> • In allen Neubaugebieten wird eine öffentliche Betriebswasserversorgung aufgebaut. • Gebäude in Neubaugebieten werden nur noch genehmigt, wenn sie mit doppelten Netzen ausgerüstet werden. |
| Bestand Ein- und Zweifamilienhäuser | <ul style="list-style-type: none"> • Bei Ein- und Zwei-Familienhäusern werden Zisternen für eine Regenwassersammlung und doppelte Leitungen auf freiwilliger Basis installiert. Das Gebührensplitting begünstigt eine Nutzung im Garten. | <ul style="list-style-type: none"> • Die Regenwassernutzung (nach angemessener Übergangsfrist und zunächst für Gartenbewässerung) ist für Ein- und Zwei-Familienhäuser obligatorisch; dafür werden neben Beratung und Information geeignete rechtliche Instrumente entwickelt. |
| Gewerbegebiete | <ul style="list-style-type: none"> • In Gewerbegebieten wird im Wesentlichen Niederschlagswasser für die Bewässerung von Grünflächen verwendet bzw. versickert. • Ein Mustervertrag für die gemeinschaftliche Regenwassernutzung wird entwickelt, der die Bereitstellung und Nutzung über Grenzen hinweg rechtssicher regelt. • Beratungen zur Betriebswassernutzung werden durchgeführt. | <ul style="list-style-type: none"> • In Gewerbegebieten sind die Standortsmanager in Betriebswasserfragen geschult und unterstützen die Gewerbetreibenden z. B. bei der Regenwassernutzung auch für Betriebswasserzwecke. • Zusammenschlüsse in den Gewerbegebieten werden gefördert; z. B. werden Regenwasserzisternen gemeinschaftlich bewirtschaftet. • Die Gewerbegebiete auf dem Flughafengelände werden über die Mainwasseraufbereitung mit Betriebswasser versorgt. |
| Öffentliche Einrichtungen | <ul style="list-style-type: none"> • Soweit es bei entsprechenden Gebäuden wirtschaftlich sinnvoll ist, wird (z. B. über Regenwassernutzung oder Grundwasserförderung) eine Versorgung mit Betriebswasser aufgebaut. | <ul style="list-style-type: none"> • Städtische Liegenschaften werden (sofern wirtschaftlich darstellbar) schnellstmöglich auf Betriebswasser umgestellt für Toilettenspülung, Klimaanlage und (soweit vorhanden) Umkehrosmose-Spülmaschinen. |
| Grüne Infrastruktur | <ul style="list-style-type: none"> • Bei der Bewässerung von Grünanlagen wird soweit wirtschaftlich möglich Trinkwasser durch andere Quellen ersetzt. • Bei der Bewässerung von Sportanlagen ist in wenigen Einzelfällen nach jeweiliger Prüfung der Erfüllung der Hygieneanforderungen eine Substitution von Trinkwasser für Kunstrasenplätze möglich. | <ul style="list-style-type: none"> • Die Bewässerung von Grünanlagen und Sportplätze wird mit Betriebswasser für öffentliche Flächen weitgehend umgesetzt und zudem auch für private Grünflächen und Sportplätze angeboten. • Weiterhin wird überprüft, ob sich Kunstrasen mit allen zur Verfügung stehenden Betriebswasser-Qualitäten einwandfrei bewässern lässt. |

7.2. Projektion der beiden Modell-Quartiere auf das Stadtgebiet

Die beiden entwickelten Szenarien wurden zunächst auf die betrachteten Modell-Quartiere Günthersburghöfe und Heimatsiedlung bezogen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die in Kapitel 5 ermittelten Substitutionseffekte in den jeweiligen Objekten innerhalb kurzer Zeiträume realisierbar sind. Aufbauend auf den in Kapitel 6 dargestellten Projektionen dieser Quartiere wurde die mögliche Realisierung des Trinkwassersubstitutionspotenzials bzw. die Aktivierung von Betriebswasserressourcen auf das Stadtgebiet abgeschätzt. Dabei wurde das bis 2030 von dem bis 2050 realisierbaren Betriebswasserpotenzial unterschieden.

In Frankfurt am Main sind die Flächen, auf denen Neubaugebiete angelegt werden können, aktuell häufig Flächen, denen zugleich wichtige Funktionen, etwa für die Landwirtschaft, die Erholungswirkung der Bevölkerung durch die Nutzung von Grünflächen oder für die Aufrechterhaltung der Klimafunktionen zugeschrieben werden. Nach Einschätzung des Stadtplanungsamts bestehen nur noch wenige Konversionsflächen, die für Neubaugebiete zur Verfügung genutzt werden können; so wurde die Umnutzung von gewerblichen Flächen zu Wohnflächen im 2016 von der Stadtverordnetenversammlung beschlossenen Masterplan Industrie als sehr kritisch für den Wirtschaftsstandort befunden (Kompetenzzentrum Industrie Wirtschaftsförderung Frankfurt 2020). Zunehmend wichtigere Möglichkeiten für die Innenentwicklung bestehen somit im Umbau, in der Nachverdichtung sowie Anpassung und Transformation von bestehenden Siedlungsbeständen, wobei dies meist nur bei Projekten mit einer gewissen Größenordnung möglich ist. Auf Grundlage der in Kapitel 2.5 dargelegten Ausführungen zur Wohnraumentwicklung, wird für beide Bevölkerungsprojektionen davon ausgegangen, dass bis 2030 etwa 34 000 Wohnungen gebaut werden können. In einer konservativen „Minimalvariante“ der Szenarien wird die Umsetzung neuen Wohnraums ab 2030 nur noch eingeschränkt verfolgt, so dass angenommen wird, dass bis 2050 weitere 6 000 Wohnungen gebaut werden. Unter der Annahme einer günstigeren Bauentwicklung in Verbindung mit einem starken Bevölkerungszuwachs wird in der „Maximalvariante“ für die Projektion in 2050 davon ausgegangen, dass weitere 36 000 Wohnungen geschaffen werden (siehe Kapitel 2.5, Tabelle 6 sowie im Einzelnen Kapitel 7.5).

Im Unterschied zu Wassersparen erfordert die Substitution von Trinkwasser durch alternative Wasserquellen in der Regel den Bau und Betrieb zusätzlicher Infrastrukturen, entweder auf einer Grundstücks- oder einer (teil-)gebietlichen Ebene. Egal ob dies als eine Innovation oder als eine Umwandlung der häuslichen bzw. öffentlichen Wasserinfrastruktur begriffen wird: Im Trendszenario gibt es keine Mechanismen, mit denen es interessierten Akteuren erleichtert wird, eigene Pläne (z. B. eine Ausrüstung der von einem Unternehmen der Wohnungswirtschaft gebauten Neubauten) mit denen eines möglichen öffentlichen Betriebswasserversorgers abzustimmen. Nur dort, wo auf dem eigenen Grundstück (z. B. durch die Aufbereitung von Grauwasser oder einen Brunnen) Betriebswasser vorhanden ist, wird es daher in diesem Szenario sicher zu einer Betriebswasserversorgung kommen. Hingegen ist es von (glücklichen) Zufällen abhängig,

wenn es in jenen Fällen, wo die Voraussetzung einer Trinkwassersubstitution darin besteht, dass es sowohl im jeweiligen Quartier einen Anbieter von Betriebswasser geben muss als auch innerhäusliche Infrastrukturen zur Weiterverteilung, dies zur Deckung gebracht und damit die Substitution realisiert werden kann.

Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wird hingegen ein neuer städtischer Akteur („Frankfurter Wasserbüro“) die verschiedenen Akteure möglichst so koordinieren, dass die häusliche Wasserinfrastruktur (z.B. „doppelte Leitungen“) zum zur Verfügung stehenden Betriebswasserangebot passt und zudem die Nachfrage nach Betriebswasser insgesamt einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen erlaubt. Dazu muss auf der stadtpolitischen Ebene die strategische Relevanz der verschiedenen alternativen Wasserquellen bestimmt und entsprechend einer hydrogeologischen Erkundung auch auf der Ebene von Teilräumen im Entwurf für den eben genannten Masterplan festgelegt werden. Weiterhin werden die Aufgaben des Unternehmens festgelegt, das die öffentliche Betriebswasserversorgung betreibt. Zudem werden mit den kommunalen Wohnungswirtschaftsunternehmen nach einer Konsultation konkrete Vorgaben vereinbart, wann und wie sie zukünftig bei ihren Mietern/Wohnungseigentümern durch den Einbau einer doppelten Versorgungsinfrastruktur die Versorgung mit Betriebswasser gewährleisten.

Im Siedlungsbestand ist es weit schwieriger, die Wasserinfrastrukturen in den Gebäuden und im öffentlichen Raum so umzuwandeln, dass eine Substitution von Trinkwasser möglich wird. Allerdings ist das wassertechnische Transformationspotenzial unterschiedlicher städtischer Teilräume verschieden hoch (vgl. Davoudi et al. 2016); das wurde auch bei der Extrapolation berücksichtigt.

Für den Siedlungsbestand wurden daher angelehnt an die im Projektverbund NETWORKS entwickelte Typologie (vgl. etwa Davoudi et al. 2016) bezogen auf das Frankfurter Stadtgebiet entsprechend dieses Transformationspotenzials verschiedene städtische Teilgebiete unterschieden. So ist anzunehmen, dass vor allem für jene städtischen Teilräume ein großes Umwandlungspotenzial erwartbar ist, die einer hohen Entwicklungsdynamik unterliegen und einen geringen Transformationsaufwand aufweisen. Dieser spezifische Transformationsaufwand ergibt sich aus der technischen Struktur der bestehenden Wasserinfrastruktur und aus ihrer räumlichen Konkurrenz zu anderen im Straßenuntergrund und in den Gebäuden verlegten Infrastrukturen. Während es z.B. für Konversionsflächen und für viele Umnutzungen und klassische Nachverdichtungen vergleichsweise einfach ist, im Zuge der Baumaßnahmen auch öffentliche Maßnahmen im Tiefbaubereich durchzuführen und z.B. ein flächendeckendes zweites Netz zur Versorgung mit Betriebswasser aufzubauen, so kann dies z.B. bei Nachverdichtungen durch Aufstockungen von Wohngebäuden, Supermärkten usw. wesentlich schwieriger sein.

Teilweise wird in Frankfurt am Main Grundwasser auch als Betriebswasser nur nach einer (graduelleren) Aufbereitung nutzbar sein. Ist Grundwasser in ausreichender Menge und Qualität für eine zu sanierende Siedlung gut zugänglich, so stehen die Bedingungen sehr günstig, dort aufbauend auf dieser Ressource eine Betriebswasserversorgung

aufzubauen. Zu beachten ist, dass nach § 38 HWG die öffentliche Wasserversorgung (auch mit Betriebswasser) den Vorrang vor anderen Benutzungen des Grundwassers genießt. Ausnahmen von der Zulassungserfordernis bei Grundwasserentnahmen bestehen für kleinere Entnahmemengen (siehe Kapitel 1.4).

Wenn Wohntürme saniert werden, so besteht unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit, deren Wasserinfrastruktur so umzugestalten, dass das Dusch- und Badeabwasser über Grauwasserleitungen abgeleitet und in einer technischen Anlage zu Betriebswasser für die Toilettenspülung und andere häusliche Zwecke aufbereitet wird, das im Hochhaus verwendet werden kann. Stehen mehrere Wohntürme nebeneinander, wie dies z. B. im Mainfeld oder in der Sigmund-Freud-Straße der Fall ist, so kann (unabhängig von einer evtl. Abschöpfung der Restwärme, die sinnvollerweise auf Gebäudeebene geschieht) die Aufbereitung zu Betriebswasser auch semizentral jenseits der Einzelgebäude stattfinden (hier kann es zudem zu Synergien bei der Druckerhöhung für die Zuleitung kommen). Beim Betrieb von semizentralen Anlagen ist zu berücksichtigen, dass mit der Stadt Frankfurt am Main bei der Benutzung öffentlicher Straßen und Wege zur Verlegung und zum Betreiben von Leitungen Verträge für die Einräumung von Wegenutzungsrechten abgeschlossen werden müssen (siehe Kapitel 1.9). In Gebäuden mit ausreichend groß dimensionierten Versorgungsschächten ist die zusätzliche Installation der Betriebswasserleitung für die Toiletten in der Regel mit einem niedrigeren Aufwand verbunden als in älteren Gebäuden, in denen alle Leitungen noch nicht in derartigen Schächten geführt, sondern einzeln unter Putz verlegt werden. Ähnlich gilt das auch für den getrennten Abtransport von Grauwasser in den Gebäuden; vor Aufbau einer Wärmedämmung können gegebenenfalls zusätzliche Leitungen auch an der Gebäudeaußenseite geführt werden. Eine (evtl. gebäudebezogene) Aufbereitung von Grauwasser zu Betriebswasser ist davon abhängig, ob hier noch der Raumbedarf für die Technik (Aufbereitung und Speicherung) befriedigt werden kann.

Durch die in Frankfurt am Main aus Gründen der Sanierung/Rehabilitierung sowie einer Anpassung an Klimawandel und Demografie erforderlich werdende Umgestaltung der Kanalisation in zahlreichen dichtbebauten Gebieten (z. B. Innenstadt) ergibt sich ein mögliches Gelegenheitsfenster, das in den nächsten Jahrzehnten für eine Umwandlung der Wasserinfrastruktur im Bestand genutzt werden kann. Im Rahmen des Umbaus der Kanalisation kann in Bestandsgebieten neben die bestehenden Zubringer-, Haupt- und Versorgungsleitungen für Energie-, Fernwärme, Telekommunikation und Trinkwasser und den Entsorgungsleitungen für Abwasser auch ein Versorgungsnetz für Betriebswasser im Untergrund ggf. platziert werden unter der Voraussetzung, dass nach vorherigen Erkundungen im Masterplan das Gebiet durch das im Szenario „Besondere Anstrengungen“ kommunal beauftragte Versorgungsunternehmen mit einer Betriebswasserversorgung zentral erschlossen wird. Nach Identifikation geeigneter Betriebswasserressourcen sind im Masterplan die dafür möglichen Areale zu lokalisieren und übergreifend für eine mögliche Betriebswasserversorgung zu bewerten. Dies betrifft insbesondere Gebiete mit Geschosswohnungsbau in der Kernstadt und den Innenstadtrandlagen. Da im Unterschied zu Trinkwasser Betriebswasser (z. B. bei Transport

in Nähe von Fernwärmeleitungen) auch erwärmt werden darf, lassen sich dabei (noch abzuändernde) Anforderungen des Leitungsbaus und des Leitungsbetriebes beachten.

Die beiden Szenarien unterscheiden sich auch darin, wieweit diese potenzielle Versorgungssituation in den Gebäuden selbst angemessen aufgegriffen werden kann. Angesichts der Herausforderungen, die derzeit mit einer entsprechenden Nachrüstung von Bestandsgebäuden verbunden ist, ist es im Trendszenario sehr unwahrscheinlich, dass es – jenseits von Modellvorhaben, die eventuell realisiert werden – zu entsprechenden Nachrüstungen in der Fläche kommt. Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ ist es Aufgabe der Stadt, hier entsprechende Anstrengungen der Gebäudeeigentümer zu motivieren; zusätzlich wird es sinnvoll sein, rechtzeitig (z.B. acht bis zehn Jahre) vor dem Aufbau der gebietlichen Betriebswasserversorgung die Eigentümer von der Möglichkeit zur Substitution zu informieren.

Um die Veränderungen in der häuslichen Wasserinfrastruktur mit dem Ausbau der öffentlichen Betriebswasserversorgung zu synchronisieren, kann es zweckmäßig sein, den Anschluss der Gebäude an die öffentliche Betriebswasserversorgung möglicherweise auch satzungsrechtlich für jene Gebiete, evtl. auch ganze Stadtteile vorzuschreiben, in denen sich nach den Ergebnissen des Betriebswasser-Masterplans für die Kommune der Aufbau einer Betriebswasserversorgung empfiehlt. Ein mehrjähriger Zeithorizont zwischen Information über die Versorgung mit Betriebswasser und deren Inbetriebnahme ermöglicht es den Eigentümer*innen, in den Wohngebäuden die komplementären Versorgungsleitungen für Betriebswasser bis zu dem Zeitpunkt, an dem das jeweilige Gebiet öffentlich mit Betriebswasser versorgt wird, installieren zu lassen (und dabei nach Möglichkeit zeitgleich mit anderen fälligen Reparaturen/Sanierungen Synergien zu finden). Eine Voraussetzung dafür ist, dass angelehnt an die bestehende technische Gebäudeausstattung die Hauseigentümer, Wohnungsverwaltungen bzw. das Sanitär Gewerbe sich gut auf diese Aufgabe vorbereiten (z.B. wie in den Wohngebäuden des Bestandes mit allen Gewerken koordiniert eine Uminstallation ohne Auszug der Wohnparteien dort, wo technisch z.B. Inlinertechnik möglich, vorgenommen werden kann).

7.3. Differenzierung und Ergänzung durch die gesondert betrachteten Orte und zentralörtlichen Funktionen

Die entwickelten Szenarien wurden in einem weiteren Schritt hinsichtlich ihrer Wirkungen bei der Substitution von Trinkwasser bzw. der Generierung von Betriebswasserressourcen bezüglich der Ein- und Zweifamilienhäuser und der zentralörtlichen Funktionen betrachtet (vgl. Kapitel 2.2, 5.2).

Die in den Szenarien vorgesehene Konzentration auf eine Betriebswasserversorgung mit Regenwasser für Ein- und Zweifamilienhäuser erlaubt es, auch für den zugehörigen Siedlungstyp, der sich insbesondere in vielen nördlichen und westlichen Stadtteilen, aber auch in Schwanheim, Goldstein und Oberrad, sowie in den Villenvierteln der gründerzeitlichen Stadtteile häufig findet, den Transformationsaufwand weiter herab-

zusetzen. Gebiete mit diesen Haustypen müssen nicht an eine öffentliche Betriebswasserversorgung angeschlossen werden. Wird alleine der Garten erschlossen, sind inhäusig keine Betriebswasser-Leitungen zu legen. Soweit in Einfamilienhäusern die Waschmaschine im Keller steht, ist auch dort die Installation einfach (z.B. auf Putz) zu bewerkstelligen; der maximal mögliche Substitutionseffekt wird aber erst mit dem Anschluss von sanitären Einrichtungen erreicht. Hierfür sind Tiefbauarbeiten im Bestand zur Installation eines Behälters (Zisterne) mit einer Einspeisung des aufgefangenen Regenwassers in eine innerhäusige Leitung sowie möglichst ein Überlauf in eine Mulde oder evtl. in die Kanalisation erforderlich. Dies setzt die entsprechende räumliche Verfügbarkeit von Flächen auf dem Grundstück voraus, die ggf. nicht in allen Wohngebieten gegeben sind bzw. erst durch weiterführende bauliche Maßnahmen auf dem Grundstück selbst (z.B. unter Mülleimerboxen) geschaffen werden können.

Im Kontext des Trendszenarios werden Zisternen für die Sammlung von Regenwasser sowie das zur innerhäuslichen Nutzung obligatorische doppelte Leitungsnetz weiterhin auf freiwilliger Basis installiert. Dabei ist davon auszugehen, dass die individuelle Entscheidung zur Nutzung weiterhin im Spannungsfeld zwischen ökologischen und ökonomischen Kriterien abgewogen wird. Festzuhalten ist, dass Anlagen zur Regenwassernutzung gerade dann wenig kosteneffizient sind, wenn sie nachträglich eingebaut werden. Daher ist davon auszugehen, dass Nachrüstungen im Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser vorwiegend im Rahmen größerer Sanierungs- und Umbaumaßnahmen durchgeführt werden. Das Trendszenario sieht vor, dass bei entsprechenden Anträgen auf (Kern-)Sanierung eine Beratung zum Thema Regenwassernutzung in Wohnbauten erfolgt. Es wird davon ausgegangen, dass bei Sanierungsfällen etwa ein Drittel der Hausbesitzer*innen entsprechende Maßnahmen ergreifen und auch doppelte Leitungsnetze zur Versorgung der Toiletten einbauen. Aufgrund der Neuordnung der Frankfurter Abwassergebühr, nach welcher die zur Berechnung des Regenwasseranteils herangezogene Grundstücksfläche um 10 m² je volle 1 m³ Zisternengröße reduziert wird, wird hier ein leichter Anreiz gegeben.

Im kontrastierenden Szenario „Besondere Anstrengungen“ führt die Konzentration der Kommune dazu, dass in Ein- und Zweifamilienhäusern eine Regenwassernutzung verpflichtend wird. Nach einer Kampagne, die die Vorteile der Regenwasserbewirtschaftung darstellt, werden ordnungsrechtliche Vorschriften für den Bestand erlassen. Mittels einer Satzung, die eine angemessene Übergangsfrist einräumt, erfolgt 2027 eine Verpflichtung zur Gartennutzung von Regenwasser, während die zusätzliche innerhäusliche Nutzung für die Ein- und Zweifamilienhäuser propagiert wird. Auch für alle anderen Wohngebäudetypen wird in diesem Szenario per Satzung 2029 die Regenwassernutzung zur Grünpflege vorgeschrieben.

Anders als in dem Trendszenario wird es im Szenario „Besondere Anstrengungen“ auch möglich werden, Betriebswasser in die Bürohochhäuser der Stadt mittel- bis langfristig über ein zunächst räumlich noch wenig ausdifferenziertes Versorgungsnetz einzuspeisen; im Bereich der Innenstadt, des Bahnhofsviertels, des Westends, Sachsenhausen-

Nord und evtl. weiterer innenstadtnaher Bereiche kann dieses Netz bis 2050 flächen-deckend wirksam werden, so dass die dort liegenden Bürohäuser angeschlossen werden können. Mit Hilfe von Satzungen und einer zielgruppenspezifischen Ansprache kann die Versorgung mit Betriebswasser so frühzeitig den Hauseigentümern und Facility Managern angekündigt werden, dass in den sich anschließenden Jahren ein Aufbau der komplementären Infrastruktur in den Gebäuden möglich wird und diese zum Start der teilräumlichen Betriebswasserversorgung angeschlossen werden können.

In Bezug auf die weiteren zentralörtlichen Funktionen lässt sich zudem in den beiden Szenarien das beispielhaft ermittelte Substitutionspotenzial auf das Stadtgebiet insgesamt ausweiten. Dies betrifft:

- Weitere Mobilitätsdrehscheiben (z. B. Bahnhöfe)
- Öffentliche Einrichtungen, einschließlich Bildungseinrichtungen
- Gewerbegebiete
- Grünanlagen
- Sporteinrichtungen

Bezogen auf Schulen, Sportanlagen und Grünanlagen wurde aufgrund der vorliegenden, in der Qualität wenig befriedigenden Ausgangsdaten eine recht konservative Annahme über die realisierbare Substitution getroffen. Bei einer sehr guten Vorbereitung der Kommune (z. B. mittels Masterplan und vorhergehender hydrogeologischer Erkundung) wird es aber möglich sein, weit mehr Grünanlagen, Schulen usw. als derzeit kalkuliert ausreichend mit Betriebswasser zu versorgen und so hier zu einer fast vollständigen Ausschöpfung des Substitutionspotenzials zu kommen.

7.4. Projektion der möglichen Betriebswassernutzung auf das Stadtgebiet

Die Ergebnisse aus den Betrachtungen in den Kapiteln 7.2 und 7.3 ermöglicht eine quantitative Abschätzung des bis 2050 realisierbaren Betriebswasserpotenzials in Frankfurt am Main.

Im Trendszenario werden die vorhandenen Aktivitäten in Bezug auf die Substitution von Trink- durch Betriebswasser fortgeschrieben. Das Szenario setzt auf freiwillige Anstrengungen aller Akteure; dabei ist zu berücksichtigen, dass in Frankfurt am Main ein Teil früherer Substitutionsmaßnahmen in den letzten Jahren aus verschiedenen Gründen eingestellt worden ist (z. B. die Versorgung des Deutschherrnviertels mit Betriebswasser aus der Seehofquelle in der Folge von Beschwerden von Nutzern im Viertel über die gelieferte Wasserqualität oder die Aufgabe der Grauwassernutzung in der KfW am Palmengarten). Infolgedessen ist hier auch ein Scheitern mancher Bemühungen und Investitionen oder nur eine teilweise Zielerreichung festzustellen (auch das mit einer Entsprechung in der Entwicklung der letzten Jahrzehnte, z. B. aktuell nur knapp 50 %ige Versorgung des Commerzbank-Towers mit Betriebswasser für die Toilettenspülung).

Der wesentliche Unterschied zwischen dem „Trendszenario“ und dem Szenario „Besondere Anstrengungen“ liegt in einer (pro-)aktiven gesamtstädtischen Koordination, die z. B. durch einen Masterplan zur Betriebswasserversorgung vorbereitet und unterstützt werden kann. Das zweite Szenario kann darauf aufbauend auch Maßnahmen umsetzen, die erst in der Zusammenarbeit unterschiedlicher Akteure wirksam werden; der Masterplan führt zugleich zu einer Neubewertung einiger Maßnahmen, die auf den ersten Blick als wenig wirtschaftlich und ökologisch fraglich erscheinen (z. B. die Nutzung der bestehenden südmainischen „Brauchwasserzapfstellen“ durch das Grünflächenamt).

Damit erlaubt das Szenario „Besondere Anstrengungen“ zudem eine systematische, stufenweise Entwicklung innerörtlicher Betriebswasserversorgungsgebiete. Das politische Bekenntnis der Stadt zum Betriebswasser, das ein Fundament auch durch die Schaffung unterstützender Stellen (z. B. im Gesundheitsamt) und satzungsrechtliche Festlegungen erhält, wirkt sich positiv auf die flächendeckende Umsetzung aus, lässt aber gesamtstädtisch auch eine verbesserte Effizienz vermuten. Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wurde für den Zeithorizont bis 2050 sowohl davon ausgegangen, dass Grünflächen an Wohngebäuden ausschließlich durch Betriebswasser (aus Regenwasser) bewässert werden, als auch, dass die strategische Entwicklung der Betriebswasserversorgung in innerstädtischen bzw. innenstadtnahen Teilgebieten zur Umrüstung von ca. 75 000 Bestandswohnungen führt und auch ein Teil der Bürogebäude mit Betriebswasser für die Toilettenspülung versorgt wird.

Zusätzlich wurde im Szenario „Besondere Anstrengungen“ angenommen, dass in einem kleinen Teil der von Eigentümer*innen bewohnten Ein- und Zweifamilienhäuser die Waschmaschine mit Regenwasser gespeist wird. Soweit eine „Betriebswasser-Kultur“ entsteht, wird auch in anderen Gebäudetypen sich das Bedürfnis entwickeln, Betriebswasser zum Wäschewaschen zu nutzen, so dass sowohl im Neubau als auch im umgerüsteten Bestand zunehmend die Möglichkeit geschaffen wird, zum Waschen der Wäsche zwischen Trinkwasser und Betriebswasser zu wählen. Entsprechende Installationen wurden bei Neubauten, Nachverdichtungen oder Nachrüstungen eingerichtet (vgl. Tabelle 87 in Anhang 7.5).

7.5. Bandbreiten der Trinkwassersubstitution 2050

Auf der Basis der Grundannahmen in den beiden Szenarien wurde der erreichbare Betriebswassereinsatz für 2030 und 2050 rechnerisch für das Stadtgebiet Frankfurt am Main abgeschätzt. Die Ergebnisse für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung einer niedrigen und einer hohen Bevölkerungsvariante werden im folgenden Kapitel präsentiert, siehe insbesondere Abbildung 25.

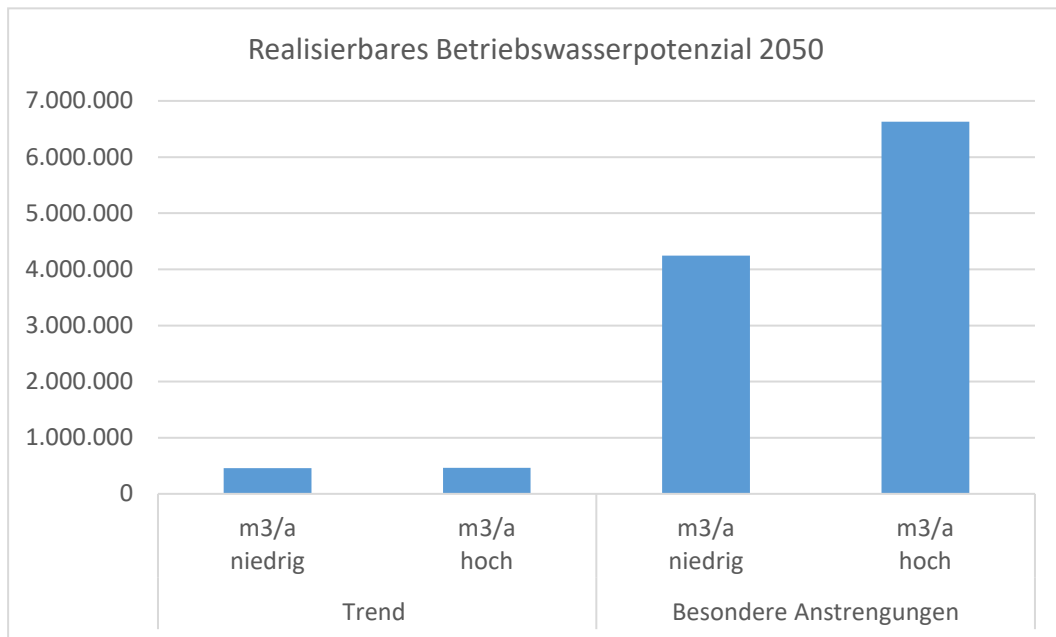


Abbildung 25: In beiden Szenarien realisierbares Betriebswasserpotenzial für das Jahr 2050 in beiden Bevölkerungsvarianten (niedrig, hoch)

Aufgrund der gewählten Vorgehensweise wurde nicht direkt aus der Bevölkerungsentwicklung in Frankfurt am Main das realisierbare Substitutionspotenzial abgeleitet, sondern dieses primär aufgrund der Voraussetzungen in den unterschiedlichen Wohnformen ermittelt. Die Bevölkerungsentwicklung hat hauptsächlich Auswirkungen bei der Abschätzung der zukünftigen Substitutionspotenziale in Wohngebäuden (siehe Abbildung 25 und Tabelle 37). Betrachtet wurde für 2050 jeweils als minimale Bevölkerungsentwicklung 817 000 Einwohner, als maximale Entwicklung 885 000 Einwohner. Für 2050 wird von einer unterschiedlichen Zunahme von Wohnungen ausgegangen (40 000 vs. 70 000), um die Nachfrage nach Wohnraum zu befriedigen; für die Maximalvariante wird angenommen, dass dort die Wohnungen von mehr Personen bewohnt werden, da die Flächen zur weiteren Wohnraumentwicklung knapp werden; für die Minimalvariante wurde hingegen von der aktuellen Wohnraumbelegung ausgegangen (vgl. Anhang 7.5 und Tabelle 6). Eine Übersicht der Ergebnisse für das Jahr 2050, die sowohl die Bevölkerungsentwicklung als auch Wohnraumentwicklung berücksichtigen, enthält Tabelle 37 (vgl. für Details Anhang 7.5)

Für das Trendszenario wird angenommen, dass es bei den neu entstehenden Mehrfamilienhäusern zu keiner weiteren Ausschöpfung des Substitutionspotenzials kommt, da eine flächendeckende Versorgung mit Betriebswasser nicht umgesetzt wird und somit Neubau- und Nachverdichtungsgebäude nur in Ausnahmefällen mit doppelten Leitungen ausgestattet werden. Im Bereich häuslicher Nutzungen (EFH und MFH) kommt es im Trendszenario 2030 zu 0,26 Mio. m³ Trinkwassersubstitution pro Jahr. In diesem Szenario unterscheidet sich aus diesem Grund auch die Trinkwassersubstitution bzgl. der beiden betrachteten Bevölkerungsvarianten nach 2030 nicht merklich (siehe Tabelle 6). Für das Jahr 2050 liegt die Trinkwassersubstitution im Trendszenario zwischen 0,300 Mio. m³ und 0,306 Mio. m³ (siehe Tabelle 37). Folgt man weiter dem Trend, so

werden im Stadtgebiet 2050 jährlich insgesamt, also auch im Bürobereich, bei der Grünanlagenpflege usw., knapp 0,5 Mio. m³ Trinkwasser durch Betriebswasser substituiert.

Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wird eine Betriebswasserversorgung strategisch entwickelt. Bei einer minimalen Bevölkerungsentwicklung von 817 000 Einwohnern (2050) beträgt die hier rechnerisch abgeschätzte Trinkwassersubstitution für den Haushaltsbereich 3,41 Mio. m³ pro Jahr. Bei der hier angenommenen maximalen Bevölkerungsentwicklung von 885 000 Personen würde es häuslich sogar zu einer Trinkwassersubstitution von insgesamt 5,55 Mio. m³ pro Jahr kommen, insbesondere, wenn es zu einer verstärkten Nutzung von Wohntürmen und höherer Wohnungsbelegung kommt.

Die Ausweisung alleine eines Trinkwassereinsparpotenzials im Betrachtungshorizont wird ohne Bezugnahme zu dem gemäß der allgemeinen Bevölkerungsentwicklung verbundenen Anstieg des Wasserbedarfs insgesamt als nicht ausreichend angesehen, da zu erwarten ist, dass das ausgewiesene Trinkwassereinsparpotenzial erst zeitlich nachgelagert zu einer Einsparung an Trinkwasser im Bestand führt. Überschlägig wurde daher für den häuslichen Wasserverbrauch in Frankfurt am Main aus der Gesamtbevölkerung von maximal 885 000 Bewohner*innen bei Annahme heutiger Faustzahlen (118 l/E*d) ein jährlicher häuslicher Wasserverbrauch inkl. Kleingewerbe (10 l/E*d) von 38,1 Mio. m³ und für Trockenjahre (mit einem Gewichtungsfaktor/Trockenjahreszuschlag von 1,05) von 40 Mio. m³ für 2050 ermittelt. Ausgehend von 747 848 Einwohner*innen am 31.12.2018 ist unter Berücksichtigung eines maximalen Bevölkerungszuwachses von 137 152 Einwohner*innen in 2050 faktisch ein Mehrbedarf an Trink- und Betriebswasser von 5,9 bzw. 6,2 Mio. m³/a in einem Trockenjahr zu veranschlagen. Unter der Annahme, dass alle Neubürger*innen in ihren Wohnungen über eine Betriebswasserversorgung zukünftig verfügen würden und diese vollumfänglich nutzen, reduziert sich der Mehrbedarf allein für Trinkwasser ausgehend von 2018 bis 2050 auf 4,0 bzw. in einem Trockenjahr auf 4,2 Mio. m³/a.

Aus den szenarischen Betrachtungen (vgl. Anhang 7.5) ergibt sich, dass hochgerechnet auf das Stadtgebiet die Betriebswassernachfrage im häuslichen Bereich von 5,55 Mio. m³ für 2050 in diesem Sektor in Trockenjahren zu einem geringeren Verbrauch von Trinkwasserverbrauch von nur noch 32,5 Mio. m³ in einem Normaljahr führt. Fast ein Sechstel des Trinkwasserbedarfs kann also bis 2050 im häuslichen Bereich bei konsequenter Umsetzung des Trinkwassereinsparpotenzials durch Substitution eingespart werden. Um das häusliche Betriebswasserpotenzial von 5,24 Mio. m³/a in Mehrfamilienhäuser und von 0,31 Mio. m³/a in Ein- und Zweifamilienhäuser in 2050 heben zu können, müssten ca. 44 % der Einwohner*innen der Stadt Frankfurt am Main Betriebswasser täglich einsetzen und diese auch in der angegebenen Größenordnung von 39 l/(E*d) nutzen. Unter Berücksichtigung des im Szenario „Besondere Anstrengungen“ hinterlegten minimalen Bevölkerungszuwachses auf 817 000 Einwohner*innen, müssten für die prognostizierten Einsparungen von 3,41 Mio. m³/a im häuslichen Bereichen 27 % der Einwohner*innen Betriebswasser tatsächlich in dieser Größenordnung nutzen.

Bei der Verfolgung des Szenarios sind wir davon ausgegangen, dass zahlenmäßig noch mehr Einwohner*innen Betriebswasser nutzen, aber häufig nur eingeschränkt (z. B. alleine zur Gartenbewässerung).

Bei einem stadtübergreifenden Aufbau einer Betriebswasserversorgung, die im Szenario „Besondere Anstrengungen“ sowohl dezentrale Momente enthält (Regen- und Grauwasser) als auch zentrale Momente (öffentliche Versorgung mit Betriebswasser vor allem als Sanitärspülwasser für Mehrfamilienhäuser, öffentliche Einrichtungen, Gewerbe) kann angenommen werden, dass das ausgewiesene häusliche Trinkwassersubstitutionspotenzial von 5,55 Mio. m³/a voraussichtlich erst in 2080 zu realisieren ist. Dies beruht auch auf den Erkenntnissen, dass hierzu von den Wohnungsbaugesellschaften und privaten Eigentümern Bautätigkeiten ausgeführt werden müssen, die neben den erforderlichen Investitionen vorübergehend die Wohnqualität beeinträchtigen können. Bei massiven Eingriffen in die Bausubstanz rechnen Unternehmen der Wohnungswirtschaft damit, dass oftmals ein Ausweichquartier zur Verfügung gestellt werden müsste.

Für die weiteren laut Szenario erreichbaren Substitutionen in den in Tabelle 37 unterschiedenen Verbrauchssektoren ist allerdings der zukünftige Trinkwasserverbrauch nur sehr viel aufwändiger zu ermitteln; aus pragmatischen Gründen kann hier daher leider keine Vergleichszahl angegeben werden.

Tabelle 37: Trinkwasser-Substitution für das Jahr 2050, in Mio. m³ pro Jahr

| Gebäude-/Flächentyp | Trendszenario | Besondere Anstrengungen |
|---|---------------------|-------------------------|
| Mehrfamilienhäuser (einschl. Wohntürme) | 0,25 | 3,10–5,24* |
| Ein- und Zweifamilienhäuser | 0,049–0,055* | 0,312–0,313* |
| Gewerbegebiete | 0,078 | 0,265 |
| Bürogebäude | 0,007 | 0,558 |
| Bildungseinrichtung | 0,002 | 0,072 |
| Grünflächen | 0,033 | 0,072 |
| Sportplätze | 0,038 | 0,109 |
| Summe | 0,458–0,464* | 4,245–6,630* |

*Bandbreite gemäß der niedrigen und hohen Bevölkerungsvarianten

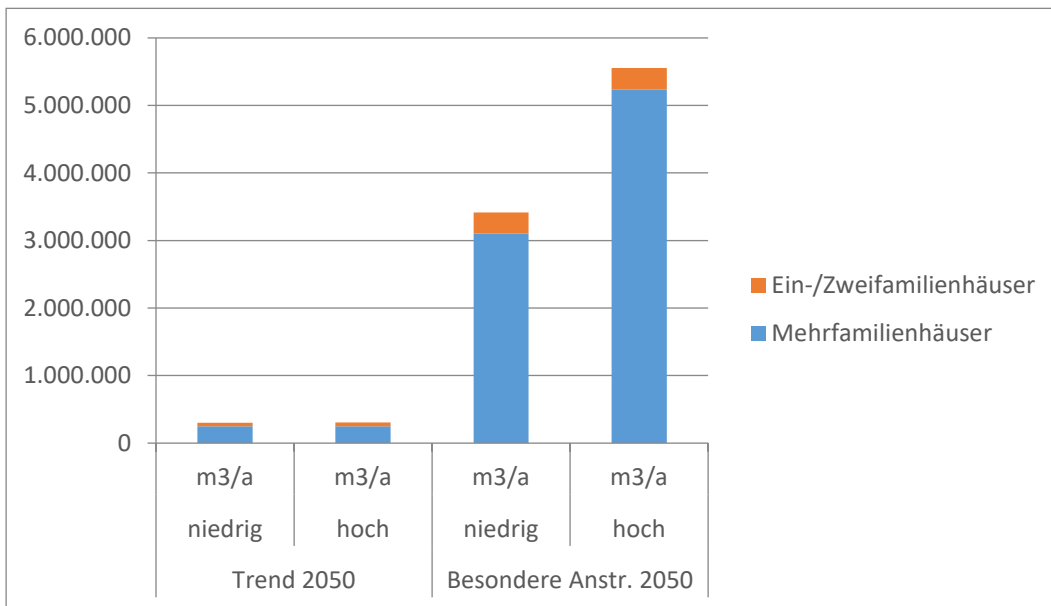


Abbildung 26: Betriebswasserpotenzial für Wohngebäude im Stadtgebiet Frankfurt am Main in unterschiedlichen demographischen Entwicklungsvarianten, 2050

Bei der Ermittlung einer Bandbreite bei den zentralörtlichen Funktionen und gesondert betrachteten Orten wurde davon ausgegangen, dass sich in der Minimalvariante lediglich in Bürogebäuden die Zahl der Arbeitnehmenden erhöht, und somit das Betriebswasserpotenzial. Es wurde davon ausgegangen, dass zusätzliche Gewerbearbeitsplätze in den Nachbargemeinden von Frankfurt am Main entstehen werden, und daher das gewerbliche Betriebswasserpotenzial unverändert bleibt; hingegen wurde in der Maximalvariante mit einer deutlichen Steigerung von Arbeitsplätzen im Bürobereich kalkuliert.

Auch für Sportplätze, Grünflächen und an der Goethe-Universität ist ein Zuwachs im Falle einer starken Bevölkerungsentwicklung schwer zu beziffern und konnte daher nicht berücksichtigt werden. Im Trendszenario wird bei den gesondert betrachteten Orten (wie auch in Gebäuden für Wohnzwecke) aufgrund der mangelnden Versorgung kein weiteres Betriebswasserpotenzial umgesetzt und beträgt bei niedriger und hoher Bevölkerungsentwicklung 0,2 Mio. m³. Bei der strategischen Entwicklung der Betriebswasserversorgung (Besondere Anstrengungen) können auch sanierte Bürogebäude mitversorgt werden, wodurch es hier zu einem Zuwachs kommt; bei der betrachteten Minimalvariante der Bevölkerungsentwicklung zu 0,8 Mio. m³ pro Jahr, bei der Maximalvariante der Bevölkerungsentwicklung zu 1,1 Mio. m³ pro Jahr, siehe Abbildung 27.

Insgesamt kommt es für das Jahr 2050 im Szenario „Besondere Anstrengungen“ zu einer möglichen Trinkwassersubstitution mit einer Bandbreite von 4,2 bis 6,6 Mio. m³ (vgl. auch Anhang 7.5); bei einer strategischen Entwicklung der Betriebswasserversorgung in innerstädtischen bzw. innenstadtnahen Teilgebieten wird hier in der Maximalvariante sogar ein Großteil der Bürogebäude mit Betriebswasser für die Toilettenspülung versorgt.

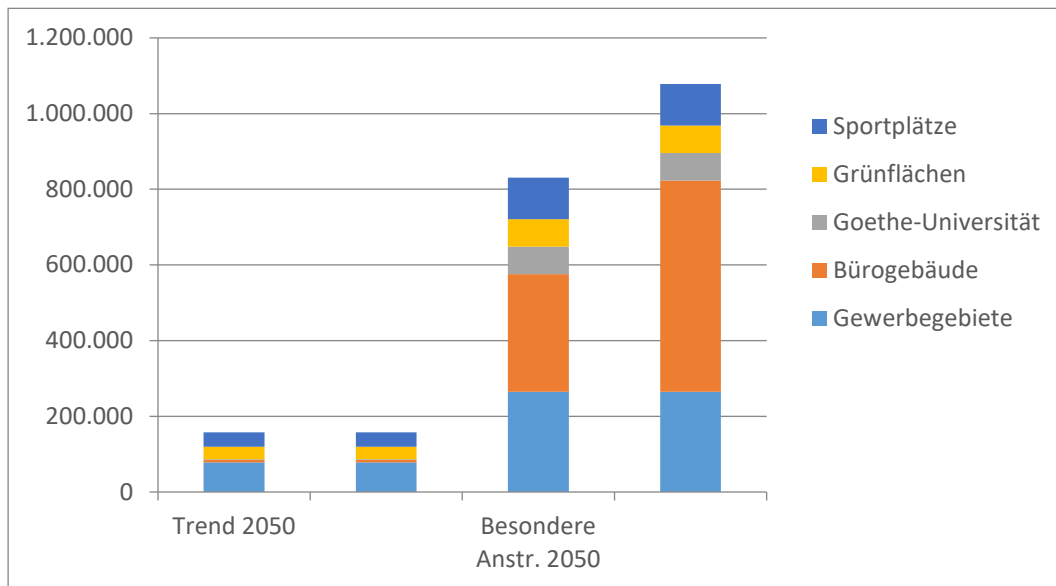


Abbildung 27: Teilgebietliche Abschätzung des Betriebswasserpotenzials für 2050

7.6. Sensitivitätsbetrachtung und weitere Diskussion der Ergebnisse

Die in Kapitel 5 dargestellten Substitutionspotenziale beruhen auf detaillierten Einzelrecherchen, die teilweise an best practises ansetzten, um aktuell bereits verwirklichte Potenziale zu identifizieren. Eine Realisierung dieser Potenziale ist jedoch nicht ohne Weiteres von den betrachteten Beispielen auf die gesamte Fläche von Frankfurt am Main verallgemeinerbar. Für eine valide Abschätzung der realisierbaren Trinkwassersubstitution für das gesamte Stadtgebiet bis 2030 und 2050 ist es notwendig, dass die Annahmen solide und in die Fläche übertragbar sind. Auf den Erkenntnissen aus Kapitel 5 konnte daher nur teilweise aufgebaut werden; teils wurden aber für die Hochrechnungen eines realisierbaren Substitutionspotenzials Differenzierungen gewählt.

Bei der Quantifizierung der beiden Szenarien wurde eher zurückhaltend vorgegangen, auch weil die zuvor erhobenen Datenbereiche für einige Bereiche (z. B. öffentliche Einrichtungen, Sporteinrichtungen und Grünanlagen) als suboptimal und nur bedingt belastbar eingeschätzt wurden. Das Trendszenario befriedigt insofern nur bedingt analytische Erwartungen: Aussagen über technisch erwartbare Substitutionsraten wurden aufgrund von erwarteten Hemmnissen unterschritten. Da hier Neuland beschritten wurde, kann es sein, dass die Trendbeschreibung zu konservativ erfolgte; darauf lässt schließen, dass sich die Ergebnisse der beiden Szenarien für die genannten Bereiche eher marginal unterscheiden. Das Gutachten von Roth (2016) schätzt die künftige Regenwassernutzung optimistischer ein; insbesondere bei der Regenwassernutzung könnte tatsächlich die zukünftige Substitution höher liegen als im Trendszenario angenommen. Bessere Aussagen zu diesem Bereich können dann gemacht werden, wenn die Gebührenabteilung der Stadtentwässerung weitere Daten zu den gemeldeten Zisternennutzungen in Frankfurt am Main auswertet und kommuniziert.

Ebenso wäre beim Szenario „Besondere Anstrengungen“ durchaus eine höhere Substitution vorstellbar, wenn eine rein technische Betrachtung erfolgt wäre. Dort wurde z. B.

davon ausgegangen, dass nicht alle Neubauprojekte (z. B. Wohnungsbau, Gewerbe) mit Betriebswasser versorgt werden können. Der Einsatz von Betriebswasser wird hauptsächlich für Bewässerung (Wohngebäude) und für die Toilettenspülung (Wohn- und Gewerbegebäude) realisiert werden; bei der Extrapolation der Szenarien wird keinesfalls von einer maximalen Umsetzung der ermittelten Potenziale ausgegangen, weil die Möglichkeit der technischen Realisierung derzeit noch nicht genau abgeschätzt werden kann, hydrogeologische Grundlagen und institutionelle Festlegungen fehlen und auch weitere offene Fragen zur Qualitätssicherung im Rahmen dieses Gutachtens nicht beantwortet werden können. Darüber hinaus decken die sektoralen und teilräumlichen Betrachtungen nicht sämtliche Bereiche ab; so konnte z. B. eine Abschätzung des aktuellen Betriebswasserpotenzials im verarbeitenden Gewerbe/Industrie nicht vorgenommen werden.

Ginge man z. B. davon aus, dass in Büro- und Gewerbegebäuden für Toilettenspülung, Gebäudekühlung, Reinigungsarbeiten und Umkehrosmose-Spülmaschinen ein ähnliches Betriebswasserpotenzial umgesetzt werden kann wie bei der Goethe-Universität, entspräche dies im Stadtgebiet ca. 0,6 Mio. m³ pro Jahr. Zudem gibt es unterschiedliche Typen der Gebäudekühlung, und es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die im exemplarisch betrachteten PA-Gebäude der Goethe-Universität verbaute Technik das Optimum darstellt.

Eine derzeit noch ungeklärte Frage ist, inwieweit eine Umstellung auf Betriebswasserversorgung bei Sanierungen von Büro-, Gewerbe- und Schulgebäuden wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Aufgrund der betrieblichen Erfahrungen beim Umbau von Bürogebäuden (z. B. Sanierung der Doppeltürme der Deutschen Bank) ist aber davon auszugehen, dass wenigstens für diesen Bereich die innergebäudliche Nachrüstung mit zusätzlichen Betriebswasserleitungen sehr viel einfacher gelingen kann.

Die Potenziale für die Nutzung von Regenwasser, das in Gewerbe und Industriegebieten anfällt und aufgefangen, gesammelt und z. B. für die Bewässerung, aber auch für Reinigungsarbeiten oder andere Zwecke genutzt werden könnte, könnten gleichfalls höher liegen als hier veranschlagt. Dies ist davon abhängig, wie weit bei Baumaßnahmen kostengünstig Zisternen angelegt werden können.

7.7. Schlussfolgerung

Um Aussagen zum möglichen Trinkwassersubstitutionspotenzial im betrachteten langfristigen Zeitraum herzuleiten, wurden zwei stark kontrastierte, hinsichtlich in ihrer Umsetzung möglichst plausible Szenarien entwickelt. Das „Trendszenario“ ist konservativ ausgelegt und schreibt die aktuelle Entwicklung im Bereich der Trinkwassersubstitution fort. Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wird die Substitution von Trinkwasser von den kommunalen und privaten Entscheider*innen mehrheitlich als wünschenswert angesehen. Mit Hilfe des Szenarios „Besondere Anstrengungen“ wurde zudem skizziert, unter welchen Voraussetzungen das anspruchsvolle Ziel einer stadtweiten Trinkwassersubstitution umgesetzt werden kann.

Im Szenario „Trend“ wird im Bereich der häuslichen Nutzung (EFH und MFH) für das Jahr 2030 ein Trinkwassersubstitutionspotenzial von 0,26 Mio. m³/a veranschlagt. Das Trinkwassersubstitutionspotenzial steigt bis zum Jahr 2050 auf ca. 0,3 Mio. m³ an. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Einsparpotenziale im Bereich Bewässerung, Industrie und Gewerbe wird ein Trinkwassersubstitutionspotenzial für das Jahr 2050 von 0,5 Mio. m³/a angenommen.

Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wird eine Betriebswasserversorgung strategisch entwickelt; zudem wird für den Siedlungsbestand eine klimaadaptive Regenwassernutzung für die Garten- und Grünbewässerung vorgeschrieben. In der Minimalvariante mit einer Bevölkerungsentwicklung von 817 000 Einwohner*innen (2050) beträgt die hier rechnerisch abgeschätzte Trinkwassersubstitution für den häuslichen Bereich 3,4 Mio. m³ pro Jahr. In der Maximalvariante mit einer Bevölkerungsentwicklung von 885 000 Personen in 2050 beträgt deren häusliches Trinkwassersubstitutionspotenzial 5,55 Mio. m³ pro Jahr; die Unterschiede zwischen beiden Varianten beruhen wesentlich auf einer höheren Anschlussquote im Bestand.

Unter Berücksichtigung weiterer Trinkwassersubstitutionspotenziale im Bereich Industrie, Gewerbe und Grünflächen wird im Szenario „Besondere Anstrengungen“ angenommen, dass rein rechnerisch in 2050 ein Trinkwassersubstitutionspotenzial von maximal insgesamt 6,63 Mio. m³/a gehoben werden kann. In der Minimalvariante verringert sich das mögliche Trinkwassersubstitutionspotenzial auf rund 4,2 Mio. m³/a in 2050. Die Extrapolation der Szenarien erfolgte aus pragmatischen Gründen nicht unter dem Aspekt einer Ausweisung größtmöglicher Trinkwassersubstitutionsmengen.

Da im Rahmen der bisher geführten Gespräche mit den involvierten Wohnungswirtschaftsgesellschaften nicht zu erwarten ist, dass großflächig Wohnungen umgerüstet werden, insbesondere wenn Mieter*innen hier tatsächlich zeitweilig in Ausweichquartiere umziehen müssten, ist zu erwarten, dass das rein rechnerisch abgeleitete Trinkwassersubstitutionspotenzial im von diesen Gesellschaften bewirtschafteten Siedlungsbestand erst in 2080 erreicht werden kann. Allerdings müssen voraussichtlich in einem Teil der innenstadtnahen Stadtviertel (z. B. Westend, Nordend, älterer Bestand im westlichen Teil von Sachsenhausen-Nord) in den nächsten Jahren die Wohnungswasserversorgungsanlagen saniert werden, was bereits ein früheres Gelegenheitsfenster für eine Transformation darstellen könnte. Bis 2080 wäre somit die Möglichkeit gegeben, dass fast ein Sechstel des für 2050 prognostizierten Trinkwasserbedarfs in Haushalten und in Kleingewerben von ca. 38,1 Mio. m³/a in einem Normaljahr bei maximaler Bevölkerungsentwicklung und maximalen Einsparpotenzial substituiert werden könnte.

Die Größe des Trinkwassereinsparpotenzials korrespondiert unmittelbar mit der Umsetzung im häuslichen Bereich und der Dynamik der Bevölkerungsentwicklung. Im Szenario „Trend“ entfällt ein Anteil von 65 % auf den häuslichen Bereich. Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wird der Substitutionsanteil in Abhängigkeit von der Bevölkerungsentwicklung durch einen Anteil von bis zu 84 % aus dem häuslichen Bereich getragen. Unabdingbar sind daher kommunalpolitische Maßnahme und Anreize für Investoren und Eigentümer, die im Rahmen von Neubauvorhaben und Wartungs- und

Instandhaltungsarbeiten den Einbau eines zweiten Leitungssystems begünstigen inkl. der damit verbundenen Betriebswasserbereitstellung.

Mit dem Bevölkerungsanstieg ist auch ein Mehrbedarf an Trinkwasser verbunden, wenn dieser im gleichen Zeitraum nicht durch den Ausbau der Betriebswassernutzung im Bestand substituiert werden kann. Der Trinkwassermehrbedarf in 2050 steigt gegenüber dem Bezugsjahr 2018 im häuslichen Bereich unter der Annahme, dass alle Neubürger*innen (ca. 137 000 Einwohner*innen bei der maximalen Bevölkerungsentwicklung) an eine Betriebswasserversorgung angeschlossen sind und diese auch entsprechend nutzen, in einem Trockenjahr auf bis zu 4,2 Mio. m³/a an.

8. Konsequenzen für das Arbeitsgebiet

Die verstärkte Propagierung der Regenwassernutzung in den Ein- und Zweifamilienhäusern kann für etwa 90 000 Frankfurter*innen den Zugang zur Regenwasserversorgung bedeuten. Diese Maßnahme kann als Einstiegspunkt in eine umfassendere Betriebswasserversorgung für Frankfurt am Main gewählt werden und ist auch alleine, ohne Transformation im Bereich der öffentlichen Trinkwasserversorgung, möglich.

Insbesondere in den Vororten von Frankfurt am Main mit einem hohen Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern ist eine verstärkte Regenwassernutzung sinnvoll, da bei diesem Gebäudetyp eine ausreichende Dachfläche zum Auffangen von Regenwasser pro Person zur Verfügung steht. Eine Reduzierung des Verhältnisses zwischen vorhandener Dachfläche und Personenzahl erfordert in Konsequenz eine Nachspeisung von Trinkwasser, wenn Betriebswasser nicht nur für die Gartenbewässerung, sondern auch für innerhäusliche Zwecke verwendet wird. Allerdings gibt es in Frankfurt am Main fast keine Vororte, die nur oder überwiegend aus Ein- und Zweifamilienhäusern bestehen. Schon im Bereich der Vororte ist es daher naheliegend, über eine öffentliche Betriebswasserversorgung nachzudenken, da nur so dort eine flächendeckende Versorgung mit Betriebswasser aufgebaut werden kann.

Hydrogeologisch können Teile des Stadtgebiets, vor allem im Bereich der Mainterrassen, auf Grundwasser in ausreichender Menge als Betriebswasserressource zurückgreifen. Überschlüssig (hier ist auch ein großer Teil der Ein- und Zweifamilienhäuser) könnte mehr als die Hälfte der Einwohner*innen mit Betriebswasser aus Grund- bzw. Regenwasser (oder einer Kombination aus beidem) versorgt werden. Vor einer entsprechenden Festlegung sollten allerdings die Vorkommen genauer erkundet werden; qualitative, aber auch ökologische Aspekte bzw. die wasser- und umweltrechtlichen Anforderungen können in Teilgebieten gegen eine entsprechende Nutzung sprechen. Bei geringerer Wasserhöfigkeit des Untergrunds bietet sich auch eine Kombination aus Regenwassernutzung und Grundwassernachspeisung, die allerdings im Rahmen der Studie nicht näher untersucht wurde, an. Mit dieser Kombination besteht in Zeiten erhöhten Wasserbedarfs (Trockenzeiten) die Möglichkeit, Nachspeisungen aus dem Trinkwassernetz zu minimieren. Bei allen Kombinationslösungen ist aber zu berücksichtigen, dass der erhöhte Materialeinsatz sich in einem höheren CO₂-Fußabdruck, einer schlechteren Ökobilanz und höheren Investitionskosten und voraussichtlich auch höherem Betriebsaufwand niederschlägt.

Im Bereich des Berger Rückens und seiner Fortsetzung nach Westen sowie des Sachsenhäuser Berges ist hingegen eine einfache Grundwasserversorgung nicht aufbaubar; für diese collinen Bereiche ist darüber nachzudenken, eine flächenhafte Versorgung entweder auf der Basis von Mainwasser oder von Grauwasser aufzubauen. Grundsätzlich könnte Mainwasser aus dem Aufbereitungswerk in Niederrad durch Düker unter dem Main hindurch geleitet werden. Eine Alternative wären nordmainische Flusswasseraufbereitungen, aus denen die großen gründerzeitlichen hochverdichteten Stadtteile Westend, Nordend-West, Nordend-Ost, Bornheim und Ostend mit insgesamt derzeit etwa 150 000 EW ebenfalls mit Betriebswasser versorgt werden könnten; wirtschaftlich

und ökobilanziell ist hier jedoch der Aufwand für die Errichtung eines neuen Betriebswasserwerkes abzuwägen.

Die szenarischen Betrachtungen verdeutlichen (vgl. Kapitel 7.6), dass insbesondere intensivere Anstrengungen zur Umsetzung einer Betriebswasserversorgung erst mit erheblichen zeitlichen Verzögerungen Auswirkungen auf den Trinkwasserbedarf haben können. Allerdings steigt der Trinkwasserbedarf zugleich aufgrund der Bevölkerungszunahme und der weiteren baulichen Entwicklung an, sodass im Zielhorizont 2080 die Trinkwasserabgabe, unter Ausschöpfung aller möglichen Betriebswasserpotenziale, realistisch abgeschätzt auf einem Niveau geringfügig unterhalb der Trinkwasserabgabe des Jahres 2018 sich stabilisieren könnte. Die Größenordnung des Ausbaus der Trinkwasserversorgung ist abhängig von den Anstrengungen der Kommune, eine eigene Betriebswasserversorgung aufzubauen bzw. von deren Umsetzungsrahmen. Nur im Rahmen von Siedlungsneubauten kann bereits im Vorfeld eine Betriebswasserversorgung mit eingeplant und umgesetzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die Vorgaben der Löschwasservorhaltungsmengen für diese Gebiete gesichert dargestellt werden müssen. Dies kann unter Berücksichtigung der Druck und Mengenvorgaben sowohl über Trinkwasser als auch Betriebswasser erfolgen.

Für eine genauere Erforschung der Auswirkungen wird vorgeschlagen, dass interdisziplinär weitere Abschätzungen unter Berücksichtigung der technischen und rechtlichen Anforderungen vorgenommen werden. Aufbauend auf einer weiterführenden Prognose des künftigen Trinkwasserbedarfs besteht die Möglichkeit, basierend auf den Einsparungsmengen in der Grundlast den Fall der sommerlichen Spitzenlastereignisse in 2050 bzw. 2080 zu betrachten. Hierfür kann auf die vorliegenden Zahlen aus dem Szenario „Besondere Anstrengungen“ (die sich auf ein Jahr beziehen) zurückgegriffen werden, um die Frage näherungsweise zu beantworten: Welche Spielräume ergeben sich ggf. durch die ermittelte Substitution in der Grundlast ab 2050/2080 in Frankfurt am Main. Insbesondere ist zu fragen, ob diese in einem Spitzenlastereignis zu einer spürbaren Entlastung der technischen Infrastruktur führen. Zu beachten ist, dass im Rahmen der bestehenden Prognoseungenauigkeiten (Bevölkerungsprognose und Substitutionspotenzial) nur allgemeine Näherungswerte ermittelt wurden und entsprechend nur eine überschlägige Abschätzung möglich ist. Eine Transferierung der Prognosen auf den Leitungsverbund (insbesondere, wenn die demographische Entwicklung in diesen Gemeinden mit einbezogen wird) oder eine Übertragung auf andere Teilräume – hier Darmstadt und Wiesbaden ggf. noch Mittelzentren wie Rüsselsheim, Raunheim – bedarf daher eines detaillierteren und tiefergehenden stochastischen Ansatzes. Nachteilig auf eine Dämpfung der Spitzenlast kann sich der forcierte Ausbau der Regenwassernutzung ohne zentral zu steuernde technische Nachspeiseeinrichtungen in regenlosen langanhaltenden Hitzeperioden auswirken. Realistisch wird eine in der Wasserbeschaffung evtl. zu deutlichen Entlastungen führende Reduktion der Trinkwasserabgabemenge in der Grund- und Spitzenlast erst ab 2050 erwartet.

Zweitens stellt sich die Frage, ob und in wieweit eine über das Trendgeschehen hinausgehende, kommunalpolitisch gestützte Substitution in Frankfurt am Main auf die

Gemeinden im Leitungsverbund und die Gemeinden in anderen Teilräumen ausstrahlt. Die Fälle, die in den beiden Szenarien behandelt werden, werden sehr unterschiedlich auf die benachbarte Kommunalpolitik bzw. die Bevölkerung der anderen Teilräume einwirken. Während für das Trendszenario von nur geringen Ausstrahlungen auszugehen ist, sind hier für das Szenario „Besondere Anstrengungen“ deutliche Beeinflussungen zu vermuten. Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung durch Ein- und Auspendler, aber auch durch die regionale Berichterstattung werden z.B. Bewusstseinskampagnen in ihren Wirkungen nicht an den Stadtgrenzen haltmachen, sondern auch im Vordertaunus Auswirkungen haben. Insbesondere in Kommunen wie Oberursel, in denen die Regenwasserbewirtschaftung schon eine mehr als zwanzigjährige kommunalpolitische Tradition hat, ist zu vermuten, dass es zu einer Mobilisierung in der Bevölkerung kommt. Auch sind kommunalpolitische Transfers in diesem Szenario zu vermuten, d. h. dass Kommunalpolitiker aus Umlandgemeinden Politikelemente zur Trinkwassersubstitution aus Frankfurt am Main in ihre Wirkungsorte „importieren“.

Einhergehend mit einer Substitution der Trinkwassermenge durch die Nutzung von Betriebswasser kann bei gleichbleibenden Fixkosten für Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Speicherung und Verteilung des Trinkwassers auf eine kleinere Abgabemenge verteilt und erwartungsgemäß zu einer Steigerung des Trinkwasserpreis führen. Der Gesamteffekt, welcher sich durch den systemseitigen Wechsel von Trink- zu Betriebswasser ergibt, müsste, falls eine flächendeckende Betriebswassernutzung in Betracht gezogen wird, zusätzlich untersucht werden. Positiv würde sich die Substitution von Trinkwasser auf mögliche Bezugsmengen aus dem Leitungsverbund dahingehend auswirken, da sich der Bezug aus den Gewinnungsgebieten für die Stadt Frankfurt am Main, unter Berücksichtigung des prognostizierten Bevölkerungszuwachses bis 2050, zumindest auf das bisherige Bezugsniveau stabilisieren würde.

9. Fazit und Ausblick

Es ist wenig wahrscheinlich, dass es in der Zukunft zu einer Entwicklung kommen wird, die sehr nahe entlang eines der beiden Szenariostränge verläuft und diesem eindeutig folgt. Die Wirklichkeit ist immer komplexer und verläuft nicht entlang von derartigen idealtypischen Pfaden. Zudem wandeln sich Entwicklungsmuster: Die Covid-19-Pandemie 2020/21 hat mit den teilweisen Lockdowns deutlich gezeigt, dass sich zukünftig in einigen Branchen des tertiären Sektors wohlmöglich stärker als bisher Heimarbeitsplätze durchsetzen werden; hierdurch kann es zukünftig zu einer Umverteilung von Wasserverbräuchen zwischen häuslichem Bereich und Bürosektor, aber auch zwischen den Pendlergemeinden im Umland und Frankfurt am Main kommen. Es könnte in Folge derartiger Umstrukturierungen der Büroarbeit auch dazu kommen, dass sich die Zuwanderungstendenz und Bevölkerungsentwicklung abschwächt. Die mit der Szenariomethode entwickelten Szenarien zur Ermittlung von Substitutionspotenziale für Trinkwasser dürfen daher keinesfalls als Vorhersagen verstanden werden.

Festhalten lässt sich aber eines: Wenn in der Stadt Frankfurt am Main tatsächlich der Weg zu einer deutlichen Substitution von Trinkwasser verfolgt werden soll, so ist eine wichtige Voraussetzung hierfür eine entsprechende (möglichst breite) politische Willensbildung. Aufbauend auf den Ergebnissen der Szenarioentwicklung und als ein weiterer Schritt bietet sich zur genaueren Identifikation der strategischen Planungsprämissen die Backcasting-Methode an. Beim Backcasting wird von einem genau definierten Ziel in der Zukunft rückwärts gedacht, und es werden notwendige Handlungsschritte und Maßnahmen retrospektiv erarbeitet. Angenommen, die Stadt Frankfurt am Main entschließt sich, den Weg zu einer deutlichen Substitution von Trinkwasser zu verfolgen, kann angenommen werden, dass dies zu einer Stabilisierung der Trinkwasserabgabemenge und der Bezugsmengen in einer noch zu ermittelnden Größenordnung führt. Ein vermehrtes Bemühen der Stadt Frankfurt am Main um eine weitgehende kommunale Versorgung mit Betriebswasser aus eigenen Ressourcen kann zusätzlich konfliktentschärfend auf das bestehende Stadt-Umland-Verhältnis wirken.

Aus den Szenarien lassen sich einige zentrale Folgerungen zur Trinkwassersubstitution ableiten, die den Erfolg der Maßnahme unmittelbar beeinflussen. So ist Folgendes erforderlich: In der Stadt ist ein „Kümmerer“ vorhanden, der das Thema Wassersubstitution dauerhaft verfolgt; diese Rolle braucht nicht in Personalunion mit einem/r politischen Wahlbeamten/in (Dezernatsleitung) verbunden werden, wie es das Szenario „Besondere Anstrengungen“ beschreibt. Es erscheint weiterhin als „Muss“, dass eine Koordinationsstelle eingerichtet wird, die die Abstimmungsprozesse zwischen den unterschiedlichen Akteuren (z.B. Stadtplanungsamt, Wasserversorger, Stadtentwässerung und Wohnungswirtschaft) koordiniert und evtl. sogar zugleich die (übergeordnete) Organisation der Trinkwassersubstitution in Frankfurt am Main verantwortet (die betriebliche Organisation kann davon abgetrennt sein). Möglicherweise kann für diese Stelle aus den Erfahrungen mit TraffIQ gelernt werden, die (auch in der organisatorischen

Trennung vom Betreiber der kommunalen Mobilitätsdienstleistungen) ein interessantes, mit Qualitätssicherung verbundenes Modell im Bereich der öffentlichen Nahverkehrskoordination darstellt.

In einem der Szenarien der Untersuchung wurde auch ein Masterplan zur Betriebswassernutzung eingeführt, der gleichfalls ein Essential darstellt. Erst auf einem Masterplan aufbauend kann strategisch festgestellt werden, ob es in Frankfurt am Main sinnvoll ist, für alle Ortsteile ein öffentliches Betriebswassernetz aufzubauen oder ob hier ausschließlich die Bereiche versorgt werden sollten, in denen die Nachfrage besonders groß werden kann. Optimal für die kommunale Strategiebildung wäre es, wenn nicht nur das Dargebot der möglichen Betriebswasserressourcen in Menge und Güte teilräumlich erfasst würde, sondern auch die Nachfrage genauer abgebildet wird, inklusive der teilgebietlichen Gelegenheitsfenster, die deren Umsetzung begünstigen würden.

Die Frankfurter Akteure haben frühzeitig im Untersuchungsprozess darauf hingewiesen, dass in der aktuellen wasserwirtschaftlichen Substitutionsdebatte nach ihrer Ansicht der Beitrag der Regenwassernutzung zu gering eingeschätzt wird. Dieser Sachverhalt konnte mit der Studie bestätigt werden. Nicht nur für Ein- und Zweifamilienhäuser kann die Niederschlagspende das Rückgrat einer Trinkwassersubstitution bilden; auch zur Pflege der Grünen Infrastruktur der Städte ist der Stellenwert von Regenwasser bisher zu wenig betont worden. Im BMBF-Vorhaben INTERESS-I, an dem zahlreiche Frankfurter Akteure beteiligt waren, wurde die Nutzung von Niederschlagswasser für die Grünpflege untersucht. Im Vorhaben wurden sehr gut die Grenzen der Regenwassernutzung herausgearbeitet und darauf aufbauend die Kopplung einer Nutzung von Regen- und Betriebswasser aus Grauwasser empfohlen.

Von der siedlungswasserwirtschaftlichen Fachwelt wird bei der Einrichtung einer Grauwasserversorgung im Siedlungsbestand Forschungsbedarf gesehen, bisher aber nicht generell für den Aufbau einer Betriebswasserversorgung im Bestand. Jenseits der technischen Fragestellungen (z. B. Verlegung von zusätzlichen Betriebswasserleitungen in Innenstadtbereichen) sind jedoch bereits im organisatorischen Bereich hiermit zahlreiche Fragen berührt, die dringend zu klären sind, wenn eine Trinkwassersubstitution auch im Siedlungsbestand eingeführt werden soll. Es war geplant, eine Veranstaltung zur Klärung des Forschungsbedarfs flankierend zum Gutachten durchzuführen. Die benötigte Finanzierung durch die Umweltstiftung des Bundes konnte jedoch nicht rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.

Die in den Quartieren betrachteten Alternativen hinsichtlich der Substitution von Trinkwasser (aufbereitetes Oberflächenwasser aus dem Main und vor Ort erzeugtes Grauwasser) liegen hinsichtlich der Kosten auf einem vergleichbaren Niveau, weisen jedoch erhebliche Unterschiede in ihren Auswirkungen auf die Umwelt auf. Bei der gewählten Fokussierung alleine auf die Stadt Frankfurt am Main und die Gegenwart erscheint bei Betrachtung des CO₂-Fußabdrucks die Referenztechnik als deutlich günstiger als die Trinkwassersubstitution. Für beide Quartiere werden im Vergleich mit der

konventionellen Trink- und Abwasserentsorgung grundlegende und belastbare Ergebnisse dargestellt. Die Betrachtung regionaler Effekte, die bei einer Substitution entstehen, sollte die durchgeführte Ökobilanzierung ergänzen.

Grundsätzlich sollte in künftigen Neubaugebieten (und möglichst auch bei Nachverdichtungen) eine Betriebswasserversorgung vorgesehen werden. Ein Aufbau einer Betriebswasserversorgung im Wohnbestand und damit eine Transformation ist möglich, aber ohne vielfache Anstrengungen, die zu einer „Betriebswasser-Kultur“ führen, nicht vorstellbar. Auch bei einer solchen Transformation im häuslichen Bestand ist nur eine Transformationsquote (Umbau auf Betriebswassernutzung) von schätzungsweise max. 90 % zu veranschlagen; das Trinkwassersubstitutionspotenzial pro teilnehmender Person wird voraussichtlich in einem Bereich zwischen 30 und maximal 40 % liegen (dies auch unter der Prämisse, dass in Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung eine Nachspeisung aus dem klassischen Trinkwassernetz, die bei inhäusigem Regenwassereinsatz unabdingbar ist, nur möglichst selten genutzt wird).

In der Vergangenheit wurden Konzepte zur Transformation der Wasserinfrastruktur im Siedlungsbereich immer so gedacht, dass von einem einheitlichen System auf ein anderes System umgestellt werden würde. Bei der hier vorgelegten Untersuchung in Frankfurt am Main hat es sich aber gezeigt, dass es zur Nutzung von Synergien sinnvoll ist, für unterschiedliche Gebäudetypen verschiedene Wasserquellen zur Substitution heranzuziehen. Es ist bisher nicht geklärt, ob der Aufwand mit der Koordination dieses Ressourcenmixes (Kluge 2020) und der daraus resultierenden unterschiedlichen Systeme die Kommune oder den von ihr beauftragten Konzessionär nicht zu sehr großen Herausforderungen führt. Da die Versorgung mit Betriebswasser als Dienstleistung von allgemeinem wirtschaftlichen Interesse eingestuft werden kann, ist darauf zu achten, dass die Kommune, wenn sie damit einen Aufgabenträger beauftragen möchte, nicht zu rahmenrechtlichen Veränderungen (z.B. in der Dienstleistungsrichtlinie der EU) kommt; insbesondere die nicht nur einmalige, sondern in einem bestimmten Turnus wiederholte Ausschreibung und Vergabe der öffentlichen Betriebswasserversorgung kann dazu geeignet sein, die Versorgungsbeziehungen der Kunden, die Betriebswasser beziehen, zu beeinträchtigen.

Die Substitution bietet auch an, gleichzeitig Synergien mit der Energieversorgung zu schaffen. In Wohnhochhäusern, aber z. T. auch in Quartieren, die von einem Unternehmen der Wohnungswirtschaft betrieben werden, erlaubt die getrennte Erfassung von Grauwasser nicht nur dessen Aufbereitung als Betriebswasser, sondern auch eine effektive Abschöpfung der Restwärme. Bei der Energierückgewinnung aus Grauwasser ist es möglich, dezentral in einem eigenständigen Anlagenteil eine nennenswerte Temperaturdifferenz etwa zur Erwärmung von häuslichem Warmwasser zu nutzen. Auch semizentral lässt sich Abwärme aus Grau- und auch aus Abwasserkanälen mit einem Wärmetauscher entziehen, allerdings mit geringerer Temperaturdifferenz, was meist nur dort energieeffizient ist, wo sich Wärmenutzungen befinden oder z. B. in ein Kältenetz eingespeist werden kann. Bei einer Nutzung im Bestand müssen immer ausrei-

chende Flächen/Raumvolumen zur Integration der Anlagentechnik zur Verfügung stehen. Dies kann zu einer erheblichen energetischen Effizienzsteigerung im Gebäudemanagement führen. Wieweit das für die großen Frankfurter Gesellschaften insgesamt ein nachhaltiges Geschäftsmodell sein kann, ist noch zu untersuchen.

Wie sich der Bewässerungsbedarf im öffentlichen Raum, aber auch auf Privatgrundstücken in den nächsten Jahren entwickeln wird, ist nicht einfach fortschreibbar. Aufgrund der Klimaveränderung wird es eine deutliche Erhöhung geben. Folglich sind auch die kommunalen Faustzahlen aufgrund der zunehmenden Hitze- und Trockenperioden anzupassen. Zudem geht es bei Regenwasserbewirtschaftung nicht in jedem Fall um die Abkehr von der Versickerung; Regenwasser lässt sich z. B. durch geeignete Versickerungstechnologien (z. B. Baum-Rigolen-Systeme) für Wasserspenden an die Vegetation nutzen. Durch den Einbezug der Vegetation können auch die im Rahmen des Gebietswasserhaushalts erforderlichen Verdunstungsmengen gewährleistet werden (vgl. Steinbrich et al. 2018).

Ein zukünftig zentrales Thema im Masterplan sollte die Dach- und Fassadengestaltung bei größeren Neubauten sein. Über eine Fassaden- und Dachbegrünung besteht die Chance, dass in den dichtbesiedelten innerstädtischen Bereichen das klimatische Änderungssignal – Hitze, Trockenheit, Starkniederschlag – abgemindert werden kann. Für den Erhalt der zukünftig vermehrt in Einsatz kommenden Dach- und Fassadenbegrünung müssen während der Vegetationsperiode Bewässerungsmengen vorgehalten werden, um die Innen- und Außenwirkung der Bepflanzung zu gewährleisten. Handlungsbedarf besteht in der Frage, welche Betriebswässer ganzjährig an den exponierten Gebäuden zur Verfügung gestellt werden können.

Ein zentrales Potenzial für die Trinkwassersubstitution in Büro- und Verwaltungsgebäuden, zunehmend auch im Bereich von Wohntürmen und Passivhäusern stellt die Gebäudeklimatisierung dar, die in dieser Untersuchung nicht systematisch betrachtet wurde. Für eine Stadt wie Frankfurt am Main ist zudem die Kühlung im Bereich der Elektronischen Datenverarbeitung (Rechenzentren) von einer zunehmenden Wichtigkeit. Insofern kann eine ergänzende Untersuchung weitere Ergebnisse liefern, die in einen kommunalen Masterplan zur Trinkwassersubstitution eingehen können.

Frühzeitige Schulungen des Handwerks (und auch die Zusammenarbeit etwa mit der berufsbildenden Philip-Holzmann-Schule oder der Heinrich-Kleyer-Schule zur Schulung des Nachwuchses) sind begleitend sinnvoll, evtl. auch Maßnahmen zur Steigerung des gegenwärtig bei Jugendlichen sehr niedrigen Image dieser Fachberufe durch die Mainova oder den Magistrat (z. B. Aktivitäten nach dem Vorbild der Berliner Ausbildungsstiftung „HandWerk stiftet Zukunft“).

Die Transformation zur Neuausrichtung der Versorgungsstruktur ist mit erheblichen Investitionen in neue Strukturen verbunden. Eine Substitution von Trinkwasser kann für die Bürgerschaft, aber auch die Kommunalpolitik selbst dann als vorteilig angesehen werden, wenn sie im Rahmen des erforderlichen Transformationsprozesses zu-

nächst unwirtschaftlich scheint. Dafür müssen im Vorfeld der Entscheidung die entsprechenden Grundlagen aufbereitet und die wirtschaftlichen Nachteile (höhere Kosten für Trink- und Betriebswasser) einem möglichen ökologischen Vorteil gegenübergestellt werden.

Zu berücksichtigen ist, dass durch die steigenden Lebenshaltungskosten keine soziale Ungerechtigkeit entstehen, die gesellschaftlich zu Folgeproblemen führen können und auch sozialgesetzlich getragen werden müssen. Erst die Verfügbarkeit in der Fläche und der Einsatz durch eine Vielzahl der Städter*innen kann dazu führen, dass durch einen eigenen Zugang zum Betriebswasser, das Wasser als eine wichtige Naturressource wahrgenommen wird und Betriebswasser nicht als ein Luxusgut firmiert.

Bei allen Überlegungen ist zu berücksichtigen, dass der in der Stadt Frankfurt am Main vorhandene hohe Anteil der Bevölkerung – jede/r achte Einwohner*innen der Stadt ist auf Existenz sichernde bedarfsorientierte Sozialleistungen angewiesen – von einer Betriebswasserversorgung nicht ausgeschlossen wird (Statistische Berichte der Stadt Frankfurt am Main, Ausgabe 06/2019). Es kann zusätzlich angenommen werden, dass ein Teil von Einfamilienhäusern im Bestand auch Eigentümer*innen in prekären Verhältnissen gehört, denen die finanziellen Mittel für eine Transformation ihrer Hauswassersysteme fehlen. Zur Teilhabe an einer flächendeckenden Betriebswasserversorgung könnten Kommunalunternehmen z.B. Leasingangebote entwickeln oder die Stadtgesellschaft einen Ausgleich z.B. über nachbarschaftliche Betriebswasser-Genossenschaften suchen.

Neben den beschriebenen ökonomischen und ökologischen Aspekten sind die mit einer quartiersübergreifenden Betriebswasserversorgung erforderliche Nutzung öffentlicher Flächen für Bau und Betrieb von Betriebswasserversorgungsanlagen rechtssicher in die geeigneten Instrumente und Maßnahmen (z.B. mit einer städtebaulichen oder öffentlich-rechtlichen Vereinbarung, Konzession) zu überführen.

Aus Vorsorgegründen sind hygienische Risiken der Betriebswasserversorgung, insbesondere bei einer innerhäuslichen Verwendung, zu beachten. Bei einer kommunalen Entscheidung für eine Intensivierung der Betriebswassernutzung in Frankfurt am Main ist folglich auch zu beachten, dass das Gesundheitsamt über ausreichend Kapazitäten verfügt, um hier entsprechend der TrinkwV tätig werden zu können; eine kluge Digitalisierung mit Nutzer-Schnittstellen (für die wir Forschungsbedarf sehen) kann hier aber möglicherweise den Aufwand minimieren.

Bei der Erarbeitung des Gutachtens ist auch deutlich geworden, dass auch das Nicht-handeln in der Vergangenheit wichtige Erkenntnisse liefern kann und gleichzeitig zeigt, wo die Grenzen dieses Handelns klar verlaufen. Die Substitution von Trinkwasser wird bisher vom Engagement der Unternehmen bzw. eines jeden Einzelnen geprägt. Neben wirtschaftlichen Aspekten fokussieren sich vermehrt Unternehmen und Einzelpersonen auf das mit einer Substitution von Trinkwasser einhergehende ökologische Handeln als ein Alleinstellungsmerkmal. Dieser Wandel in der Perspektive bietet heute andere Ansatzpunkte zur Trinkwassersubstitution als in den 1990er Jahren. Die in

früheren Gutachten angesprochenen Möglichkeiten eines Aufbaus einer Betriebswasserversorgung im Rahmen von Siedlungsneubauten basierten auf einer anderen Sichtweise. Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass die flächendeckende Einführung einer Betriebswasserversorgung in einer Stadt von der Größe von Frankfurt am Main aufgrund zahlreicher Abhängigkeiten deutlich länger als 30 Jahre benötigen wird, um abgeschlossen zu sein. Wird in den nächsten Jahren damit zielstrebig begonnen, so könnte diese herausfordernde Aufgabe möglicherweise im Jahr 2080 bewältigt sein.

Die ermittelten Systemkosten in Verbindung mit den ökologischen Auswirkungen der Betriebswasserversorgung stellen selbst noch keine endgültigen ökonomischen und ökologischen Gesamtbewertungen im regionalen Maßstab dar, liefern aber erstmalig grundlegende und belastbare Ergebnisse, die in vertiefende Studien Eingang finden können. Für weiterführende Betrachtungen wäre insbesondere noch eine Kosten-Nutzen-Betrachtung in einem größeren Maßstab wünschenswert. Im Rahmen dieser Untersuchungen würde es sich anbieten, die vorgelegte sozio-ökonomische Betrachtung um weitere Aspekte z. B. Verbesserung des sozialen Wohlbefindens, Verbesserung der volkswirtschaftlichen Effizienz und Förderung der Regionalentwicklung, die zentralen Bewertungsdimensionen aus dem 4-Konten-Modell der LAWA entsprechend zu ergänzen.

10. Literaturverzeichnis

- AG Regenwasserbewirtschaftung (2005): Konzeption zur Umsetzung der Regenwasserbewirtschaftung (RWB) in Erschließungsgebieten der Stadt Frankfurt am Main. Frankfurt am Main, Germany
- Amt für Bau und Immobilien (2018a): Auswertung der Rechnungsdaten von den Energie-Versorgungs-Unternehmen für die Jahre 2015–2017
– (2018b): Senkung der Wasserkosten in öffentlichen Gebäuden. Seminarprogramm für die Energiebeauftragten der Stadt Frankfurt am Main. Stand: 20.11.2018. Kapitel 4
- Anton, Robert (2019 fernmündlich): Bewässerung von Grünflächen. Mitschrift des Telefonats vom 23.05.2019. Technische Leitung des Wissenschaftsgartens, Johann Wolfgang Goethe-Universität
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2019): Datenerhebung 2018 – Bundesmix 2018 (Stand 08.08.2019). Durchschnittswerte der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland. Berlin
- Beck, Jessica/Filip Bertzbach/Michael Eller/Stefan Geyler/Malte Hedrich/Robert Holländer/Nadine Jansky/Heide Kerber/Steffen Krause/Alexandra Lux/Kay Möller/Liselotte Schebek/Engelbert Schramm/Gevitha Selvakumar/Alexander Sonnenburg/Christina Tocha/Wilhelm Urban (2016): Handbuch NaCoSi – Anleitung zur Entwicklung eines Nachhaltigkeitscontrollings in der Siedlungswasserwirtschaft. NaCoSi – Projektverbund. Darmstadt
- Becker, Dennis/Alexander Frey/Christina Jungfer/Kerstin Krömer/Philipp Kulse/Sebastian Maaßen/Engelbert Schramm/Kristina Wencki/Barbara Zimmermann/Martin Zimmermann (2017): Marktpotentiale der Wasserwiederverwendung – Anforderungen und Kriterium in unterschiedlichen Sektoren und mögliche Zielmärkte für das MULTI-ReUse-Verfahren. ISOE-Materialien Soziale Ökologie, 49. Frankfurt am Main
- Becker, H. P. (2018): Investition und Finanzierung Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. 8. Aufl. Wiesbaden
- Becker, Jörg (2019): Auskunft zur Wasserbilanz Rhein-Main 2017 des Regierungspräsidiums Darmstadt für die Stadt Frankfurt am Main. E-Mail vom 12.12.2019 an Engelbert Schramm (ISOE)
- Belke, Lara/Writi Maitra/Rainer Stamminger (2018): Global consumer study to identify the potential of water-saving in dishwashing. Energy Efficiency 11 (7), 1887–1895
- Benthien, Marcus (2019 fernmündlich): Bewässerung von Sportplätzen. Mitschrift des Telefonats vom 22.05.2019. Sportamt Frankfurt am Main, Bau und Technik
- Bezela, Werner/Ludger Wehr/Horst Zech (2019): Leitfaden zur Sanierung von Abwasserkanalisationen. Dessau-Roßlau
- Bieker, Susanne/Johanna Tolksdorf (2018): Integrierte, semizentrale Wasserinfrastrukturen für schnell wachsende Städte. 05/2018. Sindelfingen
- Bind, Bernd (2019): E-Mail vom 21.10.2019 an Engelbert Schramm (ISOE). „Eine Frage von Ökoprotit zu Ökoprotit Betrieb“
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Büro- und Verwaltungsgebäude. Modul Komplettmodernisierung
- Breitenbach, Harald/Ralf Ehre (2018): Gebührenkalkulation: Zivilrechtliche und kalkulatorische Anpassungserfordernisse zur Einführung von neuartigen Sanitärsystemen. KA Abwasser (2), 142–144
- Brinkmeier, Stephan (2002): Kontrahierungszwang in der Wasserwirtschaft. Die Vertragsabschlußpflicht der Wasserlieferanten gegenüber Mietern und sonstigen an einem Grundstück nicht dinglich Berechtigten. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2001. Juristische Schriftenreihe 183. Münster/Hamburg

- Cichorowski, Georg (1999): Rationelle Energie- und Wasserverwendung in Frankfurter Hochhäusern. Wasser Abwasser Praxis (5), 42–44
 – (1998): Brauchwasserinseln in Frankfurt am Main. Reinheim, Kassel
- Cichorowski, Georg/Fiedler/Heinzelmann/Christine Meinecke/Bernhard Michel (1994a): Wasserbilanz für das Gebiet des Umlandverbandes Frankfurt. Zeithorizont 2000/2010. Reinheim, Kassel
- Cichorowski, Georg/Fiedler/Bernhard Michel/Wulf Rüttrich (1991): Rationelle Wasserverwendung in Frankfurt am Main. Teil 1: Haushalte und Kleingewerbe. Teil 2: Öffentliche Einrichtungen Industrie und gewerbliche Großunternehmer. Reinheim, Kassel
- Cichorowski, Georg/Heinzelmann-Ekoos (2000): Umsetzungsmaßnahmen zur Substitution von Trinkwasser in Frankfurt am Main. Reinheim, Kassel
- Cichorowski, Georg/Matthias Koziol/Christine Meinecke/Wulf Rüttrich (1998a): Brauchwasserversorgung im Gewerbegebiet Oberhafen in Frankfurt am Main. Reinheim, Kassel
 – (1994b): Marktpotential für Brauchwasser im Gewerbegebiet Ost der Stadt Frankfurt a.M. Untersuchung zur zentralen Versorgung von gewerblichen Betrieben mit Brauchwasser. Darmstadt
- Cichorowski, Georg/Matthias Koziol/Wulf Rüttrich/Sandra Landau (1998b): Einsatzmöglichkeiten von Brauchwasser in der Bürostadt Niederrad in Frankfurt am Main. Reinheim, Kassel
- Cichorowski, Georg/Wulf Rüttrich (1997): Konzeption und Umsetzungsmaßnahmen zur Rationellen Wasserverwendung in der Stadt Frankfurt am Main. Reinheim, Kassel
- Commerzbank (2011): Eine Bank. Ein Partner. Eine Zukunft. Bericht zur unternehmerischen Verantwortung 2011. Frankfurt am Main
 – (o.J.): Bericht zur unternehmerischen Verantwortung 2011
- Davoudi, Arash/Danijela Milosevic/Ruth Scheidegger/Engelbert Schramm/Martina Winker (2016): Stoffstromanalyse zu verschiedenen Wasserinfrastruktursystemen in Frankfurter und Hamburger Quartieren. 1. Auflage. netWORKS-Paper Heft 30. Berlin
- DEHOGA – Deutscher Hotel- und Gaststättenverband e.V. Bundesverband (2017): Gemeinschaftsgastronomie. Gemeinschaftsgastronomie in Deutschland. 3. Aufl.
- Deutsche Bundesbank (2019): Umweltbericht 2017/2018. Frankfurt am Main
- Die Präsidentin der Goethe-Universität Frankfurt am Main (2018): Jahrbuch 2017. „Gemeinsam Perspektiven schaffen“. Frankfurt am Main
- DIN 18035-2:2003-07: Sportplätze. Teil 2: Bewässerung. Berlin
- DIN 1989-1:2002-04: Regenwassernutzung. Teil 1: Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung. Berlin
- DIN 4046:1983-09: Wasserversorgung; Begriffe; Technische Regel des DVGW. Berlin
- Dobroschke, Wolfhard/Patrick Gebhardt (2015): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Frankfurt am Main bis 2040. In: Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen (Hg.): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Frankfurt am Main bis 2040. Frankfurter Statistische Berichte. Frankfurt am Main, 62–71
- Düchs, Julia (2014): Wann wird's an der Isar wieder schön? – Die Renaturierung der Isar in München: Über das Verständnis von Natur in der Großstadt. München
- DVGW (2008): Technische Regel Arbeitsblatt W 410. Bonn
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2016): Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6: Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung (Working report of the DWA working group KA 8.6: Use of activated carbon on municipal wastewater treatment plants for elimination of trace substances). KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 (12), 1062–1067
- DZ Bank (2018): GRI-Bilanz 2017 der DZ Bank AG. Frankfurt am Main

- Ecoinvent (2017): Ecoinvent data v3.4, ecoinvent reports No. 1-26, Swiss Center for Life Cycle Inventories. www.ecoinvent.org
- Europäische Zentralbank (2018): Umwelterklärung der EZB – aktualisierte Fassung 2018
- Felmeden, Jörg/Bernhard Michel/Martin Zimmermann (2016): Integrierte Bewertung neuartiger Wasserinfrastruktursysteme. Vom Quartier über die Gesamtstadt bis zur regionalen Perspektive. netWORKS-Papers 32
- Ferch, Thomas/Julia Beltyukov (2020): Regenwasserbewirtschaftung auf dem Flughafen Frankfurt/Main (FRA). fbr-wasserspiegel (1), 3–6
- Fleege, Sandra (2019): Nachhaltiges Wassermanagement: Trinkwassersubstitution durch Betriebswasser in Frankfurt am Main am Beispiel von öffentlichen Einrichtungen und Bürogebäuden. Masterarbeit. Masterstudiengang Umweltschutz der Hochschulen Esslingen, Nürtingen, Reutlingen, Stuttgart
- Fraport (2018): GRI-Bericht 2017. Gute Reise! Wir sorgen dafür
 – (2017): 2017 Kompakt. Gute Reise! Wir sorgen dafür
 – (o. J.): „Nur die Wasseruhren sind bei uns ein bisschen größer“. Die Airport City benötigt vier Millionen Liter Trinkwasser – jeden Tag. <https://www.fraport.de/content/fraport/de/unternehmen/medien/newsroom/fraporter/flughafenbetrieb/nur-die-wasseruhren-sind-bei-uns-ein-bisschen-groesser.html> [Stand: 06.12.2018]
- Früh, Barbara/Meinolf Koßmann/Marita Roos (2011): Frankfurt am Main im Klimawandel
- Gawel, Erik (Hg.) (2015): Die Governance der Wasserinfrastruktur. Band 2: Nachhaltigkeitsinstitutionen zur Steuerung von Wasserinfrastruktursystemen
- Geiler, Nikolaus (2003): Bleiben die Wasserwerke auf ihrem Wasser sitzen? wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik (11/12), 22–23
- Geselle, Elisabeth (2018 mündlich): Obere Wasserbehörde, Zuständigkeit Oberflächengewässer. Persönliche Kommunikation am 03.08.2018
- Geyler, Stefan/C. Krohn (2015): Optionen dezentraler Regenwasserbewirtschaftung – eine empirische Analyse des Entscheidungsverhaltens privater Grundstückseigentümer, in Gawel, E. (Hrsg.): Die Governance der Wasserinfrastruktur, Band 2: Nachhaltigkeitsinstitutionen zur Steuerung von Wasserinfrastruktursystemen, 529-564
- Ginzky, Harald/Ulrich Hagedorf/Corinna Hornemann/Bernd Kirschbaum/Ulrich Müller-Wegener/Dennis Riechmann/Simone Richter/Jörg Rechenberg (2005): Versickerung und Nutzung von Regenwasser: Vorteile, Risiken, Anforderungen. Dessau, Germany
- Grambow, Martin (2013): Nachhaltige Wasserbewirtschaftung. Konzept und Umsetzung eines vernünftigen Umgangs mit dem Gemeingut Wasser. Wiesbaden
- Graulich, Kathrin/Rainer Stamminger/Jasmin Geppert/Lara Belke (2017): Verbraucherbefragung – Nutzung der Programme bei neuen Politikoptionen für das Ökodesign und das Energielabel von Waschmaschinen. Freiburg
- Hamburg Wasser (2016): Machbarkeitsstudie zu den beiden Stadtquartieren Tucholsky-Quartier und Struensee-Quartier in Hamburg Altona. Im Rahmen des Forschungsprojektes netWORKS 3. Abteilung Q 2 HAMBURG WASSER. Hamburg
- Hanke, Stefanie (2016): Rechtliche Rahmenbedingungen neuartiger Wasserinfrastrukturen. Difu-Berichte 3/4/2016
- HBKG: Hessisches Gesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Januar 2014 (GVBl. S. 26), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. August 2018 (GVBl. S. 374)
- HessenAgentur (2019): Ergebnisse der Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlagen der Landesentwicklungsplanung. Projektion bis zum Jahr 2035 und Trendfortschreibung bis 2050. Wiesbaden
- Hessenwasser (2019): Hydrogeologische Modellierung der geologischen Untergrundstruktur in Frankfurt am Main. Groß-Gerau

- HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2016): Beobachteter Klimawandel in Hessen. http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/einleitung_txt.htm
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hg.) (2014): Jahresbericht des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. 2013. Wiesbaden
- HMUKLV – Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2017): Integrierter Klimaschutzplan Hessen 2025
- HMWVL – Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (Hg.) (2000): Landesentwicklungsplan Hessen 2000. Wiesbaden
- HSL – Hessisches Statistisches Landesamt (2018a): Nichtöffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Hessen 2016. Wiesbaden
 – (2018b): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Hessen 2016. Wiesbaden
 – (1998): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Hessen 1975 bis 1995 329. Wiesbaden
 – (1980): Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Abfallbeseitigung sowie Umweltschutzinvestitionen 1975 115. Wiesbaden
- Huber (2020): Wirtschaftlichkeit des Grauwasser-Recyclings. <https://www.huber.de/de/huber-report/praxisberichte/membranbelebung-mbr/wirtschaftlichkeit-des-grauwasser-recyclings.html>
- IfSG – Infektionsschutzgesetz vom 20. Juli 2000 (BGBl. I S. 1045), das zuletzt durch Artikel 30 des Gesetzes vom 20. November 2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist
- IFU – Institut für Umweltinformatik (2018): Umberto – Software für das betriebliche Stoffstrommanagement, Version Umberto LCA+ (Umberto – software for operational substance flow management, version Umberto LCA+). Hamburg
- Inside Out (2016): Betriebswasser – eine neue Ressource für die häusliche Versorgung. Ausgabe Herbst 2016
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf
- ISO 14040:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genf
- ISO 14044:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Genf
- Kerber, Heide/Michael Kunkis/Engelbert Schramm (2017): Kooperationsmanagement – Ein Instrument zur Differenzierung der Wasserinfrastruktur. In: Winker, Martina/Trapp, Jan Hendrik (Hg.): Wasserinfrastruktur: Den Wandel gestalten. Technische Varianten, räumliche Potentiale, institutionelle Spielräume. Edition Difu – Stadt Forschung Praxis, 16. Berlin, 219–235
- Kerber, Heide/Engelbert Schramm/Martina Winker (2014): Partizipative Szenarioverfahren – zur methodischen Ableitung von Zukunftsbildern. Das Projekt SAUBER+ als Beispiel. ISOE-Materialien Soziale Ökologie, 38. Frankfurt am Main
- KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau Bankengruppe (2018): Perspektiven fördern – Menschen stärken. GRI-Bericht 2017 inklusive nichtfinanzieller Erklärung. Frankfurt am Main
- Klapproth, Andreas (2017): „Wassersparkonzepte für den Sportrasen“. Ansätze für einen ressourcenschonenden Umgang. Präsentation bei Osnabrücker Sporttage 2017
- Klein, Marcus (2019): Trinkwassersubstitution als kulturelle Praxis. Über die praxistheoretischen Aspekte haushaltsbezogener Regenwassernutzung und die Bedingungen eines veränderten Umgangs mit der Ressource Wasser. Masterarbeit. Frankfurt am Main: Johann Wolfgang Goethe-Universität, Institut für Humangeographie

- Kluge, Thomas (2020): Die Regulation der Ressource Grundwasser raumplanerisch und infrastrukturell gestalten. Transformationspotentiale am Beispiel der Metropolregion Rhein-Main. *gwf-Wasser Abwasser* 161 (4), 64–73
- (Hg.) (2005): Ansätze zur sozial-ökologischen Regulation der Ressource Wasser – neue Anforderungen an die Bewirtschaftung durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie und Privatisierungstendenzen. *netWORKS-Papers* 15. Berlin
- Kluge, Thomas/Jutta Deffner/Konrad Götz/Stefan Liehr/Bernhard Michel/Florian Michel/Wulf Rührich (2008): Integrierte Wasserbedarfsprognose – Teil 2: Grundlagen und Methodik. *gwf-Wasser Abwasser* 149 (10), 764–772
- Kluge, Thomas/Engelbert Schramm (1988): Wassernöte. Zur Geschichte des Trinkwassers. 2. Aufl. Köln
- Kocks Consult GmbH (2018): BMBF-Projekt SEMIZENTRAL: Ressourceneffiziente und flexible Ver- und Entsorgungsinfrastruktursysteme für schnell wachsende Städte der Zukunft, Teilprojekt 2. Fachlicher Schlussbericht. Koblenz
- Kompetenzzentrum Industrie Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH (Hg.) (2020): Masterplan Industrie für die Stadt Frankfurt am Main. Jahresbericht 2018-2019. Frankfurt am Main
- Korthals, Wolfgang/Ulrich Roth (2003): Regenwassernutzungsanlagen – „Überflüssiges Luxusgut“ oder „ökologisch vorbildlich“? *bbr – Fachmagazin für Wasser und Leitungsbau* 54 (8), 31–37
- Kraus, Fabian/Malte Zamzow/Lea Conzelmann/Christian Remy/Anne Kleyböcker/Wolfgang Seis/Ulf Mieke/Ludwig Hermann/Ralf Hermann/Christian Kabbe (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Gewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Abschlussbericht. *Texte* 13/2019. Dessau-Roßlau
- Krauß, Manuel (2015): Übergang zu neuen Trinkwassertarifen – Auswirkungen auf die Kosten für Privathaushalte. *energie/wasser-praxis* (4), 22–24
- Kruschwitz, Anke/Anja Karle/Angelika Schmitz/Rainer Stamminger (2014): Consumer laundry practices in Germany. *International Journal of Consumer Studies* 38 (3), 265–277
- Kuhn, Vollrad/Friedrich Brüne/Martin Cames (2002): Contracting für kommunale Sportstätten: Strategien zu Klimaschutz und Kostensenkung. Leitfaden. Dessau-Roßlau
- Lobüscher, Daniela (2019 fernmündlich): Telefonat mit Michaela Fischer am 17.04.2019. Regierungspräsidium Darmstadt. Zuständigkeit: Versorgungsbereiche, Wasseraufkommen und -verteilung
- Luipold, Uwe/Peter Ring/Christian Spath (2015): Räumlich-funktionales Entwicklungskonzept Gewerbe Frankfurt am Main im Rahmen des Masterplans Industrie. Berlin
- Maaß, Christian/Johannes Zedelius/Britta Uhlman (2017): Wasser sinnvoll zählen – und weniger zahlen. Vorschlag zur Vermeidung unangemessen hoher Kosten durch Änderungen des Mess- und Eichrechts für Wasserzähler. Hamburg
- Magazowski, Christoph (2017): Neuartige Tarifstrukturen (NATS) für Neuartige Sanitärsysteme (NASS). Dissertation
- Magistrat der Stadt Frankfurt a.M. (2019): Bericht des Magistrats an die Stadtverordnetenversammlung. Sportentwicklung Frankfurt am Main. B 222
- (2017): Sportentwicklung Frankfurt a.M. Bericht des Magistrats an die Stadtverordnetenversammlung. [https://frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=2988&ffmpar\[id_inhalt\]=16119](https://frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=2988&ffmpar[id_inhalt]=16119) [Stand: 24.07.2019]
- Magistrat der Stadt Frankfurt am Main (2014): Bericht des Magistrats an die Stadtverordnetenversammlung. Betr.: Frankfurts Brunnen nicht versiegen lassen. Dr. B 409
- Maitra, Writi/Lara Belke/Rainer Stamminger/Bert Nijhuis/Clara Presti (2017): Scope of improvement in water usage efficiency in manual dishwashing. A multicountry study by questionnaire survey. *International Journal of Consumer Studies* 41 (3), 253–263

- Mall GmbH (2018): Bundesweite Umfrage „Regenwassernutzung in der Baubranche 2017“
- Martin, Tobias (2017): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs. Bonn
- Martin, Tobias/Andreas Korth/Konrad Schubert (2017): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs. Abschlussbericht
- Mediathek Hessen (2012): Wasserversorgung Flughafen Frankfurt. https://www.mediathek-hessen.de/mediaview_7977_-Wasserversorgung-Flughafen-Frankfurt.html
[Stand: 24.03.2019]
- Michel, Bernhard (1997): Anwendung des Least-Cost-Planing in der Wasserversorgung. Umweltgerechte Wasserwirtschaft – qualitativer und quantitativer Grundwasserschutz. Rheinheim
- MLR BW – Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (2018): Ausführungshinweise zur Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV)
- Morera, Serni/Christian Remy/Joaquim Comas/Lluís Corominas (2016): Life cycle assessment of construction and renovation of sewer systems using a detailed inventory tool. The International Journal of Life Cycle Assessment 21 (8), 1121–1133
- Müller-Raemisch, Hans-Reiner (1998): Frankfurt am Main. Stadtentwicklung und Planungsgeschichte seit 1945. Frankfurt am Main/New York
- N.N. (2004): Wasserzähler für Regenwasser und alternative Gebührenmodelle. <https://www.baulinks.de/webplugin/2004/1113.php4> [Stand: 06.07.2018]
- Oei, Pao-Yu/Leonard Göke/Claudia Kemfert/Mario Kendzioriski/Christian von Hirschhausen (2019): Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor. Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. Politikberatung kompakt 133. Berlin
- Pawlowski, Ludwig (2009): Der Preis des Wassersparens. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (3), 287–292
- Pfeiffenberger, Ulrich (1995): Regenwassernutzung und Brauchwasserversorgung am Flughafen Frankfurt am Main. In: Koenigs, Tom (Hg.): Minus 50 % Wasser möglich! Einsparpotenziale beim Wasserverbrauch in Dienstleistungszentren und Bürogebäuden. Fallstudien aus der Praxis. Taunusstein, 79–90
- PricewaterhouseCoopers (2017): Stadtwerke 2030 – Eine empirische Studie zu den strategischen Perspektiven eines Energieversorgers. Frankfurt am Main
- Prüller, Jens (2020 fernmündlich): Telefonat mit Michaela Fischer am 15.12.2020. Landessportbund Hessen
– (2018 fernmündlich): Telefonat mit Christoph Meyer am 12.12.2018. Landessportbund Hessen
- Rautenberg, Joachim/Peter Fritsch/Winfried Hoch/Gerhard Merkl/Franz Otillinger/Matthias Weiß/Burkhard Wricke (2014): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. 16., vollst. überarb. und aktual. Aufl. 2014. Wiesbaden
- Regierungspräsidium Darmstadt (2019): Wasserbilanz Rhein-Main 2017. [https://rp-darmstadt.hessen.de/sites/rp-darmstadt.hessen.de/files/Wasserbilanz%20Rhein-Main%202017%20\(PDF%2c%20181%20KB\)_0.pdf](https://rp-darmstadt.hessen.de/sites/rp-darmstadt.hessen.de/files/Wasserbilanz%20Rhein-Main%202017%20(PDF%2c%20181%20KB)_0.pdf) [Stand: 20.02.2019]
– (2018): RP legt Wasserbilanz für 2016 vor. <https://rp-darmstadt.hessen.de/pressemitteilungen/rp-legt-wasserbilanz-f%C3%BCr-2016-vor> [Stand: 20.02.2019]
- Richter, Christian Paul/Rainer Stamminger (2012): Water Consumption in the Kitchen – A Case Study in Four European Countries. Water Resources Management 26 (6), 1639–1649

- Rödel, Volker (1983): Ingenieurbaukunst in Frankfurt am Main 1806-1914. Frankfurt am Main
- Roser, Bernd (2019): Anfrage Grünflächenbewässerung. E-Mail. Grünflächenamt Frankfurt am Main
 – (2019 mündlich): Persönliches Gespräch vom 30.08.2019 mit Dr. Engelbert Schramm und Michaela Fischer. Grünflächenamt Frankfurt am Main
- Roth, Ulrich (2016): Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region. Fortschreibung – Juli 2016. Groß-Gerau
- Roth, Ulrich/Franco Coppola/Holger Wagner (2016): Das Spitzenlastereignis 2015 im Versorgungsgebiet der Hessenwasser GmbH & Co. KG. *gwf-Wasser Abwasser* (6), 638–646
- Salonen, Tiina (2010): Strategies, Structures, and Processes for Network and Resources Management in Industrial Parks. The Cases of Germany and China. Köln
- Sartorius, Christian (2007): Zukunftsmarkt. Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement
- Scheele, Ulrich (2006): Versorgungssicherheit und Qualitätsstandards in der Wasserversorgung. Neue Herausforderungen unter veränderten Rahmenbedingungen. Diskussionspapier. netWORKS Papers. Berlin
- Scheuring, Jürgen (2018 fernmündlich): Ergänzendes Telefonat vom 06.12.2018 mit Christoph Meyer. Fraport, Frankfurt am Main
 – (2018 mündlich): Experteninterview vom 28.11.2018 durch Christoph Meyer. Fraport, Frankfurt am Main
- Schmidt, Thomas J. (2018): Brandgefahr wächst, Ernteauffälle drohen, Bewässerung kostet viel Geld. *Frankfurter Neue Presse* (05.07.2018), <https://www.fnp.de/frankfurt/brandgefahr-waechst-ernteaufaele-drohen-bewaesserung-kostet-viel-geld-10378739.html> [Stand: 30.04.2019]
- Schmitz, Angelika/Farnaz Alborzi/Rainer Stamminger (2016): Large Washing Machines Are Not Used Efficiently in Europe. *Tenside Surfactants Detergents* 53, 227–234
- Schramm, Engelbert/Thomas Giese/Thomas Kluge/Wolfgang Kuck/Carolin Völker (2016): Verändertes Kooperationsmanagement für neuartige Sanitärsysteme in Umsetzung und Betrieb. Folgerungen aus dem Beispiel Jenfelder Au in Hamburg. *gwf-Wasser Abwasser* (157), 148–155
- Schramm, Engelbert/Marcus Klein/Kaja Tabea Warczok/Martina Winker (2020): Regenwassernutzung im Frankfurter Norden. Erfahrungen aus Quartieren mit Zisternenpflicht. *fbr-wasserspiegel* 25 (1), 15–19
- Schramm, Engelbert/Martin Zimmermann (2018): Das MULTI-ReUse-Verfahren. Häusliches Betriebswasser aus Siedlungsabwasser. *fbr-wasserspiegel* (2), 3–7
- SenS – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2007): Innovative Wasserkonzepte: Betriebswassernutzung in Gebäuden. http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/Leitfaeden/Betriebswasserpdfdeutsch2007.pdf
- SIMONA (2019): Global Thermoplastic Solutions. Produkte und Services. Kirn
- Simperler, Lena/Paul Himmelbauer/Gernot Stöglehner/Thomas Ertl (2018): Siedlungswasserwirtschaftliche Strukturtypen und ihre Potenziale für die dezentrale Bewirtschaftung von Niederschlagswasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (11-12), 595–603
- SinOptiKom (2016): Sektorübergreifende Prozessoptimierung in der Transformation kommunaler Infrastrukturen im ländlichen Raum. Projektbericht. Kaiserslautern.
- Stadion Frankfurt Management GmbH (o. J.): Die Arena. Nachhaltigkeit. <https://www.commerzbank-arena.de/die-arena/nachhaltigkeit/nutzung-von-regenwasser>
- Stadt Frankfurt am Main (2018): Statistisches Jahrbuch der Stadt Frankfurt am Main 2018. Frankfurt am Main
 – (2016): Frankfurter Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Frankfurt am Main

- (o. J.): Stadtklima. https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=4564&ffm-par_id_inhalt=30232 [Stand: 13.01.2019]
- Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen (2018): Statistisches Jahrbuch der Stadt Frankfurt am Main 2018, Kapitel 6. Arbeitsmarkt
- (Hg.) (2015): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Frankfurt am Main bis 2040. Frankfurter Statistische Berichte. Frankfurt am Main
- Stadt Frankfurt am Main – Umweltamt (2014): Frankfurt legt Wert auf gutes Klima. Eine Zwischenbilanz zum 25-jährigen Bestehen des Umweltamtes (1989-2014). Frankfurt am Main
- Stadt Frankfurt am Main, Mainova, Hessenwasser (2021): Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main. https://www.stvv.frankfurt.de/parlisobj/B_63_2022_AN1.pdf
- Stadtentwässerung Frankfurt am Main (o. J.): Reinigungsleistung der ARA. <https://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/anlagen/abwasserreinigung/reinigungsleistung.html> [Stand: 02.05.2018]
- Stadtentwicklung Berlin (o. J.): Sportlich und ressourceneffizient – Olympiastadion Berlin
- Stadtplanungsamt Frankfurt am Main (2019): Frankfurt 2030. Wachstum nachhaltig gestalten – urbane Qualitäten stärken. Integriertes Stadtentwicklungskonzept. Anlage 1
- (2015): Wohnbauland-Entwicklungsprogramm. Wohnbaulandbereitstellung bis zum Jahr 2025
- Steinbrich, Andreas/Malte Henrichs/Hannes Leistert/Isabel Scherer/Tobias Schuetz/Mathias Uhl/Markus Weiler (2018): Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 62 (6), 400–409
- Studentenwerk Frankfurt am Main (2019): Essenzahlen, Warmversorgungsbetrieb auf dem Campus Westend. E-Mail vom 09.05.2019
- Theilen, Ulf/Sabrina Eichenauer (2016): Nutzung der Anaerobtechnik zur Effizienzsteigerung der kommunalen Abwasserentsorgung. Kurzfassung. Dessau-Roßlau
- Tolksdorf, Johanna (2017): Grau- und Schwarzwassertrennung in semizentralen Ver- und Entsorgungssystemen. Dissertation: Technische Universität Darmstadt
- Tolksdorf, Johanna/Tobias Blach/Weimin Shen/Michael Leinhos/Martin Wagner (2019): Wirtschaftlichkeit semizentraler, integrierter Infrastruktursysteme in schnell wachsenden urbanen Räumen am Beispiel SEMIZENTRAL. gfw-Wasser|Abwasser 2019 (3), 73–82
- Trapp, Jan Hendrik/Martina Winker (Hg.) (2017): Wasserinfrastruktur: Den Wandel gestalten. Technische Varianten, räumliche Potenziale, institutionelle Spielräume. Edition Difu – Stadt, Forschung, Praxis 16. Berlin
- TrinkwV: Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), zuletzt geändert am 03. Januar 2018 (BGBl. I S. 99)
- Verwaltungsgericht Arnberg: Benutzungszwang der öffentlichen Wasserversorgung. Urteil vom 04.04.2005 – 14 K 2304/04
- Verwaltungsgericht Weimar: Anschluss- und Benutzungszwang für kommunale Einrichtungen. Urteil vom 13.07.2005 – AZ 6 K 938/02.We
- Warczok, Kaja Tabea (2019): Abschätzung des Betriebs- und Regenwasserbedarfs auf Quartiersebene. Potentialanalyse und Maßnahmenvorschläge zur Anpassung an den Klimawandel. Masterarbeit. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität
- Wolf, Veronika (2019): Klimaschutzteilkonzept Gewerbegebiet Fechenheim-Nord/Seckbach
- Yildiz, Özgür/Till Ansmann (2018): Mit Flexibilität zu resilienten Infrastrukturen? Wie digitale Anwendungen, Nudges und Blockchain die Klimaresilienz von Infrastrukturen verbessern können. Transforming Cities (1), 36–39

Anhang

Anhang 2.4. Forschungsstand zu Teilwasserverbräuchen in Wohngebäuden

In Deutschland wird in 85 % der Haushalte zusätzlich zur Maschine täglich mit der Hand gespült, zu 16 % handelt es sich um Töpfe und ähnliches, die unter fließendem Wasser behandelt werden. Größere Mengen werden hingegen im Spülbecken im stehenden Wasser gewaschen (Maitra et al. 2017). In dieser aktuellen Befragung wurde die Wassermenge, die zum Handspülen in den Haushalten benötigt wurde, allerdings nicht erhoben. Richter und Stamminger (2012) haben hingegen 2007 in der Region Bonn/Köln in 50 Haushalten die täglichen Gesamtverbräuche am Zapfhahn in der Küche gemessen und bestimmt. Dabei ergab sich die folgende Verteilung nach Verbrauchszwecken.

Tabelle 38: Pro-Kopf-Wasserverbrauch in der Küche

| | l/(E x d) | % |
|------------------------|-----------|------------|
| Geschirrspülen | 5,5 | 50 |
| Reinigen | 1,3 | 12 |
| Kochen | 1,4 | 13 |
| Trinken | 1,4 | 13 |
| Händewaschen | 0,7 | 6 |
| Sonstige | 0,7 | 7 |
| Gesamtverbrauch | 11 | 100 |

Quelle: Richter und Stamminger (2012)

Für das Badezimmer (und damit den Großteil der Verbräuche im Bereich Körperpflege) liegen entsprechende empirische Erhebungen leider nicht vor.

Anhang 3.2.1. Rationelle Wasserverwendung in Frankfurt am Main, Teil 1: Haushalte und Kleingewerbe, 1991 (Cichorowski et al. 1991)

Das genannte Gutachten, das das Büro Cooperative für die Stadt Frankfurt am Main erstellte, diskutiert Eckdaten des Wasserverbrauchs und Möglichkeiten zur Reduzierung der Wasserabhängigkeit Frankfurts gegenüber dem Umland. Die Zielstellung begründet sich damit, dass die Frankfurter Wasserversorgung 1998 bereits zu ca. 75 % auf Wasserimporte aus umliegenden Gebieten (Vogelsberg, Spessart, Ried) angewiesen war. Dokumentiert wurde der Anstieg der Wasserimporte aus dem Umland; dieser lag 1977 noch bei 60 %. Die Studie zeigt Einsparmöglichkeiten von Trinkwasser auf und diskutiert deren Umsetzbarkeit, aber auch die Substitutionen von Trinkwasser durch Betriebswasser. Verbrauchswerte werden den potenziellen Einsparmöglichkeiten gegenübergestellt und in ihrer Praktikabilität erörtert. Die Verbrauchergruppe im Fokus ist „Haushalte und Kleingewerbe“. Zur Herstellung von Betriebswasser wird Grauwasser,

Grundwasser, Mainwasser und Regenwasser diskutiert. Mittels dezentraler Regenwassernutzung könne der Trinkwasserverbrauch für Toilettenspülung, Wäsche waschen und Gartenbewässerung um 30-50 % gesenkt werden. Hervorhebenswert ist auch die Darstellung des Wasserverbrauchs und des Einsparpotenzials auf einer Karte des Frankfurter Stadtgebietes.

Die Autoren sehen grundsätzlich drei Ansatzpunkte zur Umsetzung von Trinkwassereinsparungen: Einsparung, Substitution und Reduzierung von Verlusten, die in eine Gesamtstrategie eingehen sollten. Hier wird z.B. die Idee der technischen Beratung durch die Stadtwerke vorgeschlagen, ermöglicht durch Schulungen oder Änderungen von Arbeitsplatzbeschreibungen ihrer Mitarbeiter. Darüber hinaus wurde z.B. auch vorgeschlagen über Modellobjekte Konzepte zu entwickeln und deren Umsetzung für Wohnungen, Büros, Ämter und Kleinbetriebe zu ermöglichen. Die Autoren zitieren auch die damaligen Koalitionsvereinbarungen der Landesregierung, wonach „die Liegenschaften des Landes mit wassersparenden Techniken unter Nutzung von Regen- und Brauchwasser, ausgestattet werden sollen.“

Anhang 3.2.2. Rationelle Wasserverwendung in Frankfurt am Main, Teil 2: Öffentliche Einrichtungen, Industrie und gewerbliche Großabnehmer, 1991 (Cichorowski et al. 1991)

Im zweiten Teil haben Cichorowski und seine Cooperative-Kollegen im Auftrag des Umweltdezernats Trinkwasser-Einsparpotenziale von Großabnehmern untersucht. Wie im ersten Teil, werden auch hier Verbrauchswerte den potenziellen Einsparmöglichkeiten gegenübergestellt, und in ihrer Praktikabilität erörtert.

In öffentlichen Gebäuden lag der Anteil am Gesamttrinkwasserverbrauch in den späten Siebziger und den achtziger Jahren relativ stabil bei ca. 15 %. 1989 waren dies 9 Mio. m³/a. Zu den wichtigsten Verbrauchsbereichen zählen damals der Flughafen, Sport und Freizeiteinrichtungen, US-Army, Krankenhäuser, Parks und Friedhöfe, Zoologischer Garten, Universität, Deutsche Bundesbahn, Palmengarten, Deutsche Bundespost und die (nur in diesem Jahr stattfindende) Bundesgartenschau. Insgesamt gibt es für die öffentlichen Einrichtungen ein Trinkwassereinsparpotenzial von 3,4 Mio. m³ (35 %), wobei sich ca. die Hälfte aus Wassersparpotenzial und die andere Hälfte aus dem Trinkwassersubstitutionspotenzial ergaben. Trinkwassersubstitutionspotenziale wurden für die unterschiedlichen Verbrauchsbereiche „vorsichtig geschätzt“, die größten Potenziale ergaben sich durch Bewässerung und für die Toilettenspülung. Die städtischen Einrichtungen mit dem höchsten Trinkwassersubstitutionspotenzial sind das Sport- und Badeamt, Garten- und Friedhofsamt, Zoologischer Garten und der Palmengarten.

Im Bereich „Industrie und gewerbliche Großverbraucher“ wurden zur Zeit der Studie 14,9 Mio. m³/a Trinkwasser geliefert, weitere 8,0 Mio. m³/a stammten aus der Eigenförderung von Grundwasser und ca. 480 Mio. m³/a wurden aus Oberflächenwasser zu Kühlzwecken gewonnen. Daten wurden unter anderem durch Befragungen erhoben. Dabei wurden keine besonderen industriespezifischen Einsparpotenziale benannt.

Das Trinkwassereinsparpotenzial von 4,6 Mio. m³/a Trinkwasser setzt sich aus 1,0 Mio. m³/a Wassersparpotenzial und 3,6 Mio. m³/a Trinkwassersubstitutionspotenzial zusammen. Trinkwassersubstitutionspotenziale sind vor allem in der Reduzierung des Belegschafftwassers (Toilettenspülung) möglich. Zur Betriebswasserversorgung kommt laut dem Gutachten hauptsächlich Grundwasser und aufbereitetes Oberflächenwasser in Frage.

Grundtenor des zweiten Teils der Studie ist, dass Einsparpotenziale bei relativ geringem Aufwand vorliegen und ausgeschöpft werden können. Als Grundlage für eine erfolgreiche Substitution wird diskutiert, ein Betriebswassernetz zur sicheren Versorgung der öffentlichen Einrichtungen, Industrie und des Flughafens zu bauen und zu betreiben. Im Ergebnis sei aber keine Wirtschaftlichkeit eines Gesamtverteilungsnetzes für Betriebswasser in Frankfurt am Main gegeben. Für Insel- und teilgebietliche Lösungen sieht die Studie indes Wirtschaftlichkeit. Bezugsquellen des Betriebswassers können Flusswasser, Drainagewasser, innerstädtische Quellen, Grund- und Regenwasser, oder temporäre Ressourcen sein. Für den Erfolg eines teilgebietlichen Betriebswassernetzes ist neben einer genügenden Qualität vor allem eine hohe Versorgungssicherheit ausschlaggebend. Daher wird vorgeschlagen, über die (damals für die Wasserversorgung zuständigen) Stadtwerke eine sichere Versorgung mit Betriebswasser aufzubauen. Administrative Maßnahmen und ökonomische Hebel könnten Substitutionspotenziale ggf. schneller erschließen.

Cichorowski et al. (1991) stellten fest, dass im Stadtgebiet von Frankfurt am Main verfügbare Grundwasserressourcen von 45 Mio. m³ pro Jahr nicht ausgeschöpft werden. Als Gründe für das ungenutzte Potenzial, welches vor allem im Bereich der Öffentlichen Wasserversorgung lag (32 Mio. m³), wurde auf Qualitätsprobleme verwiesen; es wurde darüber hinaus durch nicht näher dargelegte „betrieblich-organisatorische Probleme“ begründet. Cichorowski et al. (1991) führen als Maßnahmen zur Sicherung der Grundwasservorkommen insbesondere ein Grundwasserkataster und ein Grundwasserschutzkonzept an.

Neben dem Schutz und der Sanierung des Grundwassers im Stadtgebiet könne auch der Ersatz von Trinkwasser durch Betriebswasser dazu beitragen, dass keine weiteren Ressourcen im Umland erschlossen werden müssten.

Cichorowski et al. (1991) betonten – vor allem in Teil 1 – das Wassersparpotenzial, was in den folgenden Jahren mit einer sehr wirksamen Wassersparkampagne weitgehend realisiert werden konnte. Die damaligen Ideen hinsichtlich der Betriebswassernutzung wurden offenbar nicht in einem großen Umfang umgesetzt. Festzuhalten ist, dass bereits damals – vor fast 30 Jahren – die Möglichkeit der Betriebswassernutzung erörtert wird, mit Regenwasser und Grauwasser als dezentrale Lösung, Grundwasser und Flusswasser in einem semizentralen Verteilungssystem. In den weiteren Gutachten (vgl. Anhang 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7, 3.2.8 und 3.2.9) wurde das zunächst dargelegte Konzept für Teilräume detailliert bzw. modifiziert.

Aus der Kombination Haushalt und Kleingewerbe ergibt sich die Schwierigkeit, im Wasserverbrauch nicht zwischen den beiden Nutzungen unterscheiden zu können. Der Grund dafür liegt in der Tatsache begründet, dass diese in einer Tarifgruppe zusammengefasst sind.

Anhang 3.2.3. Marktpotenzial für Brauchwasser im Gewerbegebiet Ost der Stadt Frankfurt am Main, 1994 (Cichorowski et al. 1994b)

Als Kerngebiet der Cooperative-Untersuchung im Auftrag der Stadt Frankfurt am Main wurde der Ost- oder damalige Oberhafen, Fechenheim-Süd und Fechenheim-Nord gewählt. Die Datenerhebung erfolgte durch Fragebögen und Gespräche zu Wasserverbrauch und Substitutionsmöglichkeiten; dabei wurden der aktuelle Einsatz von Betriebswasser aufgenommen und weitere Möglichkeiten identifiziert. Darauf basierend wurde ein Substitutionspotenzial von einem Drittel abgeschätzt, wobei angenommen wurde, dass eine Hälfte gleich und die andere Hälfte im Rahmen von Renovierungs- und Erneuerungsmaßnahmen umgesetzt werden kann. Als Einsatzbereiche für Betriebswasser wurde als sinnvoll erachtet: Bewässerung Außenflächen, Fahrzeugreinigung, Klimaanlage, Anlagenkühlung, Kesselspeisewasser-Aufbereitung, Produktionshilfe, Belegschaftswasser (WC-Spülung). Drei Möglichkeiten für ein Verteilungsnetz wurden dargestellt.

In der ersten Variante wird das Kerngebiet flächendeckend mit Mainwasser versorgt (270 000-300 000 m³/a), in der zweiten Variante werden zum Kerngebiet auch Teile des Osthafens genommen (270 000-300 000 m³/a). Die dritte Variante ist eine Erweiterung entlang der damals neu geplanten Nordtrasse, um ausgewählte Großabnehmer mit anzuschließen (500 000 m³/a). In der dritten Variante würden also nicht nur Gewerbetreibende mit Betriebswasser versorgt, sondern auch städtische bzw. öffentliche Einrichtungen. Es wurde empfohlen, die Betriebswasser-Versorgungskosten von über 5,00 DM/m³ über eine Mischkalkulation für Trink- und Betriebswasser auf einen marktgängigen Preis zu senken oder Zuschüsse aus der Grundwasserabgabe zu nutzen.

Cichorowski et al. (1994b) betonten in dieser Studie die Verwendung von aufbereitetem Mainwasser als Betriebswasser; hierfür wurde vorgeschlagen, eine 1993 stillgelegte Mainwasseraufbereitungsanlage zu verwenden, die altersbedingt und aus betriebswirtschaftlichen Gründen geschlossen wurde.

Es muss davon ausgegangen werden, dass in den letzten 25 Jahren Maßnahmen zum Wassersparen in Gewerbegebieten umgesetzt wurden, welche das dargestellte Potenzial verringern. In dem Gutachten wurde der Neubau der Nordtrasse als Möglichkeit gesehen, ein Leitungsnetz zu bauen. Auch die aktuellen und mittelfristigen Möglichkeiten und Zeitfenster, ein teilgebietliches Betriebswasser-Leitungsnetz beim Neubau von Straßen kostengünstig zu integrieren, sollte in der aktuellen Diskussion bedacht werden.

Anhang 3.2.4. Konzeption und Umsetzungsmaßnahmen zur Rationellen Wasserverwendung in der Stadt Frankfurt am Main, 1997 (Cichorowski und Rüthrich 1997)

Das vorliegende Gutachten ist der Schlussbericht von Cooperative zu einer dreijährigen konzeptionellen und beratenden Tätigkeit für die Stadt Frankfurt am Main (Umweltamt). Es diskutiert vor allem Aspekte der Intensivierung des Betriebswassereinsatzes sowie Handlungsspielräume hinsichtlich der Regenwassernutzung in öffentlichen Einrichtungen.

1995 wurde in Frankfurt am Main der Trinkwasserverbrauch für öffentliche Zwecke um 30 %, von Industrie und Großabnehmern um 25 %, und von Haushalten um 10 % reduziert, verglichen mit dem Verbrauch 1991. Einsparungen erklären sich durch die Trinkwasser-Notstandsverordnung (1992), strukturelle Veränderungen und Betriebswasser- und Regenwassernutzungsprojekte. 1995 und 1996 wurde eine Vielzahl an Maßnahmen geplant; neben der Erstellung von Konzepten und Untersuchungen war dies Öffentlichkeitsarbeit/Beratung. Betroffen waren die Betriebswassernutzung, Regenwassernutzung, Sparmaßnahmen und der Grundwasserschutz.

Als Betriebswasserressourcen diskutiert wurden insbesondere Oberflächengewässer (Main und Nidda) und innerstädtisches Grundwasser, teilweise auch Regenwasser und Kläranlagenabläufe. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, Betriebswasser über Insellösungen oder netzgebundene Versorgungen bereitzustellen. Vor- und Nachteile dieser beiden Möglichkeiten sind abhängig von den gegebenen Rahmenbedingungen. Cichorowski und Rüthrich (1997) sehen bereits vorhandenes Know-how im Umgang mit Betriebswasser bei Großabnehmern; Klein-, Mittelunternehmer und öffentliche Einrichtungen haben hingegen fachlichen Beratungsbedarf. Regenwassernutzung sei abgesehen von privaten Haushalten schwer pauschalisierbar und abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und der Nutzung.

Cichorowski und Rüthrich (1997) kommen zur Erkenntnis, dass das Trinkwassersubstitutionspotenzial in Frankfurt am Main erst zu einem Bruchteil ausgeschöpft sei. Unsicherheiten seitens der potenziellen Betriebswassernutzer bestünden hinsichtlich der Verwendungsmöglichkeiten, der Beschaffung und den finanziellen Auswirkungen. Des Weiteren besteht Potenzial in der Trinkwassersubstitution durch Grundwasser, das keine Trinkwasser-, aber akzeptable Betriebswasserqualität besitzt. Es besteht Bedarf für fachliche Beratung hinsichtlich der Möglichkeiten der Betriebswassernutzung. Als Möglichkeit für die Einbindung von Erkenntnissen aus Pilotprojekten in die kommunale Administration wird eine neue Institution vorgeschlagen, Wasserbüro Frankfurt (WBF).

Des Weiteren sind Karten in dem Gutachten mit Grund- und Flusswasserentnahmestellen und der Lage der Betriebswasserleitungen und Zapfstellen. Betriebswasserleitungen, die im Wesentlichen zum Transport von aufbereitetem Mainwasser zu den Infiltrationsanlagen im Stadtwald errichtet wurden, versorgten im Laufe der Zeit auch weitere Nutzer, z.B. für Betriebswasserzwecke oder die Landschaftsberegnung. 1993/94 wur-

den südmainisch sog. Betriebswasserzapfstellen errichtet, meist für städtische Institutionen wie Beregnungseinheiten der Grünflächenunterhaltung oder für die Kanalspülung der Stadtentwässerung, die aber auch von privaten Interessenten genutzt werden konnten.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten: Obgleich Frankfurt am Main (auch im gewerblichen und industriellen Bereich) durch Sparmaßnahmen den Trinkwasserverbrauch im betrachteten Zeitraum verringert hat, ist weiterhin ein erhebliches Potenzial zur Nutzung von Betriebswasser weiterhin vorhanden. Cichorowski und Rührich (1997) verdeutlichen, dass eine große Unwissenheit hinsichtlich der Nutzung von Betriebswasser bestand, obgleich die Ressource Betriebswasser in Frankfurt am Main durch den Main nahezu unerschöpflich ist. Interessant für das hier erstellte Gutachten sind die aufgelisteten Projekte der Betriebswassernutzung (Kapitel 4 bei Cichorowski und Rührich 1997), wo sowohl ausgeführte und verworfene Projekte gelistet sind. Eine nähere Überprüfung, die in diesem Gutachten aufgrund des Aufwandes unterbleiben musste, könnte zu einem größeren Kenntnisstand hinsichtlich der Hemmnisse und fördernden Bedingungen beitragen. Die Projekte sind auf die Grundwasserabgabe zurückzuführen, die in Hessen zwischen 1992 und 2003 erhoben wurde und zur Finanzierung verwendet werden konnte.

Anhang 3.2.5. Brauchwasserinseln in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski 1998)

In der Studie werden Grundwasservorkommen im Stadtgebiet identifiziert und diese mit geeigneten Versorgungsbereichen kombiniert. Das Substitutionspotenzial wird dabei für Großverbraucher aus Industrie und Gewerbe mit Hilfe von branchenbezogenen Kennwerten abgeschätzt. Des Weiteren werden anhand von einigen Fallbeispielen neue Möglichkeiten der Trinkwassersubstitution skizziert, allerdings nicht mit dem Anspruch, das Substitutionspotenzial auszuschöpfen. Es werden Beispiele aufgezeigt, die aufgrund einer günstigen Lage, also kurzen Zuleitungen, der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung standhalten.

So wurden zum Beispiel der Anschluss der Ernst-Reuter-Schule an eine bestehende Betriebswasserleitung der Müllverbrennungsanlage in der Nordweststadt (Nutzung: 5 000 m³/a, Sportplatzbewässerung, Filterspülung des schuleigenen Hallenbades) als wirtschaftlich erachtet, ebenso des Nordwest-Zentrums (Nutzung: 30 000 m³/a, Klimaanlage im Bürgerhaus und Schwimmbad Titusthermen). Für das Neubaugebiet am Rebstockgelände wird von einem Betriebswasserbedarf von 82 000 m³/a ausgegangen: in Wohnungen für WC-Spülung und Außenflächenbewässerung, in Büros für WC-Spülung und Klimaanlage. In der westlichen Innenstadt sind die großen Trinkwasserverbraucher in den Bürohäusern und Hochhäusern z. B. Geldinstitute, Immobilienverwaltungen und Hotels. Trinkwassersubstitutionsmöglichkeiten wurden berechnet in Höhe von 360 000 m³/a, z. B. für die Kältemaschinen und die Bewässerung der Außenanlagen; bei diesem Beispiel konnte Wirtschaftlichkeit in der Kostenabschätzung nicht erzielt werden.

Als Empfehlung wurde für die Stadt betont, dass bewährte Vorgehensweisen routinemäßig umgesetzt werden müssen (gleichzeitig zur Vorbereitung komplexerer Wassersparmaßnahmen).

Tatsächliche Grundwasserfördermengen lagen laut Cichorowski (1998) zumindest bei den wasserrechtlich zuständigen Institutionen (RP Darmstadt und Untere Wasserbehörde) nicht vor und wurden basierend auf Einzelinformationen geschätzt (die Informationen, die dem Land Hessen aufgrund der Grundwasserabgabe verfügbar waren, wurden nicht genutzt). Von 34 Mio. m³/a innerstädtisch förderbarem Grundwasser (14 Mio. m³ nördlich vom Main, 15 Mio. m³ südlich vom Main und 5 Mio. m³ in tiefer gelegene Grundwasserbereichen) wurden zum Zeitpunkt der Erstellung des Überblicks von Cichorowski (1998) knapp ein Drittel (10 Mio. m³/a) nicht genutzt und waren somit verfügbar. Dem gegenüber wurde das erhobene Substitutionspotenzial auf 7 Mio. m³/a geschätzt, 6,5 m³/a im Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen und 0,5 m³/a in Neubausiedlungen. Cichorowski et al. (1991) hatten für die Sektoren Haushalt/Kleingewerbe und Öffentliche Einrichtungen/Industrie ein langfristiges Substitutionspotenzial von 10 Mio. m³/a berechnet. Laut der Einschätzung der Cooperative war bis 1998 lediglich ein kleiner Teil davon realisiert, etwa 1 Mio. m³/a (Cichorowski 1998).

Die hydrogeologischen Auswertungen von Cichorowski (1998) basieren auf den damals vorliegenden Daten: Die Datenlage bezogen auf Grundwasservorkommen im Stadtgebiet war unvollständig; es wurden lediglich Teilgebiete ausgewertet. Darüber hinaus ist es in den vergangenen mehr als 20 Jahren zu qualitativen oder quantitativen Veränderungen des Grundwassers gekommen. Trotzdem könnte die Bestandsaufnahme von 1998 für die aktuelle Debatte einen wichtigen Ausgangspunkt darstellen. Aus pragmatischen Gesichtspunkten konnte im hier vorliegenden Gutachten allerdings nicht erhoben werden, welche Vorschläge umgesetzt wurden und welche nicht. Inwieweit Grundwasservorkommen und Qualität im Rahmen dieser Studie darüber hinaus ausgewertet werden können, und ob mittlerweile eine bessere Datenlage besteht, hat sich in der Datenakquise weniger deutlich gezeigt, als bei der Auswertung 2018 angenommen wurde.

Substitutionspotenziale hatte die Cooperative in ihren Untersuchungen vor allem für gewerbliche und städtische Großverbraucher gesehen; daneben kamen auch Neubaugebiete in den Blick. Die Betrachtung von Wohnquartieren im Bestand und Projekten zur Nachverdichtung ist hingegen neu.

Anhang 3.2.6. Brauchwasserversorgung im Gewerbegebiet Oberhafen in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski et al. 1998a)

Grundlage für diese Machbarkeitsstudie ist das Gutachten „Marktpotenzial für Brauchwasser im Gewerbegebiet Ost der Stadt Frankfurt am Main“ (1994, siehe Kapitel 2.3). Dabei wird die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit des Gesamtpotenzials hinsichtlich verschiedener Ausbaustufen ausgewertet. Mainwasser soll hierbei zentral entnommen und aufbereitet werden.

Die Grobdimensionierung der zentralen Aufbereitungsanlage sieht einen Betriebswasserbedarf von 180 000 m³/a und eine mittlere Betriebswasserabgabe von 600 m³/d vor. Geeigneter Ort für die Entnahme und Aufbereitung ist das Gelände der ehemaligen Kokerei in zentraler Lage des Gewerbegebiets.

Des Weiteren werden mehrere Abstufungen des Gesamtpotenzials analysiert: Ausbaustufe 1 („Oberhafen West“) weist ein Betriebswasserpotenzial von 68 000 m³/a auf. Die Wirtschaftlichkeit dieser Variante ist bei Bauzuschüssen gegeben. Ausbaustufe 2 erweitert die erste Ausbaustufe und hat ein Betriebswasserpotenzial von 105 000 m³/a. Die Betriebswasserkosten werden mit 4,60 DM/m³ ohne Zuschüsse angegeben. Ausbaustufe 3 erweitert zwar die zweite Ausbaustufe, bildet jedoch nicht das Gesamtpotenzial ab: Betriebswasserpotenzial 161 500 m³/a, Kosten für Betriebswasser 4,50 DM/m³ ohne Zuschüsse. Eine Einzelversorgung des Betonwerks und eine mögliche Erweiterung hätten ein Betriebswasserpotenzial von 9 000 m³/a bzw. weitere 8 500 m³/a.

Die Studie weist aus, dass die Kostenstruktur je Ausbaustufe ähnlich wäre. Der Vorteil des stufigen Ausbaus liegt darin, dass das Investitionsrisiko und „Anlaufverluste“ abgemindert werden können. Eine Wirtschaftlichkeit wird bei einem Kostenzuschuss von min. 70 % der Baukosten erwartet. Die Länge des Leitungsnetzes hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Betriebswassernutzung.

Insbesondere für die Nutzung des Betriebswassers und die Umsetzung des Betriebswasserkonzepts im untersuchten Gewerbegebiet herrschten Cichorowski et al. (1998) zufolge sehr gute Rahmenbedingungen (Verfügbarkeit der Fläche für die zentrale Entnahme und Aufbereitung, optimale Lage dieser Fläche im Zentrum des Gewerbegebiets, Vorhandensein eines Speichers (die alten Wassertürme der Kokerei). Auch hier konnte für das aktuelle Gutachten aus pragmatischen Gesichtspunkten der Umsetzungsstand nicht erhoben werden; bezogen auf die ermittelten Potenziale ist jedoch die Konversion im Osthafengebiet hin zum Wohnungsbau zu reflektieren.

Anhang 3.2.7. Einsatzmöglichkeiten von Brauchwasser in der Bürostadt Niederrad in Frankfurt am Main, 1998 (Cichorowski et al. 1998b)

Als Betriebswasser bietet sich in der Bürostadt Niederrad aufbereitetes Mainwasser an, da eine Entnahmestelle bereits besteht und die Leitungsführung im westlichen und südlichen Teil des Geländes gut erreichbar ist. Zur Erhebung des Substitutionspotenzials wurden erst Kennzahlen erhoben und dann hieraus die Annahme abgeleitet, dass bei Verbrauchern unter 500 l/m² Trinkwasser 50 % substituiert, und bei Verbrauchern über 500 l/m² Trinkwasser 60 % substituiert werden können. Insgesamt wurden dann 12 Gebäude näher betrachtet, die ein breites Spektrum an Bebauung und Nutzung aufweisen. Für jedes der Objekte wurde nochmals detailliert die substituierbare Trinkwassermenge abgeschätzt, und für drei zufällig gewählte Bürogebäude wird auch die Möglichkeit einer Nachrüstung beschrieben. Hierbei wurde gezeigt, dass sich das geschätzte Substitutionspotenzial in der Regel technisch umsetzen lässt und auch kostendeckend realisiert werden könne.

Im Westen und im Süden der Bürostadt Niederrad bestehen bereits Transportleitungen für Mainwasser zu einer Versickerungseinrichtung im Stadtwald und anderen Nutzungen (Flughafen, Golfplatz). Daher wird auch eine Erweiterung des Produktangebots der Stadtwerke, also die Versorgung der Bürogebäude mit Betriebswasser durch die Stadtwerke als sinnvoll erachtet und gehofft, dass sie „zur Stabilisierung des Betriebs der Mainwasser-Aufbereitungsanlage beitragen“ kann.

Neben den auch in anderen Gutachten gelisteten Betriebswasser-Nutzungen (WC- und Urinal-Spülung, Außenflächenbewässerung, Kältemaschinen, Luftbefeuchtung) wird auch der Betrieb von Bandspülmaschinen als mögliche Betriebswasser-Nutzung erachtet, die auch an eine zentrale Enthärtungsanlage angeschlossen sind. Allerdings sind mengenmäßig der Einsatz von Betriebswasser zur Rückkühlung der Kältemaschinen und die Befeuchtung der Raumluft von Bedeutung, an dritter Stelle kommt der Sanitärbereich (Spülung). Bewässerung der Außenanlagen, Reinigungsvorgänge und Löschwasservorrat wird als geringer Wasserbedarf eingeschätzt.

Für die Bürostadt Niederrad wurde berechnet, dass zwei Drittel des 1994 und 1995 benötigten Trinkwassers durch Betriebswasser ersetzt werden könnte, technisch umsetzbar sei allerdings nur die Hälfte des benötigten Trinkwasserbedarfs.

Die Wirtschaftlichkeit ist im südlichen Teil des Gebietes gewährleistet, weil dort kurze Stichleitungen zu Großabnehmern gelegt werden können. Im Westen kann von einer wirtschaftlichen Umsetzung ausgegangen werden – bereits wenn die Hälfte des Betriebswasserpotenzials bedient wird – ohne finanziellen Förderungen. Umbauten im Sanitärbereich verursachen erhöhte Kosten. Der Betriebswasserbedarf hätte sich auf gesamt 200 000 m³/a belaufen.

Schlussfolgerung

In Bezug auf diese Studie ist es unter der aktuellen Themenstellung von Interesse, herauszufinden, inwieweit Projekte verwirklicht worden sind und sich realisierte Projekte bewährt haben und wie aktuell die Situation in der Bürostadt Niederrad hinsichtlich Sanierungsmaßnahmen und Umnutzung ist.

Anhang 3.2.8. Rationelle Energie- und Wasserverwendung in Frankfurter Hochhäusern (Cichorowski 1999)

Bei dem vorliegenden Dokument handelt es sich um einen kurzen Artikel von Georg Cichorowski, damaligem Mitarbeiter der Cooperative, in der Fachzeitschrift Wasser Abwasser Praxis (Heft 5/1999). Zum Thema Trinkwassersubstitution geht der Autor auf die Möglichkeit der Grund- und Flusswassernutzung in Hochhäusern näher ein.

Da der quartäre Grundwasserleiter in der Frankfurter Innenstadt nicht sehr ergiebig ist, und auch wegen Gefährdungen der Grundwasserqualität, wäre es naheliegend, tiefere Grundwasserleiter zu nutzen, wie die tertiären Kalksteinbänke unter dem Frankfurter

Tor (Tiefe 20–100 Meter). Auch durch die Kosten für die notwendigen hydrogeologischen Untersuchungen ist Betriebswassergewinnung nur bei größerem Bedarf wirtschaftlich.

Verwendet man Flusswasser zur Betriebswasserherstellung, würden Kosten durch Wasserentnahmebauwerke und Filtrationsanlagen entstehen, und ein Leitungsnetz könne darüber hinaus aus Kostengründen nur in der Nähe des Flusses gebaut werden.

Grauwasser wurde zur Zeit des Artikels in 2 Hochhäusern genutzt, Abschlammwasser aus Kühltürmen und im anderen Beispiel Wasser aus der Luftentfeuchtung.

Eine Umrüstung bestehender Hochhäuser auf Betriebswasser erachtet der Autor als wirtschaftlich, wenn der Bedarf groß genug ist. Die zentrale Enthärtungsanlage sollte optimaler Weise in den unteren Geschossen angeschlossen werden, andernfalls, könne die Feuerlöschleitung als Steigleitung genutzt werden. Wenn die WC-Spülung nachträglich mit Betriebswasser versorgt werden soll, sei dies nur selten wirtschaftlich, da die Sanitärerschächte meist voll sind.

Das Betriebswasserpotenzial wird vom Autor allein für die westliche Innenstadt auf mehrere 100 000 m³/a geschätzt.

Schlussfolgerung

Umbaumöglichkeiten bestehender Gebäude wurden in früheren Gutachten häufig als problematisch erachtet. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen neue technische Möglichkeiten für Nachrüstung auf Betriebswasser, wie z. B. Doppelinliner. Bei den Erhebungen bei den Banken oder anderen Hochhausbetreibern ist zu fragen, wie weitgehende Modernisierungen hier erfolgt sind. Auch stellt sich die Frage nach dem Status der aufgeführten Grauwassernutzungen.

Anhang 3.2.9. Umsetzungsmaßnahmen zur Substitution von Trinkwasser in Frankfurt am Main, 2000 (Cichorowski und Heinzelmann-Ekoos 2000)

Dienstleistungsgebäude in der Innenstadt Frankfurts haben einen hohen Trinkwasserverbrauch, gleichzeitig muss dort Grundwasser drainiert werden. Damals geplante Neubauvorhaben und der Bestand an Hochhäusern in der Innenstadt West wurden auf ein Betriebswasserpotenzial von 380 000 m³/a geschätzt. Daher war das erklärte Ziel, Investitionen zur Betriebswassernutzung zu verbessern: Beratungsgespräche und auch im weiteren Verlauf Unterstützung im wasserrechtlichen Verfahren wurden daher Investoren über das Umweltamt angeboten. In den Beratungsgesprächen wurden Substitutionspotenzial, technische Rahmenbedingung, verfügbare Betriebswasser-Ressourcen und Investitionen thematisiert. Neben Klimatechnik wurde WC-spülung zweitrangig behandelt, da Trinkwassersubstitution hier kleiner ausfällt. Des Weiteren wurde vorgeschlagen z. B. durch eine Bonusregelung im Bebauungsplan Nr. 702 (Bankenviertel) Anreize zu setzen, außergewöhnliche Maßnahmen zur Wassereinsparungen umzusetzen, z. B. Vakuumentwässerung, Nutzung von Grundwasser, Regenwasser und Grauwasser als Betriebswasser.

Parallel dazu wurde Verfügbarkeit von Grundwasser geprüft: In der Umgebung der Hochhäuser wird in der oberen Profiltiefe, bis 30 Meter, von einem Grundwasserpotenzial von 350 000 m³/a bis 450 000 m³/a ausgegangen (S.53).

Eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigte eine Amortisationszeit von fünf Jahren und deutet somit auf eine ökonomisch sinnvolle Maßnahme, im Rahmen der oben beschriebenen Optionen hin.

Von den damals geplanten 15 Neubauten, die im Rahmen der Beratungsgespräche kontaktiert wurden, haben drei Objekte (Commerzbank, Polizei Präsidium, Telekom Sky-light) Regenwassernutzung, und je eines Mainwassernutzung (IG Metall) bzw. Betriebswassernutzung (Allianz) realisiert. Von den 11 bestehenden Gebäuden wurde in der Dresdner Bank eine Realisierung geplant.

Schlussfolgerung

Der Ansatz, der damals verfolgt wurde, nämlich Beratungsgesprächen und die Unterstützung der Bauherren im weiteren planerischen Verlauf, sollte in der aktuellen Studie noch einmal knapp daraufhin bewertet werden, ob er als Teil eines aktuellen Maßnahmenpaketes zur Umsetzung von Trinkwassersubstitutions-Möglichkeiten geeignet wäre.

Die Untersuchungen der hydrogeologischen Verhältnisse in der westlichen Innenstadt kann für aktuelle Studie als Ausgangspunkt von Nutzen sein.

Als interessantes Detail ist festzuhalten, dass die Nutzung der Feuerlöschleitung als Betriebswassersteigleitung in Hochhäusern als zulässig erachtet wurde.

Des Weiteren ist herauszufinden inwieweit in Frankfurt am Main in die Planung von neuen Gewerbegebieten Nachhaltigkeitsaspekte in Hinsicht auf Wasserversorgung bereits Einzug gefunden haben, z.B. im Gewerbegebiet „Am Martinszehnten“ (Frischezentrum Frankfurt am Main) und im „Nachhaltigen Gewerbegebiet“ in Fechenheim-Nord bzw. Seckbach.

Anhang 3.2.10. Konzeption zur Umsetzung der Regenwasserbewirtschaftung in Erschließungsgebieten der Stadt Frankfurt am Main, 2005 (AG Regenwasserbewirtschaftung 2005)

Hintergrund von Regenwasserbewirtschaftung ist das grundsätzliche Ziel der „Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt“. Aufgefangenes Regenwasser soll in flächeneffizienten Systemen dem Wasserkreislauf durch Versickerung und Verdunstung wieder zurückgegeben werden. Das vorliegende Dokument wurde von der Arbeitsgruppe Regenwasserbewirtschaftung (Straßenbauamt, Erschließungsamt, Stadtplanungsamt, Grünflächenamt und die Stadtentwässerung Frankfurt am Main) vorgelegt. Bei Neubaugebieten und Straßen muss der Umgang mit Niederschlagswasser geprüft werden. Regenwasserversickerung wirkt dem Problem der Kanalnetzüberlastung entgegen und wird daher bei der Erschließung von neuen Baugebieten besonders relevant.

Die vorliegende Ausarbeitung gibt einen zusammenfassenden Überblick über Fragen hinsichtlich der Umsetzung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen: Ablauf des Verfahrens, Planung und Baudurchführung, Zuständigkeiten und einen Elemente Katalog mit Abbildungen.

Ungeklärte technische, organisatorische und rechtliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Implementierung von Regenwasser-Versickerungsanlagen in Neubaugebieten werden geklärt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Klärung der Zuständigkeiten und einer Zusammenstellung von möglichen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (bspw. Mulden, Mulden-Rigolen, Gestaltungselemente). Eine Nutzung des Regenwassers ist lediglich auf einer halben Seite erwähnt, als Gestaltungselemente: Teichanlagen in Grünanlagen und Wasserspiel, jedoch nicht weiter beschrieben.

Schlussfolgerung

Im Fokus der kommunalpolitischen Anstrengungen steht derzeit die Grundwasserneubildung, nicht aber die Nutzung des Niederschlags durch den Betreiber. Die Nutzung von Regenwasser als Betriebswasser kann unter Umständen interessant für die Bauherren und die Betreiber des Gebäudes sein, die in Regenwasserbewirtschaftungsanlagen investieren müssten.

Für die vorgeschriebene Umsetzung von Regenwasserbewirtschaftung z.B. in Gewerbegebieten müssen Bauherren bereits nicht unerhebliche Investitionen einkalkulieren. Anstelle ausschließlich auf Versickerungsanlagen zu setzen, könnte auch in Lösungen zur Regenwassernutzung investiert werden, die sich unter Umständen auch betriebswirtschaftlich amortisieren können.

Anhang 3.2.11. Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region: Fortschreibung, 2016 (Roth 2016)

Die vorliegende Analyse, die im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM) entstand, beschäftigt sich mit der Entwicklung des Wasserverbrauchs bis zum Jahr 2030 und diskutiert die Sicherstellung der Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region bzw. dem Regierungsbezirk Darmstadt. Die Analyse diskutiert die Wasserversorgungssituation und die Wasserbedarfsprognose in den neun verschiedenen Verbänden der Rhein-Main-Region. Die Versorgungssicherheit der kommenden Dekade soll hierbei durch Kapazitätsausbau im Verteilungsnetz und ein integriertes, regionales Ressourcen-Management sichergestellt werden. Das Rückgrat der Wasserversorgung bilden im Untersuchungsraum und vor allem dessen Kernräumen um Darmstadt, Frankfurt am Main und Wiesbaden das Hessische Ried und der Vogelsberg.

Im Versorgungsgebiet 2 (Frankfurt/Vordertaunus) reichen die örtlichen Wasservorkommen nicht aus; Gründe dafür sind die intensive Flächennutzung und hydrogeologische Gegebenheiten. Im Jahr 2014 wurde in der Stadt Frankfurt am Main (inkl. Flughafen) knapp 50 Mio. m³ Trinkwasser verbraucht, 11 Mio. m³ wurde von Wasserwerken in Frankfurt am Main gefördert. Die Gewinnungsanlagen im Stadtwald und das Wasser-

werk Praunheim II unterliegen infolge intensiver Flächennutzung erheblicher Gefährdung, sind allerdings für Spitzenbelastung unverzichtbar; das Wasserwerk Hattersheim wird für Notfälle betriebsbereit gehalten. Die Mainwasseraufbereitungsanlage in Niederrad stand bei der Erstellung des Gutachtens zur Sanierung an.

Während das Gewinnungsgebiet im Hessischen Ried durch infiltrationsgestützt Grundwasserbewirtschaftung abgesichert sei, sind die aus dem Vogelsberg bezogenen Liefermengen infolge ökologischer Risiken gefährdet. Roth sieht die Versorgungssicherheit im Versorgungsgebiet 2 zwingend im Zusammenhang mit anderen Teilräumen und schlägt Wasserbezug aus weiter entfernten Regionen vor.

1. Betriebswasserkonzepte könnten vor allem bei Neubauprojekten geprüft werden, der Autor vermutet allerdings aufgrund technischer, ökonomischer und rechtlicher Aspekte begrenzte Wirksamkeit. Auch sei, unabhängig von fachlicher Bewertung, bis 2030 eine großflächige Umsetzung im Gebäudebestand ohnehin nicht realisierbar.
2. Eigenbedarf und Wasserverluste seitens der Trinkwasserproduktion wurden zwischen 1982 und 2014 um 37 % reduziert und seien in der Rhein-Main-Region mit ca. 9 %, (2013 und 2014) vergleichsweise zum Durchschnitt in Deutschland (ca. 11 %) gering. Hinsichtlich der technischen Möglichkeiten des Wassersparens seitens der Verbraucher kommt Roth zu dem Schluss, dass das wesentliche Wassersparpotenzial in der Vergangenheit bereits umgesetzt wurde, das noch bestehende Potenzial sei gering.
3. Hinsichtlich demographischer Entwicklungen und der Wasserbedarfsprognose für 2030 werden unterschiedliche Prognosen diskutiert; Roth (2016) richtet ein besonderes Augenmerk darauf, wie weit es faktisch bereits zu Abweichungen kommt.
4. Zur Regenwassernutzung verweist der Autor auf das DVGW-Arbeitsblatt W 555 und DIN 1989 und geht von bundesweit 20 000 bis 30 000 Neuanlagen jährlich aus. Prognostiziert auf 2030 mit einer Umsetzungsrate von 50 % bei Ein- und Zweifamilienhäusern wäre dies ein Einsparpotenzial von 0,6 l/(E*d) für Frankfurt am Main und 0,9 l/(E*d) durchschnittlich im Regierungsbezirk Darmstadt.

Schlussfolgerung

Die Autoren behandeln das Thema Trinkwassersubstitution durch Betriebswasser lediglich am Rande; ihrer Meinung nach mangelt es für eine Realisierung dieser Konzepte auch an Abnehmern. Auch aufgrund des mittelfristigen Betrachtungszeitraumes der Studie bis 2030 sieht der Autor wenig Potenzial für die Umsetzung von Betriebswassersystemen. Der Betrachtungszeitraum der aktuellen Studie geht bis 2050, auch weil strukturelle Änderungen in der Wasserinfrastruktur nicht kurzfristig umsetzbar sind. Ob der Zeitraum bis 2050, ausreichend ist, um das Potenzial von Betriebswasser zur Trinkwassersubstitution darzustellen wird sich zeigen.

Laut Roth et al. kann nach heutigem Kenntnisstand der Wasserverbrauch für die Toilettenspülung auf 18 bis 25 l/(E/d) reduziert werden, dies wird zwischen 2030 und 2050 erwartet. Aktuell wird in Fachliteratur von 32 und 34 l/(E*d) ausgegangen. Für Waschmaschinen hingegen wird angenommen, dass die derzeitigen Geräte bereits nahe an

der Grenze des Machbaren liegen; allerdings weichen Normwaschgang und tatsächliches Waschverhalten unter Umständen voneinander ab; auch sind aufgrund kleiner Haushaltsgrößen ineffiziente Beladungen zu vermuten. Daher sollte auf aktuelle Literatur aus dem in dieser Frage führenden Institut für Landtechnik der Universität Bonn zurückgegriffen werden.

Es ist zu prüfen, ob es hinsichtlich des Umsetzungspotenzials für Regenwasseranlagen im häuslichen Bereich bessere Schätzungen gibt.

Anhang 3.3.1. Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main

Tabelle 39: Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main (Angaben in 1000 m³)

| Jahr | Wassergewinnungsanlagen | Wassergewinnung insgesamt | Grund- und Quellwasser | Uferfiltrat | Oberflächenwasser (einschl. angereichertes Grundwasser) | Oberflächenwasser (einschl. Uferfiltrat und angereichertes Grundwasser) |
|------|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------|---|---|
| 1975 | 10 | 27.367 | 13.237 | 5.462 | 8.668 | ≥14.130* |
| 1979 | 10 | 24.307 | 8.468 | 4.909 | 10.930 | ≥ 15.839* |
| 1983 | 10 | 23.417 | 9.906 | 2.111 | 11.400 | ≥ 13.511* |
| 1987 | 10 | 15.490 | 8.222 | - | 7.268 | ≥ 7.268* |
| 1991 | 10 | 17.997 | 9.421 | - | 8.576 | ≥ 8.576* |
| 1995 | 10 | 13.684 | 13.684 | - | - | |
| 1998 | 9 | 12.312 | 12.312 | | | _*** |
| 2010 | 6 | 10.462 | 4.969 | | | 5.493** |
| 2013 | 5 | 10.025 | 4.546 | | | 5.479** |
| 2016 | 5 | 12.021 | 5.101 | | | 6.920** |

Quellen: Veröffentlichte Statistiken der HSL, insbesondere HSL (1980, 1998, 2018a)

* eigene Berechnungen in Anlehnung an HSL

** andere Darstellung seit 1998 durch HSL

Anhang 3.3.2. Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main

Tabelle 40: Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung in Frankfurt am Main (Angaben in 1000 m³ nach der Landesstatistik)

| Jahr | Eigengewinnung insgesamt | Grund- und Quellwasser | Uferfiltrat und angereichertes Grundwasser | Oberflächenwasser |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------|
| 1975 ^[1] | 312.603 | 8.978 | - ^[2] | 303.625 |
| 2010 | 323.798 | 6.857 | 836 | 316.105 |
| 2013 | 313.948 | 6.086 | - | 307.862 |
| 2016 | 320.598 | 5.663 | 2599 | 312.336 |

[1] HSL 1980: 39

[2] nicht gesondert erfasst

Anhang 3.3.3. Grundwasserentnahme für nicht-öffentliche Zwecke in Frankfurt am Main

Tabelle 41: Entnahmemengen der nicht-öffentlichen Betreiber im Jahr 2016 (Angaben der Oberen Wasserbehörde)

| Gemarkung | Rechtsform ausschließl. Erlaubnis | genehm. Menge m³/a | tats. Entnahme 2016 m³/a | Zweck | Bemerkungen |
|--------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------|-------------------------------|
| Schwanheim | 06.04.2000 | ohne | 74.523 | Brauchwasser | unbegrenzte Entnahmemenge |
| Bockenheim | 08.12.2016 | 260.000 | | Brauchwasser | Brunnen derzeit außer Betrieb |
| Ostend | 15.01.2007 | 8.000 | 7.209 | gewerblich | |
| Rödelheim | 13.03.2017 | 25.000 | 19.157 | gewerblich | |
| Preungesheim | 23.09.1988 | 7.000 | 4.680 | Gartenbau | |
| Zeppelinheim | 26.09.1960 | 500.000 | 150.890 | Brauchwasser | |
| Nieder-Eschbach | 08.02.2010 | 12.500 | 5.200 | Gartenbau | |
| Kalbach | 06.04.2016 | 15.000 | 8.147 | Brauchwasser | |
| Eschersheim | 23.02.1988 | 12.000 | | Gartenbau | keine Mitteilung erhalten |
| Oberrad Br. 1 | 13.11.1987 | 3.000 | 2.667 | Gartenbau | |
| Oberrad Br. 2 | 13.11.1987 | 3.000 | 2.478 | Gartenbau | |
| Sachsenhausen | 09.08.1990 | 24.000 | | Brauchwasser | Brunnen derzeit außer Betrieb |
| Fechenheim | 14.07.2008 | 15.000 | 12.244 | gewerblich | |
| Sachsenhausen | 02.11.1983 | 10.000 | | Gartenbau | keine Mitteilung erhalten |
| Sindlingen | 05.08.2013 | 9.500 | 9.969 | Gartenbau | |
| Bockenheim | 17.03.1989 | 10.000 | 7.559 | Brauchwasser | |
| Westend-Nord (Bezirk 19) | 12.08.2016 | 8.800 | 11.983 | Brauchwasser | |

| Gemarkung | Rechtsform ausschließl. Erlaubnis | genehm. Menge m³/a | tats. Entnahme 2016 m³/a | Zweck | Bemerkungen |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|
| Fechenheim | 10.10.1988 | 15.000 | 11.120 | Gartenbau | |
| Nieder-Erlenbach | 30.11.2006 | 130.000 | 89.050 | Gartenbau | |
| Schwanheim | 15.05.2012 | 15.000 | 5.009 | Gartenbau | |
| Sossenheim | 16.11.1987 | 12.000 | 3.568 | Gartenbau | |
| Nieder-Erlenbach | 05.11.2014 | 67.000 | 3.834 | Gartenbau | |
| Nieder-Erlenbach | 05.11.2014 | 10.000 | 29.720 | Gartenbau | |
| Nieder-Eschbach | 12.03.1996 | 20.500 | 13.213 | Gartenbau | |
| Gutleutviertel | 12.06.2014 | 50.000 | 33.671 | gewerblich | |
| Gallusviertel | 10.04.2018 | 125.000 | 82.430 | Brauchwasser | |
| Rödelheim | 06.12.1988 | 40.000 | 8.369 | Brauchwasser | |
| Preungesheim | 29.08.1980 | 60.000 | 41.250 | Brauchwasser | |
| Nieder-Erlenbach | 11.06.1982 | 67.275 | 42.718 | Gartenbau | |
| Rödelheim | 16.07.1982 | 18.000 | | Gartenbau | Brunnen derzeit außer Betrieb |
| Nied | 31.05.1989 | 876 | | Brauchwasser | keine Mitteilungspflicht |
| Kalbach | 12.09.1988 | 19.500 | 1.161 | Brauchwasser | |
| Schwanheim | 19.04.2010 | 40.000 | 22.088 | Brauchwasser | |
| Eckenheim | 25.02.2015 | 16.000 | | Brauchwasser | Brunnen noch nicht in Betrieb |
| Nd. Eschbach | 21.05.2003 | 13.000 | 1.680 | Brauchwasser | |
| Nieder-Eschbach | 29.07.2010 | 125 | 51 | Brauchwasser | |
| Westend-Süd | 24.06.2013 | 20.000 | 24.892 | Brauchwasser | |
| Nd-Erlenbach | 19.01.1995 | 3.000 | 1.106 | Brauchwasser | |
| Griesheim | 13.06.1991 | 5.000 | 428 | Brauchwasser | |
| Bornheim | 07.01.1984 | 7.500 | 1.671 | Brauchwasser | |
| Bornheim | 21.12.2011 | 300.000 | 246.447 | Brauchwasser | |
| Niederursel | 22.04.1997 | 500.000 | 196.738 | Brauchwasser | |
| Summe | | 2.477.576 | 1.102.397 | | |

Zusammenfassung:

| Summe der genehmigten Menge, m³/a | Summe der gemeldeten Entnahmen, (minimal), m³/a | Summe, keine Mitteilung erhalten oder keine Mitteilungspflicht, m³/a | Summe der Entnahme, (maximal), m³/a | Summe, Brunnen nicht mehr oder noch nicht im Betrieb, m³/a | Genehmigt aber nicht entnommen, m³/a |
|-----------------------------------|---|--|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 2.477.576 | 1.102.397 | 22.876 | 1.125.273 | 302.000 | 1.050.303-1.073.179 |

Die Grundwasserentnahme in Schwanheim ist bei der Berechnung nicht berücksichtigt, weil es keine genehmigte Maximalmenge gibt.

**Anhang 3.3.4. Einleitung von Brunnenwasser in die Kanalisation von Frankfurt am Main
(nach Angaben der Gebührenabteilung Stadtentwässerung Frankfurt am Main 2018)**

Insgesamt gibt es in Frankfurt am Main 52 Brunnen, deren Wasser in die Kanalisation geleitet wird. Diese verteilen sich wie folgt auf das Stadtgebiet:

| | | | |
|-----------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Anzahl Mitte: | 7 | Anzahl Süd: | 12 |
| Verbrauch 2016: | 73.606 m ³ | Verbrauch 2016: | 115.201 m ³ |
| Verbrauch 2017: | 63.640 m ³ | Verbrauch 2017: | 120.882 m ³ |
| | | | |
| Anzahl Nord: | 11 | Anzahl West: | 16 |
| Verbrauch 2016: | 123.543 m ³ | Verbrauch 2016: | 6.083 m ³ |
| Verbrauch 2017: | 125.149 m ³ | Verbrauch 2017: | 12.255 m ³ |
| | | | |
| Anzahl Ost: | 2 | | |
| Verbrauch 2016: | 427 m ³ | Gesamtmenge 2016: | 318.860 m³ |
| Verbrauch 2017: | 414 m ³ | Gesamtmenge 2017: | 322.340 |

Weiterhin gab es in den Jahren 2016 und 2017 Baustellen aus denen entweder Grundwasser (RWK) oder Abwasser (MWK) in die Kanalisation eingeleitet wurde. Für 2016 gab es 61 Grundwasser Einleiter und 14 Abwasser Einleiter. Für das Jahr 2017 47 Grundwasser Einleiter und 16 Abwasser Einleiter.

Die Zahlen belaufen sich auf folgende Ergebnisse:

2016:
MWK ca. 545.000 m³
RWK ca. 385.000 m³

Davon sind die Baustellen wie folgt ansässig:

Mitte und Nord: 26
Ost: 21
West: 11
Süd: 17

Für 2017 wurden keine endgültigen Angaben übermittelt, da mehrere Bauvorhaben nicht begonnen hatten oder sich mit Vorjahren überschneiden.

MWK ca. 350.000 m³
RWK ca. 170.000 m³

Anhang 3.3.5. Stillgelegte Brunnen in Frankfurt am Main

Tabelle 42: Stillgelegte Brunnen in Frankfurt am Main

| Gemarkung | Brunnen | genehm. Menge m³/a | Zweck | Stilllegung |
|------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Bergen-Enkheim | 6 | 420.000 | Trinkwasserversorgung | 2011 |
| Praunheim ^[1] | 7 | 1.700.000 | Trinkwasserversorgung | 2007 |
| Griesheim ^[1] | 3 | 1.000.000 | Trinkwasserversorgung | 2007 |
| Griesheim ^{[1][2]} | 9 | 4.000.000 | Brauchwasser | 1998 |
| Nieder-Eschbach | 2 | 450.000 | Trinkwasserversorgung | 2005 |
| Preungesheim | 1 | 6.000 | Gartenbau | 2005 |
| Sachsenhausen ^[3] | 1 | 60.000 | Brauchwasser | 2013 |
| Rödelheim | 1 | 26.000 | Brauchwasser | 2014 |
| Schwanheim | 1 | 3.570 | gewerblich | 2012 |
| Gesamt^[4] | 34 | 7.665.570 | | |

Quelle: Nach Angaben der Oberen Wasserbehörde mit Ergänzungen und Anmerkungen zum aktuellen Zustand und Zeitpunkt der Stilllegung (Hessenwasser). Die stillgelegten Brunnen wurden teils rückgebaut (Bergen-Enkheim, Griesheim Staustufe) oder einem anderen Nutzer übergeben (Nieder-Eschbach).

[1] Vor allem bei alten Wasserrechten (z. B. Griesheim, Praunheim III) sind diese Entnahmemengen nicht mehr genehmigungsfähig

[2] Anlage Hessenwasser, BWA Staustufe Griesheim

[3] Hier handelt es sich vermutlich um die Seehofquelle

[4] Im Wasserkonzept der Stadt Frankfurt am Main wird für die in der Tabelle angeführten WW zur öffentlichen Trinkwasserversorgung von einer nutzbaren Wassermenge von ca. 2 Mio. m³/a gesprochen.

Anhang 5.2.2. Vorgehensweise Goethe-Universität Frankfurt am Main

Beispielhaft für Bildungseinrichtungen wurde die Goethe-Universität ausgewählt. Für den Standort Campus Westend bestehen umfangreiche Datengrundlagen bzgl. Wasserversorgung. Wasserverbräuche und Substitutionspotenziale werden basierend auf einem Vorlesungsgebäude (Seminarhaus) dargestellt. Zusätzlich wurde Substitutionspotenzial in einer Kantine ermittelt. Die Daten werden mit Werten aus der Literatur verglichen und ergänzt. Die Extrapolation auf das Stadtgebiet geschieht über die ermittelten Kenngrößen (Substitutionspotenzial pro Gebäudenutzer). Diese werden mit Hilfe von statistischen Zahlen zu Frankfurts Studierenden sowie Schülern und Lehrern an allgemeinbildenden und beruflichen Schulen auf das Stadtgebiet hochgerechnet.

Anhang 5.2.3. Vorgehensweise Büro- und Verwaltungsgebäude

Beispielhaft wurde der Wasserverbrauch in verschiedenen Bürokomplexen erhoben, die zu zwei Branchen gehören und sich durch unterschiedliche Managementansätze auszeichnen. Das Betriebswasserpotenzial für den Betrieb der Toiletten für Gebäudekühlung und Reinigungsarbeiten wurde mit Hilfe von Kennzahlen berechnet. Inwieweit Umkehrosmose für die Aufbereitung von Spülmaschinen in der Großgastronomie üblich ist, konnte in der Untersuchung nicht erhoben werden; daher ist eine Hochrechnung des Potenzials auf das gesamte Stadtgebiet mit hoher Unsicherheit verbunden und wird für die Berechnungen des Substitutionspotenzials in Kapitel 8 nicht verwendet.

Tabelle 43: Wasserverbrauch der DZ-Bank am Standort Frankfurt am Main

| Kennzahl | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| Mitarbeiterzahl MA | 3.398 | 3.392 | 3.397 |
| Trinkwasser [m ³] | 72.390 | 67.203 | 75.760 |
| Abwasser [m ³] | 54.437 | 50.571 | 54.271 |
| spezifischer Wasserverbrauch [l/MA*d] | 84,83 | 79,57 | 88,85 |

Quelle: Nach Bind (2019)

Tabelle 44: Beschäftigte in Büro- und Verwaltungsgebäuden in Frankfurt am Main

| Berufshauptgruppen | Sozialversichert Beschäftigte |
|---|-------------------------------|
| Einkaufs-, Vertriebs- und Handelsberufe | 18.987 |
| Berufe in Unternehmensführung, -organisation | 102.628 |
| Berufe in Finanzdienstleistungen, Rechnungswesen und Steuerberatung | 70.416 |
| Berufe in Recht und Verwaltung | 21.854 |
| sprach-, literatur-, geistes-, gesellschafts- und wirtschaftswissenschaftliche Berufe | 3.356 |
| Werbung, Marketing, kaufmännische und redaktionelle Medienberufe | 19.918 |
| Gesamt | 237.159 |

Quelle: Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen (2018c)

Anhang 5.2.4. Vorgehensweise Gewerbegebiete

Beispielhaft wurde das Gewerbegebiet Fechenheim Nord/Seckbach in Frankfurt am Main ausgewählt. In Kooperation mit dem Standortmanager und dem Nachhaltigkeitsmanager des Gewerbegebiets wurde auf zwei Veranstaltungen die Studie vorgestellt, teilnehmende Unternehmer wurden um eine Mitwirkung bei der Datenerhebung gebeten. Hieraus resultieren vier Teilnahmen durch Unternehmer, die bereit waren einen Fragebogen auszufüllen. Da der Rücklauf der Fragebogen aus den Unternehmen zu gering war, konnte im Rahmen der Studie keine quantitative Bestimmung des Trinkwassersubstitutionspotenzials basierend auf diesen Daten durchgeführt werden. Dennoch konnten qualitativ wertvolle Erkenntnisse über das Betriebswasserpotenzial in Gewerbegebieten gewonnen werden, die mit Hilfe von Konzeptpapieren, mit weiteren öffentlichen Informationen über das Gewerbegebiet, und Literaturwerten für eine Berechnung eines minimalen Substitutionspotenzials erschlossen werden konnten. Literaturwerte für die Substitution von Trinkwasser in Bürogebäuden (Toilettenspülung) wurden zu Hilfe genommen, die mittels statistischer Daten zu Arbeitnehmern der unterschiedlichen Gewerbebereiche auf das Stadtgebiet hochgerechnet wurden (Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2018). Für Arbeitnehmer in Teilzeit wurde die Hälfte des Betriebswasserpotenzials einer Vollzeitstelle angenommen.

Tabelle 45: Beschäftigte in Gewerbe und Handel, inklusive verarbeitendes Gewerbe in Frankfurt am Main (Stadt Frankfurt am Main – Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2018c)

Beschäftigte, Jahresbericht 2018, S. 133

| Wirtschaftsabschnitt | Vollzeit | Teilzeit ^[1] *0,5 | |
|--|-----------------|---|----------------|
| verarbeitendes Gewerbe | 34.074 | 3.595 | |
| Energieversorgung | 3.476 | 418 | |
| Baugewerbe | 12.996 | 2.892 | |
| Handel, Instandhaltung und Reparatur KFZ | 32.084 | 13.620 | |
| Verkehr und Lagerei | 56.351 | 27.464 | |
| Summe | 138.981 | 47.989 | |
| Vollzeitäquivalente | | | 162.976 |
| Stellen | | | 186.970 |

[1] Bei Teilzeitstellen wurde von 50% ausgegangen.

Anhang 5.2.5. Vorgehensweise Ein- und Zweifamilienhäuser

Beispielhaft für den Bestand der Frankfurter Ein- und Zweifamilienhäuser wurden auf der Grundlage von zwei durch das ISOE betreuten Masterarbeiten zwei Wohngebiete im Norden der Stadt betrachtet, in denen baurechtliche Vorschriften den Einbau von Regenwasserzisternen festlegen. Mittels einer Potenzialanalyse wurden der Regenertrag und das Substitutionspotenzial der Anlagen zur Regenwassernutzung bestimmt; dabei wurde in Näherung die Passung von Regenertrag und Betriebswasserbedarf betrachtet. Um die Dimension der tatsächlichen Substitution abzuschätzen, erfolgte für ausgewählte Straßenzüge mit Ein- und Zweifamilienhäusern eine Abfrage der Daten zur gesplitteten Abwassergebühr bei der Stadtentwässerung Frankfurt (SEF). In der zweiten Arbeit wurde eine qualitative Befragung von Nutzer*innen von Regenwasserzisternen durchgeführt. Die Gespräche behandelten insbesondere die Thematik der „Alltagstauglichkeit“ von Regenwassernutzung auf Haushaltsebene.

Anhang 5.2.7. Vorgehensweisen öffentliche Grünflächen

Bei der Erhebung des Betriebswasserpotenzials für Bewässerung wurden Kenngrößen ermittelt, einerseits Literaturwerte, andererseits wurden exemplarisch Zahlen erhoben zur Bewässerungspraxis des Grünflächenamtes und der Goethe-Universität. Aufgrund mangelnder Angaben zu Flächen, und deren Bepflanzung kann für das Stadtgebiet der Bewässerungsbedarf weder für öffentliche noch für halb-öffentliche oder private Grünflächen berechnet werden. Unter Mitwirkung des Grünflächenamtes konnten jedoch die genauen Trinkwassermengen ermittelt werden, die für Bewässerungszwecke verwendet werden, und somit ein minimales Substitutionspotenzial für die Bewässerung von öffentlichen Grünanlagen in Frankfurt am Main.

Anhang 5.2.8. Vorgehensweise Sporteinrichtungen

Anhand einer Literaturuntersuchung und beispielhaft erhobener Zahlen für Frankfurt am Main wurden Kenngrößen zur Bewässerung von unterschiedlichen Sportanlagen ermittelt. Anschließend wurden Substitutionspotenziale für Sportplätze die vom Sportamt betrieben werden, berechnet, unter der Voraussetzung eines hygienisch unbedenklichen Betriebswassers. Die Extrapolation der Ergebnisse auf sämtliche, auch von Vereinen und anderen privaten Institutionen betriebenen Sporteinrichtungen konnte aufgrund mangelnder Datengrundlage nicht durchgeführt werden.

Anhang 6.1. Daten und Annahmen der sozio-ökonomischen Analyse

Anhang 6.1.1. Allgemeine Parameter und Annahmen

Tabelle 46: Annahmen für Rohrleitungen: Durchmesser, Materialien und spezifische Kosten

| Leitungsort | DN_min | DN_max | Material | Kosten [EUR/m] |
|---|---------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| <i>Schmutzwasser-, Grauwasserleitungen</i> | | | | |
| Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | PVC/PE | 35 |
| Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | PVC/PE | 85 |
| Anschlussleitung | 250 | 350 | PP/PE | 1.000 |
| Anschlussleitung (zusätzliche Kosten bei doppelter Leitungsführung) | 250 | 350 | PP/PE | 300 |
| <i>Trinkwasser-, Betriebswasserleitungen (Druckleitung)</i> | | | | |
| Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | PE | 30 |
| Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | PE | 35 |
| Anschlussleitung | 50 | 200 | PE | 1.000 |
| Anschlussleitung (zusätzliche Kosten bei doppelter Leitungsführung) | 65 | 100 | PE | 150 |

Quelle: Aufbauend auf Hamburg Wasser (2016)

Anhang 6.1.2. Daten der Kostenanalyse für die Günthersburghöfe

Rohrleitungsnetz in den Günthersburghöfen

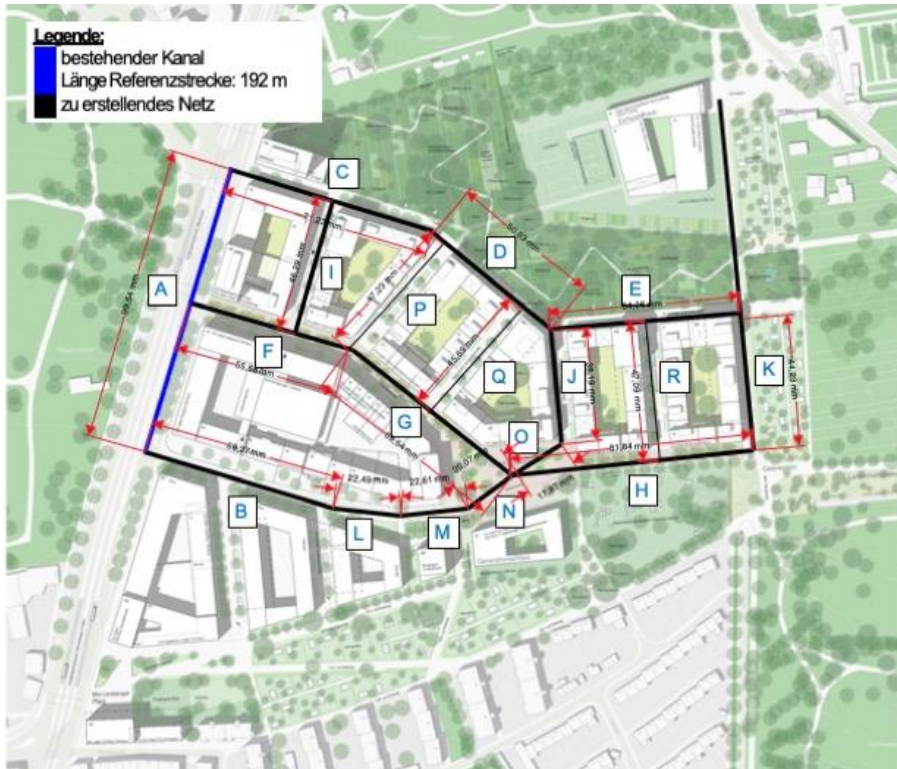


Abbildung 28: Lage der Rohrleitungen im öffentlichen Raum (Anschlussleitungen) in den Günthersburghöfen

Eigene Darstellung auf Basis des städtebaulichen Entwurfs; Copyright: Stadtplanungsamt Frankfurt

Die in der Karte eingezeichneten Abschnitte entsprechen einem Maßstab von rund 1:1900. Daraus ergeben sich folgende Abschnittslängen:

Tabelle 47: Länge der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich in den Günthersburghöfen

| Index | Straßen | Entfernung [m] |
|--------------|--------------------------|------------------|
| A | Friedberger Landstr. | 191,4 |
| B | Hungener Str. | 127,5 |
| C | Straße Nord (Abs. West) | 137,0 |
| D | Straße Nord (Abs. Mitte) | 97,4 |
| E | Straße Nord (Abs. Ost) | 123,6 |
| F | Quartiersstr. (West) | 106,9 |
| G | Quartiersstr. (Ost) | 133,8 |
| H | Weg Süd | 157,5 |
| I | Verbindungsstr. West | 90,3 |
| J | Verbindungsstr. Mitte | 70,5 |
| K | Verbindungsweg Ost | 85,1 |
| L | Quartiersplatz (NW) | 43,3 |
| M | Quartiersplatz (SW) | 43,5 |
| N | Quartiersplatz (NO) | 38,6 |
| O | Quartiersplatz (O) | 34,6 |
| P | Zugangsweg (W) | 90,9 |
| Q | Zugangsweg (Mi.) | 87,9 |
| R | Zugangsweg (O) | 90,6 |
| Summe | | ca. 1.750 |

Spezifische Annahmen für die Günthersburghöfe

Tabelle 48: Annahmen für Trink- und Schmutzwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Günthersburghöfe

| Ort | Trinkwasser- versorgung | Schmutzwasser- entsorgung | Anmerkung |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Toilette | 2,5 m | 2,5 m | |
| Dusche/Bad | 2,5 m | 2,5 m | |
| Waschbecken | 0 m | 0 m | Unmittelbar am Ver-/Entsorgungsschacht |
| Küche | 4,0 m | 4,0 m | |
| 2. Toilette | 2,5 m | 2,5 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Dusche | 2,5 m | 2,5 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Waschbecken | 0 m | 0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| Summe 3–4 Zi.-Whg. | 14,0 m | 14,0 m | |
| Summe 1–2 Zi.-Whg. | 9,0 m | 9,0 m | |

Im Fall der Versorgung mit Betriebswasser (Mainwasser oder Grauwasser) entfällt die Trinkwasserleitung für Toiletten, da die Spülung mit Betriebswasser vorgenommen wird. Bei der Grauwasservariante werden Duschen, Badewannen und Waschbecken über Grauwasserleitungen entsorgt.

Tabelle 49: Annahmen für Betriebs- und Grauwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Günthersburghöfe

| Ort | Betriebswasser- versorgung | Grauwasser- entsorgung | Anmerkung |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| Toilette | 2,5 m | | |
| Dusche/Bad | | 2,5 m | |
| Waschbecken | | 0 m | Unmittelbar am Ver-/Entsorgungsschacht |
| 2. Dusche | | 2,5 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Toilette | 2,5 m | | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Waschbecken | | 0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| Summe 3–4 Zi.-Whg. | 5,0 m | 5,0 m | |
| Summe 1–2 Zi.-Whg. | 2,5 m | 2,5 m | |

Daten der Referenzvariante „Konventionelles System“ in den Günthersburghöfen

Tabelle 50: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen (außerhalb des öffentlichen Leitungsnetzes)

| Wasserart | Leitungsort | DN _{min} | DN _{max} | spez. Kosten [EUR/m] | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|---------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 15.895 | 476.850 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | 8.379 | 293.267 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 15.895 | 556.325 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 8.709 | 740.271 |

Tabelle 51: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz des konventionellen Systems in den Günthersburghöfen

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|------------|---------------------------|--------|--------|
| Total | <u>5.897.513</u> | 3.906 | 1.821 |
| Privat | 2.066.713 | 1.369 | 638 |
| Öffentlich | 3.830.800 | 2.537 | 1.183 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Daten zur Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in den Günthersburghöfen

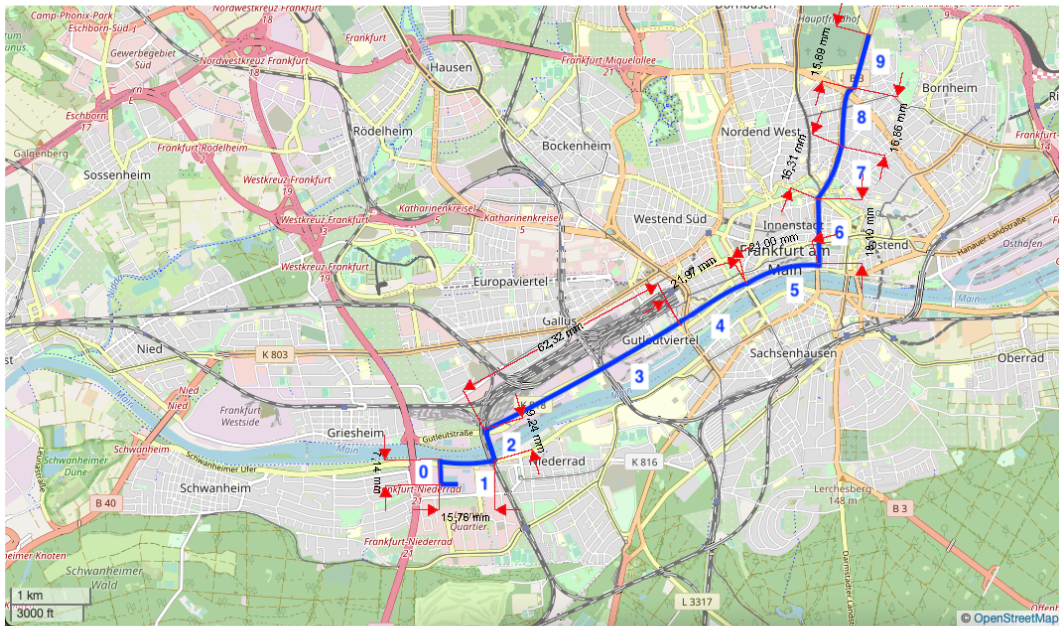


Abbildung 29: Lage der Transportleitung MWA-Günthersburghöfe
Basierend auf OpenStreetMap

Die in der Karte eingezeichneten Abschnitte entsprechen einem Maßstab von rund 1:33 000. Daraus ergeben sich folgende Abschnittslängen:

Tabelle 52: Länge der Transportleitung MWA-Günthersburghöfe

| Abschnitt | Entfernung [m] |
|--------------|------------------|
| 0 | 570,8 |
| 1 | 314,7 |
| 2 | 218,3 |
| 3 | 2715,0 |
| 4 | 910,0 |
| 5 | 859,3 |
| 6 | 819,7 |
| 7 | 756,7 |
| 8 | 665,0 |
| 9 | 579,7 |
| Summe | ca. 8.409 |

Für die Transportleitung (PE-Leitung, DN 300) wurde ein Kostenansatz von 1 500 EUR/ lfd. m angesetzt (Material und Verlegung). Die Investitionen belaufen sich damit auf ca. 12,61 Mio. EUR. Darüber hinaus wurden Kosten für den Betrieb einer Druckerhöhungsanlage berücksichtigt. Bei einer vertretbaren Durchflussgeschwindigkeit von 1,5 m/s beträgt der Auslastungsgrad der Leitung in der Tagesspitze zur Versorgung des

Quartiers ca. 3 %. Daher wurden 3 % der Investitionen der Transportleitung für die Betriebswasserversorgung der Günthersburghöfe zugerechnet, da mit der Leitung potenziell noch weitere Gebiete versorgt werden können.

Tabelle 53: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasserversorgung sowie Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen

| Wasserart | Leitungsort | DN_min | DN_max | spez. Kosten [EUR/m] | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 11.133 | 333.975 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 65 | 100 | 35 | 8.379 | 293.267 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 4.763 | 142.875 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 65 | 100 | 35 | 8.379 | 293.267 |
| Betriebswasser | Anschlussleitung | 50 | 200 | 150 | 2.080 | 312.060 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 15.895 | 556.325 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 8.709 | 740.271 |
| Schmutzwasser | Anschlussleitung | 250 | 350 | 1.000 | 1.750 | 1.750.400 |

Tabelle 54: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in den Günthersburghöfen und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW | Mehrinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
| Total | <u>6.502.840</u> | 4.307 | 2.008 | <u>605.327</u> | 401 | 187 |
| Privat | 2.359.980 | 1.563 | 729 | 293.267 | 194 | 91 |
| Öffentlich | 4.142.860 | 2.744 | 1.279 | 312.060 | 207 | 96 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Daten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in den Günthersburghöfen

Tabelle 55: Spezifische und Gesamt-Betriebskosten für eine semizentrale Wasserwiederverwendungsanlage mit Membran-Bioreaktoren (MBR) für die Günthersburghöfe

| Position | Spezifische Kosten |
|------------------------------|------------------------|
| Trinkwasser/Abfall | 0,00 EUR/(EW*a) |
| Wartung/Reparatur | 5,00 EUR/(EW*a) |
| Chemikalien | 4,50 EUR/(EW*a) |
| Personal | 4,50 EUR/(EW*a) |
| Schlamm Entsorgung | 0,30 EUR/(EW*a) |
| Strom | 6,93 EUR/(EW*a) |
| Gesamt-Betriebskosten | 68.763,97 EUR/a |

Quelle: Verändert auf Basis von Tolksdorf et al. 2019

Tabelle 56: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasserversorgung sowie Grau- und Schmutzwasserbeseitigung in den Günthersburghöfen

| Wasserart | Leitungsort | DN_min | DN_max | spez. Kosten [EUR/m] | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 11.133 | 333.975 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | 8.379 | 293.267 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 4.763 | 142.875 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | 8.379 | 293.267 |
| Betriebswasser | Anschlussleitung | 50 | 200 | 150 | 2.080 | 312.060 |
| Grauwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 4.763 | 166.688 |
| Grauwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 8.709 | 740.271 |
| Grauwasser | Anschlussleitung | 250 | 350 | 300 | 1.750 | 525.120 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 11.133 | 389.638 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 8.709 | 740.271 |

Tabelle 57: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in den Günthersburghöfen und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW | Mehrinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|-------------------|----------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|---------------|
| Total | <u>7.768.231</u> | 5.145 | 2.398 | <u>1.870.718</u> | 1.239 | 578 |
| <i>Privat</i> | 3.100.251 | 2.053 | 957 | 1.033.538 | 684 | 319 |
| <i>Öffentlich</i> | 4.667.980 | 3.091 | 1.441 | 837.180 | 554 | 258 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen

Tabelle 58: Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in den Günthersburghöfen

| Position | Wert | Anmerkung |
|---|-------------|--|
| Investitionen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | 22.000 EUR | gerundet nach KSB 2018 |
| Kalkulatorische Abschreibungen zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | 5,56 % | 18 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Betriebskosten zusätzliche Druckerhöhung Gebäude | 1.150 EUR/a | gerundet nach KSB 2018 |
| Investitionen Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | 3,00 % | anteiliger Auslastungsgrad durch Quartier |
| Kalkulatorische Abschreibungen Transportleitung MWA, anteilig | 2,50 % | 40 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Investitionen Druckerhöhung für Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | 3,00 % | anteiliger Auslastungsgrad durch Quartier |
| Kalkulatorische Abschreibungen Druckerhöhung für Transportleitung MWA, anteilig | 5,56 % | 18 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Betriebskosten MainW-Transport (Strom), anteilig | 0,21 | Strompreis in Cent/kWh |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (größer DN 200) | 3,33 % | 30 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Aufbereitungsanlagen | 5,00 % | 20 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Jährlicher Kalkulationszins | 3,00 % | Durchschnittlicher jährlicher Kalkulationszins bezogen auf Investitionen und durchschnittliche Nutzungsdauer |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 46.100 | m³/a Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung (Trinkwasserpreis: 1,79 EUR (netto)) ohne Zählergebühr |
| Betriebswasser aus MWA (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 46.100 | m³/a Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung (Betriebswasserpreis Ausgang MWA: 0,53 EUR (netto)) ohne Zählergebühr |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 46.100 | m³/a Grauwasseranfall Körperpflege (Abwassergebühr: 1,45 EUR (brutto=netto)) |
| Strompreis [EUR/kWh] | 0,21 | Nettopreis (ohne 19% USt) |
| Wohneinheiten | 1.510 | |
| Einwohner | 3.239 | |

Anhang 6.1.3. Daten der Kostenanalyse für die Heimatsiedlung

Rohrleitungsnetz in der Heimatsiedlung

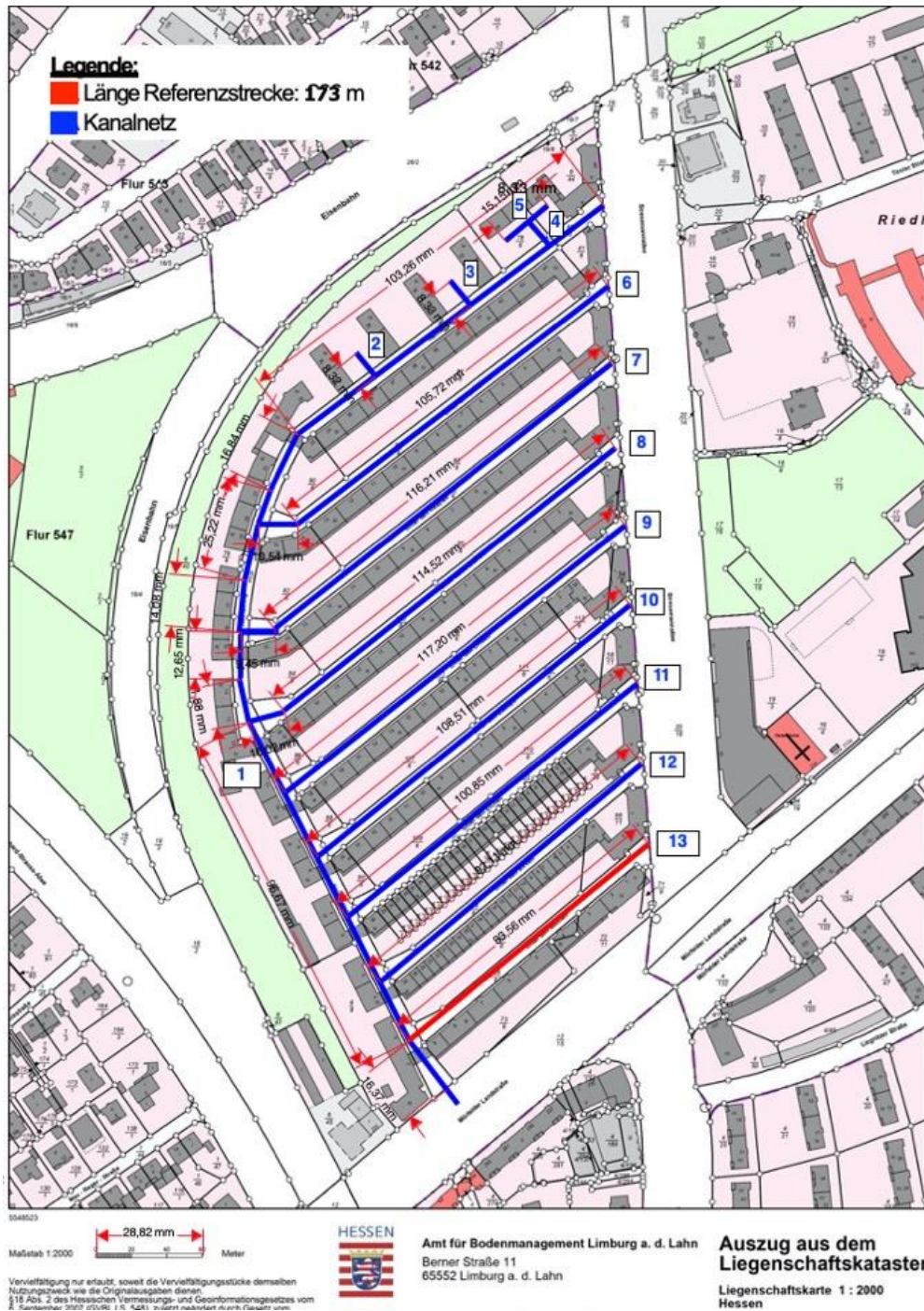


Abbildung 30: Lage der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich (Anschlussleitungen) in der Heimatsiedlung

Eigene Darstellung auf Basis des Auszugs aus dem Liegenschaftskataster; Copyright: Amt für Bodenmanagement Limburg a.d. Lahn

Die in der Karte eingezeichneten Abschnitte entsprechen einem Maßstab von rund 1:2 000. Daraus ergeben sich folgende Abschnittslängen:

Tabelle 59: Länge der Rohrleitungen im öffentlichen Bereich in der Heimatsiedlung

| Index | Straßen | Entfernung [m] |
|--------------|-------------------------|------------------|
| 1 | Heimatring | 617,7 |
| 2 | Zugang Heimatring 25-28 | 17,3 |
| 3 | Zugang Heimatring 29-32 | 17,3 |
| 4 | Zugang Heimatring 42-48 | 17,3 |
| 5 | Zugang Heimatring 40 | 32,2 |
| 6 | Unter den Kastanien | 241,8 |
| 7 | Unter den Akazien | 263,5 |
| 8 | Unter den Platanen | 259,0 |
| 9 | Unter den Linden | 243,8 |
| 10 | Unter den Eschen | 225,7 |
| 11 | Unter den Eichen | 209,7 |
| 12 | Unter den Birken | 191,6 |
| 13 | Unter den Buchen | 173,1 |
| Summe | | ca. 2.510 |

Spezifische Annahmen für die Heimatsiedlung

Tabelle 60: Annahmen für Trink- und Schmutzwasserleitungen in Wohnungen (Gebäudeinstallation) der Heimatsiedlung

| Ort | Trinkwasser- versorgung | Schmutzwasser- entsorgung | Anmerkung |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|---|
| Toilette | 3,0 m | 3,0 m | |
| Dusche/Bad | 6,0 m | 6,0 m | |
| Waschbecken | 0 m | 0 m | Unmittelbar am Ver-/Entsorgungsschacht |
| Küche | 3,0 m | 3,0 m | |
| 2. Toilette | 3,0 m | 3,0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Dusche | 6,0 m | 6,0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Waschbecken | 0 m | 0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| Summe 3–4 Zi.-Whg. | 21,0 m | 21,0 m | |
| Summe 1–2 Zi.-Whg. | 12,0 m | 12,0 m | |

Im Fall der Versorgung mit Betriebswasser (aus Mainwasser oder Grauwasser) entfällt die Trinkwasserleitung für Toiletten, da die Spülung mit Betriebswasser vorgenommen wird. Bei der Grauwasservariante werden Duschen, Badewannen und Waschbecken über Grauwasserleitungen entsorgt.

Tabelle 61: Annahmen für Betriebs- und Grauwasserleitungen in Wohnungen der Heimatsiedlung

| Ort | Betriebswasser- versorgung | Grauwasser- entsorgung | Anmerkung |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| Toilette | 3,0 m | | |
| Dusche/Bad | | 6,0 m | |
| Waschbecken | | 0 m | Unmittelbar am Ver-/ Entsorgungsschacht |
| 2. Dusche | | 6,0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Toilette | 3,0 m | | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| 2. Waschbecken | | 0 m | nur bei 3–4 Zi.-Whg. |
| Summe 3–4 Zi.-Whg. | 6,0 m | 12,0 m | |
| Summe 1–2 Zi.-Whg. | 3,0 m | 6,0 m | |

Daten der Referenzvariante „Konventionelles System“ in der Heimatsiedlung

Tabelle 62: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserbeseitigung in der Heimatsiedlung (außerhalb des öffentlichen Leitungsnetzes)

| Wasserart | Leitungsort | DN_min | DN_max | spez. Kosten [EUR/m] | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|---------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 12.021 | 360.630 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | 4.199 | 146.965 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 12.021 | 420.735 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 5.019 | 426.615 |

Tabelle 63: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz des konventionellen Systems in der Heimatsiedlung

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|------------|---------------------------|--------|--------|
| Total | <u>7.195.065</u> | 7.253 | 3.429 |
| Privat | 1.354.945 | 1.366 | 646 |
| Öffentlich | 5.840.120 | 5.887 | 2.784 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Daten der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in der Heimatsiedlung

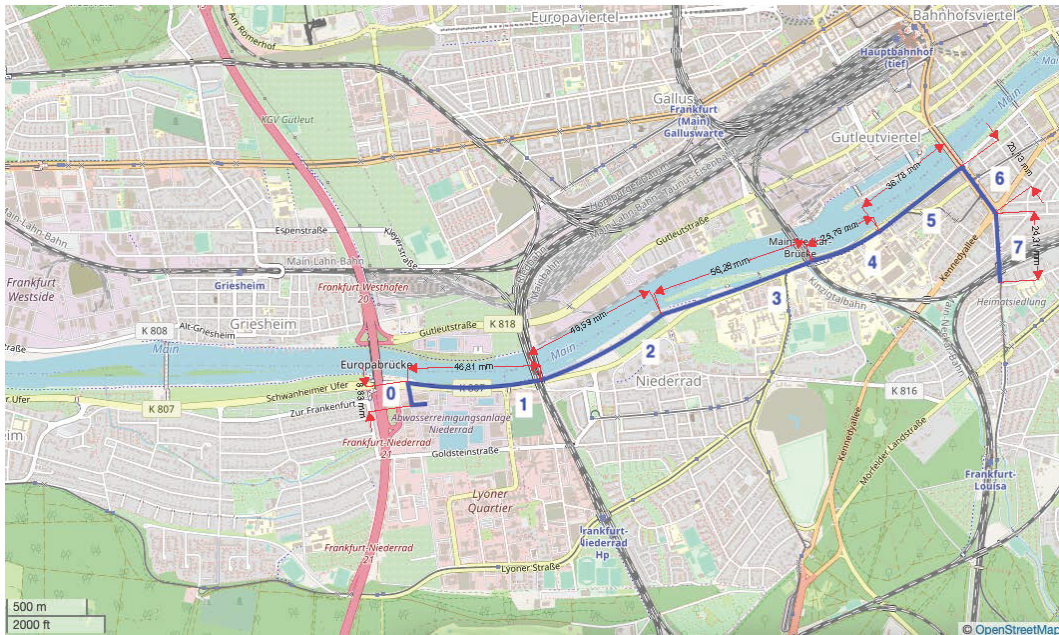


Abbildung 31: Lage der Transportleitung MWA-Heimatsiedlung
Basierend auf OpenStreetMap

Die in der Karte eingezeichneten Abschnitte entsprechen einem Maßstab von rund 1:22 000. Daraus ergeben sich folgende Abschnittslängen:

Tabelle 64: Länge der Transportleitung MWA-Heimatsiedlung

| Abschnitt | Entfernung [m] |
|--------------|------------------|
| 0 | 570,8 |
| 1 | 324,3 |
| 2 | 911,1 |
| 3 | 946,7 |
| 4 | 431,2 |
| 5 | 669,8 |
| 6 | 323,2 |
| 7 | 421,1 |
| Summe | ca. 4.598 |

Für die Transportleitung (PE-Leitung, DN 300) wurde ein Kostenansatz von 1 500 EUR/ lfd. m angesetzt (Material und Verlegung). Die Investitionen belaufen sich damit auf ca. 6,90 Mio. EUR. Darüber hinaus wurden Kosten für den Betrieb einer Druckerhöhungsanlage berücksichtigt. Es werden 2 % der Investitionen der Transportleitung für die Betriebswasserversorgung der Heimatsiedlung zugerechnet, da mit der Leitung potenziell noch weitere Gebiete versorgt werden können.

Tabelle 65: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasserversorgung sowie Schmutzwasserbeseitigung in der Heimatsiedlung

| Wasserart | Leitungsort | DN_min | DN_max | spez. Kosten [EUR/m] | Aufschlag | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------|-----------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | | 9.006 | 270.180 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 65 | 100 | 35 | | 4.199 | 146.965 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 50 % | 3.015 | 135.675 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 65 | 100 | 35 | 50 % | 4.199 | 220.448 |
| Betriebswasser | Anschlussleitung | 50 | 200 | 1.000 | | 3.330 | 3.330.060 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | | 12.021 | 420.735 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | | 5.019 | 426.615 |

Tabelle 66: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ in der Heimatsiedlung und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW | Mehrinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
| Total | <u>10.790.798</u> | 10.878 | 5.143 | <u>3.595.733</u> | 3.625 | 1.714 |
| Privat | 1.620.618 | 1.634 | 772 | 265.673 | 268 | 127 |
| Öffentlich | 9.170.180 | 9.244 | 4.371 | 3.330.060 | 3.357 | 1.587 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Daten der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in der Heimatsiedlung

Tabelle 67: Spezifische und Gesamt-Betriebskosten für eine semizentrale Wasserwiederverwendungsanlage mit Membran-Bioreaktoren (MBR) für die Heimatsiedlung

| Position | Spezifische Kosten |
|------------------------------|-------------------------------|
| Trinkwasser/Abfall | 0,00 EUR/(EW*a) |
| Wartung/Reparatur | 5,00 EUR/(EW*a) |
| Chemikalien | 4,50 EUR/(EW*a) |
| Personal | 4,50 EUR/(EW*a) |
| Schlamm Entsorgung | 0,30 EUR/(EW*a) |
| Strom | 6,93 EUR/(EW*a) |
| Gesamt-Betriebskosten | <u>44.540,54 EUR/a</u> |

Verändert auf Basis von Tolksdorf et al. 2019

Tabelle 68: Länge und Investitionen des Rohrleitungsnetzes für Trink- und Betriebswasser-versorgung sowie Grau- und Schmutzwasserbeseitigung in der Heimsiedlung

| Wasserart | Leitungsort | DN_min | DN_max | spez. Kosten [EUR/m] | Aufschlag | Länge [m] | Investitionen [EUR] |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------|-----------|-----------|---------------------|
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | | 9.006 | 270.180 |
| Trinkwasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | | 4.199 | 146.965 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 15 | 40 | 30 | 50 % | 3.015 | 135.675 |
| Betriebswasser | Gebäudeinstallation Steigleitung | 50 | 150 | 35 | 50 % | 4.199 | 220.448 |
| Betriebswasser | Anschlussleitung | 50 | 200 | 150 | | 3.330 | 3.330.060 |
| Grauwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | 50 % | 6.030 | 316.575 |
| Grauwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | 50 % | 5.019 | 639.923 |
| Grauwasser | Anschlussleitung | 250 | 350 | 1.000 | | 2.510 | 753.018 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Wohnung | 50 | 150 | 35 | | 5.991 | 209.685 |
| Schmutzwasser | Gebäudeinstallation Fallrohr | 150 | 250 | 85 | | 5.019 | 426.615 |

Tabelle 69: Gesamtinvestitionen für das Rohrleitungsnetz der Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ in der Heimsiedlung und Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzsystem

| | Gesamtinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW | Mehrinvestitionen [EUR] | pro WE | pro EW |
|------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
| Total | <u>12.289.263</u> | 12.388 | 5.858 | <u>5.094.198</u> | 5.135 | 2.428 |
| Privat | 2.366.065 | 2.385 | 1.128 | 1.011.120 | 1.019 | 482 |
| Öffentlich | 9.923.198 | 10.003 | 4.730 | 4.083.078 | 4.116 | 1.946 |

WE=Wohneinheit; EW=Einwohner

Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in der Heimatsiedlung

Tabelle 70: Parameter und Daten des Jahreskostenvergleichs der betrachteten Varianten in der Heimatsiedlung

| Position | Wert | Anmerkung |
|---|--------|---|
| Investitionen Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | 2,00 % | anteiliger Auslastungsgrad durch Quartier |
| Kalkulatorische Abschreibungen Transportleitung MWA, anteilig | 2,50 % | 40 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Investitionen Druckerhöhung für Transportleitung MWA (BetrW), anteilig | 2,00 % | anteiliger Auslastungsgrad durch Quartier |
| Kalkulatorische Abschreibungen Druckerhöhung für Transportleitung MWA, anteilig | 5,56 % | 18 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Betriebskosten MainW-Transport (Strom), anteilig | 0,21 | Strompreis in Cent/kWh |
| Kalkulatorische Abschreibungen Gebäudeinstallationen | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (bis einschl. DN 200) | 2,00 % | 50 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Anschlussleitungen (größer DN 200) | 3,33 % | 30 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Kalkulatorische Abschreibungen Aufbereitungsanlagen | 5,00 % | 20 Jahre durchschnittliche Nutzungsdauer (vgl. AfA-Tabelle) |
| Jährlicher Kalkulationszins | 3,00 % | Durchschnittlicher jährlicher Kalkulationszins bezogen auf Investitionen und durchschnittliche Nutzungsdauern |
| Trinkwasser (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 29.900 | m ³ /a Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung (Trinkwasserpreis: 1,79 EUR (netto)) ohne Zählergebühr |
| Betriebswasser aus MWA (für Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 29.900 | m ³ /a Wasserbedarf Toilette+Reinigung/Bewässerung (Betriebswasserpreis Ausgang MWA: 0,53 EUR (netto)) ohne Zählergebühr |
| Abwasser (aus Toilette+Reinigung/Bewässerung) | 29.900 | m ³ /a Grauwasseranfall Körperpflege (Abwassergebühr: 1,45 EUR (brutto=netto)) |
| Strompreis [EUR/kWh] | 0,21 | Nettopreis (ohne 19 % USt) |
| Wohneinheiten | 992 | |
| Einwohner | 2.098 | |

Anhang 6.1.4. Sozioökonomische Analyse

Tabelle 71: Matrix der möglichen und wahrscheinlichen Umlagenstrukturen

| | Mainwasser | Grauwasser (öffentl.) | Grauwasser (privater Betr.) |
|--|---|-----------------------|--|
| Umlage der anfallenden Kosten | • Evtl. Mischkalkulation mit Trinkwasser | • | • |
| Kostenumlage nach Grund- und Arbeitspreis | • Wasseruhren obligatorisch | ? | ? |
| Flatrate für alle Nebenkosten (=Pauschalmiete) | ? | ? | • Insbesondere bei Energiegewinnung |

Annahmen für die Umlagenrechnungen Günthersburghöfe

- Durchschnittsverbrauch für jede Person (für Kleinkind $\frac{1}{2}$ Verbrauch)
- Jeweils 90m²-Wohnung
- Tarif für Betriebswasser aus Mainwasser 1,11 €/m³
- Kosten Wasserzähler 60 €/a, Montage 60 €/a, Austausch 5 a
- Pauschalmiete 18 €/m (2014 für das ABG Aktiv-Stadthaus Pauschalmiete von 13 €/m)
- Bei der flächenbezogenen Umlage wird der Verbrauch eines 3-Personenhaushalts als durchschnittlich für alle Wohnungen angenommen.

Tabelle 72: Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren: Betriebswasser aus Mainwasser Günthersburghöfe

| Umlagemodelle | 3-Personenhaushalt (Mittelschicht, 1 Kleinkind) | 5-Personenhaushalt (Sozialhilfe) |
|---------------------------|---|----------------------------------|
| verbrauchsbezogene Umlage | 298,92 €/a = 24,91 €/m | 477,85 €/a = 39,82 €/m |
| davon Trinkwasser | 138,41 €/a = 11,53 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 40,52 €/a = 3,38 €/m | 81,03 €/a = 6,75 €/m |
| Kosten Wasseruhr | 120,00 €/a = 10,00 €/m | 120,00 €/a = 10,00 €/m |
| personenbezogene Umlage | 403,65 €/a = 33,64 €/m | 672,75 €/a = 56,06 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 48,62 €/a = 4,05 €/m | 81,03 €/a = 6,75 €/m |
| davon Abwasser | 188,94 €/a = 15,75 €/m | 314,90 €/a = 26,24 €/m |
| flächenbezogene Umlage | 403,65 €/a = 33,64 €/m | 403,65 €/a = 33,64 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 166,09 €/a = 13,84 €/m |
| davon Betriebswasser | 48,62 €/a = 4,05 €/m | 48,62 €/a = 4,05 €/m |
| davon Abwasser | 188,94 €/a = 15,75 €/m | 188,94 €/a = 15,75 €/m |
| Pauschalmiete | 19.440,00 €/a = 1.620,00 €/m | 19.440,00 €/a = 1.620,00 €/m |

Tabelle 73: Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren:
Betriebswasser aus Grauwasser Günthersburghöfe

| Umlagemodelle | 3-Personenhaushalt (Mittelschicht, 1 Kleinkind) | 5-Personenhaushalt (Sozialhilfe) |
|---------------------------|--|-------------------------------------|
| verbrauchsbezogene Umlage | 321,55 €/a = 26,80 €/m | 523,11 €/a = 43,59 €/m |
| davon Trinkwasser | 138,41 €/a = 11,53 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 63,15 €/a = 5,26 €/m | 126,29 €/a = 10,52 €/m |
| Kosten Wasseruhr | 120,00 €/a = 10,00 €/m | 120,00 €/a = 10,00 €/m |
| personenbezogene Umlage | 343,48 €/a = 28,62 €/m | 572,47 €/a = 47,71 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 75,77 €/a = 6,31 €/m | 126,29 €/a = 10,52 €/m |
| davon Abwasser | 101,62 €/a = 8,47 €/m | 169,36 €/a = 14,11 €/m |
| flächenbezogene Umlage | 343,48 €/a = 28,62 €/m | 343,48 €/a = 28,62 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 166,09 €/a = 13,84 €/m |
| davon Betriebswasser | 75,77 €/a = 6,31 €/m | 75,77 €/a = 6,31 €/m |
| davon Abwasser | 101,62 €/a = 8,47 €/m | 101,62 €/a = 8,47 €/m |
| Pauschalmiete | 19.440,00 €/a = 1.620,00 €/m | 19.440,00 €/a = 1.620,00 €/m |

Annahmen für die Umlagenrechnungen Heimsiedlung

- Durchschnittsverbrauch für jede Person (für Kleinkind $\frac{1}{2}$ Verbrauch)
- Jeweils 80 m²-Wohnung
- Tarif für Betriebswasser aus Mainwasser 0,87 €/m³
- Kosten Wasserzähler 60 €/a, Montage 60 €/a, Austausch 5 a
- Pauschalmiete 18 €/m (2014 für das ABG Aktiv-Stadthaus Pauschalmiete von 13 €/m)
- Bei der flächenbezogenen Umlage wird der Verbrauch eines 3-Personenhaushalts als durchschnittlich für alle Wohnungen angenommen.

Tabelle 74: Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren:
Betriebswasser aus Mainwasser Heimatsiedlung

| Umlagemodelle | 3-Personenhaushalt (Mittelschicht, 1 Kleinkind) | 5-Personenhaushalt (Sozialhilfe) |
|---------------------------|--|---|
| verbrauchsbezogene Umlage | 290,16 €/a = 24,18 €/m | 460,33 €/a = 38,36 €/m |
| davon Trinkwasser | 138,41 €/a = 11,53 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 31,76 €/a = 2,65 €/m | 63,51 €/a = 5,29 €/m |
| Kosten Wasseruhr | 120,00 €/a = 10,00 €/m | 120,00 €/a = 10,00 €/m |
| personenbezogene Umlage | 393,14 €/a = 32,76 €/m | 655,23 €/a = 54,60 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 38,11 €/a = 3,18 €/m | 63,51 €/a = 5,29 €/m |
| davon Abwasser | 188,94 €/a = 15,75 €/m | 314,90 €/a = 26,24 €/m |
| flächenbezogene Umlage | 393,14 €/a = 32,76 €/m | 393,14 €/a = 32,76 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 166,09 €/a = 13,84 €/m |
| davon Betriebswasser | 38,11 €/a = 3,18 €/m | 38,11 €/a = 3,18 €/m |
| davon Abwasser | 188,94 €/a = 15,75 €/m | 188,94 €/a = 15,75 €/m |
| Pauschalmiete | 17.280,00 €/a = 1.440,00 €/m | 17.280,00 €/a = 1.440,00 €/m |

Tabelle 75: Sozio-ökonomische Auswirkungen der Substitution in den Quartieren:
Betriebswasser aus Grauwasser Heimatsiedlung

| Umlagemodelle | 3-Personenhaushalt (Mittelschicht, 1 Kleinkind) | 5-Personenhaushalt (Sozialhilfe) |
|---------------------------|--|---|
| verbrauchsbezogene Umlage | 321,55 €/a = 26,80 €/m | 523,11 €/a = 43,59 €/m |
| davon Trinkwasser | 138,41 €/a = 11,53 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 63,15 €/a = 5,26 €/m | 126,29 €/a = 10,52 €/m |
| Kosten Wasseruhr | 120,00 €/a = 10,00 €/m | 120,00 €/a = 10,00 €/m |
| personenbezogene Umlage | 343,48 €/a = 28,62 €/m | 572,47 €/a = 47,71 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 276,82 €/a = 23,07 €/m |
| davon Betriebswasser | 75,77 €/a = 6,31 €/m | 126,29 €/a = 10,52 €/m |
| davon Abwasser | 101,62 €/a = 8,47 €/m | 169,36 €/a = 14,11 €/m |
| flächenbezogene Umlage | 343,48 €/a = 28,62 €/m | 343,48 €/a = 28,62 €/m |
| davon Trinkwasser | 166,09 €/a = 13,84 €/m | 166,09 €/a = 13,84 €/m |
| davon Betriebswasser | 75,77 €/a = 6,31 €/m | 75,77 €/a = 6,31 €/m |
| davon Abwasser | 101,62 €/a = 8,47 €/m | 101,62 €/a = 8,47 €/m |
| Pauschalmiete | 17.280,00 €/a = 1.440,00 €/m | 17.280,00 €/a = 1.440,00 €/m |

Anhang 6.2. Definitionen und Eingabedaten für den CO₂-Fußabdruck

Anhang 6.2.1. Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

Dieser Abschnitt definiert Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz, aufbauend auf den Kategorien der ISO 14040/44 (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006).

Ziel der Studie

Das Ziel dieser Ökobilanz ist die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks verschiedener Varianten zur Deckung des Wasserbedarfs in zwei ausgewählten Stadtquartieren in Frankfurt am Main für Toilettenspülung und Reinigung/Bewässerung. Als Fallstudien werden ein Bestandsgebiet (Heimatsiedlung) und ein Neubaugebiet (Günthersburghöfe) analysiert. Dabei wird eine Referenzvariante (Versorgung über das bestehende Trinkwassernetz) mit zwei Varianten der Betriebswasserversorgung (Betriebswasser aus Mainwasseraufbereitung bzw. lokaler Wiedernutzung von Grauwasser) verglichen. Zielhorizont für die Studie ist das Jahr 2030.

Zielgruppe der Studie sind neben dem Auftraggeber und Wasserversorger Hessenwasser auch die politischen und gesellschaftlichen Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit. Die Studie bildet eine Grundlage für die Planungen der Wasserversorgung in Frankfurt am Main in den nächsten Jahrzehnten.

Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion der betrachteten Systeme ist die „Versorgung der Bewohner der Stadtquartiere mit Wasser für Toilettenspülung und Reinigung/Bewässerung“. Die Funktion beinhaltet die Aufbereitung und Verteilung von Wasser und die Bereitstellung in den Haushalten des Stadtquartiers mit dem erforderlichen Mindestdruck. Die Qualitätsanforderungen für das aufbereitete Wasser orientieren sich dabei mindestens an den Anforderungen für Betriebswasser (SenS 2007).

Entsprechend ist die funktionelle Einheit der Bilanzierung „pro m³ Wasser [1/m³]“. Alle direkten und indirekten Aufwendungen werden für alle Varianten auf diese Einheit bezogen. Im Neubaugebiet werden 3238 Einwohner mit 46 100 m³ pro Jahr versorgt, im Bestandsgebiet 2098 Einwohner mit 29 900 m³ pro Jahr.

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der betrachteten Varianten umfassen die Förderung und Aufbereitung des Wassers sowie die Verteilung zum Endkunden. Dabei werden insbesondere folgende Prozesse und Systeme bilanziert (Abbildung 32):

- Förderung und Aufbereitung von Rohwasser zur Trinkwasserversorgung: Aufwendungen für Aufbereitung (Strom, Wärme, Betriebsmittel, Abfälle) und Verteilung (Strom für Pumpen)
- Förderung und Aufbereitung von Mainwasser zur Betriebswasserversorgung: Aufwendungen für Aufbereitung (Strom, Wärme, Betriebsmittel, Abfälle) und Verteilung (Strom für Pumpen), inkl. Materialaufwendungen für die benötigte Infrastruktur (Zuleitung zum Stadtgebiet, lokales Verteilnetz bis zum Verbraucher)

- Sammlung und lokale Aufbereitung von leicht verschmutztem Grauwasser (Bad und Dusche) zur Betriebswasserversorgung: Aufwendungen für Sammlung, Aufbereitung (Strom, Betriebsmittel, Abfälle) und Verteilung (Strom für Pumpen), inkl. Materialaufwendungen für die benötigte Infrastruktur (Netz zur Grauwassersammlung, Speicher und Aufbereitung, lokales Verteilnetz bis zum Verbraucher)
- Gutschrift für vermiedene Aufwendungen der Behandlung von Grauwasser in der Kläranlage: Transport zur Kläranlage (Strom für Pumpen), Betriebsmittel auf der Kläranlage (Strom, Betriebsmittel, Abfälle)

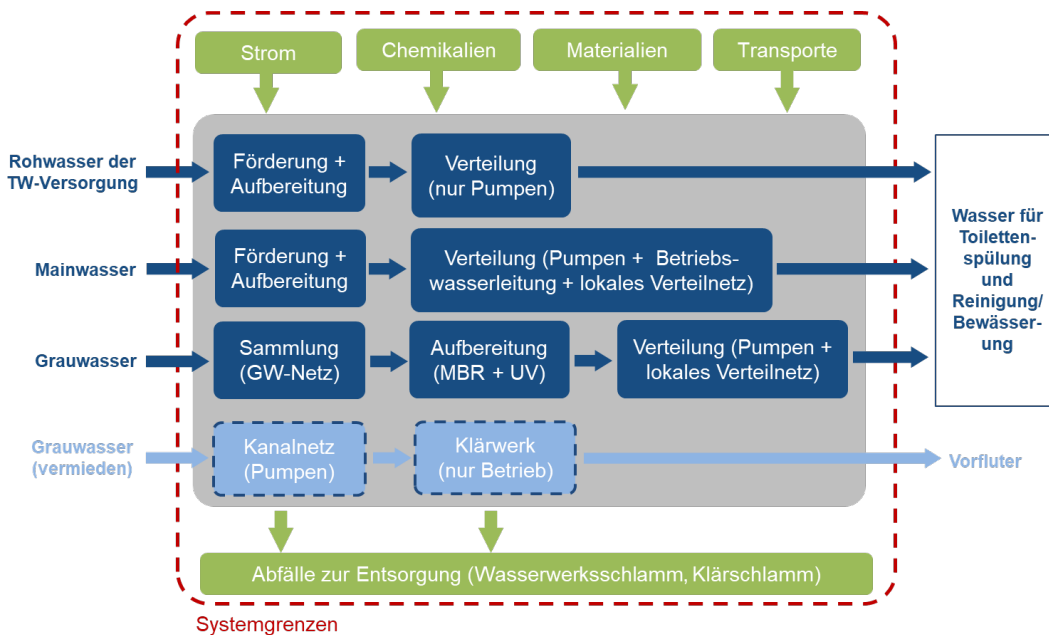


Abbildung 32: Systemgrenzen der Bilanzierung für den CO₂-Fußabdruck

TW: Trinkwasser, GW: Grauwasser, MBR: Membranbioreaktor

In der Bilanz nicht enthalten sind die Infrastruktur für die Trinkwasserversorgung (Anlagen, Verteilnetz) und die Mainwasseraufbereitung (Anlagen). Es wird davon ausgegangen, dass die vorhandene Infrastruktur genutzt wird (Bestandsgebiet) bzw. in allen Varianten die gleiche Infrastruktur für die Trinkwasserversorgung benötigt wird (Neubaugebiet). Einsparungen im Trinkwassernetz des Neubaugebiets (= nicht benötigte Leitungen zur Toilette) werden den Varianten gutgeschrieben, in dem der vermiedene Materialeinsatz vom Aufwand abgezogen wird.

Betrachtete Varianten

Die Betrachtung erfolgt für zwei Fallstudien: ein Bestandsgebiet (Heimatsiedlung mit 2098 Einwohnern) und ein Neubaugebiet (Günthersburghöfe mit 3238 Einwohnern). Für das Bestandsgebiet wird nach den Wasserbilanzen der Studie eine Jahreswassermenge von 29 900 m³ angerechnet, für das Neubaugebiet eine Jahreswassermenge von 46 100 m³.

Für beide Fallstudien werden drei Varianten dargestellt (Tabelle 76):

1. **Versorgung mit Trinkwasser (Referenzvariante):** diese Variante bildet den bestehenden Zustand ab und bilanziert die Aufwendungen für die Versorgung mit Trinkwasser basierend auf den Betriebsdaten der Wasserversorgung in 2018. Für das Bilanzmodell hat der Versorger für diese Variante die Wasserwerke Goldstein, Hinkelstein und die Einspeisung von Trinkwasser aus dem Hessischen Ried („Riedwasser“) vorgegeben. Die Bilanz beschränkt sich auf die betrieblichen Aufwendungen der Trinkwasseraufbereitung und -verteilung.
2. **Versorgung mit Betriebswasser aus Mainwasser:** diese Variante umfasst die Aufbereitung von Mainwasser in der bestehenden Mainwasseraufbereitungsanlage (MWA) Niederrad, die Lieferung des Betriebswassers bis zum Stadtgebiet über eine neue Betriebswasserleitung sowie die Verteilung des Betriebswassers im Gebiet. Die betrieblichen Aufwendungen der MWA Niederrad basieren auf den Betriebsdaten 2018. Es wird angenommen, dass der Betrieb der MWA Niederrad für diese Variante unverändert bleibt (gleicher Aufbereitungsprozess). Die neu zu errichtende Infrastruktur aus Betriebswasserleitung und lokalem Verteilnetz wird anhand der Planungsdaten des ISOE (vgl. Kapitel 5.1 und 6.1) bilanziert.
3. **Versorgung mit Betriebswasser aus Grauwasser:** diese Variante beschreibt die lokale Sammlung und Aufbereitung von leicht verschmutztem Grauwasser aus Haushalten (Bad, Dusche) und die Verteilung als Betriebswasser. Die benötigte Infrastruktur für Grauwassersammlung, Speicherung, Aufbereitung und Verteilung wird anhand der Planungsdaten des ISOE (vgl. Kapitel 5.1 und 6.1) bilanziert. Für die Aufbereitung wird eine Behandlung in einem Membranbioreaktor (MBR) und eine anschließende Desinfektion über UV angesetzt. Betriebliche Aufwendungen für diese Behandlung werden aus der Literatur abgeschätzt. Die vermiedene Ableitung und Behandlung des Grauwassers im Abwassersystem wird anhand von Betriebsdaten des Klärwerks Niederrad der Stadtentwässerung Frankfurt bilanziert und der Variante gutgeschrieben.

Tabelle 76: Varianten für die Bilanzierung des CO₂-Fußabdrucks für das Bestandsgebiet (Heimatsiedlung, 29 900 m³/a) und das Neubaugebiet (Günthersburghöfe, 46 100 m³/a)

| Varianten | Beschreibung | Bilanzmodell | Datenherkunft |
|----------------------------------|---|---|--|
| Referenz: Trinkwasser | Versorgung mit Trinkwasser | WW Goldstein/Hinkelstein, Riedwasser, nur Betrieb | Hessenwasser (2018) |
| Betriebswasser aus Mainwasser | Versorgung mit Betriebswasser aus Mainwasser | MWA Niederrad, Betriebswasserleitung, Verteilnetz im Gebiet | Hessenwasser (2018), Planungsdaten ISOE (Netze) |
| Betriebswasser aus Grauwasser | Versorgung mit Betriebswasser aus Grauwasserrecycling | Sammelnetz Grauwasser, Aufbereitung (MBR + UV), Verteilung, Einsparungen im Abwassersystem | Planungsdaten ISOE (Netze), Literatur (MBR+UV), Daten der SEF |

Datenqualität

Die Datenqualität für die Beschreibung der betrachteten Systeme ist überwiegend mittel bis hoch einzuschätzen (Tabelle 77). Im Fall der Versorgung mit Betriebswasser (Mainwasser oder Grauwasser) entfällt die Trinkwasserleitung für Toiletten, da die Spülung mit Betriebswasser vorgenommen wird. Bei der Grauwasservariante werden Duschen, Badewannen und Waschbecken über Grauwasserleitungen entsorgt

Tabelle 77: Datenqualität für den CO₂-Fußabdruck

| Prozess | Beschreibung | Datenherkunft | Datenqualität |
|---------------------------------------|---|--|---------------|
| WW Goldstein, Hinkelstein, Riedwasser | Betriebsdaten 2018 für Strom, Wärme, Chemikalien, Abfälle | Hessenwasser | hoch |
| Trinkwasserverteilung | Betriebsdaten 2018 für Strom, Wärme, Chemikalien | Hessenwasser | hoch |
| MWA Niederrad | Betriebsdaten 2018 für Strom, Wärme, Chemikalien, Abfälle | Hessenwasser | hoch |
| Betriebswasserleitung | Materialverbrauch der Leitung, Strom für Pumpen | ISOE (Planung) | mittel |
| Betriebswassernetz | Materialverbrauch für Betriebswassernetz (lokal) | ISOE (Planung) | mittel |
| Grauwasseraufbereitung und Speicher | Strom und Abfälle für MBR + UV, Material für Infrastruktur | IWAR Darmstadt (Anlage in China), Infrastruktur: Schätzung KWB | mittel |
| Grauwassersammelnetz und Speicher | Materialverbrauch für Sammelnetz + Speicher (Lokal) | ISOE (Planung) | mittel |
| Kanalnetz und Klärwerk | Betriebsdaten für Strom, Chemikalien, Abfälle | Strom: SEF, Chemikalien und Abwasserpumpwerk: Schätzung KWB | mittel-hoch |
| Hintergrundprozesse | Bereitstellung von Strom, Wärme, Chemikalien, Entsorgung von Abfällen | Strommix: Hessenwasser, Datenbank Ecoinvent (v3.4) | hoch |

Die Betriebsdaten der bestehenden Anlagen zur Wasseraufbereitung und Verteilung beruhen auf den Angaben des Betreibers und erfassen damit den tatsächlichen Aufwand sehr gut. Die Planungsdaten des ISOE zu den Netzen für die Wasserverteilung bzw. Grauwassersammlung wurden pro Gebiet über geografische Daten (Lage des Gebiets, Bebauungsplan) und Gebäudecharakteristika (u. a. Stockwerke, Grundrisse der Wohneinheiten) erstellt und in der Projektgruppe validiert, stellen aber nur eine Abschätzung der tatsächlich notwendigen Leitungsnetze dar. Die Betriebsdaten zur Speicherung und Aufbereitung des Grauwassers wurden aus der Literatur übernommen und beschreiben eine gut untersuchte Anlage ähnlicher Größenordnung (10 000 Einwohner) im chinesischen Qingdao. Die Infrastruktur der Grauwasseraufbereitung wurde anhand bestehender Studien durch KWB abgeschätzt. Die betrieblichen Aufwendungen des

Klärwerks beruhen auf Daten der Stadtentwässerung Frankfurt (Stromverbrauch, Energiebilanz Verbrennung) und sind ergänzt durch Abschätzungen des KWB für weitere Betriebsmittel und Abwasserförderung im Kanalnetz.

Für die Hintergrundprozesse ist primär der verwendete Strommix von Bedeutung, da der Stromverbrauch einen bedeutenden Anteil am CO₂-Fußabdruck der Varianten hat. Hier wurden die Angaben des Betreibers für den eingekauften Strom 2018 verwendet. Für die Produktion eingesetzter Betriebsmittel und Materialien sowie die Entsorgung von Abfällen wurde überwiegend die Ökobilanz-Datenbank ecoinvent in Version 3.4 genutzt (Ecoinvent 2017). Ergänzt wurde diese Datenbank mit verfügbaren detaillierten Modellen des KWB soweit möglich (Kläranlage, Monoverbrennung, Produktion von Aktivkohle).

Indikatorsystem für CO₂-Fußabdruck

Als Indikator für den CO₂-Fußabdruck wird das Treibhauspotenzial nach den Faktoren der IPCC berechnet (IPCC 2014). Neben den hauptsächlich relevanten Treibhausgasen CO₂, N₂O und CH₄ werden dadurch auch andere Treibhausgase aus den Hintergrundprozessen bewertet. Die Faktoren beziehen sich auf den Indikator Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential (GWP)) und berücksichtigen einen Zeithorizont von 100 Jahren für die Wirkung („GWP 100a“).

Die Bilanzierung der betrachteten Varianten erfolgte mit der Ökobilanz-Software UMBERTO® LCA+ (IFU 2018). Dabei wurden für alle Varianten Stoffflussmodelle aufgestellt und entsprechend der Eingabedaten die Materialflüsse pro Jahr erfasst und ausgewertet.

Anhang 6.2.2. Eingabedaten für die Bilanzierung

Alle relevanten Eingabedaten der Bilanzierung für alle betrachteten Varianten werden im Folgenden aufgeführt, aufgegliedert nach Stromverbrauch, Verbrauch von Betriebsmitteln und Entsorgung von Abfällen, Aufwendungen für die Infrastruktur, und verwendeten Datensätzen für die Hintergrundprozesse.

Stromverbrauch

Zentral für die Bewertung der Varianten hinsichtlich ihres CO₂-Fußabdrucks ist der Stromverbrauch der Wasseraufbereitung und -verteilung (Tabelle 78). Für die Referenzvariante der Trinkwasseraufbereitung ergibt sich insgesamt ein Stromverbrauch von 0,628 kWh/m³ Wasser. Davon entfallen 24 % auf das Wasserwerk Goldstein (inkl. vorgeschalteter Infiltration von Mainwasser der MWA Niederrad), 30 % auf das Wasserwerk Hinkelstein (inkl. Infiltration der MWA Niederrad), 9 % auf das eingespeiste Wasser aus dem Hessischen Ried (Wasserwerk Allmendsfeld inkl. vorgeschalteter Infiltration aus dem Wasserwerk Biebesheim und Transport über die Druckerhöhungsanlage Haßloch), und 37 % auf die Verteilung nach Frankfurt am Main über den Wasserbehälter Sachsenhausen.

Tabelle 78: Stromverbrauch der bilanzierten Prozesse

| Prozess | Geförderte Wassermengen [m³/m³ Produkt] | Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m³] | Bemerkungen |
|-----------------------|---|--------------------------------------|--|
| Trinkwasser | 1 | 0,628 | Gesamtverbrauch |
| <i>Aufbereitung</i> | | | |
| WW Goldstein | 0,401 | 0,293 | |
| + MWA Niederrad | 0,115 | 0,303 | Infiltrationsanteil für WW Goldstein |
| WW Hinkelstein | 0,523 | 0,318 | |
| + MWA Niederrad | 0,067 | 0,303 | Infiltrationsanteil für WW Hinkelstein |
| WW Allmendsfeld | 0,076 | 0,291 | Einspeisung als „Riedwasser“ |
| + WW Biebesheim | 0,037 | 0,271 | Infiltrationsanteil für WW Allmendsfeld |
| <i>Verteilung</i> | | | |
| DEA Haßloch | 0,076 | 0,313 | Transport vom WW Allmendsfeld für „Riedwasser“ |
| WBH Sachsenhausen | 1 | 0,233 | Transport nach Frankfurt am Main |
| Betriebswasser | 1 | 0,744 | Gesamtverbrauch Günthersburghöfe |
| | 1 | 0,489 | Gesamtverbrauch Heimatsiedlung |
| <i>Aufbereitung</i> | | | |
| MWA Niederrad | 1 | 0,303 | |
| <i>Verteilung</i> | | | |
| Günthersburghöfe | 1 | 0,441 | MWA-Transportleitung mit 0,328 kWh/m³ nach Hessenwasser, dazu Druckerhöhungs-anlage vor Ort (+2bar) mit 0,113 kWh/m³ |
| Heimatsiedlung | 1 | 0,186 | MWA-Transportleitung mit 0,186 kWh/m³ nach Hessenwasser, keine Druckerhöhungs-anlage vor Ort erforderlich |
| Grauwasser | 1 | 1,1 | Gesamtverbrauch |
| Sammlung | 1 | 0 | Schwerkraftsammler |
| Aufbereitung | 1 | 1,0 | Membranbioreaktor und UV-Desinfektion nach (Kocks Consult GmbH 2018) |
| Verteilung | 1 | 0,2 | Schätzung KWB (3,5 bar) |
| Abwasser | 1 | 0,45 | Gesamtverbrauch für Einsparungen im Grauwasser-Szenario |
| Kanalnetz | 1 | 0,15 | KWB-Schätzung für Abwasserpumpwerk |
| Klärwerk | 1 | 0,3 | Nach (Theilen & Eichenauer 2016), umgerechnet für Grauwasserqualität |

Für die Betriebswasserversorgung aus Mainwasser setzt sich der Stromverbrauch aus der Aufbereitung in der MWA Niederrad ($0,303 \text{ kWh/m}^3$), der Transportleitung zum Gebiet (Angaben Hessenwasser) und einer ggf. erforderlichen Druckerhöhungsanlage vor Ort zusammen. Die Transportleitung zu den Günthersburghöfen wird mit $0,328 \text{ kWh/m}^3$ angesetzt (großer Höhenunterschied zwischen MWA und Versorgungsgebiet: 50m), die lokale Druckerhöhungsanlage auf $0,113 \text{ kWh/m}^3$ (Zusatzdruck von +2 bar erforderlich). Somit ergibt sich für die Versorgung dieses Gebiets ein Gesamtstromverbrauch von $0,744 \text{ kWh/m}^3$ für diese Variante. Für die Heimatsiedlung wird aufgrund des geringeren Höhenunterschieds zur MWA (5m) für die Transportleitung ein Stromverbrauch von $0,186 \text{ kWh/m}^3$ angesetzt. Da eine lokale Druckerhöhung hier nicht erforderlich ist, ergibt sich für die Heimatsiedlung ein Gesamtstromverbrauch von $0,489 \text{ kWh/m}^3$.

Für die Sammlung und Aufbereitung von Grauwasser fällt ein Stromverbrauch von $1,1 \text{ kWh/m}^3$ an. Während die Sammlung des Grauwassers per Schwerekraftsystem erfolgt und daher ohne Stromverbrauch auskommt, ist die Aufbereitung im Membranbioreaktor mit anschließender UV-Desinfektion relativ energieaufwändig. Die vorhandenen realen Daten aus einer großtechnischen Umsetzung in China (Qingdao) zeigen einen noch deutlich höheren Stromverbrauch der Anlage, der allerdings auf Unterauslastung und technische Besonderheiten zurückzuführen ist. Dennoch lässt sich für diese Technologie auch unter optimalen Annahmen ein Stromverbrauch von minimal 1 kWh/m^3 ableiten (Kocks Consult GmbH 2018). Angaben von Herstellern zu Grauwasseraufbereitungsanlagen liegen teilweise noch deutlich höher (z.B. $3,8 \text{ kWh/m}^3$ für Aufbereitung und Verteilung (Huber 2020)), beziehen sich aber meist auf deutlich kleinere Anlagen (z.B. Versorgung eines Hotels). Für die gewählte Technologie und Größenordnung der Anlage ist der in dieser Studie verwendete Stromverbrauch als repräsentativ anzusehen. Die lokale Verteilung des Grauwassers wird mit $0,2 \text{ kWh/m}^3$ abgeschätzt (3,5 bar).

Für die vermiedene Behandlung des Grauwassers im Abwassersystem wird ein Stromverbrauch von $0,45 \text{ kWh/m}^3$ gutgeschrieben, wovon 33 % auf den Abwassertransport und 67 % auf das Klärwerk entfallen.

Betriebsmittel, Wärmeversorgung und Abfälle

Daten zum Verbrauch von Betriebsmitteln, Wärmeversorgung und dem Anfall von Abfällen sind für alle Aufbereitungsanlagen getrennt erfasst (Tabelle 79). Je nach Aufbereitungstechnik werden für die Wasseraufbereitung unterschiedliche Chemikalien genutzt. Auch die Wärmeversorgung der Anlagen erfolgt mit unterschiedlichen Energieträgern. Für die Grauwasseraufbereitung wurden keine weiteren Betriebsmittel angesetzt, wobei ggf. Chemikalien zur periodischen Reinigung der Anlage benötigt werden können. Diese Aufwendungen werden jedoch als gering eingeschätzt und hier vernachlässigt, auch weil keine belastbaren Daten dazu vorlagen. Die Angaben zu anfallenden Abfällen beziehen sich auf die mengenmäßig relevanten Massenströme der Wasserwerksschlämme bzw. des Klärschlammes aus Kläranlage und Grauwasseraufbereitung.

Tabelle 79: Verbrauch an Betriebsmitteln (Chemikalien und Brennstoffe/Wärme) und Anfall von Abfällen

| Betriebsmittel | Einheit | WW Go | WW Hi | WW Al | WW Bi | MWA Ni | DEA Ha | WBH Sa | KW Ni | GW |
|---|---------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----|
| Chemikalien | | | | | | | | | | |
| NaOH (30 %) | g/m ³ | 7,3 | | | | | | | | |
| Poly-Al-Cl (10 % Al) | g/m ³ | 0,05 | 0,13 | 0,003 | | | | | 25 | |
| Polymer (100 %) | g/m ³ | 0,03 | 0,08 | | 0,3 | | | | 1,9 | |
| FeCl ₃ (40 %) | g/m ³ | | | | 65 | | | | | |
| Dolomit (100 %) | g/m ³ | | 70 | | | | | | | |
| Ca(OH) ₂ (100 %) | g/m ³ | | | | 7,6 | | | | | |
| KMnO ₄ (100 %) | g/m ³ | | | | | 0,02 | | | | |
| Al ₂ (SO ₄) ₃ (16 % Al) | g/m ³ | | | | | 41 | | | | |
| H ₂ SO ₄ (50 %) | g/m ³ | | | | | 1,5 | | | | |
| HCl (30 %) | g/m ³ | | | | 0,02 | | | | | |
| Na-Silikat (37 %) | g/m ³ | | | | | 13 | | | | |
| Sauerstoff (100 %) | g/m ³ | | | | | 6,8 | | | | |
| Aktivkohle (100 %) | g/m ³ | 2,4 | | | 6,1 | 19 | | | | |
| Chlorgas (100 %) | g/m ³ | | 0,13 | | | | 0,16 | 0,07 | | |
| Wärme | | | | | | | | | | |
| Fernwärme | kWh/m ³ | | | | | 0,19 | | | | |
| Erdgas | kWh/m ³ | | | 0,004 | | | 0,002 | 0,002 | | |
| Öl/Diesel | ml/m ³ | 0,02 | 1,6 | 0,08 | | 0,07 | 0,08 | 0,03 | | |
| Abfälle | | | | | | | | | | |
| WW-Schlamm | g TS/m ³ | 1,2 | 6,9 | 3,3 | 46,1 | 0,53 | | | | |
| Klärschlamm | g TS/m ³ | | | | | | | | 130 | 90 |

WW: Wasserwerk, MWA: Mainwasseraufbereitung, DEA: Druckerhöhungsanlage, WBH: Wasserbehälter, KW: Klärwerk, GW: Grauwasseranlage, Go: Goldstein, Hi: Hinkelstein, Al: Allmendsfeld, Bi: Biebesheim, Ni: Niederrad, Ha: Haßloch, Sa: Sachsenhausen

Materialverbrauch für Infrastruktur

Für die Verteilung des Betriebswassers sind zusätzliche Netze notwendig, deren Materialaufwand und Entsorgung in dieser Bilanz mit erfasst wird (Tabelle 80). Für alle Rohrsysteme ist dabei der Werkstoff HDPE (PE100) gewählt worden, der für Trinkwasser- und Abwassersysteme mittlerweile gängig ist. Bilanziell ist der Materialaufwand für die Netze anhand der Rohrlängen und Rohrdurchmessern und entsprechenden spezifischen Rohrgewichten (SIMONA 2019) berechnet worden. Die Materialaufwendungen werden über die technische Lebensdauer der Systeme auf die jährlich zu behandelnde Wassermenge verrechnet. Dabei ist in Absprache mit dem Versorger eine mittlere Lebensdauer von 30 Jahren für Rohrnetze im öffentlichen Raum und 50 Jahren in Gebäuden angesetzt worden.

Aufwendungen für die Errichtung der Infrastruktur über das Material für Aufbereitung und Transport hinaus (z. B. Aufwand beim Einbau, Formstücke, Peripherie, Wasserzähler, Schächte, etc.) werden in dieser Bilanz nicht erfasst. Für die Fallstudie im Bestandsquartier wird der Mehraufwand eines Umbaus im Bestand über pauschale Aufschlagfaktoren auf das Rohrnetz abgeschätzt.

Für die Fallstudie Neubau (Günthersburghöfe) ergibt sich für die Variante „Betriebswasser aus Mainwasser“ ein gesamtes Materialgewicht von 32,4 t HDPE für das Verteilnetz. Davon entfallen 14 % auf die Leitung zum Stadtgebiet, 46 % auf das Verteilnetz in der Straße, und 40 % auf die Verteilnetze in den Gebäuden. Die Zuleitung von der MWA Niederrad zum Gebiet (8,409 km, DN300) wird dabei nach Abstimmung mit dem Versorger nur zu 3 % auf das Gebiet angerechnet, da die höhere Kapazität dieser Leitung perspektivisch für die Betriebswasserversorgung größerer Stadtgebiete geplant werden würde. Die Einsparung im Trinkwasserwassernetz des Neubaugebiets (-824 kg HDPE) beziehen sich auf die nicht benötigten Leitungen in den Gebäuden zur Versorgung der Toilettenspülung mit Trinkwasser.

Für die Variante „Betriebswasser aus Grauwasser“ ergibt sich ein Materialverbrauch von 96,3 t HDPE für die Sammlung und Verteilung von Grauwasser. Davon entfallen 71 % auf den Grauwassersammler und 29 % auf das Verteilnetz für das Betriebswasser. Durch die größeren Durchmesser des Grauwassersammelnetzes (Abwasser) ergeben sich für diese Variante deutlich höhere Materialgewichte. Mögliche Einsparungen im Trinkwasser- und Abwassernetz belaufen sich hier ebenfalls auf deutlich höhere Werte (-11254 kg HDPE) und stammen hauptsächlich aus dem kleineren Abwassersystem. Für die Speicherung von Wasser vor und nach der Grauwasseraufbereitung wird ein Speichervolumen von insgesamt 100 m³ angesetzt, zudem wird für die Aufbereitungsanlage und deren Einbau ein Materialgewicht (Beton, Stahl, HDPE) überschlägig abgeschätzt.

Für die Fallstudie Bestandsgebiet (Heimatsiedlung) beruhen die Berechnungen der Materialaufwendungen auf den gleichen Annahmen. Darüber hinaus fällt hier ein Mehraufwand für den Umbau im Bestand an. Vorliegende Studien zeigen, dass mit einem CO₂-Mehraufwand von ca. 30 % bezogen auf den Materialaufwand für den Einbau von Rohren unter Straßenland zu rechnen ist, da bestehende Straßen aufgedrückt und nach Verlegung der Straßenbelag wieder hergestellt werden müssen (Morera et al. 2016). Darüber hinaus wurden keine weiteren relevanten Studien zum Umbau von Leitungsnetzen im Bestand in der Literatur gefunden (eine Übersicht bietet z. B. Bezela et al. (2019)). Daher wird in dieser Studie ein pauschaler Aufschlag von +30 % auf das Materialgewicht für die Rohrnetze im öffentlichen Raum angesetzt, um den Umbau im Bestand zu berücksichtigen. Für den Umbau in Gebäuden wird pauschal ein etwas geringerer Aufwand angesetzt (+20 %), da die Umbauarbeiten ggf. im Rahmen einer anstehenden Sanierung durchgeführt werden können.

Neben dem Aufwand für die Produktion der Rohre wird für das Material HDPE ebenfalls die Entsorgung erfasst (Verbrennung). Dabei entstehende CO₂-Emissionen aus der Verbrennung des rohölbasierten Werkstoffs werden in der Bilanz berücksichtigt.

Tabelle 80: Materialverbrauch der bilanzierten Prozesse

| Prozesse | Material | Menge [kg] | Lebensdauer [a] | Rohrdurchmesser [DN] und Längen, Bemerkungen |
|---|----------|------------|-----------------|--|
| Fallstudie Neubau (Günthersburghöfe) | | | | |
| Variante Betriebswasser aus Mainwasser | | | | |
| Betriebswasserleitung | HDPE | 4440 | 30 | DN300 (8,409 km), Anteil: 3 % |
| Betriebswassernetz | | | | |
| Straße | HDPE | 14.810 | 30 | DN200 (2.080 m) |
| Gebäude | HDPE | 13.141 | 50 | DN 25 (4.763 m), DN80 (8379 m) |
| Einsparung Trinkwassernetz | HDPE | -824 | 50 | DN 25 (4.763 m) nicht benötigt |
| Variante Betriebswasser aus Grauwasser | | | | |
| Grauwassersammler | | | | |
| Straße | HDPE | 23.088 | 30 | DN 250 (2.080 m) |
| Gebäude | HDPE | 45.293 | 50 | DN 80 (4.763 m), DN150 (8.379 m) |
| Einsparung Abwassernetz | HDPE | -10.430 | 50 | DN 100 (4.763 m) nicht benötigt |
| Betriebswassernetz | | | | |
| Straße | HDPE | 14.810 | 30 | DN200 (2.080 m) |
| Gebäude | HDPE | 13.141 | 50 | DN 25 (4.763 m), DN80 (8.379 m) |
| Einsparung Trinkwassernetz | HDPE | -824 | 50 | DN 25 (4.763 m) nicht benötigt |
| Aufbereitung | HDPE | 1.000 | 30 | MBR-Anlage (Schätzung) |
| Speicher | HDPE | 3.333 | 50 | Zisterne (100 m³) |
| | Beton | 49.000 | 50 | Tiefbau |
| | Stahl | 4.667 | 50 | Tiefbau |
| Fallstudie Bestand (Heimatsiedlung) | | | | |
| <i>(Aufschlag wegen Bestandsumbau: +20 % für Leitungen Wohnung, +30 % für Leitungen Straße)</i> | | | | |
| Variante Betriebswasser aus Mainwasser | | | | |
| Betriebswasserleitung | HDPE | 1.617 | 30 | DN300 (4,594 km), Anteil: 2 % |
| Betriebswassernetz | | | | |
| Straße | HDPE | 15.218 | 30 | DN150 (3.330 m) |
| Gebäude | HDPE | 8.033 | 50 | DN 25 (3.015 m), DN80 (4.199 m) |
| Einsparung Trinkwassernetz | HDPE | -626 | 50 | DN 25 (3.015 m) nicht benötigt |
| Variante Betriebswasser aus Grauwasser | | | | |
| Grauwassersammler | | | | |
| Straße | HDPE | 36.963 | 30 | DN 250 (3.330 m) |
| Gebäude | HDPE | 33.665 | 50 | DN 80 (6.030 m), DN150 (4.199 m) |
| Einsparung Abwassernetz | HDPE | -15.847 | 50 | DN 100 (6.030 m) nicht benötigt |
| Betriebswassernetz | | | | |
| Straße | HDPE | 15.218 | 30 | DN150 (3.330 m) |
| Gebäude | HDPE | 8.033 | 50 | DN 25 (3.015 m), DN80 (4.199 m) |

| Prozesse | Material | Menge [kg] | Lebensdauer [a] | Rohrdurchmesser [DN] und Längen, Bemerkungen |
|----------------------------|----------|------------|-----------------|--|
| Einsparung Trinkwassernetz | HDPE | -626 | 50 | DN 25 (3.015 m) nicht benötigt |
| Aufbereitung | HDPE | 1.000 | 30 | MBR-Anlage (Schätzung) |
| Speicher | HDPE | 4.333 | 50 | Zisterne (100 m ³) |
| | Beton | 49.000 | 50 | Tiefbau |
| | Stahl | 4.667 | 50 | Tiefbau |

Datensätze für Hintergrundprozesse

Die Datensätze für die Hintergrundprozesse beschreiben die Bereitstellung von Strom, Betriebsmitteln, Wärmeträgern, Baumaterialien, Abfallentsorgung und Transporte. Die Studie nutzt vorrangig vorhandene Datensätze der Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent Version 3.4 (Ecoivent 2017). Soweit vorhanden, werden lokale Daten der Situation in Frankfurt am Main berücksichtigt.

Für den Strommix werden die tatsächlichen CO₂-Angaben der Stromversorger verwendet, darunter der eingekaufte Strommix der Hessenwasser (Versorger Mainova) für das Jahr 2018. Für die Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Strommixes werden zusätzlich Daten des bundesdeutschen Strommix 2018 (BDEW 2019) und eine Prognose des DIW für das Jahr 2030 genutzt (Oei et al. 2019). Letztere Prognose schätzt den CO₂-Fußabdruck für das Jahr 2030 unter der Annahme, dass das Ziel der Bundesregierung von 65 % Anteil an erneuerbaren Energien am Strommix erreicht wird.

Für die Produktion von regenerierter Aktivkohle wird ein Datensatz des KWB genutzt, der auf Herstellerangaben beruht (DWA 2016). Für die Versorgung mit Fernwärme wird in Anlehnung an Angaben des Versorgers mit 70 % Anteil über Erdgas und 30 % über Müllverbrennung gerechnet. Für die Monoverbrennung wird ein bestehendes Modell des KWB genutzt (Kraus et al. 2019), das auf die Energiebilanz der Verbrennungsanlage in Frankfurt am Main angepasst wurde (Theilen und Eichenauer 2016). Für die Transporte von Betriebsmitteln und Material für Infrastruktur werden Entfernungen pauschal abgeschätzt (600 km für Chemikalien und Material, 50 km für Beton und Entsorgung HDPE). Für den Transport der Abfälle Wasserwerksschlamm und Klärschlamm von den Werken zur Entsorgung werden jeweils die tatsächlichen Transportentfernungen in Frankfurt am Main berücksichtigt.

Tabelle 81: Datensätze für die Hintergrundprozesse

| Prozess | Datensatz | Bemerkungen |
|---|---|--|
| Strom | | |
| Strommix Hessenwasser 2018 | Mainova (296 g CO ₂ /kWh), außer DEA Haßloch (Entega: 144 g CO ₂ /kWh) | Angaben Hessenwasser für Stromeinkauf 2018 |
| Strommix BDEW 2018 | 421 g CO ₂ /kWh | (BDEW 2018) |
| Strommix 2030 (DIW-Prognose, 65 % EE) | 265 g CO ₂ /kWh (Prognose: Anteil der erneuerbaren Energien 65 %) | (Oei <i>et al.</i> 2019) |
| Chemikalien | | |
| NaOH (30 %) | market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Poly-Al-Cl (10 % Al) | polyaluminium chloride production [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Polymer (100 %) | market for polyacrylamide [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| FeCl ₃ (40 %) | iron (III) chloride production, product in 40 % solution state [RoW] | Ecoinvent v3.4 |
| Dolomit (100 %) | market for dolomite [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Ca(OH) ₂ (100 %) | lime production, hydrated, loose weight [RoW] | Ecoinvent v3.4 |
| KMnO ₄ (100 %) | oxidation of manganese dioxide [RER] | Ecoinvent v3.4 |
| Al ₂ (SO ₄) ₃ (16 % Al) | aluminium sulfate production, without water, in 4.33 % aluminium solution state [RoW] | Ecoinvent v3.4 |
| H ₂ SO ₄ (50 %) | market for sulfuric acid [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| HCl (30 %) | market for hydrochloric acid, without water, in 30 % solution state [RER] | Ecoinvent v3.4 |
| Na-Silikat (37 %) | market for sodium silicate, without water, in 37 % solution state [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Sauerstoff (100 %) | market for oxygen, liquid [RER] | Ecoinvent v3.4 |
| Aktivkohle (100 %) | KWB-Datensatz für regenerierte Aktivkohle, Rohmaterial Steinkohle | Daten in (DWA 2016) |
| Chlorgas (100 %) | market for chlorine, gaseous [RER] | Ecoinvent v3.4 |
| Wärme | | |
| Fernwärme | | |
| Anteil Erdgas (70 %) | market for heat, district or industrial, natural gas [Europe without Switzerland] | Ecoinvent v3.4 |
| Anteil Müllverbrennung (30 %) | treatment of municipal solid waste, incineration [DE] | Ecoinvent v3.4 |
| Erdgas | heat production, natural gas, at industrial furnace low-NO _x >100kW [Europe without Switzerland] | Ecoinvent v3.4 |
| Öl/Diesel | diesel, burned in diesel-electric generating set, 18.5kW [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Material | | |
| HDPE | polyethylene production, high density, granulate [RER] | Ecoinvent v3.4 |

| Prozess | Datensatz | Bemerkungen |
|------------------|--|--|
| Rohrextrusion | extrusion production, plastic pipes [RER] | Ecoinvent v3.4 |
| Beton | market for concrete, for de-icing salt contact [RoW] | Ecoinvent v3.4 |
| Baustahl | market for reinforcing steel [GLO] | Ecoinvent v3.4 |
| Abfälle | | |
| HDPE | treatment of waste polyethylene, municipal incineration [Europe without Switzerland] | Ecoinvent v3.4 |
| WW-Schlamm | | |
| Verbrennung | treatment of digester sludge, municipal incineration [GLO] | Ecoinvent v3.4 (für WW Goldstein, WW Hinkelstein, MWA Niederrad) |
| Deponie | market for process-specific burdens, inert material landfill [RoW] | Ecoinvent v3.4 (für WW Allmendsfeld, WW Biebesheim) |
| Klärschlamm | | |
| Monoverbrennung | KWB-Modell Monoverbrennung, Energiewerte nach Stadtentwässerung Frankfurt, Ascheentsorgung: process-specific burdens, slag landfill [Europe without Switzerland] | Energiewerte nach (Theilen & Eichenauer 2016), KWB-Modell nach (Kraus <i>et al.</i> 2019) |
| Transport | | |
| LKW | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 [RER] | Transportentfernungen: Chemikalien + Material: 600 km, Beton und HDPE zur Entsorgung: 50 km, Wasserwerks- und Klärschlämme: je nach Werk |

Anhang 7.1.1. Partizipative Ausgestaltung der beiden Szenarien

Die beiden Szenarien erhielten die Titel „Trendszenario“, wobei darauf hingewiesen wurde, dass dies nicht mit „Weiter so als bisher“ zu verwechseln sei, und „Besondere Anstrengungen“, so dass hier auch Entwicklungen aufgenommen werden können, die nach den bisherigen Erfahrungen weniger wahrscheinlich sind. Örtlich wurde das Szenariofeld auf das Stadtgebiet Frankfurt am Main festgelegt. Die Diskussion zum zeitlichen Horizont ergab, dass der Zwischenschritt 2030 unbedingt notwendig ist, weil dies ein relevanter Zeithorizont für Maßnahmen von Politik und Verwaltung ist. Ein weiterer Zeithorizont bis 2050 ist jedoch aufgrund der langen Lebensdauer von Gebäuden und Wasserinfrastruktur zusätzlich sinnvoll, um genauer abschätzen zu können, was z. B. bei langfristigen Investitionsplanungen oder der Umrüstung von Bestandsgebäuden mögliche Resultate sein können.

Schlüsselfaktoren, an denen die beiden Szenarien kontrastierend dargestellt wurden, waren Entscheidungen der Kommunalpolitik, die verfolgte Managementstrategie zur Bewirtschaftung der Betriebswasserressourcen, die Realisierung im Wohngebäudebe-

stand und in Neubaugebieten sowie die kommunalpolitische Umsetzung jeweils begleitende Maßnahmen für die Umsetzung einer Betriebswasserversorgung. Des Weiteren wurde die Entwicklung des Trinkwassersubstitutionspotenzials für folgende spezifische Örtlichkeiten berücksichtigt: Öffentliche Einrichtungen, Bürogebäude (einschl. Hochhäuser), Gewerbegebiete, Grünflächen und Sportplätze.

Während des Workshops haben die Praxisakteure auf Erfahrungswerte und bevorstehende Entwicklungen verwiesen, diese können die unterschiedlichen Szenarien begünstigen oder hemmen. Hier wurde z. B. erwähnt, dass in Frankfurt am Main mittelfristig der Umbau der Abwasserinfrastruktur aufgrund mangelnder Kapazitäten bevorsteht und die kürzlich eingeführte getrennte Abwassergebühr aufgrund von Gebühreneinsparungen zu mehr Regenwassernutzung führen kann. Weiter wurde darauf verwiesen, dass das kommunale Vorschreiben eines Anschluss- und Benutzungszwangs für Betriebswasser über Satzungen rechtlich zu einer Aufsicht bei der Landeskartellbehörde führen könnte; grundsätzlich, so die Folgerung, sollten möglichst Anreize für freiwilliges Handeln geschaffen werden.

Anhang 7.1.2. Konsistenzbetrachtung

Konsistenz gilt als entscheidend für die Plausibilität von Szenarien; dabei geht es um die Widerspruchsfreiheit der einzelnen Projektionen zueinander. Widersprüche werden dabei als Inkonsistenzen bezeichnet. Um in sich konsistente Zukunftsbilder zu erhalten, werden die einzelnen Projektionen auf ihre Vereinbarkeit geprüft. Mit der Konsistenzanalyse lässt sich bewerten, welche Kombinationen sich konsistent zu einander verhalten und somit in die Konstruktion widerspruchsfreier Szenarien einfließen können. Dies ist nicht nur für die Glaubwürdigkeit entscheidend, sondern auch für die Deutbarkeit von Szenarien entscheidend. Hierbei werden zunächst für alle Schlüsselfaktoren wenigstens zwei Ausprägungen identifiziert. So zum Beispiel unterschiedlich große Anstrengungen beim Aufbau von Betriebswasserversorgungen in Neubaugebieten. Vereinfachend wurde die städtische Expertengruppe, die das Vorhaben begleitet, gebeten, die Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Ausprägungen abzuschätzen. Prämisse war, dass die wahrscheinlichere Ausprägung im Trend- und die weniger wahrscheinliche im Szenario „Besondere Anstrengungen“ platziert sein müsste. Die durchgeführte Konsistenzanalyse bestätigte dies.

Der Eintritt der im „Trendszenario“ formulierten Maßnahmen wurde fast durchweg als wahrscheinlicher bewertet als im Szenario „Besondere Anstrengungen“, was die relative Konsistenz der beiden entwickelten Szenarien bestätigt. Auf der Skala von 1 (sehr wahrscheinlich) bis 6 (sehr unwahrscheinlich) erlangte das Trendszenario einen Mittelwert von 2,54, das normative Szenario 3,52 (vgl. Anhang 7.1.3). Im Szenario „Besondere Anstrengungen“ wurden die Maßnahmen im Bereich Ein-/Zweifamilienhäuser (4,2), Kommunalpolitik (3,9) und Bestandsgebiete (4) als „eher unwahrscheinlich“ eingeschätzt. Im Trendszenario war die schlechteste Bewertung eine 3, diese wurde für Betriebswassermanagement und Neubaugebiete abgegeben.

Aus untersuchungspragmatischen Gründen wurde die Konsistenzanalyse statt wie in Kerber et al. (2014) beschrieben durchgeführt auf das beschriebene Verfahren vereinfacht.

Anhang 7.5. Berechnung des Substitutionspotenzials im Szenario „Besondere Anstrengungen“ 2050 bei unterschiedlicher Bevölkerungsentwicklung

Insgesamt ergab sich in dem Szenario „Besondere Anstrengungen“ bei einem starken Bevölkerungszuwachs ein Substitutionspotenzial von 6,6 Mio. m³. Dies setzt sich zusammen aus dem Substitutionspotenzial im Bereich Wohnen und dem Substitutionspotenzial gesondert betrachteter Orte wie z. B. Arbeitsstätten, Bildungs-, und Freizeiteinrichtungen. Beim ebenfalls betrachteten schwächeren Bevölkerungszuwachs beträgt das Substitutionspotenzial 4,2 Mio. m³.

Im Bereich Wohnen wurde im Szenario „Besondere Anstrengungen“ bis 2050 ein Substitutionspotenzial von 5,6 Mio. m³ errechnet, 1,3 Mio. m³ bis 2030 und weitere 4,3 Mio. m³ bis 2050, siehe Tabelle 83. Wird die Variante mit einem niedrigeren Bevölkerungswachstum betrachtet, kommt es im Szenario „Besondere Anstrengungen“ im Jahr 2050 im Bereich Wohnen zu einem Substitutionspotenzial von 3,4 Mio. m³, siehe Tabelle 84.

Für die Berechnung wurden die zusätzlichen Einwohner (siehe Kapitel 2.5) den verschiedenen Gebäudetypen zugeordnet (Tabelle 82). Während in den Bestandsgebäuden von einer gleichbleibenden Personenanzahl pro Haushalt (1,9 Personen) ausgegangen wird, wird bei der hohen Bevölkerungsvariante davon ausgegangen, dass für den Bereich Neubau ab 2030 2,2 Personen pro Haushalt leben.

Tabelle 82: Verteilung der Bevölkerung in unterschiedlichen Gebäudetypen 2030 und 2050

| Anzahl Personen | | | | |
|--|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Berechnungsgrundlage: 1,9 Personen pro Wohnung | Anz. Whg. 2017 | 2017 | 2030 | 2050 |
| Einfamilienhäuser (EFH) | 28.181 ^[1] | 53.544 | 51.837 | 60.022 |
| Zweifamilienhäuser (ZFH) | 21.148 ^[1] | 40.181 | 40.500 | 47.995 |
| Hochhäuser (Annahme 2017: 143 x 15 Stockwerke x 6 Wohnungen) | 12.870 | 24.453 | 27.326 | |
| Gesamt | 62.199 | 118.178 | 119.663 | 108.017 |
| Mehrfamilienhäuser (MFH) | 338.267 ^[1] | 642.707 | 713.356 | 776.876 |
| Mehrfamilienhäuser ohne Hochhäuser | 325.397 | 618.254 | 686.030 | |
| Gesamt | 387.596 | 736.432 | 805.693 | 884.893 |

[1] Stat. Jahrbuch 2018, S. 71

Tabelle 83: Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante hoch, Wohnen

| m³/a | Trend | | | Besondere Anstrengungen | | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------|------------------|------------------|
| | 2030 | 2050 | Gesamt | 2030 | 2050 | Gesamt |
| MFH | 251.042 | | | 953.144 | 4.285.652 | |
| EZFH | 10.851 | 44.690 | | 305.634 | 7.817 | |
| Gesamt | 261.893 | 44.690 | 306.583 | 1.258.778 | 4.293.470 | 5.552.248 |

Tabelle 84: Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante niedrig, Wohnen

| m³/a | Trend | | | Besondere Anstrengungen | | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------|------------------|------------------|
| | 2030 | 2050 | Gesamt | 2030 | 2050 | Gesamt |
| MFH | 251.042 | | 251.042 | 953.144 | 2.149.349 | 3.102.493 |
| EZFH | 10.851 | 38.303 | 49.153 | 305.634 | 6.751 | 312.386 |
| Gesamt | 261.893 | 38.303 | 300.196 | 1.258.778 | 2.156.100 | 3.414.879 |

Zur Berechnung des Substitutionspotenziales werden für das Szenario „Besondere Anstrengungen“ folgende Annahmen getroffen: Ein- und Zweifamilienhäuser erreichen bis 2050 über 0,3 Mio. m³ des Betriebswasserpotenziales; der Großteil hiervon wird bereits bis 2030 für Bewässerung, und bei Sanierungsobjekten auch für eine teilweise innerhäusliche Verwendung, ausgeschöpft. Bis 2050 werden in 500 neu entstehenden Wohneinheiten in Zweifamilienhäusern 50 % der Toiletten und 50 % der Waschmaschinen mit Betriebswasser versorgt. Für die niedrige Bevölkerungsvariante ergeben sich aufgrund der niedrigeren Besetzung der Haushalte etwas niedrigere Substitutionspotenziale.

Im Folgenden wird exemplarisch für Mehrfamilienhäuser und die höhere Bevölkerungsvariante dargestellt, welche Annahmen im Detail dem in Tabelle 83 dargestellten Ergebnis zugrunde gelegt wurden. Auch hier ergeben sich wesentliche Differenzen aus der Zahl der Haushaltsmitglieder ab 2030. Weiterhin wurde hier aber für den Zeitraum zwischen 2030 und 2050 von einer weitaus höheren Umsetzung der Betriebswasserversorgung im Bestand ausgegangen, insbesondere um einen Einblick in die maximal realisierbaren Größenordnungen zu erhalten (es werden also hier nicht nur demographische Effekte abgebildet): Im Bereich der bestehenden Mehrfamilienhäuser (Tabelle 85) werden bis 2030 einerseits Wohntürme saniert, wobei in den Gebieten Mainfeld und Nordweststadt die Toilettenspülung zu 100 % und Waschmaschinen zu 20 % durch Mainwasser versorgt wird. Im Rahmen von Nachverdichtungsprojekten, die in der Stadt verteilt sind, können 5 000 Wohnungen mit Betriebswasser für die Toilettenspülung versorgen werden. Die Grünflächenbewässerung von 10 % der Mehrfamilienhäuser wird ebenso durch Betriebswasser gedeckt. Bis 2050 werden weitere Wohntürme saniert z. B. in Eckenheim, Preungesheim und Fechenheim, dabei werden 25 % der Wohntürme für die Betriebswasserversorgung umgerüstet, wobei 100 % der Toilettenspülung und 20 % der Waschmaschinen mit Betriebswasser versorgt werden. Im Rahmen von

Nachverdichtungsprojekten bis 2050 können weitere 5 000 Wohnungen mit Betriebswasser für die Toilettenspülung versorgt werden. Die Grünflächenbewässerung von 85 % der Mehrfamilienhäuser wird ebenso durch Betriebswasser gedeckt. Zudem wird bis 2050 durch die strategische Entwicklung der Betriebswasserversorgung die Nachrüstung in Bestandsgebäuden für 150 000 Einwohner ermöglicht, was eine Versorgung der Toilettenspülung zu 100 % und der Waschmaschinen zu 50 % zur Folge hat.

Tabelle 85: Substitutionspotenzial in der Bevölkerungsvariante hoch, Mehrfamilienhäuser Neubau

| Bes. Anstrengungen 2030 | | | Bes. Anstrengungen 2050 zusätzlich | | | gesamt 2050 |
|-------------------------|----------|---------|------------------------------------|---------|---------|-------------|
| Neubau | Whg | 29.000 | Neubau | Whg | 30.000 | |
| Pers./Whg: 1,9 | Pers | 55.100 | Pers./Whg: 2,2 | Pers | 66.000 | |
| Toilette | I/Pers/d | 32 | Toilette | I/Per/d | 32 | |
| Substitutionspotenzial | m³/a | 640.752 | Substitutionspotenzial | m³/a | 767.507 | 1.408.260 |

Tabelle 86: Substitutionspotenzial gesondert betrachtete Orte, „Besondere Anstrengungen“

| Minimale Bevölkerungsvariante, 2050 (m³/a) | | Maximale Bevölkerungsvariante, 2050 (m³/a) | |
|--|----------------|--|------------------|
| Gewerbegebiete | 265.269 | Gewerbegebiete | 265.269 |
| Bürogebäude | 310.500 | Bürogebäude | 558.147 |
| Goethe-Universität | 72.264 | Goethe-Universität | 72.264 |
| Grünflächen | 72.919 | Grünflächen | 72.919 |
| Sportplätze | 109.550 | Sportplätze | 109.550 |
| Summe | 830.502 | Summe | 1.078.149 |

Tabelle 87: Betriebswassernutzung bei Waschmaschinen aufgrund sich entwickelnder „Betriebswasser-Kultur“ (ausschließlich im Szenario „Besondere Anstrengungen“)

| | 2030 | | 2050 | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Personen | Waschmaschine | Personen | Waschmaschine |
| Hohe Bevölkerungsvariante | | | | |
| EZFH | 11.839 | 6.231 | 550 | 250 |
| MFH | 752 | 396 | 75.385 | 34.266 |
| Summe | 12.591 | 6.627 | 75.935 | 34.516 |
| Niedrige Bevölkerungsvariante | | | | |
| EZFH | 11.839 | 6.231 | 475 | 250 |
| MFH | 752 | 396 | 25.385 | 13.360 |
| Summe | 12.591 | 6.627 | 25.860 | 13.610 |

Es wurde davon ausgegangen, dass in der hohen Bevölkerungsvariante bis 2030 1,9 Personen pro Haushalt leben, nach 2030 dann 2,2 Personen pro Haushalt; in der niedrigen Bevölkerungsvariante wird der Wert von 1,9 Personen pro Haushalt bis 2050 kalkuliert

Durch Neubauten von Mehrfamilienhäusern (Tabelle 85) kommt es bis 2050 zu einem Substitutionspotenzial von 1,4 Mio. m³; davon werden 0,6 Mio. m³ bis 2030 erreicht. Von den 29 000 Wohnungen, die bis 2030 neu entstehen werden hierfür 25 % für die Toilettenspülung mit Betriebswasser versorgt. Bei weiteren 30 000 Wohnungen, die bis 2050 neu entstehen, werden ebenfalls die Toiletten mit Betriebswasser versorgt.

Bei den gesondert betrachteten Orten (Gewerbegebiete, Bürogebäude, Bildungseinrichtungen, Grünflächen und Sportplätze) kommt es im Szenario „Besondere Anstrengungen“ im Jahr 2050 zu einem Substitutionspotenzial von 1,1 Mio. m³. Hier unterscheidet sich die minimale Bevölkerungsvariante von der maximalen Bevölkerungsvariante lediglich bezüglich der Bürogebäude. Es wurde davon ausgegangen, dass bei einem starken Bevölkerungswachstum Arbeitsplätze im Servicebereich zunehmen, während die anderen Bereiche (Gewerbegebiete, Bildungseinrichtungen, Grünflächen und Sportplätze) im Stadtgebiet nicht weiterwachsen können und stagnieren. In Bürogebäuden können 2050 knapp 190 000 Personen für die Toilettenspülung mit Betriebswasser versorgt werden, was zu einem Substitutionspotenzial von knapp 0,6 Mio. m³ führt, siehe Tabelle 86. Grünflächen und Friedhöfe werden im Szenario „Besondere Anstrengungen“ weitreichend für die Bewässerung mit Betriebswasser versorgt, Sportanlagen ebenso für die Bewässerung und zusätzlich für die Toilettenspülung. Im Campus Westend der Goethe-Universität wird im Rahmen von Sanierung und Erweiterungen teils die Toilettenspülung, Reinigung und die Klimaanlage mit Betriebswasser gespeist. Es wurde weiter angenommen, dass Gebäude in Gewerbegebieten vereinzelt, insbesondere aber die Gewerbeflächen am Flughafen für die Toilettenspülung mit Betriebswasser versorgt werden.

Anhang 7.6. *Eingeschätzte Wahrscheinlichkeiten der Szenario-Maßnahmen*

Die Wahrscheinlichkeit, mit der sich Schlüsselfaktoren der beiden Szenarien (vgl. Tabelle 36) realisieren, wurde aus Zeitgründen von den Teilnehmenden des Szenario-workshops anschließend an den Workshop auf einer Skala von eins bis sechs bewertet, wobei eins für sehr wahrscheinlich, sechs für sehr unwahrscheinlich steht. X bedeutet, dass keine Bewertung vorgenommen wurde. Die Ergebnisse dieser Einschätzung enthält die Tabelle 88.

Einige Schlüsselfaktoren, die dem Trendszenario zugeordnet waren, wurden als gleich oder weniger wahrscheinlicher als solche bewertet, die zum Szenario „Besondere Anstrengungen“ zugeordnet waren. Das wurde als Hinweis darauf gewertet, dass das Trendszenario an diesen Stellen möglicherweise etwas vom Trend abweicht und bei der anschließenden Szenarioentwicklung nicht davon ausgegangen werden kann, dass die entsprechenden Schlüsselfaktoren sich vollständig verwirklichen.

Alternativ wäre es möglich gewesen, problematische Schlüsselfaktoren umzuformulieren, um darauf aufbauend die Szenarien weiter zu entwickeln.

Tabelle 88: Auswertung der Konsistenzbewertung

| | Trendszenario | | | | | | | Besondere Anstrengungen | | | | | | |
|--|---------------|---|---|---|---|---|--------------|-------------------------|---|---|---|---|---|--------------|
| | | A | B | C | D | E | Durchschnitt | | A | B | C | D | E | Durchschnitt |
| Kommunalpolitik | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2,2 | 1 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 4,4 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 5 | 3 | 3 | 3,4 |
| | 3 | 4 | x | 4 | x | 3 | 3,7 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 4 | 2 | x | 2 | 3 | 3 | 2,5 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 5,2 |
| | | | | | | | | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3,6 |
| | | | | | | | 2,59 | | | | | | | 3,92 |
| Wasserquellen und -management | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 4 | x | 4 | 3 | 2 | 3,25 | 1 | 4 | x | 4 | 4 | x | 4 |
| | 2 | 3 | x | 2 | 3 | 3 | 2,75 | 2 | 3 | x | 2 | 3 | 3 | 2,75 |
| | | | | | | | | 3 | 4 | x | 2 | 2 | x | 2,7 |
| | | | | | | | 3,00 | | | | | | | 3,14 |
| Begleitende Maßnahmen | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | x | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2,8 |
| | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2,2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2,2 |
| | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2,4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2,6 |
| | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2,6 | | | | | | | |
| | | | | | | | 2,3 | | | | | | | 2,53 |
| Bestandsgebiete Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---|---|------|
| | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2,4 | 1 | 3 | 6 | 2 | x | x | 3,7 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3 | x | 3,25 |
| | | | | | | | | 3 | 4 | x | 3 | 3 | 4 | 3,5 |
| | | | | | | | | 4 | 4 | 2 | 5 | 4 | 6 | 4,2 |
| | | | | | | | | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 6 | 5,2 |
| | | | | | | | 2,2 | | | | | | | 3,96 |
| Neubaugelände | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2,8 | 1 | 5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3,8 |
| | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | x | 3,25 | 2 | 4 | 2 | 5 | 4 | x | 3,75 |
| | | | | | | | 3,03 | | | | | | | 3,78 |
| Bestand Ein- und Zweifamilienhäuser | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 6 | 1 | 1 | 3 | 2,6 | 1 | 5 | 6 | 2 | 4 | 4 | 4,2 |
| Gewerbegebiete | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2,4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | | | | | | | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | x | 3,5 |
| | | | | | | | | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | x | 3 |
| | | | | | | | 2,4 | | | | | | | 3,17 |
| Öffentl. Einrichtungen | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 3 | x | 3 | 2 | 2 | 2,5 | 1 | 4 | x | 3 | 4 | 5 | 4 |
| Grüne Infrastruktur | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | x | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | x | 3 | 3 | 4 | 3,25 |
| | 2 | 3 | x | 3 | 2 | 3 | 2,75 | 2 | 4 | x | 3 | 2 | 3 | 3 |
| | | | | | | | 2,38 | | | | | | | 3,13 |