

Energieeinsparpotenziale durch die Optimierung bestehender Trinkwassersysteme

**Betrachtung von Mietwohnungen und
Einfamilienhäusern mit zentralem und
dezentralem System**

Energieeinsparpotenziale durch die Optimierung bestehender Trinkwassersysteme

**Betrachtung von Mietwohnungen und
Einfamilienhäusern mit zentralem und dezentralem
System**

Auftraggeber:	Verbraucherzentrale Nordrhein- Westfalen
FfE-Auftragsnummer:	VZD-01
Bearbeiter/in:	Britta Kleinertz, Christa Dufter, Simon Greif, Jochen Conrad
Fertigstellung:	Juli 2017

Impressum:

Endbericht

Der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

in Zusammenarbeit mit der
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft
mbH (FfE GmbH)

zum Projekt:

Energieeinsparpotenziale durch die Optimierung
bestehender Trinkwassersysteme -
Betrachtung von Mietwohnungen und
Einfamilienhäusern mit zentralem und
dezentralem System

Auftraggeber:

Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen
Dr. Reinhard Loch

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung.....	2
3	Komponenten der am meisten verbreiteten TWW-Systeme und auftretende Verluste	3
3.1	Trinkwarmwasser-Zapfstellen	4
3.2	Trinkwarmwasser-Verteilung	4
3.3	Trinkwarmwasser-Speicherung	6
3.4	Trinkwarmwasser- Erwärmung	6
3.4.1	Dezentrale TWW-Erwärmer.....	6
3.4.2	Zentrale Systeme.....	7
4	Methodik zur Bestimmung der Einsparpotenziale	8
4.1	Berechnung der Einsparungen einzelner Maßnahmen	8
4.2	Berechnung der Einsparungen kombinierter Verhaltensänderungen	8
4.3	Ermittlung der Nutzungsfrequenz von Zapfstellen	11
4.4	Berechnung der Wirtschaftlichkeit investiver Maßnahmen	11
5	Ermittelte Einsparungen.....	14
5.1	Einsparungen durch Verbrauchsanpassung	14
5.2	Einsparungen durch Verminderung von Verteilverlusten.....	20
5.3	Einsparungen durch Verminderung von Speicherlusten.....	25
5.4	Einsparungen durch Austausch des TWW-Erwärmers.....	28
5.5	Übersicht verschiedener Kombinationen	31
6	Energieeinsparung für NRW	32
6.1	Ermittlung vorhandener Versorgungssysteme.....	32
6.2	Berechnung der Einsparpotenziale.....	37
7	Darstellung und Erklärung des Rechentools	40
7.1	Rechtliche Einschränkungen	40
7.2	Technische Einschränkungen.....	42
7.3	Eingangsdaten	42
7.4	Hinterlegte Daten	44
7.5	Berechnungsschritte für die PV-Eigennutzung	46
7.5.1	Bestimmung der Lastgänge und Speichercharakteristika	46
7.5.2	Bilanzierungen für jeden Zeitschritt	48
7.5.3	Eigenverbrauchssteigerung	48

7.6	Ausgabewerte	49
7.7	Ermittelte Sensitivitäten und Einschränkungen.....	51
8	Kosteneinsparpotenziale für Prosumer	52
8.1	Gewählte Parameter für Simulation	52
8.2	Simulationsergebnisse einzelner Systeme	53
8.3	Einsparpotenzial für NRW.....	55
9	Analyse und Interpretation der Ergebnisse.....	56
9.1	Einsparung TWW-Bereitstellung.....	56
9.2	Nutzung selbst erzeugten Stromes aus der PV-Anlage.....	56
10	Literaturverzeichnis.....	57

1 Zusammenfassung

Trinkwarmwassersysteme bieten ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung. Sowohl durch einfache Anpassungen der Durchflussvolumenströme an den Zapfstellen sowie dem Verbraucherverhalten sind bereits weitreichende Potenziale der Energie- und Kosteneinsparung erschließbar. Des Weiteren amortisiert sich der Austausch eines hydraulischen durch einen elektronischen Durchlauferhitzer bei der Wahl eines effizienten neuen Gerätes bereits nach vier Jahren. Die Dämmung von Verteilrohren sowie die verbesserte Regelung von Zirkulationspumpen stellt im Gebäudebestand ein hohes wirtschaftliches Potenzial dar. Bei der Regelung von Zirkulationspumpen ist eine verbesserte Einstellung der Zirkulationsdauern als relevanter Einsparfaktor zu nennen. Ein Speichertausch kann die auftretenden Speicherverluste halbieren, der Austausch der Speicher ist jedoch bei den meisten betrachteten vorhandenen und neuen Systemen nicht wirtschaftlich.

Gemäß den vorliegenden Daten werden in Nordrhein-Westfalen 22,8 TWh Endenergie für die Trinkwassererwärmung aufgewendet. Damit verbunden sind jährliche Kosten von 3,1 Mrd. €. Werden alle in der Studie untersuchten und als wirtschaftlich eingestuften Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt, kann 51% der eingesetzten Endenergie eingespart werden. Hierdurch würden die Energiekosten für gesamt Nordrhein-Westfalen um 1,6 Mrd. € sinken. Das wirtschaftliche Potenzial für die Dämmung von Rohren wird unter der Annahme freiliegender Rohre berechnet. In der Realität sinkt das wirtschaftliche Potenzial der Dämmung somit, das Energie- und Kosteneinsparpotenzial bei Vernachlässigung zusätzlicher Rohrdämmung liegt bereits bei 31 % bzw. 1 Mrd. €.

Zur Nutzung des Stroms aus einer eigenen PV-Anlage im Trinkwarmwassersystem, wird ein Versorgungssystem mit Wärmepumpe und Heizstab sowie Gaskessel und Heizstab betrachtet. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der Eigenstromnutzung mit einem Stromspeicher untersucht.

Die Nutzung selbst erzeugten PV-Stromes in einem elektrischen Speicher steigert den Eigenversorgungsgrad (Strom) unter den betrachteten Umständen um 25 % und auch die Eigenverbrauchsquote (Strom) um 32 %. In Anbetracht der entgangenen Einnahmen durch die Einspeisevergütung amortisiert sich die Verwendung eines elektrischen Speichers jedoch nicht innerhalb seiner Lebensdauer.

Betrachtet man die reine Flexibilisierung der Trinkwarmwasser-Bereitstellung sind sowohl Gastherme mit Heizstab als auch Wärmepumpe mit Heizstab unter aktuellen Rahmenbedingungen, speziell auf Grund der verringerten Erlöse aus der Einspeisevergütung, nicht wirtschaftlich. Allerdings kann in einem System mit Wärmepumpe und ohne elektrischen Speicher der Eigenversorgungsgrad (Strom und Trinkwarmwasser) bereits um bis zu 18 % auf 44 %, im Gaskesselsystem um 25 % auf bis zu 41 % erhöht werden.

Die Eigenverbrauchsquote (Strom und Trinkwarmwasser) liegt in Systemen mit Gaskessel und elektrischem Speicher bei bis zu 98 %, in Systemen mit Wärmepumpe und elektrischem Speicher bei bis zu 87 %.

2 Einleitung

Im Rahmen der politischen Ziele zur CO₂-Verminderung gerät auch der Gebäudesektor immer mehr in den Fokus der Betrachtungen. Die Bereitstellung von Trinkwarmwasser (TWW) macht in Deutschland sektorübergreifend aktuell 4,6 % des Endenergiebedarfes aus, bezogen auf den Endenergiebedarf der privaten Haushalte sogar 14,4 % /BMWI-01 17/. In Haushalten sowie im Gewerbe, Handel, Dienstleistungen-Sektor hängt dieser Anteil jedoch sehr stark vom Sanierungszustand der betrachteten Gebäude ab. Auf Grund des verminderten Raumwärmebedarfs in Niedrigenergiegebäuden steigt die Relevanz immer weiter an.

Im Rahmen dieser Studie werden im ersten Teil Möglichkeiten zur Verminderung des Energiebedarfs für die Bereitstellung von TWW ermittelt. Im Fokus stehen hierbei die verhaltensbasierte Verminderung des TWW-Bedarfs, die Optimierung der bestehenden TWW-Verteilung sowie die Erneuerung des TWW-Erwärmers. Im zweiten Teil der Studie wird ein Excel-Tool erstellt, welches es Nutzern einfach ermöglicht, technische und ökonomische Potenziale der Flexibilisierung ihres TWW-Erwärmers zur Nutzung des erzeugten Stroms aus der eigenen Photovoltaik (PV) Anlage zu ermitteln.

Da 80,5 % des Endenergiebedarfs für TWW-Bereitung auf private Haushalte entfallen, liegt der Fokus dieser Studie auf den Effizienzsteigerungspotenzialen dieses Sektors. Allerdings lassen sich die Ergebnisse ebenfalls auf TWW-Systeme in GHD und zum Teil auch in der Industrie übertragen.

3 Komponenten der am meisten verbreiteten TWW-Systeme und auftretende Verluste

Bei Energieangaben zu TWW-Verbräuchen muss zwischen dem Energieinhalt des abgegebenen TWW (Nutzenergie) und dem gesamten Energiebedarf für die TWW-Bereitstellung (Endenergie), welcher sich aus dem Brennstoff- und Strombedarf für Erzeugung und Verteilung zusammensetzt, unterschieden werden. Häufig sind die im System auftretenden Verluste höher als der Nutzenergiebedarf /FFE-05 02/, /MUE-01 07/. Zum Verständnis der Einsparmöglichkeiten wird in diesem Kapitel zunächst auf die Teilsysteme der TWW-Bereitstellung eingegangen und es werden die jeweils auftretenden Verlustarten erläutert. Generell werden zentrale und dezentrale Systeme zur Versorgung mit TWW unterschieden. Bei zentralen Systemen erfolgt die Erwärmung des Wassers für mehrere Wohneinheiten gemeinsam, bei dezentraler Versorgung hingegen je Wohneinheit. In **Abbildung 3-1** sind die Bilanzgrenzen und Energieflüsse zur Beurteilung der TWW-Erzeugung und des TWW-Verteilsystems in einem zentralen System graphisch dargestellt.

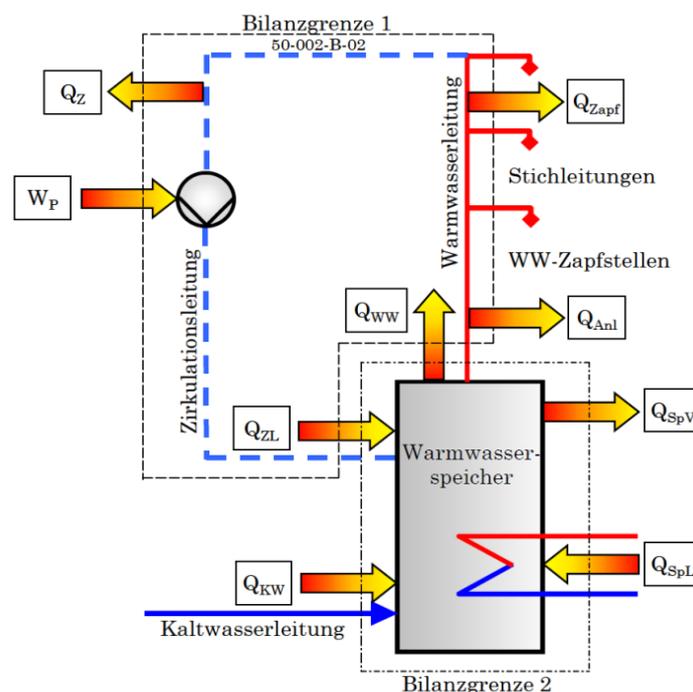


Abbildung 3-1: Energieein- und -austräge in der TWW-Versorgung /FFE-05 02/

Q_{Zapf} :	in die Stichleitung des Haushaltes abgegebene Wärmemenge
Q_Z :	Zirkulationsverlust
W_p :	Abwärmeeintrag durch die Zirkulationspumpe
Q_{WW} :	aus dem Warmwasserspeicher entnommene Wärmemenge
Q_{ZL} :	in den Warmwasserspeicher abgegebene Wärmemenge
Q_{AnL} :	Rohraufheizverluste
Q_{SpV} :	Warmwasserspeicherverluste
Q_{SpL} :	benötigte Wärmemenge
Q_{KW} :	Wärmemenge Kaltwasser

In den folgenden Unterkapiteln werden die entsprechenden Komponenten und auftretenden Verluste entlang des Systems von oben nach unten erläutert

3.1 Trinkwarmwasser-Zapfstellen

Bei den in der Studie betrachteten relevanten Zapfstellen handelt es sich um Dusche, Waschbecken, Spülbecken und Badewanne. Auf weitere Zapfstellen wie das Bidet wird auf Grund der geringen Relevanz nicht eingegangen. Auf den benötigten TWW-Bedarf der einzelnen Zapfstellen sowie die hieraus resultierenden möglichen Einsparungen wird genauer in **Kapitel 5.1** eingegangen. Im Weiteren nicht quantifizierte aber durch Verhaltensänderungen vermeidbare Verluste an allen Zapfstellen sind Ablauf- und Rückmischverluste.

Ablaufverluste

Befindet sich die Zapfstelle direkt am TWW-Erwärmer oder an der Zweigstelle der Zirkulationsleitung, so ist bei Zapfvorgängen nahezu sofort warmes Wasser verfügbar. Bei der Entnahme von TWW an den Zapfstellen in zentralen TWW-Systemen kann es hingegen zu längeren Wartezeiten kommen bis das Wasser das gewünschte Temperaturniveau erreicht. Daher wird zunächst das in der TWW-Leitung ausgekühlte Wasser ausgeschoben. Der Energieinhalt des hier nicht genutzten TWW wird als Ablaufverlust bezeichnet.

Rückmischverluste

Häufig verbleibt an Waschbecken mit Einhebelmischern die Position des Hebels mittig. Auch bei sehr kurzen Zapfungen wird daher warmes Wasser angefordert und somit erzeugt und in das Verteilsystem gespeist, ohne dass dieses explizit gewünscht ist. Der Nutzer bemerkt den Anteil des warmen Wassers kaum, da durch die Rückmischung des wenigen warmen Wassers mit dem kalten Wasser die Temperatur des Auslaufstroms sehr stark absinkt. Die durch die Rückmischung verloren gegangenen Energiemengen werden als Rückmischverluste bezeichnet.

3.2 Trinkwarmwasser-Verteilung

Generell besteht ein Wasser-Versorgungsnetz immer aus einer Kalt- und einer Warmwasserleitung. Wichtigen Einfluss auf die Verluste bei der TWW-Versorgung haben der Rohrwerkstoff der Leitung, dessen Dämmung und Länge sowie die Temperaturniveaus des TWW und der Umgebung. Bei dezentraler Versorgung ist der TWW-Erwärmer über eine kurze Verteilleitung mit den Zapfstellen verbunden, sodass hier geringe Verluste auftreten. Bei zentralen Systemen mit gleichem Dämmstandard kommt es zu höheren Verlusten. Ein Vorteil dezentraler Erwärmung ist die kurze Dauer von ca. 7 bis 9 Sekunden bis das TWW die gewünschte Temperatur erreicht hat /SWT-01 15/. In zentralen Systemen kann das TWW hingegen häufig günstiger erwärmt werden.

Bei der zentralen Versorgung in Einfamilien- und in Zweifamilienhäusern kann das Versorgungsnetz als einfache Stichleitung vom zentralen Erwärmer zu den Wohnungsstationen und von dort über kurze Verteilleitungen zu den Zapfstellen führen. In diesen Systemen wird das TWW erst in das Verteilsystem gespeist, wenn es angefordert wird, was zu relativ langen Wartezeiten führen kann. In Gebäuden mit

höherem Komfort sowie allen Mehrfamilienhäusern ist des Weiteren eine Zirkulationsleitung vorhanden, welche vom Ende der Stichleitung eine Verbindung zurück in den TWW-Speicher schafft (siehe Abbildung 3-1). In Systemen mit Zirkulation wird das TWW über den festgelegten Zirkulationszeitraum kontinuierlich durch die Stich- und Zirkulationsleitung gepumpt, sodass an jeder Zapfstelle immer direkt TWW verfügbar ist. Dies führt zu einem Komfortgewinn, aber auch zu höheren Wärmeverlusten und Hilfsenergieverbräuchen auf Grund der langen Leitungen.

Die im Folgenden beschriebenen Anlauf- und Verteil- und Standverluste treten sowohl in dezentralen als auch zentralen System auf, Zirkulationsverluste hingegen nur in zentralen Systemen mit Zirkulationsleitung.

Anlaufverluste

Wird TWW gezapft fließt dieses zunächst durch Leitungen, welche eine geringere Temperatur aufweisen als das TWW. Der Wärmeaufwand zum Aufheizen der Verteilleitungen bis zur TWW-Temperatur wird als Anlaufverlust bezeichnet. Je länger die Pausen zwischen den einzelnen Zapfungen sind, desto stärker kühlt die Leitung aus und desto höher sind die Anlaufverluste. Bei unterbrochener Zirkulation treten Leitungsanlaufverluste sowohl in der Stichleitung als auch in der Zirkulationsleitung auf.

Verteilverluste

Die Verteilverluste entstehen im gesamten Rohrleitungssystem zwischen TWW-Erwärmer und Zapfstelle während das TWW die Rohrleitungen durchströmt. Zwar ist die Leitung zu dem Zeitpunkt bereits durch die Anlaufverluste aufgewärmt, sie geben jedoch kontinuierlich Wärme an die Umgebung ab und nehmen somit weiterhin Wärme aus dem TWW auf.

Standverluste

Während der Zapfpausen ergeben sich in den Leitungen Standverluste durch das Auskühlen des noch im Rohr befindlichen TWW.

Zirkulationsverluste

Erfolgt die TWW-Verteilung mittels eines Zirkulationssystems, werden die Verluste, die während den Betriebszeiten der Zirkulationspumpe in Stichleitung und Zirkulationsleitung entstehen, als Zirkulationsverluste bezeichnet. Die Pumpenlaufdauer ist somit ein wichtiger weiterer Faktor für die resultierenden Verluste.

In über der Hälfte der in /FFE-05 02/ vermessenen Gebäude betragen Zirkulationsverluste über 50 % der erzeugten TWW-Energie. Besonders hoch waren sie in Mehrfamilienhäusern mit langen, schlecht gedämmten Leitungen und durchgängigem Zirkulationsbetrieb. Weiterhin zeigen die Messungen, dass Anlauf- und Zirkulationsverluste in Systemen mit einer Zirkulationsleitung insgesamt 25 % bis 75 % der aus dem Speicher abgegebenen Wärmeleistung ausmachen. In Systemen mit Stichleitung sind Anlaufverluste für 12 % bis 50 % des TWW-Bedarfs verantwortlich.

3.3 Trinkwarmwasser-Speicherung

Während bei dezentralen Systemen häufig auf eine Speicherung des TWW verzichtet wird, werden diese bei zentralen Versorgungssystemen zur Bevorratung für hohe Bedarfspeaks eingesetzt.

Speicherverluste

Ist ein TWW-Speicher vorhanden, bevorratet dieser kontinuierlich TWW auf dem durch die hygienischen Vorschriften festgelegten Temperaturniveau (siehe **Kapitel 7.1**). Dabei gibt der TWW-Speicher kontinuierlich Wärmeenergie an die Umgebung ab. Die hier auftretenden Verluste sind vor allem von den Temperaturniveaus von TWW und Umgebung sowie dem Dämmstandard des Speichers abhängig.

3.4 Trinkwarmwasser- Erwärmung

In der dezentralen Erwärmung werden vor allem strombasierte Anlagen eingesetzt, zum Teil auch Gasthermen.

3.4.1 Dezentrale TWW-Erwärmer

In der dezentralen Erwärmung werden vor allem strombasierte Anlagen eingesetzt, zum Teil auch Gasthermen. Der Nachteil der dezentralen Verwendung von Gasthermen ist hierbei das benötigte Abluftsystem für die Verbrennungsgase.

Hydraulischer Durchlauferhitzer

In Abhängigkeit von der Durchflussmenge schaltet der Differenzdruckschalter bei kleinem Durchfluss auf eine kleine Leistung und bei großem Durchfluss auf große Leistung. Das Wasser wird auf die gewünschte Temperaturstufe erwärmt und anschließend durch Beimischen von Kaltwasser auf die gewünschte Temperatur abgekühlt. Hierdurch entstehen im Gerät Rückmischverluste.

Elektronisch geregelter Durchlauferhitzer

Ein elektronisch geregelter Durchlauferhitzer erfasst die Eingangsgrößen Durchflussmenge, Zulauf- und TWW-Temperatur. Dabei werden Soll- und Ist-Zustand ständig verglichen und bei Bedarf die Durchflussmenge über einen integrierten Mischmotor und die Heizleistung elektronisch angepasst. Die TWW-Temperatur kann dabei stufenlos gewählt werden. Gegenüber hydraulisch gesteuerten Durchlauferhitzern besitzen elektronisch geregelte Durchlauferhitzer einen erhöhten Komfort und einen besseren Wirkungsgrad.

Voll-elektronischer Durchlauferhitzer

Dieser misst Temperatur des Zuflusses sowie den Volumenstrom des Zu- und Ausflusses. Ist die bereitzustellende Leistung zu hoch, um mit dem Durchlauferhitzer die gewünschte Temperatur bereit zu stellen wird der Ausflusstrom begrenzt.

Elektrisch beheizter Speicher (Kleinspeicher)

In elektrisch beheizten TWW-Speichern wird Wasser mittels einer Aufheizfläche im Speicher erwärmt. Das Volumen der Speicher schwankt dabei zwischen 5 und 200 l. Das Aufheizen erfolgt häufig zu vorgegebenen Niedertarifzeiten.

Gastherme

Der Begriff Gastherme ist nicht klar definiert. In dieser Studie wird darunter ein dezentrales gasbefeuetes Gerät zur Erwärmung von TWW und Raumwärme, auch Gas-Etagenheizung genannt, verstanden.

Gasdurchlauferhitzer

Hierbei handelt es sich um kleine Gasthermen die sich meist in den Wohnungen selbst befinden und nur TWW bereitstellen.

Der Nachteil der dezentralen Verwendung von Gasthermen und Gasdurchlauferhitzern ist das benötigte Abluftsystem für die Verbrennungsgase.

3.4.2 Zentrale Systeme

In zentralen Systemen findet häufig eine kombinierte Erwärmung von TWW und Wasser für die Raumheizung statt. Diese beiden Systeme sind jedoch auf Grund der viel höheren hygienischen Anforderungen an das TWW immer strikt zu trennen. Allerdings entstehen durch die häufig räumlich nah aneinander angelehnte Rohrührung Abhängigkeiten bei den auftretenden Verlusten. Eingesetzt werden Gas-/Öl-Brennwert- und Niedertemperaturkessel, Fernwärmeübergabestationen, Pelletkessel sowie Wärmepumpen. Diese Systeme können zudem mit einer Solarthermie-Anlage verbunden sein. Auf Grund ihrer hohen Effizienz und der geltenden Effizienzanforderungen steigen die Anteile von Brennwertgeräten sowie regenerativen Wärmeerzeugern und Wärmepumpen.

Da der Fokus der Studie auf reinen TWW-Erwärmern liegt, wird hier nicht detailliert auf die einzelnen Technologien eingegangen.

4 Methodik zur Bestimmung der Einsparpotenziale

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Berechnung der Energie- und Kosteneinsparung für die verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion des TWW-Bedarfs erläutert. Die gewählten Parameter und konkret hieraus resultierende Einsparungen sind dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

Die reduzierten Zapfvolumenströme durch Einsatz von Spararmaturen sollten durch einen Produktvergleich im Baumarkt festgestellt werden. Dies gestaltet sich jedoch als schwierig, da ein Großteil der Armaturen nicht mit den resultierenden Durchflussmengen beschriftet war, Daten müssen für jede einzelne Armatur im technischen Datenblatt online ermittelt werden. Somit wird hier auf Daten aus der Fachliteratur, zu den verschiedenen möglichen Zapfvolumina zurückgegriffen. Eine Unterteilung in Durchflussbegrenzer und Spararmatur ist somit, außer für die Dusche, nicht möglich. In Wohngebieten mit hohem Kalkanteil im Trinkwasser ist vom Einsatz eines Durchflussbegrenzers eher abzuraten, da sich dieser mit Kalk zusetzt. Hier sollte beim Kauf direkt eine Armatur mit geringem Durchflussvolumenstrom gewählt werden.

4.1 Berechnung der Einsparungen einzelner Maßnahmen

Die Energie- und Wassereinsparung wird im Rahmen der Studie immer als Differenz des betrachteten Verbrauches zum höchsten Verbrauchsniveau bestimmt. Hierbei ist eine Einsparung definiert gemäß **Formel (1)**.

$$Einsparung = 1 - \frac{Verbrauch_{neu}}{Verbrauch_{alt}} \quad (1)$$

4.2 Berechnung der Einsparungen kombinierter Verhaltensänderungen

Um die Veränderungen des jährlichen Energieverbrauchs abhängig von Verbraucherverhalten und Durchflussbegrenzern abzuschätzen, werden drei Verbrauchsniveaus für die einzelnen Zapfstellen festgelegt und in den TWW-Lastganggenerator der FfE eingebunden, welcher hier zunächst beschrieben wird.

Zur Modellierung von elektrischen und TWW-Lastgängen wurde an der FfE ein auf Aktivitätsprofilen von verschiedenen typischen Personengruppen basierender Lastganggenerator entwickelt. Bei den Personengruppen handelt es sich um eine Person in Vollzeit-Beschäftigung, eine in Teilzeit-Beschäftigung, einen Rentner und ein Kind. Ein beispielhaftes Aktivitätsprofil für eine in Vollzeit berufstätige Person ist in **Abbildung 4-1** dargestellt. Der Beginn eines Balkens stellt hierbei einen Aktivitätsbeginn dar, die Länge des Balkens die aktivitätsspezifische Dauer. Es wird deutlich, dass sich die Aktivitätsprofile zwischen Werktag und Wochenende signifikant unterscheiden.

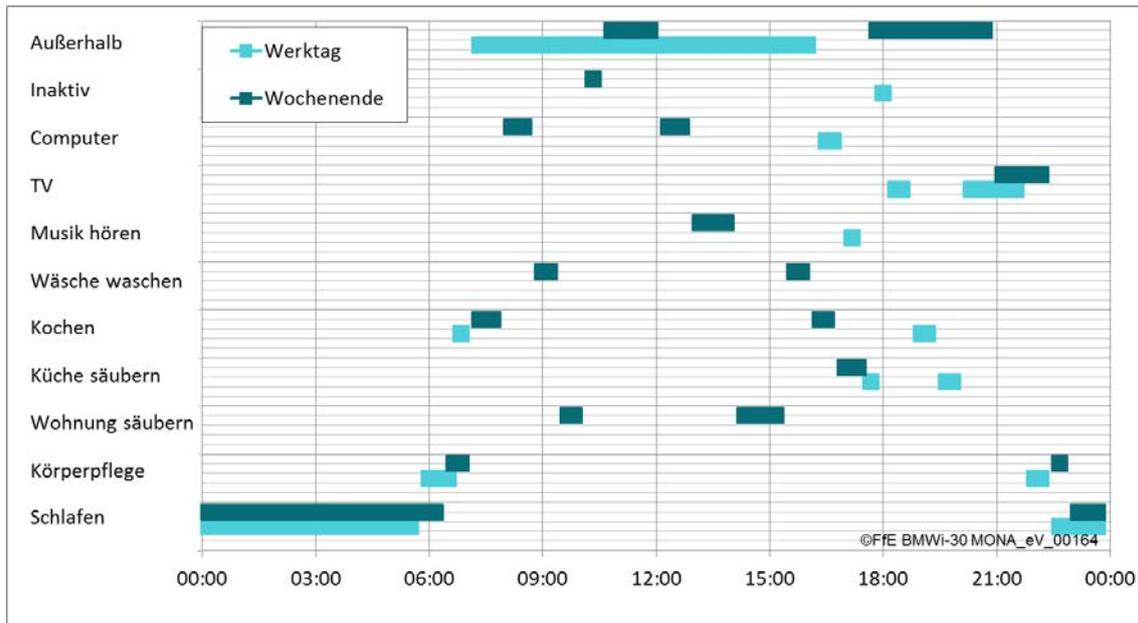


Abbildung 4-1: *Beispiel eines Tagesaktivitätsprofils für einen Werk- bzw. Wochenendtag mit modifiziertem Code-Schema /FFE-45 17/*

Anlehnend an /WID-01 09/ lassen sich basierend auf diesen Aktivitätsprofilen für jeden Bewohnertyp eines Haushaltes Einschaltwahrscheinlichkeiten für verschiedene Geräte bzw. Zapfwahrscheinlichkeiten für die einzelnen TWW-Zapfstellen bestimmen. Diese Wahrscheinlichkeiten kombiniert mit den charakteristischen Energieverbräuchen der Geräte ergibt ein für jeden Bewohnertyp spezifisches Lastprofil. Ein Zufallsgenerator ermöglicht die realistische Verminderung von Gleichzeitigkeitseffekten und die Integration von Ungleichmäßigkeiten in die Lastgänge (z. B. späteres Aufstehen an einem Wochentag). Eine detaillierte Beschreibung des Lastganggenerators ist /FFE-45 17/ zu entnehmen.

Um einen realistischen Verlauf zu erzielen, ist ein Vergleich des Lastgangs mit aus der Literatur bekannten Charakteristika von TWW-Lastprofilen notwendig. Diese sind vor allem der gesamte Energieverbrauch, die Anteile der einzelnen Zapfstellen am gesamten Energiebedarf sowie der gemittelte typische Verlauf des Lastgangs.

TWW-Energieverbrauch

In /VDI-01 08/ wird von einem jährlichen Energieverbrauch von 500 kWh TWW pro Person in einem Einfamilienhaus und 1.000 kWh TWW pro Wohneinheit in einem Mehrfamilienhaus ausgegangen. /REC-01 16/ hingegen beziffert den TWW-Bedarf von einem Einfamilienwohnhaus mit 636 bis 1.062 kWh/Jahr. In /FFE-05 02/ zeigte sich, dass der TWW-Bedarf in den Normen tendenziell unterschätzt wird. Messungen in mehreren Gebäuden haben deutlich gemacht, dass der jährliche TWW-Bedarf zwischen 520 und 770 kWh/Jahr liegt. Durchschnittlich lag er bei 706 kWh/Jahr pro Person. Auch aus den Energiedaten für Deutschland ergibt sich mit einem Endenergiebedarf für die Bereitstellung von TWW von insgesamt 329,6 PJ /BMWi-01 17/ und der Anzahl der Einwohner von 82,2 Mio. /DESTATIS-06 15/ ein durchschnittlicher TWW-Endenergiebedarf von 1.114 kWh/Jahr. Dieses Verhältnis von Endenergiebedarf zu Bewohneranzahl unterlag in den vergangenen Jahren nur geringen Schwankungen. Hieraus ergeben sich mit dem in /IFE-02 03/ ermittelten Richtwert durchschnittlichen

Bereitstellungsnutzungsgrad von 72 % ein TWW-Nutzenergiebedarf von 802 kWh/Jahr. Somit lässt sich ableiten, dass die Werte aus /FFE-05 02/ näher an den realen Verbräuchen liegen und der Zielwert für den gesamten TWW-Zapfenergiebedarf auf 706 kWh/Person festgelegt wird.

Anteile der Zapfstellen am Energiebedarf

Um die Effizienzsteigerung einzelner Zapfstellen nicht zu überschätzen, wird überprüft ob die Anteile der Energieverbräuche einzelner Zapfstellen im Lastganggenerator mit den in der Literatur verfügbaren Daten übereinstimmen.

Laut Daten des BDEW teilt sich der Trinkwasserbedarf in Haushalten, bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 122 l/ Person am Tag wie in **Tabelle 4-1** dargestellt auf /BDEW-03 17/. Allerdings werden hier die Zapfstellen Waschbecken und Dusche zusammen aufgelistet.

Tabelle 4-1: *TWW-Bedarf in deutschen Haushalten nach Anwendung gemäß /BDEW-03 17/ und berechnete relevanten Anteile für den TWW-Bedarf*

Aktivität	Anteil am gesamtem Trinkwasserbedarf	Anteil am Trinkwarmwasserbedarf	Tägliches Bedarfsvolumen
Baden/ Duschen/ Körperpflege	36 %	75 %	44 l
Toilettenspülung	27 %	-	
Wäsche waschen	12 %	-	
Kleingewerbeanteil	9 %	-	
Raumreinigung/ Autopflege/ Garten	6 %	13 %	7 l
Geschirrspülen	6 %	13 %	7 l
Essen/Trinken	4 %	-	

Auch in VDI 2067 Blatt 12:2017-04 /VDI-01 17/ sind Standardwerte für Wasserverbrauchsvolumina und Energiemengen je Anwendung angegeben (siehe **Tabelle 4-2**). Hier wiederum ist die Reinigung der Wohnung nicht explizit als verbrauchsrelevante Zapfstelle hinterlegt.

Tabelle 4-2: *Wasserverbrauch der verschiedenen Anwendungen des TWW-Bedarfs gemäß /VDI-01 17/*

	Durchschnittlicher Wasserverbrauch-nach TWW- Anwendung		
	Minimalwerte	Mittelwerte	Maximalwerte
Dusche	6 l/Tag	18 l/Tag	30 l/Tag
Waschtisch	8 l/Tag	12 l/Tag	16 l/Tag
Spülen von Hand	5 l/Tag	5 l/Tag	5 l/Tag

Zwar sind in /VDI-01 17/ ebenfalls Energieverbräuche dargestellt, die Werte sind jedoch hier nicht passend, da andere Annahmen zu den Zapftemperaturen an den einzelnen Zapfstellen getroffen wurden. Zunächst werden die Verbrauchsvolumina aus Tabelle 4-1 mit der Aufteilung Dusche zu Waschtisch aus Tabelle 4-2 verknüpft.

Berechnet man hieraus mit den festgelegten Temperaturniveaus der Zapfungen (gemäß /REC-01 16/) ergeben sich die in **Tabelle 4-3** dargestellten Anteile der unterschiedlichen Zapfstellen am gesamten TWW-Bedarf eines Haushalts.

Tabelle 4-3: *Abgeleitete Anteile am TWW-Bedarf aus /BDEW-03 17/ und /VDI-01 17/*

	Durchschnittliches tägliches Verbrauchsvolumen je Zapfstelle	Festgelegte Temperaturniveaus der Zapfstellen gemäß /REC-01 16/	Anteil an gesamter TWW-Bereitstellung nach Anwendung
Dusche	26 l/Tag	40 C	42 %
Waschtisch	18 l/Tag	35 C	25 %
Spülen von Hand	7 l/Tag	55 C	16 %
Raumreinigung/Autopflege	7 l/Tag	55 C	16 %

Die Validierung des Lastgangs anhand dieser Daten und die Evaluierung von Verbrauchsminderungspotenzialen erfolgt in Kapitel 5.1.

4.3 Ermittlung der Nutzungsfrequenz von Zapfstellen

Zwar sind in /VDI-01 17/ Nutzungsfrequenzen für die verschiedenen Zapfstellen hinterlegt, diese können auf Grund des zu geringen gesamten Energiebedarfes in der Norm jedoch nicht als repräsentativ angenommen werden. Die Nutzungsfrequenzen werden daher über den im validierten Lastganggenerator berechneten Verbrauch je Zapfstelle und den festgelegten Verbräuchen je Zapfung berechnet.

4.4 Berechnung der Wirtschaftlichkeit investiver Maßnahmen

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden Annuität, Kapitalwert, Amortisationsdauer (statisch und dynamisch) und interner Zinsfuß berechnet. Diese Kennzahlen sowie die getroffenen Annahmen werden nachfolgend kurz erläutert. Darüber hinaus werden in den **Kapiteln 5.4** und **7.6** weitere Annahmen dargelegt, welche bei der Analyse von Einsparungen durch investive Maßnahmen bzw. für die Berechnungen im Rechentool notwendig sind.

Annuität

Über die Annuität wird die Investition K_0 unter Berücksichtigung des Kalkulationszinssatzes r gleichmäßig über die gesamte Lebensdauer T verteilt. Allgemein berechnet sich diese nach **Formel (2)**.

$$Annuität = K_0 \cdot \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (2)$$

Als Kalkulationszinssatz wird für diese und alle weiteren Berechnungen die Verzinsung einer 30-jährigen Bundesanleihe in Höhe von 1,037 %¹ verwendet /FIN-01 17/.

¹ Kurs zum 26.06.2017

Kapitalwert

Mittels des Kapitalwerts können Maßnahmen mit verschiedenen Anfangsinvestitionen und Einzahlungsüberschüssen verglichen werden. Für die Berechnung werden die in der Zukunft liegenden Einzahlungsüberschüsse C_t auf den Zeitpunkt der Investition abgezinst und anschließend die Anfangsinvestition K_0 abgezogen.

$$KW_0 = -K_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

Die Einzahlungsüberschüsse C_t entsprechen hierbei den Kosteneinsparungen durch die entsprechende Maßnahme. Ist der Kapitalwert einer Investition positiv, so wird eine Rendite größer des angenommenen Kalkulationszinssatzes r erwirtschaftet, die Investition sollte also durchgeführt werden. Eine Investition mit negativem Kapitalwert sollte hingegen nicht realisiert werden.

Amortisationsdauer

Die Amortisationsdauer entspricht dem „Zeitpunkt, in dem die Summe der Einzahlungsüberschüsse eines Investitionsprojekts (bei statischer Amortisationsrechnung) oder deren Barwert (bei dynamischer Amortisationsrechnung) gleich der Investitionsausgabe (Anschaffungsauszahlung) ist“ /GAB-02 17/. Die dynamische Amortisationsdauer ist in jedem Fall etwas länger, da hier die Anfangsinvestition im Vergleich zu den Kosteneinsparungen während der Lebensdauer stärker ins Gewicht fällt. Bei den betrachteten Maßnahmen in **Kapitel 5** werden ein konstanter Strompreis und somit konstante jährliche Kosteneinsparungen C_t über die gesamte Laufzeit angenommen. Daher ergibt sich die statische Amortisationsdauer mit Anfangsinvestitionen K_0 als:

$$\text{statische Amortisationsdauer} = \frac{K_0}{C_t} \quad (4)$$

Die dynamische Amortisationsdauer ist etwas länger, da hier die Anfangsinvestition im Vergleich zu den zukünftigen Kosteneinsparungen stärker ins Gewicht fällt. Allerdings sind die Kosten für die hier betrachteten Maßnahmen vergleichsweise gering, so dass der Unterschied nur marginal ausfällt.

Interner Zinsfuß

„Der interne Zinsfuß ist der Diskontierungszinssatz, bei dem der Kapitalwert des Investitionsprojektes gleich null ist“ /GAB-03 17/. Eine Investition ist demnach vorteilhaft, wenn ihr interner Zinsfuß größer als der angenommene Kalkulationszinssatz ist.

Angesetzte Kosten für die Bereitstellung TWW-Wärme

Für die Preise der Endenergieträger werden die in **Tabelle 4-4** genannten Werte verwendet. Der Preis für Heizöl beträgt 49,21 €/100 l. Da diese Angabe für den unteren Heizwert gilt, wird er mit dem unteren Heizwert von 10,08 kWh/l /REC-01 16/ verrechnet. Somit ergibt sich ein Heizölpreis von 4,89 €/kWh. Die Kosten für das Trinkwasser selber (1,67 €/m³ /ITNRW-01 17/) werden im Rahmen dieser Studie vernachlässigt.

Tabelle 4-4: *Angesetzte Preise für Endenergieträger aus /BMWI-08 17/*

Kostenkomponente	Preise
Strom	29,33 €/kWh
Erdgas	6,86 €/kWh
Heizöl	4,89 €/kWh

5 Ermittelte Einsparungen

Im folgenden Kapitel werden die Studienparameter zur Berechnung der Energie- und Kosteneinsparpotenziale sowie die ermittelten Einsparungen der verschiedenen TWW-Bereitungsstufen von der TWW-Zapfstelle bis zum Erwärmer erläutert. Eine tabellarische Übersicht über die verschiedenen kombinierten Einsparungen ist in **Kapitel 5.5** dargestellt.

5.1 Einsparungen durch Verbrauchsanpassung

Bei den hier betrachteten Zapfstellen handelt es sich um Dusche, Waschbecken, Spültisch zum Geschirrspülen, Spültisch zur Wohnungsreinigung und die Badewanne. In der Literatur sind für deren Energieverbräuche stark schwankende Werte zu finden. Im Folgenden werden Spannbreiten der Einflussparameter dargestellt, um die entsprechenden Einsparpotenziale zu ermitteln. Hierbei wird für jede Zapfstelle unterschieden zwischen einer Reduzierung der Zapfdauer durch eine Verhaltensänderung und eine Reduzierung des Zapfvolumenstroms durch Einsatz eines Durchflussbegrenzers bzw. einer Spararmatur. In den Berechnungen der Energieverbräuche an den einzelnen Zapfstellen, wird immer mit einer Referenztemperatur des kalten Wassers von 10 °C gerechnet /REC-01 16/.

Dusche

Für die Berechnung der Energieverbräuche wird eine Zapf-Standardtemperatur beim Duschen von 40 °C angesetzt /REC-01 16/.

Insbesondere die Duschkauern variieren mit zwischen 4 und 16 Minuten /BEV-01 17/ extrem zwischen verschiedenen Personen, wodurch auch das je Zapfung benötigte TWW-Volumen stark schwankt. Die in der Studie berechneten Einsparungen durch die Anpassung der Duschkdauer werden über die in **Tabelle 5-1** dargestellten Zapfvolumina je Zapfung bestimmt. Die Nutzungsfrequenz wurde zu 180 Zapfungen im Jahr ermittelt.

Tabelle 5-1: *Übersicht der verschiedenen Verbrauchsniveaus für die Dusche bei einer Standardtemperatur von 40° C und einem Standardvolumenstrom von 8,34 l/min /REC-01 09/*

Zapfdauer	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
16 min	133 l	4,63 kWh	833,5 kWh	0 %
14 min	117 l	4,05 kWh	729,3 kWh	13 %
12 min	100 l	3,47 kWh	625,2 kWh	25 %
10 min	83 l	2,98 kWh	521,0 kWh	38 %
8 min	67 l	2,32 kWh	416,8 kWh	50 %
6 min	50 l	1,74 kWh	312,6 kWh	63 %
4 min	33 l	1,16 kWh	208,4 kWh	75 %

Beispielhafte Kosten bei der TWW-Bereitstellung über einen hydraulischen und einen elektronischen Durchlauferhitzer durch die Anpassung der Dushdauer sind in **Abbildung 5-1** dargestellt.

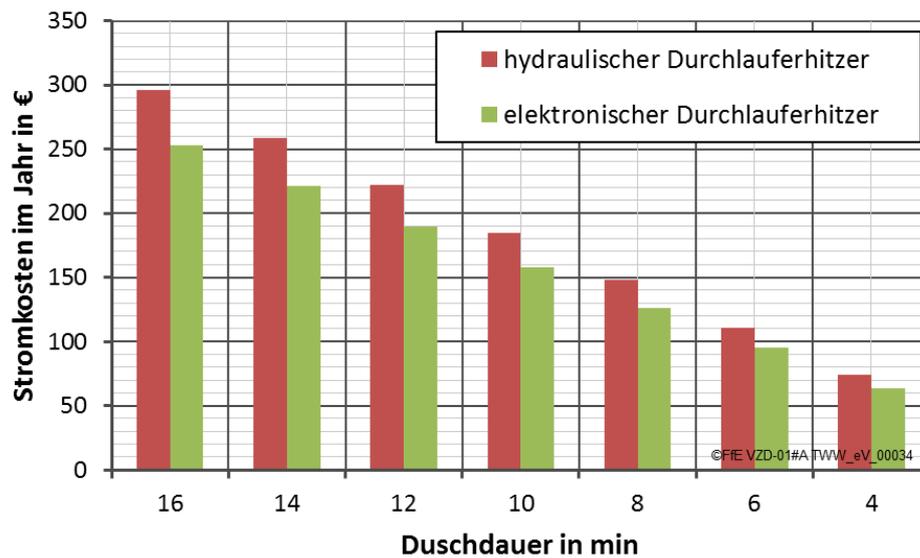


Abbildung 5-1: Darstellung der jährlichen Stromkosten für die TWW-Bereitstellung bei hydraulischen und elektronischen Durchlauferhitzern in Abhängigkeit der Dushdauer

Die Einsparung von TWW beim Duschen ist zudem durch die Verwendung einer Duschbrause mit geringerem Durchflussvolumenstrom möglich. Im Baumarkt sind verschiedene ein- bis dreistrahlige Duschköpfe, teilweise mit verschiedenen Sonderfunktionen, verfügbar. Von diesen weisen viele eine Durchflussmenge von unter 10 l/min aus. Im Bestand sind jedoch viele Duschen mit einem Volumenstrom von bis zu 16 l/min verbaut /DPA-01 16/. Resultierende Energie- und Kosteneinsparungen sind **Tabelle 5-2** zu entnehmen.

Tabelle 5-2: Übersicht der verschiedenen Verbrauchsniveaus für die Dusche bei einer Standardtemperatur von 40 °C und Standarddauer von 6 Minuten /REC-01 16/, /BEV-01 17/

Durchflussvolumenstrom	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
16 l/min	96 l	3,33 kWh	599,7 kWh	0 %
9,5 l/min	57 l	1,98 kWh	356,1 kWh	41 %
8 l/min	48 l	1,67 kWh	299,8 kWh	50 %
6 l/min	36 l	1,25 kWh	224,9 kWh	63 %

Für den Austausch der Duscharmaturen mit hohem TWW-Bedarf mit einer neuen Armatur werden die im Baumarkt ermittelten Kosten in **Tabelle 5-3** angesetzt. Die Lebensdauer der Armaturen wird mit 15 Jahren angenommen.

Tabelle 5-3: *Übersicht über gemittelte Preise der Duscharmaturen abhängig vom Zapfvolumenstrom*

Durchflussvolumenstrom	Durchschnittlicher Preis
9,5 l/min	19,39 €
8 l/min	20,36 €
6 l/min	27,49 €

Zur Bewertung des Einbaus von Spararmaturen wird auf die Berechnung der Annuität und der dynamischen Amortisationsdauer verzichtet, da in diesem Fall nur sehr geringe Ausgaben notwendig sind. **Tabelle 5-4** zeigt die Ergebnisse für die drei betrachteten Spararmaturen. Die attraktivste Option ist eine Spararmatur mit einer Durchflussmenge von 6 l/min. Mit Kosten von 19,39 € und monatlichen Kosteneinsparung von 9,44 €, hat sich die Anschaffung bereits nach zwei Monaten gelohnt.

Tabelle 5-4: *Kennzahlen der Wirtschaftlichkeit verschiedener Spararmaturen bei Kombination mit einem elektronischen Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$)*

Spararmatur und Durchflussvolumenstrom	Gesamte jährliche Einsparung	Gesamte Kosteneinsparung über die Lebensdauer	Statische Amortisationsdauer
Dusche 9,5 l/min	73,66 €/Jahr	1.104,93 €	4 Monate
Dusche 8 l/min	90,66 €/Jahr	1.359,92 €	3 Monate
Dusche 6 l/min	113,33 €/Jahr	1.699,90 €	2 Monate

Waschbecken

Eine Reduzierung des TWW-Bedarfes der Zapfungen am Waschbecken ist ebenfalls durch eine Reduzierung der Zapfdauer und des Zapfvolumenstromes möglich. Während **Tabelle 5-5** eine mögliche Variation der Zapfdauer und das resultierende Zapfvolumen je Zapfung ausweist, wird in **Tabelle 5-6** eine Variation des Volumenstromes durch die Armaturen betrachtet. Die Nutzungsfrequenz wurde zu 783 Zapfungen im Jahr ermittelt.

Für die Berechnungen der Energieeinsparung wird eine Standardtemperatur für Zapfungen am Waschbecken von 35 °C angenommen /REC-01 09/.

Tabelle 5-5: *Übersicht der verschiedenen Zapfdauern für das Waschbecken bei konstanter durchschnittlicher Durchflussmenge von 5 l/min /REC-01 16/*

Quelle für Zapfdauer	Verbraucher	Zapfdauer	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
/REC-01 09/	Waschbecken hoher Verbrauch	3 min	15 l	0,43 kWh	339,7 kWh	0%
/REC-01 09/	Waschbecken Standard	1,5 min	7,5 l	0,22 kWh	169,8 kWh	50%
Selbst gemessener Wert	Waschbecken geringer Verbrauch	0,5 min	2,5 l	0,07 kWh	56,6 kWh	83%

Tabelle 5-6: *Übersicht der verschiedenen Zapfvolumenströme für das Waschbecken bei konstanter durchschnittlicher Zapfdauer von 1,5 min /REC-01 09/*

Quelle für Volumenstrom	Verbraucher	Durchflussvolumenstrom	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
/REC-01 16/	Waschbecken hoher Verbrauch	7 l/min	10,5 l	0,30 kWh	237,8 kWh	0%
/REC-01 16/	Waschbecken Standard	5 l/min	7,5 l	0,22 kWh	169,8 kWh	29%
/REC-01 16/	Waschbecken geringer Verbrauch	3 l/min	4,5 l	0,13 kWh	101,9 kWh	57%

Es wird deutlich, dass die Einsparungen je Zapfung zwar gering ausfallen, die jährlichen Einsparungen auf Grund der hohen Zapffrequenz jedoch insgesamt ebenfalls sehr hoch ausfallen können.

Spülbecken für das Geschirrspülen und Reinigen der Wohnung

Spülbecken in der Küche werden meist zum Spülen von Geschirr sowie zur Zapfung von TWW zur Wohnungsreinigung genutzt. Einsparpotenzial besteht hier vor allem beim Spülen von Geschirr durch eine Reduzierung der Dauer der Zapfung z.B. durch Einlassen des Spülbeckens statt das TWW kontinuierlich laufen zu lassen (**Tabelle 5-7**). Gleichmaßen lässt sich das Zapfvolumen durch eine Reduzierung der Durchflussmenge an der Spülarmatur verringern (**Tabelle 5-8**).

Die angegebenen Durchschnittswerte je Zapfung für das Spülen werden in /VDI-01 17/ geringer angesetzt. Allerdings wird in der Norm mit einer Spülhäufigkeit von 216 Zapfungen im Jahr gerechnet. Bei den hier betrachteten Werten handelt es sich eher um ein selteneres, aber dafür größeres Spülereignis. Die Nutzungsfrequenz des Spülbeckens für Spülen und Putzen wurde zu 142 Zapfungen im Jahr ermittelt.

Die Standardtemperatur für Zapfungen am Spülbecken beträgt 55 °C /REC-01 09/.

Tabelle 5-7: *Übersicht der verschiedenen Zapfdauern für das Spülbecken für die Reinigung der Wohnung oder das Spülen bei konstanter durchschnittlicher Durchflussmenge von 6 l/min /REC-01 16/*

Quelle für Zapfdauer	Verbraucher	Zapfdauer	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
/REC-01 09/	Küchenspüle hoher Verbrauch	8,3 min	50 l	2,59 kWh	369,6 kWh	0 %
/REC-01 09/	Küchenspüle Standard	5 min	30 l	1,56 kWh	221,8 kWh	40 %
/REC-01 09/	Küchenspüle geringer Verbrauch	2,5 min	15 l	0,78 kWh	110,9 kWh	70 %

Tabelle 5-8: *Übersicht der verschiedenen Zapfvolumina für das Spülbecken für die Reinigung der Wohnung oder das Spülen bei konstanter durchschnittlicher Zapfdauer von 5 min /REC-01 16/*

Quelle für Zapfdauer	Verbraucher	Durchflussvolumenstrom	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährlicher Energieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
/REC-01 09/	Küchenspüle hoher Verbrauch	10 l/min	50 l	2,60 kWh	368,1 kWh	0%
/REC-01 09/	Küchenspüle Standard	6 l/min	30 l	1,56 kWh	221,8 kWh	40%
/REC-01 09/	Küchenspüle geringer Verbrauch	3 l/min	15 l	0,78 kWh	110,9 kWh	70%

Da die Einsparungen durch Anpassung der Zapfdauer und des Zapfvolumenstromes gleich hoch ausfallen, wird deutlich, dass beide Alternativen ein weitreichendes Potenzial zur Energie- und Kosteneinsparung darstellen. Der Nutzer kann somit entscheiden, welche der Varianten die attraktivere oder eher umsetzbare ist, wenn eine Einsparung erzielt werden soll.

Badewanne

Eine Übersicht über die verschiedenen Verbrauchsniveaus für die Badewanne ist in **Tabelle 5-9** dargestellt. Es ist anzumerken, dass das benötigte Volumen hier vor allem von der Größe der Badewanne abhängt und somit nur in begrenztem Ausmaß durch Zapfdauer und –volumenstrom begrenzt werden kann.

Da die Nutzung der Badewanne eher als Entspannungsmaßnahme und nicht als einfache „Reinigung“ zu sehen ist, wird diese im Folgenden nicht genauer betrachtet. Des Weiteren ist eine teilweise Befüllung der Badewanne unrealistisch. Zudem hat der Konsument wenig Einfluss auf Badewannengröße und kann lediglich bei Neukauf der Badewanne dessen Größe und somit TWW-Volumenbedarf beeinflussen.

Tabelle 5-9: Übersicht der verschiedenen Verbrauchsniveaus für die Badewanne

Quelle	Verbraucher	Verbrauchsvolumen	Energieverbrauch je Zapfung	Jährliche Einsparung Zapfenergie
/REC-01 09/	Badewanne groß	250 l	8,67 kWh	0 %
/REC-01 09/	Badewanne mittel	150 l	5,20 kWh	50 %
/REC-01 09/	Badewanne klein	100 l	3,47 kWh	150 %

Kombinierte Betrachtung der Zapfstellen mittels Lastganggenerator

Die in **Tabelle 5-10** festgelegten Standardzapfungen wurden in den Lastganggenerator eingebunden und der erzeugte Lastgang daraufhin anhand der in **Kapitel 4.2** genannten Kriterien validiert, um repräsentative Aussagen zu Einsparpotenzialen durch Anpassung des Verbraucherverhaltens treffen zu können.

Tabelle 5-10: Festgelegte Standardzapfungen für Lastganggenerator

Quelle	Zapfstelle	Verbrauchsvolumen	Zapfdauer	Temperatur	Durchflussvolumenstrom
/REC-01 09/	Dusche	50 l	6 min	40 °C	8,3 l/min
/REC-01 16/	Waschbecken	7,5 l	1,5 min	35 °C	5 l/min
/REC-01 09/	Spülbecken zum spülen	30 l	5 min	55 °C	6 l/min
/REC-01 09/	Spülbecken zum putzen	30 l	5 min	55 °C	6 l/min

Eine Auswertung der generierten Zapfprofile zeigt, dass sich beim Standardnutzer die Energieverbräuche folgendermaßen anteilig auf die Zapfstellen aufteilen: Dusche 44,4 %, Waschbecken 24,1 %, Spültisch zum Putzen 15,3 % und Spültisch zum Spülen 16,2 %. Somit liegen die Ergebnisse des Lastganggenerators nah genug an den in Kapitel 4.2 bestimmten Anteilen und ermöglichen es repräsentative Aussagen zu treffen.

Weitere eingebundene Verbrauchsniveaus

Um die mögliche Energieverbrauchsminderung über ein Jahr zu bestimmen werden für die genannten Zapfstellen die Zapfmengen verschiedener Verbrauchsniveaus eingebunden. Für die Dusche wurden die in **Tabelle 5-11** dargestellten Zapfmengen verwendet. Da bei den anderen Zapfstellen vor allem das Verbraucherverhalten als wichtige Einsparmöglichkeit betrachtet wird, werden für diese die Zapfmengen bei konstantem Durchfluss und veränderter Zapfdauer verwendet (Waschbecken: Tabelle 5-5, Spülbecken: Tabelle 5-7). Eine Variation der Zapfungen der Badewanne wird nicht betrachtet.

Tabelle 5-11: *Übersicht der verschiedenen Verbrauchsniveaus für die Dusche*

Verbrauchs-niveau	Zapfdauer	Durchfluss-volumenstrom	Verbrauchs-volumen	Energieverbrauch je Zapfung
Hoher Verbrauch	10 min	16 l/min	160 l	5,55 kWh
Erhöhter Verbrauch	8 min	10 l/min	80 l	2,78 kWh
Standard Verbrauch	6 min	8,3 l/min	50 l	1,74 kWh
Niedriger Verbrauch	5 min	7 l/min	35 l	1,21 kWh

Die Ergebnisse der resultierenden Energieeinsparungen durch die Einbindung der verschiedenen Verbrauchsniveaus sind in **Tabelle 5-12** und **Tabelle 5-13** dargestellt. Hierbei werden in Tabelle 5-12 die Verbrauchsniveaus aller Zapfstellen verändert. In Tabelle 5-13 wurde lediglich das Verbrauchsniveau der Dusche variiert, bei mittlerem Verbrauch der anderen Zapfstellen.

Tabelle 5-12: *Übersicht der resultierenden Energieverbräuche abhängig vom Verbrauchsniveau aller Zapfstellen*

Verbrauchsniveau	Zapfenergieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
Hoher Verbrauch für alle Zapfstellen	1.707,2 kWh	0 %
Standardverbrauch für alle Zapfstellen	703,9 kWh	59 %
Niedriger Verbrauch für alle Zapfstellen	386,1 kWh	77 %

Tabelle 5-13: *Übersicht der resultierenden Energieverbräuche abhängig vom Verbrauchsniveau der Dusche*

Verbrauchsniveau	Zapfenergieverbrauch	Jährliche Einsparung Zapfenergie
Hoher Verbrauch der Dusche	1.391,0 kWh	0 %
Erhöhter Verbrauch der Dusche	891,3 kWh	36 %
Standard Verbrauch der Dusche	703,9 kWh	49 %
Niedriger Verbrauch der Dusche	610,2 kWh	56 %

5.2 Einsparungen durch Verminderung von Verteilverlusten

Wie in **Kapitel 3** beschrieben muss in der Realität zwischen Ablauf-, Anlauf-, Zirkulations- und Verteilverlusten unterschieden werden, welche aber stark interdependent sind. Ablaufverluste werden in dieser Studie nicht genauer betrachtet. Da Verteilverluste der Stichelung in der Wohnung nur einen geringen Anteil an den anfallenden Energieverlusten und somit Kosten ausmachen /MUE-01 07/, wird auf diese ebenfalls nicht im Detail eingegangen.

Wie in Kapitel 3 beschrieben ist in Ein- und Zweifamilienhäusern zwischen Gebäuden mit Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb zu unterscheiden. Bei Stichleitungen lassen sich Verluste primär durch eine verbesserte Dämmung der Rohre erreichen. Zirkulationsverluste hingegen sind des Weiteren abhängig von der Zirkulationsdauer. Auf Grund der vielen Stellhebel zur Senkung der Verteilverluste wird einzeln auf diese eingegangen. Daten zu thermischen Verlusten von TWW-Leitungen liegen der FfE durch Messungen in verschiedenen Gebäudetypen und Baualtersklassen durch /FFE-05 02/ und /MUE-01 07/ vor.

TWW-Temperaturniveau

Generell besteht die Möglichkeit über eine Absenkung der TWW-Temperatur im Verteilsystem die Verluste zu begrenzen. Dies ist jedoch nur im Rahmen des in **Kapitel 7.1** genannten hygienisch unbedenklichen Temperaturbereich möglich.

Isolation von Zirkulations- und Verteilrohren

Die Wärmeverluste eines Kupferrohres betragen bei einem Durchmesser von 22 mm ca. 60 W/m, seit der Einführung der Heizungsanlagenverordnung 95 sind maximale Verluste von 8 W/m erlaubt /FFE-05 02/. Mit der Energie-Einsparverordnung (EnEV) 2002 wurde die Anforderung an die Dicke des Dämmmaterials festgelegt, welche bis zur aktuellen Version der EnEV gelten. Zum Beispiel müssen Rohre mit dem Durchmesser von 22 mm mit einer Dämmschicht von 20 mm umschlossen werden, wobei es unter anderem Ausnahmen für kurze Stichleitungen von bis zu 3 m gibt. Untersuchungen im Gebäudebestand im Rahmen von /FFE-05 02/ haben gezeigt, dass in Neubauten ein Verlustwert von bis zu 5 W/m erreicht wird. Gleichmaßen sind im Gebäudebestand weiterhin viele Rohre im Gebäudebestand nicht oder nicht ausreichend isoliert /MUE-01 07/. Hier sind durch einfache Dämmung offener liegender Rohre Dämmpotenziale erschließbar. **Tabelle 5-14** gibt eine Übersicht über die durchschnittlich in /MUE-01 07/, /FFE-05 02/, /FFE-84 11/ ermittelte Rohrlängen und Verlustkoeffizienten der verbauten Rohre.

Tabelle 5-14: *Charakteristika der Verteilrohre für die verschiedenen Gebäudetypen, abgeleitet aus /MUE-01 07/, /FFE-05 02/, /FFE-84 11/*

Versorgungssystem	Rohrlänge	Verlustkoeffizient verbauter Rohre
Einfamilienhaus Stichleitung	6,3 m	11,6 W/m
Einfamilienhaus Zirkulation	25,9 m	11,6 W/m
Zweifamilienhaus Stichleitung	12 m	14,5 W/m
Zweifamilienhaus Zirkulation	13,2 m	14,5 W/m
Mehrfamilienhaus mit 5 WE	36 m	24,3 W/m
Mehrfamilienhaus mit 7 WE	51 m	24,3 W/m
Mehrfamilienhaus mit 16 WE	80 m	24,3 W/m

Mit Hilfe von Dämmmaterial um die Rohre lassen sich diese auftretenden Verluste sehr stark verringern. In **Tabelle 5-15** sind der resultierende Verlustkoeffizient abhängig von der Dämmdicke des Rohres sowie die Preise für das Dämmmaterial aufgetragen. Es ist zu beachten, dass die Verluste ab einer gewissen Dämmdicke auf Grund der hohen Oberfläche wieder zunehmen. Hierbei ist außerdem zu berücksichtigen, dass die

Dämmdicke von 0,015 m nicht den EnEV-Anforderungen für Neubauten und grundsanierte Gebäude entsprechen würde.

Hier wurde ein Preis für das Dämmmaterial „Steinwolle alukaschiert“ angenommen. Bei feuerbeständigen Materialien, mit welchen nach EnEV gedämmt werden kann, steigt der Preis auf 7,90 €/m /EMAX-04 17/, bei Hartschaummaterialien auf 4,20 €/m /EMAX-01 17/.

Tabelle 5-15: Erreichbare Leistungsverluste abhängig von der Dämmdicke von Rohren mit Durchmesser 0,022 m und Kosten für Dämmmaterial Steinwolle alukaschiert /EMAX-02 17/, /EMAX-03 17/

Dämmdicke bei spez. Wärmeleitfähigkeit 0,037 W/mK	Resultierende spezifische Leitungsverluste	Preis für Dämmmaterial
0 m	60,00 W/m	-
0,015	6,97 W/m	1,79 €/m
0,022	6,00 W/m	2,36 €/m

Gemäß DIN V 4701-10 berechnen sich Zirkulationsverluste gemäß **Formel (5)** und die Verluste in Zeiten ohne Zirkulation gemäß **Formel (6)**. Während im Folgenden der Wärmeverlustkoeffizient U_{Rohr} und die Zirkulationsdauer t_{Zirk} variieren, werden für die relevanten Temperaturen die Werte aus /IWU-01 02/ übernommen, und zwar eine Zirkulationstemperatur von $T_{\text{Zirk}} = 50 \text{ °C}$, eine Temperatur bei Zirkulationspause von $T_{\text{keine Zirk}} = 32 \text{ °C}$ und eine Umgebungstemperatur von $T_{\text{Umgebung}} = 20 \text{ °C}$.

$$Q_{\text{Verluste Zirkulation}} = \frac{1}{1000} \cdot U_{\text{Rohr}} \cdot L_{\text{Zirk}} \cdot (T_{\text{Zirk}} - T_{\text{keine Zirk}}) \cdot t_{\text{Zirk}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{Verluste keine Zirk}} = \frac{1}{1000} \cdot U_{\text{Rohr}} \cdot L_{\text{Zirk}} \cdot (T_{\text{keine Zirk}} - T_{\text{Umgebung}}) \cdot (24h - t_{\text{Zirk}}) \quad (6)$$

Die resultierenden Energieeinsparungen je Meter gedämmtes Rohr sowie Kosteneinsparung und statische Amortisationsdauer sind in **Tabelle 5-16** dargestellt. In der ökonomischen Betrachtung wird eine Lebensdauer der Wärmedämmung von 20 Jahren /VDI-06 13/ angesetzt.

Tabelle 5-16: Kennzahlen der Wirtschaftlichkeit verschiedener Möglichkeiten der Dämmung der Rohre bei Kosten von 6ct/kWh für bereitgestelltes TWW und einer Zirkulationsdauer von 16 Stunden

Spezifische Leitungsverluste alt	Spezifische Leitungsverluste gedämmt neu	Jährliche spezifische Energieeinsparungen	Jährliche spezifischen Kosteneinsparung	Kosteneinsparung über Lebensdauer	Amortisationsdauer (statisch)
60 W/m	6,97 W/m	310 kWh/m	19,49 €/m	389,79 €/m	1 Monat
	6,00 W/m	315 kWh/m	19,85 €/m	396,92 €/m	1 Monat
15,3 W/m	6,97 W/m	49 kWh/m	3,06 €/m	61,20 €/m	6 Monate
	6,00 W/m	54 kWh/m	3,42 €/m	68,34 €/m	7 Monate
14,5 W/m	6,97 W/m	44 kWh/m	2,77 €/m	55,32 €/m	6 Monate
	6,00 W/m	50 kWh/m	3,12 €/m	62,45 €/m	8 Monate
11,6 W/m	6,97 W/m	27 kWh/m	1,70 €/m	34,00 €/m	13 Monate
	6,00 W/m	33 kWh/m	2,06 €/m	41,14 €/m	14 Monate

Zirkulationsdauern

Durch die Wahl von optimierten Zirkulationsdauern, können Zirkulationsverluste reduziert werden. Zudem sinkt durch verringerte Zirkulationsdauern der elektrische Hilfsenergiebedarf für die Zirkulationspumpen. Allerdings darf die Dauer der Zirkulation in Mehrfamilienhäusern für maximal acht Stunden am Tag ausgesetzt werden /MUE-01 07/. Des Weiteren zeigt /FFE-05 02/, dass nicht adäquat gewählte Zirkulationsdauern die Anlauf- und Zirkulationsstartverluste erhöhen.

Eine Übersicht über die in /FFE-05 02/ ermittelten mittleren und minimalen Zirkulationsdauern ist in **Tabelle 5-17** dargestellt..

Tabelle 5-17: Vergleich zwischen aktuellen und minimalen Betriebsdauern von Zirkulationspumpen abgeleitet aus /FFE-05 02/

Versorgungssystem	Mittelwerte Zirkulationsdauer	Minimalwerte Zirkulationsdauer aus
Einfamilienhaus Zirkulation	10,1 h	1,3 h
Zweifamilienhaus Zirkulation	13,9 h	3,7 h
Mehrfamilienhaus mit 3 bis 6 Wohneinheiten	8 h	7 h
Mehrfamilienhaus mit mehr als 6 Wohneinheiten	20,3 h	16 h

Die hieraus abgeleiteten reduzierten Energieverluste je Meter der Verteilleitung sowie die resultierende Kosteneinsparung bei einem TWW-Bereitstellungspreis von 6 ct/kWh sind in **Tabelle 5-18** zusammengefasst bei spezifischen Leitungsverlusten von 14,5 W/m in **Tabelle 5-19** bei spezifischen Leitungsverlusten von 6 W/m.

Tabelle 5-18: *Vergleich zwischen Zirkulationsverlusten bei aktuellen und minimalen Betriebsdauern von Zirkulationspumpen sowie jährliche Kosteneinsparung bei Kosten von 6 ct/kWh für bereitgestelltes TWW und spezifische Leitungsverlusten von 14,5 W/m*

Versorgungssystem	Jährliche Energieverluste bei Mittelwert der Zirkulationsdauern	Jährliche Energieverluste bei Minimalwert der Zirkulationsdauern	Jährliche spezifische Kosteneinsparung	Jährliche Kosteneinsparung für Gebäude
Einfamilienhaus	90,2 kWh/m	67,0 kWh/m	4,21 €/m	26,55 €
Zweifamilienhaus	100,3 kWh/m	73,3 kWh/m	4,61 €/m	55,36 €
Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten	84,7 kWh/m	81,0 kWh/m	5,16 €/m	185,86 €
Mehrfamilienhaus mit 7 Wohneinheiten	117,2 kWh/m	105,9 kWh/m	6,66 €/m	339,75 €
Mehrfamilienhaus mit 16 Wohneinheiten	117,2 kWh/m	105,9 kWh/m	6,66 €/m	532,94 €

Tabelle 5-19: *Vergleich zwischen Zirkulationsverlusten bei aktuellen und minimalen Betriebsdauern von Zirkulationspumpen sowie jährliche Kosteneinsparung bei Kosten von 6 ct/kWh für bereitgestelltes TWW und spezifische Leitungsverlusten von 6 W/m*

Versorgungssystem	Jährliche Energieverluste bei Mittelwert der Zirkulationsdauern	Jährliche Energieverluste bei Minimalwert der Zirkulationsdauern	Jährliche Kosteneinsparung	Jährliche Kosteneinsparung für Gebäude
Einfamilienhaus	37,4 kWh/m	27,7 kWh/m	1,74 €/m	10,99 €
Zweifamilienhaus	41,5 kWh/m	30,4 kWh/m	1,91 €/m	22,92 €
Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten	35,1 kWh/m)	34,0 kWh/m	2,14 €/m	76,96 €
Mehrfamilienhaus mit 7 Wohneinheiten	48,5 kWh/m	43,8 kWh/m	2,76 €/m	109,02 €
Mehrfamilienhaus mit 16 Wohneinheiten	48,5 kWh/m	43,8 kWh/m	2,76 €/m	220,67 €

Intelligente Zirkulation

Zirkulationsverluste können zudem durch die Verwendung eines intelligenten Zirkulationssystems reduziert werden /FFE-84 11/. Bei einer Zapfung wird die Temperatur in der TWW-Verteilleitung gemessen und mit der geforderten Zapftemperatur verglichen. Im Bedarfsfall wird die Zirkulationspumpe eingeschaltet, um den gewünschten Sollwert an der Zapfstelle schneller als bei einer herkömmlichen Zirkulation zu erreichen. Die Elektronik des Zirkulationssystems speichert die regelmäßigen und täglichen TWW-Zapfungen und kann somit für die folgenden Tage entsprechend dem Nutzerverhalten TWW bereitstellen. Abweichende Zapfintervalle, wie Unterschiede zwischen Werk-, Wochenend- und Feiertagen, werden vom System erkannt und gespeichert. Bei längerer Nichtbenutzung des TWW-Netzes wird ein Programm aktiviert, welches durch regelmäßige Spülungen des Rohrsystems die Bildung von Legionellen und weiteren Mikroorganismen verhindern soll.

5.3 Einsparungen durch Verminderung von Speicherverlusten

Für die Ermittlung der Einsparungen durch den Austausch der TWW-Speicher müssen zum einen typische Speichervolumina als auch typische Warmhalteverluste festgelegt werden.

Speichervolumina

Ein Vergleich der vermessenen Systeme in /MUE-01 07/ und /FFE-05 02/ legt Speichervolumina in Abhängigkeit des Gebäudetyps gemäß **Tabelle 5-20** nahe.

Wärmeverluste

Seit dem 26. September 2015 müssen unter anderem Warmwasserbereiter und TWW-Speicher mit ihrer Energieeffizienzklasse gekennzeichnet werden. Erfüllen müssen die Ökodesign Anforderungen alle Warmwasserspeicher mit einem Volumen bis 2.000 l. Jene mit bis zu 500 l müssen zudem mit einem Energielabel markiert werden.

Die Richtwerte für die maximal erlaubten Verluste werden hierbei stufenweise angepasst und sind immer abhängig vom Speichervolumen. Ab September 2017 müssen TWW-Speicher immer mindestens Effizienzklasse C erfüllen, damit sie den Ökodesign Anforderungen entsprechen. /UBA-14 13/

Eine Übersicht über die Verluste verbauter und aktuell angebotener TWW-Speicher ist ebenfalls Tabelle 5-20 zu entnehmen. In /IWU-01 02/ sind Formeln zur Berechnung der Speicherverluste von verwendeten TWW-Speichern aus den 70er, 80er und 90er Jahren hinterlegt. Gemäß Ökodesign Richtlinie erlaubte thermische Warmhalteverluste lassen sich anhand der in /EU-10 13/ festgelegten Formeln, abhängig von Speichervolumen und Effizienzklasse des TWW-Speichers, bestimmen. Hiermit wiederum lassen sich die jährlich erlaubten Warmhalteverluste berechnen.

Tabelle 5-20: *Charakteristika der TWW-Speicher für die verschiedenen Gebäudetypen, abgeleitet aus /IWU-01 02/, /EU-10 13/*

	Einfamilienhaus TWW-Speicher mit 150 l	Zweifamilienhaus TWW-Speicher mit 200 l	Mehrfamilienhaus TWW-Speicher mit 500 l
	Verluste in kWh/Tag	Verluste in kWh/Tag	Verluste in kWh/Tag
Systeme 70er Jahre	2,36	2,58	3,50
Systeme 80er Jahre	1,88	2,07	2,80
Systeme 90er Jahre	1,61	1,78	2,48
Neuer Speicher mit Effizienzklasse C	1,88	2,06	2,8
Neuer Speicher mit Effizienzklasse B	1,34	1,47	2,00
Neuer Speicher mit Effizienzklasse A	0,96	1,05	1,43

In /FFE-05 02/ weisen auch Speicher des Baualters 1995 und 1997 bei 500 l einen täglichen Speicherverlust von 3,1 kWh/Tag auf und sind somit höher als die Richtwerte

für diese Gebäude abgeleitet aus /IWU-01 02/. Hingegen weisen drei Speicher geringere Verluste auf als es ihren Werten nach /IWU-01 02/ entspräche. Es ist also festzuhalten, dass es sich hier nur um grobe Richtwerte handeln kann.

Die Kosten für den Einsatz eines neuen Speichers sind in **Tabelle 5-21** abhängig von Effizienzklasse und Speichervolumen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Preise zwischen Anbietern recht stark variieren. Bei der Recherche konnten keine Kosten für TWW-Speicher mit Effizienzklasse C bei einem Volumen von 200 l ermittelt werden.

Tabelle 5-21: *Kosten für neue Speicher abhängig von Speichervolumen und Effizienzklasse*

	Einfamilienhaus mit TWW-Speichervolumen 150 l	Zweifamilienhaus mit TWW-Speichervolumen von 200 l	Mehrfamilienhaus mit TWW-Speichervolumen von 500 l
Kosten neuer Speicher Effizienzklasse C in €	477 € ¹	--	988 € ¹
Kosten neuer Speicher Effizienzklasse B in €	606 € ¹	711 € ¹	1.436 € ¹
Kosten neuer Speicher Effizienzklasse A in €	1.673 € ²	1.725 € ²	3.950 € ²

¹ Vergleich verschiedener Angebote,

² Angabe eines Herstellers,

³ keine Hersteller gefunden

Die Lebensdauer von TWW-Speichern wird in der ökonomischen Betrachtung auf 20 Jahre /VDI-06 13/ festgelegt.

In **Tabelle 5-22** sind repräsentativ die Ergebnisse für Speicher in Kombination mit der teuersten hier betrachteten zentralen Versorgungstechnologie, eines Gas-Niedertemperaturkessel aus dem Jahre 2000 (siehe **Tabelle 5-23**), dargestellt. Es zeigt sich, dass sich lediglich der Tausch des 150 l Speichers aus den 70 er Jahren hin zu einem neuen Speicher der Effizienzklasse B innerhalb der Lebensdauer des Speichers wirtschaftlich rechnet.

Tabelle 5-22: Kennzahlen der Wirtschaftlichkeit verschiedener Austauschmöglichkeiten der TWW-Speicher bei Kosten von 10 ct/kWh für bereitgestelltes TWW

Speicher alt	Speicher neu	Jährliche Energieeinsparung	Jährliche Kosteneinsparungen	Amortisationsdauer (statisch)
150 l aus den 70er Jahren	Effizienzklasse C	175,2 kWh	15,27 €	32 Jahre
	Effizienzklasse B	372,3 kWh	32,45 €	19 Jahre
	Effizienzklasse A	511,0 kWh	44,54 €	38 Jahre
150 l aus den 80er Jahren	Effizienzklasse C	0,0 kWh	0,00 €	-
	Effizienzklasse B	197,1 kWh	17,18 €	36 Jahre
	Effizienzklasse A	335,8 kWh	29,27 €	58 Jahre
150 l aus den 90er Jahren	Effizienzklasse C	-98,6 kWh	-8,59 €	-56 Jahre
	Effizienzklasse B	98,6 kWh	8,59 €	71 Jahre
	Effizienzklasse A	237,3 kWh	20,68 €	81 Jahre
200 l aus den 70er Jahren	Effizienzklasse B	405,15 kWh	35,32 €	21 Jahre
	Effizienzklasse A	558,5 kWh	48,68 €	36 Jahre
200 l aus den 80er Jahren	Effizienzklasse B	219,0 kWh	19,09 €	38 Jahre
	Effizienzklasse A	372,3 kWh	32,45 €	54 Jahre
200 l aus den 90er Jahren	Effizienzklasse B	113,2 kWh	9,68 €	73 Jahre
	Effizienzklasse A	266,5 kWh	23,23 €	75 Jahre
500 l aus den 70er Jahren	Effizienzklasse C	255,5 kWh	22,27 €	45 Jahre
	Effizienzklasse B	547,5 kWh	47,72 €	31 Jahre
	Effizienzklasse A	755,6 kWh	65,86 €	60 Jahre
500 l aus den 80er Jahren	Effizienzklasse C	0,0 kWh	0,00 €	-
	Effizienzklasse B	292,0 kWh	25,45 €	57 Jahre
	Effizienzklasse A	500,1 kWh	43,59 €	91 Jahre
500 l aus den 90er Jahren	Effizienzklasse C	-116,8 kWh	-10,18 €	-98 Jahre
	Effizienzklasse B	175,2 kWh	15,27 €	95 Jahre
	Effizienzklasse A	383,3 kWh	33,41 €	119 Jahre

5.4 Einsparungen durch Austausch des TWW-Erwärmers

Zum Vergleich verbauter und neuer TWW-Erwärmer ist es essenziell, dass die Effizienzen unter gleichen Bedingungen ermittelt wurden. Da der Fokus der Untersuchung auf der Effizienz von TWW-Erwärmern liegt, wird nur hierfür detailliert auf die Prüfbedingungen eingegangen nicht jedoch für Geräte zur kombinierten bereitstellung von TWW und Raumwärme.

Zapfprofile für Effizienzmessung von TWW-Erwärmern

Speziell bei TWW-Erwärmern haben die genutzten Zapfprofile einen weitreichenden Effekt auf die Effizienz. Gemessene Daten zur Effizienz verschiedener TWW-Erwärmer wurden 2002 im FfE-Projekt ISOTEG durch Messungen realer Anlagen ermittelt. Hierbei wurden sowohl die Zapfbedingungen nach PrEN 13203 K/D, PrEN 13203 K/ D/ B und einem eigens generierten ISOTEG-TWW-Lastprofil verwendet. Alle Erwärmer wiesen bei Vermessung mit dem ISOTEG-Lastprofil einen in relevantem Ausmaße geringeren Norm-Nutzungsgrad auf, da kürzere und stärker über den Tag verteilte Zapfungen vorgesehen sind. Des Weiteren ist die insgesamt bereitgestellte TWW-Menge geringer. /FFE-05 02/

Tabelle 5-23 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Studie betrachteten TWW-Erwärmer. Da die Daten für ältere TWW-Erwärmer aus ISOTEG verwendet werden, wird für die Bestimmung der Effizienz neuer Erwärmer das Zapfprofil L nach /EU-10 13/ gewählt. Dieses ähnelt den Prüfbedingungen und dem Zapfprofil PrEN 13203 K/D sehr stark, sodass die Ergebnisse vergleichbar sind.

Die Nutzungsgrade für Durchlauferhitzer entstammen Messungen der Stiftung Warentest, welche nach DIN EN 50193–1 und prEN 50193–2–1 prüft /SWT-01 15/. In den Messungen wird deutlich, dass die Effizienz kurzer Zapfungen am Handwaschbecken auch bei den verschiedenen Durchlauferhitzern mit 85 % bis 93 % sehr viel niedriger ist als bei länger andauernden Duschzapfungen von bis zu 100 %. Hier hat die Aufheizung des Durchlauferhitzers selbst Verluste zur Folge. Die in Tabelle 5-23 genannten Nutzungsgrade der Durchlauferhitzer entsprechen den anhand der Zapfprofile gemessenen Daten und sind hiermit mit den anderen Werten vergleichbar.

Für die Gasterme sind keine Messdaten mit Zapfprofil L verfügbar, allerdings für Lastprofil M und XL nach /EU-10 13/. Der in der Tabelle eingetragene Wert ist der Mittelwert dieser Messwerte. Es lässt sich festhalten, dass bei der Recherche viele Gastermen sogar einen geringeren TWW-Effizienzwert aufweisen als das im Jahr 2000 in Rahmen von /FFE-05 02/ vermessene Gerät. Die Lebensdauern der Anlagen zur Bereitstellung von Raumwärme und TWW sind /VDI-01 17/ entnommen.

Tabelle 5-23: Übersicht über Nutzungsgrade, Investitionskosten und erwartete Lebensdauern /SWT-01 15/¹, /VDI-06 13/², /FFE-05 02/³, /SIE-01 17/⁴ /HORN-01 17/⁵, /WOLF-01 15/⁶, /HED-01 17/⁷, /REC-01 16/⁸

Wärmeerzeuger	Alter	Zapfprofil	Norm-Nutzungsgrad	Investitionskosten	Erwartete Lebensdauer
Elektronischer Durchlauferhitzer (hier verschieden effiziente Gerät)	2015	DIN EN 50139	87,0 % ¹	179 € ¹	15 Jahre ²
	2015	DIN EN 50139	97,0 % ¹	280 € ¹	15 Jahre ²
Hydraulischer DLE	2015	DIN EN 50139	83,0 % ¹	245 € ¹	12 Jahre ²
Elektrische beheizter TWW-Speicher (100l)	2000	PrEN 13203 – 1 - L	91,7 % ³	--	20 Jahre ²
	2015	Energy-Related Products Richtlinie - L	92,8 % ⁴	496 € ⁵	20 Jahre ²
Gastherme	2000	PrEN 13203 – 1 - L	71,9 % ³	--	20 Jahre ²
	2015	Energy-Related Products Richtlinie - L	74,0 % ⁶	1.140 € ⁷	20 Jahre ²
Öl-NT-Kessel	2000	TWW und RW	91,3 % ³	--	20 Jahre ²
	2017	TWW und RW	94,0 % ⁸	--	20 Jahre ²
Öl-Brennwertkessel	2017	TWW und RW	105,0 % ⁸	--	20 Jahre ²
Gas-NT-Kessel	1978	TWW und RW	63,9 % ³	--	20 Jahre ²
	2000	TWW und RW	78,7 % ³	--	20 Jahre ²
	2017	TWW und RW	94,0 % ⁸	--	20 Jahre ²
Gas-Brennwertkessel	2000	TWW und RW	92,3 % ³	--	20 Jahre ²
	2017	TWW und RW	109,0 % ⁸	--	20 Jahre ²

Wirtschaftlichkeit des Wechsels des TWW-Erwärmers

Für den Wechsel des TWW-Erwärmers werden die Berechnungen jeweils für einen Zwei- und Vierpersonenhaushalt durchgeführt. Aufwendungen für Wartung und Instandhaltung werden unter der Annahme, dass sie durch den Wechsel des TWW-Erwärmers nicht beeinflusst werden, vernachlässigt. Die Angaben zu Investitionen, Lebensdauern und Nutzungsgraden der verschiedenen Systeme sind Tabelle 5-23 zu entnehmen. Zusätzlich wird die kritische Zapfmenge berechnet, ab der eine Amortisationsdauer von fünf Jahren erreicht wird.²

$$\text{kritische Zapfmenge} = \frac{\frac{K_0}{5}}{\text{jährliche Kosteneinsparung}} = \frac{\frac{K_0}{5}}{EEP \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{neu}}} - \frac{1}{\eta_{\text{alt}}} \right)} \quad (7)$$

Diese ergibt sich durch Division der gleichmäßigen Verteilung der Anfangsinvestition K_0 auf fünf Jahre durch die jährlichen Kosteneinsparungen, wobei EEP dem

² Die Berechnung erfolgt statisch, also ohne Berücksichtigung des Kalkulationszinssatzes.

Endenergiepreis entspricht. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung für die verschiedenen Maßnahmen sind in **Tabelle 5-24** zusammengefasst.

Tabelle 5-24: Kennzahlen der Wirtschaftlichkeit verschiedener Maßnahmen für den Wechsel des TWW-Erwärmers

	Maßnahme	Jährliche Kosteneinsparung	Gesamte Kosteneinsparung	Statische Amortisationsdauer	Kritische Zapfmenge
Zweipersonen Haushalt	Austausch Durchlauferhitzer ($\eta = 87\%$)	22,97 €/Jahr	344,48 €	8 Jahre	2.204 kWh/Jahr
	Austausch Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$)	72,09 €/Jahr	1.081,39 €	4 Jahre	1.098 kWh/Jahr
	Austausch elektr. TWW-Speicher	5,36 €/Jahr	107,18 €	> 20 Jahre	26.165 kWh/Jahr
	Austausch TWW-Speicher durch Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$)	24,70 €/Jahr	370,54 €	12 Jahre	3.204 kWh/Jahr
	Austausch Gastherme	38,27 €/Jahr	765,44 €	> 20 Jahre	8.421 kWh/Jahr
Vierpersonen Haushalt	Austausch Durchlauferhitzer ($\eta = 87\%$)	45,93 €/Jahr	688,96 €	4 Jahre	2.204 kWh/Jahr
	Austausch Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$)	144,19 €/Jahr	2.162,78 €	2 Jahre	1.098 kWh/Jahr
	Austausch elektr. TWW-Speicher	10,72 €/Jahr	214,36 €	> 20 Jahre	26.165 kWh/Jahr
	Austausch TWW-Speicher durch Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$)	49,41 €/Jahr	741,09 €	6 Jahre	3.204 kWh/Jahr
	Austausch Gastherme	76,54 €/Jahr	1.530,89 €	15 Jahre	8.421 kWh/Jahr

Da die Amortisationsdauer mit dem TWW-Verbrauch sinkt, amortisieren sich die Investitionen im Vierpersonenhaushalt schneller. Der Austausch mit dem effizienteren Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$) ist in beiden Fällen die lukrativste Maßnahme, welche sich bereits nach 1,9 (Zweipersonenhaushalt) bzw. 3,9 Jahren (Vierpersonenhaushalt) amortisiert. Der Austausch des TWW-Speicher durch einen Durchlauferhitzer ($\eta = 97\%$) ist für den Zweipersonenhaushalt mit einer Amortisationsdauer von 11,3 Jahren bei einer Lebensdauer von nur 15 Jahren keine attraktive Investition. Für den Vierpersonenhaushalt ist die Amortisationsdauer von 5,7 Jahren akzeptabel. Der Austausch des elektrischen TWW-Speichers durch einen neuen lohnt sich in keinem Fall, da der nur sehr geringe Effizienzgewinn nicht ausreicht um die vergleichsweise hohen Investitionen zu decken.

5.5 Übersicht verschiedener Kombinationen

Die resultierenden Kosteneinsparungen durch die in 5.1 diskutierten Maßnahmen kombiniert mit verschiedenen TWW-Erwärmern ist in **Tabelle 5-25** dargestellt.

Tabelle 5-25: *Resultierende Kosteneinsparungen bei der Kombination von Gebrauchsanpassung und verschiedenen TWW-Erwärmern*

	Einsparung Energiekosten im Vergleich zur Referenz in €/Jahr																			
	TWW Verbrauch in kWh/Jahr	Nutzenergie- einsparung kWh/Jahr	Technologie							90%										
			hydraulischer Durchlauferhitzer	elektronischer Durchlauferhitzer	Elektrischer TWW- Speicher	Gastherme alt	Gastherme neu	93%	72%											
			83%	94%	93%	94%	90%	90%	90%											
Kombinierte Verhaltens- änderung	Verbrauchsniveau hoch	1.709																		
	Verbrauchsniveau Standard	704	1.005		355	314	318	318	96	77										
	Verbrauchsniveau niedrig	386	1.323		467	413	418	418	126	101										
	Verbrauchsniveau Standard Dusche niedrig	610	1.099		388	343	347	347	105	84										
	Verbrauchsniveau Standard Dusche erhöht	891	817		289	255	258	258	78	62										
	Verbrauchsniveau Standard Dusche hoch	1.391	318		112	99	100	100	30	24										
Dusche	Spararmatur (16 l/min)	600																		
	Spararmatur (13 l/min)	487	112		40	35	36	36	46	37										
	Spararmatur (9,5 l/min)	356	244		86	76	77	77	23	19										
	Spararmatur (8 l/min)	300	300		106	94	95	95	29	23										
	Spararmatur (6 l/min)	225	375		132	117	118	118	36	29										
	Verhaltensänderung (16 min)	834																		
Waschtisch	Verhaltensänderung (14 min)	729	104		37	33	33	33	10	8										
	Verhaltensänderung (12 min)	625	208		74	65	66	66	20	16										
	Verhaltensänderung (10 min)	521	313		110	98	99	99	30	24										
	Verhaltensänderung (8 min)	417	417		147	130	132	132	40	32										
	Verhaltensänderung (6 min)	313	521		184	163	165	165	50	40										
	Verhaltensänderung (4 min)	208	625		221	195	198	198	60	48										
Spültisch	Durchflussbegrenzer (7 l/min)	238																		
	Durchflussbegrenzer (5 l/min)	170	68		24	21	21	21	6	5										
	Durchflussbegrenzer (3 l/min)	102	136		48	42	43	43	13	10										
	Verhaltensänderung (3 Min)	340			0															
	Verhaltensänderung (1,5 Min)	170	170		60	12	13	13	16	13										
	Verhaltensänderung (0,5 Min)	57	283		100	21	21	21	27	22										
Spültisch	Durchflussbegrenzer (10 l/min)	370																		
	Durchflussbegrenzer (6 l/min)	222	148		52	11	11	11	14	11										
	Durchflussbegrenzer (3 l/min)	111	259		91	19	19	19	25	20										
	Verhaltensänderung (8,3 min)	368																		
	Verhaltensänderung (5 min)	222	146		52	11	11	11	14	11										
	Verhaltensänderung (2,5 min)	111	257		91	19	19	19	25	20										

6 Energieeinsparung für NRW

Um die möglichen Einsparungen für NRW zu bestimmen, werden zunächst die installierten TWW-Versorgungssysteme anhand statistischer Daten abgeleitet. Danach wird mit Hilfe der zuvor beschriebenen aktuellen Verlustwerte und Effizienzen der aktuelle Energiebedarf zur TWW-Bereitstellung abgeschätzt. Im letzten Schritt werden die in Kapitel 5 als wirtschaftlich bestimmten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung umgesetzt und sowohl die technisch als auch wirtschaftlich darstellbaren Energie- und Kosteneinsparpotenziale für die Endenergiebereitstellung berechnet.

6.1 Ermittlung vorhandener Versorgungssysteme

Zur Bestimmung der vorhandenen TWW-Erwärmer in NRW werden Daten aus verschiedenen Quellen miteinander verknüpft. Das mehrstufige Verfahren wird im Folgenden Schrittweise erläutert.

Gebäudedaten

Das flächendeckende, räumlich aufgelöste „FfE Regionalisierte Energiesystemmodell“ (FREM) enthält unter anderem Daten zu Gebäude- und Bewohnerstruktur auf Gemeindeebene für Deutschland hinterlegt. Es nutzt zur Modellierung unterschiedlichste Fachdaten, statistische Datenquellen und Verteilungsschlüssel, wodurch eine flexible und gleichzeitig über alle Aggregierungsebenen und Datenquellen konsistente Datenbasis sichergestellt wird. /FFE-04 12/ Ebenfalls auf Gemeindeebene und gebäudetypenscharf sind Raumwärme- und TWW-Bedarf hinterlegt /SOLPOT-01 14/.

TWW-Erwärmung je Energieträger

Zur Abbildung des Bestands an TWW-Erwärmern in NRW werden die Daten der „Zusatzerhebung des Mikrozensus 2014“ vom Statistischen Bundesamt /DESTATIS-11 16/ zu verwendeten Endenergieträgern in TWW-Erwärmern verwendet und mit den in FREM hinterlegten Daten zur vorhandenen Gebäudestruktur auf Gemeindeebene verschnitten. Hierüber ist eine Auswertung der Versorgungsstruktur für Deutschland, bzw. in NRW, möglich. Im Zensus liegen getrennte Daten für alte und neue Bundesländer vor. Durch hohen Fernwärme-Anteil in den neuen Bundesländern ist hier der Anteil von Erdgas- und Strom-basierter TWW-Erwärmung geringer. Für NRW werden die Daten für das Bundesland verwendet /DESTATIS-15 14/.

Mikrozensus

Im Rahmen des Mikrozensus werden jedes Jahr ca. 830.000 Personen in etwa 370.000 privaten Haushalten und Gemeinschaftsunterkünften stellvertretend für die gesamte Bevölkerung zu ihren Lebensbedingungen befragt. Sie werden nach einem festgelegten statistischen Zufallsverfahren ausgewählt und die Daten für statistische Zwecke verwendet /DESTATIS-15 14/. Die Zusatzerhebung, welche unter anderem genauer die vorhandenen Raum- und TWW-Erwärmungssysteme abfragt, findet alle vier Jahre zusätzlich statt. Diese Daten der letzten Erhebung von 2014 werden genutzt um den Anteil der verschiedenen Erwärmungssysteme an allen vorhandenen Systemen abzuleiten.

Verteilung der TWW-Erwärmer

Für die Einteilung der elektrischen TWW-Bereitstellungstechnologien liegen Daten des BDEW /BDEW-07 16/ und des IWU /IWU-02 10/ vor, welche sich wie in **Abbildung 6-1** ersichtlich unterscheiden.

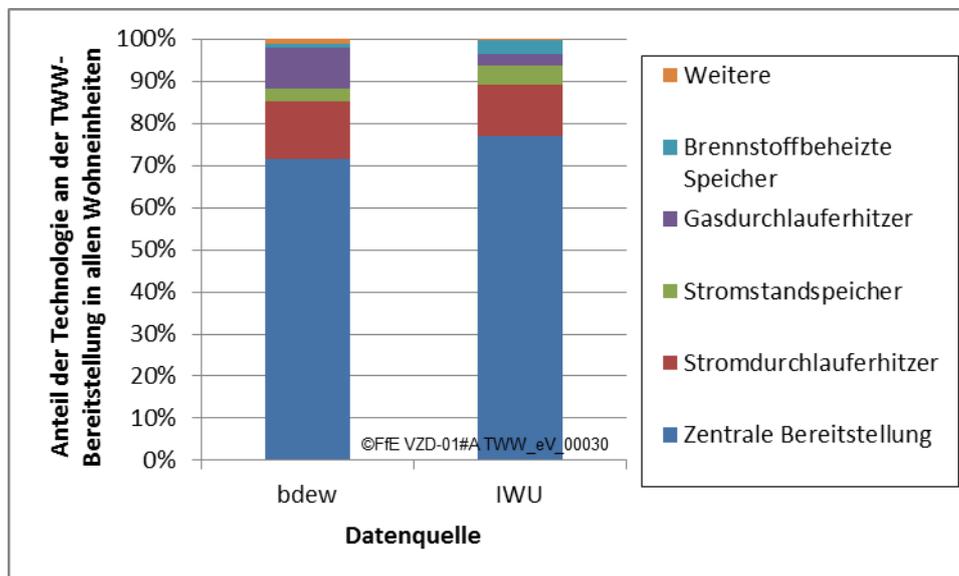


Abbildung 6-1: Vergleich der verfügbaren Daten zur Verteilung der TWW-Erwärmer in Deutschland /BDEW-07 16/, /IWU-02 10/

Für die Auswertungen der „Datenbasis Gebäudebestand“ in /IWU-02 10/ liegen 7.510 auswertbaren Datensätzen, davon 7.364 Wohngebäude, vor. Es sind etwa 5,4 % aller deutschen Kehrbezirke vertreten, verteilt über 56 % aller Kreise in Deutschland. Aus der breit aufgestellten Umfrage „Heizungsmarkt Wohnungswirtschaft“ (/BDEW-09 16/) liegen ebenfalls Informationen zur Verteilung von zentralen und dezentralen Systemen vor. Die Ergebnisse zur detaillierten Aufschlüsselung der TWW-Erwärmer entstammte allerdings einer Umfrage, die bei 5.000 Haushalten in Deutschland durchgeführt wurde /BDEW-07 16/. Auf Grund der höheren Anzahl befragter Haushalte, wurde entschieden die Zusammensetzung der TWW-Erwärmer in NRW mit den zuerst beschriebenen Daten des IWU zu bestimmen.

Aufteilung der elektrischen Wärmebereitstellung

Die Unterteilung der Bereitstellungstechnologien in Kleinspeicher und Durchlauferhitzer erfolgt anhand ihres Anteils an den strombasierten TWW-Bereitstellungstechnologien in den IWU-Daten /IWU-02 10/. Somit wird für die strombasiert versorgten Wohneinheiten von einem Anteil von 72 % Durchlauferhitzern und 28 % Kleinspeicher ausgegangen. Die Durchlauferhitzer müssen im Weiteren in hydraulische und elektronische Durchlauferhitzer unterteilt werden. Hierzu ist jedoch keine verlässliche Datenbasis verfügbar. Laut einer per E-Mail mitgeteilten Schätzung der Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. sind aktuell in Deutschland noch ca. fünf Millionen hydraulische Durchlauferhitzer verbaut. Ein anderer Fachmann schätzt im Gespräch, dass ca. 70 % der verbauten Durchlauferhitzer hydraulisch und 30 % elektronisch geregelt werden.

Berechnet man mit den hinterlegten Daten im Gebäudemodell, jeweils verschnitten mit den Zensusdaten für alte bzw. neue Bundesländer, die Anzahl der verbauten Durchlauferhitzer in Deutschland ergeben sich die in **Tabelle 6-1** dargestellten Werte.

Tabelle 6-1: *Berechnete Anzahl der in NRW vorhandenen Arten der elektrischen TWW-Erwärmung*

Technologie	Verteilung gemäß /BDEW-07 16/	Verteilung gemäß /IWU-02 10/
Durchlauferhitzer insgesamt	6,1 Mio.	5,3 Mio.
Hydraulische Durchlauferhitzer (bei Anteil von 70%)	4,3 Mio.	3,7 Mio.
Elektronische Durchlauferhitzer (bei Anteil von 30%)	1,8 Mio.	1,6 Mio.
Kleinspeicher	1,3 Mio.	2,1 Mio.

Es zeigt sich, dass mit den vorhandenen Daten eine Anzahl von maximal 4,3 Millionen Durchlauferhitzern ermittelt werden kann. In diesem Bereich liegt also eine starke Diskrepanz zwischen verschiedenen Angaben vor. Da keine der Abschätzung mit Sicherheit validiert werden kann, wird trotz der stärkeren Nähe zwischen den Daten des BDEW und der Aussage der Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. mit den Daten aus /IWU-02 10/ weiter verfahren.

Bereitstellung über Gas

Für die Unterteilung der gasbasierten TWW-Erwärmungssysteme in zentrale und dezentrale Anlagen wird angenommen, dass es sich bei allen dezentral versorgten Einheiten der Wärmeversorgung (Etagenheizungen) um Kombigeräte zur TWW- und Raumwärmebereitstellung handelt. In /DESTATIS-01 17/ sind die Daten zur Versorgungsstruktur von Gebäuden, abhängig von dem Gebäudetyp und der Baualtersklasse hinterlegt. Es werden Gebäude mit Ofenheizung, Block- oder Zentralheizung, Fernheizung und Etagenheizung unterschieden. Mittels der Verschneidung dieser Daten mit den NRW-Gebäudedaten, wird ermittelt wie viele Gebäude über eine Etagenheizung versorgt werden. Auf Grund der hohen Anzahl von Gebäuden mit drei bis sechs Wohneinheiten in NRW, welche in stärkerem Ausmaß über eine Etagenheizung verfügen, liegt der Anteil mit 8,4 % höher als im Bundesdurchschnitt (siehe **Abbildung 6-2**).

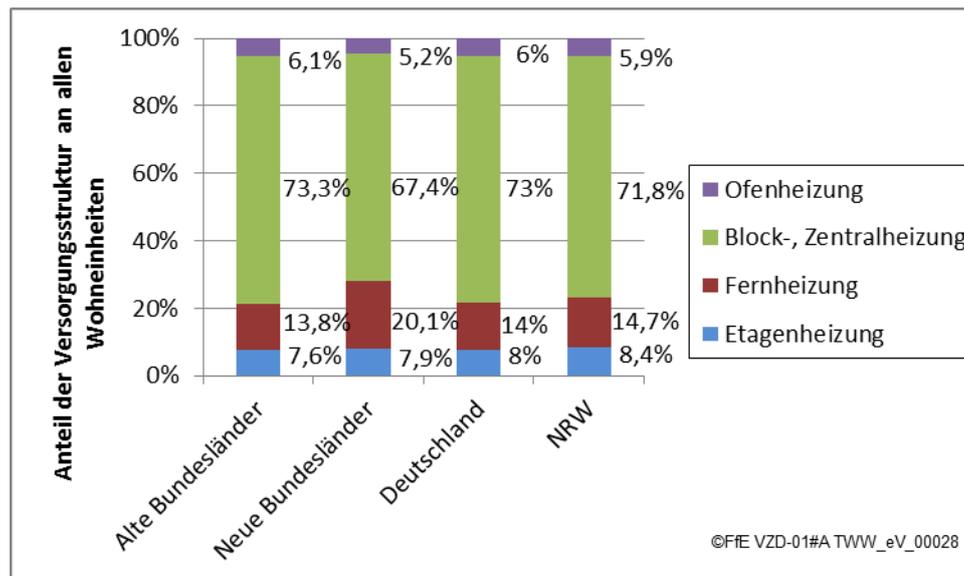


Abbildung 6-2: Versorgungsart abhängig vom Gebäudetyp /DESTATIS-01 17/

Bereitstellungstechnologien basierend auf Erdgas und Öl

Die Verteilung der Niedertemperatur und Brennwertkessel wird gemäß /BDH-01 15/ bestimmt (siehe **Tabelle 6-2**).

Tabelle 6-2: Anteile der Wärmeerzeugungstechnologien je verwendetem Endenergieträger nach /BDH-04 16/

		Verwendete Technologie	
		Niedertemperaturkessel	Brennwertkessel
Energieträger	Gas	64 %	36 %
	Öl	89 %	11%

Altersstruktur der TWW-Erwärmer

Aus Baualter und Lebensdauer der Erwärmer lässt sich abschätzen, welchen Standard die TWW-Erwärmer in den einzelnen Gebäuden aufweisen.

Zur Bestimmung des Alters der aktuell verbauten TWW-Erwärmer wird zunächst angenommen, dass das mittlere Jahr einer Baualterklasse dem Baujahr aller Gebäude der Baualterklasse entspricht, z.B. 1953 in der Baualterklasse 1946 bis 1960. Mit der erwarteten Lebensdauer wird dann auf die Anzahl der bereits stattgefundenen Austausche der TWW-Erwärmer geschlossen. Hieraus wiederum wird das letzte Jahr der Erneuerung des TWW-Erwärmers bestimmt.

Tabelle 6-3: *Baualter der vorhandenen TWW-Erwärmer abhängig von der Baualtersklasse des Gebäudes und Art des TWW-Erwärmers*

	Baualtersklasse des Gebäudes									
	vor 1900	1900 - 1945	1946 - 1960	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1985	1986 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2005	2006 - 2010
Durchlauf-erhitzer (Lebensdauer 15 Jahre)	2005	2013	2013	2011	2006	2013	2006	2013	2003	2008
Andere TWW-Erwärmer (Lebensdauer 20 Jahre)	2000	2003	2013	2006	2016	2003	2011	1998	2003	2008

Auf Grund der in **Tabelle 6-3** ermittelten Altersklassen, wird für Anlagen, welche ab 2013 getauscht wurden, mit dem Effizienzwert für 2015 bzw. 2017 gerechnet. Im Falle des Gas-Niedertemperaturkessels, liegt der Norm-Nutzungsgrad für Anlagen von 1978 vor. Dieser wird für Anlagen angesetzt, bei welchem die letzte Erneuerung 1998 stattfand. Bei anderen Anlagen mit den Werten für 2000 gerechnet.

Ein Vergleich mit den ermittelten Werten in **Tabelle 6-4** im Rahmen von /ZIV-01 16/ zeigt, dass das Alter der Gas- und Ölheizungen mit dem oben genannten Verfahren eher unterschätzt wird. Es wird deutlich, dass 62,1 % der installierten Ölheizungen und 55,8 % der Gasheizungen vor 1997 installiert wurden, die meisten im Zeitraum zwischen 1988 und 1997. Für diese Baujahre liegen keine Messwerte für die Effizienz der Geräte vor. Es ist also davon auszugehen, dass das Einsparpotenzial durch Austausch der zentralen Erwärmer, welches immer in Kombination mit der Bereitstellung der Raumwärme evaluiert werden muss, unterschätzt wird. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Studie.

Tabelle 6-4: *Anteil der Befeuerungsanlagen in alten Bundesländern nach Datum der Inbetriebnahme /ZIV-01 16/*

	bis 1978	1979 bis 1982	1983 bis 1988	1988 bis 1997	1998 bis 2015	2016
Ölbefeuert	3,9 %	3,3 %	11,5 %	43,6%	37,5%	< 1%
Gasbefeuert	< 1%	1,6%	8,0%	46,2 %	42,7%	< 1%

Zusammensetzung der TWW Erwärmer in NRW

Die resultierende Zusammensetzung der TWW-Erwärmer in NRW bezogen auf die versorgten Wohneinheiten ist **Tabelle 6-5** zu entnehmen. Hierbei wird sowohl zwischen den vorhandenen Technologien als auch dem Alter der Anlage differenziert.

Auf Grund einer steigenden Effizienz von Heizungsanlagen mit der installierten Leistung, wäre eine Differenzierung zwischen Zentral- und Etagenheizungsanlagen möglich. Da hierfür jedoch keine differenzierten Daten vorliegen, wird diese Unterscheidung im Rahmen dieser Studie nicht gemacht.

Tabelle 6-5: *Ermittelte Verteilung der TWW-Erwärmungstechnologien auf die Wohnungen in NRW – differenziert nach Technologie und errechnetem Anlagenalter*

Bereitstellungstechnologie	Anzahl Wohneinheiten die mit dieser TWW-Erwärmungstechnologie versorgt werden	Anteil der Versorgungstechnologie an der gesamten TWW-Bereitstellung in NRW
Hydraulischer Durchlauferhitzer	1.426.660	17%
Elektronischer Durchlauferhitzer	611.426	7%
Elektrische TWW Speichererwärmer (2000)	562.571	7%
Elektrische TWW Speichererwärmer (2017)	255.180	3%
Gas-Brennwert (2000)	1.070.538	12%
Gas-Brennwert (2017)	393.584	5%
Gas-Niedertemperatur (1978)	260.027	3%
Gas-Niedertemperatur (2000)	1.643.151	19%
Gas-Niedertemperatur (2017)	699.705	8%
Öl-Brennwert (2017)	41.384	0%
Öl-Niedertemperatur (2000)	660.900	8%
Öl-Niedertemperatur (2017)	334.837	4%
Nicht betrachtet	627.088	7%

6.2 Berechnung der Einsparpotenziale

Um die möglichen Einsparungen zu ermitteln, werden zunächst die aktuellen Verbräuche sowie Verluste berechnet und validiert. Danach werden mögliche wirtschaftlich umsetzbare Effizienz Maßnahmen umgesetzt, woraus verminderte Verbräuche und Verluste resultieren. Die Differenz dieser beider Szenarien stellt das mögliche Einsparpotenzial dar.

Berechnung aktueller Verbräuche, Verluste und Kosten

Für die Berechnung des aktuellen TWW-Bedarfs sowie der auftretenden Verluste wird nach dem Bottom-up-Prinzip vorgegangen. Zunächst wird angenommen dass jeder Einwohner von NRW, ca. 17,9 Mio. gemäß /ITNRW-01 16/, den Standard-TWW-Bedarf aufweist. Dieser beträgt mit dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Lastgang, welcher an die gemessenen Werte aus /FFE-05 02/ angelehnt ist, 703,9 kWh/Jahr.

Für die Berechnung der Zirkulationsverluste werden die vom Gebäudetyp abhängigen Rohrlängen und Verlustbeiwerte aus Tabelle 5-14 sowie die Betriebsdauern aus Tabelle 5-17 angesetzt. Hieraus werden die Verteilverluste für alle Gebäude mit einem zentralen TWW-Versorgungssystem berechnet. Ein Vergleich der Verteilsysteme von Ein- und Zweifamilienhäusern aus /FFE-05 02/ legt nahe, dass bei Systemen mit Stichleitung die Verluste ca. 30 % bis 35 % der Verluste eines Systems mit Zirkulation ausmachen. Diese Werte werden auch von Herstellern angesetzt /PTR-01 15/. Daher wird für Gebäude mit Stichleitung mit einem Verlust von 35 % des Verlustes beim Zirkulationssystem gerechnet. Des Weiteren werden die in Tabelle 5-20 aufgelisteten Speichergrößen und Verlustbeiwerte ebenfalls je Gebäudetyp festgelegt, wobei die

Verlustwerte der 90er Jahren angesetzt werden. Aus diesem Zeitraum stammen die meisten Erwärmer und somit ebenfalls die TWW-Speicher. Im letzten Schritt wird dieser gesamte bereitzustellende TWW-Bedarf mit dem Anteil der jeweiligen Bereitstellungstechnologie bzw. deren Wirkungsgrad und der genutzten Endenergieform verknüpft.

Berechnung möglicher Verbräuche, Verluste und Kosten

Zur Bestimmung der Verbräuche, Verluste und Kosten in einem effizienteren System wird analog zu der soeben beschriebenen Methodik vorgegangen. Allerdings werden die in als wirtschaftlich bestimmte Maßnahmen zur Energieeinsparung umgesetzt. Zunächst wird mit einem TWW-Bedarf des geringsten Verbrauchsniveaus aus Kapitel 5.1 gerechnet. Die Verteilverluste werden bei gleich bleibender Rohrlänge je Gebäudetyp mit einem verminderten spezifischen Verlustbeiwert von 6 W/m berechnet. Für Ein- und Zweifamilienhäuser wird mit einer Zirkulationsdauer von sechs Stunden gerechnet. Zwar sind Zirkulationsdauern darunter möglich, hierdurch steigenden jedoch die Zapfanlaufverluste stark an, sodass bei geringeren Dauern mit einem zusätzlichen Verlustaufschlag gerechnet werden müsste. In Mehrfamilienhäusern wird weiterhin eine Zirkulationsdauer von 16 Stunden angenommen. Eine Anpassung der Speicherverluste wird nicht vorgenommen, da diese Maßnahmen nicht wirtschaftlich sind. Für die TWW-Erwärmer wird mit einem Austausch aller hydraulischen Durchlauferhitzer und TWW-Speicher durch einen elektronischen Durchlauferhitzer gerechnet. Die restlichen Anteile der jeweiligen TWW-Erwärmer bleiben erhalten, da im Rahmen dieser Studie keine Aussage zur Wirtschaftlichkeit ihres Austausches getroffen wird.

Die auftretenden Energiebedarfe und Verluste sind in **Tabelle 6-6** aufgeschlüsselt. Bei aktuellen Verlusten ergibt sich ein ergibt sich eine Endenergiebedarf für TWW von 1.277 kWh/Jahr pro Person in NRW. Dieser Werte ist höher als der in **Kapitel 4.2** aus den statistischen Daten ermittelte Wert von 1.114 kWh/Jahr pro Person, ist jedoch in Anbetracht der hohen Anzahl an getroffenen Annahmen als gut anzusehen. Nach Umsetzung der wirtschaftlichen Maßnahmen ergibt sich hingegen ein TWW-Verbrauch von 628 kWh/Jahr pro Person. Dies entspricht einer gesamten Energieeinsparung von 51 %.

Tabelle 6-6: *Übersicht über benötigte Energiemengen entlang des Versorgungssystems*

Energiebedarf	Aktueller Energiebedarf	Energiebedarf nach Effizienzsteigerung
Zapfenergiebedarf	12.575 GWh/Jahr	6.898 GWh/Jahr
Verteilverluste	5.744 GWh/Jahr	1.572 GWh/Jahr
Speicherverluste	1.644 GWh/Jahr	1.644 GWh/Jahr
Umwandlungsverluste	2.852 GWh/Jahr	1.099 GWh/Jahr
Gesamter Energiebedarf	22.816 GWh/Jahr	11.213 GWh/Jahr

Die Kosten für die bereit zu stellenden Endenergien sind in **Tabelle 6-7** festgehalten. Diese reduzieren sich insgesamt um 53 %.

Tabelle 6-7: *Energiekosten bei aktuellen und zukünftig durch Effizienzsteigerung reduziertem TWW-Bedarf*

Endenergiebedarf	Energiekosten bei aktuellem Endenergiebedarf	Energiekosten bei reduziertem Endenergiebedarf durch Effizienzsteigerung
Strom	2.208 Mio.€	1.017 Mio.€
Erdgas	759 Mio.€	384 Mio.€
Öl	127 Mio.€	64 Mio.€
Insgesamt	3.094 Mio.€	1.466 Mio.€

Bei alleinigem Austausch hydraulischer Durchlauferhitzer und elektrisch beheizter TWW-Speicher durch einen effizienten elektronischen Durchlauferhitzer, lassen sich in NRW 9 % des aktuellen Strombedarfes für die TWW-Bereitstellung einsparen. Dies entspricht einer Einsparung von 200 Mio. € im Jahr.

7 Darstellung und Erklärung des Rechentools

Da Durchlauferhitzer kein relevantes Speichervolumen aufweisen, ist die gesteuerte Anpassung der Erzeugung von TWW durch selbst erzeugten Strom hier nicht sinnvoll. Für die gezielte Erwärmung zu Zeiten hoher PV-Erzeugung sind somit nur zentrale TWW-Speicher in Kombination mit einem Heizstab oder einer Wärmepumpe geeignet. Heizstäbe weisen im Gegensatz zu Wärmepumpen mit 99 % einen geringen Wirkungsgrad auf /NEO-01 16/, sodass eine alleinige TWW-Bereitstellung mit ihnen nicht sinnvoll erscheint. Im Tool sind sie daher immer als Teil eines hybriden Systems hinterlegt. Bei den beiden relevanten Systemen handelt es sich um eine Kombination von Wärmepumpe und Heizstab sowie Gastherme und Heizstab.

In diesem Kapitel werden rechtliche und technische Restriktionen, notwendige Eingangsdaten, die Berechnungslogik sowie die generierten Ergebnisse des in Microsoft® Excel erstellten Rechentools beschrieben.

7.1 Rechtliche Einschränkungen

Im Folgenden wird ein Überblick über rechtliche Vorschriften, welche bei der Implementierung des Rechentools zu beachten sind, gegeben.

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Trinkwasserverordnung

Die Trinkwasserverordnung (TrinkwV) basiert auf dem Infektionsschutzgesetzes (IfSG) und der EG-Trinkwasserrichtlinie (98/83/EG). Gemäß § 37 Abs. 1 IfSG gilt: „Wasser für den menschlichen Gebrauch muss so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit, insbesondere durch Krankheitserreger, nicht zu besorgen ist“. Um diese Maßgabe zu gewährleisten, fordert § 4 Abs. 1 TrinkwV die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik (u.a. DIN, DVGW, VDI) sowie mikrobiologischer, chemischer und radiologischer Grenzwerte in §§ 5 bis 7a TrinkwV /BUN-01 16/.

DVGW-Arbeitsblatt W 551

Besonders hervorzuheben ist hier DVGW-Arbeitsblatt W 551, welches Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums enthält. Legionellen verursachen, unter Umständen lebensgefährliche, Symptome ähnlich einer Lungenentzündung. Die Infektion erfolgt durch Einatmen legionellenbelasteten Wassers z. B. beim Duschen. Bei Wassertemperaturen zwischen 30 °C und 45 °C vermehren sie sich besonders stark.

Im DVGW-Arbeitsblatt W 551 wird zwischen Groß- und Kleinanlagen unterschieden. Bei ersteren handelt es sich um Anlagen mit Trinkwassererwärmern mit einem Inhalt > 400 l und/oder > 3 l Leitungsvolumen, auch bekannt als die „3-Liter-Regel“. Entsprechende Anlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern zählen jedoch unabhängig von dieser Einteilung als Kleinanlagen (siehe auch § 3 Abs. 12 TrinkwV) /DVGW-01 04/. Daher haben einige Vorschriften des DVGW-Arbeitsblattes W 551 für diese empfehlenden und keinen verpflichtenden Charakter. Nichtsdestotrotz ist folgendes zu beachten. Nach § 3 Abs. 10 TrinkwV handelt es sich bei der Trinkwasserbereitstellung im Rahmen einer Vermietung um eine gewerbliche Tätigkeit. D.h. wer ein

Einfamilienhaus vermietet, gilt als Unternehmer oder sonstiger Inhaber einer Wasserversorgungsanlage und ist als solcher für die Qualität des Trinkwassers verantwortlich /BUN-01 16/.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 551 verweist außerdem auf DIN 1988-200, welche Anforderungen an Planung, Bauteile, Apparate und Werkstoffe für die Trinkwasserinstallation formuliert. Ferner müssen Speicher in Ein- und Zweifamilienhäusern so ausgelegt werden, dass am Austritt aus dem Trinkwassererwärmer eine Temperatur von mindestens 60 °C möglich ist. Wird im Betrieb ein Wasseraustausch für TWW innerhalb von drei Tagen gewährleistet, kann die Betriebstemperatur auf ≥ 50 °C abgesenkt werden, niedrigere Temperaturen sind jedoch in jedem Fall zu vermeiden /DIN-02 12/. Bei Großanlagen, wie beispielsweise in Mehrfamilienhäusern, muss hingegen am Austritt des Trinkwassererwärmers stets eine Mindesttemperatur von 60 °C erreicht werden, wodurch sich eine deutlich geringere Flexibilität des Speicherladezustandes ergibt. Zusätzlich muss der gesamte Wasserinhalt bei Anlagen mit integrierten Vorwärmstufen (bivalente Speicher) und einem Speichervolumen ≥ 400 l einmal am Tag auf 60 °C aufgeheizt werden. Auch hier ist es im Vergleich dazu für Anlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern ausreichend, dass die Erwärmung auf mindestens 60 °C möglich ist, die Temperatur muss jedoch nicht dauerhaft vorliegen /DIN-02 12/.

In Ein- und Zweifamilienhäusern mit Rohrleitungsinhalten > 3 l ist der Einbau von Zirkulationssystemen vorgeschrieben. Die Einhaltung der Temperaturvorgaben, welche für Großanlagen gelten, ist in diesem Fall zwar nicht verpflichtend, wird jedoch zur Vermeidung von Legionellenwachstum empfohlen. Die Warmwassertemperatur im zirkulierenden Wasser soll demnach um maximal 5 K gegenüber der Speicheraustrittstemperatur absinken /DIN-02 12/, /DVGW-01 04/.

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz)

Der Zweck des Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetzes (EEWärmeG) ist es mitunter die „[...] Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus Erneuerbaren Energien zu fördern“ und so bis 2020 den Anteil dieser auf 14 % zu erhöhen (§ 1 EEWärmeG). Eigentümer von neu errichteten Gebäuden ab einer Nutzfläche von mehr als 50 Quadratmetern sind dazu verpflichtet, je nach verwendetem Energieträger ihren Wärme- und Kälteenergiebedarf durch einen bestimmten Mindestanteil aus regenerativen Energien zu decken (§ 3 Abs. 1 EEWärmeG). Für die Erfüllung der Mindestanforderungen für solare Strahlungsenergie von 15 % wird nur die Solarthermie anerkannt, nicht jedoch die Nutzung von Photovoltaikstrom /BMJV-01 08/.

EEG-Umlage auf selbst erzeugten und verbrauchten Strom

Grundsätzlich ist für die Eigenversorgung aus Erneuerbaren Energien eine anteilig reduzierte EEG-Umlage fällig (§ 61 Abs. 1 S. 1 und 2 EEG). Seit 01.01.2017 ist diese auf 40 % der regulären EEG-Umlage, welche 6,88 ct/kWh beträgt, begrenzt /BNETZA-34 16/, /ÜNB-05 16/. Eine Ausnahme ist die De-minimis Regelung, gemäß derer die EEG-Umlage für selbst erzeugten und verbrauchten Strom von Kleinanlagen mit einer installierten Leistung von maximal 10 kW entfällt. Die Befreiung ist auf maximal

10 MWh pro Kalenderjahr begrenzt. Voraussetzung ist hierfür, dass es sich um eine Eigenversorgung im Sinne des EEG handelt /BNETZA-34 16/.

7.2 Technische Einschränkungen

Neben den rechtlichen Vorschriften wird die Flexibilisierung der TWW-Bereitstellung auch durch technische Grenzen eingeschränkt.

Mess- und Regelungstechnik

Die gezielte Flexibilisierung jeder Art elektrischer Verbrauchseinheiten erfordert den Einsatz geeigneter Mess- und Regelungstechnik. In Zukunft können auch intelligente Messsysteme (auch Smart Meter genannt) in Kombination mit Steuerboxen für diesen Zweck verwendet werden. Aktuell gibt es bereits Komplettsysteme welche die Flexibilisierung von Wärmepumpen und Heizstäben ermöglichen, z.B. /MBW-01 17/, /MBW-02 17/.

TWW-Temperatur

Die Kapazität von TWW-Speichern ergibt sich im Wesentlichen durch das Volumen und die mögliche Temperaturspreizung des TWW. Während die minimale Temperatur durch hygienische Anforderungen beschränkt ist, sollte die maximale Temperatur in Abhängigkeit der Wasserhärte festgelegt werden. In Regionen mit einer Calciumhydrogencarbonat Konzentration von über $2,5 \text{ mol/m}^3$ kann bereits eine Temperatur zwischen 60 und 70 °C kritisch sein, da es hier bereits zur verstärkten Kalkbildung im TWW-System kommt /REC-01 16/. Als Standardwert wird eine maximal erlaubte TWW-Temperatur von 70 °C angenommen.

Temperaturbereich Wärmepumpe

Wärmepumpen können aufgrund der aktuell eingesetzten Kältemittel eine maximale TWW-Temperatur von 58°C erreichen /VIESS-01 11/. Oberhalb dieser Temperatur wird im Tool daher bei hoher PV-Erzeugung der Heizstab genutzt, um den Speicher bis zur vorgegebenen Maximaltemperatur weiter zu erwärmen.

7.3 Eingangsdaten

In der Eingabemaske des Tools sind vom Nutzer verschiedene Eingaben zu machen. Vor Überarbeitung der Parameter sollte sichergestellt werden, dass die Berechnung deaktiviert ist. Dies ist der Fall wenn die Schaltfläche oben rechts im Blatt „Eingabedaten“ rot hinterlegt ist und die Beschriftung „Berechnung deaktiviert“ trägt. Die für die im Rahmen der Studie gewählten Parameter sind **Kapitel 8.1** zu entnehmen. Im Folgenden wird lediglich eine Hilfestellung für die Wahl des thermischen Speichers sowie der Dimensionierung von Wärmepumpe, Heizstab, PV-Anlage und Batteriespeicher gegeben.

TWW-Speichervolumen und Leistung TWW-Erwärmer

TWW-Speicher und Wärmepumpen werden angelehnt an DIN EN 15450 ausgelegt /DIN-03 07/. Hierfür ist eine weitreichende Kenntnis über vorhandene Zapfstellen, Haushaltsgröße und Zapfverhalten der Bewohner notwendig. In der Auslegung wird zwischen dem Speicherprinzip und einer Teilspeicherung unterschieden. Das

Standardverfahren nach DIN EN 15450 wird anhand des Standardzapfprofils durchgeführt, woraus die Bedarfskennzahl des TWW-Bedarfs und daraus die Leistungskennzahl des Speichers ermittelt werden. Zudem kann für Ein- und Zweifamilienhäuser ein vereinfachtes Verfahren angesetzt werden, welches in /VIESS-01 11/ erläutert wird und für die in Kapitel 8.1 festzulegenden Parameter verwendet wird. Hier wird pro Person ein TWW-Bedarf von 25 l, bei t_{Bedarf} von 60 °C, angesetzt und verdoppelt. Hieraus resultiert das Mindestspeichervolumen, welches für drei Personen beispielsweise 150 l beträgt. Dieses wird dann nach **Formel (8)** in das Volumen V_{Speicher} bei der angestrebten Speichertemperatur t_{Soll} umgerechnet. Die Kaltwassertemperatur $t_{\text{Kaltwasser}}$ beträgt gemäß Norm 10 °C. Für den Dreipersonenhaushalt folgt damit:

$$V_{\text{Speicher}} = V_{\text{Bedarf}} \cdot \frac{t_{\text{Bedarf}} - t_{\text{Kaltwasser}}}{t_{\text{Soll}} - t_{\text{Kaltwasser}}} = 150 \text{ l} \cdot \frac{60 \text{ °C} - 10 \text{ °C}}{50 \text{ °C} - 10 \text{ °C}} = 187 \text{ l} \quad (8)$$

Da es keinen TWW-Speicher dieser Größe gibt, wird mit einem Speichervolumen von 200 l weiter gerechnet.

Die Heizleistung der TWW-Wärmepumpe berechnet sich dann, gemäß **Formel (9)** aus der erlaubten Aufheizzeit zwischen zwei Perioden mit starkem TWW-Bedarf (T_{aufh}). Entgegen dem Standardwert von 11,5 h aus /VIESS-01 11/ werden hier 10 h angesetzt, da sich in /MUE-01 07/ gezeigt hat, dass Zapfpeaks vor 8.00 und ab 18.00 Uhr auftreten und nicht wie in der Norm vor 8.00 und um 20:30 Uhr.

$$\begin{aligned} Q_{\text{Wärmepumpe}} &= \frac{V_{\text{Speicher}} \cdot c_W \cdot (t_{\text{Soll}} - t_{\text{Kaltwasser}})}{T_{\text{aufh}}} \quad (9) \\ &= \frac{200 \text{ l} \cdot 0,001163 \frac{\text{kWh}}{\text{l} \cdot \text{K}} \cdot (50 \text{ °C} - 10 \text{ °C})}{10 \text{ h}} = 0,93 \text{ kW} \end{aligned}$$

Die Wärmepumpe sollte somit eine Heizleistung von 1 kW aufweisen.

Generell sollten TWW-Speicher so klein wie möglich dimensioniert werden, um hygienische Anforderungen sicher einzuhalten und Verluste zu minimieren. Im Falle einer gewünschten Flexibilisierung des Eigenverbrauchs, sollte hingegen ein höheres Volumen bereitgestellt werden. Für den Fall der Lastflexibilisierung wird aktuell diskutiert, ob die Vorschrift der möglichst geringen Auslegung des Speichervolumens aufgeweicht wird.

PV-Anlage und elektrischer Speicher

Ist die PV-Anlage bereits vorhanden, so wird die Anschlussleistung von elektrischen Speichern abhängig von der Peakleistung der PV-Anlage gewählt. Hierbei wird die Leistung des Speichers häufig halb so groß wie die der PV-Anlage dimensioniert. Die Kapazität sollte gewährleisten, dass der Batteriespeicher bei vollem Leistungsbezug zwei Stunden Laden kann.

Gemäß /HTW-01 14/ erfolgt die kostenoptimale Dimensionierung der PV-Anlage und des Hausspeichersystems kombiniert. Hiernach liegt das wirtschaftliche Optimum der Dimensionierung bei einer PV-Leistung von 0,8 kWp je MWh Jahresstrombedarf des Haushalts. Die nutzbare Speicherkapazität sollte 1,1 kWh je MWh Jahresstrombedarf

des jeweiligen Haushalts betragen. Laut /HTW-01 14/ kann in dieser Konfiguration ein hoher Eigenverbrauchsanteil und Eigenversorgungsgrad bei einer relativ geringer PV-Fläche erreicht werden.

Der Wirkungsgrad des Batteriespeichers ist abhängig von der verwendeten Zelltechnologie, Art der Anbindung (gleich- oder wechselstromgekoppelt) sowie der herstellerepezifischen Güte der Bauteile und Steuerung. Laut Herstellerangaben für Bleibatterien liegt der energetische Wirkungsgrad zwischen 65 % und 70 % und bei Lithiumbatterien zwischen 85 % und 88 % /LIE-01 14/, /CAR-01 14/. In der Praxis ist die Effizienz jedoch aufgrund des Standby-Verbrauchs sowie ineffizienter Regelungen teilweise niedriger /PVM-02 16/. Nachgelagerte Verluste durch Selbstentladung sind mit 2 % bis 5 % der Kapazität pro Monat vernachlässigbar /VDE-03 15/.

Kritische Temperaturniveaus

Um für Zeiten mit hohen thermischen Lasten einen Puffer bereit zu stellen wird die Solltemperatur höher festgelegt als die Minimaltemperatur. Eine generelle Abweichung der Solltemperatur unter 50 °C sollte gemäß DVGW 551 zum Schutz vor Legionellenvermehrung verhindert werden /DVGW-01 04/. Wird die Minimaltemperatur auf Grund kurzfristig hoher Zapfereignisse erreicht, schaltet der Heizstab als Unterstützung zu.

Die maximal festgelegte Temperatur sollte wie in **Kapitel 7.2** beschrieben abhängig von der Wasserhärte festgelegt werden. Oberhalb einer Temperatur von 58 °C weisen Wärmepumpen eine sehr niedrige Effizienz auf /VIESS-01 11/. In diesem Temperaturbereich wird daher bei hoher PV-Erzeugung der Heizstab genutzt, um dem Speicher weiter zu erwärmen.

7.4 Hinterlegte Daten

Im Tool sind sowohl TWW- und Strombedarfsprofile als auch PV-Erzeugungslastgänge bereits hinterlegt.

Trinkwarmwasser- und Stromverbrauchsprofile

Mit dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Lastganggenerator werden die Verbrauchsprofile für die vier Bewohnertypen vollzeit- und teilzeitbeschäftigt sowie Rentner und Kind hinterlegt. Diese werden wiederum mit den eingegebenen Verbrauchsdaten skaliert.

Photovoltaik-Erzeugungsprofile

Ein FfE internes PV-Lastgang-Tool ermöglicht es anhand der Eingabewerte für Globalstrahlung, Neigung und Ausrichtung des PV-Moduls typische PV-Lastgänge für zu erzeugen. Über den Vergleich der gemittelten Werte (1981 bis 2010) für die Globalstrahlung in verschiedenen Städten in NRW /LNUV-01 16/ werden die in **Tabelle 7-1** genannten Städte als Basis für die Ermittlung der PV-Lastgänge gewählt. Im Regionalmodell COSMO-EU sind die notwendigen Daten zur Einstrahlung in minütlicher Auflösung abrufbar. Diese werden mit dem Tool verrechnet und dann auf Fünf-Minuten-Werte umgerechnet.

In /METE-01 14/ sind reale Ertragswerte für PV-Anlagen mit Südausrichtung, auf die ersten drei Ziffern der Postleitzahl genau, für 2013 ausgewertet. Der Vergleich der

Werte aus /METE-01 14/ mit den in /LNUV-01 16/ ausgelesenen Daten zeigt, dass die die Trend in Globalstrahlung und PV-Erzeugung zwischen den Städten nicht übereinstimmen. Laut /LNUV-01 16/ ist Erfstadt eine sehr sonnige Stadt, gemäß der Werte in /METE-01 14/ ist der PV-Ertrag jedoch der zweitschlechteste der gewählten Städt. Dies kann an den unterschiedlichen betrachteten Jahren, sowie den spezifischen in /METE-01 14/ betrachteten Anlagen liegen. Bei den generierten Daten ist der Unterschied der Erzeugung zwischen den Städten ähnlich zu /LNUV-01 16/. Es zeigt sich jedoch dass sich die Erzeugungslastgänge und auch die gesamten Energiemengen zwischen Dormagen und Beckum sowie zwischen Lemgo und Bestwig kaum unterscheiden.

Tabelle 7-1: Vergleich der Werte für die Globalstrahlung in den verschiedenen Städten mit den Werten aus /METE-01 14/ und den ermittelten Werten mit dem Lastganggenerator

Gemeinde	Globalstrahlung Durchschnittswerte für 1981 – 2010 aus /LNUV-01 16/	Gute Werte nach /METE-01 14/	Obergrenze nach /METE-01 14/	Mittelwert aus generierten Daten	Südausrichtung aus generierten Daten (kWh/kWp)
Erfstadt	>1.050 – 1.060 kWh/m ²	851 kWh/kWp	1.033 kWh/kWp	990 kWh/kWp	1.063 kWh/kWp
Dormagen	> 1020 – 1040 kWh/m ²	855 kWh/kWp	1.048 kWh/kWp	948 kWh/kWp	1.014 kWh/kWp
Beckum	> 1.000 – 1010 kWh/m ²	878,8 kWh/kWp	1.017 kWh/kWp	950 kWh/kWp	1.022 kWh/kWp
Lemgo	> 970 – 980 kWh/m ²	840,1 kWh/kWp	1.035 kWh/kWp	912 kWh/kWp	975 kWh/kWp
Bestwig	> 950 – 960 kWh/m ²	870,3 kWh/kWp	1.043 kWh/kWp	914 kWh/kWp	975 kWh/kWp

Vergleicht man den Verlauf der Erzeugungslastgänge zwischen den verschiedenen Ausrichtungen Ost, Südost, Süd, Südwest und West (siehe **Abbildung 7-1**) wird ein deutlicher Unterschied der Lastgänge über den Tagesverlauf sichtbar. Daher sind im Rechentool lediglich die PV-Erzeugungsgänge für die drei Städte Erfstadt, Beckum und Lemgo hinterlegt, jedoch für alle fünf Anlagenorientierungen.

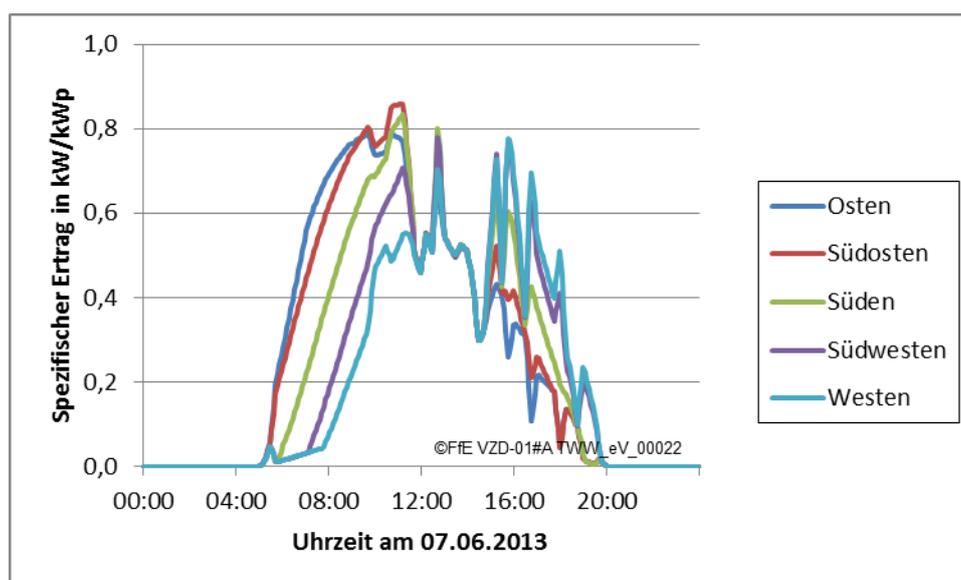


Abbildung 7-1: Vergleich des spezifischen PV-Ertrags eines Moduls in Lemgo abhängig von der Anlagenausrichtung

Anhand von **Abbildung 7-2** kann der Nutzer des Tools die für ihn relevante Globalstrahlungskategorie bestimmen.

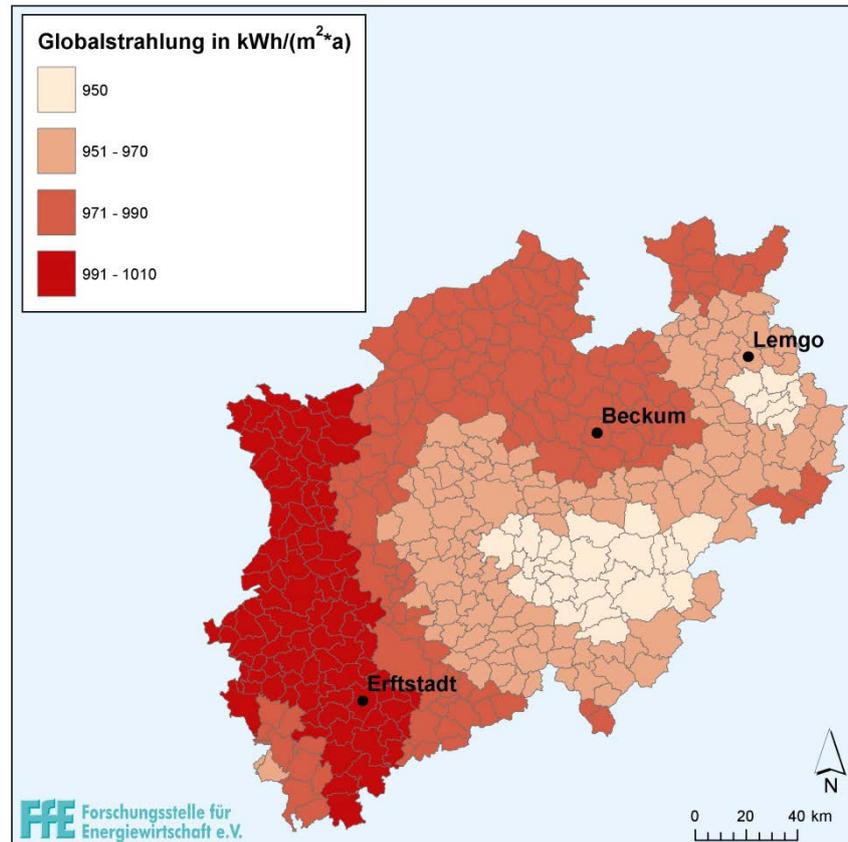


Abbildung 7-2: Globalstrahlungskarte für NRW

7.5 Berechnungsschritte für die PV-Eigennutzung

Für die folgenden Überlegungen und Berechnungen ist zu beachten, dass PV-Erzeugungslastgänge immer negative Werte aufweisen, da diese Strom in das Netz einspeisen. Verbrauchseinheiten andererseits haben ein positives Vorzeichen.

7.5.1 Bestimmung der Lastgänge und Speichercharakteristika

Mit den im Eingabeblatt eingegebenen Daten zur PV-Anlage, sowie den vorhandenen Bewohnern und deren Strom- und Energieverbrauch, werden die hinterlegten Lastgänge zunächst passen ausgewählt. Die PV-Erzeugungslastgänge werden im Weiteren mit der Leistung der installierten PV-Anlage skaliert. Weichen die im Eingabefeld festgelegten Werte für Strom und TWW-Verbrauch von der aus den Bewohnertypen summierten Last ab, wird der Gesamtlastgang skaliert. Ist eine Zirkulationspumpe vorhanden, wird ein täglicher Zirkulationsverlust von 500 Wh/Tag zzgl. eines Anlaufverlustes von 214 Wh/Tag gleichmäßig über alle Zeitschritte auf den TWW-Lastgang addiert /FFE-84 11/. Dieses Verfahren ist stark vereinfacht, jedoch für die Bestimmung des gesamten aus dem TWW-Speicher ausgespeicherten Energieverbrauchs geeignet.

Verluste thermischer Speicher

Gemäß Ökodesign-Richtlinie werden die erlaubten Verluste thermischer Speicher in kWh/Tag angegeben. Diese Richtwerte müssen nach DIN 12897:2016 bei einer Speichertemperatur von $(65 \pm 3)^\circ\text{C}$ und einer Umgebungstemperatur von $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ gemessen und angegeben werden /DIN-02 16/. Im Rahmen der dynamischen Simulation des TWW-Speichers übersteigen die Verluste jedoch die in der Norm festgelegten, sobald die Temperatur im Speicher, somit die Temperaturdifferenz zwischen Speicherinhalt und Außentemperatur, höher ist als unter Normbedingungen. Für die Eingabe im Berechnungstool wird daher aus dem Eingabewert „Verlust pro Tag“ der „prozentuale Verlust je Zeitschritt“ berechnet. Eine Übersicht über die festgelegten spezifischen Verluste gemäß /DIN-02 16/ ab September 2017 sowie die resultierenden Verluste am Tag und prozentuellen Verlustkoeffizienten sind **Tabelle 7-2** zu entnehmen.

Tabelle 7-2: Übersicht über spezifische und berechnete prozentuale Speicherverluste für TWW-Speicher verschiedener Größen und Effizienzklassen

		TWW-Speichervolumen in l							
Energieklasse	Grenzwert der Speicher- verluste	100	200	250	500	750	1000	1500	2000
A+	Verluste in W	25,4	31,8	34,3	43,5	50,1	55,6	64,4	71,6
	Verluste in kWh/d	0,61	0,76	0,82	1,04	1,20	1,33	1,55	1,72
	Verluste in %/Tag	12%	7%	6%	4%	3%	3%	2%	2%
A	Verluste in W	35,3	43,9	47,2	59,5	68,5	75,9	87,7	97,4
	Verluste in kWh/d	0,85	1,05	1,13	1,43	1,64	1,82	2,11	2,34
	Verluste in %/Tag	16%	10%	9%	6%	4%	4%	3%	2%
B	Verluste in W	49,4	61,4	66,0	83,2	95,8	106,0	122,5	136,0
	Verluste in kWh/d	1,19	1,47	1,58	2,00	2,30	2,54	2,94	3,26
	Verluste in %/Tag	23%	14%	12%	8%	6%	5%	4%	3%
C	Verluste in W	69,22	86,01	92,49	116,71	134,33	148,68	171,93	190,86
	Verluste in kWh/d	1,66	2,06	2,22	2,80	3,22	3,57	4,13	4,58
	Verluste in %/Tag	32%	20%	17%	11%	8%	7%	5%	4%

Kritische Speicherfüllstände

In der Eingabemaske werden vier kritische Temperaturen für das TWW-System festgelegt. Hieraus werden gemäß **Formel (10)** die vier kritischen Speicherfüllstände – minimal, soll, maximal für Wärmepumpen und maximal – berechnet.

$$Q_{\text{Speicher}} = V_{\text{Speicher}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p,\text{Wasser}} \cdot T_{\text{Speicher}} \quad (10)$$

Im Rahmen der Berechnung wird angenommen, dass die Speicher zu Beginn halb gefüllt sind.

7.5.2 Bilanzierungen für jeden Zeitschritt

Zu jedem Zeitschritt der Berechnung werden die Speicherfüllstände beider Speicher abhängig von den im vorherigen Zeitschritt erfolgten Ein- und Ausgangsenergien bestimmt.

Ladezustand des elektrischen Speichers

Der Energieinhalt des elektrischen Speichers W_{Speicher} berechnet sich gemäß **Formel (11)** zu Beginn jedes Zeitschrittes aus dem Energieinhalt des vorherigen Zeitschrittes ($W_{\text{Speicher}, t-1}$), der im vorherigen Zeitschritt bezogenen Leistung ($W_{\text{Bezug Speicher}, t-1}$), dem Einspeisewirkungsgrad (η_{Laden}), der ausgespeisten Leistung aus dem Speicher ($W_{\text{Ausspeisung Speicher}, t-1}$) und dem Entladewirkungsgrad (η_{Entladen}).

$$W_{\text{Speicher}} = W_{\text{Speicher}, t-1} + W_{\text{Bezug Speicher}, t-1} \cdot \eta_{\text{Laden}} + \frac{W_{\text{Ausspeisung Speicher}, t-1}}{\eta_{\text{Entladen}}} \quad (11)$$

Die in den Speicher eingespeiste Energie ist somit um den Einspeisewirkungsgrad niedriger als die vom Speicher bezogene Leistung. Gleichermaßen ist somit die aus dem Speicher ausgespeiste Leistung höher als die vom Haushalt aus dem Speicher bezogene Leistung.

Ladezustand des TWW-Speichers

Der Ladezustand des elektrischen Speichers wird für jeden Zeitschritt gemäß **Formel (12)** neu bestimmt.

$$Q_{\text{Speicher}} = Q_{\text{Speicher}, t-1} \cdot (1 - f_{\text{Verluste}}) - Q_{\text{entladen}} + Q_{\text{geladen}} \quad (12)$$

Während der elektrische Speicher den Ladezustand 0 aufweisen darf, ist dies für den thermischen Speicher nicht erlaubt. Sobald er seinen Soll-Ladezustand unterschreitet, muss der Haupt-Wärmeerzeuger (Wärmepumpe bzw. Gaskessel) zuschalten. Kommt es auf Grund der Gleichzeitigkeit verschiedener TWW-Zapfungen oder einer langen Zapfdauer zu einer starken Entladung des Speichers, ist es möglich dass die Wärmepumpe den Wärmebedarf nicht decken kann und die Temperatur unter die Minimaltemperatur fällt. In diesem Fall schaltet unterstützend der Heizstab zu. In dem Versorgungssystem „Gaskessel und Heizstab“ kommt dies nicht vor, da der Gaskessel auf Grund der niedrigen Kosten größer dimensioniert wird.

7.5.3 Eigenverbrauchssteigerung

Zur Bestimmung des einspeicherbaren PV-Stroms wird vom Erzeugungslastgang der PV-Anlage zuerst der Haushaltsstromverbrauch gedeckt. Die restliche erzeugte Energiemenge wird, falls möglich, zunächst in den elektrischen Speicher und dann in den TWW-Speicher eingespeichert.

Generell ist das Laden der Speicher immer durch die beiden technischen Bedingungen der noch freien Speicherkapazität ($W_{\text{Speicher frei}}$) und der maximalen Ladeleistung ($W_{\text{Speicher, maximal laden}}$) des Speichers limitiert. Bei der Nutzung des eigenen PV Stromes, kommt hierzu die Beschränkung, dass nur der PV-Strom verwendet werden soll, die Bezugsleistung des elektrischen Speichers bzw. des Wärmeerzeugers darf diese also nicht überschreiten. Ist die Rückspeisung durch die PV-Anlage abzüglich der Haushaltslast ($W_{\text{Rückspeisung}}$) höher als die minimale Ladeleistung des Speichers wird immer geprüft, welche der drei genannten Limitierungen den Ladezustand bestimmt.

Hausspeichersystem

Abhängig vom Ladezustand des Speichers und dem Betrag sowie der Höhe der Residuallast des Hausanschlusses, wird bestimmt ob der Speicher lädt, entlädt oder nicht aktiv wird. Ist die Einspeisung der eigenen PV-Anlage abzüglich des selbst verbrauchten Stromes höher als die minimale Ladeleistung des Stromspeichers wird gemäß **Formel (13)** die Ladeleistung des Speichers bestimmt.

$$W_{\text{Speicher,laden}} = \min(W_{\text{Speicher,frei}}, W_{\text{Speicher,maximal laden}}, W_{\text{Rückspeisung}}) \quad (13)$$

Ist der Speicher noch gefüllt, wenn die vom Haushalt verbrauchte elektrische Energie höher ist als die erzeugte PV-Leistung, wird die minimale Energie aus vorhandenem Speicherinhalt ($W_{\text{Speicher,Inhalt}}$), maximal entladbarer Energie ($W_{\text{Speicher,maximal entladen}}$) und Haushaltsstromverbrauch $W_{\text{Verbrauch Haushalt}}$ aus dem Speicher entladen, siehe **Formel (14)**.

$$W_{\text{Speicher,entladen}} = \min(W_{\text{Speicher,Inhalt}}, W_{\text{Speicher,maximal entladen}}, W_{\text{Verbrauch Haushalt}}) \quad (14)$$

Eigenverbrauchssteigerung über thermischen Speicher

Übersteigt die PV-Erzeugung den Strombezug des Haushalts und den Strombezug des ggf. vorhandenen Speichers, wird der thermische Speicher bei freier Speicherkapazität mittels einer Wärmepumpe oder eines Heizstabes erwärmt. Hierfür gelten dieselben in Formel (13) festgehaltenen Kriterien. Im Versorgungssystem „Wärmepumpe und Speicher“ wird hierfür zunächst die Wärmepumpe genutzt bis ihre maximal erreichbare Temperatur im Speicher vorhanden ist, dann lädt bei weiterhin verfügbarer PV-Erzeugung der Heizstab den Speicher bis zur maximal festgelegten Temperatur. Im System „Gaskessel und Heizstab“ hingegen, schaltet der Heizstab direkt zu, sodass TWW-Erwärmung über den Gaskessel verhindert wird.

7.6 Ausgabewerte

Für die Beurteilung eines flexiblen TWW-Systems, ist sowohl die energetische als auch die wirtschaftliche Bilanzierung notwendig. Während die energetische Bilanzierung direkt aus den durchgeführten Berechnungen erfolgt, werden für die Wirtschaftlichkeit weitere Annahmen und Festlegungen getroffen. Energetische Ausgabewerte und Kosten sowie Eigenversorgungsgrad und Eigenverbrauchsquote werden sowohl für das ungesteuerte System, als auch für die eigenverbrauchsoptimierende Steuerung ausgegeben. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die Differenz der beiden Systeme betrachtet.

Energetische Ausgabewert und Kosten

Zunächst wird berechnet wie viel Strom der Haushalt und die TWW-Erwärmer aus dem Netz beziehen und wie viel eigenen PV-Strom sie verwenden. Zudem wird die ins Stromnetz eingespeiste Strommenge bestimmt. In der Bilanzierung ohne gezielten Eigenverbrauch wird der Standby-Verbrauch des elektrischen Speichers vom Strombezug aus dem öffentlichen Netz abgezogen. Eine detaillierte Berechnung würde zusätzliche Berechnungsspalten erfordern, ist aber nicht zielführend. Bei dem System mit Gaskessel wird des Weiteren die Gasbezugsmenge berechnet. Hieraus werden mit dem entsprechenden Gas-, Haushaltsstrom- und ggf. Wärmepumpenstrompreis die Kosten für die Versorgung mit TWW und Strom berechnet.

Visuell wird der Anteil der verschiedenen TWW-Erwärmer an der gesamten TWW-Bereitstellung gezeigt. Die monatlich gemittelte Verlaufskurve des Speicherfüllstandes von Strom- und Wärmespeicher über das Jahr ermöglicht die Einschätzung, ob die gewählten Speicherkapazitäten ggf. zu groß gewählt wurden, bzw. der Speicher zu früh am Tag bereits gefüllt ist.

Eigenversorgungsgrad (Haushaltsstrom)

Entspricht dem Quotienten aus eigenverbrauchtem Haushaltsstrom (z. B. aus einer eigenen PV-Anlage) und dem gesamten Haushaltsstromverbrauch.

Eigenverbrauchsquote (Haushaltsstrom)

Diese berechnet sich aus dem Quotienten von eigenverbrauchtem Haushaltsstrom durch den gesamten von der eigenen PV-Anlage erzeugten Strom.

Eigenversorgungsgrad (Haushaltsstrom und Trinkwarmwasser)

Die Summe von eigenverbrauchtem Haushaltsstrom und eigenverbrauchtem Strom für die Trinkwarmwasserbereitung dividiert durch die gesamte eingesetzte Endenergie³ (z. B. gesamter Stromverbrauch des Haushalts und gesamter Gasverbrauch).

Eigenverbrauchsquote (Haushaltsstrom und Trinkwarmwasser)

Diese berechnet sich aus dem Quotienten von eigenverbrauchtem Strom im Haushalt und in der Trinkwarmwasserbereitstellung durch den gesamten von der eigenen PV-Anlage erzeugten Strom.

Wirtschaftlichkeit

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wird angenommen, dass beim System „Wärmepumpe und Heizstab“ diese beiden Komponenten bereits im Haus vorhanden sind. Wird jedoch aufgrund der Flexibilisierung ein größerer Heizstab verwendet, so können diese zusätzlichen Investitionen in der Berechnung berücksichtigt werden. Im System mit „Gaskessel und Heizstab“, stellt der Heizstab eine zusätzliche Investition dar, sodass dieser in jedem Fall mit einbezogen wird. Die Kosten für die notwendige IKT-Infrastruktur fallen in beiden Fällen an. Da der Stromspeicher explizit für die Lastflexibilisierung angeschafft wird, werden die Investitionskosten hierfür komplett in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einbezogen.

Da das System aus drei Komponenten – Stromspeicher, Heizstab und IKT-Infrastruktur – besteht, ergeben sich für die betrachteten Kennzahlen folgende Besonderheiten im Vergleich zu den in Kapitel 4.4 allgemein gültigen Berechnungen.

Annuität

Die einzelnen Komponenten weisen unterschiedliche Lebensdauern auf. Daher werden die jeweiligen Annuitäten separat berechnet und anschließend addiert, um die Annuität des Gesamtsystems zu erhalten (siehe **Formel (15)**). Die einzelnen Annuitäten berechnen sich dabei nach Formel (2).

³ In diesem Fall ohne Energieaufwendungen für die Raumwärmebereitstellung, da diese nicht Teil der Untersuchung ist.

$$A_{System} = A_{Stromspeicher} + A_{Heizstab} + A_{IKT-Anbindung} \quad (15)$$

Kapitalwert

Der Kapitalwert wird nach Formel (3) bestimmt. Die Einzahlungsüberschüsse C_t entsprechen dabei den jährlichen Kosteneinsparungen unter Berücksichtigung der Entwicklung von Strom- und Gaspreisen sowie der verminderten Erlöse aus der Einspeisevergütung nach EEG durch die Flexibilisierung. Aufwendungen für Wartung- und Instandhaltung werden vernachlässigt. Auch hier müssen die unterschiedlichen Lebensdauern der drei Komponenten berücksichtigt werden. Daher wird für die Lebensdauer T das Maximum der Lebensdauern der eingesetzten Komponenten verwendet. K_0 setzt sich aus den Investitionen der drei Komponenten zusammen, r entspricht dem Kalkulationszinssatzes.

Interner Zinsfuß

Der interne Zinsfuß wird für die maximale Lebensdauer aus den entsprechenden Komponenten berechnet.

7.7 Ermittelte Sensitivitäten und Einschränkungen

Im Rahmen der Erstellung und Validierung des Rechentools hat sich gezeigt, dass die gewählte Form der Einbindung der Lastgänge, speziell zur Reduzierung des Datenvolumens, ausreichend ist, jedoch einige Nachteile birgt.

Erste Evaluierungen mit dem Berechnungstool haben verdeutlicht, dass es bei mehrfacher Nutzung des gleichen Lastgangs zu hohen Lastspitzen kommt. Zudem kann vorkommen, dass die gleiche Zapfstelle bzw. das gleiche elektronische Gerät mehrfach gleichzeitig zuschaltet. Daher können auch beim System mit „Gaskessel und Heizstab“ kurzfristige Unterschreitungen der kritischen Temperatur auftreten. Im Falle des kombinierten Systems „Wärmepumpe und Heizstab“, schaltet dann der Heizstab zu, sodass der Anteil des Heizstabs an der wärmegeführten TWW-Bereitstellung ggf. überschätzt wird.

8 Kosteneinsparpotenziale für Prosumer

Im Rahmen der Studie werden mit den in **Kapitel 8.1** dargestellten Parametern beispielhafte Auswertungen mit dem Rechentool durchgeführt, um hieraus Kosteneinsparpotenziale für einzelne Einfamilienhäuser (siehe **Kapitel 8.2**) und darüber für alle Prosumer in NRW (siehe **Kapitel 8.3**) zu bestimmen.

8.1 Gewählte Parameter für Simulation

Die Dimensionierung der PV-Anlage und des Hausspeichersystems wird kostenoptimal gemäß /HTW-01 14/ vollzogen. Hiernach liegt das wirtschaftliche Optimum der Dimensionierung bei einer PV-Leistung von 0,8 kWp je MWh Jahresstrombedarf und einer nutzbaren Speicherkapazität von 1,1 kWh je MWh Jahresstrombedarf des jeweiligen Haushalts. Laut /HTW-01 14/ kann in dieser Konfiguration ein hoher Eigenverbrauchsanteil und Eigenversorgungsgrad bei einer relativ geringen PV-Fläche erreicht werden. Im Rahmen von /JET-02 16/ wurden für verschiedene Gebäudetypen und Baualterklassen die verfügbaren Dachflächen für die Installation von PV- Anlagen ermittelt. In NRW stehen damit im Durchschnitt 41,2 m² zur Verfügung. Aus /HTW-01 14/ mit den unten dargestellten Stromverbräuchen ergibt sich eine zu installierende Leistung der PV-Anlage von 3 kWp, welche mit einer Fläche von 16,13 m² erreichbar ist.

Weitere festgelegte Parameter für alle Auswertungen:

- Bewohner: 1 Vollzeitbeschäftigter, 1 Teilzeitbeschäftigter, 1 Kind
- Strombedarf: 3.500 kWh, TWW-Bedarf: 2.100 kWh
- Thermische Leistungen: Wärmepumpe 1 kW, Gaskessel 6 kW, Heizstab 3 kW
- Arbeitszahl Wärmepumpe: 2,4 /AGE-01 06/, Wirkungsgrad Gastherme: 90 % /VAI-02 16/, Wirkungsgrad Heizstab: 99 % /NEO-01 16/, Wirkungsgrad elektrische Speicher: 86 % /LIE-01 14/, /CAR-01 14/
- Temperaturgrenzen: 70 °C Maximaltemperatur des Speichers, 58 °C Maximaltemperatur für Wärmepumpe, 55 °C Solltemperatur des Speichers, 45 °C Minimaltemperatur des Speichers
- Es ist eine Zirkulationspumpe vorhanden
- Stadt: Beckum, PV-Ausrichtung: Süd
- Grundpreis Strom 8,90 €/Monat und Arbeitspreis 29,33 ct/kWh /BMWI-08 17/, ohne Wärmepumpentarif, Annahme zur Strompreisentwicklung 2 %
- Grundpreis Gas 10,17 €/Monat, Arbeitspreis 6,5 ct/kWh /BNETZA-20 16/, , Annahme zur Gaspreisentwicklung 2 %
- Einspeisevergütung 12,2 ct/kWh gültig ab 01.07.2017 für Dachanlagen bis 10 kWp /BNETZA-07 17/
- Keine Umlagen auf selbstverbrauchten Strom

- Kosten für Heizstab bei 3 kW ca. 139 €, entspricht bei 2 kW in Kombination mit der Wärmepumpe 128 €, also einer Zusatzinvestition von 11 €

Jeweils untersuchte Variationen der Parameter:

- Jeweils das System „Gaskessel und Heizstab“ und „Wärmepumpe und Heizstab“
- Speicher der Effizienzklasse B nach /EU-10 13/: mit Volumen 200 l (Verlustbeiwert 61,4 W) und 500 l (Verlustbeiwert 83,2 W)
- Jeweils ohne und mit elektrischem Speicher, wenn mit elektrischem Speicher Komplettsystem SES30DCS1+SPICA50 aus /CAR-02 17/

8.2 Simulationsergebnisse einzelner Systeme

Da Eigenversorgungsgrad und Eigenverbrauchquote nur von der Ladesteuerung abhängen, wird zunächst der Effekt des gesteuerten Ladens auf diese dargestellt. Danach wird die Wirtschaftlichkeit der Systeme erst unter Einbezug der Einspeisevergütung dargestellt und darauf unter Vernachlässigung dieser.

Eigenversorgungsgrad und Eigenverbrauchquote

Der Eigenversorgungsgrad (Strom) liegt im Falle des ungesteuerten Ladens immer bei 28 %, die Eigenverbrauchsquote (Strom) bei 32 %. Dies resultiert aus dem, auf Grund der Gleichzeitigkeiten zwischen Erzeugung und Haushaltsstromverbrauch, direkt selber verbrauchten Strom. Durch die Nutzung des Stromspeichers kann in beiden TWW-Systemen der Eigenversorgungsgrad (Strom) auf 53 % erhöht werden, die Eigenverbrauchsquote (Strom) auf 64 %.

Im Falle des Eigenversorgungsgrades (Strom und TWW) sowie der Eigenverbrauchsquote (Strom und TWW) liegt auch bei ungesteuertem Laden ein Unterschied zwischen Systemen mit Wärmepumpe und mit Gaskessel vor. Auf Grund der hohen Effizienz der Wärmepumpe wird weniger Energie von außen bezogen, zudem schaltet die Wärmepumpe auch im ungesteuerten Fall hin und wieder zu Zeiten mit PV-Erzeugung. Daher liegt hier der Eigenverbrauchsquote (Strom und TWW) bei 25 %, bei Gaskesseln bei nur 15 %. Die erreichbaren Eigenversorgungsgrade (Strom und TWW) bei gesteuertem Laden sind in **Tabelle 8-1** dargestellt.

Tabelle 8-1: Erreichter Eigenversorgungsgrad (Strom und TWW) bei gesteuertem Laden

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	38%	44%
	Mit elektrischem Speicher	47%	50%
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	36%	41%
	Mit elektrischem Speicher	41%	44%

Gleichermaßen ist die Eigenverbrauchsquote (Strom und TWW) mit 40 % im Wärmepumpensystem höher als beim Gaskesselsystem mit 32 %. Die resultierenden

Eigenverbrauchsquoten (Strom und TWW) bei gesteuertem Laden sind **Tabelle 8-2** zu entnehmen.

Tabelle 8-2: *Erreichte Eigenverbrauchsquote (Strom und TWW) bei gesteuertem Laden*

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	65%	79%
	Mit elektrischem Speicher	81%	86%
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	76%	87%
	Mit elektrischem Speicher	90%	97%

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei Eigenverbrauch

Während in **Tabelle 8-3** die auftretende Differenz der Energiekosten zwischen dem ungesteuerten und gesteuerten Laden unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung dargestellt ist, weißt **Tabelle 8-4** die Differenz der Kosten ohne Einbeziehung der Einspeisevergütung aus. Eine negative Kostendifferenz weist auf Mehrkosten durch das gesteuerte Laden hin.

Tabelle 8-3: *Kostendifferenz zum ungesteuerten Verbrauch bei einer Einspeisevergütung von 12,2 ct/kWh*

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	-10,36 €	-18,42 €
	Mit elektrischem Speicher	105,00 €	108,06 €
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	-58,92 €	-75,69 €
	Mit elektrischem Speicher	103,73 €	96,07 €

Tabelle 8-4: *Kostendifferenz zum ungesteuerten Verbrauch ohne Betrachtung der Einspeisevergütung*

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	88,68 €	123,73 €
	Mit elektrischem Speicher	266,64 €	286,40 €
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	105,74 €	131,45 €
	Mit elektrischem Speicher	323,06 €	341,37 €

Amortisationsdauer

Zwar weißt Tabelle 8-3 für Systeme mit elektrischem Speicher eine Reduktion der jährlichen Energiekosten aus, diese amortisieren sich jedoch auf Grund der aktuell noch zu hohen Investitionen für Speicher in keinem der betrachteten Fälle mit

Einspeisevergütung. Auch die reine Flexibilisierung der TWW-Versorgung amortisiert sich bei Berücksichtigung der Einspeisevergütung nicht innerhalb der Lebensdauer der Geräte.

Nimmt man eine Abschaffung der Einspeisevergütung an, so amortisieren sich die verschiedenen TWW-Flexibilisierungen innerhalb der in **Tabelle 8-5** dargestellten Dauern.

Tabelle 8-5: *Amortisationsdauer bei gesteuertem Verbrauch ohne Betrachtung der Einspeisevergütung*

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	6 Jahre	4 Jahre
	Mit elektrischem Speicher	20 Jahre	19 Jahre
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	5 Jahre	4 Jahre
	Mit elektrischem Speicher	20 Jahre	19 Jahre

8.3 Einsparpotenzial für NRW

Wie die Ergebnisse aus **Kapitel 8.2** zeigen, gibt es unter aktuellen Bedingungen kein wirtschaftliches Potenzial für Prosumer durch die Flexibilisierung ihrer TWW-Erwärmung. Hierbei wurden Möglichkeiten, wie die mögliche Teilnahme am Regelleistungsmarkt, auf Grund der hohen Komplexität ausgeschlossen.

Geht man jedoch von einem entfallen der Einspeisevergütung aus, beläuft sich bei einer Anzahl von ca. 2.15 Mio. Einfamilienhäusern in NRW das jährliche Energiekosteneinsparpotenzial auf 191 – 735 Mio. € (siehe **Tabelle 8-6**).

Tabelle 8-6: *Kosteneinsparung für NRW bei gesteuertem Verbrauch ohne Betrachtung der Einspeisevergütung*

Versorgungssystem		Südausrichtung	
		Speichervolumen TWW-Speicher 200 l	Speichervolumen TWW-Speicher 500 l
Wärmepumpe mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	190,9 Mio. €	266,4 Mio. €
	Mit elektrischem Speicher	574,1 Mio. €	616,6 Mio. €
Gaskessel mit Heizstab	Ohne elektrischen Speicher	227,7 Mio. €	283,0 Mio. €
	Mit elektrischem Speicher	695,5 Mio. €	735,0 Mio. €

9 Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Im Rahmen der Studie wird sowohl untersucht welche Energie- und Kosteneinsparungen in der TWW-Versorgung möglich sind, als auch ob der gezielte Verbrauch von eigenem PV-Strom wirtschaftlich sinnvoll ist.

9.1 Einsparung TWW-Bereitstellung

Die Ergebnisse in **Kapitel 5** haben gezeigt, dass speziell durch Verhaltensanpassungen, sowie den Einsatz von Durchflussbegrenzern und Spararmaturen weitreichende Potenziale zur Reduktion des TWW-Verbrauches erschlossen werden können. Diese Maßnahmen haben zudem den Vorteil dass sie durch einzelne Personen getroffen werden können. Wirtschaftlich ebenfalls umsetzbare Maßnahmen wie die Optimierung des TWW-Verteilsystems oder der Austausch des TWW-Erwärmers unterliegen andererseits dem „Mieter-Vermieter“-Dilemma. Besonders zur Effizienzsteigerung im TWW-Verteilsystem sind zudem detaillierte Prüfungen des vorhandenen Systems notwendig. Wie die Ergebnisse zeigen, kann sich eine verbesserte Dämmung der TWW-Verteilrohre oder eine verbesserte Einstellung der Zirkulationszeiten jedoch bereits in kurzer Zeit wirtschaftlich lohnen.

9.2 Nutzung selbst erzeugten Stromes aus der PV-Anlage

Die in **Kapitel 8.2** dargestellten Ergebnisse werden nacheinander für die gewählten Freiheitsgrade diskutiert.

Verwendung eines elektrischen Speichers

In fast allen betrachteten Fällen ergeben sich hier ein negative Kapitalwerte und Amortisationsdauern über die Lebensdauer des Systems hinaus. Es sollte jedoch unterstrichen werden, dass hier die komplette Investition in den Speicher betrachtet wird und zur Lastflexibilisierung der TWW-Komponenten lediglich die zusätzlich anzuschaffenden Komponenten. Auf Grund der weiterhin sinkenden Preise für Batteriespeicher ist zudem mit einer wirtschaftlichen Darstellbarkeit der Nutzung von Heimspeichersystemen zu rechnen.

Flexibilisierung der TWW-Versorgung und Einspeisevergütung

Speziell in Systemen mit einer Erdgas-basierten TWW-Erwärmung, zeigt sich der Eigenverbrauch durch einen Heizstab als unwirtschaftlich. Bei einem Erdgaspreis von 6,86 ct/kWh und einer Effizienz des Erwärmers von ca. 86 % ist die gasbasierte TWW-Erwärmung auf Grund der vermiedenen Einnahmen durch die Einspeisevergütung sehr viel günstiger. Bei 29,33 ct/kWh kostet thermische Energie 12,2 ct/kWh, also so viel wie die PV-Einspeisevergütung. Auf Grund höherer Verluste durch die Flexibilisierung des thermischen Speichers, treten jedoch bei der Lastflexibilisierung zusätzliche Kosten für die Wärmebereitstellung auf.

10 Literaturverzeichnis

- AGE-01 06** Auer, Falk; Schote, Herbert: Schlussbericht - Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei - Erdreich-Wärmepumpen mit positiver Ökobilanz; Kritische Bewertung von Luft-Wärmepumpen. Lahr: Agenda Energie Lahr, 2006
- BDEW-03 17** Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015 - Durchschnittswerte bezogen auf die Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe - Anteile in: BDEW-Wasserstatistik. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2017
- BDEW-07 16** Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland - Basisdaten und Einflussfaktoren. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2016
- BDEW-09 16** Trunec, Katrin: Heizungsmarkt Wohnungswirtschaft - Fakten und Argumente. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2016
- BDH-01 15** Gesamtbestand zentrale Wärmeerzeuger 2014. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., 2015
- BDH-04 16** Gesamtbestand zentrale Wärmeerzeuger 2015. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., 2016
- BEV-01 17** Tipp 52: Duschkauer verkürzen in: http://www.energieverbraucher.de/de/tipp52-duschkauer__1993/. Abruf: 25.06.2017. (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rU2VnXfm>). Unkel: Bund der Energieverbraucher, 2017
- BMJV-01 08** Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz - EEWärmeG) in: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eew_rmeg/gesamt.pdf (14.12.2015). Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Juris GmbH, 2008
- BMWi-01 17** Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- BMWi-08 17** Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung - Stand 05.05.2017. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2017
- BNETZA-07 17** Pho-to-vol-taik-an-la-gen - Datenmeldungen und EEG-Ver-gü-tungs-sät-ze in: <https://www.bundesnetzagentur.de> (Accessed: 2017-06-18). Bonn: Bundesnetzagentur (BNetzA), 2017
- BNETZA-20 16** Monitoringbericht 2016 - Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i.V.m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i.V.m. § 53 Abs. 3 GWB. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2016
- BNETZA-34 16** Leitfaden zur Eigenversorgung. Bonn: Bundesnetzagentur (BNetzA), 2016

- BUN-01 16** Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Trinkwasserverordnung - TrinkwV in: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/trinkwv_2001/gesamt.pdf. Berlin: Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016
- CAR-01 14** Marktübersicht Batteriespeicher. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2014
- CAR-02 17** C.A.R.M.E.N. e.V. (Car): Marktübersicht Batteriespeicher. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2017
- DESTATIS-01 17** Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 - Sonderauswertung: Bewohnte Wohnungen nach Art der Nutzung, Gebäudegröße, Baujahr und Beheizung - Sammelheizungen disaggregiert. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2017
- DESTATIS-06 15** Fläche und Bevölkerung der Bundesländer Deutschlands in: http://www.statistik-portal.de/statistik-portal/de_jb01_jahrtabl.asp (21.12.2015). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2015
- DESTATIS-11 16** Bauen und Wohnen - Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 Bestand und Struktur der Wohneinheiten Wohnsituation der Haushalte in: Fachserie 5 Heft 1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2016
- DESTATIS-15 14** Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 - Bewohnte Wohnungen nach Art der Nutzung, Gebäudegröße, Baujahr und Energieart der Warmwasserversorgung auf Bundeslandebene. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2014
- DIN-02 12** DIN 1988-200 - Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen – Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) – Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2012
- DIN-02 16** DIN EN 12897:2016-12 - Wasserversorgung - Bestimmung für mittelbar beheizte, unbelüftete (geschlossene) Speicher-Wassererwärmer. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2016
- DIN-03 07** DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN 15450 - Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007
- DPA-01 16** Duschkopf mit zu hohem Verbrauch ersetzen in: <http://www.fnp.de/ratgeber/hausundgarten/Duschkopf-mit-zu-hohem-Verbrauch-ersetzen;art314,2671597> (Accessed: 2017-06-25) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rU2U4OQI>. Frankfurt am Main: Frankfurter Neue Presse, 2016
- DVGW-01 04** Arbeitsblatt W 551 - Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. Bonn: DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., 2004

- EMAX-01 17** 1m Rohrisolierung für 20-22mm Rohr, Hartschaum mit Kunststoffummantelung und Klebeverschluss, 20mm Dämmstärke in https://www.emax-haustechnik.de/de/installation/isolierung/rohrisolierungen/1m-rohrisolierung-20-22mm-rohr-hartschaum-kunststoffummantelung-klebeverschluss-20mm-daemmstaerke?action_ms=1 (Accessed: 2017-07-01) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rktUpfmQ>. Albstadt: TradeCom GmbH, 2017
- EMAX-02 17** 1m Rohrisolierung Steinwolle alukaschiert 22mm (1/2") mit 15mm Dämmstärke, 50% EnEV in: https://www.emax-haustechnik.de/de/installation/isolierung/rohrisolierungen/1m-rohrisolierung-steinwolle-alukaschiert-22mm-1-2-15mm-daemmstaerke-50-enev?action_ms=1 (Accessed: 2017-07-01) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rktXdtyb>. Albstadt: TradeCom GmbH, 2017
- EMAX-03 17** 1m Rohrisolierung Steinwolle alukaschiert 22mm (1/2") mit 23mm Dämmstärke, 100% EnEV in: https://www.emax-haustechnik.de/de/installation/isolierung/rohrisolierungen/1m-rohrisolierung-steinwolle-alukaschiert-22mm-1-2-23mm-daemmstaerke-100-enev?action_ms=1. (Accessed: 2017-07-01) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rmAqFJ1N>. Albstadt : TradeCom GmbH, 2017
- EMAX-04 17** 1m Rohrisolierung Steinwolle feuerbeständig 22mm (1/2") mit 23mm Dämmstärke in: https://www.emax-haustechnik.de/de/installation/isolierung/rohrisolierungen/1m-rohrisolierung-steinwolle-feuerbestaendig-22mm-1-2-23mm-daemmstaerke?action_ms=1 (Accessed: 2017-07-01) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rktHJrVV>. Albstadt: TradeCom GmbH, 2017
- EU-10 13** DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 812/2013 DER KOMMISSION vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieeffizienzkenzeichnung von Warmwasserbereitern, Warmwasserspeichern und Verbundanlagen aus Warmwasserbereitern und Solareinrichtungen. Brüssel, Belgien: Europäische Union, 2013
- FFE-04 12** Schmid, Tobias; Beer, Michael; Corradini, Roger: Energiemodell der Wohngebäude in: BWK Bd. 64 (2012) Nr. 1/2. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2012
- FFE-05 02** Geiger, B.; Carter, M.; Mühlbacher, H.: Warmwasserbereitung - Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2002
- FFE-45 17** Köppl, Simon; Samweber, Florian; Bruckmeier, Andreas; Böing, Felix; Hinterstocker, Michael; Kleinertz, Britta; Konetschny, Claudia; Müller, Mathias; Schmid, Tobias; Zeiselmaier, Andreas: Projekt MONA 2030: Grundlage für die Bewertung von Netzoptimierenden Maßnahmen - Teilbericht Basisdaten. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2017

- FFE-84 11** Schwentzek, Marco; Fieger, Christian; Tzscheuschler, Dr.-Ing. Peter: Reduzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen durch dezentrale elektrische Warmwasserversorgung. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft e.V., 2011
- FIN-01 17** 30j-Bundesanleihen in: <http://www.finanzen.net/zinsen/30j-Bundesanleihen> (Abruf: 27.06.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rXIC7xSL>). Karlsruhe: finanzen.net GmbH, 2017
- GAB-02 17** Pape, Ulrich: Gabler Wirtschaftslexikon - Stichwort: Amortisationsdauer in: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/amortisationsdauer.html> (Abruf: 29.06.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6ra45OquY>. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2017
- GAB-03 17** Pape, Ulrich: Gabler Wirtschaftslexikon - Stichwort: interner Zinsfuß in: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/interner-zinsfuss.html> (Abruf: 29.06.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6ra4PqPcf>. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2017
- HED-01 17** Wolf CGU-2-10 10kW Gas-Heiztherme, raumluftabhängig, E / H in: <https://www.heizungsdiscout24.de/gas-heizung/wolf-cgu-2-10-10kw-gas-heiztherme-raumluftabhaengig-e-h.html?pidcount=1&pid=12357&gclid=CK29p4CF8NQCfQ4R0wodyMcFrg> (Accessed: 2017-07-01) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rmNJ4txE>. Gießen: Heizungsdiscout 24 GmbH, 2017
- HORN-01 17** Warmwasserspeicher Siemens 100l DG10025 Ein oder Zweikreis Boilerbetrieb in: <http://www.hornbach.de/shop/Warmwasserspeicher-Siemens-100l-DG10025-Ein-oder-Zweikreis-Boilerbetrieb/5638757/artikel.html> (Accessed: 2017-06-26) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rVUb0KBE>. Bornheim: HORNBACH Baumarkt AG, 2017
- HTW-01 14** Weniger, Johannes; Quaschnig, Volker; Tjaden, Tjarko: Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen in: PV-Magazine. Berlin: PV-Magazine, 2014
- IFE-02 03** Mühlbacher, Helmuth: Dynamisches Verhalten von Wärmeerzeugern - Feldmessungen und Prüfstandsversuche in: „Leistungsorientierte Energiewirtschaft Impulse aus der Energieforschung“, Fachtagung der FfE. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2003
- ITNRW-01 16** Bevölkerung in NRW am 31.12. in: <https://www.it.nrw.de/statistik/a/daten/eckdaten/r511ausl.html>, Abruf am 14.06.2017. Düsseldorf: Landesbetrieb - Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2016
- ITNRW-01 17** NRW: Trinkwasser kostete 2016 im Schnitt 1,67 Euro, Abwasser 2,67 Euro je Kubikmeter in: https://www.it.nrw.de/presse/pressemitteilungen/2017/pres_013_17.html, Abruf am 30.03.2017. Düsseldorf: Landesbetrieb - Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2017

- IWU-01 02** Diefenbach, Nikolaus; Loga, Tobias; Born, Rolf; Großklos, Marc; Herbert, Carsten: Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2002
- IWU-02 10** Diefenbach, Nikolaus Dr.; Cischinsky, Holger Dr.; Rodenfels, Markus: Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2010
- JET-02 16** Jetter, Fabian; Bosch, Stephan: Energiewende auf dem Dach - Siedlungsstrukturelle Informationen als Grundlage zur Berechnung des Solarpotenzials auf Wohngebäuden. In: Kartographische Nachrichten. Bonn: Gesellschaft für Kartographie und Geomatik (DGfK e.V.), 2016
- LIE-01 14** Lorenz, Christian; Schröder, Gerd (Leipziger Institut für Energie GmbH): Wirtschaftlichkeit Batteriespeicher - Berechnung der Speicherkosten und Darstellung der Wirtschaftlichkeit ausgewählter Batterie-Speichersysteme. Werlste: Redpoint Solar GmbH, 2014
- LNUV-01 16** Klimaatlas Nordrhein-Westfalen in: <http://www.klimaatlas.nrw.de/site/nav2/KarteMG.aspx>. (Abruf: 2017-06-20). Archived by WebCite® <http://www.webcitation.org/6rMhweRdr>. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2016
- MBW-01 17** PV-Energy-Manager 2.1 ohne Heizstab in: <https://www.mbw-electronic-online.de/PV-Energy-Manager-21> (Abruf: 26.06.2017) Archived by WebCite <http://www.webcitation.org/6rVYMK6bY>. Muldenhammer: MBW Electronic Shop, 2017
- MBW-02 17** PV-Energy-Manager 1.1 ohne Heizstab in: <https://www.mbw-electronic-online.de/PV-Energy-Manager-11> (Abruf: 26.06.2017) Archived by WebCite <http://www.webcitation.org/6rVcBjvuX>. Muldenhammer: MBW Electronic Shop, 2017
- METE-01 14** te Heesen, Henrik; Herbort, Volker; Pfatischer, Robert: Studie zum Ertrag von Photovoltaikanlagen 2013 in Deutschland. Augsburg: Meteocontrol, 2014
- MUE-01 07** Mühlbacher, H.: Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten. Dissertation. München: TU München, 2007
- NEO-01 16** Technisches Datenblatt - neoheat Heizstab. Hartberg, Austria: neovoltaic AG, 2016
- PTR-01 15** Energieeffizientes Warmwassertemperaturhaltesystem - Das HWAT-Einrohrverteilsystem von Raychem bietet hohe Energieeffizienz und hilft Kosten sparen. Dublin, Irland: Pentair Ltd., 2015
- PVM-02 16** Batteriespeicher: die Frage nach der Effizienz. In: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/batteriespeicher--die-frage-nach-der-effizienz_100022369 (Abruf: 30.06.2016) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6ie3u5h2h>). Frankfurt am Main: pv magazine Deutschland, 2016

- REC-01 09** Schramek, Ernst-Rudolf; Sprenger, Eberhard; Recknagel, Hermann: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 09/10. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2009
- REC-01 16** Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf: Recknagel - Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 78. Ausgabe 2017/2018 - einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: Karl-Joseph Albers, 2016
- SIE-01 17** Produktsteckbrief DG10025 - Wandspeicher 100 Liter - Zweikreis-, Einkreis- oder Boilerschaltung; 1/6 kW. München: Siemens AG, 2017
- SOLPOT-01 14** Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale auf Gemeindeebene - Web-Portal der Wüstenrot-Stiftung, Ludwigsburg und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE). München: FfE e.V., 2014, Abrufbare Ergebnisse unter <http://www.solarthermiepotenziale.de>
- SWT-01 15** Durchlauferhitzer - Schock für Warmduscher in: Stiftung Warentest 01/2015. Berlin: Stiftung Warentest, 2015
- UBA-14 13** Umweltbundesamt: Hintergrund - Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchskennzeichnung - Warmwasserbereiter und Warmwasserspeicher. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2013
- ÜNB-05 16** Prognose der EEG-Umlage 2017 nach AusglMechV - Prognosekonzept und Berechnung der ÜNB – Stand: 14.10.2016. Berlin: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, Transnet BW GmbH, 2016
- VAI-02 16** Gas-Wandheizgeräte - atmoTEC exclusive/plus. Remscheid: Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, 2016
- VDE-03 15** Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene - Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. - Energietechnische Gesellschaft (ETG), 2015
- VDI-01 08** Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen - VDI 4655. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008
- VDI-01 17** VDI 2067 Blatt 12 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2017
- VDI-06 13** VDI 2067 - Energieaufwand für die Erzeugung in: VDI-Richtlinien. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013
- VIESS-01 11** Viessmann Planungshandbuch Wärmepumpen. Allendorf: Viessmann Deutschland GmbH, 2011
- WID-01 09** Widén, Joakim; Wäckelgard, Ewa: A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand in: Applied Energy 87 (2010). Uppsala, Sweden: Elsevier, 2009
- WOLF-01 15** Gaskombithermen und Gasthermen mit integriertem Speicheranschluss - Montage- und Wartungsanleitung - CGU-2-10 - CGU-2K-18/24. Mainburg: Wolf GmbH, 2015

ZIV-01 16 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2016. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV), 2016