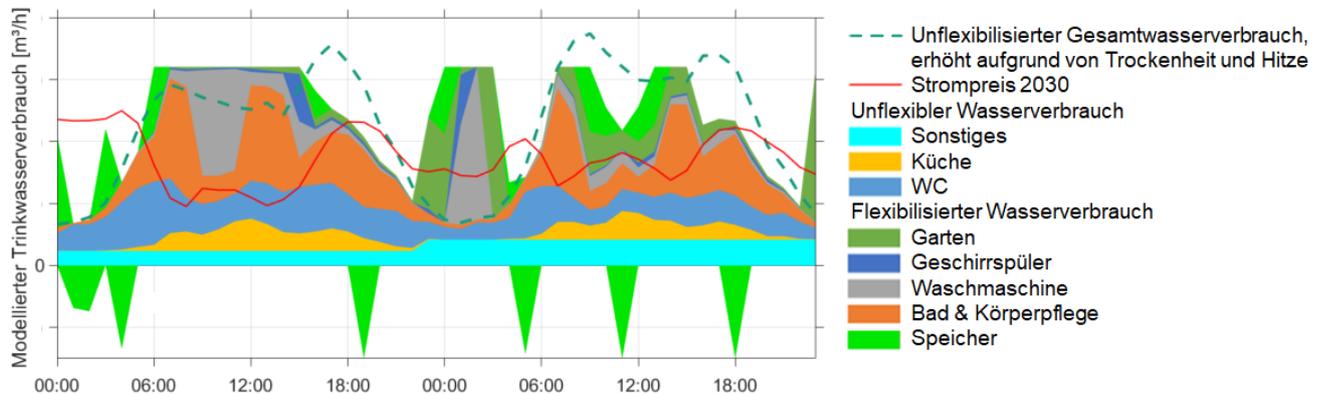


FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ENERIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK, IEE

MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERSORGUNGEN UND EINSATZOPTIMIERUNG VON FLEXIBILITÄTSOPTIONEN



MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERSORGUNGEN UND EINSATZOPTIMIERUNG VON FLEXIBILITÄTSOPTIONEN

Dr. Kaspar Knorr, Pedro Giron, Dr. Martin Wiemer

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, IEEI
in Kassel.

Verbundprojekt Zukunftsstadt: Flexible Utility – Mit sozio-technischer Flexibilisierung zu mehr Klimaresilienz und
Effizienz in der städtischen Infrastruktur (FLEXITILITY)

Oktober 2022, Kassel

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und
Forschung unter dem Förderkennzeichen 01 LR 1710G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhalt

1	Übersicht.....	5
2	Modellierung der Trinkwasserversorgung	6
2.1	Trinkwasserverbrauch eines Versorgungsgebietes	6
2.2	Einsetzen von Wasserverbrauchsarten, Eingangsdatensatz 2019	6
2.3	Wasserverbrauch für „Garten & Sonstiges“	7
2.4	Erstellen eines Hitze- und Trockenheitsszenarios	9
2.5	Eingangsdatensatz 2030	11
2.6	Flexibilitätsoptionen	12
2.7	Trinkwasserspeicher	13
2.8	Pumpleistungskennlinie.....	15
3	Strompreise	17
3.1	Börsenstrompreise	17
3.2	Netzentgelte	18
4	Optimierung des Flexibilitätseinsatzes	19
4.1	Entwicklung des Optimierungsmodells	19
4.2	Durchführung	21
4.3	Ergebnisinterpretation.....	22
5	Handlungsempfehlungen.....	27
6	Literatur	29

1 Übersicht

Der folgende Bericht schildert den Aufbau und die Ergebnisse des Optimierungssystems zum Einsatz von Flexibilitäten in der Trinkwasserversorgung. Das Optimierungssystem besteht aus zwei Hauptbestandteilen: einem umfangreichen Teil zur Datenvorverarbeitung (Kapitel 2 und 3) und einem Optimierungsteil (Kapitel 4). Die Ergebnisse der Flexibilitätseinsatzoptimierung sind in Kapitel 4.3 geschildert. Kapitel 5 leitet aus den Untersuchungen Handlungsempfehlungen ab. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau des Optimierungsmodells und gibt die Unterkapitelnummern zur Beschreibung der Datenvorverarbeitung an.

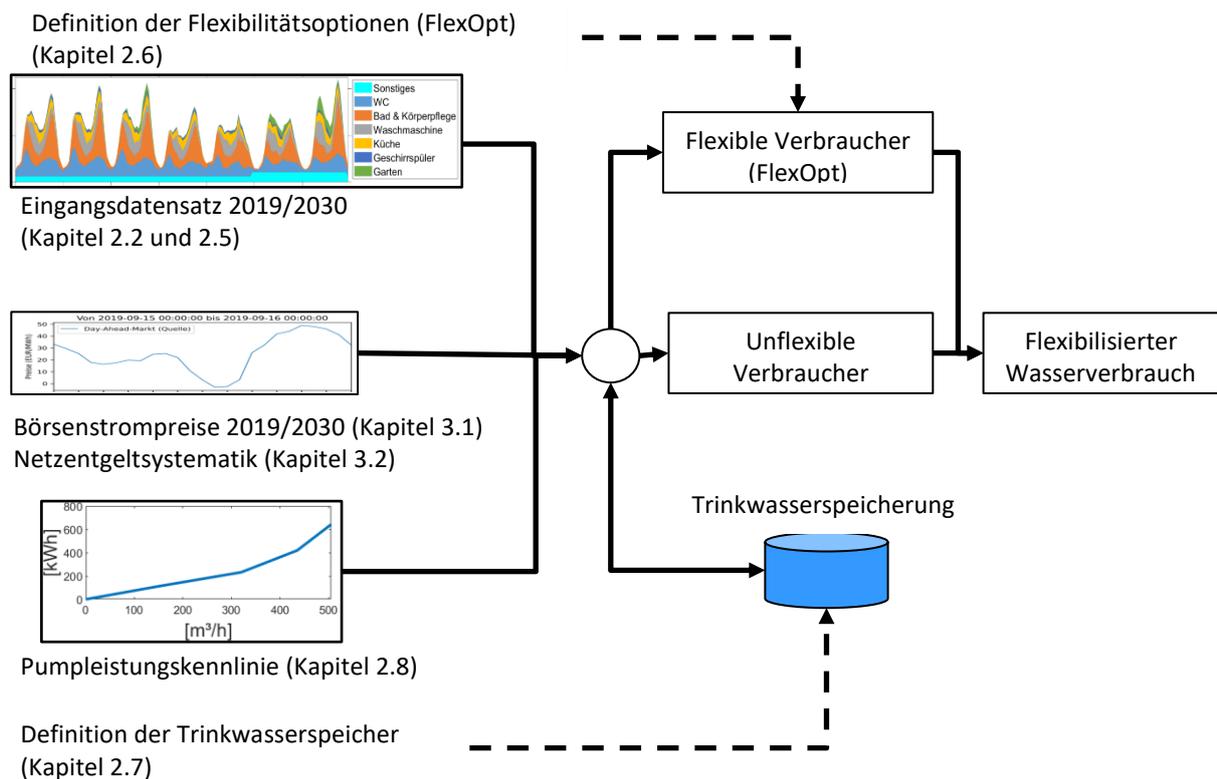


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Optimierungsmodells inkl. Nennung der Kapitel zur Datenvorverarbeitung

2 Modellierung der Trinkwasserversorgung

2.1 Trinkwasserverbrauch eines Versorgungsgebietes

Für die Projektuntersuchungen wird eine Zeitreihe des Trinkwasserverbrauchs $V_{\text{gem}}(h)$ eines Versorgungsgebietes verwendet. Die Zeitreihe weist eine zeitliche Auflösung von einzelnen Stunden h und eine zeitliche Abdeckung der Jahre 2017 bis einschließlich 2019 auf. Das Maximum der Zeitreihe wird im Folgenden als $V_{\text{max}1}$ bezeichnet.

2.2 Einsetzen von Wasserverbrauchsarten, Eingangsdatsatz 2019

Für die Einsatzoptimierung der Flexibilitäten in Kapitel 4 ist es notwendig, den gesamten Trinkwasserverbrauch des betrachteten Versorgungsgebietes in Wasserverbrauchsarten aufzuteilen. Als Wasserverbrauchsarten werden dabei die Anwendungen bezeichnet, für die das Trinkwasser letztendlich verwendet wird. Es werden entsprechend dem Projekt DEMAPLAN [1] die Verbrauchsarten WC, Körperpflege, Waschmaschine, Küche, Geschirrspüler und Garten & Sonstiges betrachtet und für den Eingangsdatsatz 2019 um eine Basislast ergänzt. Aus dem Projekt DEMAPLAN liegen Tagesmuster (engl. „pattern“) des Trinkwasserverbrauchs einer Kleinstadt in stündlicher Auflösung vor, die nicht nur nach Verbrauchsart unterscheiden, sondern auch nach Werktagen und Wochenenden (siehe Abbildung 2).

Um die für eine Kleinstadt gültigen Tagesmuster besser einschätzen zu können, ist in Abbildung 2 nicht der Gesamtverbrauch der Kleinstadt angegeben, sondern der auf eine Person heruntergebrochene. Aus den derart skalierten Tagesmustern darf aber keineswegs auf den Wasserverbrauch einzelner Personen oder eines einzelnen Haushalts geschlossen werden, welche deutlich höhere relative Schwankungen aufweisen, was ebenfalls im DEMAPLAN-Projekt [1] gezeigt wurde. Da Gartenbewässerung im Gegensatz zu den übrigen Wasserverbrauchsarten stark von der Jahreszeit abhängt, wird der Wasserverbrauch für „Garten & Sonstiges“ im Folgenden zunächst ausgeklammert und in Kapitel 2.3 gesondert betrachtet. Ohne den Wasserverbrauch für Garten & Sonstiges ergeben sich die Anteile der Wasserverbrauchsarten am gesamten Wasserverbrauch pro Stunde gemäß Abbildung 3. Die Muster aus Abbildung 3 werden durch folgendes Vorgehen in die Zeitreihe des Trinkwasserverbrauchs des betrachteten Versorgungsgebietes $V_{\text{gem}}(h)$ aus Kapitel 2.1 „eingefügt“, um verbrauchsspezifische Zeitreihen für das Versorgungsgebiet zu erhalten.

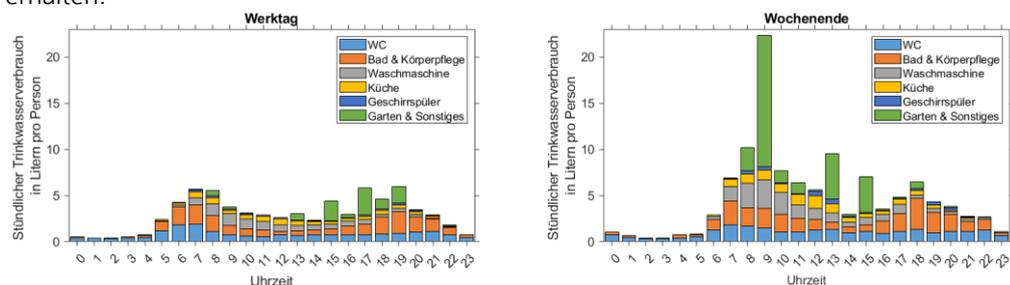


Abbildung 2: Tagesmuster des Trinkwasserverbrauchs einer Kleinstadt aus dem Projekt DEMAPLAN [1]

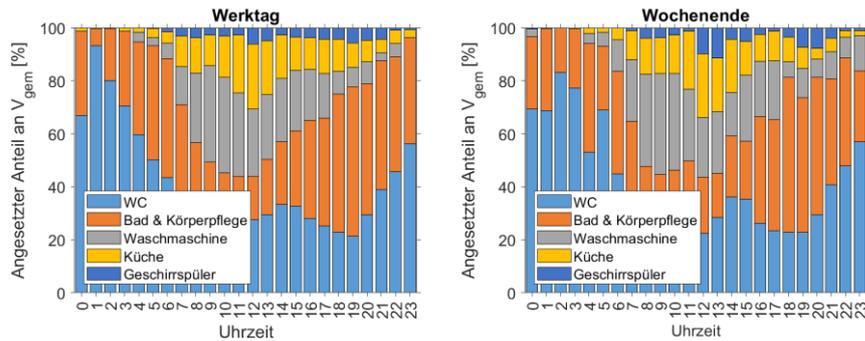


Abbildung 3: Anteile der Wasserverbrauchsarten am gesamten Wasserverbrauch pro Stunde gemäß DEMAPLAN [1].

Zunächst wird für jeden Tag der Zeitreihe $V_{\text{gem}}(h)$ das Minimum bestimmt und als so genannte Basis-Last angesetzt. Als Basis-Last wird der Wasserverbrauch des betrachteten Versorgungsgebietes interpretiert, der nicht den Wasserverbrauchsarten WC, Körperpflege, Waschmaschine, Küche und Geschirrspüler zuzuordnen ist. Hierzu zählen etwa industrieller, gewerblicher und landwirtschaftlicher Wasserverbrauch, aber auch die ausgeklammerte Verbrauchsart „Garten & Sonstiges“, auch wenn diese im Gegensatz zur definierten Basislast hohe Schwankungen aufweist. Der nach Abzug der Basis-Last verbleibende Wasserverbrauch des betrachteten Versorgungsgebietes wird entsprechend der Anteile der DEMAPLAN-Verbrauchsarten am Gesamtverbrauch der jeweiligen Tageszeit aus Abbildung 3 aufgeteilt, wobei nach Werktagen und Wochenenden unterschieden wird und Feiertage als Wochenenden aufgefasst werden. Durch tagesscharfe Umskalierung der resultierenden Wasserverbrauchszeitreihen wird gewährleistet, dass die Anteile der Verbrauchsarten für jeden Tag denen aus Abbildung 4 ohne Garten & Sonstiges entsprechen.

Es ist zu beachten, dass es sich bei den resultierenden, verbrauchsspezifischen Trinkwasserzeitreihen des betrachteten Versorgungsgebietes um synthetische Zeitreihen handelt, die sich zwar für die weiteren Untersuchungen eignen, deren Repräsentativität für reale Trinkwasserversorgungsgebiete jedoch zu überprüfen ist. Insbesondere wird der fluktuierende Charakter etwa von Gartenbewässerung oder des Wasserbedarfs für Landwirtschaft in diesen Zeitreihen nicht berücksichtigt. Dieser Datensatz wird im Folgenden als „Eingangsdatensatz 2019“, da für die Flexibilitätseinsatzoptimierungen in Kapitel 4 die ebenfalls modellierten Jahre 2017 und 2018 nicht verwendet werden.

2.3 Wasserverbrauch für „Garten & Sonstiges“

Blieb der Trinkwasserverbrauch für Garten & Sonstiges im Eingangsdatensatz 2019 noch ausgeklammert, wird in diesem Kapitel die Methode für seine Berücksichtigung im so genannten Eingangsdatensatz 2030 beschrieben.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass der Wasserverbrauch für „Garten & Sonstiges“ gemäß der DEMAPLAN-Tagesmuster [1] insbesondere an Wochenenden mit ca. 26% einen großen Anteil am Gesamtwasserverbrauch aufweist.

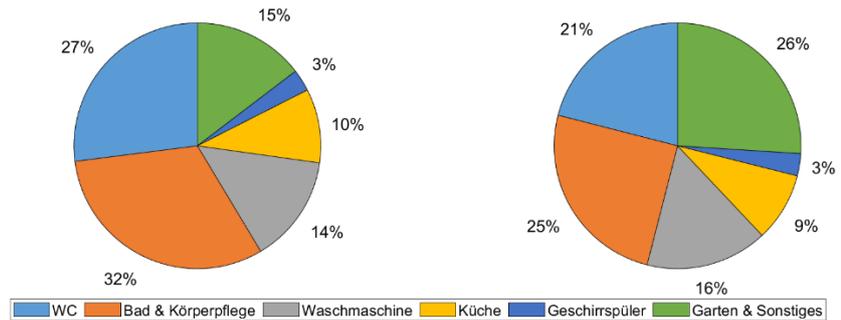


Abbildung 4: Zusammensetzung des Trinkwasserverbrauchs einer Kleinstadt aus dem Projekt DEMAPLAN [1]

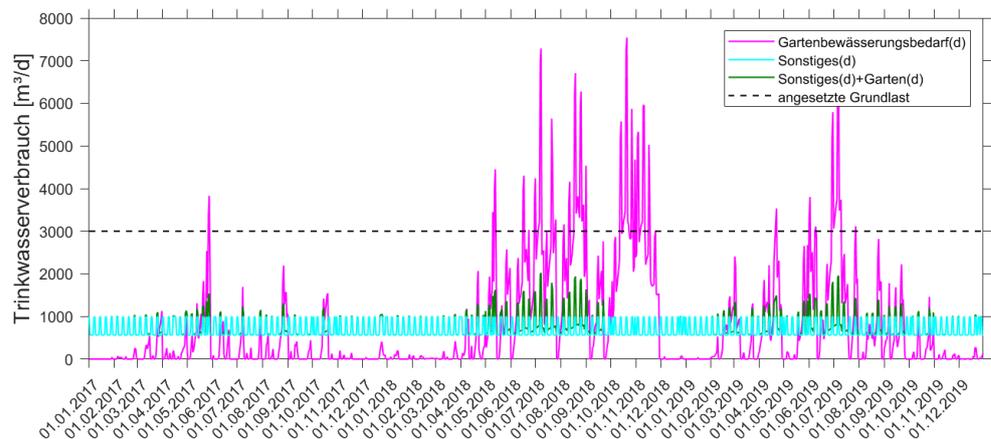


Abbildung 5: Ansatz zur Abbildung des Gartenbewässerungsbedarfs

Es werden die Anteile von 15% an Werktagen und 26% an Wochenenden auf den gemessenen Trinkwasserverbrauch V_{gem} angewendet, um die Wassermenge für Garten & Sonstiges in Kubikmetern zu erhalten. Zur Verteilung dieser Wassermenge auf einzelne Tage d wird der Bewässerungsbedarf $GD(d)$ aus [2] herangezogen und derart skaliert, dass genannten Wassermengen für Werktage und Wochenenden erreicht werden. Abbildung 5 bezeichnet den derart skalierten Bewässerungsbedarf $GD(d)$ als „Gartenbewässerungsbedarf(d)“.

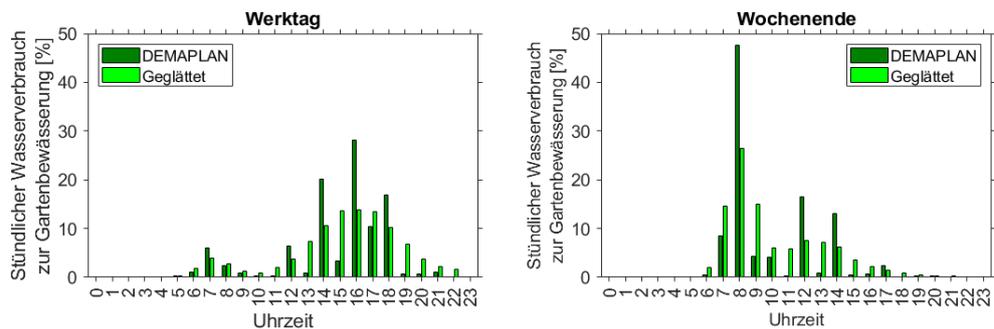


Abbildung 6: Glättung des DEMAPLAN-Wasserverbrauchs [1] zur Gartenbewässerung

Es fällt in Abbildung 5 ein hoher Gartenbewässerungsbedarf im Herbst 2018, also zu einer Zeit auf, in der mit geringer Gartenbewässerung zu rechnen ist. Zudem weist in dieser Zeit der gemessene tägliche Trinkwasserverbrauchs $V_{\text{gem}}(d)$ ein deutlicher Einbruch auf, der evtl. auf Unvollständigkeit des gemessenen Wasserverbrauchs zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden der berechnete

Gartenbewässerungsbedarf im Herbst 2018 nicht berücksichtigt und zu Null gesetzt (der genaue Zeitraum wird dadurch deutlich, dass in diesem Zeitraum Garten(d) im Gegensatz zu Gartenbewässerungsbedarf(d) Null ist). Zudem übersteigt der so modellierte Gartenbewässerungsbedarf an manchen Tagen den gemessenen Trinkwasserverbrauch des Versorgungsgebietes $V_{gem}(d)$. Aus diesem Grund wird eine Sockellast Sonstiges(d) in den Gartenbewässerungsbedarf eingeführt, um diesen gleichmäßiger zu verteilen. Die Sockellast Sonstiges(d) wird als der Anteil „Sonstiges“ der Wasserverbrauchsart „Garten & Sonstiges“ interpretiert. Der restliche Anteil des Bewässerungsbedarfs wird entsprechend als Garten(d) bezeichnet.

Die Sockellast Sonstiges (d) wird so hoch gewählt, dass der Wasserverbrauch Garten(d) und Sonstiges(d) an Tagen, an denen $V_{gem}(d)$ über der angesetzten Grundlast von $3000\text{m}^3/\text{d}$ liegt, zusammen höchstens 50% von $V_{gem}(d)$ ausmacht. Abbildung 5 verdeutlicht die unterschiedliche Sockellast Sonstiges(d) für Werktage und Wochenenden, sowie das Hinzukommen des Wasserverbrauchs Garten(d) in den Sommermonaten, ebenfalls verstärkt an Wochenenden.

Während die Sockellast Sonstiges(d) als konstant über die einzelnen Tage d angenommen wird um den Verlauf Sonstiges(h) für einzelne Stunden h zu erhalten, wird zur Erhöhung der zeitlichen Auflösung des Wasserverbrauchs Garten(d) von Tagen auf Stunden das entsprechende DEMAPLAN-Muster aus Abbildung 2 herangezogen. Da die sehr ausgeprägten Spitzen, etwa an Wochenenden um 9 Uhr, als nicht repräsentativ für andere Wasserversorgungsgebiete eingeschätzt werden, wird der Wasserverbrauch für „Garten & Sonstiges“ mittels Faltung mit einer Gaußverteilung geglättet (siehe Abbildung 6) und, unter Skalierung auf die Tageswerte Garten(d), zum stündlichen Wasserverbrauch Garten(h) zusammengesetzt.

Diese Methode zur Modellierung der Wasserverbrauchart Garten ist als pragmatischer Ansatz einzustufen, um die im Projekt notwendigen Zeitreihen zu generieren. In weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen sollten überprüft werden, inwieweit durch diese Methode der tatsächliche Wasserverbrauch zur Gartenbewässerung rekonstruiert oder prognostiziert werden kann.

2.4 Erstellen eines Hitze- und Trockenheitsszenarios

In [2] wurde mittels einer einfachen multiplen linearen Regressionsanalyse der gemessene Trinkwasserverbrauch $V_{gem}(d)$ eines Versorgungsgebietes in der zeitlichen Auflösung von Tagen d durch eine Grundlast G und Zeitreihen zur mittleren Tagestemperatur $T(d)$, zur Sonnenscheindauer $S(d)$, zur „Trockenheit“ $A(d)$, zum Niederschlag $N(d)$, zu Werktagen oder Wochenenden $W(d)$ und zu Urlaubszeiten $U(d)$ rekonstruiert. Das Regressionsmodell war der Form

$$V_{sim}(d) = G + \beta_6 T(d) + \beta_7 S(d) + \beta_8 (A(d) - 1) + 0,56 - N(d) + \beta_9 W(d) + \beta_{10} U(d) \Big|_{\substack{T(d) > 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) > 4750\text{m}^3}}$$

und führte mit den ermittelten Regressionsparametern β_6 bis β_{10} zu einer mittleren absoluten Abweichung über alle betrachteten Tage von

$$\frac{|V_{gem} - V_{sim}|}{V_{gem}} = \mathbf{3,6\%}.$$

Dieses Regressionsmodell wird im Folgenden mit $V_{sim}(T, N)$ bezeichnet, um seine Abhängigkeit von der mittleren Tagestemperatur T und dem Tagesniederschlag N zum Ausdruck zu bringen und Modellen $V_{sim}(T, N_{Trockenheit})$, $V_{sim}(T_{Hitze}, N)$ und $V_{sim}(T_{Hitze}, N_{Trockenheit})$ gegenüberzustellen, in denen pauschal um $1,5^\circ\text{C}$ erhöhte, mittlere Tagestemperaturen $T_{Hitze}(d)$ und ausbleibende Niederschläge $N_{Trockenheit}(d)$ an warmen Tagen ($T(d) > 19^\circ\text{C}$) und an Tagen mit nicht ungewöhnlich niedrigem Wasserverbrauch ($V_{gem}(d) > 4750\text{m}^3$) angesetzt werden.

$$T_{Hitze}(d) = T(d) + 1,5^\circ\text{C}$$

$$N_{Trockenheit}(d) = N(d) \left| \begin{array}{l} T(d) \leq 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) \leq 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

$$N_{Trockenheit}(d) = 0 \left| \begin{array}{l} T(d) > 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) > 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

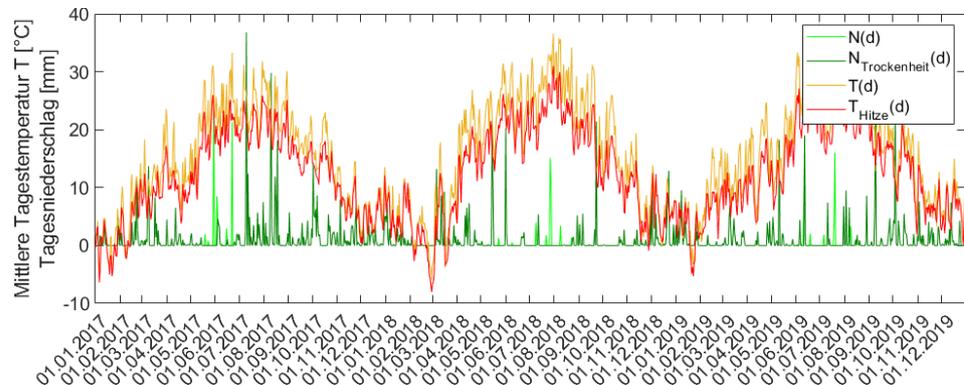


Abbildung 7: Angesetzte Veränderung des Niederschlags N und der Temperatur T für das Trockenheits- bzw. Hitzeszenario

Abbildung 7 zeigt die angesetzte Veränderung des Niederschlags N und der Temperatur T. Es wird deutlich, dass im Trockenheitsszenario einige Niederschläge in den Sommermonaten ausbleiben, während im Hitzeszenario die mittlere Tagetemperatur durchgehend um 1,5°C erhöht ist.

Aus den Modellen $V_{sim}(T, N_{Trockenheit})$, $V_{sim}(T_{Hitze}, N)$ und $V_{sim}(T_{Hitze}, N_{Trockenheit})$ werden zwei Szenarien berechnet, die für die weiteren Untersuchungen verwendet werden.

Es wird ein Hitze-Szenario $V_{Hitze}(d)$ erstellt, für das gilt:

$$V_{Hitze}(d) = V_{gem}(d) \left| \begin{array}{l} T(d) \leq 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) \leq 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

$$V_{Hitze}(d) = V(T_{Hitze}, N_{Trockenheit})(d) - V_{sim}(T, N_{Trockenheit})(d) \left| \begin{array}{l} T(d) > 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) > 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

Falls $V_{Hitze}(d) < V_{gem}(d)$, wird $V_{Hitze}(d) = V_{gem}(d)$ gesetzt.

Zudem wird ein Hitze- & Trockenheitsszenario $V_{Hitze\&Trockenheit}(d)$ erstellt, für das gilt

$$V_{Hitze\&Trockenheit}(d) = V_{gem}(d) \left| \begin{array}{l} T(d) \leq 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) \leq 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

$$V_{Hitze\&Trockenheit}(d) = V(T_{Hitze}, N_{Trockenheit})(d) \left| \begin{array}{l} T(d) > 19^\circ\text{C} \\ V_{gem}(d) > 4750\text{m}^3 \end{array} \right.$$

Falls $V_{Hitze\&Trockenheit}(d) < V_{Hitze}(d)$, wird $V_{Hitze\&Trockenheit}(d) = V_{sim,Hitze}(d)$ gesetzt.

Tabelle 1 verdeutlicht die Zunahme des Wasserverbrauchs im Hitze- und Hitze- & Trockenheits-Szenario.

Szenario	Änderung an trockenen und heißen Tagen gegenüber V_{gem}			
	Gesamtwasser- verbrauch [%]	Maximale Erhöhung [%]	Maximale Erhöhung [m^3/d]	Tag der maximalen Erhöhung [m^3/d]
V_{Hitze}	+3,5	+12,3	+593	03.06.17
$V_{Hitze\&Trockenheit}$	+9,6	+35,6	+1751	23.08.18

Tabelle 1: Änderung des Wasserverbrauchs im Hitze- und Hitze- und Trockenheitsszenario

Die modellierte Zunahme des Wasserverbrauchs an heißen und trockenen Tagen liegt im Mittel bei 9,6% und maximal bei 35,6%. Zur Einschätzung dieser modellierten Zunahmen sei auf [3] verwiesen, dass eine Zunahme des Wasserverbrauchs eines Versorgungsgebietes um 20% bei Hitze und Trockenheit nennt.

Diese Methode zur Modellierung des gestiegenen Wasserverbrauchs bei erhöhten Temperaturen und ausbleibendem Niederschlag ist als pragmatischer Ansatz einzustufen, um die im Projekt benötigten Wasserverbrauchszeitreihen bei Hitze und Trockenheit zu generieren.

In weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen sollten überprüft werden, inwieweit durch diese Methode tatsächliche Anstiege des Wasserverbrauchs durch Hitze oder Trockenheit rekonstruiert oder prognostiziert werden können.

2.5 Eingangsdatsatz 2030

Zusätzlich zum Eingangsdatsatz 2019 aus Kapitel 2.2 wird für die Flexibilitätsoptimierungen in Kapitel 4 ein weiterer Eingangsdatsatz modelliert, der als Eingangsdatsatz 2030 bezeichnet wird. Dieser enthält im Gegensatz zum Eingangsdatsatz 2019 zum einen auch den Wasserverbrauch zur Gartenbewässerung (siehe Kapitel 2.3) und bildet zum anderen erhöhten Trinkwasserverbrauch aufgrund von Hitze und Trockenheit ab (siehe vorangegangenes Kapitel 2.4). Der erhöhte Wasserverbrauch aufgrund von Trockenheit und Hitze war bereits in Abbildung 5 durch $V_{sim,Hitze}(d)$ und $V_{sim,Hitze\&Trockenheit}(d)$ gekennzeichnet. Zur Erstellung des Eingangsdatsatzes 2030 wird für Tage, an denen $V_{sim,Hitze}(d)$ und $V_{gem}(d)$ übereinstimmen, die Differenz aus $V_{gem}(h)$ und $Garten(h) + Sonstiges(h)$ entsprechend Kapitel 2.2 durch die DEMAPLAN-Anteile der Wasserverbrauchsarten (WC, Bad & Körperpflege, Waschmaschine, Küche und Geschirrspüler aus Abbildung 3 ersetzt, wobei keine Basislast angesetzt wird. Für Tage, an denen sich $V_{sim,Hitze}(d)$ und $V_{gem}(d)$ unterscheiden (Hitzetage), wird zunächst die Differenz $V_{sim,Hitze}(d) - V_{gem}(d)$ berechnet.

Die Einhüllenden der DEMAPLAN-Muster ohne Garten und Sonstiges (siehe Abbildung 2) werden daraufhin, unterschieden nach Werktagen und Wochenenden bzw. Feiertagen, tagesweise auf diese Differenz skaliert und zu $V_{gem}(h)$ addiert, um $V_{sim,Hitze}(h)$ in stündlicher Auflösung zu modellieren. Daraufhin wird die Differenz aus $V_{sim,Hitze}(h) - Garten(h) - Sonstiges(h)$ entsprechend Kapitel 2.2 durch die DEMAPLAN-Anteile der Wasserverbrauchsarten ohne Garten & Sonstiges ersetzt, wobei die Zusammensetzung aus Abbildung 8 anstelle von Abbildung 3 verwendet wird. Abbildung 8 ergibt sich aus der Erhöhung der Wasserverbrauchsart „Bad & Körperpflege“ um ca. 17,5% (wobei Duschen mit 83% und Baden mit 17% gewichtet wurden) und der Verringerung der Wasserverbrauchsart „Waschmaschine“ um ca. 1,8% an heißen Tagen gemäß einer im Projekt durchgeführten Umfrage [4]. Mit „etwas häufiger als sonst“ angegebene, hitzebedingte Verbrauchsänderungen wurden dabei als +50% interpretiert; „seltener als sonst“ wurde mit -50% interpretiert.

Zur Modellierung des erhöhten Wasserverbrauchs im Szenario Hitze & Trockenheit $V_{sim,Hitze\&Trockenheit}(d)$ wird $Garten(h)$ tagesweise auf die Differenz $V_{sim,Hitze\&Trockenheit}(d) - V_{sim,Hitze}(d)$ skaliert und als zusätzlicher Wasserverbrauch zur Gartenbewässerung aufgrund von Trockenheit aufgefasst. Ansonsten entsprechen sich die Wasserverbräuche in den Szenarien Hitze und Hitze & Trockenheit.

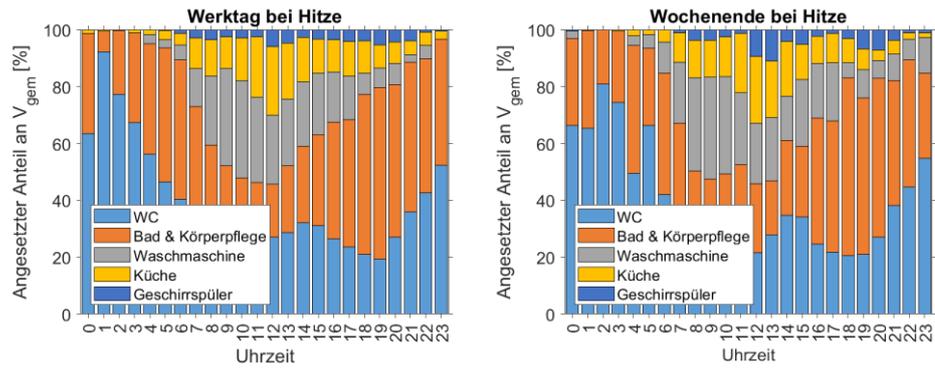


Abbildung 8: Anteile der Wasserverbrauchsarten am gesamten Wasserverbrauch pro Stunde gemäß DEMAPLAN [1] und der Umfrage zum Wasserverbrauchsverhalten an heißen Tagen [4]

Die verbrauchsspezifischen Trinkwasserzeitreihen des Hitze- & Trockenheitsszenarios werden im Folgenden als „Eingangsdatensatz 2030“ bezeichnet. Es ist wie beim Eingangsdatensatz 2019 zu beachten, dass es sich hierbei um synthetische Zeitreihen handelt, die sich zwar für die weiteren Untersuchungen eignen, deren Repräsentativität für reale Trinkwasserversorgungsgebiete jedoch zu überprüfen ist.

2.6 Flexibilitätsoptionen

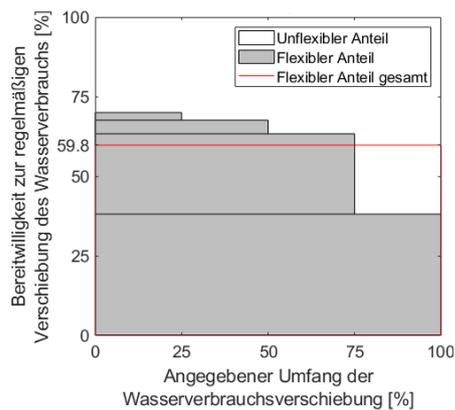


Abbildung 9: Ermittlung des Verschiebungspotenzials der Flexibilitätsoption Geschirrspüler aus Umfrageergebnissen [5]

Die Wasserverbrauchsarten Garten, Waschmaschine, Geschirrspüler und Bad & Körperpflege werden als potenzielle Flexibilitätsoptionen (FlexOpt) betrachtet. Auch Trinkwasserspeicher werden als Flexibilitätsoptionen verstanden, jedoch in Kapitel 2.7 gesondert behandelt. Zur Quantifizierung der Flexibilitätsoptionen wird auf die Sonderbefragung [5] zurückgegriffen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde. Abbildung 9 verdeutlicht am Beispiel der Flexibilitätsoption Geschirrspüler, wie aus den Umfrageergebnissen zur Bereitswilligkeit zur regelmäßigen Verschiebung des Wasserverbrauchs und zum Umfang der Verbrauchsverschiebung das Flexibilitätspotenzial berechnet wird. Die

Bereitswilligkeit ergibt sich aus der prinzipiellen Bereitswilligkeit zur Verbrauchsverschiebung (hierfür wurden 88,6% angesetzt), multipliziert mit der verbrauchsartenspezifischen Bereitswilligkeit (79% im Fall von Geschirrspülern), multipliziert mit der Bereitswilligkeit einen bestimmten Umfang zu verschieben. Die entsprechenden Produkte sind in Abbildung 9 als graue Flächen dargestellt und werden als „Flexibler Anteil“ bezeichnet. Das Flexibilitätspotenzial zur zeitlichen Verschiebung ergibt sich als das Verhältnis des „Flexiblen Anteils“ zum gesamten Wasserverbrauch für Geschirrspülen zu 59,8%. Die übrigen Flexibilitätspotenziale sind in Tabelle 2 aufgelistet. Für das Flexibilitätspotenzial von Bad & Körperpflege wurden Umfrageergebnisse zu Duschen und Baden mit 83% (Duschen) und 17% (Baden) gewichtet und aufsummiert. Diese Flexibilitätspotenziale werden auf unterschiedliche Art den Eingangsdatensätzen der vorangegangenen Kapitel zugeordnet. Während für den Eingangsdatensatz 2019

nur Waschmaschine und Geschirrspüler als Flexibilitätsoptionen berücksichtigt werden, kommen für den Eingangsdatensatz 2030 noch Bad & Körperpflege sowie Garten hinzu. Die Flexibilitätspotenziale sind für Eingangsdatensatz 2030 aber nicht nur deswegen höher, weil vier anstelle von zwei Flexibilitätsoptionen zugeordnet werden; im Eingangsdatensatz 2030 macht der als „Sonstiges“ bezeichnete Wasserverbrauch mit im Mittel 17% des gesamten Wasserverbrauchs einen kleineren Anteil aus als der als „Basislast“ bezeichnete Anteil im Eingangsdatensatz 2019 mit im Mittel ca. 33%. Entsprechend größer sind die modellierten Wasserverbräuche für Geschirrspüler, Waschmaschine, Garten und Bad & Körperpflege im Eingangsdatensatz 2030 und somit auch die Flexibilitätspotenziale im m³.

	Trinkwasserverbrauchsart	Geschirrspüler	Waschmaschine	Garten	Bad & Körperpflege
Eingangsdatensatz 2019	Flexibilitätspotenzial [%]	59,8	61,5	-	0
	Unflexibler Anteil [%]	40,2	38,5	-	100
Eingangsdatensatz 2030	Flexibilitätspotenzial [%]	59,8	61,5	58,7	35,8
	Unflexibler Anteil [%]	40,2	38,5	41,3	64,2

Tabelle 2: Flexibilitätspotenzial zur zeitlichen Verschiebung der betrachteten Flexibilitätsoptionen

Werden diese Flexibilitätspotenziale mit den Anteilen der jeweiligen Wasserverbrauchsart nach Abbildung 4 gewichtet, ergibt sich ein Gesamtpotenzial von ca. 1/3 des Wasserverbrauchs von Haushalten. Neben den Flexibilitätspotenzialen müssen auch die Zeiträume, in die die flexiblen Wasserverbräuche verschoben werden können, definiert werden. Abbildung 10 zeigt die angesetzten Zeitfenster für Flexibilitätseinsatz.

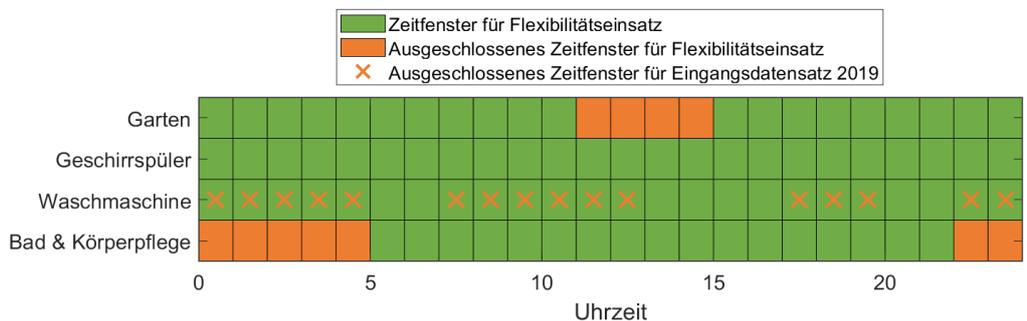


Abbildung 10: Angesetzte Zeitfenster für Flexibilitätseinsatz

Auch hinsichtlich der ihnen zugeordneten Zeitfenster für Flexibilitätseinsatz unterscheiden sich Eingangsdatensatz 2019 und 2030. Für ersteren ist der Einsatz der Flexibilitätsoption Waschmaschine die Zeiträume von 5 bis 7 Uhr, 13 bis 17 Uhr und 20 bis 22 Uhr beschränkt.

2.7 Trinkwasserspeicher

Neben den Flexibilitätsoptionen Garten, Waschmaschine, Geschirrspüler und Bad & Körperpflege werden auch Trinkwasserspeicher als mögliche Flexibilitäten betrachtet. Hierfür muss das Speichervolumen vorgegeben werden.

Zur Dimensionierung der Trinkwasserspeicher wird für jeden Tag der Jahre 2017 bis 2019 der Speicherstand(h) eines Trinkwasserspeichers berechnet, der sich aus einem minimalen, über den Tag konstanten Speicherzufluss speist und in der Lage ist den Wasserverbrauch $V_{gem}(h)$ des Tages zu decken.

$$\text{Speicherzufluss} = \sum_{h=0}^{24} V_{gem}(h)/24$$

$$\text{Speicherstand ohne Anfangsstand}(h) = \sum_{n=0}^h \text{Speicherzufluss} - V_{gem}(n)$$

$$\text{Anfangsstand} = \min\{\text{Speicherstand ohne Anfangsstand}\}$$

$$\text{Speicherstand}(h) = \text{Anfangsstand} + \text{Speicherstand ohne Anfangsstand}(h)$$

Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Verläufe für den Tag, an dem sich das Maximum von 1381m³ des notwendigen Speicherstands über alle drei Jahre ergibt. Für die Einsatzoptimierungen in Kapitel 4 werden mit 150m³ und 800m³ nur ca. 10% bzw. ca. 60% 150m³ des sehr großen, für eine Glättung des Speicherzuflusses am extremsten Tag notwendigen Speichervolumens von 1381m³ verwendet. Im Folgenden werden die Investitionskosten für die Speichervolumina von 150m³ und 800m³ betrachtet. Es wird dabei unterschieden, ob sich diese Volumina durch einzelne, zentrale Speicher oder eine Vielzahl kleiner, dezentraler Speicher ergeben.

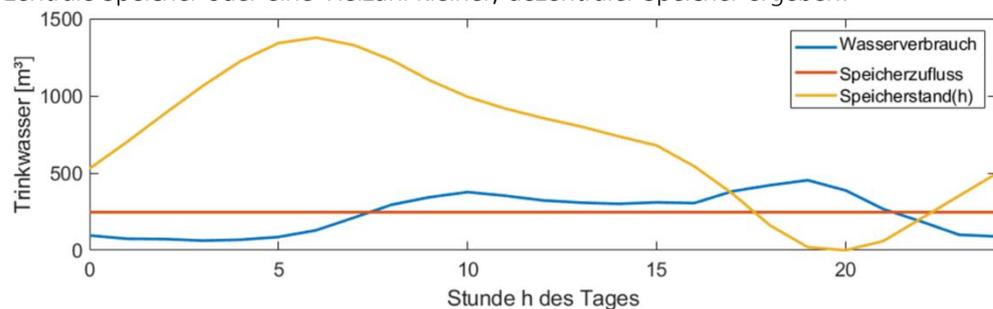


Abbildung 11: Darstellung des Prinzips zur Ermittlung des Volumens von Trinkwasserspeichern zur vollständigen Glättung des Speicherzuflusses

Für Tabelle 3 wurden die Investitionskosten von insgesamt zehn großen, zentralen Trinkwasserspeichern recherchiert, wovon sich acht in Deutschland und zwei in Österreich befinden. Die Investitionskosten pro Speichervolumen liegen zwischen 0,8 k€/m³ und 3,5 k€/m³.

Jahr	Speicher- volumen V [m ³]	Investitions- kosten C [k€]	Investitionskosten pro Speichervolumen [k€/m ³]	Quelle
2013	600	765	1,3	[6]
2015	1200	2150	1,8	[7]
2016	500	403	0,8	[8]
2017	2200	2080	0,9	[9]
2019	1200	1450	1,2	[10]
2022	300	736	2,5	[11]
2022	500	1700	3,4	[12]
2022	1000	3500	3,5	[13]
2022	3000	8000	2,7	[14]
2022	4500	7250	1,6	[15]

Mittelwert: 2,0

Tabelle 3: Recherchierte Investitionskosten in große, zentrale Trinkwasserspeicher

Die beiden Regressionskurven/Trendlinien C1(V) und C2(V) aus allen zehn Datenpaaren zeigen in Abbildung 12 keine eindeutige Abnahme der Investitionskosten pro Speichervolumen bei zunehmenden Speichervolumen. Diese Abnahme wird allerdings deutlich, wenn in Regressionskurve C3(V) nur die fünf Speicher betrachtet werden, die vor 2022 errichtet wurden. Die fünf Speicher, die 2022 errichtet wurden, weisen deutlich höhere Investitionskosten pro Speichervolumen als die älteren Speicher auf.

$$E(Q) = \rho \cdot g \cdot \frac{Q \cdot (\Delta H + R \cdot Q^2)}{\square(Q)}$$

Es werden in [16] zwei Beispiele dieser „typischen“ Verläufe gezeigt, die im Folgenden als „Pumpleistungskennlinien“ bezeichnet werden. Für die folgenden Untersuchungen wird in Absprache mit den Praxispartnern eine Pumpleistungskennlinie gemäß Abbildung 13 verwendet, die sich an den Beispielen der flachen und der steilen Pumpleistungskennlinie aus [16] orientiert. Die verwendete Pumpleistungskennlinie ist in Abbildung 13 in normierter Form dargestellt. Die zur Normierung verwendete maximal geförderte Trinkwassermenge $V_{\max 1}$ entspricht dem Maximum der verwendeten Trinkwasserverbrauchszeitreihe $V_{\text{gem}}(h)$ des betrachteten Trinkwasserversorgungsgebietes (siehe Kapitel 2.1). Die ebenfalls gezeigte Trinkwassermenge $V_{\max 2}$ entspricht dem Maximum des unflexiblen Anteils des Trinkwasserverbrauchs.

3 Strompreise

Der gesamte Strompreis [ct/kWh] setzt sich aus einer Reihe von Preisen zusammen, die sich zu den Bestandteilen Börsenpreis, Netzentgelte und Abgaben gruppieren lassen. Abbildung 14 zeigt die angesetzte Strompreiszusammensetzung, die sich für die Jahre 2019 und 2030 ohne Einsatz von Flexibilitäten ergibt. Unter Abgaben sind hierbei die Umlage § 19 Abs. 2 StromNEV für die ersten 1 GWh und über 1 GWh hinausgehend, die Umlage für abschaltbare Lasten § 18 AbLaV, die Offshore-Netzumlage § 17 f EnWG, die KWK-Umlage §§ 26 a und 26 b KWKG aus [17] und die Kosten für Messstellenbetrieb, Konzessionsabgabe und Stromsteuer aus [18] zusammengefasst. Die EEG-Umlage aus [18] wird in Abbildung 14 für das Jahr 2019 separat ausgeführt, um den Einfluss ihres angesetzten Wegfalls für das Jahr 2030 zu verdeutlichen. Die Abgaben inkl. EEG-Umlage fallen, im Gegensatz zu den Netzentgelten (basierend auf [17]) und dem day-ahead Börsenpreis, unabhängig davon an, um welche Uhrzeit der Strom verbraucht wird. Somit lassen sich durch einen innertägigen Einsatz von Flexibilitäten höchstens ca. 37% des Strompreises im Jahr 2019 und ca. 67% im Jahr 2030 reduzieren. Für die Abgaben werden keine Preisveränderungen von 2019 auf 2030 angenommen. Die Änderung der Netzentgelte rührt vom unterschiedlichen Verlauf des Wasserverbrauchs in Eingangsdatensatz 2019 und 2030 her.

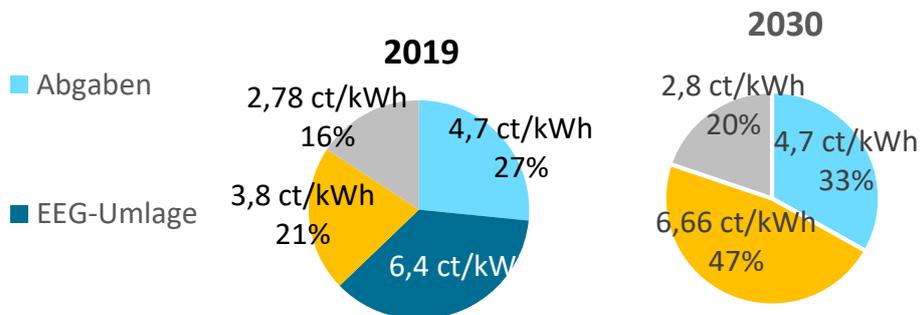


Abbildung 14: Angesetzte Zusammensetzung des Strompreises 2019 (links) und 2030 (rechts) ohne Flexibilitätseinsatz.

3.1 Börsenstrompreise

Abbildung 15 zeigt Charakteristiken des tatsächlichen day-ahead Börsenstrompreises 2019 [19] und des in [20] für die Zwecke von FLEXITLITY modellierten day-ahead Börsenstrompreises 2030.

Die mittleren Tagesgänge im linken Teil der Abbildung verdeutlichen, dass der Strompreis 2019 in der Regel seinen minimalen Wert in den ersten Tagesstunden und Spitzen um ca. 7 und ca. 18. Uhr aufweist. Darin stimmt der Strompreis 2019 in der Regel relativ genau mit dem Wasserverbrauch ohne Garten gemäß Abbildung 2 überein, was auf ein hohes Potenzial zur Stromkosteneinsparung bei zeitlicher Verschiebung des Wasserverbrauchs hinweist. Der Strompreis 2030 hat hingegen in der Regel sein Minimum im Zeitraum von 7 bis 14 Uhr, was seine Ursache in der zu diesen Zeiten hohen PV-Einspeisung haben kann. Seine Spitzen liegen bei 5 und 18 Uhr. Damit stimmt der Strompreis 2030 weniger genau mit dem Wasserverbrauch überein. Nichtsdestotrotz sind für 2030 höhere Stromkosteneinsparungen als für 2019 zu erwarten. Dies liegt daran, dass der Einsatz von Flexibilitäten in Kapitel 4 für jeden Tag des Jahres separat optimiert wird und die durch einen kostenoptimalen Einsatz der Flexibilitäten erreichbaren Kosteneinsparungen demzufolge von den Strompreisschwankungen innerhalb der einzelnen Tage abhängen. Das im Vergleich zu 2019 deutlich häufigere Auftreten von hohen innertägigen Strompreisschwankungen im Jahr 2030 lässt sich im linken Teil von Abbildung 15 bereits erahnen und wird in den

Häufigkeitsverteilungen im rechten Teil von Abbildung 15 eindeutig ausgewiesen. Die Börsenstrompreise 2019 werden dem Eingangsdatensatz 2019 zugordnet, die Börsenstrompreise 2030 dem Eingangsdatensatz 2030.

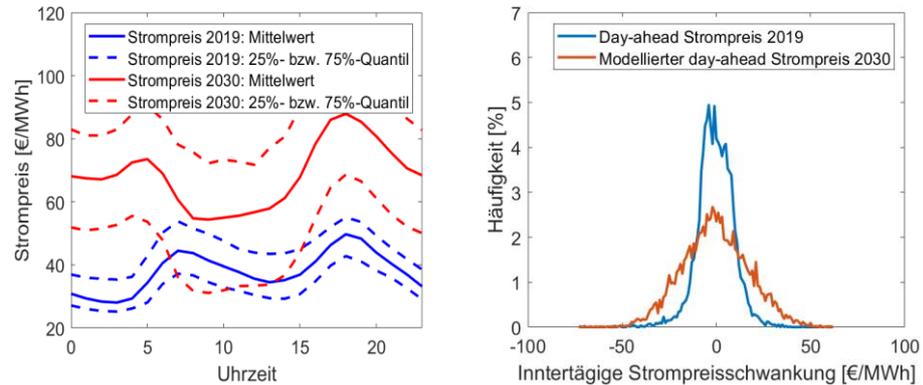


Abbildung 15: Charakteristiken der day-ahead Börsenstrompreise 2019 [19] und 2030 [20]

3.2 Netzentgelte

Neben der Ausnutzung von (inntägigen) Schwankungen des Börsenstrompreises lassen sich durch eine gezielte zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs auf Zeiten mit geringen Stromnetzbelastungen („atypische Netznutzung“) auch die Netzentgelte reduzieren. Die Netzentgelte setzen sich in der Regel aus einem Arbeitspreis und einem Leistungspreis zusammen, für die gemäß [17] die Werte 0,79 €/kWh bzw. 104,2 €/kW angesetzt werden. Der für den Leistungspreis relevante Leistungswert [kW] entspricht dem höchsten Leistungswert des Stromverbrauchs, der während des gesamten betrachteten Jahres innerhalb von so genannten Hochlastzeitfenster aufgetreten ist. Die Hochlastzeitfenster wurden für die folgenden Einsatzoptimierungen aus [21] entnommen.

4 Optimierung des Flexibilitätseinsatzes

In diesem Kapitel werden das Optimierungsmodell (Kapitel 4.1), die Durchführung (Kapitel 4.2) und die Ergebnisse (Kapitel 4.3) des optimalen Einsatzes der Flexibilitätsoptionen aus Kapitel 2.6 und von Trinkwasserspeichern aus Kapitel 2.7 beschrieben.

4.1 Entwicklung des Optimierungsmodells

In Abbildung 16 ist das Modell zur Abbildung der Trinkwasserversorgung schematisch dargestellt (vgl. Abbildung 1). Auf der linken Seite sind die Stromquelle aus dem Netz und die Wasserquelle dargestellt. Dazu gehört eine Darstellung des Pumpsystems und eines Wasserspeichers. Auf der rechten Seite ist ein typischer Endverbraucher gezeigt. Jeder Verbraucher hat eine vordefinierte Anzahl von Wasserverbrauchsarten nach Kapitel 2.2, die eine tägliche Wasserverbrauchskurve mit einer stündlichen Zeitaufösung haben. In der Abbildung ist der Wasserfluss durch eine blaue Linie und der Stromfluss durch eine grüne Linie dargestellt. Als Verknüpfungspunkt an den Verbrauch gibt es einen blauen Bilanzpunkt, bei dem die Summe der Zu- und Abflüsse Null ergeben sollte, ebenso wie bei dem Wasserabfluss. Dies bedeutet, dass keine Modellierung von Leitungsverlusten oder Druckdifferenzen aufgrund der Höhe berücksichtigt wird.

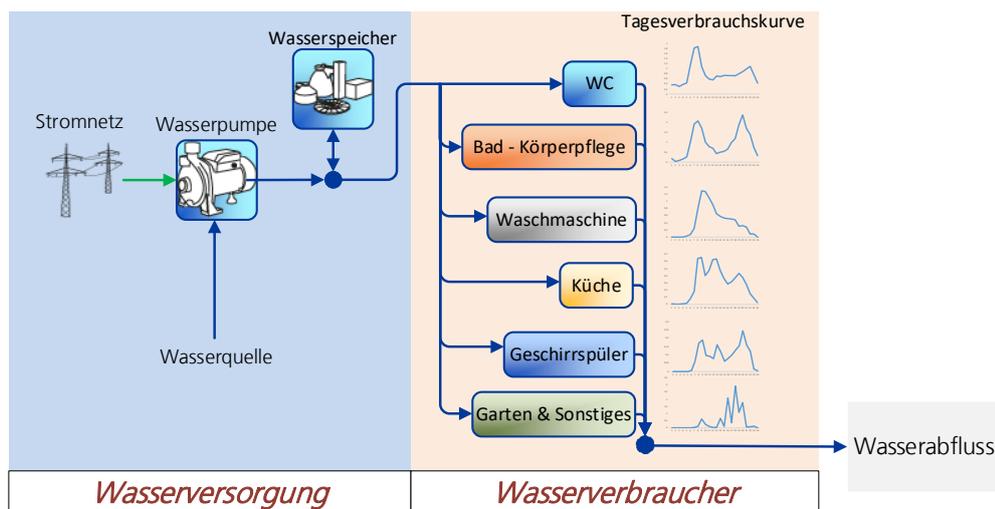


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Systems

Für die Untersuchung wird ein mathematisches Optimierungsmodell benötigt, in dem technische Eigenschaften und Beschränkungen berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, die Auswirkungen von veränderten Rahmenbedingungen in einem Wasserversorgungssystem zu untersuchen. Durch den modularen Aufbau des Skripts wird das jeweilige betriebliche Planungsproblem in Abhängigkeit von den Eingangsdaten und der gewünschten Systemkonfiguration gelöst.

Eine Option wird mit der Varianzminimierung des Verbrauchs während eines Tages modelliert. Die Varianzoptimierung ermöglicht eine geglättete Kurve. Die Varianz ist ein Streuungsmaß, welches die Verteilung von Werten um den Mittelwert kennzeichnet.

$$\min \text{Var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

Dabei ist die Variable x_i^{flex} definiert als der Wasserverbrauch für jede Stunde i und für jede Verbrauchsart. Die Tagessumme muss mit dem Parameter D_{day}^e übereinstimmen, der den Gesamtwasserverbrauch für jeden Tag day und für jede Verbrauchsart e darstellt. Dieser Verbrauch wird mit dem Flexibilitätsprozentsatz $flex\%$ aus Tabelle 2 multipliziert, um die Gesamtmenge zu begrenzen, die während des Tages verteilt werden kann.

$$\sum_{i=1}^n x_i^{flex} = D_{day}^e \times flex\%$$

Komplementär wird die Variable x_i^{noflex} definiert, die den nicht flexiblen Anteil darstellt.

$$\sum_{i=1}^n x_i^{noflex} = D_{day}^e \times (1 - flex\%)$$

Unter Berücksichtigung der oben genannten Gleichungen für einen Mustertag lässt sich die Verschiebung wie folgt darstellen, wobei die Nachfragespitzen in diesem Beispiel in die Stunden zwischen 0 und 5 Uhr verschoben werden.

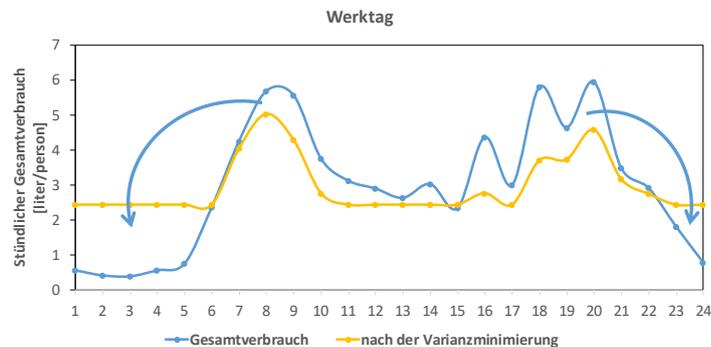


Abbildung 17: Beispiel der Verbrauchsverschiebung unter Varianzoptimierung

Mit diesen Variablen lassen sich die Zeitfenster definieren, in denen eine Nachfrageverschiebung möglich ist (siehe Kapitel 2.6).

Alternativ zur Varianzoptimierung wird eine Zielfunktion angesetzt, die die stündlichen Stromkosten für das Wasserpumpen minimiert.

$$\min \text{Kosten} = \sum_{i=1}^n c_i$$

Die Kosten c für jede Stunde ergeben sich aus der Multiplikation der erforderlichen Pumpenergie (siehe Kapitel 2.8) mit dem stündlichen Strompreis (siehe Kapitel 3)

$$c_i = E(Q_i) \times \text{Preis}_i$$

Um die Wasserpumpe optimal nutzen zu können und einen Ausgleich zu den Schwankungen des Strompreises innerhalb eines Tages zu ermöglichen, wird auch das mathematische Modell eines Wasserspeichers verwendet.

$$V_i = V_{i-1} + Qin_i - Qout_i$$

Wobei $Qout_i$ dem Gesamtwasserbedarf aller Verbrauchsarten für jede Stunde entspricht. Die Wassermenge Qin_i wird abgepumpt und in einer spezifischen

Variablen V_i akkumuliert. Dadurch kann das Wasser zu einem Zeitpunkt gepumpt werden, zu dem der Strompreis niedrig ist, um zu einem anderen Zeitpunkt verbraucht zu werden.

Die Optimierung wird mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen Ansatzes unter Verwendung der Energiemanagementsoftware EnergyPilot [27] gelöst.

Die Optimierungen können für einzelne Tage durchgeführt werden, jedoch werden für die Durchführungen im folgenden Kapitel ganze Jahre betrachtet.

4.2 Durchführung

Das Optimierungssystem ist als ein Punktmodell gemäß Abbildung 1 und Abbildung 16 aufgebaut, d.h. es werden keine Berechnungen des Wasserleitungsnetzes, etwa Druckberechnungen, durchgeführt.

Es wurden 15 verschiedene Varianten der Flexibilitätsoptimierung durchgeführt, deren Unterscheidung Zeile 1 bis 5 von Tabelle 5 entnommen werden kann.

Das Optimierungssystem liest entweder den Eingangsdatensatz 2019 und die Strompreise 2019 oder die entsprechenden Zeitreihen für das Jahr 2030 ein. Eine weitere Eingangsgröße stellt die Pumpleistungskennlinie aus Kapitel 2.8 dar, die das Optimierungssystem nutzt, um von Wasserverbrauch, sei er bereits durch die Einsatzoptimierung verschoben oder nicht, über Pumpleistung, Börsenstrompreis und Netzentgeltssystematik auf Pumpkosten umzurechnen.

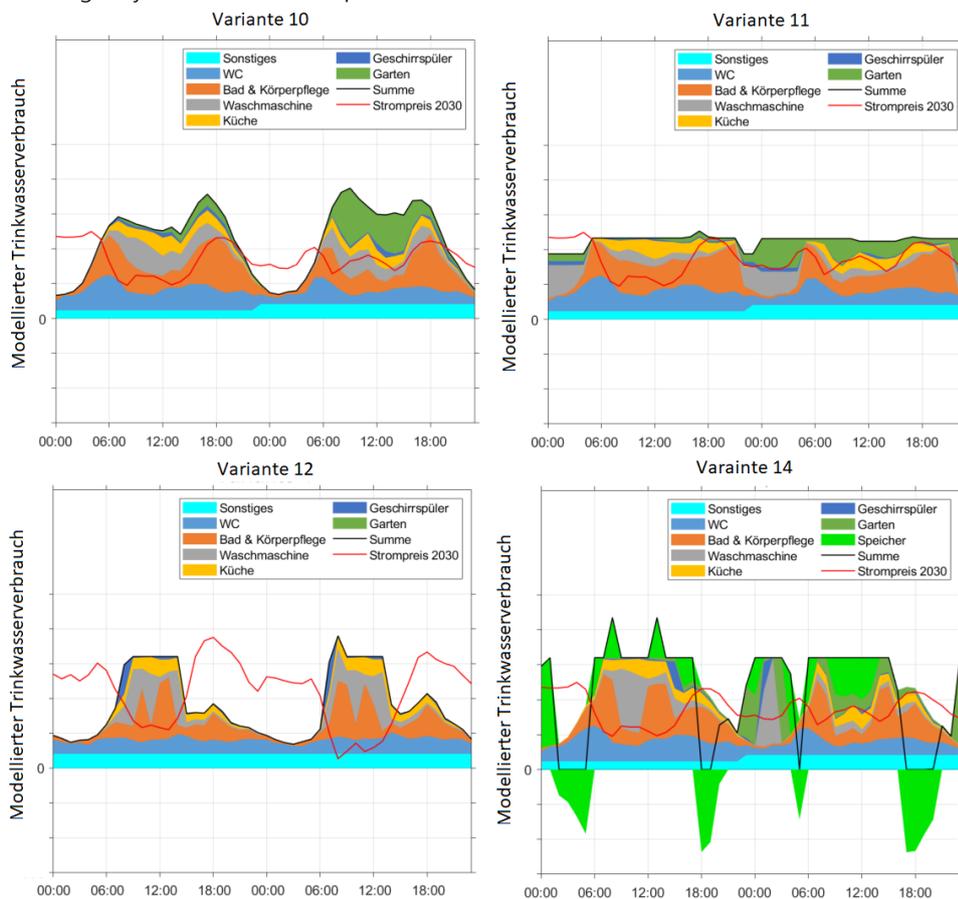


Abbildung 18: Verdeutlichung der Auswirkungen der Flexibilitätseinsatzoptimierung

Sofern Flexibilitätsoptionen in einer Optimierungsvariante berücksichtigt werden, teilt das System den Wasserverbrauch aus dem Eingangsdatensatz in einen flexiblen und unflexiblen Anteil auf (siehe auch Abbildung 1). Der unflexible Anteil ergibt sich dabei

aus dem Eingangsdatensatz, dessen Zeitreihe einer jeden Wasserverbrauchsart mit dem entsprechenden Wert des unflexiblen Anteils aus Tabelle 2 multipliziert wird. Der flexible Anteil wird entsprechend vom Eingangsdatensatz abgezogen und steht dem Optimierungssystem unter Berücksichtigung der Zeitfenster aus Abbildung 10 zum zeitlich verschobenen Einsatz zur Verfügung.

Es werden zwei Optimierungsziele betrachtet. Zum einen werden die Flexibilitäten so eingesetzt, dass eine Minimierung der Pumpkosten erreicht wird (Minimierungsziel „Kosten“). Zum anderen wird mit dem Flexibilitätseinsatz eine Minimierung der Varianz des gesamten Wasserverbrauchs erreicht (Minimierungsziel „Varianz“). Hierdurch werden der resultierende Wasserverbrauch möglichst glatt gehalten und Verbrauchsspitzen so weit wie möglich reduziert (vergleiche Variante 11 mit Variante 10 in Abbildung 18).

Das Minimierungsziel „Kosten“ kann dazu führen, dass niedrige Strompreise derart intensiv ausgenutzt werden, dass der Wasserverbrauch mit Flexibilitätseinsatz sein Maximum ohne Flexibilitätseinsatz $V_{\max 1}$ [m³/h] übersteigt, was ggf. nur mit neuen oder größeren Pumpen möglich wäre. Um neue Maxima des Wasserverbrauchs zu verhindern, wird die Restriktion in das Optimierungssystem eingeführt, dass der Wasserverbrauch nach Flexibilitätseinsatz $V_{\max 1}$ nicht übersteigen darf. Diese Restriktion wird in Tabelle 5 als „Beschränkung“ bezeichnet. Bei Variante 15 wurde diese Beschränkung auf $V_{\max 2}$ [m³/h] reduziert, was das Maximum des Wasserverbrauchs abzüglich aller Flexibilitäten (ohne Speicher) ist. Die Ergebnisse von Variante 15 sind sehr vergleichbar zu Variante 12. Die stärkere Beschränkung führt zu einer etwas geringeren Jahrespumpenergie und damit auch zu etwas niedrigeren Abgaben, deren Minimierung allerdings nicht Teil der Optimierung war.

Abbildung 18 verdeutlicht die Auswirkungen des Flexibilitätseinsatzes auf die Zeitreihen des resultierenden Wasserverbrauchs. Variante 10, für die kein Flexibilitätseinsatz durchgeführt wurde, dient zum Vergleich.

Tabelle 5 zeigt alle durchgeführten Optimierungsvarianten und deren Ergebnisse.

4.3 Ergebnisinterpretation

Hinsichtlich der Jahresfördermenge in Zeile 6 muss beachtet werden, dass der Wasserverbrauch im Eingangsdatensatz 2030 wegen des modellierten Mehrverbrauchs bei Trockenheit und Hitze um ca. 1,2% höher ist als im Eingangsdatensatz 2019.

Hinsichtlich der Jahreshöchstlast in Zeile 7 fällt auf, dass Varianten mit dem Optimierungsziel minimale Kosten die Beschränkung aus Zeile 5 insbesondere bei Varianten mit großem Speicher weitestgehend ausnutzen, während Varianten mit dem Optimierungsziel minimale Varianz eine Reduzierung der Jahreshöchstlast bewirken.

Durch Vergleich der Jahreshöchstlast der Varianten 11 bis 15 mit Variante 10 wird deutlich, dass die aufgrund von Hitze und Trockenheit auf ca. 103% gestiegene Jahreshöchstlast durch Flexibilitätseinsatz zumindest auf 100% reduziert werden kann und damit die Klimaresilienz des Trinkwasserversorgungssystems zur Bewältigung des modellierten, klimabedingten Verbrauchsanstiegs gewährleistet ist.

Die Jahrespumpenergie in Zeile 8 liegt für Eingangsdatensatz 2030 um ca. 1,5% höher als für Eingangsdatensatz 2019 und nimmt für Varianten mit Kostenminimierung und großen Speichern leicht höhere Werte an, was sich durch die Inkaufnahme von geringer Pumpeffizienz bei hoher Fördermenge (siehe Pumpleistungskennlinie in Abbildung 13) zugunsten von niedrigen Strompreisen erklärt.

Zeile 9 enthält die gesamten berechneten Jahrespumpkosten. Es ist zu beachten, dass für Eingangsdatensatz 2030 bereits ca. 20% niedrigere Jahrespumpkosten als für Eingangsdatensatz 2019 vorliegen, trotz höherer Fördermenge. Dies erklärt sich durch den Wegfall der EEG-Umlage und die insgesamt niedrigeren Abgaben (siehe Zeile 11), deren Verringerungen über die höheren Kosten an der Strombörse (Zeile 10) hinausgehen. Durch die größtmögliche angesetzte Ausnutzung von Flexibilitäten lassen sich für Eingangsdatensatz 2019 ca. 8% und für Eingangsdatensatz 2030 ca. 17%

einsparen. Dies ergibt sich durch Vergleich der gesamten Pumpkosten von Variante 9 mit Variante 1, bzw. von Variante 14 mit Variante 10.

Wird das Potenzial zur Pumpkosteneinsparung durch Einsatz von Speichern für den Eingangsdatensatz 2019 den Investitionskosten für Speicher (siehe Kapitel 2.7) gegenübergestellt, ergeben sich Amortisationszeiten ohne Berücksichtigung möglicher Kreditzinsen gemäß Tabelle 4.

Speichertyp	Speichervolumen [m ³]	Speicheranzahl	Gesamtes Speichervolumen V [m ³]	Formel zur Bestimmung der Investitionskosten aus Kapitel 2.7	Investitionskosten [k€]	Resultierende Amortisationszeit [a]
zentral	150	1	150	C1(V)	445	37
zentral	150	1	150	C2(V)	201	17
dezentral	2	75	150	C4(V)	612	51
zentral	800	1	800	C1(V)	1582	105
zentral	800	1	800	C2(V)	1589	106
dezentral	2	400	800	C4(V)	3264	218

Tabelle 4: Bestimmung der Amortisationszeiten für Trinkwasserspeicher

Die Amortisationszeiten ergeben sich als Quotient aus Investitionskosten und Pumpkosteneinsparpotenzial (siehe Zeile 9 in Tabelle 5 für Prozentangaben) und stellen aufgrund des nicht eindeutigen Zusammenhangs zwischen Investitionskosten und Speichervolumen (siehe Kapitel 2.7) nur eine ungefähre Abschätzung dar. Insbesondere für den zentralen 150m³-Speicher erscheint nach dieser Abschätzung aufgrund der relativ geringen Amortisationszeit zwischen 17 und 37 Jahren eine Investition in Erwägung gezogen werden zu können, zumal die Speicher nicht nur zur Reduzierung der Pumpkosten, sondern auch zur Abdeckung von Spitzenlasten, zur Überbrückung von Störzeiten, zum Bereithalten einer Trink- oder Löschwasserreserve, zum Abbau, Sicherstellung und Begrenzen des Wasserdrucks im Rohrnetzsystem, zur Entlastung des Wassernetzes bei Druckstößen und als Vorlagebehälter für Druckerhöhungsanlagen eingesetzt werden können.

Zeile	Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Eingangsdatensatz	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2030	2030	2030	2030	2030	2030	
2	Minimierungsziel	Kein	Varianz	Varianz	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	Kein	Varianz	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	
3	Flexibilität	keine	2 Flex- Opt	Speicher	2 Flex- Opt	Speicher	2 Flex- Opt	Speicher	2 FlexOpt & Speicher	4 Flex- Opt	keine	4 Flex- Opt	4 Flex- Opt	4 Flex- Opt	4 FlexOpt & Speicher	4 Flex- Opt	
4	Speichervolumen [m³]	0	0	150	800	0	150	800	150	800	0	0	0	150	800	0	
5	Beschränkung [m³/h]	V_{max1} (keine)	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1} (keine)	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max1}	V_{max2}	
6	Jahresfördermenge (Anteil an Variante 1 bzw. 10) [%]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
7	Jahreshöchstlast im Verhältnis zu Zeile 5 [%]	100	96	94	68	100	95	100	89	100	103	75	100	100	100	100	
8	Jahrespumpenergie (Anteil an Variante 1 bzw. 10) [%]	100	100	100	100	100	100	102	99	102	100	100	101	101	104	100	
9	Jahrespumpkosten (Anteil an Variante 1 bzw. 10) [%]:	100	98	99	95	98	96	93	95	92	100	96	94	91	83	93	
10	davon Strombörse [%]	22	22	22	22	22	22	21	22	21	47	49	47	47	49	47	
11	davon Abgaben [%]	62	63	63	65	63	64	69	65	69	34	35	36	37	42	36	
12	davon Netzentgelte [%]	16	14	15	12	15	13	11	12	10	19	16	17	16	10	17	
13	Höchstlast in Hochlastzeit- fenstern (Anteil an Variante 1 bzw. 10) [%]	100	89	90	67	89	75	48	67	46	100	72	72	61	15	72	
15	Stromkosten [ct/kWh]	17,9	17,6	17,7	17,1	17,6	17,3	16,2	17,1	16,2	14,1	13,7	13,1	12,7	11,3	13,2	
16	Pumpkosten [ct/m³]	13,2	13	13	12,6	13	12,7	12,3	12,6	12,1	10,5	10,1	9,8	9,5	8,7	9,8	
17	EE-Anteil im Stromverbrauch [%]	35,3	34,8	35,4	35,2	35,5	35,6	37,8	35,1	37,3	69,3	67,5	72,5	73,9	78,1	72,2	
	Vorgaben						Ergebnisse										

Tabelle 5: Varianten und Ergebnisse der Optimierung des Flexibilitätseinsatzes

Die höheren Einsparpotenziale für Eingangsdatensatz 2030 (siehe Zeile 9 in Tabelle 5) sind auf die höheren zugeordneten Flexibilitätspotenziale zurückzuführen (siehe Kapitel 2.6). Die Pumpkosteneinsparungen in Zeile 9 sind zum größeren Teil auf die atypische Netznutzung zur Reduzierung der Netzentgelte (Zeile 12) zurückzuführen und zum kleineren Teil auf die Ausnutzung niedrigen Börsenstrompreise (Zeile 10). Die Netzentgelte resultieren aus der Jahreshöchstlast in Hochlastzeitfenstern (Zeile 13), die in Varianten mit großen Speichern besonders gering ausfällt.

Abbildung 19 zeigt die Anteile, die die verschiedenen Wasserverbrauchsarten an den Jahrespumpkosten an der Strombörse aufweisen. Die Pumpkosten von Variante 10 dienen hierbei als Referenz. Durch den FlexOpt-Einsatz in Variante 12 können die Pumpkosten um ca. 6% gesenkt werden, auch wenn die FlexOpt nur einen kleinen Teil des Wasserverbrauchs ausmachen. Abbildung 19 verdeutlicht dies durch Angabe des unflexiblen Anteils. In Variante 14 kommt mit der Speicherbefüllung eine zusätzliche Wasserverbrauchsart mit entsprechenden Pumpkosten von ca. 30% hinzu, allerdings fallen die gesamten Pumpkosten um ca. 11% niedriger als in Variante 12 aus, weil ca. 39% der Pumpkosten dadurch eingespart werden, dass Wasserverbrauch durch Speicherentnahme gedeckt wird. Diese Pumpkosteneinsparungen sind in Abbildung 19 als negative, bzw. vermiedene Pumpkosten dargestellt.

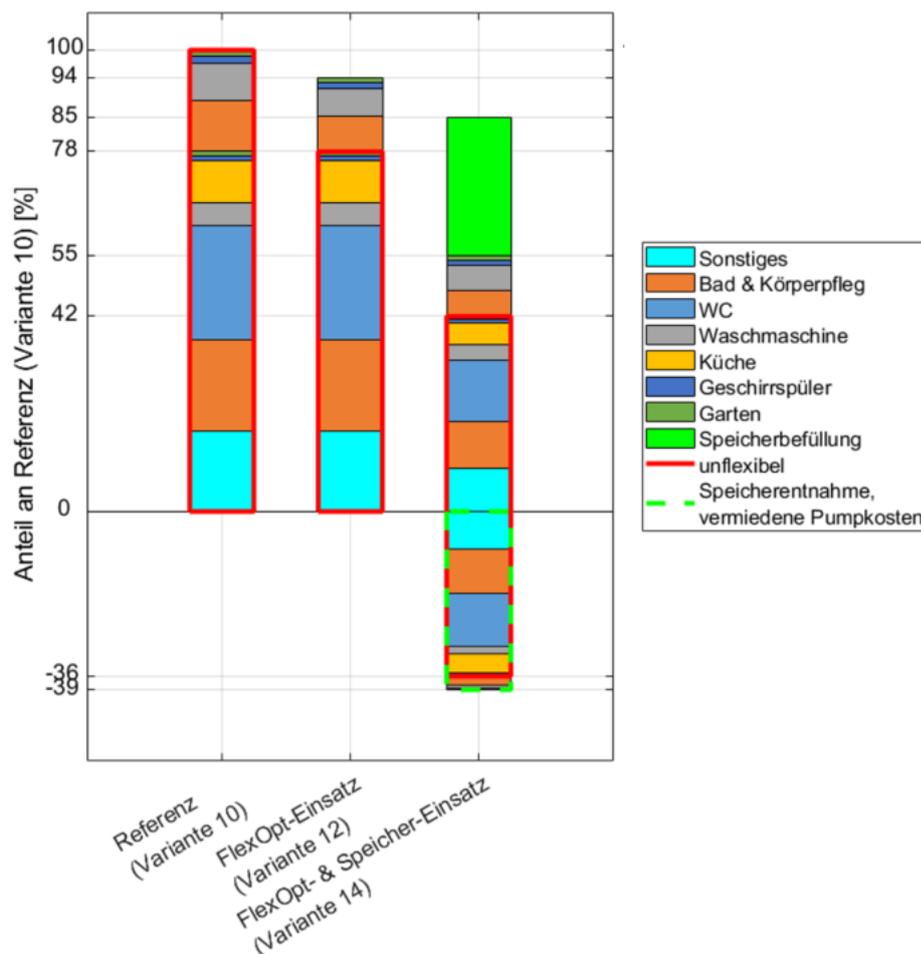


Abbildung 19: Anteil der verschiedenen Wasserverbrauchsarten an den Pumpkosten an der Strombörse

In Zeilen 15 und 16 von Tabelle 5 werden die gesamten Pumpkosten durch die Jahrespumpenergie aus Zeile 8 bzw. die Jahresfördermenge aus Zeile 6 dividiert, um normierte Stromkosten in ct/kWh bzw. „Pumpkosten“ in ct/m³ zu erhalten. Die Stromkosten wurden mit Werten aus der Praxis verglichen und als realistisch eingestuft.

Hinsichtlich der „Pumpkosten“ sind für Eingangsdatensatz 2019 1,1 ct/m³ einsparbar, für Eingangsdatensatz 2030 ca. 1,8 ct/m³ (dies ergibt sich wiederum durch Vergleich von Variante 9 mit Variante 1, bzw. von Variante 14 mit Variante 10). Zur Einordnung dieser Einsparpotenziale wird der durchschnittliche Trinkwasserpreis eines durchschnittlichen Haushalts in Deutschland von 2,6 €/m³ aus [22] herangezogen. Im Vergleich zu einem Trinkwasserpreis von 2,6 €/m³ sind die Einsparpotenziale durch optimierten Einsatz von Flexibilitäten mit 1,1 ct/m³ bzw. 1,8 ct/m³ vernachlässigbar. Der durch Flexibilitätseinsatz reduzierbare Anteil an Pumpkosten macht offensichtlich schlichtweg einen zu geringen Anteil an den Gesamtkosten zur Trinkwasserbereitstellung aus, als dass sich eine verbraucherseitige Flexibilisierung lohnen würde. Zumindest ist nicht davon auszugehen, dass Trinkwasserverbraucher für eine Reduzierung ihrer Trinkwasserkosten um ca. 0,7% Einschränkungen hinsichtlich der Uhrzeiten ihres Wasserverbrauchs in Kauf nehmen würden. Eine wirtschaftliche Motivation zur verbraucherseitigen Flexibilisierung des Wasserverbrauchs ist daher kaum gegeben.

Die im Projekt durchgeführten Umfragen [5] legen aber nahe, dass die Bereitschaft zur Verschiebung des Wasserverbrauchs auch in der Motivation zu sozialem und umweltfreundlichem Verhalten begründet liegt. Kosteneinsparungen sind daher nicht der einzige Aspekt, nach denen die Flexibilitätseinsatzoptimierungen bewertet werden sollten. Zeile 17 gibt daher den Anteil erneuerbarer Energien (EE) aus [20] wieder, der dem Stromverbrauch zum Pumpen im Mittel zugrunde liegt. Wegen der hohen Korrelation von Börsenstrompreis und Residuallast (siehe [20]), wobei die Residuallast bei hohen EE-Einspeisung niedrig ist, ergibt sich bei Kostenminimierung tendenziell eine zunehmend höherer EE-Nutzung bei höheren eingesetzten Flexibilitäten, insbesondere für den Eingangsdatensatz 2030.

5 Handlungsempfehlungen

Folgende Handlungsempfehlungen werden für die Ermöglichung und den Einsatz von Flexibilitäten in der Trinkwasserversorgung aus den Untersuchungen abgeleitet:

1. Stündliche Messung der geförderten Wassermenge und des Stromverbrauchs
Um Erkenntnisse über den Tagesverlauf des Trinkwasserverbrauchs ziehen und Vortagsprognosen des Wasserverbrauchs (siehe nächsten Punkt) erstellen zu können, ist eine stündliche oder häufigere Aufzeichnung der geförderten Wassermenge erforderlich. Diese sollte mit einer Aufzeichnung der verwendeten Pumpenergie [kWh] im Viertelstundentakt einhergehen, was für die Gewährung eines individuellen Netzentgelts ohnehin notwendig ist.
2. Vortagsprognosen des Wasserverbrauchs
Um Flexibilitäten gezielt einsetzen zu können, sei es zur Reduzierung der Pumpkosten, zur Verhinderung von (extremwetterbedingten) Lastspitzen oder zur möglichst hohen Ausnutzung von erneuerbaren Energien, sind Vortagsprognosen des Wasserverbrauchs erforderlich. In die Erstellung der Vortagsprognosen sollten Wetterdaten einfließen, um mögliche Überlastungen der Trinkwasserversorgung durch Extremwetter prognostizieren und entsprechende Maßnahmen, z.B. Flexibilitätseinsatz, planen zu können. Vortagsprognosen des (Pump-) Stromverbrauchs sind für die Teilnahme an der day-ahead Strombörse erforderlich.
3. Aufzeichnung der unterschiedlichen Wasserverbrauchsarten
Da je nach Wasserverbrauchsart unterschiedliche Flexibilitätspotenziale anzusetzen sind, sollte die Zusammensetzung des Trinkwasserverbrauchs in stündlicher Auflösung weiter untersucht und durch Messungen belegt werden, um diesbezüglich eine größere Datengrundlage zu schaffen.
4. Untersuchung der Wetterabhängigkeit des Wasserverbrauchs
Die Aufzeichnungen der unterschiedlichen Wasserverbrauchsarten (Punkt 3) sollten Wetterdaten gegenübergestellt werden, um den Einfluss des Wetters, insbesondere von Extremwetter, auf den Wasserverbrauch genauer analysieren zu können (siehe hierzu auch [2]).
5. Aktivierung der Flexibilitäten
Eine große Herausforderung besteht darin, wie die Flexibilitäten in der Trinkwasserversorgung aktiviert werden können. Hier sind z.B. ein steuernder Eingriff des Wasserversorgers bzgl. des Trinkwasserbezugs von Kunden, dezentrale Automatisierungen des Trinkwasserverbrauchs bei den Kunden oder einfache Mitteilungen zur Notwendigkeit einer zeitlichen Verschiebung des Wasserverbrauchs an die Kunden und deren Einhaltung auf freiwilliger Basis vorstellbar. Trinkwasserspeicher, die vom Wasserversorger betrieben werden, sind unter diesem Gesichtspunkt einfacher zu aktivieren und daher ggf. zu priorisieren. Die Gartenbewässerung stellt eine unregelmäßige Wasserverbrauchsart dar, die insbesondere an ggf. kritischen Tagen (Hitze- und Trockenheitstage) einen hohen Anteil am Wasserverbrauch ausmachen kann und deren zeitliche Verschiebungen kaum Komforteinbußen für die Kunden bedeutet.
6. Berücksichtigung von Flexibilitäten bei der Auslegung von Trinkwasserversorgungen

Auch wenn es nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung war, lassen sich Flexibilitäten auch dahingehend nutzen, die notwendigen Kapazitäten von neu zu errichtenden oder auszulegenden Trinkwasserversorgungen zu minimieren und damit die Investitionskosten zu reduzieren.

7. Erfassung und systematische Bekanntmachung von kritischen Trinkwasserversorgungsgebieten

„Die öffentliche Wasserversorgung entnimmt mit 2,8 Prozent [...] nur einen Bruchteil der erneuerbaren Wasserressourcen. [...] Bisher gibt es in Deutschland keinen flächendeckenden Wasserstress. Man spricht von Wasserstress, wenn die gesamte Wasserentnahme eines betrachteten Jahres mehr als 20 Prozent des langjährigen mittleren Wasserdargebots beträgt.“ [23]. „Trotz eines insgesamt ausreichenden Wasserdargebots gibt es auch in Deutschland vereinzelte Regionen, in denen die Grund- und Oberflächenwasserressourcen bei langanhaltender Trockenheit den Wasserbedarf nicht kompensieren können.“ [24]. „Größter Handlungsbedarf bei der öffentlichen Trinkwasserversorgung besteht bei Kommunen, deren Versorgung (1) auf einer einzelnen Wassergewinnung beruht, die (2) auf eine Quelfassung oder einen im Festgestein befindlichen flachgründigen Brunnen zurückgreift und die (3) nicht an ein Verbundsystem angeschlossen sind. [...]. Bei Versorgungsgebieten mit einer wachsenden Anzahl an Trinkwassernutzern, deren Gesamtbedarf oder deren Spitzenbedarf bereits heute schon nahe der Kapazitätsgrenze liegt, kann daher mit einer steigenden Gefährdung gegenüber Dürren gerechnet werden.“ [25]. „Umfangreiche [...] Wasserdargebots- und Wasserbedarfsanalysen [sollten daher] die Grundlage für die wasserwirtschaftliche Planung und das Niedrigwasser- und Dürremanagement [bilden]“ [26] und das in [26] geforderte Grundwasserentnahmemonitoring dahingehend erweitert werden, dass kritische Trinkwasserversorgungen der Forschungslandschaft systematisch bekannt gemacht werden, um entsprechende Lösungskonzepte entwickeln zu können.

6 Literatur

- [1] inter3 - Institute for resource management; DEMAPLAN - Demand-oriented management and planning of water infrastructures; 2015; https://www.inter3.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Veroeffentlichungen/DEMAPLAN_onlineversion.pdf
- [2] Knorr, K.; Multiple lineare Regression des Trinkwasserverbrauchs eines Wasserversorgungsgebietes durch Wetterdaten und kalendarische Informationen; 2022; <https://doi.org/10.24406/publica-281>
- [3] Barth, S.; Trinkwasser in Löhne, Bad Oeynhausen, Hüllhorst und Hille wird knapp; 2019; https://www.nw.de/lokal/kreis_herford/loehne/22491035_In-Loehne-wird-das-Trinkwasser-wieder-knapp.html
- [4] co2online; Haushaltsbefragung Bitterfeld-Wolfen im Rahmen von Flexitility; <https://www.flexitility.de/reallabor/haushaltsbefragung/>
- [5] co2online; Sonderbefragung im Rahmen von Flexitility und des digitalen Reallabors; <https://www.flexitility.de/reallabor/sonderbefragung/>
- [6] this-magazin; 600 m³ Nutzinhalte in Rekordzeit errichtet; 2013; https://www.this-magazin.de/artikel/tis_600_m_Nutzinhalt_in_Rekordzeit_errichtet_1627807.html
- [7] Walter + Partner GbR; Hochbehälter Freudenberg; 2015; <https://walter-und-partner.de/referenze/hochbehaelter-freudenberg/>
- [8] TILLIG Ingenieure; Hochbehälter Gaisbühl – Binzgen; 2016; <https://tillig-ingenieure.de/portfolio-item/hochbehaelter-gaisbuehl-binzgen/>
- [9] Gemeinderat Kraichtal; Beschlussvorlage zur Wasserversorgung, Versorgungskonzept Münzesheim, Oberacker und Gochsheim; 2017; https://gr-online.kraichtal.de/bi/vo0050.asp?_kvonr=634
- [10] Ambrosch, W.; Wasser für Graz: Spezial-Hochbehälter im Naherholungsgebiet Lustbühel; 2019; <https://mach-partner.at/blog/wasser-fuer-graz-spezial-hochbehaelter-im-naherholungsgebiet-lustbuehel/>
- [11] Nestler, F.; Wasserwerke lassen 300-Kubikmeter-Speicher in Breitenbrunn errichten; 2022; <https://www.freipresse.de/erzgebirge/schwarzenberg/wasserwerke-lassen-300-kubikmeter-speicher-in-breitenbrunn-errichten-artikel12142695>
- [12] Ortschaftsrat Mösbach; Neuer Hochbehälter für 1,7 Millionen Euro ist notwendig; 2022; <https://www.bo.de/lokales/achern-oberkirch/neuer-hochbehaelter-fur-17-millionen-euro-ist-notwendig#>
- [13] Masson, M.; Wasser wird in Mahlberg teurer - Neuer Hochbehälter kostet 3,5 Millionen Euro; 2022; <https://www.lahrer-zeitung.de/inhalt.wasser-wird-in-mahlberg-teurer-neuer-hochbehaelter-kostet-3-5-millionen-euro.44e5c16c-def7-4ef3-88f2-6302136e1e7c.html>

- [14] Filzek, M.; Kist bekommt neuen Hochbehälter für Trinkwasser; 2022; <https://www.br.de/nachrichten/bayern/kist-bekommt-neuen-hochbehaelter-fuer-trinkwasser,T2yvH90>
- [15] Steiert, H.; Die Arbeiten am neuen Hochbehälter Vogelsang in Rheinfelden liegen im Zeitplan; 2022; <https://www.suedkurier.de/region/hochrhein/rheinfelden/die-arbeiten-am-neuen-hochbehaelter-vogelsang-in-rheinfelden-liegen-im-zeitplan;art372615,11234116>
- [16] Hensel, P.; König, D.; Layec, V.; et al. ENERWA - Energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems - Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung - AP B3; September 2017; https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/enerwa_schlussbericht_1.pdf
- [17] MITNETZ Strom; Preisblatt 1 - Netzentgelte für Entnahmen mit Leistungsmessung Entgelte gültig ab 01.01.2019; https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/datei-ablage/ne_2019_mns_pb1_rlm.pdf?sfvrsn=aa76baf9_4
- [18] Bundesnetzagentur; Monitoringbericht 2019 –Tabelle 86; Januar 2020; https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [19] ENTSO-E; ENTSO-E transparency platform data for the year 2019; <https://transparency.entsoe.eu>
- [20] Knorr, K.; Modellierung der innertägigen Schwankungen des zukünftigen day-ahead Strompreises; 2022; <https://doi.org/10.24406/publica-280>
- [21] MITNETZ Strom; Hochlastzeitfenster für atypische Netznutzung nach § 19 Abs. 2 Satz 1 StromNEV - Kalenderjahr 2019 - https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/datei-ablage/hochlastzeitfenster-2019.pdf?sfvrsn=7330bbf9_2
- [22] ATT, BDEW, DVGW DBVW und VKU DWA; Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2020; 2020; https://www.bdew.de/media/documents/WEB_brachenbild_dt_wasserwirtschaft_2020_DIN_A4_24062020_NEU.pdf
- [23] Umweltbundesamt; Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten>
- [24] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Sicherheit der Trinkwasser-versorgung - Teil 1: Risikoanalyse; 2019; https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PIB/PIB-15-sicherheit-trinkwasserversorgung-teil1.pdf;jsessionid=DE5B50C3F649787D4691E1F51BFB89C2.live362?__blob=publicationFile&v=12

- [25] Riedel, T.; et al.; Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien – Abschlussbericht; 2021;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Nationale Wasserstrategie – Entwurf des Bundesumweltministeriums; 2021;
<https://www.bmu.de/download/nationale-wasserstrategie>
- [27] Fraunhofer IEE; Energiemanagementsoftware EnergyPilot;
<https://www.iee.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/digitales-portfoliomanagement/iee-ems/energypilot.html#550313236>