



Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

**Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern
bei dynamisch variierten Lasten und
Übertragungskomponenten**

Helmuth Mühlbacher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 20.06.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 29.10.2007 angenommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens, das auf der Grundlage tagtypischer Untersuchungen eine energetische Bewertung von Wärmeerzeugern und Warmwasserspeichern unter praxisnahen Bedingungen gestattet. Vor-Ort-Messungen liefern dabei typische Verbrauchskennwerte und Betriebsbedingungen für die Entwicklung charakteristischer Bedarfsgänge definierter Referenzgebäude mittels Simulationstools. Diese Bedarfsprofile dienen auch als Eingangsgrößen für einen Prüfstand mit dynamischen Wärmelasten. Zielsetzung ist die messtechnische Bilanzierung verschiedener Heizkessel und Warmwasserspeicher, die Hochrechnung auf Jahreswerte und die Analyse relevanter Einflussfaktoren.

Abstract

Within the scope of the thesis, the development of a new test procedure on the basis of day-specific investigations is described. The test method allows for the energetic assessment of heat generators and hot water tanks under practical operating conditions. For this purpose, on-site measurements deliver typical consumption data and operating conditions for the development of characteristic demand profiles for defined reference buildings with the aid of simulation tools. These demand profiles serve as input variables for a test bench with dynamic thermal loads. The objectives are the metrological benchmarking of different central heating boilers and hot water tanks, the extrapolation of annual values and the analysis of relevant influencing factors.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Vorgehensweise und Methodik.....	2
3	Feldversuche.....	4
3.1	Einflussgrößen zum Betriebsverhalten von Wärmeerzeugern	6
3.2	Untersuchte Kombisysteme zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung	8
3.2.1	Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf Raumheizung und Warmwasser	12
3.2.2	Analyse des elektrischen Hilfsenergieverbrauchs	14
3.2.3	Tagesgang des Heizwärmeverbrauchs	15
3.2.4	Heizungsrelevante Einflussgrößen	16
3.2.5	Einflussgrößen bei der Warmwasserspeicherladung.....	19
3.2.6	Ermittlung von Nutzungsgraden	20
3.2.7	Energieflussdiagramme	23
3.3	Warmwasserversorgungssysteme	24
3.3.1	Kennwerte der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme	25
3.3.2	Warmwasserbedarf, Einfluss von Gebäude- und Versorgungsart	30
3.3.3	Tages- und jahreszeitliche Einflüsse auf den Warmwasserbedarf	32
3.3.4	Zapfenergie und Versorgungsart.....	35
3.4	Anlaufvorgänge bei der Warmwasserzapfung	38
4	Entwicklung standardisierter dynamischer Lastgänge.....	43
4.1	Referenzobjekte (Gebäude und Haushalte)	44
4.2	Referenzlastgänge für die zentrale Heizwärmeversorgung.....	48
4.2.1	Saisonalgang des Heizwärmebedarfs und Typisierung durch Taggruppen	49
4.2.2	Tagesgang des Heizwärmebedarfs	53
4.3	Referenzlastgänge für die zentrale Warmwasserversorgung.....	54
4.3.1	Simulationsergebnisse.....	64
4.3.2	Fahrprofile für Stichelungs- und Zirkulationsbetrieb	69
5	Konzeption und Aufbau des Wärmeerzeugerprüfstands	71
5.1	Aufbau der Heizwärme- und Warmwasserversorgung.....	71

5.1.1 Einhausung und Brennstoffversorgung.....	71
5.1.2 Heizkreissimulator mit Wärmesenke.....	74
5.1.3 Warmwasserbereitung und -verbrauchssimulation.....	75
5.2 Messtechnische Ausstattung des Wärmeerzeugerprüfstands	77
6 Validierung des Wärmeerzeugerprüfstands	83
6.1 Umsetzung der Lastgänge am Prüfstand	83
6.2 Nachbildung der Bedarfsgänge am Prüfstand	85
6.2.1 Heizwärmebedarf.....	85
6.2.2 Zirkulationsverluste	86
6.2.3 Warmwasserzapfvorgänge	88
7 Prüfstandsversuche und Ergebnisse	89
7.1 Messtechnische Untersuchungen eines Öl-Niedertemperaturkessels.....	89
7.2 Analyse der Prüfstandsversuche in Bezug auf den Jahresnutzungsgrad	95
7.3 Vergleich der Messergebnisse mit Feldversuchen.....	100
7.4 Analyse ausgewählter Einflussfaktoren	100
7.4.1 Wärmeerzeuger mit und ohne Außentemperaturfühler	100
7.4.2 Warmwasserverteilung als Zirkulations- oder Stichelungssystem	102
7.4.3 Zapfprofil „Normal-“ oder „Badetag“	102
7.5 Messergebnisse ausgewählter Heizkessel	103
8 Ausbau zum KWK-Prüfstand	105
9 Zusammenfassung und Ausblick	109
10 Literatur	111
11 Anhang.....	113
11.1 Abbildungsverzeichnis	113
11.2 Tabellenverzeichnis	117
11.3 Abbildungen.....	118
11.4 Tabellen	121

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Energiebedarf zur Deckung der Raumheizwärme stellt mit einem Anteil von 31 % den zweitgrößten Sektor des Energieverbrauchs in Deutschland dar. In Anbetracht der aktuellen öffentlichen Diskussionen um den Klimaschutz ist eine Reduzierung des Energieverbrauchs und eine damit verbundene Senkung klimarelevanter Emissionen bei der Heizwärme- und Warmwasserbedarfsdeckung unumgänglich. Planungsmängel bei der Auslegung der Wärmeerzeuger führen dazu, dass in vielen Gebäuden überdimensionierte, wenig angepasste und unzulänglich betriebene Heizungssysteme anzutreffen sind. Insbesondere bei der kombinierten Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser durch Heizkessel mit Warmwasserspeicher findet man in der Praxis Betriebsparameter, die oftmals einen rationellen Anlagenbetrieb verhindern. Auch optimale Auslegungen und auf den ursprünglichen Versorgungsfall zutreffende Betriebsparameter werden vielfach nicht angepasst, wenn sich mit einer bau- und wärmetechnischen Sanierung der Wärmebedarf des Gebäudes verändert. Die Auswahl und die Abstimmung des Wärmeerzeugers und des Heizwärme- und Warmwasserverteilsystems auf das jeweilige Gebäude gewinnt deshalb immer mehr an Bedeutung.

Zur Ermittlung des Normnutzungsgrads von Heizkesseln in Wohngebäuden sind an unterschiedlichen Stellen der entsprechenden Normen Prüfverfahren zu finden, die aber alle nur stationäre Verbrauchslastgänge zugrunde legen. Die ermittelten Prüfergebnisse erlauben es zwar, verschiedenste Geräte diverser Hersteller miteinander zu vergleichen, repräsentieren jedoch keinen typischen oder durchschnittlichen Anwendungsfall. Eine Aussage, wie effizient der Wärmeerzeuger im realen Gebäude betrieben werden kann, ist damit nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit war es daher, ein Prüfverfahren zu entwickeln, das es gestattet, verschiedenste Wärmeerzeuger und Warmwasserspeicher unter realitätsnahen Bedingungen messtechnisch zu untersuchen und reale Jahresnutzungsgrade zu erhalten. Dazu war es zunächst nötig, im Rahmen des von der Bayerischen Forschungsförderung geförderten Projekts /ISO-TEG/ detaillierte Messungen zum Betriebsverhalten alter und neuer Heizkessel zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung vor Ort in Gebäuden durchzuführen und auszuwerten. Daraus abgeleitete Kennwerte sind in Abschnitt 3 dieser Arbeit nach Erläuterung von Methodik und Vorgehensweise dargestellt. Anschließend wurden für definierte Referenzgebäude Lastgänge des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs entwickelt (siehe Kapitel 4). Ein weiterer Abschnitt ist der Konzeption und dem Aufbau eines Wärmeerzeugerprüfstands mit seiner gesamten Anlagen- und Messtechnik gewidmet. Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich mit der Umsetzung und Nachbildung der einzelnen Lastgänge sowie der Prüfstandsvalidierung. Im letzten Teil werden ausgewählte Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen erläutert und auf Jahreswerte hochgerechnet. Nach einem kurzen Überblick über die Erweiterung zum KWK-Prüfstand schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Vorgehensweise und Methodik

Die Grundidee dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prüfverfahrens, mit dem es möglich ist, verschiedene Wärmeerzeuger und Warmwasserspeicher unter praxisnahen Bedingungen am Prüfstand messtechnisch zu untersuchen. Zur Erfassung und Analyse energierelevanter Einflüsse sind in einem ersten Schritt detaillierte Messungen zum Betriebsverhalten alter und neuer Heizkessel vor Ort in Gebäuden durchzuführen. Die Vor-Ort-Messungen liefern dabei Abbilder der typischen Verbrauchskennwerte und Betriebsbedingungen sowie deren Bandbreiten; damit sollen realitätsnahe Nachbildungen im Prüfverfahren ermöglicht werden. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Messung von Anlaufvorgängen sowohl beim Start der Zirkulationspumpe als auch bei Warmwasserzapfvorgängen, da zu diesem Thema aussagekräftige Werte in der Fachliteratur fehlen. Zum realitätsnahen Betrieb des Prüfstands sind nachfolgend aufgeführte, charakteristische Kenngrößen zum Betriebsverhalten zu bestimmen:

Wärmeerzeuger:

- Tagesgang des Heizwärmeverbrauchs
- Schalthäufigkeiten, Brennerlauf- und -stillstandszeiten
- Brennstoffeinsatz und elektrischer Hilfsenergiebedarf
- tagtypische Nutzungsgrade

Warmwasserspeicher:

- Verbrauchskennwerte für Zirkulations- und/oder Stichleitungsbetrieb
- Einfluss von Werk- und Wochenendtag auf den Warmwasserverbrauch
- saisonaler Warmwasserverbrauch

Warmwasserzapfstelle:

- typische Zapfmengen und -temperaturen
- Temperaturverlauf an der Warmwasserzapfstelle beim Zapfvorgang
- Verluste bei Zapfvorgängen

Aus der Vielzahl vorhandener Gebäude sind für die Gebäudearten „Einfamilienhaus“ und „Mehrfamilienhaus“ Typgebäude zu definieren, die einen hohen Verbreitungsgrad hinsichtlich Geometrie und Bauphysik im deutschen Gebäudebestand aufweisen. Bei der Auswahl der Referenzgebäude wird auf die Typgebäude aus dem Projekt /IKARUS/ zurückgegriffen. Für diese Referenzgebäude ist es notwendig, das Warmwasser- und Heizungsverteilsystem auszulagen und die Raumübertragungsflächen zu planen, um bauphysikalische und verbrauchsspezifische Kenndaten zur Entwicklung der Bedarfsprofile zu ermitteln. Da der experimentelle Betrieb eines Heizkessels über ein gesamtes Jahr sehr kosten- und zeitintensiv wäre, sind die Heizperiode repräsentierende Tageslastgänge zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung zu

entwickeln, die sich am Prüfstand reproduzierbar nachbilden lassen und mit denen ein gesamter Jahresbetrieb beurteilt werden kann. Der Heizwärmebedarfsgang auf 15-Minuten-Basis ist mit dem Simulationstool /TRNSYS/ zu berechnen. Um charakteristische Tage zu erhalten, werden Tagtypen definiert, die die verschiedenen Jahreszeiten mit den zugehörigen meteorologischen Bedingungen repräsentieren. Die Einteilung erfolgt in „Winter-“, „Übergangs-“ und „Sommertage“, wobei zusätzlich zwischen „heiteren“ (Bedeckungsgrad $< 0,8$) und „trüben“ (Bedeckungsgrad $\geq 0,8$) Tagen zu unterscheiden ist.

Die Entwicklung der Warmwasserzapfprofile beruht auf den Felduntersuchungen. Aufgrund typischen Nutzerverhaltens bei der Warmwasserentnahme findet eine Differenzierung in „Normal-“, „Bade-“ und „Wochenendtag“ statt. Da der Aufbau eines vollständigen Warmwasserverteilsystems mit unterschiedlichen Rohrgeometrien und -werkstoffen sowie Isolierstandards für die einzelnen Referenzobjekte nicht zu realisieren wäre, müssen Fahrprofile für den Prüfstand auf Grundlage der Warmwasserspeicherentnahme entwickelt werden. Dazu ist es notwendig, ein Simulationstool zur Berechnung von Warmwasserversorgungssystemen bei dynamischem Betrieb zu programmieren. Als Eingangsgrößen dienen die definierten Warmwasserzapfprofile, die Betriebsart (Zirkulations- und/oder Stichleitungsbetrieb), die Zirkulationszeiten und der Aufbau des Warmwasserverteilsystems des gewählten Referenzgebäudes. Das Berechnungsergebnis für beide Betriebsarten ist ein Warmwasserspeicherentnahmeprofil basierend auf Warmwasserzapfvorgängen. Bei Zirkulationsbetrieb ist darüber hinaus ein Fahrprofil erforderlich, das die Zirkulationsverluste beinhaltet.

Für die messtechnischen Untersuchungen verschiedener Heizkessel und Warmwasserspeicher ist ausgehend von den Vor-Ort-Messungen ein Prüfstand zu konzipieren und aufzubauen. Die einzelnen Komponenten sollen dabei die Nachbildung der verschiedenen Referenzgebäude mit ihrer gesamten Anlagentechnik wie etwa Gebäudeheizlast, Wasserinhalt der Rohrleitungen und Heizkörper oder Größe des Warmwasserspeichers ermöglichen. Um die Vergleichbarkeit zu den Feldversuchen zu gewährleisten, ist darauf zu achten, dass beim Aufbau des Wärmeerzeugerprüfstands nur Standardkomponenten Verwendung finden.

Der Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands erfordert eine umfangreiche Mess-, Regel- und Steuerungstechnik. Dabei sind die zur Bilanzierung des Wärmeerzeugers und Warmwasserspeichers sowie die zur Regelung oder Steuerung der einzelnen Prüfstandskomponenten erforderlichen Temperatur- und Durchflussmessstellen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde zu erfassen. Eine wichtige Voraussetzung ist die Umsetzung des Messkonzepts in ein Datenerfassungssystem, das eine Auswertung der gewonnenen Daten ermöglicht, das für Analysearbeiten unerlässlich ist. Das zu erstellende Softwareprogramm soll einen sicheren Betrieb des Prüfstands ohne Beaufsichtigung über mehrere Tage erlauben. Der Prüfstand bietet in dieser Form die Möglichkeit, verschiedene Wärmeerzeuger und Warmwasserspeicher unter reproduzierbaren Bedingungen zu testen.

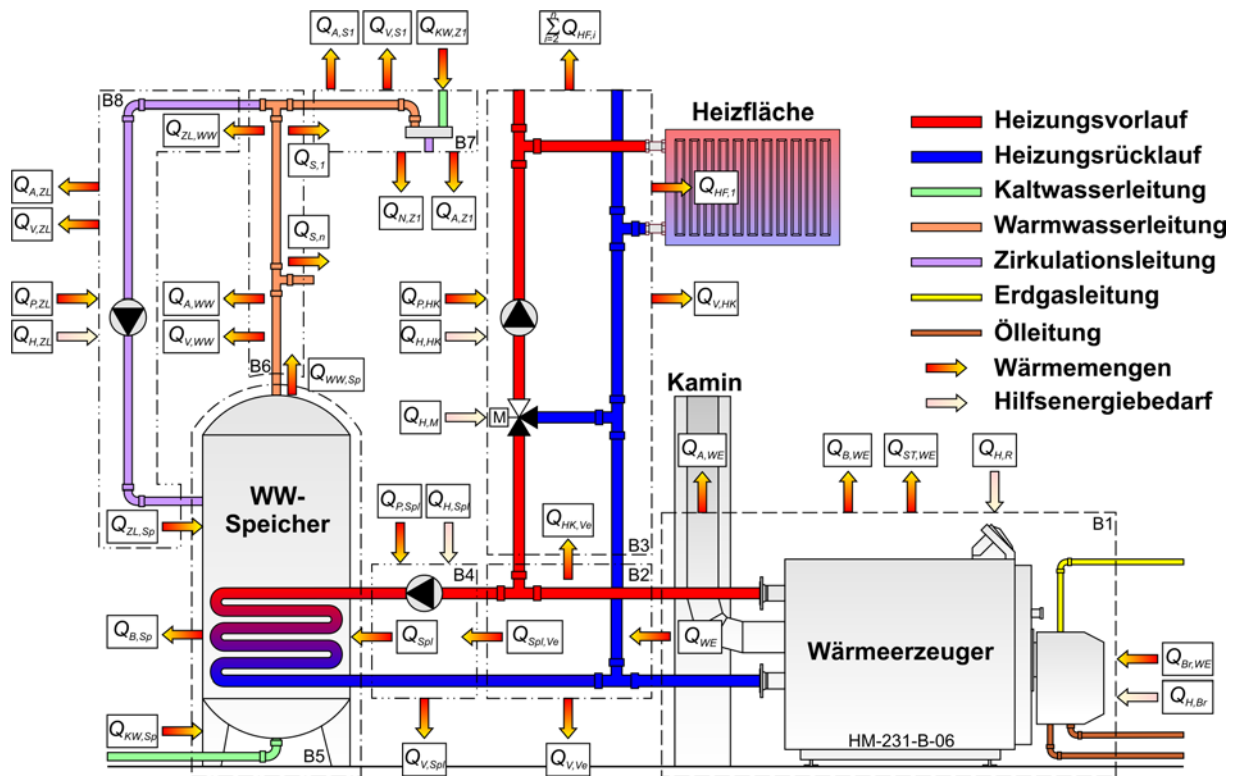
3 Feldversuche

Für einen aussagekräftigen Vergleich von unterschiedlichen Raumwärme- und Warmwasserversorgungsanlagen, die zum Teil unter sehr verschiedenen Bedingungen betrieben werden, sind gesicherte Kenntnisse über das stationäre und instationäre Betriebsverhalten der Wärme- und Warmwasserbereitungsanlagen notwendig. Neben dem Wirkungsgrad im Nennbetrieb sind dabei vor allem das Teillastverhalten und der Bereitschaftsbetrieb von Bedeutung. Darüber hinaus spielen die Einflüsse des realen Verhaltens der Raumwärme- und Warmwasserverteilung und Raumheizflächen sowie der verbraucherseitigen dynamischen Wärmelast eine große Rolle. Deshalb wurden detaillierte messtechnische Untersuchungen in verschiedenen Einfamilien-, Zweifamilien- und Mehrfamilienhäusern durchgeführt und die charakteristischen Kenngrößen der Gebäudeheizung, der Warmwasserbereitung und -verteilung aufgezeichnet und ausgewertet. Schwerpunkte lagen dabei auf der detaillierten Erfassung des Einflusses von Überdimensionierung, Betriebsparametern, Lastgängen des Raumwärmebedarfs und der Warmwasserbereitung sowie des Wartungszustands der Anlagen und der Beurteilung bezüglich des Energieverbrauchs.

Da in der Fachliteratur aussagekräftige Werte zu diesen Themen fehlen, galt ein besonderes Augenmerk dieser Arbeit der Messung von Zirkulations- und Anlaufverlusten und deren Untersuchung an einer ausreichenden Zahl von Messobjekten. Eine solch differenzierte Betrachtung führt zu transparenten Ergebnissen, die Anhaltspunkte für Optimierungsmöglichkeiten und zukünftige regeltechnische Entwicklungen im Bereich der Wärme- und Warmwasserversorgungstechnik liefern.

Die zur energetischen Beurteilung von Raumwärme- und Warmwasserversorgungssystemen benötigten Energieflüsse mit den einzelnen Bilanzgrenzen sind beispielhaft in **Abbildung 3-1** grafisch dargestellt. Hier werden die Wärmeein- und -austräge sowie der Hilfsenergiebedarf im Wärmeerzeuger, Heizkreis, Warmwasserspeicher und Warmwasserverteilsystem beschrieben. Die charakteristischen Kennwerte und Verlustposten während der Messperiode sind so mittels der erstellten Energiebilanzen für die einzelnen Messobjekte ausweisbar.

Die messtechnische Erfassung vollständiger Nutzungsgradketten würde bereits bei einem einzelnen Objekt einen enorm hohen Aufwand erfordern. So wäre allein für eine Aufteilung des Energieinhalts im gezapften Wasser in Anlaufverluste, Leitungsverluste und Nutzwärme an jeder Zapfstelle eine kontinuierliche Volumenstrom- und Temperaturmessung erforderlich. Als Nutzwärme gilt nur derjenige Volumenanteil, der dem Nutzer mit der gewünschten Zapftemperatur zur Verfügung steht. Eine solche Messung ist vor allem in einem Mehrfamilienhaus in der Praxis nicht durchführbar. Die einzelnen Bereiche der Nutzungsgradkette wurden in drei voneinander unabhängigen Messkampagnen, die in den nachfolgenden Abschnitten detailliert aufgeführt sind, untersucht.



Bilanzgrenzen

- | | | | |
|----|--------------------|----|-----------------------------|
| B1 | Wärmeerzeuger | B2 | Wärmeverteilsystem |
| B3 | Heizkreis | B4 | Warmwasserspeicherladekreis |
| B5 | Warmwasserspeicher | B6 | Warmwasserleitung |
| B7 | Stichleitung | B8 | Zirkulationsleitung |

Hilfsenergiebedarf

- | | | | |
|------------|--------------------------------------|------------|--|
| $Q_{H,R}$ | Hilfsenergiebedarf Kesselregelung | $Q_{H,Br}$ | Hilfsenergiebedarf Brenner |
| $Q_{H,M}$ | Hilfsenergiebedarf Heizkreismischer | $Q_{H,HK}$ | Hilfsenergiebedarf Heizungsumwälzpumpe |
| $Q_{H,Sp}$ | Hilfsenergiebedarf Speicherladepumpe | $Q_{H,ZL}$ | Hilfsenergiebedarf Zirkulationspumpe |

Wärmemengen

- | | | | |
|---------------|--|----------------|---|
| $Q_{Br,WE}$ | Wärmeeintrag Brennstoff | Q_{WE} | Wärmeabgabe Wärmeerzeuger |
| $Q_{ST,WE}$ | Strahlungsverluste Wärmeerzeuger | $Q_{B,WE}$ | Betriebsbereitschaftsverluste Wärmeerzeuger |
| $Q_{A,WE}$ | Abgasverluste Wärmeerzeuger | $Q_{HK,Ve}$ | Wärmeeintrag Heizkreis |
| $Q_{Spl,Ve}$ | Wärmeeintrag Speicherladekreis | $Q_{V,Ve}$ | Verteilungsverluste Verteilerkreis |
| $Q_{HF,1..n}$ | Wärmeeintrag Heizfläche | $Q_{V,HK}$ | Verteilungsverluste Heizkreis |
| $Q_{P,HK}$ | Wärmeeintrag Heizkreispumpe | Q_{Sp} | Wärmeeintrag Warmwasser |
| $Q_{V,Sp}$ | Verteilungsverluste Warmwasserspeicherladekreis | $Q_{P,Sp}$ | Wärmeeintrag Warmwasserspeicherladepumpe |
| $Q_{B,Sp}$ | Betriebsbereitschaftsverluste Warmwasserspeicher | $Q_{V,WW}$ | Verteilungsverluste Warmwasserleitung |
| $Q_{A,WW}$ | Leitungsaufheizverluste Warmwasserleitung | $Q_{S,1..n}$ | Wärmeeintrag Stichleitung |
| $Q_{ZL,WW}$ | Wärmeeintrag Zirkulationsleitung | $Q_{V,S1..n}$ | Verteilungsverluste Stichleitung |
| $Q_{A,S1..n}$ | Leitungsaufheizverluste Stichleitung | $Q_{KW,S1..n}$ | Kaltwasserwärmeeintrag Zapfstelle |
| $Q_{N,Z1..n}$ | Nutzwärmemenge Zapfstelle | $Q_{A,Z1..n}$ | Ausgussverluste Zapfstelle |
| $Q_{V,ZL}$ | Verteilungsverluste Zirkulationsleitung | $Q_{A,ZL}$ | Leitungsaufheizverluste Zirkulationsleitung |
| $Q_{P,ZL}$ | Wärmeeintrag Zirkulationspumpe | | |
| $Q_{KW,Sp}$ | Kaltwasserwärmeeintrag Warmwasserspeicher | | |
| $Q_{WW,Sp}$ | Wärmeeintrag Warmwasserleitung am Warmwasserspeicheraustritt | | |
| $Q_{ZL,Sp}$ | Wärmeeintrag der Zirkulationsleitung in den Warmwasserspeicher | | |

Abbildung 3-1: Wärmeein- bzw. -austräge und Hilfsenergiebedarf von Wärmeerzeuger, Heizkreis, Warmwasserspeicher und Warmwasserverteilsystem

Die Ergebnisse der drei Messkampagnen sind nun so kombinierbar, dass damit eine Abbildung der einzelnen zentralen und dezentralen Raumwärme- und Warmwasserversorgungsvarianten möglich ist.

Bei den Raumwärmevarianten ist zu unterscheiden nach:

- dezentraler Versorgung (zum Beispiel Gas- oder Ölofen)
- zentraler Versorgung (zum Beispiel Heizkessel)
- einer Kombination aus zentraler und dezentraler Versorgung (zum Beispiel Heizkessel und Kachelofen)

Die einzelnen Warmwasserversorgungsvarianten gliedern sich in:

- dezentrale Variante (zum Beispiel Elektrokleinspeicher)
- zentrale Variante mit Stichleitungssystem
- zentrale Variante mit Zirkulationssystem

Die untersuchten Energie- und Stoffströme über die Bilanzgrenzen je Messkampagne (siehe Abbildung 3-1) teilen sich wie folgt auf:

- **Messkampagne 1:** Bilanzgrenzen B1 – B5 (Abschnitt 3.2)
- **Messkampagne 2:** Bilanzgrenzen B5, B6, B8 (Abschnitt 3.3)
- **Messkampagne 3:** Bilanzgrenze B7 (Abschnitt 3.4)

Alle nachfolgend beschriebenen Vor-Ort-Messungen werden bei Analyse der messtechnischen Daten vorgenannten Bilanzgrenzen und Bilanzierungen zugeordnet. Damit ist ein einheitliches Schema von Analyse und Interpretation der Ergebnisse gewährleistet.

3.1 Einflussgrößen zum Betriebsverhalten von Wärmeerzeugern

Um die charakteristischen Kenngrößen zum Betriebsverhalten zentraler Heizungs- und Warmwasserversorgungsvarianten zu erhalten, wurden in den untersuchten Vor-Ort-Objekten je nach Messkampagne nachfolgende Größen erfasst:

Wärmeerzeugung:

- Gasverbrauch des Wärmeerzeugers oder
- Ölvor- und Rücklaufvolumenstrom in den Brenneranschlussleitungen
- Verbrennungslufttemperatur
- Abgastemperatur und Abgaszusammensetzung
- Heizraumtemperatur
- Außentemperatur

Heizungssystem:

- Heizkreisvor- und -rücklauftemperatur
- Heizkreisdurchfluss
- Leitungsquerschnitte

Warmwassersystem:

- Vor- und Rücklauftemperatur der Warmwasserspeicherladung
- Durchfluss im Warmwasserspeicherladekreis
- Warm- und Kaltwassertemperatur am Warmwasserspeicher
- Kaltwassermenge am Warmwasserspeichereintritt
- Temperatur an der Warmwasserzapfstelle
- Zapfmenge
- Temperatur in der Zirkulationsleitung
- Durchfluss in der Zirkulationsleitung
- Leitungsquerschnitte

Elektrische Hilfsenergieverbraucher:

- Brenner
- Heizungsregelung
- Heizungs- und Warmwasserspeicherladepumpe
- Zirkulationspumpe

Für die zu messenden Temperaturen fanden Pt-100-Mantelthermometer der Güteklasse A Verwendung. Zur Erfassung von sich sehr schnell ändernden Temperaturen – wie zum Beispiel der Abgas- oder Warmwasserzapftemperatur – kamen zusätzlich Thermoelemente zum Einsatz. Um die Betriebssicherheit, einfache Demontage und optimale Möglichkeiten zu weiteren Untersuchungen zu gewährleisten, wurden zur Erfassung der einzelnen Temperaturmessstellen und Minimierung der Ansprechzeit sehr dünnwandige Tauchhülsen montiert.

Die Aufzeichnung der Volumenströme in den einzelnen Wasserkreisen erfolgte mit Hilfe von magnetisch induktiven Durchflussmessgeräten, die einen sehr geringen Druckverlust und eine hohe Messgenauigkeit aufweisen. Der Vorteil dieser Messstellenkonfiguration im Vergleich zum Einbau von Wärmemengenzählern liegt in der geringeren Beeinflussung der Strömungs- und Druckverhältnisse in den einzelnen Wasserverteilsystemen. Für die Ausweisung des elektrischen Hilfsenergiebedarfs wurde neben dem Gesamtstromverbrauch auch die Leistungsaufnahme einzelner relevanter Verbraucher wie Umwälzpumpen, Wärmeerzeugerregelung oder Brenner getrennt aufgezeichnet. Eine detaillierte Analyse und Auswertung der Betriebszeiten der einzelnen Komponenten war somit möglich. Zur Plausibilisierung der Messung des Ölverbrauchs mit den installierten Volumenstromzählern in den Brenneranschlussleitungen wurden die messtechnisch erfassten Heizölvolumina mit dem Produkt aus

Brennerlaufzeit und Ölbrennerdüsen-Durchsatz verglichen. Bei gasbefeueten Wärmeerzeugern erfolgte die Brennstoffmengenerfassung durch die Installation von Impulsgebern mit einer Auflösung von $0,01 \text{ m}^3/\text{Impuls}$ an den bestehenden Gasuhren. Um alle dynamischen Vorgänge beim Betrieb der einzelnen Wärme- und Warmwasserversorgungsanlagen exakt zu erfassen, wurden sämtliche Messwerte mit einer Abtastrate von 10 s aufgezeichnet.

Der formelmäßige Zusammenhang für die Wärmemengenströme \dot{Q} und die Tagesnutzungsgrade $\eta_{T,i}$ stellt sich wie folgt dar:

Die Wärmemengenströme \dot{Q} für die einzelnen Bilanzgrenzen der messtechnisch untersuchten Raumwärme- und Warmwasserversorgungssysteme sind mit Hilfe der gemessenen Temperaturdifferenzen, der Massenströme sowie der spezifischen Wärmekapazität von Wasser mit nachstehender Gleichung bestimmbar:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p,W} \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

mit \dot{Q} : Wärmemengenstrom in kJ/h

\dot{m} : Massenstrom in kg/h

$c_{p,W}$: spezifische Wärmekapazität von Wasser in kJ/(kg·K)

ΔT : Temperaturdifferenz in K

Der jeweilige Tagesnutzungsgrad $\eta_{T,i}$ lässt sich unter Zuhilfenahme der berechneten Wärmemengen für die Raumwärmeversorgung $Q_{H,i}$, die Warmwasserspeicherladung $Q_{S,i}$ sowie für den Energieinhalt des Brennstoffs $Q_{BR,i}$ in kWh/d nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\eta_{T,i} = \frac{Q_{H,i} + Q_{S,i}}{Q_{BR,i}} \quad (3.2)$$

mit $\eta_{T,i}$: Tagesnutzungsgrad

$Q_{H,i}$: Wärmemenge Heizung in kWh/d

$Q_{S,i}$: Wärmemenge Warmwasserspeicherladung in kWh/d

$Q_{BR,i}$: Brennstoffeinsatz in kWh/d

i : Tagnummer

Die Kapitel 3.2 bis 3.4 sind nun den messtechnisch untersuchten Kombisystemen zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung, den reinen Warmwasserversorgungsanlagen sowie den Anlaufvorgängen bei der Warmwasserzapfung gewidmet.

3.2 Untersuchte Kombisysteme zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung

Im Jahr 2000 wurden an einem Einfamilien-, zwei Reihen-, einem Zweifamilien- und zwei Mehrfamilienhäusern die charakteristischen Kenngrößen sowohl der Heizwärmeerzeugung und -verteilung, als auch der Warmwassererzeugung und -verteilung messtechnisch erfasst

und aufgezeichnet. Die zeitgleiche Ermittlung der Lastgänge des Heiz- und Warmwasserbedarfs, der Verluste bei der Wärme- und Warmwasserbereitstellung, der Warmwasserentnahme aus dem Speicher und der Temperaturniveaus stand dabei im Mittelpunkt. Abbildung 3-1 zeigt die in der Messkampagne 1 erfassten Wärmeströme, die die Bilanzgrenzen B1 bis B5 enthalten.

Eine Übersicht der im Raum München und Augsburg untersuchten Messobjekte gibt **Tabelle 3-1**. Der Messzeitraum betrug dabei zwischen einer Woche und zwei Monaten. Die Bandbreite der installierten Wärmeerzeuger reichte von einem für „Heizöl extra leicht“ umgebauten Koksessel in Messobjekt MO 1 mit Baujahr 1963 bis zu einem mit Baujahr 1997 sehr modernen Gas-Brennwertkessel in Messobjekt MO 6. Die Rohrführung zur Heizwärmeverteilung in den einzelnen Messobjekten war zum größten Teil als Zweirohrsystem ausgelegt. Bei Messobjekt MO 1 kam in einem Teil des Gebäudes ein Einrohrsystem zum Einsatz. Zusätzlich war hier der Heizkreis im Bad als Schwerkraftheizkreis ohne Heizungsumwälzpumpe ausgeführt. Die Raumübertragungsflächen waren – bis auf wenige Ausnahmen – alle mit Thermostatventilen ausgestattet. Im Einrohrheizkreis in Messobjekt MO 1 gab es nur ein zentral montiertes Thermostatventil, das aber immer vollständig geöffnet war.

Die Warmwasserversorgung erfolgte bei allen Gebäuden zentral über den Wärmeerzeuger beziehungsweise bei Messobjekt MO 4 über eine messtechnisch nicht untersuchte Warmwasserwärmepumpe. Die Warmwasserverteilsysteme waren bei allen Gebäuden als Zirkulationssysteme mit kurzen Sticleitungen zu den Zapfstellen ausgeführt. Um einen genauen Einblick in die Betriebsweise der einzelnen Systeme zu erhalten, wurden zusätzlich zu den beschriebenen Messdaten die von den Nutzern in den Heizungsregelungen und Zeitschaltuhren festgelegten Einstellungen erfasst. Anschließend erfolgte ein partieller Vergleich mit den von den Herstellern programmierten Werkseinstellungen, der dazu dienen sollte, Aussagen über die Gewohnheiten der einzelnen Nutzer wie beispielsweise eingestellte Laufzeiten der Zirkulations- und Warmwasserspeicherladepumpe, Warmwasserspeichertemperatur und Zeiten der Nachtabenkung zu erhalten.

Tabelle 3-2 stellt die aus den Messungen abgeleiteten Kenngrößen der einzelnen Messobjekte, unterteilt in die Bilanzkreise Wärmeerzeuger und Warmwasserspeicher und den Hilfsenergieverbrauch, zusammenfassend dar. Die Messungen fanden in der Winter-/Übergangszeit bei mittleren Tagesaußentemperaturen von 4,4 °C bis 14,3 °C während der Messperiode statt. Der kleinste mittlere Durchfluss im Heizkreis von 153 l/h bei einer mittleren Umwälzpumpenlaufzeit von 13,9 h/d findet sich in Messobjekt MO 5 wieder. Trotz des sehr geringen Durchflusses liegt die mittlere Spreizung im Heizkreis hier bei rund 9 K. Dies hängt damit zusammen, dass die messtechnischen Untersuchungen in den Monaten April bis Juni des Jahres 2000 durchgeführt wurden und der Heizwärmeverbrauch im Erfassungszeitraum mit 27,1 kWh/d sehr niedrig war. Zudem verfügt der Wärmeerzeuger über eine Heizungsregelung, die die Kesselwassertemperatur abhängig von der jeweiligen Außentemperatur gleitend einstellt.

Tabelle 3-1: Übersicht über die messtechnisch untersuchten Raumwärme- und Warmwasserversorgungssysteme

Bezeichnung	Einheit	Messobjekt					
		MO 1	MO 2 ¹	MO 3	MO 4 ²	MO 5	MO 6
Allgemein							
Gebäudetyp	–	EFH	ZFH	RH	RH	MFH	MFH
Gebäudebaujahr	–	1963	1974	1979	1969/1998	1898/1997	1886/1999
Standort	–	Augsburg Land	München Land	München Land	München Land	München Stadt	München Stadt
beheizte Fläche	m ²	200	120	120	150	306	622
Haushalte	Anz.	1	1	1	1	7	11
anwesende Personen	Pers.	3	2	2	5	14	28
Messperiode	–	29.01.00 04.02.00	03.03.00 14.03.00	17.02.00 23.02.00	24.03.00 04.04.00	27.04.00 27.06.00	02.03.00 25.03.00
Wärmeerzeuger							
Kesseltyp	–	umgebauter Koksessel	Umstellbrandkessel	NT-Kessel	atm. Gaskessel	NT-Kessel	Brennwertkessel
Kesselleistung	kW	32	29	14 – 17	23	18 – 30	24 – 68
Baujahr	–	1963	1974	1991	1985	1985	1997
Brennstoff	–	Heizöl extra leicht	Heizöl extra leicht	Heizöl extra leicht	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Außentemperatursensor	–	nicht vorhanden	nicht vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden
Tagbetrieb ³ Werktag	–	00:00 – 24:00	00:00 – 24:00	05:30 – 07:00 16:30 – 22:30	07:30 – 24:00	07:00 – 23:00	06:00 – 23:30
Tagbetrieb ³ Wochenende	–	00:00 – 24:00	00:00 – 24:00	07:45 – 22:30	07:30 – 24:00	07:00 – 23:00	06:00 – 23:30
Wärmeversorgung							
Rohrführung	–	Ein-, Zweirohr, Schwerkraft ⁴	Zweirohrsystem	Zweirohrsystem	Zweirohrsystem	Zweirohrsystem	Zweirohrsystem
Heizflächen	–	Radiatoren ⁵	Radiatoren	Radiatoren	Radiatoren	Radiatoren	Radiatoren
Thermostatventile	–	teilweise vorhanden ⁶	vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden
Warmwasserversorgung							
Warmwasserversorgung	–	zentral	zentral	zentral	extern über Wärmepumpe	zentral	zentral
Betriebsweise	–	Zirkulation	Zirkulation	Zirkulation	–	Zirkulation	Zirkulation
Länge Warmwasserverteilsystem	m	19,1	6,4	17,2	–	45,4	87,5
Warmwasserspeichergroße	l	150	100	140	–	500	500
Baujahr	–	1963	1974	1991	–	1995	1997
Speicherladebetrieb Werktag	–	00:00 – 24:00	intern über Kesselwasser	17:00 – 22:00	–	06:45 – 22:30	04:30 – 23:30
Speicherladebetrieb Wochenende	–	00:00 – 24:00	intern über Kesselwasser	10:00 – 22:00	–	06:45 – 22:30	04:30 – 23:30
Zirkulationsbetrieb Werktag	–	03:45 – 01:15	00:00 – 24:00	05:45 – 06:45 17:15 – 20:15	–	00:00 – 24:00	05:00 – 22:00
Zirkulationsbetrieb Wochenende	–	03:45 – 01:15	00:00 – 24:00	07:45 – 08:30 09:45 – 10:30 15:00 – 20:15	–	00:00 – 24:00	05:00 – 22:00

¹ nur eine Doppelhaushälfte wurde messtechnisch erfasst² die Warmwasserbereitung erfolgt extern über eine Wärmepumpe und wurde hier nicht erfasst³ in den übrigen Zeiten abgesenkter Heizbetrieb⁴ der Zubau in Zweirohrausführung und der Badkreis als Schwerkraftsystem⁵ im Einrohrsystem werden Rippenrohrheizkörper verwendet⁶ das Einrohrsystem besitzt nur ein zentral angebrachtes Thermostatventil

Tabelle 3-2: Kennwerte der untersuchten Raumwärme- und Warmwasserversorgungssysteme (als Mittelwerte über die Messperiode)

Kennwert	Einheit	Messobjekt					
		MO 1	MO 2	MO 3	MO 4 ¹	MO 5	MO 6
Bilanzkreis Wärmeerzeuger							
mittlere Tagesaußentemperatur	°C	4,4	5,1	5,6	6,4	14,3	5,0
vergleichbarer Lastgang	–	WT	WT/ÜT	WT/ÜT	ÜT	ÜT	WT/ÜT
Messperiode	d	7	12	7	12	37	24
mittlerer Durchfluss Heizkreis	l/h	849	181	257	179	153	760
Laufzeit Heizungspumpe	h/d	24,0	24,0	24,0	19,9	13,9	21,5
mittlere Spreizung Heizkreis	K	9,3	32,0	15,1	19,4	8,8	12,2
Heizwärmeverbrauch	kWh/d	216,7	74,8	73,3	52,1	27,1	229,0
spez. Heizwärmeverbrauch	kWh/(m ² ·d)	1,1	0,6	0,6	0,3	0,1	0,4
spez. Heizwärmeverbrauch p.a. ²	kWh/(m ² ·a)	215	130	132	80	48	76
mittlerer Durchfluss Speicherladekreis	l/h	1938	– ³	2495	–	887	2344
Laufzeit Speicherladepumpe	h/d	1,9	– ³	1,1	–	2,1	2,5
mittlere Spreizung Speicherladekreis	K	1,6	– ³	– ⁵	–	14,3	15,7
Wärmemenge Speicherladung	kWh/d	9,9	5,5	7,6	–	31,7	70,2
spez. Wärmemenge Speicherladung	kWh/(m ² ·d)	0,05	0,05	0,06	–	0,10	0,11
spez. Wärmemenge Speicherladung p.a.	kWh/(m ² ·a)	18	17	23	–	38	41
Brennstoffeinsatz	kWh/d	329,3	138,4	111,6	98,6	89,6	320,8
spez. Brennstoffeinsatz	kWh/(m ² ·a)	339	253	213	151	131	126
mittlerer Tagesnutzungsgrad	%	68,8	58,0	72,5	52,8	65,7 ⁴	93,3
Takthäufigkeit	1/d	58,0	35,1	48,7	66,5	43,2	70,5
Brennerlaufzeit Heizung	h/d	11,7	4,3	4,9	3,7	1,7	7,2
Brennerlaufzeit Speicherladung	h/d	1,7	– ³	1,0	–	1,8	2,5
mittlere Kesselwassertemperatur	°C	66	– ⁵	47	53	41	47
Bilanzkreis Warmwasserspeicher							
mittlere WW-Speichertemperatur	°C	56	68	52	–	51	53
Warmwasserspeicherverluste	kWh/d	2,1	1,4	1,4	–	3,1	3,1
Energiemenge Warmwasserentnahme	kWh/d	3,0	2,6	3,5	–	19,0	48,9
Anlaufverluste Warmwasserzapfung	kWh/d	0	0	1,2	–	0	0
Zirkulationsverluste	kWh/d	4,5	1,5	0,9	–	9,7	18,2 ⁶
Anlaufverluste Zirkulationsstart	kWh/d	0,3	0	0,6	–	0	0
Energiemenge WW-Speicherentnahme	kWh/d	7,8	4,1	6,2	–	28,7	67,1
Warmwasserentnahmemenge	l/d	62,7	49,8	104,6	–	480,5	965,3
spez. Warmwasserentnahmemenge	l/(Pers.·d)	20,9	24,9	52,3	–	34,3	34,5
mittlerer Durchfluss Zirkulationskreis	l/h	122	82	251	–	211	317
Laufzeit Zirkulationspumpe	h/d	21,5	24,0	4,6	–	24,0	17,0
mittlere Spreizung Zirkulationskreis	K	1,6	0,6	1,2	–	1,7	1,8
spez. Zirkulationsverlustleistung	W/m	10,9	9,3	11,6	–	8,9	10,3 ⁷
Hilfsenergieverbrauch							
Brenner	kWh/d	1,65	0,63	1,37	0,02	0,07	0,54
Regelung	kWh/d	0,05	0,22	0,22	0,10	0,24	0,50
Heizungspumpe	kWh/d	3,79	1,87	1,13	0,50	0,70	1,53
Speicherladepumpe	kWh/d	0,13	0	0,10	–	0,15	0,15
Zirkulationspumpe	kWh/d	0,49	0,56	0,13	–	1,10	0,41
spez. Hilfsenergieverbrauch	Wh/(m ² ·d)	30,55	27,30	24,58	4,08	7,39	5,04
spez. Hilfsenergieverbrauch p.a.	kWh/(m ² ·a)	7,6	7,1	6,4	1,0	2,4	1,4
Hilfsenergieverbrauch p.a.	kWh/a	1524	858	769	154	726	883

¹ die Warmwasserbereitung erfolgt extern über eine Wärmepumpe und wurde hier nicht erfasst² Jahr 2000: 230 Heizztage, Heizperiodenmitteltemperatur 6,5 °C³ interne Warmwasserbereitung über das Kesselwasser⁴ im Heizbetrieb (der mittlere Tagesnutzungsgrad im reinen Sommerbetrieb beträgt 61,2 %)⁵ nicht erfasst⁶ inklusive 2,9 kWh/d Schwerkraftzirkulationsverluste⁷ 4,8 W/m bei Schwerkraftzirkulation

Der spezifische Heizwärmeverbrauch – bezogen auf die beheizte Fläche – variiert bei den einzelnen Messobjekten zwischen 0,1 kWh/(m²·d) und 1,1 kWh/(m²·d). Auffallend ist die sehr geringe mittlere Temperaturspreizung im Speicherladekreis in Messobjekt MO 1 von 1,6 K. Dieser Wert entsteht durch eine überdimensionierte Warmwasserspeicherladepumpe mit einem mittleren Durchfluss von 1938 l/h.

Hinzu kommt die aufgrund des Baujahrs von 1963 sehr starke Verkalkung des Rohrbündelwärmetauschers im Warmwasserspeicher. Diese Verkalkung verhindert einen effizienten Wärmeübergang des Heizmediums an das Warmwasser und erfordert dadurch sehr lange Laufzeiten der Warmwasserspeicherladepumpe von immerhin 1,9h/d. Die zur Versorgung der einzelnen Messobjekte mit Trinkwarmwasser benötigten Energiemengen zur Warmwasserspeicherladung liegen zwischen 5,5 kWh/d und 70,2 kWh/d. Die relativ hohe Spanne der ermittelten mittleren Tagesnutzungsgrade reicht von 52,8 % bis 93,3 %.

Bei einer vergleichenden Bewertung ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse wechselnde Rahmenbedingungen widerspiegeln. Die unterschiedlichen Messzeiträume reichen dabei von der nahezu reinen Warmwasserbereitung bis zum Heizbetrieb bei tiefen Außentemperaturen. An Messobjekt MO 4 wird deutlich, wie sich eine wärmetechnische Sanierung der Gebäudehülle auf das energetische Verhalten des vorhandenen Wärmeerzeugers auswirkt. Der ermittelte Nutzungsgrad von 52,8 % ist auch unter Berücksichtigung der in der Übergangszeit liegenden Messperiode für einen 17 Jahre alten Heizkessel inakzeptabel.

Die höchste mittlere Kesselwassertemperatur von 66 °C trat am Heizkessel in Messobjekt MO 1 wegen der fehlenden Heizungsregelung und des eingesetzten Öl-Standardheizkessels auf.

Somit sind nach Tabelle 3-2 Bilanzaussagen möglich zu:

Brennstoffeinsatz:

- Raumheizung
- Warmwasserbereitung (Warmwasserspeicherladung)

Hilfsenergie:

- Heizkreis
- Warmwasserladung und -verteilung
- Wärmeerzeuger

3.2.1 Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf Raumheizung und Warmwasser

In **Abbildung 3-2** ist der jährliche Anteil der Raumwärme, Warmwasserversorgung und der Wärmeerzeugerverluste am spezifischen Brennstoffeinsatz für die einzelnen Messobjekte, geordnet nach dem Baujahr, zu sehen. Der sehr hohe spezifische Heizwärmeverbrauch von 216,7 kWh/(m²·a) des Messobjekts MO 1 resultiert aus der unzureichenden Dämmung des

Gebäudes, der von der Außentemperatur unabhängigen Heizungsregelung und der fehlenden Nachtabsenkung. Der spezifische Heizwärmeverbrauch nimmt tendenziell ab, je neuer das Gebäude und je höher der Sanierungsstandard ist. Da es sich bei Messobjekt MO 6 um ein freistehendes Mehrfamilienhaus handelt, liegt der Brennstoffeinsatz für die Raumwärmeversorgung pro Quadratmeter höher als bei Messobjekt MO 5. Gut erkennbar ist der größere Anteil der Warmwasserbereitung am Brennstoffeinsatz bei den untersuchten Mehrfamilienhäusern wegen der kleineren Pro-Kopf-Wohnfläche und des besseren Wärmedämmstandards.

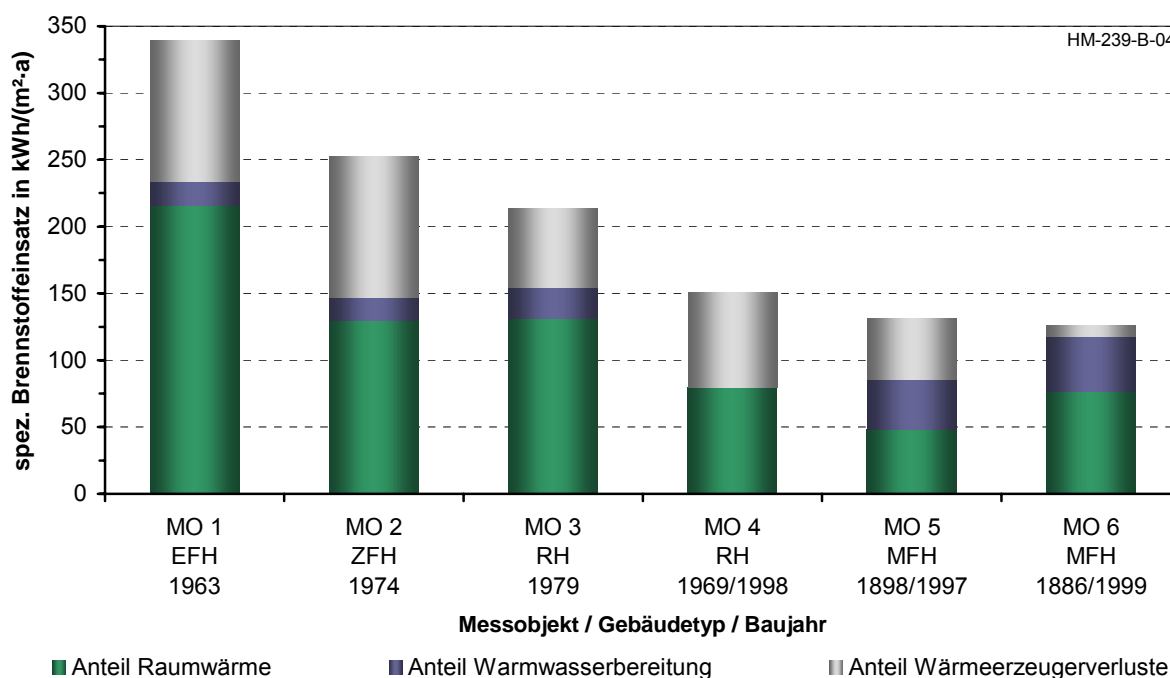


Abbildung 3-2: Anteil der Raumwärme, Warmwasserversorgung und Wärmeerzeugerverluste am spezifischen Brennstoffeinsatz

Gemäß Arbeitsblatt W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ ist zum Schutz vor Legionellenbildung in Trinkwarmwasserinstallationssystemen von Mehrfamilienhäusern eine Warmwasserspeicheraustrittstemperatur von mindestens 60 °C einzuhalten, wobei eine kurzzeitige Absenkung im Minutenbereich akzeptabel ist. Die Messobjekte MO 5 und MO 6 mit mittleren Warmwasserspeichertemperaturen von 51 °C beziehungsweise 53 °C und Warmwasserspeicheraustrittstemperaturen von maximal 56,8 °C beziehungsweise 55,9 °C erfüllen diese Anforderungen nicht. Um das Gesundheitsrisiko der Bewohner zu minimieren, ist hier ein Anheben der Warmwasserspeichertemperatur auf mindestens 60 °C unumgänglich.

Die während der Untersuchungen aus den Warmwasserspeichern entnommenen spezifischen Warmwassermengen reichen von 20,9 l/(Pers.·d) bis 52,3 l/(Pers.·d). Die mittlere Temperaturdifferenz im Zirkulationskreis beträgt bei den untersuchten Messobjekten 0,6 K bis 1,8 K und liegt damit deutlich unter dem von Arbeitsblatt W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ empfohlenen Wert von 5 K. Eine Durchflussverringerng im Zirkulationskreis

würde hier zu einer Vergrößerung der Temperaturdifferenz führen. Die daraus resultierende Verringerung der Zirkulationsverluste und der geringere elektrische Hilfsenergieverbrauch der Zirkulationspumpe würden ein nicht unerhebliches Einsparpotenzial ohne Komfortverlust bedeuten.

3.2.2 Analyse des elektrischen Hilfsenergieverbrauchs

Bei der Interpretation des elektrischen Hilfsenergieverbrauchs in den untersuchten Messobjekten müssen die vorhandene Heizungs- und Warmwasserversorgungstechnik, die Wohnfläche und die vom Nutzer hinterlegten Betriebszeiten der einzelnen Komponenten berücksichtigt werden. Bezieht man den elektrischen Hilfsenergieverbrauch auf die Wohnfläche und das Jahr, so erhält man den in **Abbildung 3-3** dargestellten, jährlichen spezifischen elektrischen Hilfsenergieverbrauch /MÜH 03/.

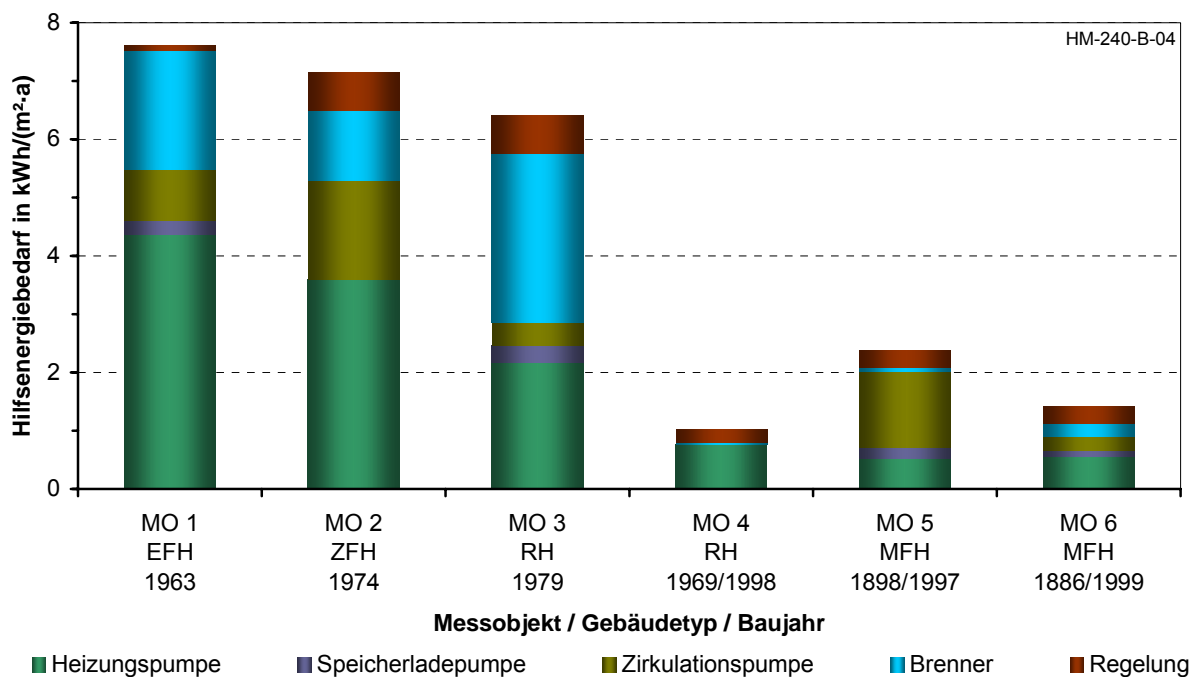


Abbildung 3-3: Jährlicher spezifischer elektrischer Hilfsenergieverbrauch in den untersuchten Messobjekten

Das Maximum findet sich aufgrund der drei installierten Heizungsumwälzpumpen und der veralteten Heiztechnik in Messobjekt MO 1 mit 7,6 kWh/(m²·a) wieder. Auffallend ist der relativ hohe spezifische elektrische Hilfsenergieverbrauch der Zirkulationspumpe pro Jahr in den Messobjekten MO 2 und MO 5. Der Grund dafür liegt im 24-Stunden-Betrieb und der Überdimensionierung der Zirkulationspumpe. Der Minimalwert von 1,0 kWh/(m²·a) in Messobjekt MO 4 rührt zum einen daher, dass die Warmwasserbereitung nicht mit erfasst wurde, zum anderen handelt es sich um einen atmosphärischen Wärmeerzeuger ohne elektrisch betriebenes Gebläse. Der mit 1,4 kWh/(m²·a) auffallend niedrige jährliche spezifische Hilfsenergieverbrauch in Messobjekt MO 6 resultiert aus der sehr gut eingestellten und optimierten

Heizungsregelung sowie den bedarfsgerecht festgelegten Betriebszeiten der einzelnen elektrischen Verbraucher.

3.2.3 Tagesgang des Heizwärmeverbrauchs

Der normierte Heizenergieverbrauch für die untersuchten Ein- und Zweifamilien- sowie Reihenhäuser – bezogen auf den Stundenmittelwert des Tagesverbrauchs für Werktage – ist in **Abbildung 3-4** dargestellt. Bemerkenswert ist der Verlauf der Messobjekte MO 1 und MO 2, die über den ganzen Tag einen ähnlich hohen Verbrauch aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die eingesetzten Wärmeerzeuger älteren Baujahrs sind und keine Heizungsregelung vorhanden ist, die an die Nutzergewohnheiten angepasst werden könnte beziehungsweise bei der eine Nachtabsenkung einstellbar wäre. Bei den Messobjekten MO 3 und MO 4 hingegen fällt der Verbrauch in den Nachtstunden wegen der eingestellten Nachtabsenkung deutlich geringer aus. Der teilweise stark variierende Verbrauch während des Tagbetriebs ist durch Nutzereingriffe bedingt.

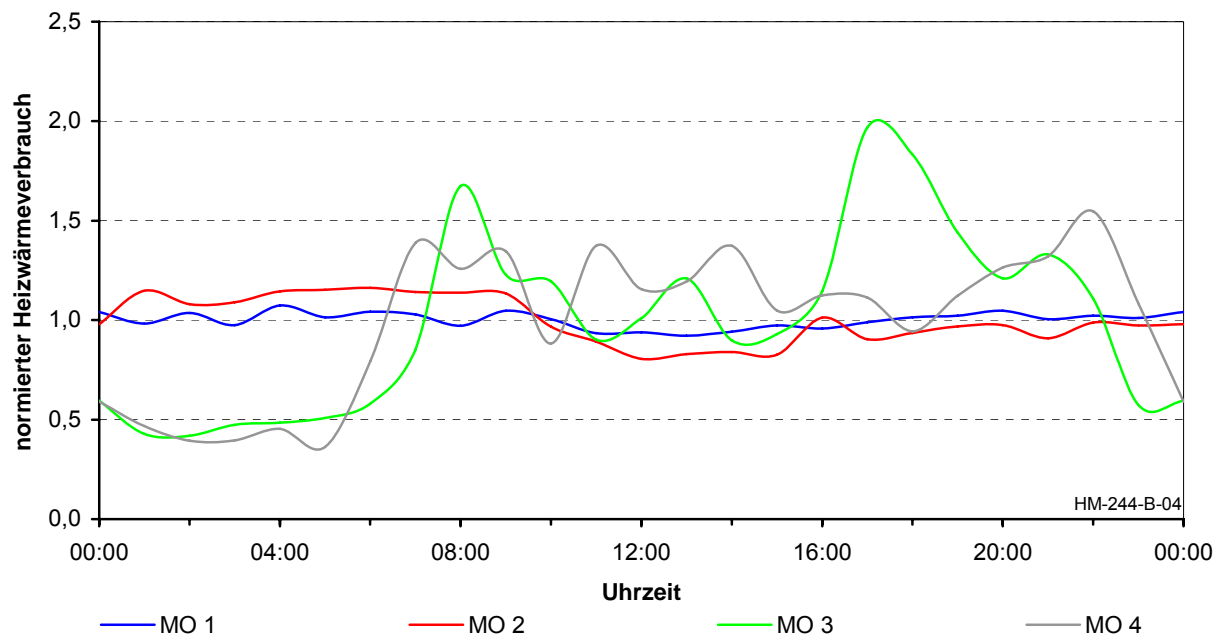


Abbildung 3-4: Heizwärmeverbrauch der untersuchten Einfamilien-, Zweifamilien- sowie Reihenhäuser bezogen auf den Stundenmittelwert des Tagesverbrauchs an Werktagen

Abbildung 3-5 zeigt den normierten Heizwärmeverbrauch der untersuchten Mehrfamilienhäuser. Der Verlauf ist gekennzeichnet durch den abgesenkten Betrieb in den Nachtstunden, die Morgenspitze, den geringeren Verbrauch während des Tages und den abendlichen Anstieg. Die zeitliche Differenz bei der Morgenspitze der beiden Objekte entsteht durch den unterschiedlich programmierten Absenk-/Tagbetrieb. Die hohe Spitze am Morgen des Messobjekts MO 5 und der nur unwesentlich zunehmende Verbrauch am Abend ergibt sich aus der Tatsache, dass die Messungen in der Übergangs- beziehungsweise Sommerzeit durchgeführt

wurden und der normierte Verbrauchswert daher zunächst höher und später tiefer liegt als bei Messobjekt MO 6. Wegen der in diesen Messobjekten eingestellten ersten Warmwasserspeicherladung des Tages kurz vor Beginn des Tagbetriebs nimmt der Verbrauch vor der Morgenspitze erkennbar ab.

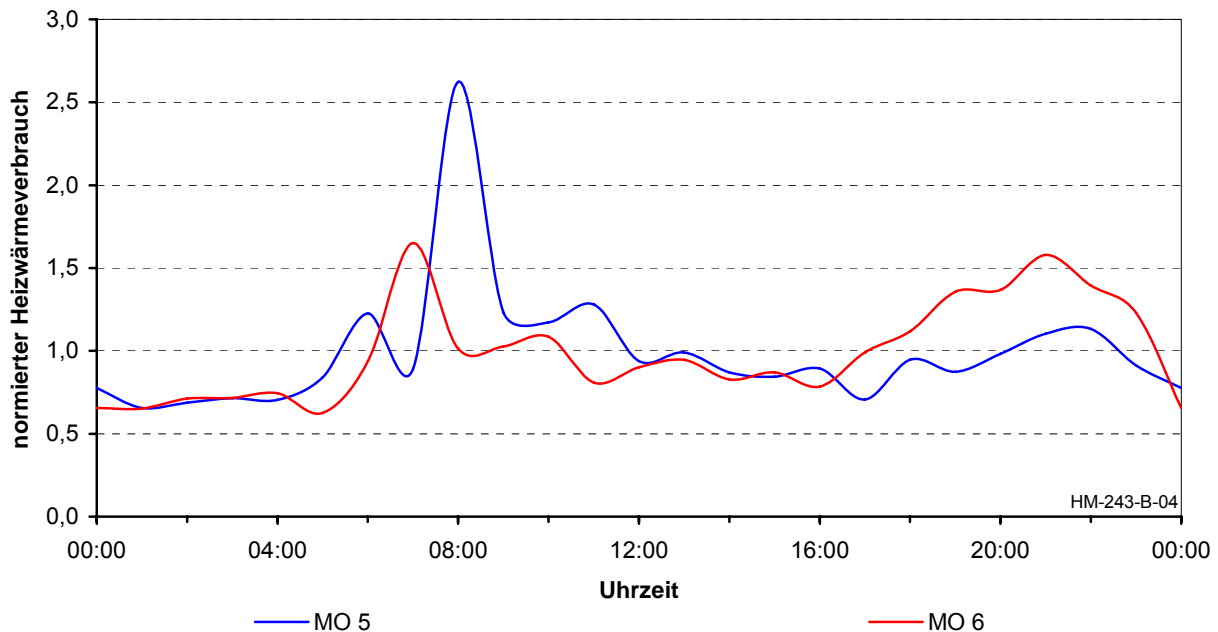


Abbildung 3-5: Heizwärmeverbrauch der untersuchten Mehrfamilienhäuser bezogen auf den Stundenmittelwert des Tagesverbrauchs an Werktagen

Der Einsatz von zeitgesteuerten Thermostatventilen würde zu einer noch größeren Reduzierung der Verbrauchswerte in den Zeiten des Absenkbetriebs führen und damit den Energieverbrauch weiter verringern.

3.2.4 Heizungsrelevante Einflussgrößen

Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft am Messobjekt MO 1 die heizungsrelevanten Parameter Vor- und Rücklauftemperatur, Außentemperatur und Heizkreisdurchfluss sowie die in den Heiz- und Speicherladekreis abgegebene thermische Leistung vom 30. Januar 2000. An den Temperaturverläufen ist sehr deutlich das Fehlen jeglicher Heizungsregelung und die Betriebsweise des Öl-Standardheizkessels des Objekts ablesbar. Bei diesem Kesseltyp kann lediglich die Kesselwassertemperatur manuell eingestellt und gegebenenfalls die Heizungs-vorlauftemperatur über einen handgesteuerten Mischer jahreszeitlich verändert werden.

Die Heizungsvorlauftemperatur lässt sich somit nicht automatisch abhängig von der Außentemperatur anpassen. Der daraus resultierende gleichmäßige, sägezahnähnliche Verlauf von Heizungsvor- und -rücklauftemperatur wird nur geringfügig durch die Speicherladungen beeinflusst, weil keine Speicherladevorrangschaltung existiert. Die Speicherladung erfolgt somit zeitgleich zur Raumwärmeversorgung. Da Thermostatventile an einem Großteil der

Raumheizflächen und drehzahlgeregelte Heizungsumwälzpumpen fehlen, ist der Heizkreisdurchfluss über den ganzen Tag konstant, was eine gleichmäßige Wärmeabgabe des Wärmeerzeugers bewirkt. Trotz der alten Heizungsanlage sind hier noch mittlere Tagesnutzungsgrade während der Messperiode von durchschnittlich 68,8 % (siehe Tabelle 3-2) erreichbar.

Die somit entstehenden Verluste bei der Wärmeerzeugung für dieses Objekt liegen bei 31,2 % bezogen auf den Brennstoffeinsatz. Hier ist allerdings zu beachten, dass sich die Bereitschaftsverluste wegen des sehr hohen Heizwärmeverbrauchs, der durch die schlechte Bauphysik bedingt ist, nicht mehr so stark auf den Nutzungsgrad auswirken. Bereits bei mittleren Tagesaußentemperaturen von 4,4 °C sind in diesem Messobjekt Brennerlaufzeiten von 11,7 h/d zur Deckung des Heizwärmeverbrauchs notwendig. Demnach müssen neben dem Nutzungsgrad auch noch andere Kennzahlen wie zum Beispiel der spezifische Heizwärmeverbrauch in die Beurteilung von Wärmeerzeugern einfließen.

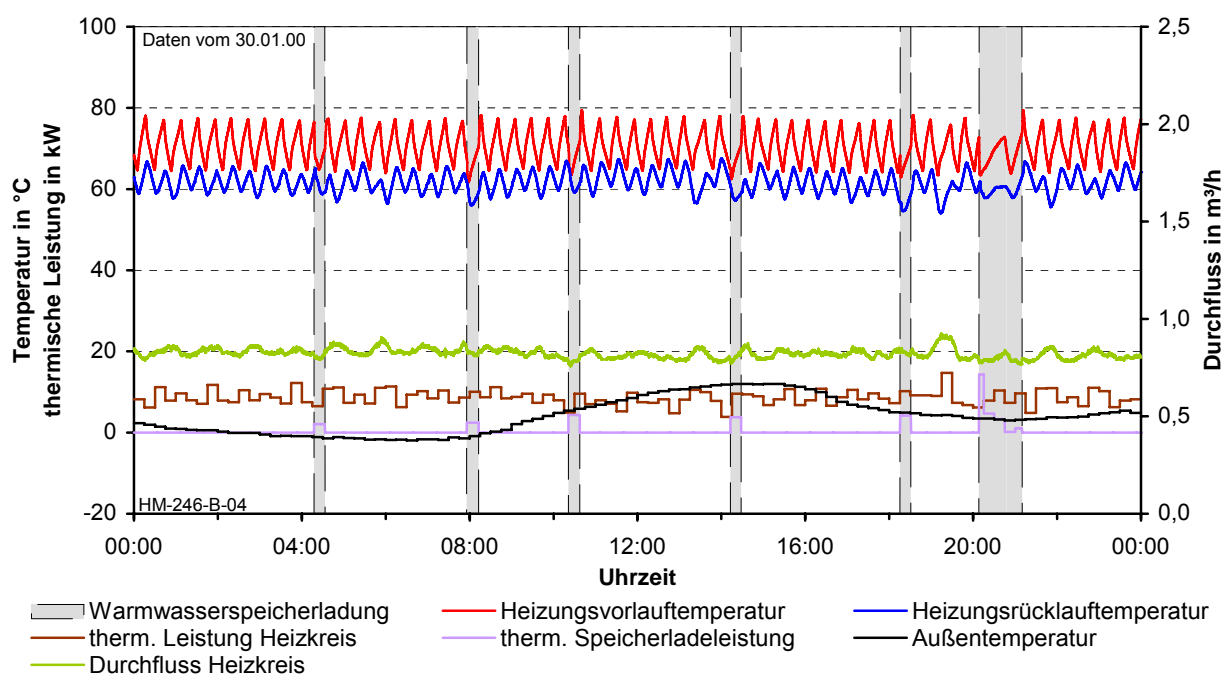


Abbildung 3-6: Temperatur-, Durchfluss- und thermischer Leistungsverlauf am Beispiel des Öl-Standardheizkessels (Baujahr 1963) im Einfamilienhaus MO 1

Ein Vergleich mit einem installierten modernen Gas-Brennwertkessel (MO 6) ist in **Abbildung 3-7** für den 3. März 2000 aufgezeigt. Im Gegensatz zur **Abbildung 3-6** ist hier sehr deutlich der Zeitraum der Nachtabsenkung zwischen 23:30 Uhr und 6:00 Uhr durch eine abgesenkte Heizungs-vor- und -rücklauf-temperatur zu erkennen. In diesem Gebäude kommt es während der Nachtabsenkung zu einer Durchflusserhöhung, weil sich die an den Raumheizflächen angebrachten Thermostatventile wegen der abgesenkten Heizkreistemperaturen öffnen. Verstärkt wird dieser Effekt zusätzlich durch die eingesetzte drehzahlgeregelte Umwälzpumpe. Der Wärmeerzeuger geht um 6:00 Uhr in den Tagbetrieb über. Gemäß der in der

Heizungsregelung hinterlegten Heizkurve erfolgt nun ein Anstieg der Kesselwassertemperatur. Mit dieser erhöhten Vorlauftemperatur ist es möglich, die abgesunkene Raumtemperatur wieder auf die Raum-Solltemperatur anzuheben. Das führt zu diesem Zeitpunkt zu einem Maximum der in den Heizkreis abgegebenen thermischen Leistung, da das gesamte Heizsystem (Wärmeerzeuger, Rohrleitungen, Raumheizflächen und deren Wasserinhalt) wieder auf ein höheres Temperaturniveau erwärmt werden muss. Ist die Raum-Solltemperatur erreicht, kommt es erneut zu einer Reduzierung des Heizkreisdurchflusses, da sich einzelne Thermostatventile schließen.

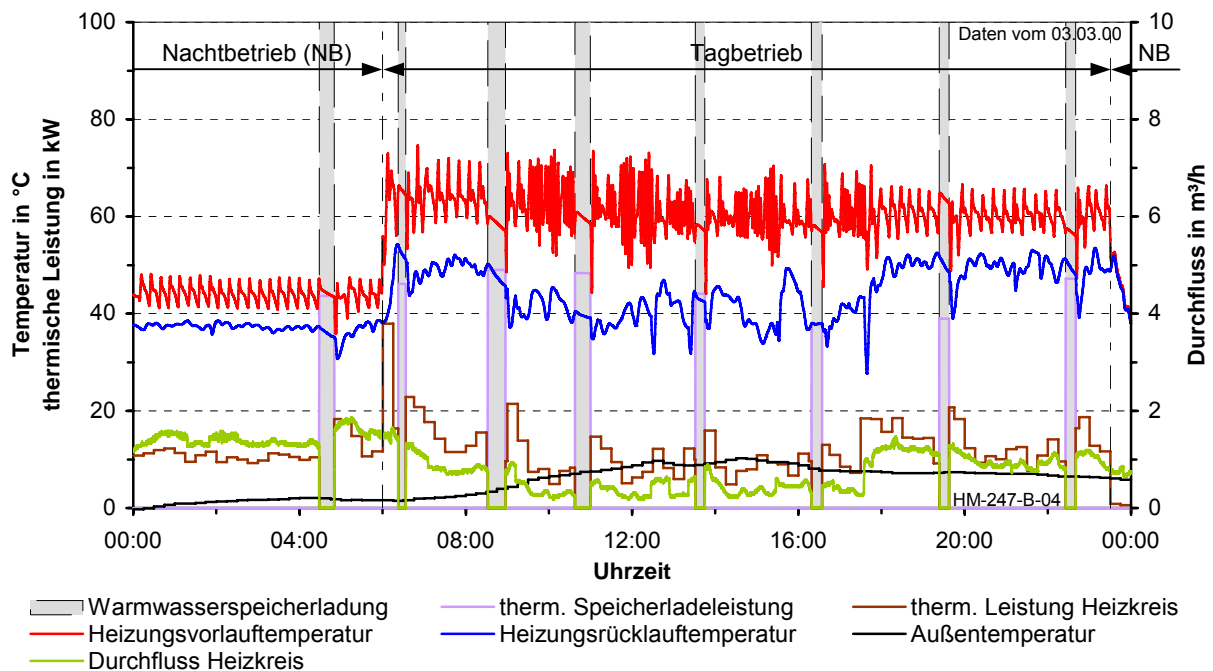


Abbildung 3-7: Temperatur-, Durchfluss- und thermischer Leistungsverlauf am Beispiel des Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997) im Mehrfamilienhaus MO 6

Während des weiteren Tagbetriebs ist die Vorlauftemperatur zum größten Teil nur von der Außentemperatur abhängig. Der sprunghafte Anstieg des Heizkreisdurchflusses um 17:30 Uhr geht auf einen Nutzereingriff durch manuelles Öffnen eines oder mehrerer Thermostatventile zurück. Das in den Heizkörpern befindliche, auf Raumtemperatur ausgekühlte Heizungswasser bedingt einen kurzzeitigen Einbruch der Heizungsrücklauftemperatur auf unter 30 °C. Um 23:30 Uhr geht der Kessel vom Tag- in den Nachtbetrieb über, was wiederum ein Absinken der Vor- und Rücklauftemperatur zur Folge hat. Insgesamt kommt es an diesem Übergangstag wegen des kleinen Warmwasserspeicherinhalts von 500 Litern, der großen Warmwasserzapfmengen, des Zirkulationsbetriebs und der geringen Warmwasserspeichertemperaturen zu acht Warmwasserspeicherladungen. Schaltet nach Beendigung der Warmwasserspeicherladung die Heizungspumpe wieder ein, treten aufgrund der Stellzeit des in den Heizkreis eingebauten Drei-Wege-Mischers und der hohen Kesselwassertemperatur kurzfristig höhere Schwankungen der Heizungsvorlauftemperatur auf.

3.2.5 Einflussgrößen bei der Warmwasserspeicherladung

Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 zeigen die charakteristischen Parameter einer Warmwasserspeicherladung in Messobjekt MO 6 vom 3. März 2000 zwischen 8:20 Uhr und 9:05 Uhr. Sinkt die Warmwasserspeichertemperatur unter den hier eingestellten Wert von 50,5 °C, so geht der Wärmeerzeuger in den Warmwasserspeicherladebetrieb über.

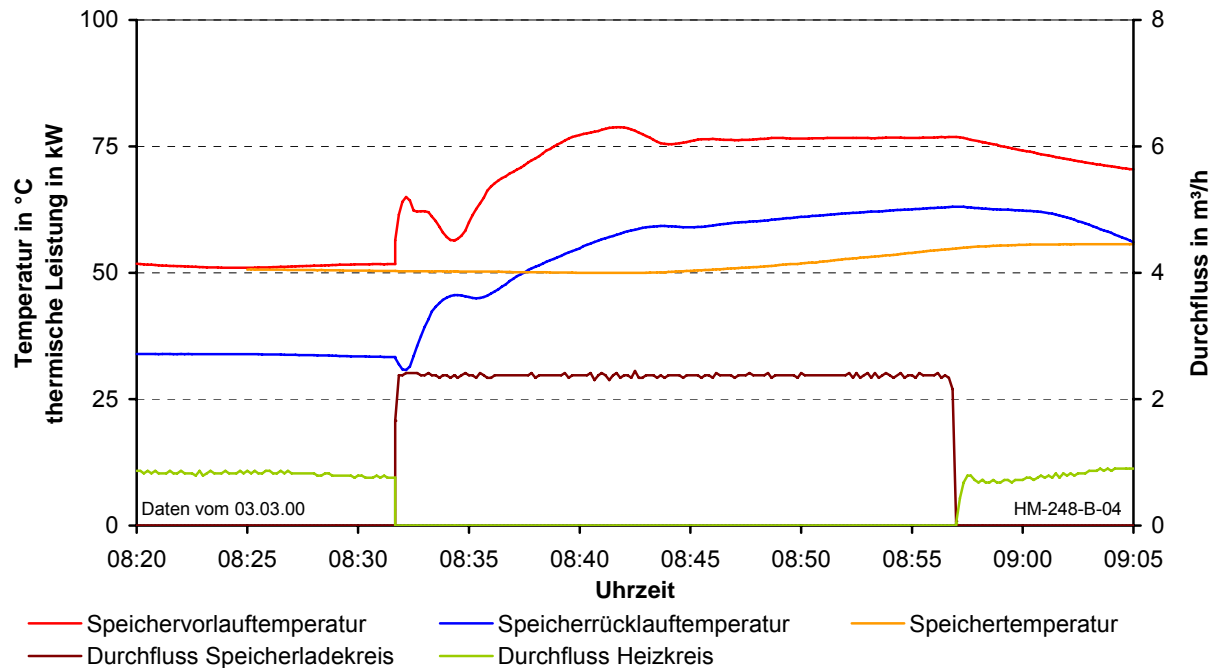


Abbildung 3-8: Temperatur- und Durchflussverlauf einer Warmwasserspeicherladung am Beispiel des in MO 6 eingebauten Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997)

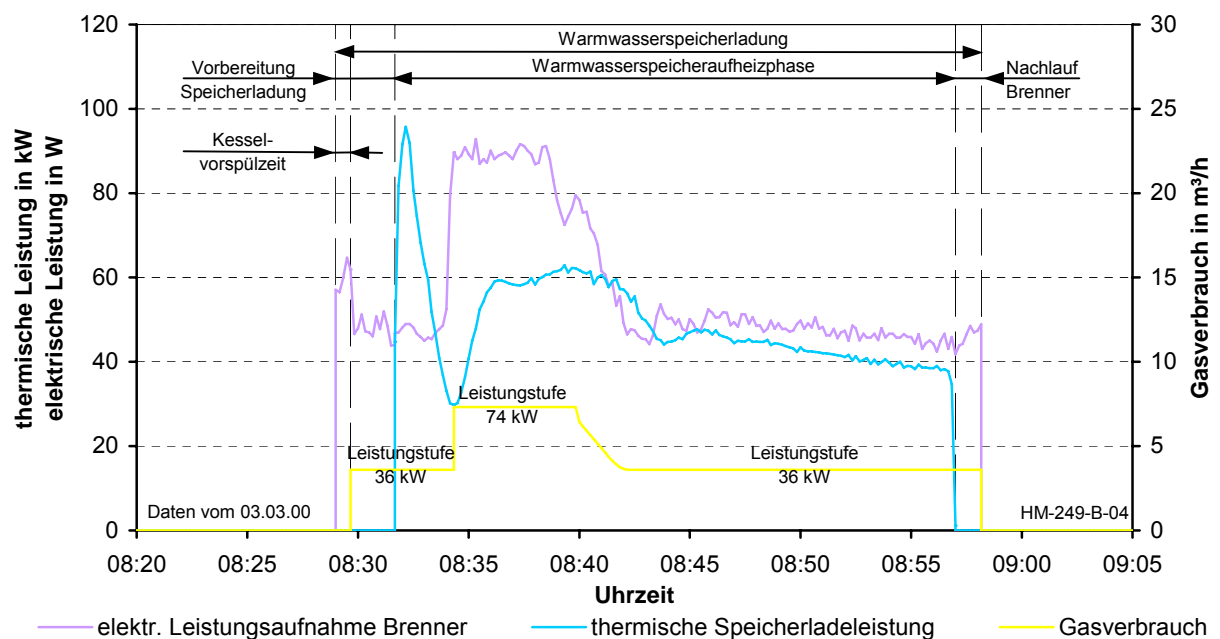


Abbildung 3-9: Leistungsverlauf und Gasverbrauch bei einer Warmwasserspeicherladung des in MO 6 eingebauten Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997)

Beim Brennerstart wird der Brennraum gespült, um noch darin verbliebene brennbare Gase aus dem Brennraum zu entfernen. Die Kesselvorspülzeit von knapp 40 Sekunden ist am zeitversetzten Anstieg der elektrischen Leistungsaufnahme des Brenners und des Gasverbrauchs zu erkennen. Wie der Verlauf des Gasverbrauchs zeigt, läuft der Brenner in den ersten vier Minuten mit 36 kW auf der niedrigsten Stufe, um eine längere Lebensdauer des Heizkessels zu erreichen. Zur schnellen Erwärmung des Kesselwassers und somit des Warmwasserspeichers schaltet der Brenner anschließend auf seine volle Leistung von 74 kW.

Ist eine regelungsintern festgelegte Kesselwassertemperatur überschritten, reduziert der Heizkessel seine Leistung, um längere Brennerlaufzeiten zu erzielen und ein häufiges Takten zu vermeiden. Zwei Minuten nach der Brennerzündung, wenn die Kesselwassertemperatur über der Warmwasserspeichertemperatur liegt, gibt die Heizungsregelung die Speicherladepumpe frei und der Heizungspumpenbetrieb wird unterbrochen. Die thermische Speicherladeleistung weist ein Maximum beim Start der Speicherladepumpe auf, da das Wasser in den Speicheranschlussleitungen ausgekühlt ist. Aufgrund der ansteigenden Warmwasserspeichertemperatur und der dadurch schlechteren Wärmeübertragung an den Wasserinhalt im Speicher sinkt die thermische Speicherladeleistung mit zunehmender Laufzeit ab. Ist die Soll-Warmwasserspeichertemperatur erreicht, schaltet die Heizungsregelung die Speicherladepumpe wieder ab. Ein Nachlaufen der Speicherladepumpe, wie es bei anderen Wärmeerzeugertypen üblich ist, findet hier nicht statt. Während der Aufheizphase des Warmwasserspeichers wird der Heizkreis nicht mit Wärme versorgt, sodass das Gebäude leicht auskühlt. In der Folge öffnen sich die Thermostatventile in den unterversorgten Räumen (siehe Abbildung 3-7), was einen Anstieg des Heizkreisdurchflusses nach der Warmwasserspeicherladung bewirkt. Der langsame Anstieg des Durchflusses im Heizkreis nach Beendigung der Warmwasserspeicherladung ist bei dieser Anlage auf die Drehzahlregelung der Heizungsumwälzpumpe zurückzuführen.

3.2.6 Ermittlung von Nutzungsgraden

Für den Vergleich der energetischen Effizienz von Wärmeerzeugern wird der Nutzungsgrad verwendet. Dieser beschreibt das Nutzen-Aufwand-Verhältnis von Energiemengen über ein bestimmtes Zeitintervall.

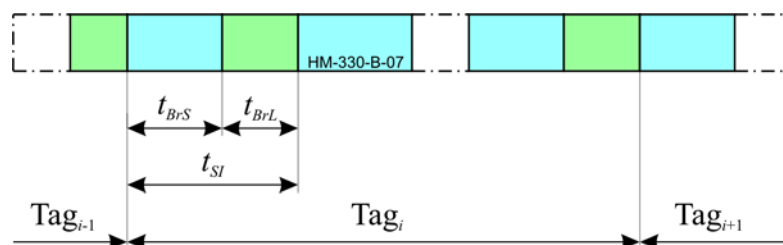


Abbildung 3-10: Brennerlauf- und -stillstandszeiten

Der kleinste Zeitraum zur Bestimmung des Nutzungsgrads ist ein einzelnes Schaltintervall mit der Dauer t_{SI} , wie in **Abbildung 3-10** dargestellt.

Die Berechnung der Kesselauslastung für einen bestimmten Zeitraum geschieht mit folgender Gleichung:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^a t_{BrL,i}}{\sum_{i=1}^a (t_{BrL,i} + t_{BrS,i})} \quad (3.3)$$

mit φ : Kesselauslastung
 a : Anzahl Taktungen
 t_{BrL} : Brennerlaufzeit in h
 t_{BrS} : Brennerstillstandszeit in h

Bei der Berechnung des Nutzungsgrads ist zu beachten, dass die Rahmenbedingungen am Bilanzbeginn und -ende gleich sind. Ist dies der Fall, oder wird über einen sehr langen Zeitraum bilanziert, kann zur Bestimmung des Nutzungsgrads die Gleichung 3.2 verwendet werden. Erfolgt die Berechnung allerdings für einen kürzeren Betrachtungszeitraum, wie zum Beispiel für einen Tag, so gilt nachstehende Formel:

$$\eta_{T,i,korr} = \frac{Q_{H,i} + Q_{S,i} + \Delta Q_{WE,i} + \Delta Q_{WWS,i}}{Q_{BR,i}} \quad (3.4)$$

wobei $\Delta Q_{WE,i} = m_{WE,W} \cdot c_{p,W} \cdot (T_{WE,W,E,i} - T_{WE,W,E,i-1})$

$\Delta Q_{WWS,i} = m_{WWS,W} \cdot c_{p,W} \cdot (T_{WWS,W,E,i} - T_{WWS,W,E,i-1})$

mit $\eta_{T,i,korr}$: korrigierter Tagesnutzungsgrad
 Q_H : Wärmemenge Heizung in kWh/d
 Q_S : Wärmemenge Warmwasserspeicherladung in kWh/d
 ΔQ_{WE} : Differenz des Wärmeerzeugerenergieinhalts in kWh
 ΔQ_{WWS} : Differenz des Warmwasserspeicherenergieinhalts in kWh
 Q_{BR} : Brennstoffeinsatz in kWh/d
 $m_{WE,W}$: Kesselwasserinhalt in kg
 $m_{WWS,W}$: Warmwasserspeicherinhalt in kg
 $c_{p,W}$: spezifische Wärmekapazität von Wasser in kWh/(kg·K)
 $T_{WE,W,E}$: mittlere Kesselwassertemperatur am Ende des Tages in °C
 $T_{WWS,W,E}$: mittlere Temperatur WW-Speicherinhalt am Ende des Tages in °C
 i : Tagnummer

Zusätzlich zum Brennstoffbedarf und zur abgegebenen Wärmemenge in den Heizkreis und Warmwasserspeicher wird hier noch der Wärmeerzeugerenergieinhalt zu Beginn und am Ende des Bilanzzeitraums berücksichtigt. Speziell bei Heizkesseln mit einem großen Kesselwasserinhalt ist es notwendig, diesen Bilanzposten zu beachten. Einen bedeutenderen Einfluss stellt bei Wärmeerzeugern mit integriertem oder aufgesetztem Warmwasserspeicher wegen

des meist größeren Wasservolumens die Differenz des Warmwasserspeicherenergieinhalts am Anfang und Ende des Betrachtungszeitraums dar. Sie muss bei diesen Kesselbauformen mit- einbezogen werden. **Abbildung 3-11** verdeutlicht den Unterschied bei der Nutzungsgradbe- rechnung mit und ohne Einbeziehung von internen Aufheizvorgängen mittels Gleichung 3.2 und Gleichung 3.4.

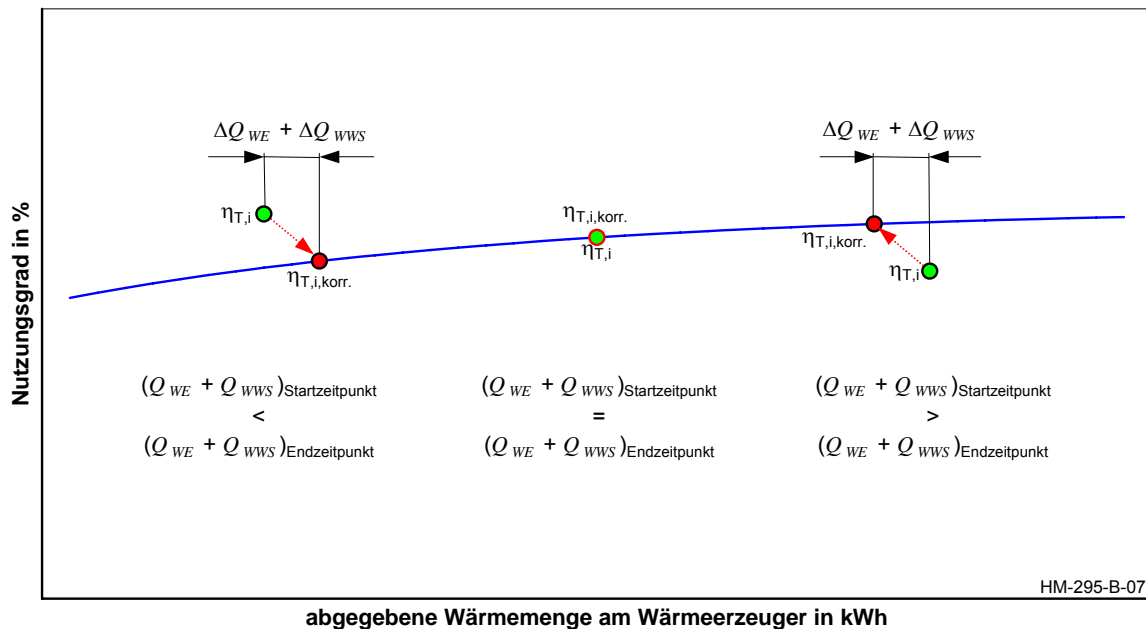


Abbildung 3-11: Bestimmung des Tagesnutzungsgrads mit und ohne Berücksichtigung von internen Aufheiz- und Entspeicherungsvorgängen

Der auslastungsabhängige Verlauf des Tagesnutzungsgrads des in Messobjekt MO 5 gemessenen atmosphärischen Gasheizkessels (Baujahr 1985) ist in **Abbildung 3-12** zu sehen. Der Wärmeerzeuger erreicht bei hoher Auslastung Tagesnutzungsgrade von rund 68 %. Im Sommerbetrieb liegen aufgrund der für dieses Gebäude kleinen Kesselleistung, des generell hohen Warmwasserbedarfs und der damit verbundenen relativ hohen Auslastung immerhin noch Werte von rund 61 % vor. Gemessen am heutigen technischen Standard ergibt sich jedoch ein sehr unbefriedigender Nutzungsgradverlauf.

Die Auswertung der Untersuchungen in Messkampagne 1 liefert Aussagen zu

- Schalthäufigkeiten,
- Kesselauslastung,
- Brennerlauf- und Brennerstillstandszeiten,
- Jahresnutzungsgraden und
- tagtypischen Nutzungsgraden

und damit Hinweise für praxistypisches Verhalten sowie real auftretende Kennwerte der Energieeffizienz von Wärmeerzeugern.

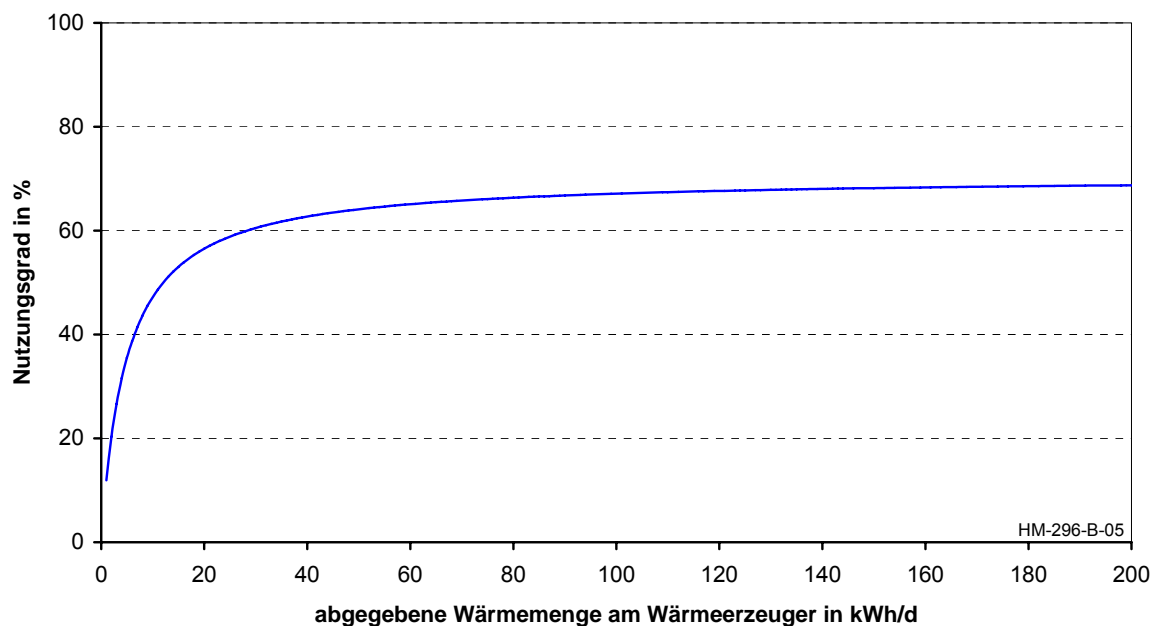


Abbildung 3-12: Nutzungsgradverlauf des messtechnisch untersuchten atmosphärischen Gasheizkessels (Baujahr 1985) in Messobjekt MO 5

3.2.7 Energieflussdiagramme

In **Abbildung 3-13** sind beispielhaft die Energieflussbilder für die Raumwärme- und Warmwasserversorgung des Reihenhauses MO 2 und des Mehrfamilienhauses MO 6 veranschaulicht. Darin ist die Nutzungsgradkette vom Primärenergieeinsatz bis zur Nutzenergie dargestellt, wobei die Werte auf die Nutzenergiemenge der jeweiligen Nutzungsgradkette bezogen sind. Die primärenergetischen Bereitstellungs-nutzungsgrade für die Endenergieträger „Heizöl extra leicht“, Erdgas und Strom wurden der Studie /FfE 01/ entnommen. Die größten Verluste von 41,3 % bei MO 2 treten bei der Wärmeerzeugung auf, gefolgt von der Endenergiebereitstellung mit 16,5 % und den Warmwasserspeicher- und Warmwasserverteilungsverlusten mit 9,4 %. Das Verhältnis zwischen der Nutzenergie für die Raumwärme und der Nutzenergie für das Warmwasser von 92,5 % zu 7,5 % ist für den Gebäudestandard als typisch anzusehen. Im Vergleich dazu entstehen bei MO 6 mit 14,4 % die größten Verluste bei der Erdgasbereitstellung, gefolgt von der Warmwasserspeicherung und -verteilung mit 12,2 % und der Wärmeerzeugung mit 8,5 %. In diesem Messobjekt ist sehr gut erkennbar, dass dem Energieverbrauch zur Warmwasserbereitung durch den besseren Wärmedämmstandard und den damit verbundenen geringeren Heizenergieverbrauch immer größere Bedeutung zukommt. Der Wärmege-winn aus den Verlusten bei der Warmwasserverteilung in der Heizperiode wurde hier nicht berücksichtigt.

Fasst man die Ergebnisse der Messkampagne 1 zusammen, so weist nur eine der sechs untersuchten Heizungsanlagen einen insgesamt zufriedenstellenden Betrieb auf. Die größte Schwachstelle liegt in der meist nicht an die Bedürfnisse der Bewohner angepassten Heizungsregelung.

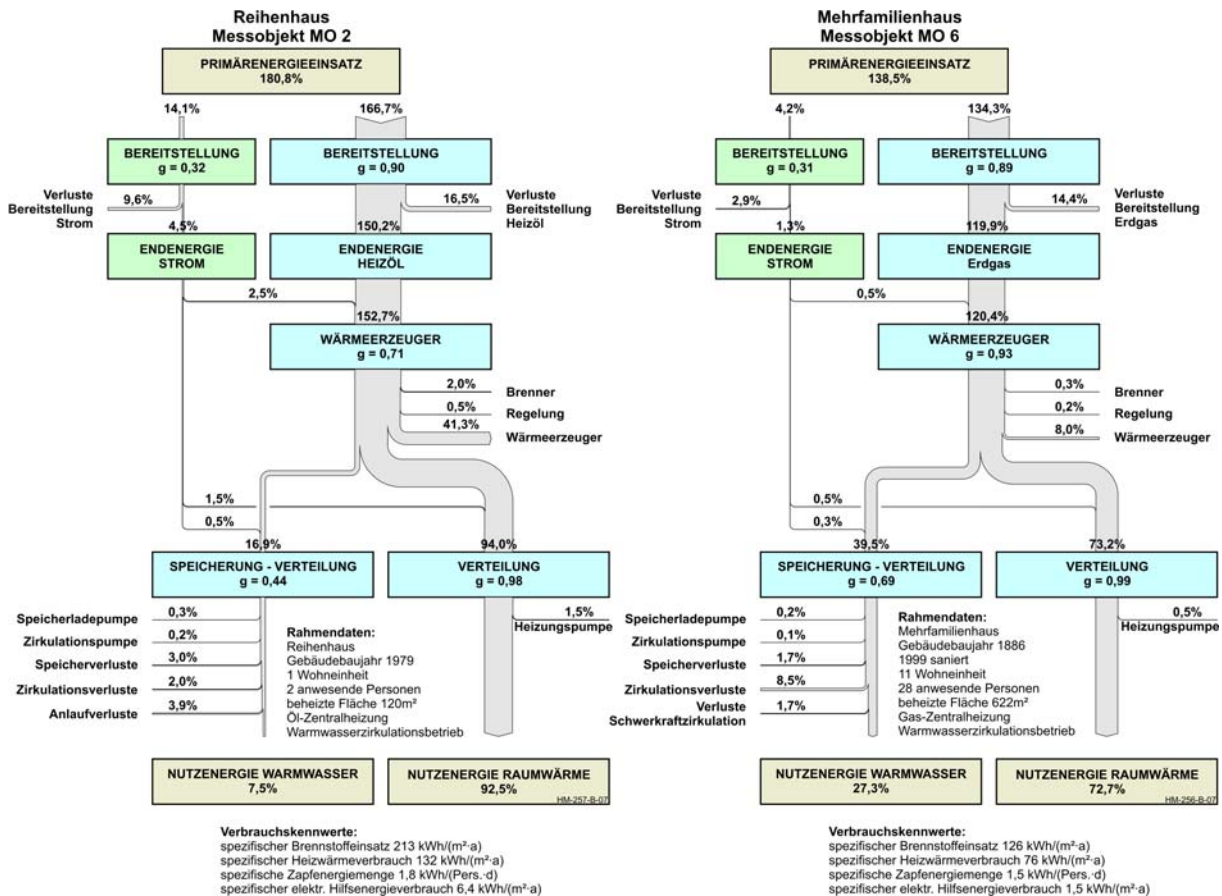


Abbildung 3-13: Energieflussbild des untersuchten Reihenhauses MO 2 und des Mehrfamilienhauses MO 6

3.3 Warmwasserversorgungssysteme

Heute stehen zur zentralen Warmwasserbereitung die unterschiedlichsten Versorgungssysteme zur Verfügung. Diese bieten bei diversen Einsatzmöglichkeiten sowohl Vor-, als auch Nachteile, die aber aufgrund fehlender oder falscher Informationsvermittlung kaum transparent sind. Welche energetische Qualität die Warmwasserbereitung hat, ist meist nicht bekannt, da genaue Kenntnisse über das Betriebsverhalten des Gesamtsystems fehlen. In diesem Abschnitt werden daher die Ergebnisse der in der Messkampagne 2 durchgeführten messtechnischen Untersuchungen von 16 Warmwasserversorgungssystemen dargestellt und analysiert.

Einen Überblick über die Vor-Ort-Objekte gibt **Tabelle 3-3**. Bei der messtechnischen Untersuchung wurde ein besonderes Augenmerk auf die zeitgleiche Erfassung der Warmwasserzapfmengen, der zeitlichen Bedarfsgänge und der Temperaturniveaus gelegt. Dadurch ist es möglich, den Zapfenergiebedarf und die Warmwasserverteilungsverluste (Anlauf-, Leitungs- und Zirkulationsverluste) zu bestimmen. Abbildung 3-1 zeigt die zur Beurteilung von Warmwassererzeugern und Warmwasserverteilsystemen festgelegten Bilanzgrenzen (B5, B6, B8) und Energieflüsse.

Um die spezifischen Verbrauchskennwerte und Verluste für die Dauer der Messreihe ausweisen zu können, wurde die Anzahl der anwesenden Personen miterfasst. Bei den verschiedenen Messobjekten handelte es sich ausschließlich um Gebäude mit zentraler Warmwasserbereitung, bei denen heizöl- oder erdgasbefeuerte Wärmeerzeuger das benötigte Trinkwarmwasser zur Verfügung stellten. Die einzige Ausnahme bildete hier der in Messobjekt MO 2 zentral installierte Elektrowarmwasserspeicher mit einem Wasserinhalt von 80 l. Um den Einfluss verschiedener Versorgungsvarianten quantifizieren und berücksichtigen zu können, fanden Untersuchungen sowohl an Messobjekten mit Stichelungsbetrieb (Messobjekte MO 1 bis MO 4) als auch mit Zirkulationsbetrieb (Messobjekte MO 5 bis MO 16) statt. Die zur Ermittlung der einzelnen Verlustarten benötigten Leitungslängen des Warmwasserverteilsystems wurden, wenn nicht aus Installationsplänen des Installateurs bekannt, über Laufzeitmessungen bestimmt. Die Leitungslängen fielen dabei je nach Versorgungsvariante und Gebäudetyp unterschiedlich aus und betragen bei den untersuchten Messobjekten zwischen 6,0 m und 117,7 m.

Tabelle 3-3: Übersicht über die messtechnisch untersuchten Warmwasserversorgungssysteme

Bezeichnung	Einheit	Messobjekt							
		MO 1	MO 2	MO 3	MO 4	MO 5	MO 6	MO 7	MO 8
Gebäudetyp	–	ZFH	ZFH	EFH	EFH	EFH	ZFH	RH	EFH
Gebäudebaujahr	–	1970	1970	1995	1996	1963	1974	1979	1989
Haushalte	Anz.	1	1	1	1	1	1	1	1
anw. Personen	Pers.	1,86	1,86	1,86	4	3	2	2	4
WW-Versorgung	–	zentral							
Betriebsweise	–	Stichelungsbetrieb				Zirkulationsbetrieb			
Energieträger	–	Heizöl	Strom	Erdgas	Erdgas	Heizöl	Heizöl	Heizöl	Heizöl
WW-Speichergröße	l	150	150	80	300	150	100	140	190
Leitungslänge	m	12,0	12,0	6,6	6,0	19,1	6,4	17,2	57,4

Bezeichnung	Einheit	Messobjekt							
		MO 9	MO 10	MO 11	MO 12	MO 13	MO 14	MO 15	MO 16
Gebäudetyp	–	ZFH	EFH	MFH	MFH	MFH	MFH	MFH	MFH
Gebäudebaujahr	–	1995	1999	1963	1965	1970	1993	1898/1997	1886/1999
Haushalte	Anz.	2	1	4	4	11	6	7	11
anw. Personen	Pers.	2	2	7	7	23	7	14	28
WW-Versorgung	–	zentral							
Betriebsweise	–	Zirkulationsbetrieb							
Energieträger	–	Heizöl	Heizöl	Heizöl	Heizöl	Heizöl	Heizöl	Erdgas	Erdgas
WW-Speichergröße	l	400	135	300	200	250	1000	500	500
Leitungslänge	m	20,0	10,1	75,4	42,7	88,2	117,7	45,4	87,5

3.3.1 Kennwerte der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme

Die aus den Messungen ermittelten Kennwerte der einzelnen Warmwasserversorgungssysteme sind in **Tabelle 3-4** vergleichend zusammengestellt.

Tabelle 3-4: Kennwerte der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme (Mittelwerte über den Messzeitraum)

Kennwert	Einheit	Messobjekt							
		MO 1	MO 2	MO 3	MO 4	MO 5	MO 6	MO 7	MO 8
mittlere WW-Speichertemperatur	°C	64,4	56,7	63,2	52,7	56,0	67,9	52,3	65,8
spez. Zapfmenge ¹	l/(Pers.·d)	30,2	22,4	38,1	61,5	33,8	50,4	56,4	42,5
Zapfenergiemenge ¹	kWh/d	1,8	1,4	2,3	8,0	3,3	3,3	3,7	5,5
Zapfanlaufverluste	kWh/d	2,0	1,6	1,2	0,9	0 ²	0 ³	1,2	5,7
spez. Zapfenergiemenge ¹	kWh/(Pers.·d)	1,0	0,7	1,2	2,0	1,1	1,6	1,8	1,4
Zapfhäufigkeit	Anz./(Pers.·d)	6,6	6,5	11,5	5,4	3,5	9,2	11,6	9,7
mittlere Zapfzeit	min/Zapfung	1,0	1,2	0,7	1,3	0,8	0,8	3,3	0,9
mittlerer Durchfluss Zirkulationskreis	l/h	–	–	–	–	122	82	251	489
Zirkulationsdauer	h./d	–	–	–	–	21,5	24,0	4,6	1,3
ΔT_{Zirk} ⁴	°C	–	–	–	–	1,5	0,6	0,7	1,8
Zirkulationsstarts	Anz./d	–	–	–	–	1,0	0 ³	2,3	3,3
Zirkulationsverluste	kWh/d	–	–	–	–	4,5	1,4	0,9	1,3
Zirkulationsanlaufverluste	kWh/d	–	–	–	–	0,4	0 ³	0,6	7,0
Zirkulationsverlustleistung	kW	–	–	–	–	0,2	0,1	0,2	1,0
spez. Zirkulationsverlustleistung	W/m	–	–	–	–	10,9	9,3	11,6	17,7
Leistungsaufnahme Zirkulationspumpe	W	–	–	–	–	23	23	28	20

Kennwert	Einheit	Messobjekt							
		MO 9	MO 10	MO 11	MO 12	MO 13	MO 14	MO 15	MO 16
mittlere WW-Speichertemperatur	°C	58,6	51,2	60,0	58,5	60,4	55,8	51,3	53,0
spez. Zapfmenge ¹	l/(Pers.·d)	116,6	53,9	79,9	63,6	92,7	92,2	53,9	44,4
Zapfenergiemenge ¹	kWh/d	7,6	3,5	18,2	14,5	69,4	21,0	24,5	40,5
Zapfanlaufverluste	kWh/d	1,2	0,1	2,5	2,5	0 ³	2,3	0 ³	0 ⁵
spez. Zapfenergiemenge ¹	kWh/(Pers.·d)	3,8	1,8	2,6	2,1	3,0	3,0	1,8	1,4
Zapfhäufigkeit	Anz./(Pers.·d)	10,7	8,6	11,5	11,0	7,3	10,4	6,8	5,1
mittlere Zapfzeit	min/Zapfung	1,1	0,6	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	2,0
mittlerer Durchfluss Zirkulationskreis	l/h	189	283	485	242	1215	224	213	425
Zirkulationsdauer	h./d	3,7	12,9	9,0	7,0	24,0	16,0	24,0	17,0
ΔT_{Zirk} ⁴	°C	1,8	0,2	4,4	4,5	3,3	5,2	1,6	1,8
Zirkulationsstarts	Anz./d	2,0	2,0	2,0	2,0	0 ³	1,0	0 ³	1,0 ⁵
Zirkulationsverluste	kWh/d	1,5	0,8	22,4	8,9	111,0	21,7	9,7	18,2 ⁶
Zirkulationsanlaufverluste	kWh/d	0,5	0,2	3,8	1,7	0 ³	1,9	0 ³	0 ⁵
Zirkulationsverlustleistung	kW	0,4	0,1	2,5	1,3	4,6	1,4	0,4	0,9
spez. Zirkulationsverlustleistung	W/m	19,7	6,3	33,1	29,6	52,5	11,5	8,9	10,2
Leistungsaufnahme Zirkulationspumpe	W	20	24	20	20	35	25	46	24

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

² keine Zapfvorgänge außerhalb der Zirkulationszeiten

³ durchgehender Zirkulationsbetrieb

⁴ Temperaturdifferenz zwischen Warmwasserleitungsaustritt und Zirkulationsleitungseintritt am Warmwasserspeicher

⁵ Schwerkraftzirkulation während der Stillstandszeit der Zirkulationspumpe

⁶ inklusive 2,9 kWh/d Schwerkraftzirkulationsverluste

Bei diesen Messobjekten wurden die nach Arbeitsblatt W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ geforderten Austrittstemperaturen am Warmwasserspeicher von 60 °C nur in zwei der sechs Mehrfamilienhäuser eingehalten. Die mittleren Warmwasserspeichertemperaturen der untersuchten Versorgungsmöglichkeiten lagen zwischen 51,2 °C und 67,9 °C. In den einzelnen Objekten war eine durchschnittliche Zapfmenge, bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C, von 63,5 l/(Pers.·d) messbar. Die Bandbreite in den untersuchten Gebäuden reichte von 22,4 l/(Pers.·d) bis 116,6 l/(Pers.·d).

Der Bedarf an Trinkwarmwasser ist nicht nur von den anwesenden Personen abhängig; Einflüsse von Wohnungsgröße, Alter, Beruf, Gewohnheiten und Lebensstandard der Bewohner sind zu unterstellen. **Abbildung 3-14** zeigt detailliert die spezifische Zapfenergie sowie die beim Betrieb von Warmwasserversorgungsanlagen entstehenden Verlustarten. Bei Zapfhäufigkeiten zwischen 3,5 Zapfungen/(Pers.·d) und 11,6 Zapfungen/(Pers.·d) variiert die spezifische Zapfenergiemenge zwischen 0,7 kWh/(Pers.·d) und 3,8 kWh/(Pers.·d).

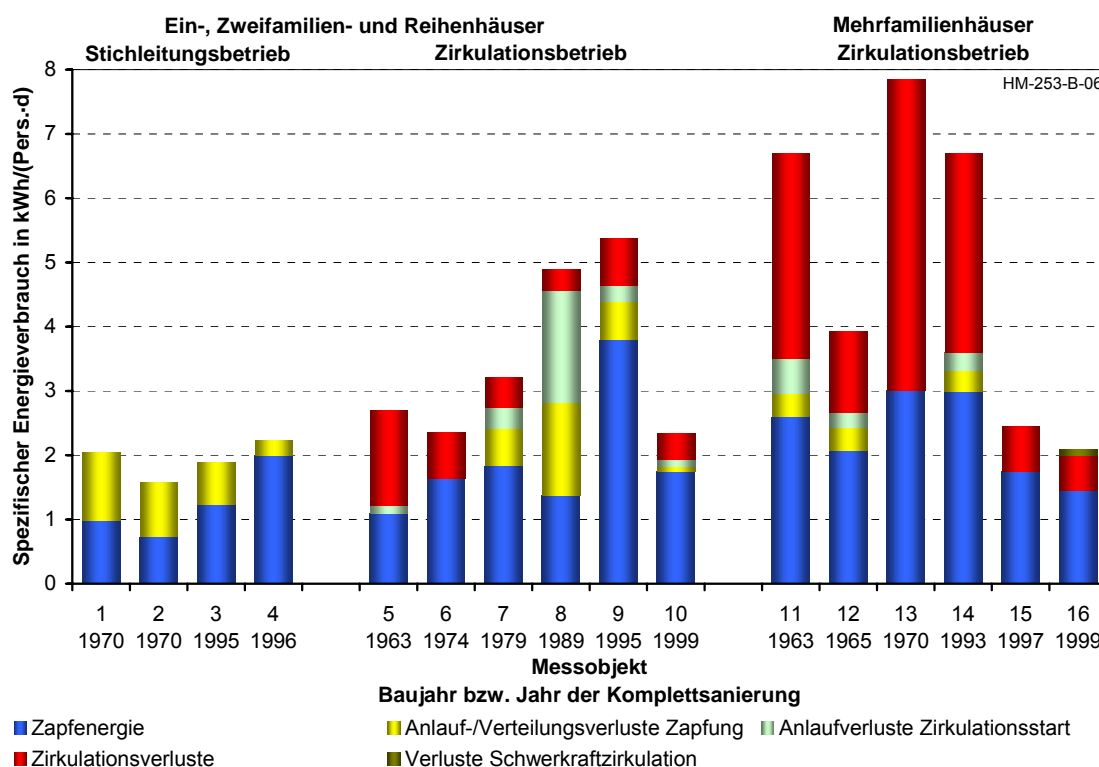


Abbildung 3-14: Spez. Zapfenergieverbrauch, Anlauf-, Verteilungs- und Zirkulationsverluste für die messtechnisch untersuchten Gebäude in der Messkampagne 2

In **Abbildung 3-15** werden die Warmwasserversorgungen der untersuchten Gebäude der Messkampagne 2 bilanziert. Die Ergebnisse sind unterteilt nach Ein-, Zweifamilien- und Reihen- sowie Mehrfamilienhäusern und zusätzlich nach dem Anlagenbau- beziehungsweise Sanierungsjahr geordnet. Die Darstellung verdeutlicht die Aufteilung der Zapfenergie und der einzelnen Verlustarten für die messtechnisch untersuchten Gebäude und zeigt darüber hinaus

auf, wie lange die Zirkulationspumpe – soweit vorhanden – in den verschiedenen Objekten während eines Tages in Betrieb war. Die ausgewiesenen Verluste gliedern sich in die Anlauf- und Leitungsverluste während des Zapfvorgangs, die Anlaufverluste beim Start der Zirkulationspumpe und die Zirkulationsverluste beim Betrieb einer Zirkulationspumpe.

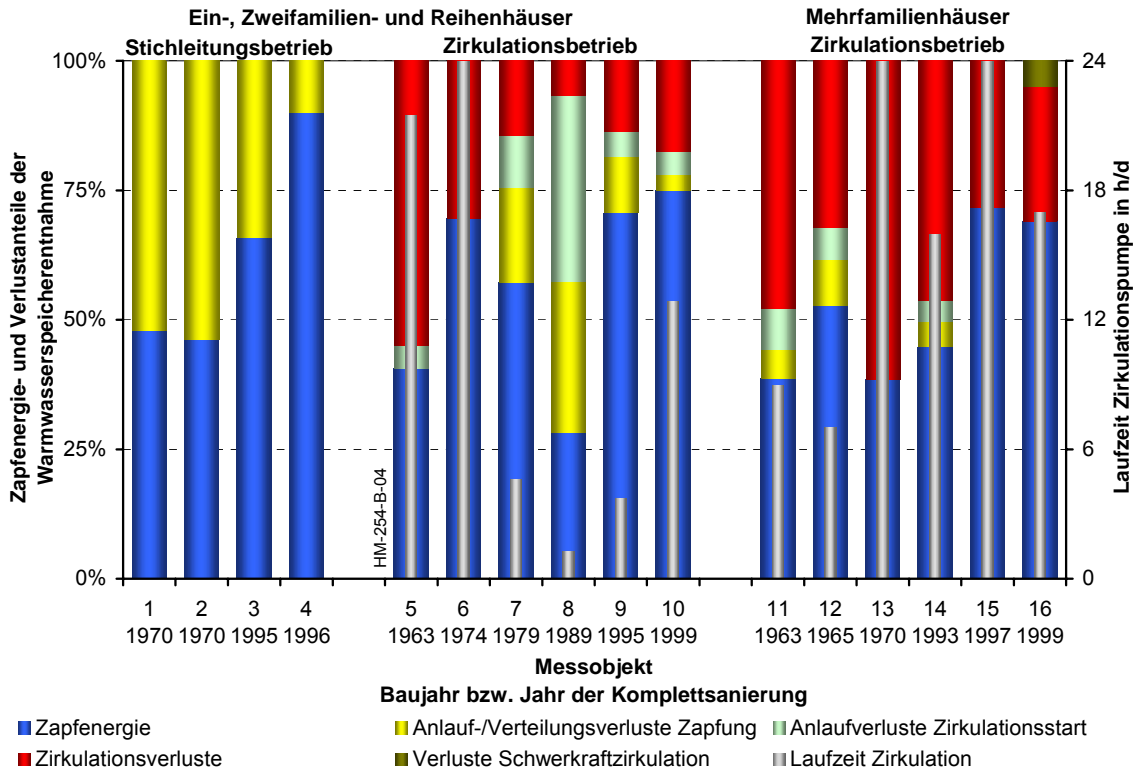


Abbildung 3-15: Aufteilung der ins Warmwasserverteilsystem eingespeisten Wärmemenge in Zapfenergie und die verschiedenen Verlustarten

Treten Zapfvorgänge nur innerhalb der Betriebszeiten der Zirkulationspumpe auf, wie dies bei den Messobjekten MO 6, MO 13 und MO 15 der Fall ist, so können die Anlaufverluste unter der Voraussetzung, dass die Stichleitung bis zur Zapfstelle sehr kurz ist, vernachlässigt werden. Der Zapfenergieanteil steigt mit dem Baujahr der Anlagen an, wodurch die Verluste abnehmen. Nur Messobjekt MO 8 weicht von dieser Regel ab. Trotz des relativ geringen Alters des Gebäudes beträgt der Zapfenergieanteil, bezogen auf die Wärmeentnahmemenge aus dem Warmwasserspeicher, nur rund 30 %. Der Grund dafür liegt in einer sehr hohen Warmwasserspeichertemperatur, einer mangelhaften Dämmung des Warmwasserverteilsystems, häufigen Zirkulationsstarts und einem Betrieb der Zirkulationspumpe zu Zeiten der geringsten Zapfhäufigkeit.

Bei den Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäusern ist zu erkennen, dass das Verhältnis zwischen Zapfenergie und den Zirkulationsverlusten sehr stark von den Betriebsstunden der Zirkulationspumpe abhängig ist. Wird die Zirkulationspumpe fast während des ganzen Tages betrieben, können die Zirkulationsverluste wie im Messobjekt MO 5 rund 60 % und mehr betragen.

Eine Ausnahme stellt Messobjekt MO 6 dar, da dort die Leitungslängen sehr kurz sind. Lläuft die Zirkulationspumpe nur zu Zeiten mit häufigen Warmwasserzapfungen, sinken wie in den Messobjekten MO 9 und MO 10 die Zirkulationsverluste. Dieser Trend hängt mit der unterschiedlichen Dämmung des Warmwasserverteilsystems in den untersuchten Gebäuden, den verschiedenen Haushaltsgrößen und der Betriebsweise der Zirkulationspumpe zusammen und ist auf die Mehrfamilienhäuser nicht übertragbar. Dabei darf die Zirkulationspumpe laut Arbeitsblatt W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ wegen der Legionellengefahr nicht länger als acht Stunden pro Tag abgeschaltet werden, was zu unvermeidbaren Verlusten führt. Bei den Messobjekten MO 11 und MO 12 hätte dies eine Verlängerung der Betriebszeiten der Zirkulationspumpe auf minimal 16 h/d zur Folge.

In den Betriebspausen der Zirkulationspumpe in Messobjekt MO 16 treten zudem Verluste durch Schwerkraftzirkulation von 2,9 kWh/d auf. Der Volumenstrom nach Abschaltung der Zirkulationspumpe sinkt hier nicht auf Null ab, sondern pendelt sich abhängig von der Warmwasserspeichertemperatur, der Temperatur des Wasserinhalts der Rohrleitungen sowie der Zapfhäufigkeit und -dauer auf einen Wert von rund 40 l/h ein. Gründe dafür sind das Fehlen einer Schwerkraftbremse im Zirkulationskreis sowie die großen Warmwasser- und Zirkulationsleitungsquerschnitte.

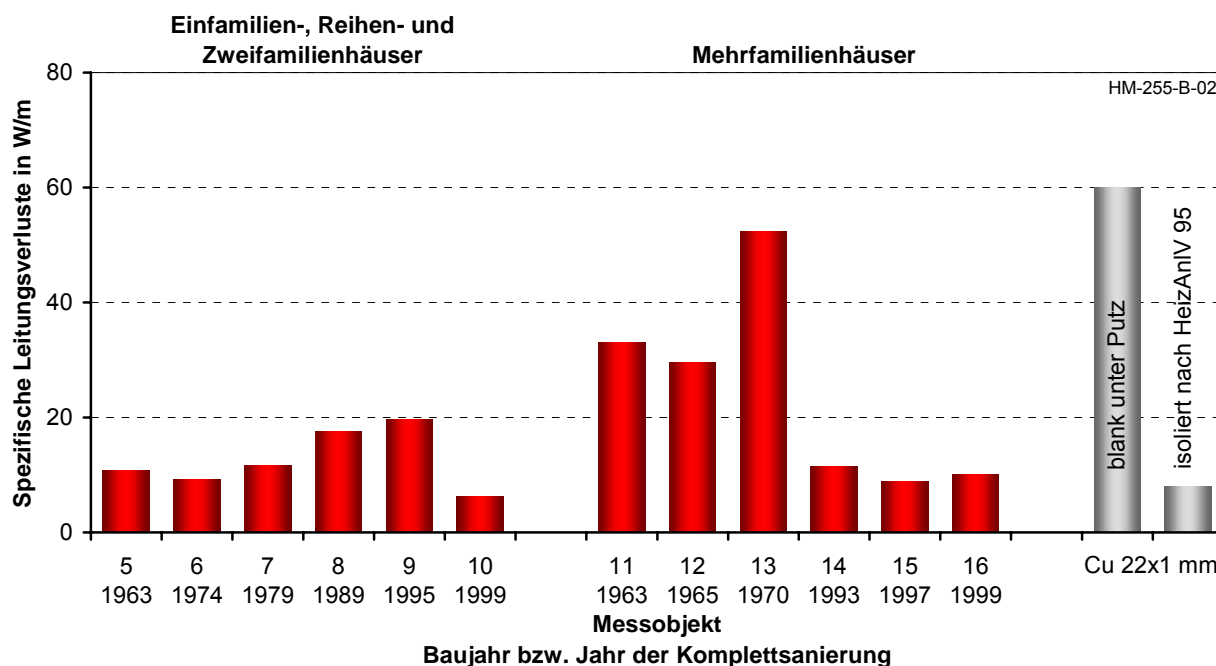


Abbildung 3-16: Spezifische Leitungsverluste des Warmwasserverteilsystems der untersuchten Messobjekte (MO 5 – MO 16) mit Zirkulationsbetrieb

Bei Gebäuden, deren Warmwasserverteilsystem aus einer Warmwasser- und Zirkulationsleitung bestand, waren mit Hilfe der messtechnischen Untersuchungen die spezifischen Zirkulationsverluste bestimmbar, wie Tabelle 3-4 zeigt. Berücksichtigung fanden dabei nur die Verteilungsverluste im quasistationären Betrieb. **Abbildung 3-16** soll dies verdeutlichen. Die

Verluste, die wegen des Anlaufvorgangs beim Start der Zirkulationspumpe entstehen, werden separat ausgewiesen. Die geringsten Verluste der untersuchten Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäuser weist mit 6,3 W/m Messobjekt MO 10 auf, was angesichts seines Baujahrs und der sehr guten Bauausführung zu erwarten war. Erklärbar sind die – für das Gebäudebaujahr relativ geringen – Leitungsverluste in den Messobjekten MO 5 bis MO 7 mit der Tatsache, dass sämtliche Aufputzleitungen des Warmwasserverteilsystems nachträglich mit hochwertigem Material gedämmt wurden. Die im Vergleich dazu großen Verluste in den Messobjekten MO 8 und MO 9 sind auf die sehr hohe mittlere Warmwasserspeichertemperatur (MO 9) und die mangelhafte Dämmung zurückzuführen.

Bei den untersuchten Mehrfamilienhäusern ist die Abhängigkeit der Verluste vom Baujahr erkennbar. Lediglich Messobjekt MO 13 mit Verlusten von 52,5 W/m entspricht nicht dem Standard. Die Ursache für die sehr hohen Verluste liegt in der unzureichenden und teilweise gänzlich fehlenden Isolierung der Rohrleitungen in den Verteilschächten und Aufputzleitungen.

Abbildung 3-16 gibt damit Richtwerte für Rohrleitungsverluste für die beiden Gebäudearten

- Einfamilienhäuser und
- Mehrfamilienhäuser

vor.

Um die einzelnen Zirkulationsverluste besser einordnen zu können, sei an dieser Stelle betont, dass ein Kupferrohr mit einem Durchmesser von 22 mm blank unter Putz bei einer Warmwassertemperatur im Leitungstück von 60 °C Oberflächenverluste von rund 60 W/m aufweist. Ein nach /HeizAnIV/ isoliertes Rohr verursacht im Gegensatz dazu lediglich Verluste von rund 8 W/m.

3.3.2 Warmwasserbedarf, Einfluss von Gebäude- und Versorgungsart

In Gebäuden mit Stichleitungsbetrieb ist die für die Zapfung aus dem Warmwasserspeicher entnommene Energiemenge ausschließlich durch das verbrauchsspezifische Verhalten der Bewohner, die Güte der Warmwasserinstallation und die Warmwasserspeichertemperatur bedingt. Wird jedoch eine Zirkulationspumpe verwendet, so kommt zum verbrauchsspezifischen Anteil noch ein betriebsbedingter Anteil hinzu, der bei Mehrfamilienhäusern angesichts des meist größeren Warmwasserversorgungssystems höher ist als bei Einfamilienhäusern mit Zirkulationsbetrieb.

Obwohl die Zapfenergiemenge bei Gebäuden mit Zirkulationsleitungsbetrieb tendenziell über solchen mit Stichleitungsbetrieb liegt, sind die entnommenen Energiemengen aus dem Warmwasserspeicher ähnlich. Dies hängt damit zusammen, dass bei Zirkulationsbetrieb die Anlaufverluste geringer ausfallen und die Rohrleitungsverluste bis zur Zapfstellenstichleitung in den Zirkulationsverlusten mitberücksichtigt werden.

Abbildung 3-17 zeigt die mittlere Warmwasserspeicherenergieentnahme und deren Abweichung vom Mittelwert für die einzelnen untersuchten Gebäudetypen und die verschiedenen Warmwasserversorgungsvarianten in Abhängigkeit von der Anzahl der anwesenden Personen.

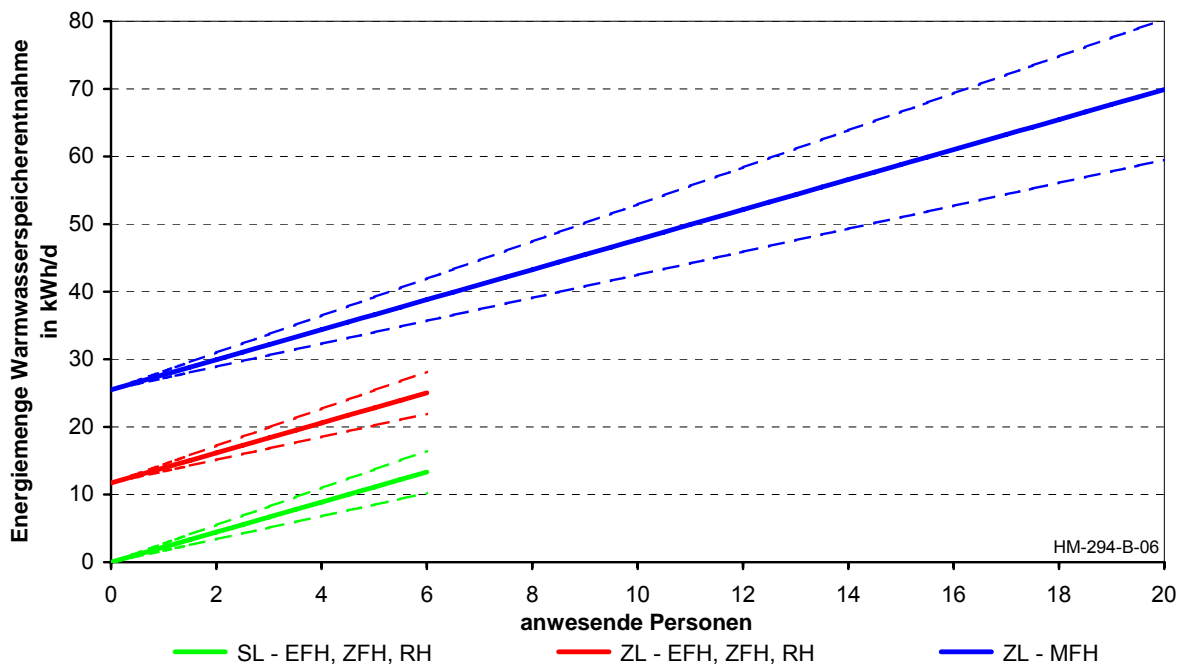


Abbildung 3-17: Energieentnahme am Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Personenanzahl, der Gebäudeart und der Warmwasserversorgungsvariante

Aus den messtechnischen Untersuchungen konnte folgender Zusammenhang abgeleitet werden:

$$Q_{WWS} = z + b \cdot a_{Pers} \quad (3.5)$$

wobei $z = f(l, u, t_{Zirk}, T_{WWS})$: betriebs- und installationsbedingter Anteil in kWh/d

$b = 2,22 \pm 0,52$: verbrauchs- und installationsabhängiger Anteil in kWh/(Pers.·d)

mit Q_{WWS} : entnommene Wärmemenge am WW-Speicher in kWh/d

l : Zirkulationsleitungslänge in m

u : Rohrleitungsverluste in W/m

t_{Zirk} : Laufzeit Zirkulationspumpe in h

T_{WWS} : Warmwasserspeichertemperatur in °C

b : Faktor in Abhängigkeit vom Verbraucherverhalten in kWh/(Pers.·d)

a_{Pers} : anwesende Personen

Der Einfluss verschiedener betriebs- und installationsbedingter Anteile an den Grundverlusten bei Zirkulationsbetrieb ist in **Abbildung 3-18** zu sehen. Die aus dem Warmwasserspeicher entnommene spezifische Energiemenge sinkt dabei exponentiell mit der Personenanzahl. Bei

einer Verminderung der Zirkulationsdauer von 24 h/d auf 18 h/d kommt es zu einer Reduktion der Verluste um rund 25 %.

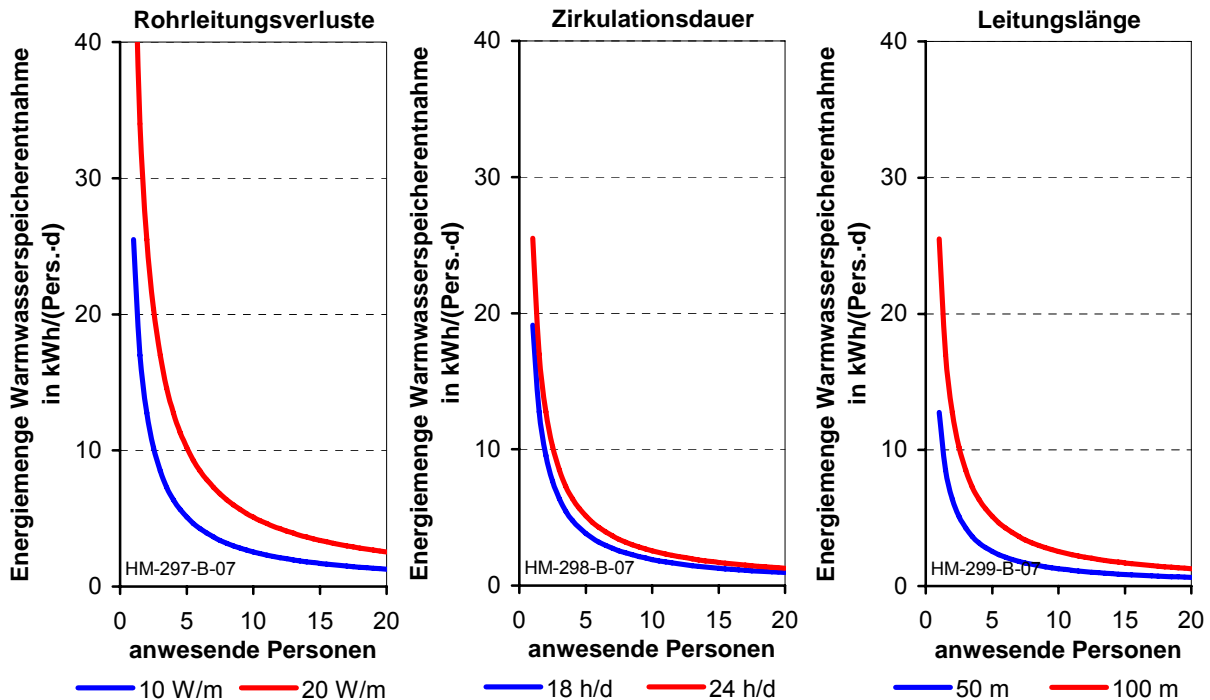


Abbildung 3-18: Betriebs- und installationsbedingter Anteil an der am Warmwasserspeicher entnommenen Energiemenge

Diese Betrachtungen liefern Verbrauchskennwerte zu

- Stichleitungsbetrieb,
- Zirkulationsbetrieb
- und Zapfenergiemengen,

die wichtig für die Beurteilung der beiden Komplexe von System und Verbraucher sind.

3.3.3 Tages- und jahreszeitliche Einflüsse auf den Warmwasserbedarf

Der Verlauf der mittleren monatlichen Zapfmenge pro Tagkategorie, unterteilt in Werk- und Wochenendtage, für das Messobjekt MO 16 im Jahr 2000 ist in **Abbildung 3-19** zu sehen. Sehr gut erkennbar ist die Abhängigkeit der Zapfmenge von der jeweiligen Jahreszeit und damit der Außentemperatur. Die Ursache dafür ist unter anderem in der sich jahreszeitlich ändernden Kaltwassertemperatur und dem unterschiedlichen saisonal abhängigen Nutzerverhalten zu finden. Die Schwankungsbreite liegt zwischen 800 l/d und 1400 l/d an Werktagen sowie zwischen 1300 l/d und 1800 l/d an Wochenenden. Um charakteristische, tagesabhängige Merkmale der einzelnen Nutzergruppen in den verschiedenen Gebäuden analysieren zu können, wurden die einzelnen Tagesverläufe eines Gebäudes miteinander verglichen und zu jahreszeitlich unterschiedlichen Verläufen zusammengefasst. Den mittleren Tagesgang der

Pro-Kopf-Zapfmenge für die Winter- und Sommerperiode, unterteilt in Werk- und Wochenendtag, zeigt beispielhaft **Abbildung 3-20** für das Messobjekt MO 16.

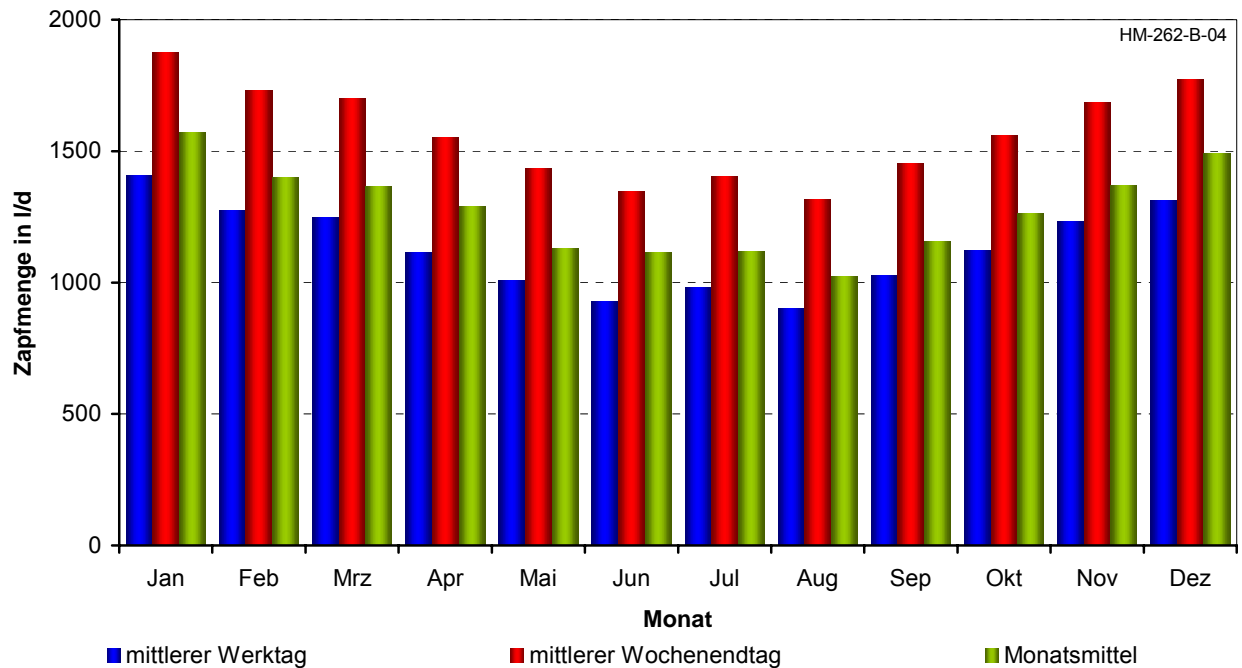


Abbildung 3-19: Monatsmittel der täglichen Zapfmenge für Werk- und Wochenendtage des Messobjekts MO 16 über ein Jahr

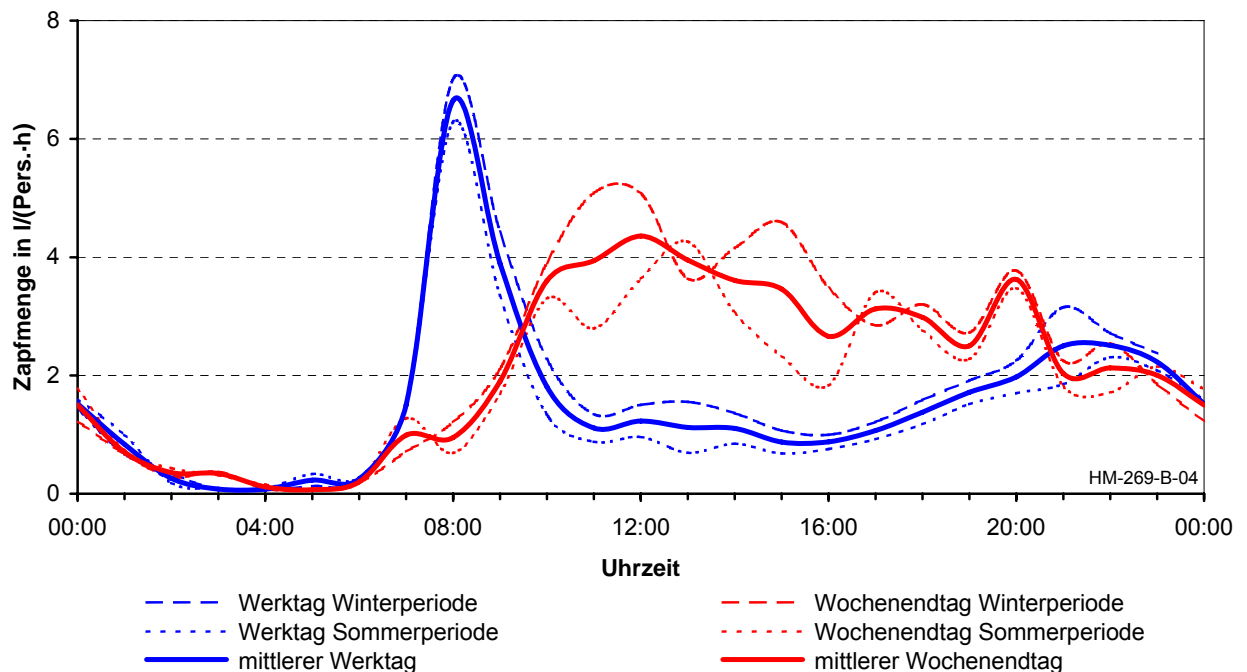


Abbildung 3-20: Mittlerer Tagesgang der Zapfmenge für die Winter- und Sommerperiode, unterteilt in Werk- und Wochenendtag, für MO 16

Die Werkzeuge sind gekennzeichnet durch:

- eine Morgenspitze, die in Höhe und Zeitpunkt nur einer geringen jahreszeitlichen Schwankung unterliegt
- einen Verlauf während des Tages, der nur geringe Schwankungen aufweist und im Sommer in seiner Höhe etwas geringer ausfällt
- einen abendlichen Anstieg in der Winterperiode, der eine Stunde früher beginnt und um rund 25 % höher liegt als in der Sommerperiode
- einen ähnlichen Verlauf während der Nachtstunden in der Sommer- und Winterperiode

Der Verlauf an Wochenenden ist charakterisiert durch:

- eine später auftretende Morgenspitze gegenüber dem Werktag
- den zeitlich ähnlichen Anstieg am Morgen sowohl in der Sommer- als auch in der Winterperiode
- einen weitestgehend unterschiedlichen Verlauf wegen eines uneinheitlichen Nutzerverhaltens während des Tages
- einen zeitgleichen und in seiner Höhe ähnlichen Anstieg am Abend um 20 Uhr
- keine gravierenden Unterschiede in den Nachtstunden
- einen insgesamt erhöhten Warmwasserbedarf als an Werktagen

Vergleicht man die Messobjekte MO 1 bis MO 16 miteinander, so weisen alle Tagesverläufe der untersuchten Vor-Ort-Objekte die gleichen charakteristischen Merkmale an Werk- und Wochenendtagen auf. Der ähnliche Verlauf an den Werktagen und der vom sehr unterschiedlichen Nutzerverhalten geprägte, differenzierte Verlauf an den Wochenenden spiegelt sich auch in den Messobjekten MO 1 bis MO 15 wider.

Um einen mittleren, als typisch anzusehenden Tagesverlauf zu erhalten, wurden die einzelnen Verläufe zu einem Profil je Gebäudetyp zusammengefasst. **Abbildung 3-21** und **Abbildung 3-22** zeigen beispielhaft die gemittelten Tagesgänge aus allen Mehrfamilienhäusern, unterteilt in Werk- und Wochenendtagen. Als Kollektiv enthalten sie einen typischen Lastgang, der für den Gebäudetyp Mehrfamilienhaus als charakteristisch anzusehen ist. Die Zapfmengen an den Wochenenden liegen um 21 % höher als an Werktagen.

Aus den vorangegangenen Untersuchungen der Messkampagne 2 war es somit möglich, den Saisonalgang der Zapfmenge, den Tagesgang der Zapfmenge und die mittleren Tagesleistungsgänge der Kollektive „Ein-“ und „Mehrfamilienhäuser“ für

- Werkzeuge und
- Wochenende

zu ermitteln.

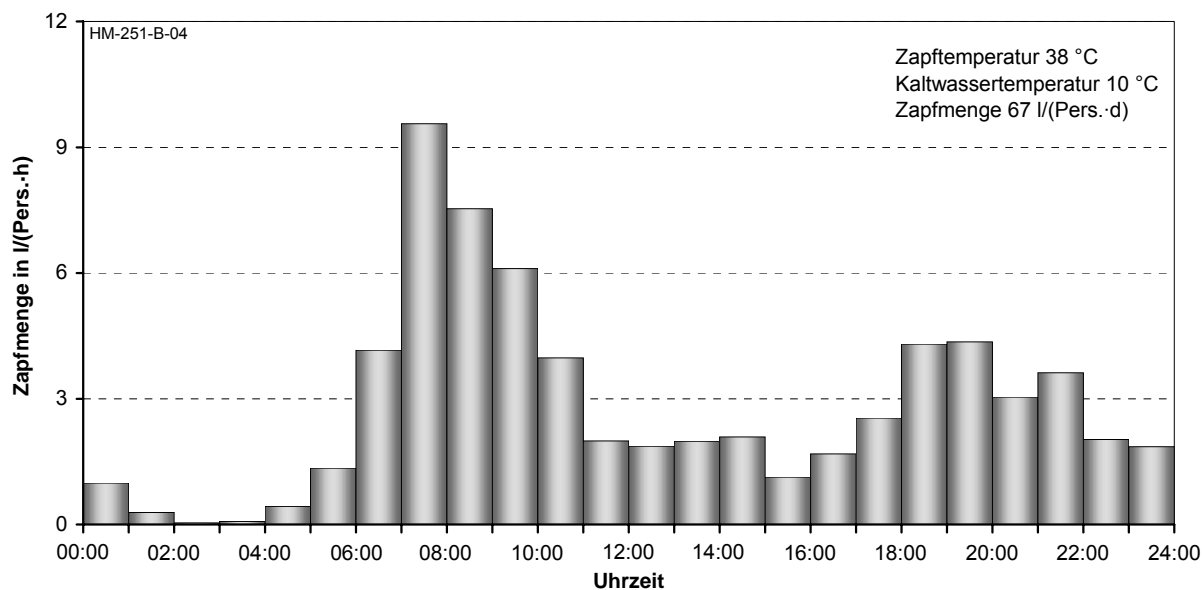


Abbildung 3-21: Mittlerer Tagesgang der Warmwasserzapfmenge aller Mehrfamilienhäuser an Werktagen

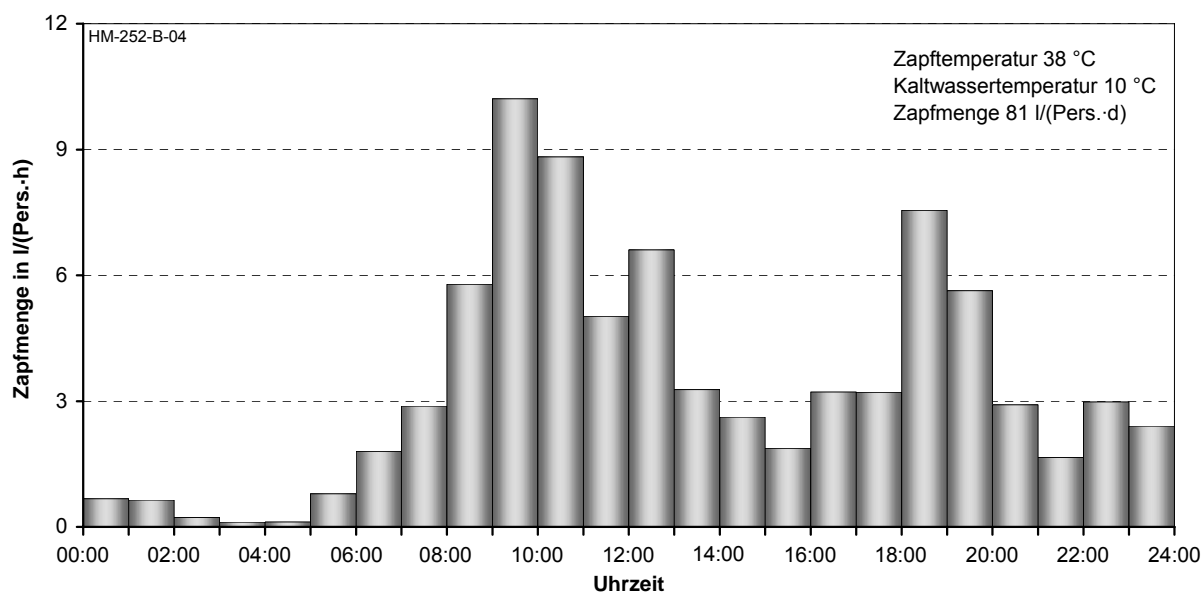


Abbildung 3-22: Mittlerer Tagesgang der Warmwasserzapfmenge aller Mehrfamilienhäuser an Wochenendtagen

3.3.4 Zapfenergie und Versorgungsart

Anhand der ermittelten Ergebnisse können realistische Warmwasserentnahmemengen aus dem Warmwasserspeicher während eines Zapfvorgangs abgebildet werden. Die als typisch anzusehenden Verbrauchswerte sind in **Tabelle 3-5** genannt. Dabei fand eine Unterteilung in die Verbrauchsstellen Handwaschbecken, Dusche und Badewanne statt. Die aus dem Warmwasserspeicher entnommenen Wassermengen pro Zapfung reichen von 0 l bis 52 l, je nach Zapfstellentyp und Verbrauchsgewohnheiten der einzelnen Personen. Die große Bandbreite der Werte spiegelt die unterschiedlichen Verbrauchsgewohnheiten der einzelnen Personen

wider. Der Energieinhalt und die Warmwasserentnahmemenge aus dem Warmwasserspeicher sind dabei bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C.

Tabelle 3-5: Typische Energie- und Warmwasserentnahmemengen aus dem Warmwasserspeicher beim Zapfvorgang

Verbrauchsstelle	Energiemenge je Zapfung ¹ kWh/Zapfung	einmalige Entnahme ¹ l/Zapfung
Handwaschbecken	0 bis 0,5	0 bis 8,5
Dusche	0,5 bis 3,0	8,5 bis 52
Badewanne	≥ 3,0	≥ 52

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C

Tabelle 3-6: Mittlerer Verlust- und Zapfenergieanteil in Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäusern

Bezeichnung	spez. Wärmemenge kWh/(Pers.·d)	Anteil an der Warmwasserentnahme %
Ein- und Zweifamilienhäuser mit Stichelungssystem (MO 1 – MO 4)		
Warmwasserentnahme aus dem Speicher	2,0	100
Anlauf- und Leitungsverluste beim Zapfvorgang	0,6	29
Zapfenergie ¹	1,4	71
Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäuser mit Zirkulationssystem (MO 5 – MO 10)		
Warmwasserentnahme aus dem Speicher	3,6	100
Anlauf- und Leitungsverluste beim Zapfvorgang	0,5	15
Anlaufverluste Zirkulationsstart	0,6	16
Zirkulationsverluste	0,7	19
Zapfenergie ¹	1,8	50

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

Die gebäudetypabhängigen Energiemengen, die bei den einzelnen Versorgungsvarianten auftreten, können über die gemittelten Verlust- und Zapfenergieanteile bestimmt werden. Für Ein- und Zweifamilien- sowie Reihenhäuser mit Stichelungs- oder Zirkulationsbetrieb sind diese in **Tabelle 3-6** verzeichnet. Bei Gebäuden mit Stichelungssystem ist im Mittel ein geringerer spezifischer Zapfenergiebedarf als bei Objekten mit Zirkulationssystem festzustellen. Ein Grund dafür dürfte sein, dass Nutzer in Gebäuden mit Stichelungsbetrieb bei kleinen Handwaschzapfungen bewusst auf die Verwendung von Warmwasser verzichten, da die Wartezeiten, bis warmes Wasser an der Zapfstelle zur Verfügung steht, die effektive Zapfzeit überschreiten würde. Je nach gewähltem Betriebszustand reicht der Zapfenergiebedarf von 1,4 kWh/(Pers.·d) bis 1,8 kWh/(Pers.·d). Die Anlaufverluste beim Zapfvorgang sind bei beiden Versorgungsvarianten nahezu gleich hoch, was auf die nicht an die Nutzergewohnheiten angepassten Zirkulationszeiten zurückzuführen ist. Damit findet ein Großteil der Zapfvorgänge außerhalb der Betriebszeiten der Zirkulationspumpe statt. Häufige Startvorgänge und nur sehr kurze Laufzeiten der Zirkulationspumpe haben bei den untersuchten Gebäuden

Zirkulationsanlaufverluste von 0,6 kWh/(Pers.·d) zur Folge. Die aus dem Warmwasserspeicher entnommene Energiemenge von 3,6 kWh/(Pers.·d) bei Zirkulationssystemen zur Zapfenergiebereitstellung liegt daher um das 1,8-fache über dem Wert für Stichelungssysteme.

Bei den in **Tabelle 3-7** dargestellten Mehrfamilienhäusern teilt sich die Energiemenge aus dem Warmwasserspeicher in die Zirkulationsverluste mit 2,2 kWh/(Pers.·d), die Zapfenergie mit 2,2 kWh/(Pers.·d) und die Anlaufverluste mit 0,2 kWh/(Pers.·d) auf. Die Zirkulationsverluste betragen somit wegen der geforderten langen Betriebszeiten der Zirkulationspumpe und des meist sehr verzweigten Warmwasserverteilsystems fast 50 %.

Tabelle 3-7: Mittlerer Verlust- und Zapfenergieanteil in Mehrfamilienhäusern

Bezeichnung	spez. Wärmemenge kWh/(Pers.·d)	Anteil an der Warmwasserentnahme %
Mehrfamilienhäuser mit Zirkulationssystem (MO 11 – MO 16)		
Warmwasserentnahme aus dem Speicher	4,6	100
Anlauf- und Leitungsverluste beim Zapfvorgang	0,1	2
Anlaufverluste Zirkulationsstart	0,1	2
Zirkulationsverluste	2,2	48
Zapfenergie ¹	2,2	48

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

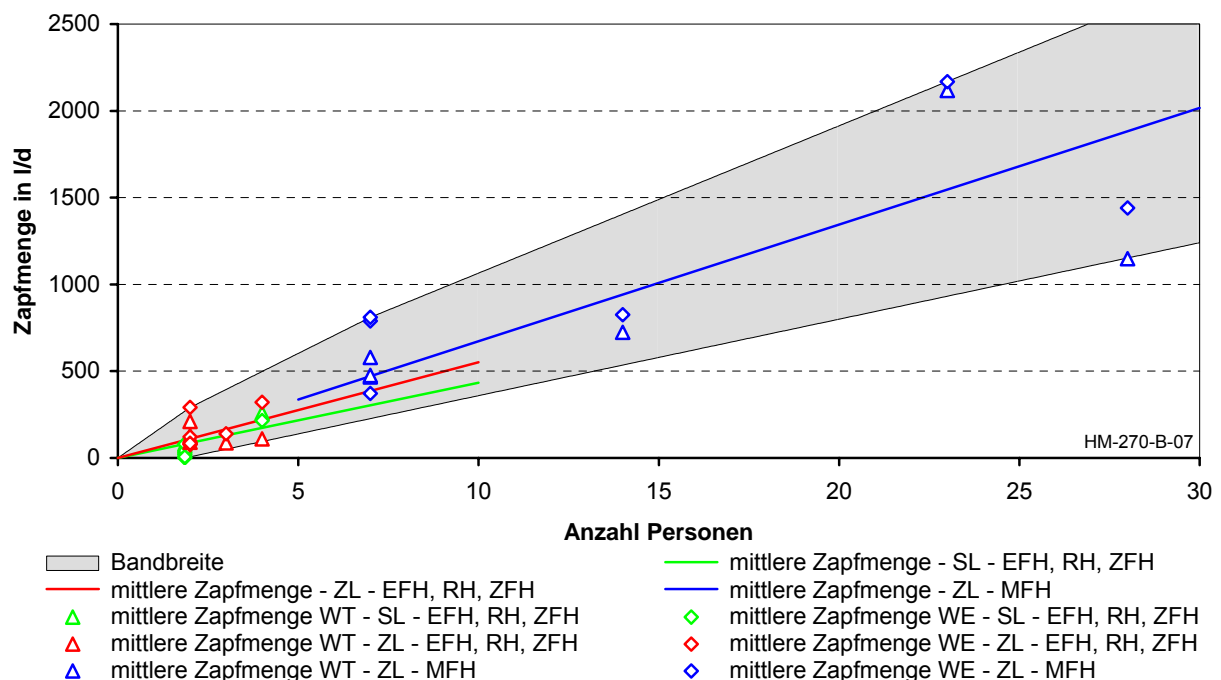


Abbildung 3-23: Mittlere Zapfmenge in Abhängigkeit von der Personenanzahl und der Warmwasserversorgungsvariante

Mit Hilfe der vorangegangenen Untersuchungen konnten für die jeweiligen Gebäudetypen und Versorgungsvarianten die entsprechenden typischen Verbrauchskennlinien in Abhängigkeit von der jeweiligen Personenanzahl ermittelt werden. In **Abbildung 3-23** sind zusätzlich

die Zapfmengen der einzelnen Objekte, unterteilt in Werk- und Wochenendtag, aufgeführt. Das Spektrum der Werte gibt dabei den Streubereich an, der durch die unterschiedlichen Nutzergewohnheiten und Nutzergruppen entsteht. Mit Hilfe der ausgewiesenen Kennlinien sind mittlere gebäudetypabhängige Verbrauchswerte bestimm- und für weitere Berechnungen verwendbar.

3.4 Anlaufvorgänge bei der Warmwasserzapfung

Der Temperaturverlauf an der Zapfstelle bei der Entnahme von Warmwasser an zentralen Warmwasserversorgungssystemen wird stark vom Verhalten des Nutzers und vom vorgelegten Warmwasserverteilnetz beeinflusst. Befindet sich die Zapfstelle direkt am Warmwasserbereiter oder an der Zirkulationsleitung, so ist bei Zapfvorgängen nahezu sofort warmes Wasser verfügbar. Üblicherweise muss aber das in der Stichleitung ausgekühlte Wasser ausgedrückt und die Rohrleitung durch nachfließendes Wasser aufgeheizt werden, bevor Wasser mit der vom Nutzer gewünschten Temperatur an der Zapfstelle zur Verfügung steht. Die Verluste bei der Warmwasserzapfung setzen sich aus den Verteilungs-, Zirkulations-, Leitungsaufheiz- beziehungsweise Anlauf- und Ablaufverlusten zusammen.

Abbildung 3-24 zeigt den Temperaturverlauf und die einzelnen Verluste beim Zapfvorgang am Beispiel einer Warmwasserentnahme an einem Küchenspülbecken. Bei Zapfbeginn hat das Wasser an der Zapfstelle fast Umgebungstemperatur. Abhängig von der Installation, dem Dämmstandard der Warmwasserverteilleitungen und der Art der Wasserentnahmemarmatur ist der Wasserinhalt in den einzelnen Teilstücken auf unterschiedliche Temperaturen ausgekühlt, was sich in einem charakteristischen Temperaturverlauf widerspiegelt. Den Wärmehinzufluss zum Aufheizen der Warmwasserverteilleitungen bis auf die Warmwassertemperatur bezeichnet man als Anlaufverluste. Die Anlaufverlustleistung hat ihr Maximum zu Beginn des Zapfvorgangs. Wird das Warmwasser beim Start des Zapfvorgangs mit einer Temperatur unter der gewünschten Zapftemperatur nicht verwendet, wie zum Beispiel beim Duschvorgang, so treten bei Zapfbeginn Ablaufverluste auf. Die Leitungsverluste entstehen während der Entnahmedauer beim Durchfluss des Warmwassers durch die Rohrleitungen vom Warmwasserspeicher bis zur Entnahmestelle. Sie sind abhängig von der Länge, dem Rohrwerkstoff und dem Dämmstandard der Verteilleitung sowie der Warmwasser- und Umgebungstemperatur.

Die Starttemperatur zu Beginn eines Zapfvorgangs ist sehr stark von der Länge der Zapfpausen abhängig. Am Zapfende stellen sich jedoch immer gleiche Temperaturniveaus ein, die der vorhandenen Warmwasserspeichertemperatur und der Zapfdauer unterliegen. Um die Einflüsse von Leitungslängen, Dämmstandards, Leitungsverlegung, Art der Zapfstelle und Zapfverhalten des Nutzers genauer quantifizieren zu können, wurde für diese Arbeit bei mehr als 300 Zapfvorgängen mit unterschiedlicher Warmwasserversorgung und Installationstechnik das Anlaufverhalten über Volumenstrom- und Temperaturmessungen bestimmt. Ein wesentlicher

Teil dieser Bestimmung war die Erfassung der Warmwasser- und Zapftemperatur, der Zapfmenge und -dauer sowie der zum Messzeitpunkt aktuellen Uhrzeit.

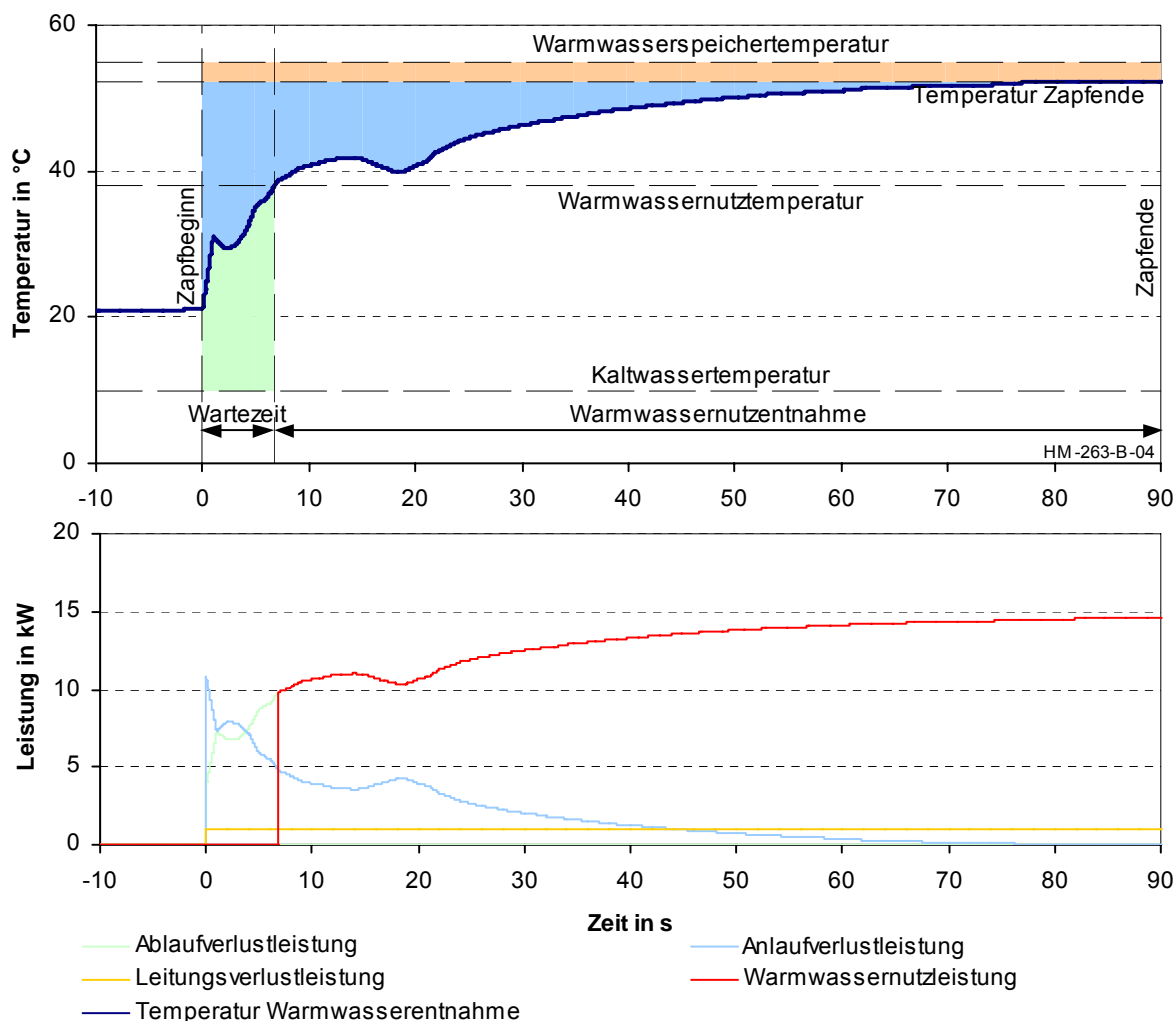


Abbildung 3-24: Temperaturverlauf und Verluste an einer Warmwasserzapfstelle

Die messtechnischen Untersuchungen erfolgten in acht Einfamilienhäusern mit Stichleitungsbetrieb, acht Einfamilienhäusern mit Zirkulationsbetrieb und 22 Mehrfamilienhäusern mit Zirkulationsbetrieb. Eine genaue Übersicht der untersuchten Messobjekte geben **Tabelle 11-1** und **Tabelle 11-2** im Anhang. **Abbildung 3-25** stellt im ϑ -V-Diagramm die Kennlinien sowohl für die messtechnisch untersuchten Einfamilienhäuser mit Stichleitungsbetrieb als auch für jene mit Zirkulationsbetrieb dar. Ferner sind die minimal beziehungsweise maximal gemessenen Starttemperaturen am Zapfbeginn und die minimalen beziehungsweise maximalen Endtemperaturen am Zapfende eingezeichnet. Die abgebildeten durchschnittlichen Anlaufvorgänge ergeben sich aus dem arithmetischen Mittel aller Einzelwerte für die jeweilige Versorgungsvariante. Folgezapfungen, die innerhalb eines Zeitraums von 20 Minuten lagen, werden dabei nicht berücksichtigt, was die Lage des arithmetischen Mittels beim Startvorgang im unteren Drittel des Bereichs von $T_{S,\min}$ bis $T_{S,\max}$ erklärt. Bei der Endtemperatur tritt eine

weitgehend symmetrische Streuung um das arithmetische Mittel auf, da sich diese je nach Zapfdauer immer auf eine ähnliche Temperatur einpendelt, die von der Warmwasserspeichertemperatur und den Leitungsverlusten abhängig ist. Eine gute Aussage erhält man dabei für die Start- und Endtemperaturen bei Zapfvorgängen. Bei einzelnen Anlaufvorgängen können aufgrund unterschiedlicher Vorlaufvolumina während der Anlaufphase durchaus Abweichungen vom eingezeichneten Verlauf auftreten.

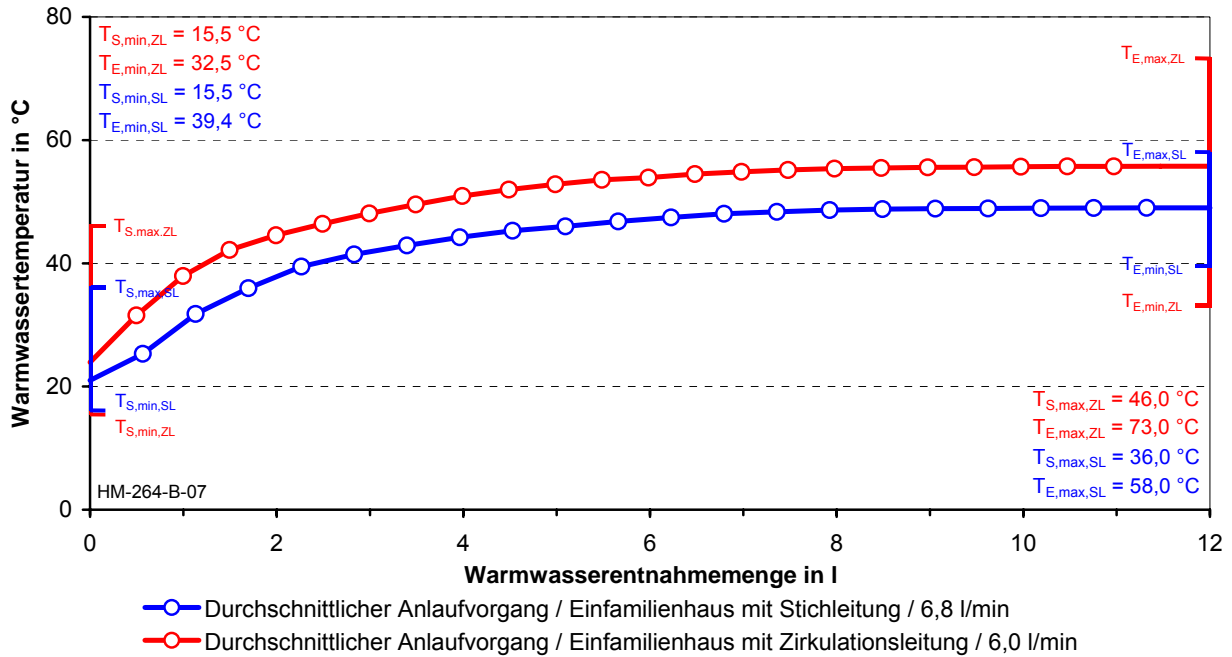


Abbildung 3-25: Mittlere Kennlinie der aufgenommenen Temperaturverläufe im Einfamilienhaus mit Stich- oder Zirkulationsleitung

Die Temperatur steigt bei Zirkulationsbetrieb schneller an als bei Stichleitungsbetrieb, daher wird auch die Endtemperatur früher erreicht. Bei den Mehrfamilienhäusern liegt die maximale Endtemperatur um 6 K unter der von Einfamilienhäusern mit Zirkulationsbetrieb. Auch die Schwankungsbreite der gemessenen Endtemperaturen ist bei den untersuchten Mehrfamilienhäusern kleiner. Die Ursache ist in der meist besser gewarteten und betriebenen Warmwasserbereitungsanlage in Mehrfamilienhäusern zu suchen.

Über eine transzendente Wachstumsfunktion /ELS 2001/ ist es möglich, Anlaufvorgänge wie folgt abzubilden:

$$y = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{x}\right)^C} \tag{3.6}$$

Des charakteristischen „S“-förmigen Verlaufs wegen bezeichnet man Funktionen dieser Grundform als Sigmoid-Funktionen. Ein großer Vorteil dieser Funktionen liegt darin, auch asymmetrische Verläufe darstellen zu können. Dadurch gelingt es, den Temperaturverlauf an

der Zapfstelle über die gesamte Zapfmenge inklusive der beiden Knickstellenbereiche mathematisch exakt abzubilden und in Simulationsrechnungen zu integrieren. Durch das Hinzufügen eines Summanden D , der die Temperatur bei Zapfbeginn bestimmt, und einer Verschiebung der Unstetigkeitsstelle bei $x = 0$ l auf $x = -40$ l erhält man die in /GEI 3/ definierte Form der Sigmoid-Funktion. Die gemessenen Anlaufvorgänge lassen sich somit genau nach folgender Formel in Abhängigkeit von der Warmwasserentnahmemenge an der Zapfstelle errechnen:

$$T_{ww} = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{m_{Zapf} + 40} \right)^C} + D \quad (3.7)$$

mit T_{ww} : Warmwassertemperatur an der Zapfstelle in °C
 A, B, C, D : Koeffizienten
 m_{Zapf} : Warmwasserentnahmemenge an der Zapfstelle in l

Der obere und untere Grenzwert wird dabei durch die Koeffizienten A und D bestimmt. Aus der Summation der Koeffizienten A und D ergibt sich die maximal mögliche Warmwasserzapftemperatur. Die Koeffizienten B und C bewirken dagegen eine horizontale Verschiebung beziehungsweise ein Abflachen des Verlaufs. In **Abbildung 3-26** ist die Sigmoid-Funktion beispielhaft für zwei Zapfstellen veranschaulicht.

Mit den Erkenntnissen über die Bandbreite der auftretenden Temperaturverläufe, die aus den messtechnischen Untersuchungen der Anlaufvorgänge gewonnen wurden, lassen sich für folgende Gebäudetypen und Warmwasserverteilungssysteme standardisierte Anlagenkonfigurationen definieren:

- Einfamilienhaus mit Stichleitung
- Einfamilienhaus mit Zirkulations- und Stichleitung
- Mehrfamilienhaus mit Zirkulations- und kurzer Stichleitung
- Mehrfamilienhaus mit Zirkulations- und langer Stichleitung

Die ermittelten repräsentativen Kennlinien für diese Konfigurationen sind in **Tabelle 3-8** aufgeführt. Die hier angegebenen Werte repräsentieren den Durchschnitt der in den Untersuchungen vorgefundenen Leitungsquerschnitte und -längen, Dämmstandards und Volumenströme sowie Start- und Endtemperaturen der einzelnen Versorgungsvarianten.

Die abgeleiteten, standardisierten Kennlinien, die den Anlaufvorgang abbilden, sind in **Abbildung 3-27** zusammengefasst. Die mittlere Starttemperatur für das Zapfen von Warmwasser wurde dabei in Einfamilienhäusern mit 19 °C und in Mehrfamilienhäusern mit 25 °C angesetzt. Aus den Feldversuchen gewonnene Erkenntnisse dienen nun als Eingangsgrößen zur Erstellung von Wärme-Lastprofilen für Gebäude sowie für die Konzeption und den Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands.

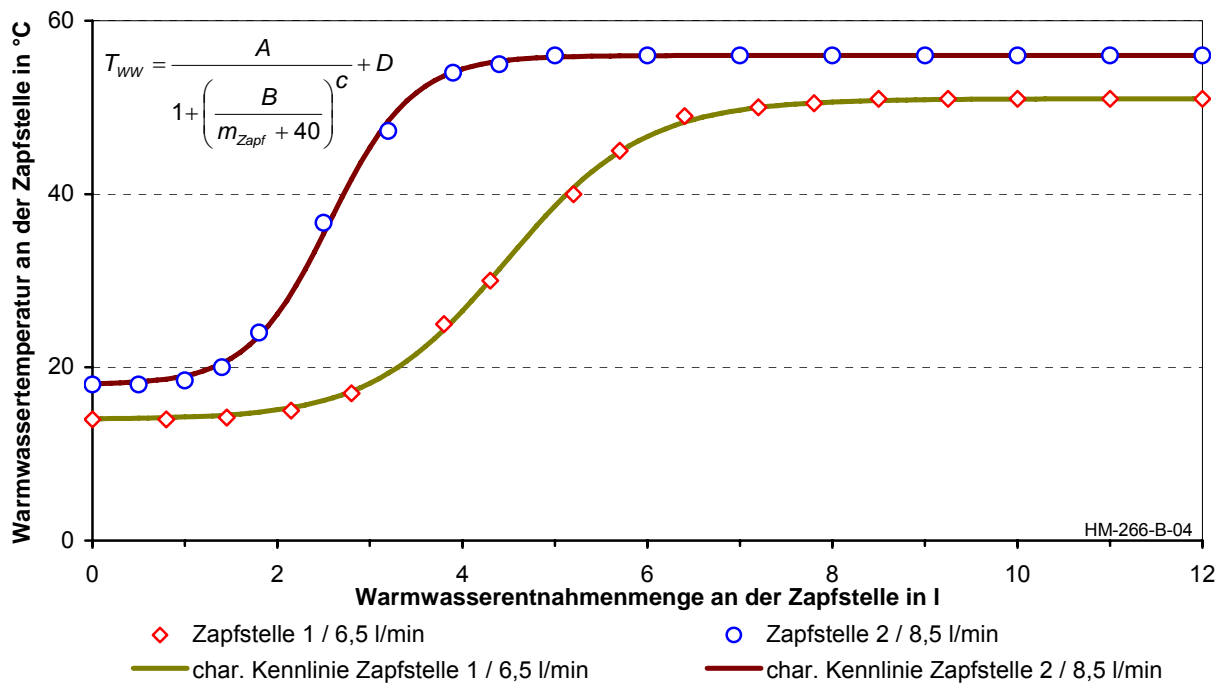


Abbildung 3-26: Abbildung des Temperaturverlaufs eines Anlaufvorgangs mit einer Sigmoid-Funktion

Tabelle 3-8: Charakteristische Kenngrößen nach der Sigmoid-Funktion

Messort	A	B	C	D
EFH mit Stichleitung	36	42,396	97,716	19
EFH mit Zirkulations- und Stichleitung	36	41,442	111,196	19
MFH mit Zirkulations- und kurzer Stichleitung	30	40,375	454,754	25
MFH mit Zirkulations- und langer Stichleitung	30	42,622	65,568	25

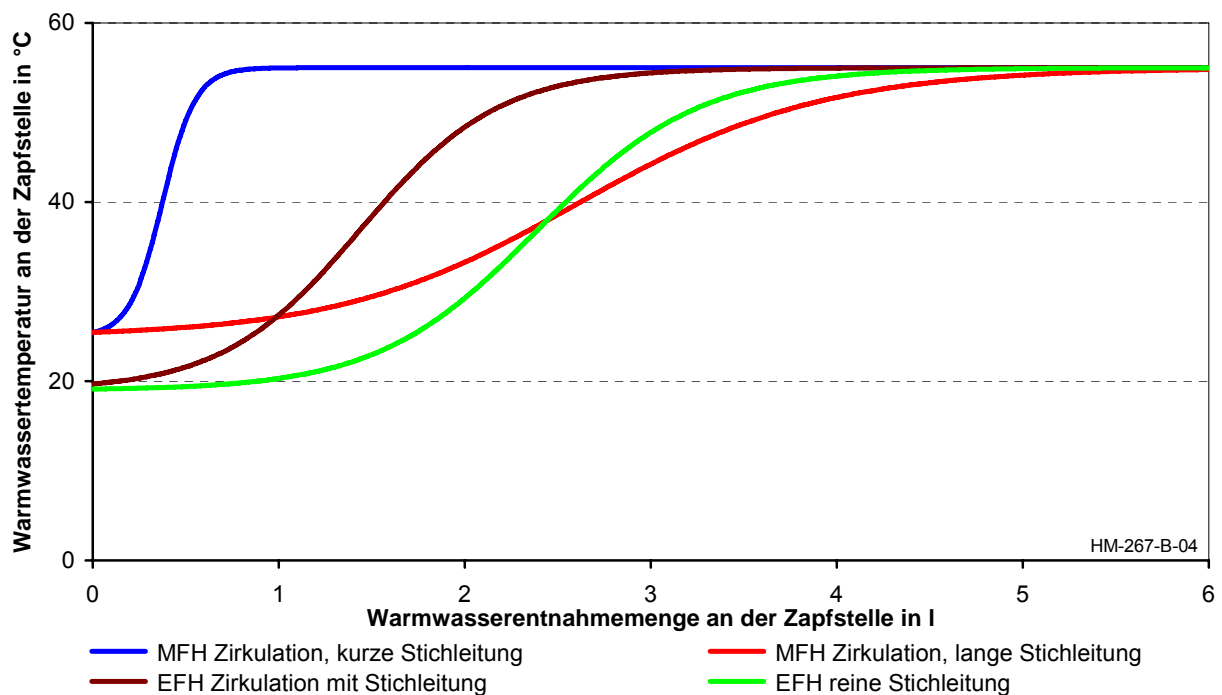


Abbildung 3-27: Standardisierter Temperaturverlauf beim Zapfvorgang

4 Entwicklung standardisierter dynamischer Lastgänge

Im praxisnahen Betrieb sind verschiedene Wärmeerzeuger zur Zeit nur bedingt belastbar miteinander zu vergleichen, da das erfasste Nenn- und Teillastverhalten nur grobe Vergleiche erlaubt. Messtechnische Untersuchungen einzelner Kessel über ein ganzes Kalenderjahr, in typgleichen Gebäuden, mit ähnlichen Heiz- und Warmwassersystemen und Betrieb bei gleichen klimatischen Verhältnissen wären sehr zeit- und kostenintensiv. Deshalb wurden für diese Arbeit spezielle Tageslastgänge zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung entwickelt, die sich am Wärmeerzeugerprüfstand mit unterschiedlichsten Kombinationen aus Wärme- und Warmwassererzeugern reproduzierbar nachbilden und mit vertretbarem Aufwand umsetzen lassen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der einzelnen Verbrauchslastgänge zeigt **Abbildung 4-1**:

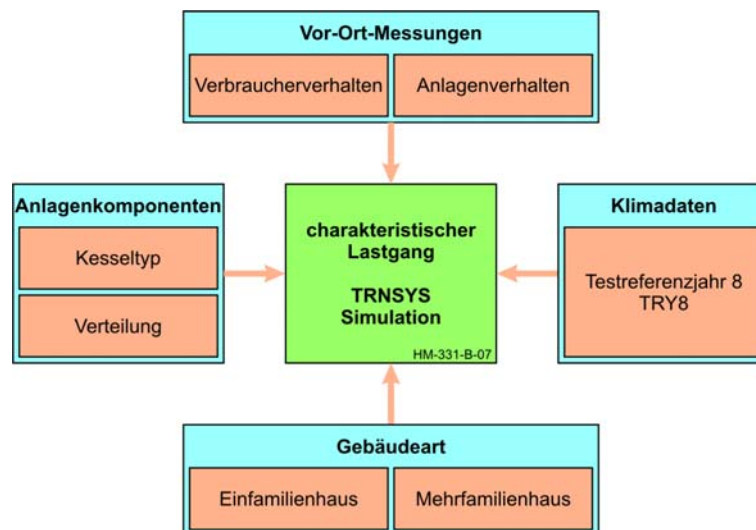


Abbildung 4-1: Methode zur Bestimmung charakteristischer Lastgänge

Als Eingangsgrößen dienten dabei

- die Vor-Ort-Messungen,
- die Klimadaten des Testreferenzjahrs 8,
- die Gebäudeart und
- die Anlagenkomponenten.

Die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen mit den charakteristischen Lastgängen werden entsprechend ihrer statistischen Häufigkeit gewichtet. Daraus kann man im Anschluss auf die jeweiligen Jahreswerte hochrechnen. Somit lassen sich gesicherte Aussagen über das Betriebsverhalten und die Verbrauchskennwerte unterschiedlicher Wärme- und Warmwassererzeuger treffen, wodurch deren Vergleich möglich ist. Die notwendigen Eingangsdaten für die Konzeption und den Betrieb des Prüfstands werden im Folgenden definiert und dargestellt.

4.1 Referenzobjekte (Gebäude und Haushalte)

Zur Abbildung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs, der Rohrleitungslängen und Wasserinhalte der Verteilleitungen, des Wasserinhalts der Heizkörper, der Zapfstellenanzahl und weiterer Daten am Wärmeerzeugerprüfstand war im Rahmen dieser Arbeit je ein repräsentatives Referenzobjekt für die Gebäudetypen „Einfamilienhaus“ und „Mehrfamilienhaus“ zu definieren. Bei der Auswahl der Gebäudekennwerte der Referenzobjekte dienten zwei Typgebäude des Forschungsprojekts /IKARUS/ als Grundlage. Um die Auswirkung einer nachträglichen wärmetechnischen Sanierung der Gebäudehülle auf den Wärmeerzeuger untersuchen zu können, wurden die Verbrauchskennwerte jedes Gebäudetyps für den unsanierten und sanierten Zustand ermittelt. Die Bezeichnung der Referenzobjekte teilt sich wie folgt auf:

Referenzobjekt (RO):

Einfamilienhaus (EFH):	RO-EFH-1/1	≙ „Einfamilienhaus unsaniert“
	RO-EFH-1/2	≙ „Einfamilienhaus saniert“
Mehrfamilienhaus (MFH):	RO-MFH-10/1	≙ „Mehrfamilienhaus unsaniert“
	RO-MFH-10/2	≙ „Mehrfamilienhaus saniert“

Eine nachträgliche Sanierung des Gebäudes wirkt sich auf dessen Wärmebedarfsgang und somit zum Beispiel auf die Brennerlaufzeit und den Jahresnutzungsgrad aus. Voraussetzung ist hier eine Sanierung entsprechend den Vorgaben der /WSVO '95/. Die vorgeschriebenen Wärmedurchgangskoeffizienten (*U*-Werte) waren über eine Wärmedämmung der Außenwand, des Daches und der Kellerdecke sowie den Einsatz von Fenstern mit Wärmeschutzverglasung erreichbar. **Tabelle 4-1** stellt die typischen Referenzobjekte mit ihren wichtigsten bauphysikalischen und verbrauchsspezifischen Kenndaten dar.

Tabelle 4-1: Kenndaten der Referenzobjekte

	Einheit	Einfamilienhaus		Mehrfamilienhaus	
		RO-EFH-1/1	RO-EFH-1/2	RO-MFH-10/1	RO-MFH-10/2
Standort		München			
Bewohner	Pers.	4		22	
Wohneinheiten		1		10	
beheizte Fläche	m ²	102		665	
Gebäudevolumen	m ³	285		2400	
A/V-Verhältnis		0,9		0,5	
Anzahl Zapfstellen	-	3		30	
Jahresheizwärmebedarf	kWh/a	26.736	9.228	76.281	40.428
spez. Jahresheizwärmebedarf	kWh/(m ² ·a)	262	90	115	61

Aus dieser Tabelle entwickelt sich der Aufbau sowie das heizungs- und trinkwasserseitige Installationsschema der einzelnen Referenzobjekte. **Abbildung 4-2** zeigt dies beispielhaft für das Referenzobjekt „Einfamilienhaus“.

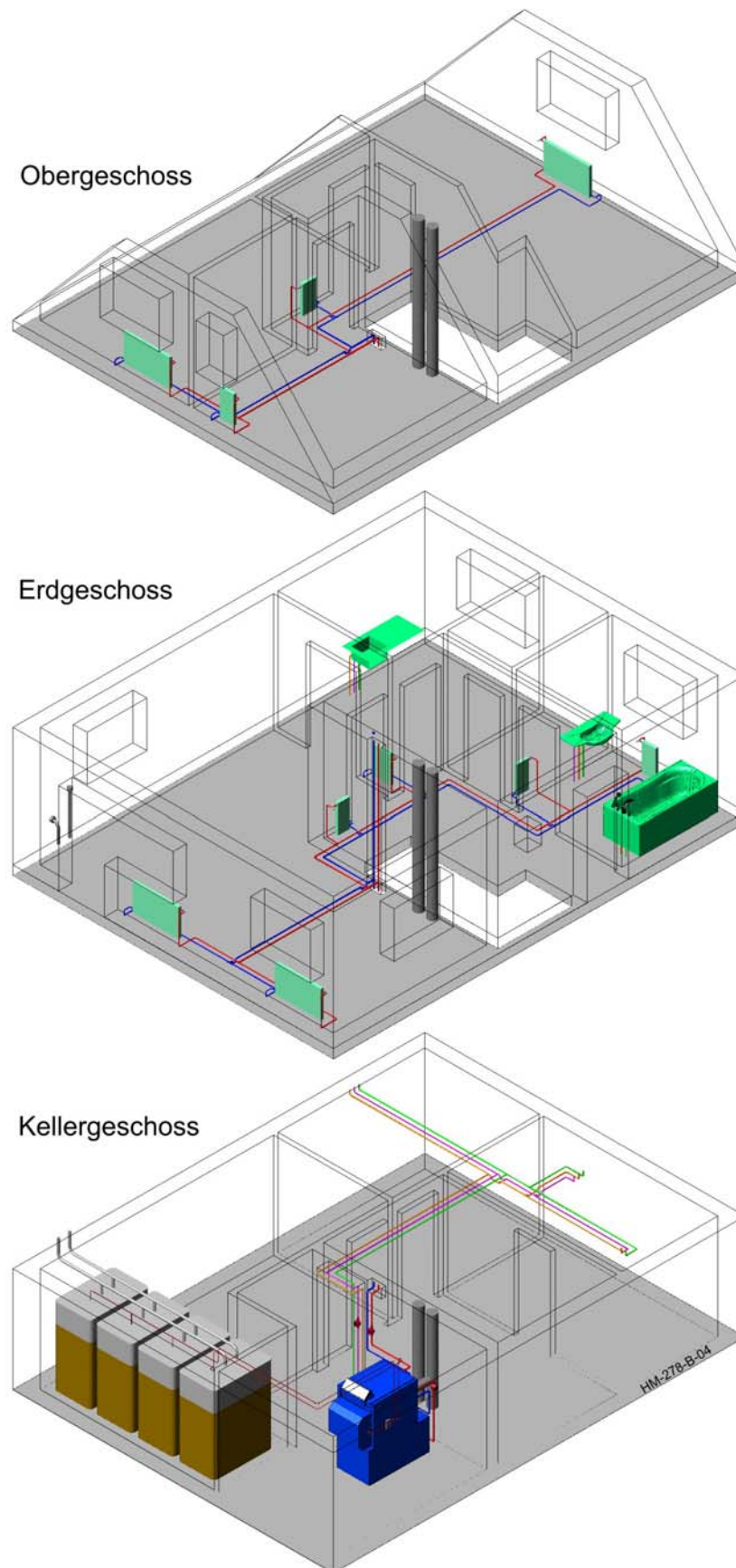


Abbildung 4-2: Heizungs- und trinkwarmwasserseitiges Installationsschema für das Referenzobjekt „Einfamilienhaus“

Das Einfamilienhaus hat ein Kellergeschoss und zwei Wohngeschosse. Die Brennstoffversorgung, der Wärmeerzeuger und der Warmwasserspeicher befinden sich im Kellergeschoss. Die Heizungsverteilung ist als Zweirohrsystem ausgeführt, wobei die Steigleitungen in einem Schacht und die horizontalen Verteilleitungen im Boden verlegt sind. Die Anordnung der einzelnen Heizkörper erfolgt nach Möglichkeit unter den Fensterflächen. Zur Versorgung des Gebäudes mit Warmwasser werden drei Zapfstellen (Küchenspüle, Handwaschbecken und Dusche beziehungsweise Wanne im Bad) installiert. Die Warmwasserverteilung ist dabei wahlweise als Stichleitungssystem oder als Zirkulations- und Stichleitungssystem umsetzbar. Das Zusammenfügen der einzelnen Komponenten ergibt die Leitungslängen des Warmwasser- und Heizungsverteilsystems und die Positionen der Heizflächen und Warmwasserzapfstellen. Die Auslegung der Heizkörper erfolgt nach /DIN 4701-3/. Um den Einfluss verschiedener Heizkörpertypen mit ihren unterschiedlichen Wasserinhalten auf den Wärmeerzeuger untersuchen zu können, findet die Auslegung der Heizflächen sowohl in Radiator-, als auch Konvektorbauart statt.

Die Konzeption des Wärmeerzeugerprüfstands und die Ermittlung der heizungs- und warmwasserseitigen Bedarfsgänge erfordern anlagenspezifische Eingangsdaten aus den Referenzobjekten. Für eine Abbildung sowohl des Bestands an Altanlagen als auch moderner Heizungsanlagen in Neubauten ist eine Auslegung für unsanierte und sanierte beziehungsweise neue Warmwasser- und Heizungsverteilsysteme und Heizflächen erforderlich.

Tabelle 4-2: Leitungslängen und Wasserinhalte des sanierten und unsanierten Warmwasserverteil- und Heizsystems des Referenzobjekts „Einfamilienhaus“

	Einheit	Warmwasserverteil- und Heizsystem	
		RO-EFH-1/1	RO-EFH-1/2
Sanierungsstand Gebäude	-	unsaniert	saniert
Heizungsverteilsystem			
Leitungslänge Heizungsvorlauf	m	43,1	43,1
Wasserinhalt Heizungsvorlauf	l	18,8	14,9
Leitungslänge Heizungsrücklauf	m	40,9	40,9
Wasserinhalt Leitungsrücklauf	l	18,5	14,4
Heizflächen			
Heizflächenart	-	Radiatoren	Flachheizkörper
Wasserinhalt	l	207,2	82,1
mittlerer Heizkörperexponent	-	1,35	1,31
Warmwasserverteilsystem			
Anzahl Zapfstellen	-	3	
Warmwasserzapftemperatur	°C	38	
Länge Warmwasserleitung	m	18,3	
Länge Kaltwasserleitung	m	18,3	
Länge Zirkulationsleitung	m	16,8	
Wasserinhalt Verteilsystem	l	12,3	11,3

In **Tabelle 4-2** sind die für die weiteren Betrachtungen notwendigen Daten des sanierten und unsanierten Warmwasserverteil- und Heizsystems am Beispiel „Einfamilienhaus“ genannt.

Durch die geringeren Leitungsquerschnitte und den Einsatz von Flachheizkörpern anstatt Stahlröhrenradiatoren im sanierten wie im neuen Einsatzfall verringert sich – bei gleichen Leitungslängen und Heizkörperleistungen – der Wasserinhalt von 256,8 l auf 122,7 l. Dies führt zu einer Veränderung der Totzeiten (Wasserumlaufzeiten) im System. Um verschiedene Heizkörpertypen mit ihrem Verhalten, etwa bei einer Warmwasserspeicherladung mit Vorrangschaltung, am Wärmeerzeugerprüfstand darstellen zu können, werden zunächst Auskühlkurven von handelsüblichen Heizkörpern ermittelt. **Abbildung 4-3** zeigt exemplarisch das Auskühlverhalten eines Gussglieder- und Stahlröhrenradiators sowie eines profilierten Flachheizkörpers und eines Standardkonvektors bei einer Normheizkörperwärmeleistung nach /DIN EN 442-2/ von 1000 W, einer Heizkörpereintrittstemperatur von 75 °C, einer Heizkörperaustrittstemperatur von 65 °C und einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

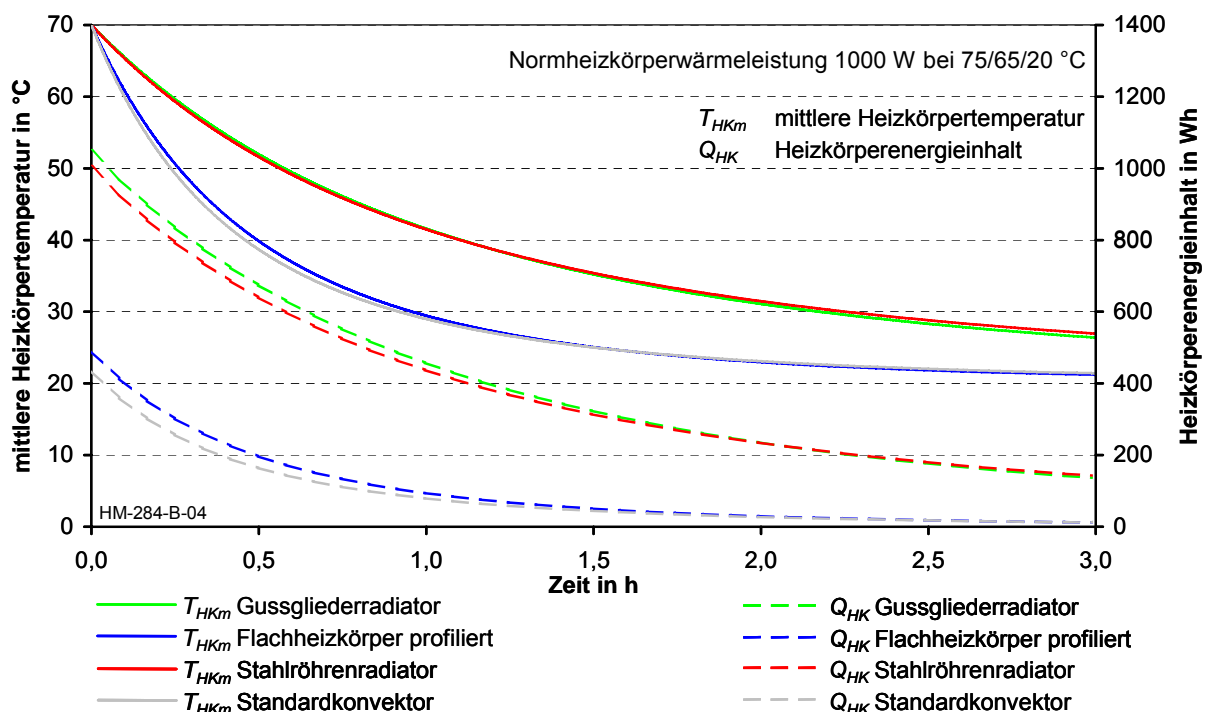


Abbildung 4-3: Auskühlverhalten verschiedener Heizkörpertypen

Wegen des geringen Energieinhalts, der auf den niedrigen Wasserinhalt und das geringe Heizkörpergewicht zurückzuführen ist, kühlen Konvektor- und Flachheizkörper im Vergleich zu Radiatorheizflächen sehr rasch aus. Bei gleicher Heizkörperleistung liegt der Wärmeinhalt von Radiatorheizflächen mehr als doppelt so hoch wie bei Konvektoren. Dies spiegelt sich auch im Anfahrverhalten wider, wodurch sich eine relativ schnelle Regelung bei Heizkörpern mit geringem Wärmeinhalt realisieren lässt. Bereits nach knapp 20 Minuten ist bei Konvektor- und Flachheizkörpern die Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizkörpertemperatur und der Umgebungstemperatur auf die Hälfte gesunken. Bei Radiatoren stellt sich ein solcher Temperaturunterschied erst nach knapp 50 Minuten ein.

4.2 Referenzlastgänge für die zentrale Heizwärmeversorgung

Zur Entwicklung standardisierter dynamischer Heizungslastgänge ist die Definition von Referenztagen notwendig, deren Tagesgänge jeweils einen durchschnittlichen Tag einer Periode bezüglich Heizwärmebedarf, Bewölkungsgrad und Außentemperaturverlauf repräsentieren. Zur Auswahl von entsprechenden Tagen mit charakteristischen Kennwerten eines Jahres konnte eine Methodik entwickelt werden, deren schematischer Ablauf in **Abbildung 4-4** für unsanierte Referenzobjekte dargestellt und nachfolgend beschrieben ist.

Eingang in die Berechnungsmethodik finden

- das Testreferenzjahr 8,
- speziell definierte Referenzobjekte,
- Betriebsdaten und Erkenntnisse aus den Vor-Ort-Messungen
- sowie die zu untersuchenden Prüflinge.

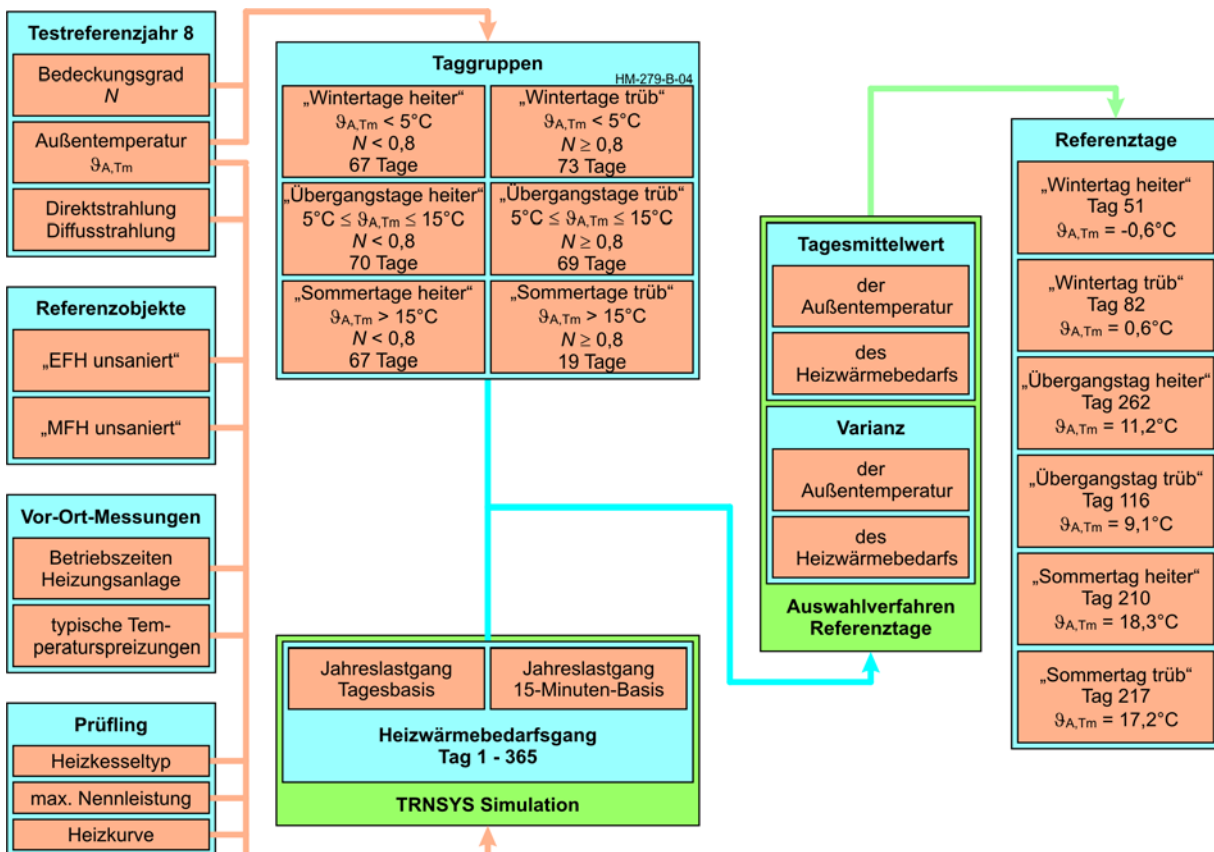


Abbildung 4-4: Berechnungsmethodik zur Entwicklung der heizungsseitigen Referenzlastgänge für unsanierte Referenzobjekte

Als Eingangsgrößen zur Klassifizierung der einzelnen Tage in Taggruppen dienen der Bedeckungsgrad N und die mittlere Tagesaußentemperatur $\vartheta_{A,Tm}$ aus dem Testreferenzjahr 8 (TRY 8). Das TRY 8 beschreibt die charakteristischen Wetterdaten für die Klimaregion „Donau- und Alpenvorland“ und entspricht in seinen Mittelwerten über einen längeren

Zeitraum den Klimamittelwerten dieser Region. Die einzelnen Taggruppen teilen sich in „Winter-“, „Übergangs-“ und „Sommertage“ ein, die die verschiedenen Jahreszeiten mit ihren zugehörigen meteorologischen Bedingungen abbilden. Dabei wird das Tagesmittel der Außentemperatur als Unterscheidungsmerkmal verwendet. Ein „Wintertag“ zeichnet sich durch eine mittlere Tagesaußentemperatur unter 5 °C aus. Bei unsanierten Gebäuden liegt die Temperatur an „Übergangstagen“ zwischen 5 °C und 15 °C und an „Sommertagen“ über 15 °C.

4.2.1 Saisonalgang des Heizwärmebedarfs und Typisierung durch Taggruppen

In **Abbildung 4-5** sind der Verlauf des monatlichen Heizwärmebedarfs für die Referenzobjekte „Einfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“ mit einem Jahresheizwärmebedarf von 26736 kWh/a beziehungsweise 9228 kWh/a und die mittlere Monatsaußentemperatur dargestellt. Das sanierte Gebäude ist charakterisiert durch einen geringeren Heizwärmebedarf und eine niedrigere Heizgrenztemperatur. Die Heizgrenztemperatur hängt dabei nicht nur vom Dämmstandard des Gebäudes, sondern auch von der Höhe der nutzbaren Wärmegewinne im Verhältnis zu den Wärmeverlusten in der Heizperiode ab. Steigt dieses Verhältnis an, verkürzt sich die Heizperiode, und die Heizgrenztemperatur sinkt auf tiefere Werte. Dies hat zur Folge, dass die Heizungsanlage früher in den Sommerbetrieb wechseln kann, was bei der Auswahl geeigneter Taggruppen zu berücksichtigen ist. Der Außentemperaturbereich wurde in dieser Arbeit daher für sanierte Gebäude mit 5 °C bis 13 °C für „Übergangstage“ und mit über 13 °C für „Sommertage“ festgelegt.

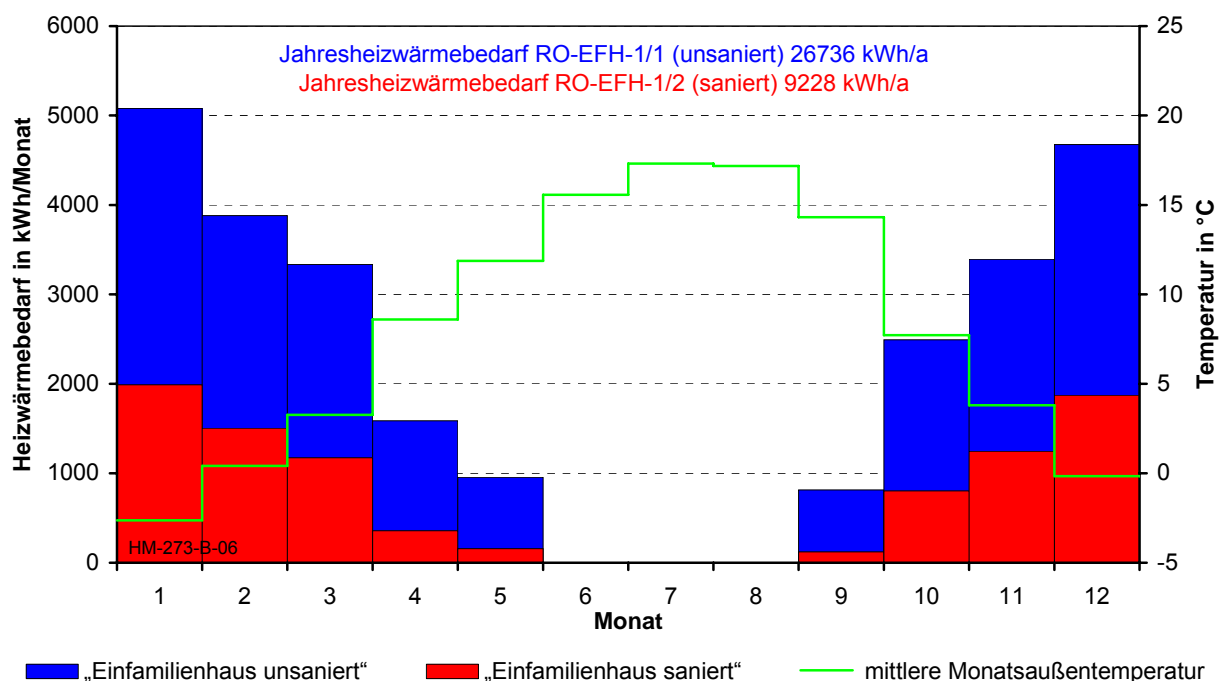


Abbildung 4-5: Verlauf des monatlichen Heizwärmebedarfs und der Monatsaußentemperatur über ein Jahr für das „Einfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“

Zusätzlich zur Klassifizierung in verschiedene Temperaturbereiche fand eine Unterscheidung nach „heiteren“ und „trüben“ Tagen statt, weil dies für den Wärmebedarfsgang und das thermische Verhalten des Gebäudes von großer Bedeutung ist. Speziell bei Wärmeerzeugern mit Außentemperatursensor wirkt sich die größere Außentemperaturamplitude an „heiteren“ Tagen erheblich auf den Betrieb der Heizkessel aus.

Als Kriterium dazu dient der Bedeckungsgrad N , der in Achteln angibt, welcher Anteil des Himmels mit Wolken bedeckt ist. Die Extremwerte „Null“ und „Eins“ werden nur ausgewiesen, wenn gar keine Wolke beziehungsweise kein blauer Fleck am Himmel zu sehen ist. Nach /DIN 4710/ zeichnen sich „heitere“ Tage mit einem $N < 0,8$ und „trübe“ Tage mit einem $N \geq 0,8$ aus. Die Analyse des Testreferenzjahrs 8 nach den genannten Kriterien führt zu den in **Tabelle 4-3** dargestellten charakteristischen Taggruppen.

Die Anzahl der Tage einer Taggruppe, abhängig vom Typ „heiter“ oder „trüb“, liegt bei unsanierten Gebäuden an Wintertagen bei 67 beziehungsweise 73 Tagen, an Übergangstagen bei 70 beziehungsweise 69 Tagen und an Sommertagen bei 67 beziehungsweise 19 Tagen. Bei sanierten Gebäuden verschiebt sich die Anzahl der Tage einer Periode von 139 auf 111 Tage für die Taggruppe „Übergangstage“ und von 86 auf 114 Tage für die Taggruppe „Sommertage“. Da die Rahmenbedingungen für die Taggruppe „Wintertage“ für das unsanierte und sanierte Gebäude gleich sind, bleiben diese Werte unverändert.

Tabelle 4-3: Charakteristik der einzelnen Taggruppen des Testreferenzjahrs 8 für unsanierte und sanierte Gebäude

	Einheit	Taggruppe „heiter“		Taggruppe „trüb“		Periode	
		unsaniert	saniert	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert
Sanierungsstand	-	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert
Bedeckungsgrad	-	$N < 0,8$		$N \geq 0,8$		$0 \leq N \leq 1$	
„Wintertag“							
Anzahl der Tage	-	67	67	73	73	140	140
Außentemperaturbereich	°C	$T_A < 5$	$T_A < 5$	$T_A < 5$	$T_A < 5$	$T_A < 5$	$T_A < 5$
Durchschnittstemperatur	°C	-0,6	-0,6	0,8	0,8	0,1	0,1
„Übergangstag“							
Anzahl der Tage	-	70	50	69	61	139	111
Außentemperaturbereich	°C	$5 \leq T_A \leq 15$	$5 \leq T_A \leq 13$	$5 \leq T_A \leq 15$	$5 \leq T_A \leq 13$	$5 \leq T_A \leq 15$	$5 \leq T_A \leq 13$
Durchschnittstemperatur	°C	10,8	9,6	9,2	8,6	10,0	9,0
„Sommertag“							
Anzahl der Tage	-	67	87	19	27	86	114
Außentemperaturbereich	°C	$T_A > 15$	$T_A > 13$	$T_A > 15$	$T_A > 13$	$T_A > 15$	$T_A > 13$
Durchschnittstemperatur	°C	18,5	17,4	17,1	16,2	18,2	17,1

Die für den Betrieb des Prüfstands benötigten Verläufe des Heizwärmebedarfs in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten wurden mit Hilfe des Gebäude- und Anlagensimulationsprogramms /TRNSYS/ für ein gesamtes Jahr erstellt. Als Eingangsgrößen dienten unter anderem das TRY 8, die Kenndaten der Referenzobjekte, die Vor-Ort-Messungen und die messtechnisch zu untersuchenden Wärmeerzeuger, in Abbildung 4-4 als Prüfling bezeichnet. Ferner

flossen typische Temperaturspreizungen zwischen Heizungsvor- und Heizungsrücklauf und die ermittelten Betriebszeiten von Tag- und Nachtbetrieb der Heizungsanlage aus den Vor-Ort-Messungen ein. Die zur Simulation benötigten Vorgabedaten des Wärmereizgers wie Kesseltyp, maximale Nennleistung und die eingestellte Heizkurve fanden ebenfalls Eingang in das Simulationsprogramm.

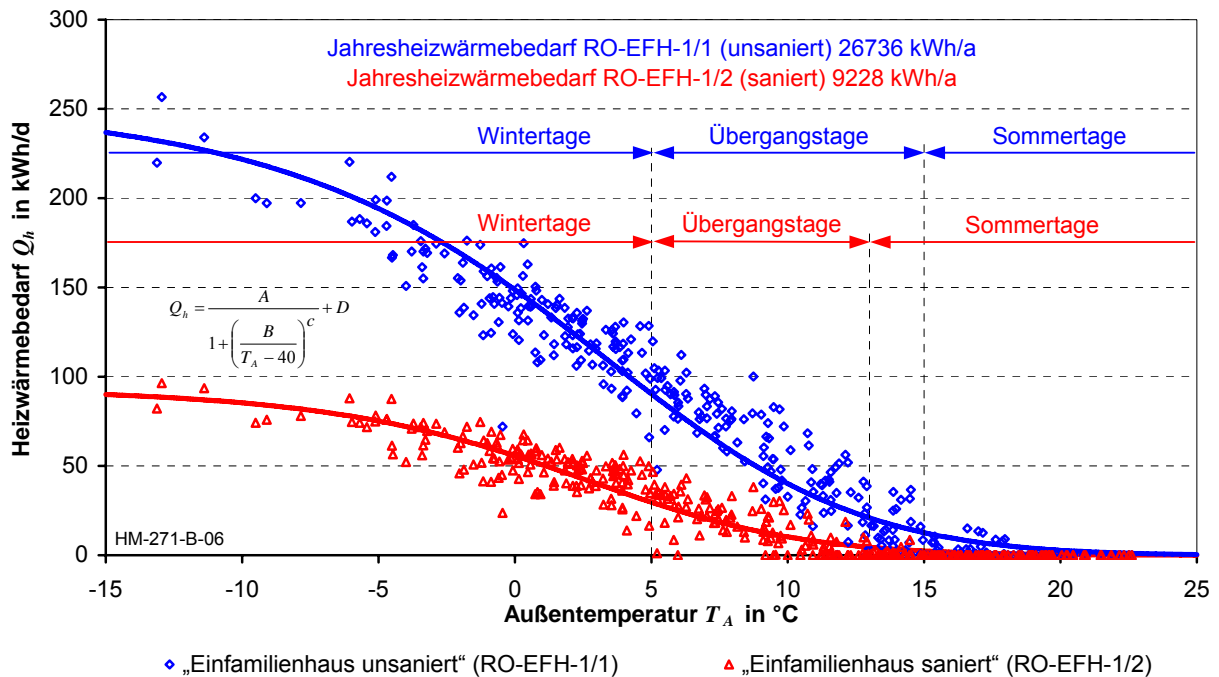


Abbildung 4-6: Heizwärmebedarfswerte und sigmoide Approximation für das „Einfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“ in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur

In **Abbildung 4-6** sind die Temperaturbereiche der Taggruppen, die täglichen Heizwärmebedarfswerte und die sigmoide Approximation für die Referenzobjekte „unsaniertes“ und „saniertes Einfamilienhaus“ abhängig von der mittleren Tagesaußentemperatur angegeben. Der Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Außentemperatur kann über nachfolgende Sigmoid-Funktion in sehr guter Näherung analytisch abgebildet werden:

$$Q_h = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T_A - x_0}\right)^C} + D \quad (4.1)$$

mit Q_h : Heizwärmebedarf in kWh/d
 A, B, C, D : Koeffizienten
 x_0 : Koeffizient
 T_A : mittlere Tagesaußentemperatur in °C

Die Koeffizienten der Sigmoid-Funktion der einzelnen Referenzobjekte sind in **Tabelle 4-4** zu finden.

Tabelle 4-4: Koeffizienten der Referenzobjekte „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus“

Messort	A	B	C	D	x_0
„Einfamilienhaus unsaniert“ (RO-EFH-1/1)	255	-38,128	7,000	0	40
„Einfamilienhaus saniert“ (RO-EFH-1/2)	94	-38,300	8,583	0	40
„Mehrfamilienhaus unsaniert“ (RO-MFH-10/1)	740	-37,997	7,933	0	40
„Mehrfamilienhaus saniert“ (RO-MFH-10/2)	470	-39,896	7,600	0	40

Dabei lassen sich drei Temperaturbereiche voneinander unterscheiden. Während sich bei hohen Außentemperaturen (Sommertage) kein Heizwärmebedarf ergibt, steigt dieser mit sinkender Temperatur – nahezu linear – steil an und läuft bei sehr tiefen Temperaturen gegen einen konstanten Wert. Der Verlauf des Heizwärmebedarfs speziell bei geringen Außentemperaturen liegt beim unsanierten Referenzobjekt deutlich über dem des sanierten Gebäudes. Die Ergebnisse für das „Mehrfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“ sind in **Abbildung 11-1** im Anhang dargestellt.

Bei der Auswahl des repräsentativen Tages aus der jeweiligen Taggruppe fanden typische Außentemperaturverläufe mit hoher Temperaturamplitude an „heiteren Tagen“ und geringen Temperaturschwankungen an „trüben Tagen“ Beachtung. Dies ist durch eine möglichst geringe Varianz s^2 der 15-Minuten-Werte der Außentemperatur des repräsentativen Tages zu den 15-Minuten-Werten aus allen Tagen der betrachteten Gruppe nach folgender Gleichung zu erreichen:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \quad (4.2)$$

mit s^2 : Varianz

n : Anzahl der 15-Minuten-Werte pro Tag

t_i : Temperatur der Viertelstunde

\bar{t} : Mittelwert der Temperatur der Viertelstunde aller Tage einer Gruppe

Die Kombination aus minimaler Differenz zur Durchschnittstemperatur und zum durchschnittlichen Heizwärmebedarf der Taggruppe sowie geringer Varianz der 15-Minuten-Werte der Außentemperatur und des Heizwärmebedarfs entscheidet über die Eignung als repräsentativer Tag für eine Taggruppe. Die Berechnung der Varianz des Heizwärmebedarfs kann dabei analog zur Berechnung der Varianz der Außentemperatur vorgenommen werden. Die ermittelten repräsentativen Tage für das „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus unsaniert“ sind in **Tabelle 4-5** abgebildet.

Somit wären für die Konzeption und die messtechnischen Untersuchungen am Wärmeerzeugerprüfstand sechs charakteristische Tageslastgänge für den Heizwärmebedarf und den Außentemperaturverlauf erforderlich. Die Sommertage „heiter“ und „trüb“ werden im Folgenden zu einem Tag zusammengefasst, da sich der zu untersuchende Wärmeerzeuger in der Sommerperiode auf Sommerbetrieb umstellt und nur zur reinen Warmwasserbereitung dienen soll. Aus diesem Grund findet der Außentemperaturverlauf des Tagtyps „Sommertag heiter“ Verwendung beim Betrieb des Wärmeerzeugers im Sommerbetrieb.

Tabelle 4-5: Referenztage, Außentemperatur und Wärmebedarf der einzelnen Taggruppen für die Referenzobjekte „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus unsaniert“

	Einheit	Tagtyp „heiter“		Tagtyp „trüb“	
		EFH	MFH	EFH	MFH
„Wintertag“					
Repräsentativer Tag	-	51		82	
Durchschnittstemperatur repräsentativer Tag	°C	-0,57		0,57	
Varianz der Außentemperatur	-	1,97		0,12	
Wärmebedarf der Taggruppe	kWh/Periode	9389	27739	10224	30924
durchschnittlicher Wärmebedarf	kWh/d	140	414	140	424
Wärmebedarf am repräsentativen Tag	kWh/d	144	417	139	410
„Übergangstag“					
Repräsentativer Tag	-	262		116	
Durchschnittstemperatur repräsentativer Tag	°C	11,21		9,11	
Varianz der Außentemperatur	-	3,18		3,69	
Wärmebedarf der Taggruppe	kWh/Periode	2796	7034	4205	10443
durchschnittlicher Wärmebedarf	kWh/d	40	100	61	151
Wärmebedarf am repräsentativen Tag	kWh/d	40	85	55	144
„Sommertag“					
Repräsentativer Tag	-	210		217	
Durchschnittstemperatur repräsentativer Tag	°C	18,28		17,15	
Varianz der Außentemperatur	-	1,14		0,72	
Wärmebedarf der Taggruppe	kWh/Periode	116	141	6	0
durchschnittlicher Wärmebedarf	kWh/d	2	2	0	0
Wärmebedarf am repräsentativen Tag	kWh/d	0	0	0	0

4.2.2 Tagesgang des Heizwärmebedarfs

Die Heizwärmebedarfs- und Außentemperaturprofile als Eingangsgrößen für den Wärmeerzeugerprüfstand der entwickelten Tagtypen „Wintertag“ und „Übergangstag“ für das Referenzobjekt „Einfamilienhaus unsaniert“ sind in **Abbildung 4-7** und für das „Mehrfamilienhaus unsaniert“ in **Abbildung 11-2** im Anhang angeführt. Der Verlauf des Heizwärmebedarfs ist charakterisiert durch den abgesenkten Betrieb in den Nachtstunden, die Morgenspitze, den geringeren Verbrauch während des Tages und einen leichten abendlichen Anstieg. Da das Gebäude zuerst auf die Soll-Raumtemperatur und das gesamte Heizsystem auf die – abhängig von der eingestellten Heizkurve und der vorherrschenden Außentemperatur – eingestellte Betriebstemperatur gebracht werden muss, entsteht eine ausgeprägte Morgenspitze. Als Basis dient für das Gebäude dabei eine Absenkung der Soll-Raumtemperatur um 3 K in der Zeit von

22:00 Uhr bis 6:00 Uhr. An den Wintertagen ist erst wieder ab 3:00 Uhr Energie zur Aufrechterhaltung der abgesenkten Soll-Raumtemperatur nötig.

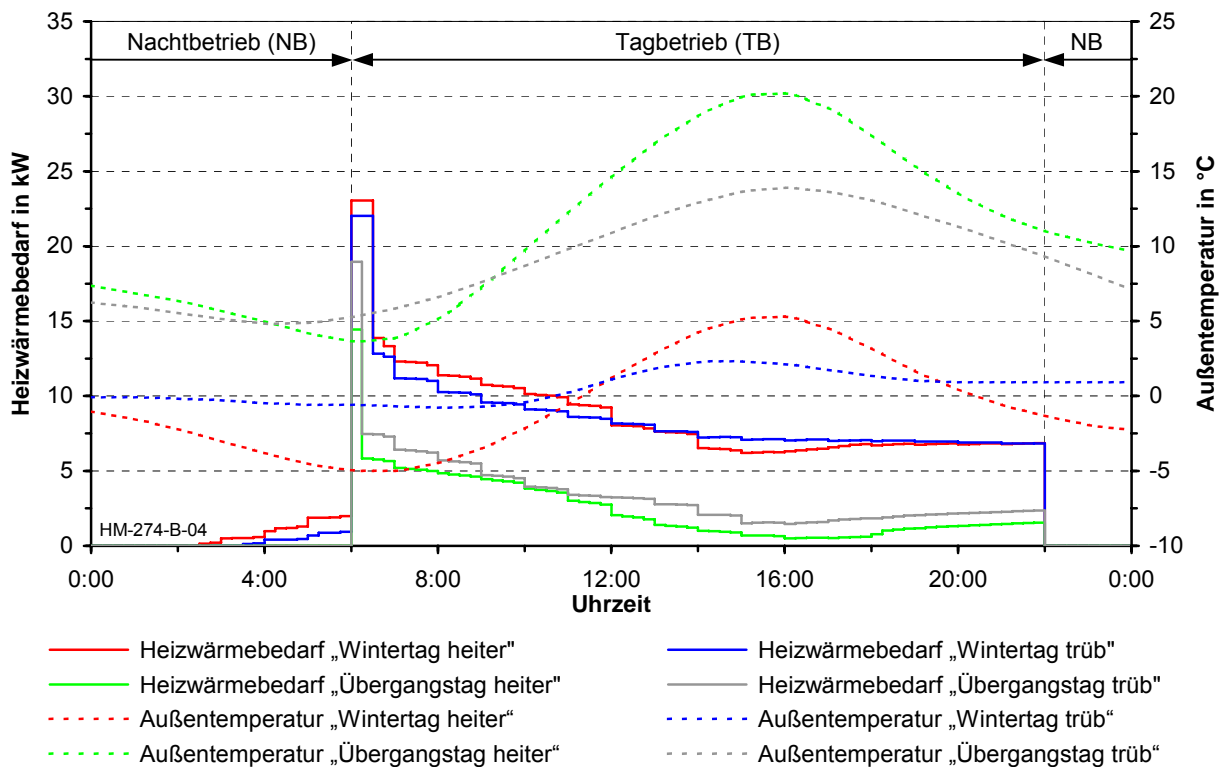


Abbildung 4-7: Heizwärmebedarfs- und Außentemperaturprofile der Referenztage für den Gebäudetyp „Einfamilienhaus unsaniert“

Der Verlauf der Außentemperatur an den Tagtypen „heiter“ ist gekennzeichnet durch eine große Temperaturamplitude von bis zu 16 K mit einem Maximum zwischen 15:00 Uhr und 16:00 Uhr. An den „trüb“ Tagen ähnelt der charakteristische Temperaturgang zwar den „heiteren“ Tagen, der Tagesgang der Außentemperatur verläuft jedoch deutlich flacher. Der Verlauf der Heizwärmebedarfskurve während des Tagbetriebs besitzt ein Minimum zeitlich leicht versetzt zum Maximum der Außentemperatur, was auf den daraus resultierenden geringeren Energiebedarf und auf die Trägheit des Gebäudes zurückzuführen ist.

4.3 Referenzlastgänge für die zentrale Warmwasserversorgung

Zur Ermittlung des Normnutzungsgrads von Heizkesseln in Wohngebäuden sind an unterschiedlichsten Stellen der entsprechenden Normen Trinkwarmwasserbedarfsgänge zu finden. Diese gestatten es zwar, verschiedene Geräte diverser Hersteller miteinander zu vergleichen, repräsentieren allerdings keinen typischen oder durchschnittlichen Anwendungsfall. So werden zum Beispiel bei praxisfern hohen Warmwasserzapfmengen auch praxisfern hohe Nutzungsgrade ausgewiesen. **Tabelle 4-6** bietet eine Übersicht der in /DIN 4702-8/ und /DIN EN 13203-2/ enthaltenen Warmwasserzapfprofile. /DIN 4702-8/ gibt dabei für sechs

verschiedene Kesselleistungsklassen Warmwasserentnahmemengen-Profile an. Die sehr große Entnahmemenge dieser Zapfprofile am Profilende, wie in **Abbildung 4-8** oben dargestellt, dient dazu, eine Aufladung des Warmwasserspeichers am Profilende zu erreichen und damit die Bilanzierung zu erleichtern. /DIN EN 13203-2/ definiert hingegen eine Anzahl täglicher Zapfprogramme für die häusliche Warmwasserverwendung in der Küche, zum Duschen und Baden und für Kombinationen dieser Verwendungsarten. Bei diesen Profilen handelt es sich um fünf Warmwasserzapfprogramme. Das Zapfprogramm Nummer 3 (Küche/Dusche/Baden) ist in **Abbildung 4-8** unten veranschaulicht.

Tabelle 4-6: Gegenüberstellung einiger Norm-Warmwasserzapfprofile

Bezeichnung	Warmwasserentnahmeenergie kWh/d	Warmwasserentnahmemenge l/d
Zapfprogramm nach DIN 4702 Teil 8¹		
ZP 120 (Kesselleistung bis 20 kW)	7,0 ²	120
ZP 160 (Kesselleistung über 20 kW bis 32 kW)	9,3 ²	160
ZP 240 (Kesselleistung über 32 kW bis 46 kW)	14,0 ²	240
ZP 320 (Kesselleistung über 46 kW bis 60 kW)	18,6 ²	320
ZP 480 (Kesselleistung über 60 kW bis 80 kW)	27,9 ²	480
ZP 640 (Kesselleistung über 80 kW bis 120 kW)	37,2 ²	640
Zapfprogramme nach DIN EN 13203-2³		
Zapfprogramm Nr. 1	2,1	36 ²
Zapfprogramm Nr. 2	5,845	100,2 ²
Zapfprogramm Nr. 3	11,655	199,8 ²
Zapfprogramm Nr. 4	19,07	325 ²
Zapfprogramm Nr. 5	24,53	420 ²

¹ gilt für die Ermittlung des Norm-Nutzungsgrads und des Norm-Emissionsfaktors von Heizkesseln

² bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Warmwassertemperatur von 60 °C

³ gilt für gasbeheizte Geräte, Durchlaufwasserheizer und Kombi-Kessel mit einer maximalen Wärmebelastung von 70 kW und einem Speichervolumen ≤ 300 l

Alle zu Prüfzwecken angegebenen Verbräuche beziehen sich auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C. Die Realität zeigt allerdings, dass die Temperaturen an der Zapfstelle – unter anderem abhängig von den Zapfpausen und dem Aufbau des Verteilsystems – erheblich von dieser Temperatur abweichen (siehe Abschnitt 3.3).

Da die vorgenannten Zapfprofile ausschließlich zum Gerätevergleich dienen, bleiben Fragen wie etwa zu Auswirkungen

- des Aufbaus des Warmwasserverteilsystems (Rohrwerkstoff, Isoliergüte, Leitungsführung),
- der Betriebsart (Zirkulations-, Stichleitungsbetrieb) oder
- typischer und charakteristischer Tagesgänge der Nutzenergieentnahme (Warmwasser)

auf den Energieverbrauch offen.

Aussagen zur tatsächlich an der Zapfstelle entnommenen Energie- beziehungsweise Wassermenge und zu Auswirkungen der einzelnen auftretenden Verluste und deren Rückwirkungen

auf den Warmwasserspeicher sind mit den vorhandenen Zapfprogrammen nicht möglich. Zum Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands wurden aus diesem Grund spezielle Warmwasserfahrprofile entwickelt, deren Beschreibung sich der nachfolgende Abschnitt widmet.

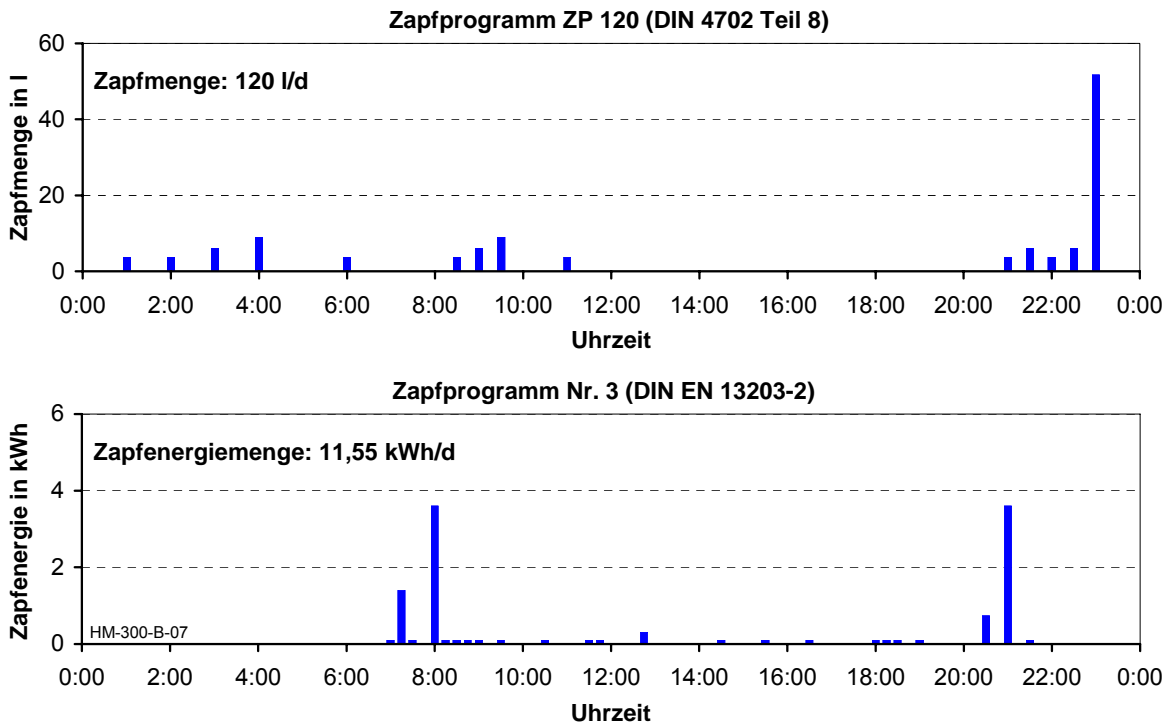


Abbildung 4-8: Warmwasserzapfprogramm ZP 120 (DIN 4702 Teil 8) und Nr. 3 (DIN EN 13203-2)

Aus den in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 geschilderten und bilanzierten Vor-Ort-Messungen und einer Reihe weiterer durchgeführter Messreihen sind – abhängig vom Zapfstellentyp – mittlere Zapfenergiemengen und -volumenströme bestimmbar. Die Einteilung der Zapfstellentypen erfolgt dabei in Handwaschbecken, Dusche und Badewanne.

Tabelle 4-7: Mittlere Zapfenergiemengen und -volumenströme abhängig vom Zapfstellentyp beim Zapfvorgang in einem Einfamilienhaus

Zapfstellentyp	Energiemenge je Zapfung ¹ kWh/Zapfung	einmalige Entnahmemenge ¹ l/Zapfung	mittlerer Zapfvolumenstrom l/min
Handwaschbecken	0,105	3,23	5
Dusche	1,450	44,6	7
Badewanne	5,230	160,8	15

¹ bezogen auf eine Zapftemperatur von 38°C und eine Kaltwassertemperatur von 10°C

In **Tabelle 4-7** sind die Energiemengen und Volumenströme je Zapfung für den Gebäudetyp „Einfamilienhaus“, bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C, verzeichnet. Die Spanne der je Zapfung entnommenen Energiemenge liegt dabei zwischen 0,105 kWh beim Handwaschbecken und 5,23 kWh bei der Badewanne. Mit

Hilfe der gemessenen Warmwasserverbrauchswerte können für jeden Gebäudetyp Wochenmittelwerte in Abhängigkeit vom Zapfstellentyp gebildet werden. Daraus wird deutlich, mit welcher Häufigkeit die einzelnen Zapfstellentypen Verwendung finden.

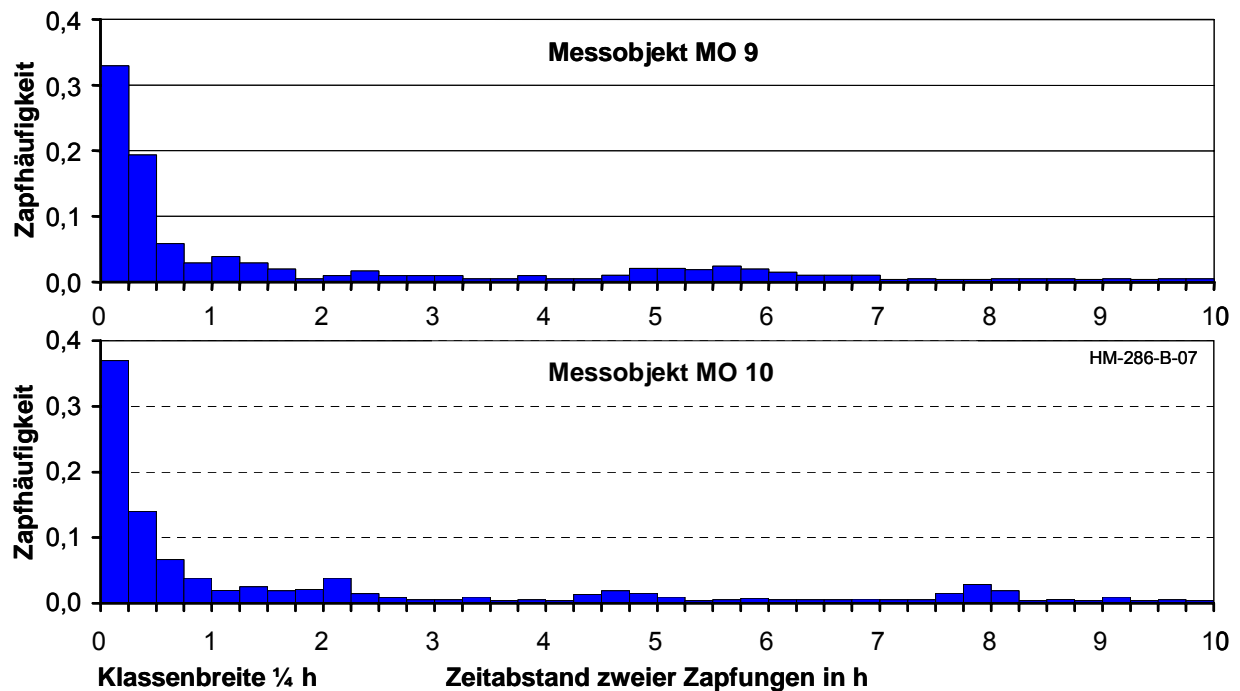


Abbildung 4-9: Zapfhäufigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Zeitabstand zweier Zapfungen am Beispiel der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme MO 9 und MO 10

Abbildung 4-9 enthält die Zapfhäufigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Zeitabstand zweier Zapfungen am Beispiel der untersuchten Vor-Ort-Objekte MO 9 und MO 10. Wie man sieht, liegen bei über einem Drittel aller Zapfungen die Zeitabstände zwischen zwei Zapfungen unter einer Viertelstunde. Der Anstieg der Zapfhäufigkeit nach einem Zeitabstand von fünf bis acht Stunden ist auf die Schlafgewohnheiten der Nutzer und die berufsbedingten Abwesenheitszeiten zurückzuführen. Die Häufigkeitsverteilung ist dabei sehr stark von folgenden Faktoren abhängig:

- Berufstätigkeit und Anzahl der Bewohner
- Anzahl der Kinder
- Anzahl und Art der Zapfstellen
- Aufbau und Betrieb des Warmwasserverteilsystems (Zirkulations- und/oder Stichleitungsbetrieb)
- Haushaltstyp (Ein- bis Mehrfamilienhaushalte)
- Nutzergewohnheiten

Aus den genannten Überlegungen lassen sich Warmwasserzapfprofile in Abhängigkeit von der Zapfstelle ableiten. Die entwickelten Verbrauchsprofile sind beispielhaft für ein Einfamilienhaus mit einem Drei- bis Vierpersonenhaushalt und ein Mehrfamilienhaus mit zehn Haushalten in **Abbildung 4-10** und **Abbildung 4-11** dargestellt. Den Ergebnissen sind nachfolgende Zusammenhänge zugrunde gelegt, die es gestatten, einzelne charakteristische Sachverhalte (typisches Verbraucherverhalten, Zapfstellendaten, Haushaltsgröße) miteinzubeziehen.

$$Q_{N,WW,j} = \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^3 Q_{WW,i} \cdot a_{Z,k,i,j} \cdot x_{Z,k,i,j} \cdot a \quad (4.3)$$

mit $Q_{N,WW}$: Nutzenergieentnahme Warmwasser in kWh/d

i : Zapfstellentyp

1 ... Handwaschbecken

2 ... Dusche

3 ... Badewanne

j : Tagtyp

1 ... Normaltag

2 ... Badetag

3 ... Wochenendtag

k : Stunde des Tages

$Q_{WW,i}$: Zapfenergie je Zapfung und Zapfstellentyp in kWh/Zapfung

a_Z : Anzahl Zapfungen in Anz./(Pers.·d)

$x_{Z,k}$: Anteil der Zapfungen in der Stunde k an den täglichen Zapfungen

a : Anzahl Personen

Dabei fand für das Einfamilienhaus und für einen durchschnittlichen Drei- bis Vierpersonenhaushalt eine Unterscheidung zwischen einem „Normal-“, „Bade-“ und „Wochenendtag“ statt. Die entnommenen Energiemengen lagen zwischen 6,56 kWh („Normaltag“) und 16,26 kWh („Badetag“). Beim Vergleich mit den Norm-Zapfprofilen konnten die morgendlichen Entnahmespitzen bestätigt werden; allerdings traten die abendlichen Zapfvorgänge deutlich früher auf.

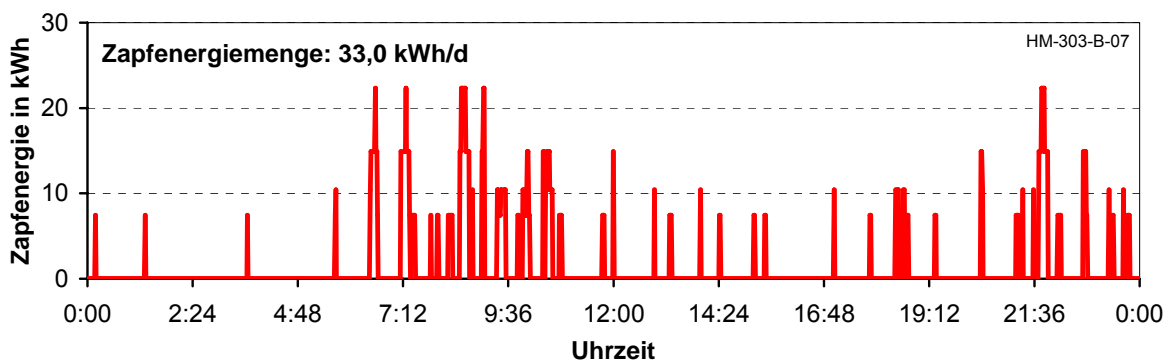


Abbildung 4-10: Warmwasserzapfprofil für den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“

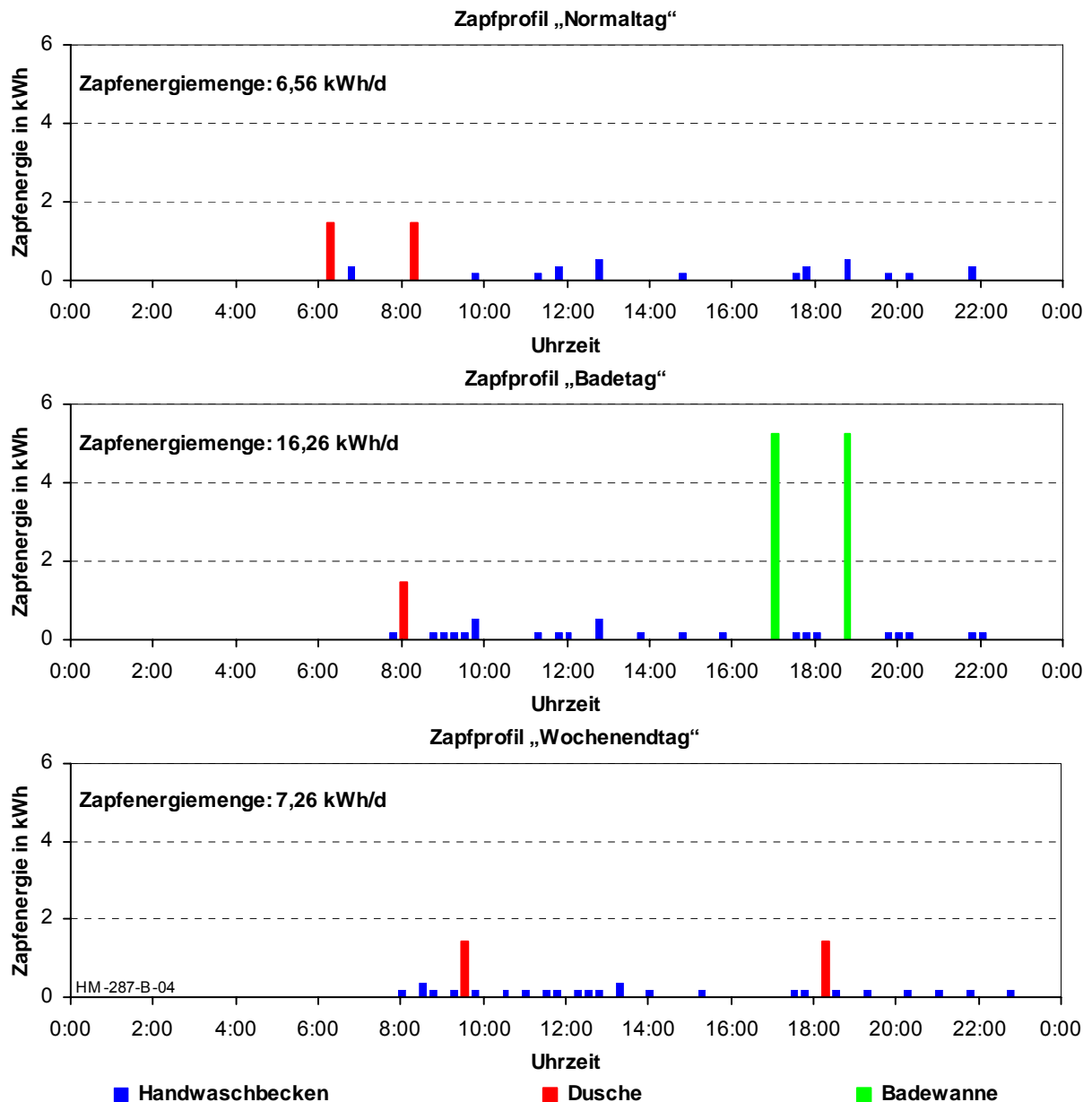


Abbildung 4-11: Warmwasserzapfprofile „Normaltag“, „Badetag“ und „Wochenendtag“ für einen Drei- bis Vierpersonenhaushalt in Abhängigkeit vom Zapfstellentyp

Wie die Vor-Ort-Messungen (Abschnitt 3) zeigen, hängt die dem Warmwasserspeicher entnommene Energiemenge stark von der Güte des Warmwasserverteilsystems ab. Der Aufbau eines vollständigen Verteilsystems mit unterschiedlichen Rohrquerschnitten und -werkstoffen sowie Isolierstandards für Ein- und Mehrfamilienhäuser wäre für eine Nachbildung des Warmwassersystems am Prüfstand sehr zeit- und kostenintensiv. Daher wurde ein Simulationstool zur Berechnung von Warmwasserversorgungssystemen bei dynamischem Betrieb entwickelt. Mit dessen Hilfe ist es möglich, aus den ermittelten Zapfprofilen und vorgegebenen Zirkulationszeiten Warmwasserfahrprofile auf Basis der Warmwasserspeicherentnahme für den Prüfstand zu generieren. Eine Übersicht der Ein- und Ausgangsgrößen des Simulationstools bietet **Abbildung 4-12**.

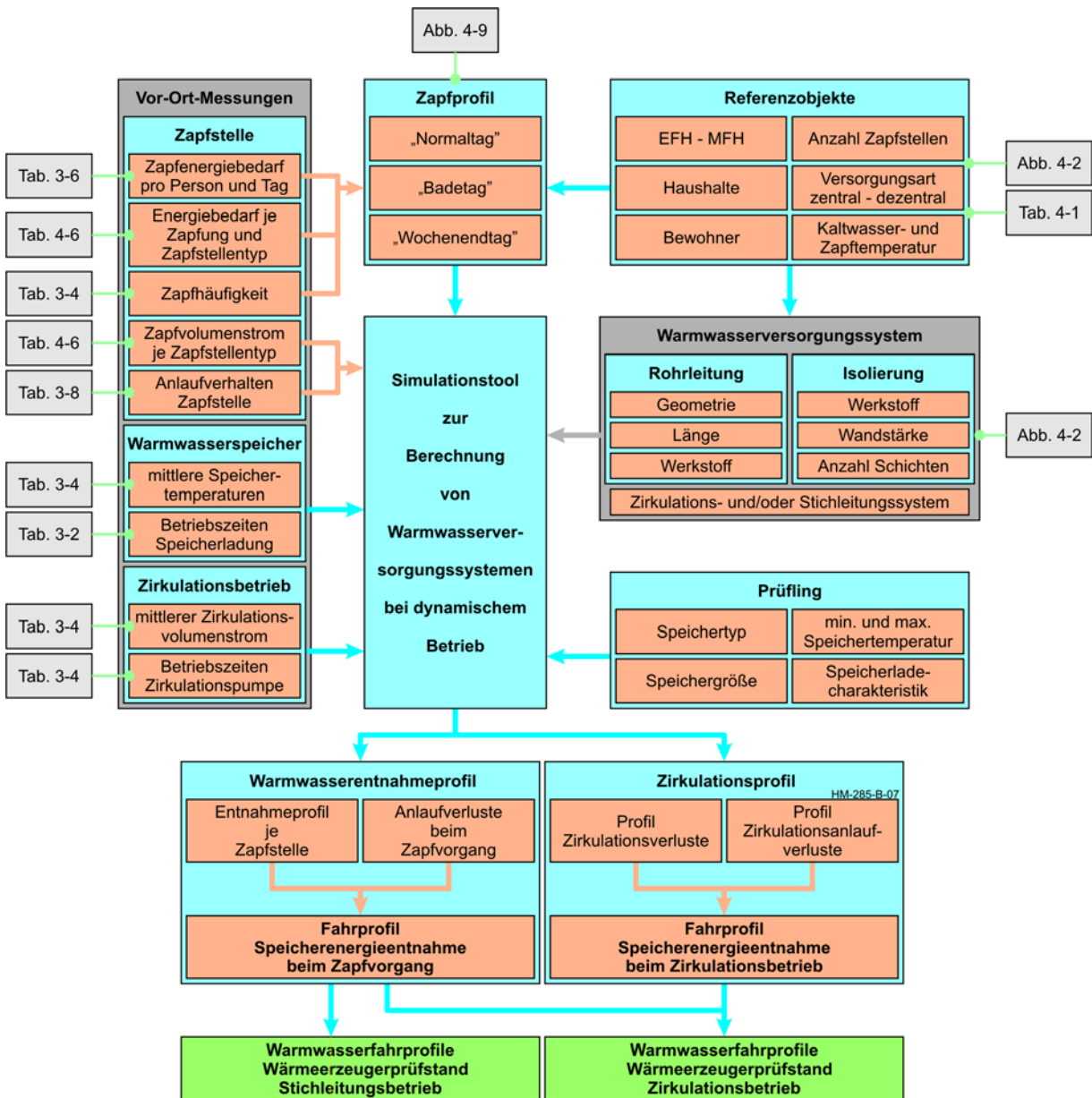


Abbildung 4-12: Übersicht der Ein- und Ausgangsgrößen zur Entwicklung der Warmwasserfahrprofile für den Wärmezeugerprüfstand

Ausgangsbasis für die Erstellung der Fahrplandaten sind das Referenzobjekt (siehe Abschnitt 4.1) mit seinem Warmwasserversorgungssystem, Ergebnisse aus den Vor-Ort-Messungen und daraus abgeleitete Warmwasserzapfprofile. Zu Beginn müssen am Referenzobjekt die Anzahl und Positionen der Zapfstellen sowie die zugehörigen Zapfstellentypen definiert werden. Dabei ist zwischen Küchen-, Handwasch-, Dusch- oder Badewannenarmatur zu unterscheiden. Je nach Versorgungsart der Zapfstelle besteht die Möglichkeit einer Auswahl zwischen zentraler oder dezentraler Warmwasserversorgung (zum Beispiel einem Untertischspeicher). Ausgehend vom Warmwasserspeicher und der Kaltwassereinspeisung ins Gebäude werden dann die Kalt- und Warmwasserleitungen zu den einzelnen Zapfstellen zusammengestellt, deren Länge bestimmt und definiert, welches Rohrleitungsstück bei welchem

Zapfvorgang durchflossen wird. Beim Betrieb als Warmwasserzirkulationssystem ist zusätzlich noch die Rückführung der Zirkulationsleitung von den zu versorgenden Entnahmestellen in den Warmwasserspeicher notwendig. Über spezielle Eingabemasken kann man den einzelnen Leitungsstücken den Werkstoff, die Geometrie und die Isolierstärke zuweisen. In **Abbildung 4-13** ist auszugsweise die Eingabemaske „Vorgabewerte Warmwasserleitung“ des Simulationsprogramms dargestellt.

Warmwasserleitungsparameter

Leitungsnummer	1	2	3	4	5
Werkstoff	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl
Dichte	7880,00	7880,00	7880,00	7880,00	7880,00
spez. Wärmekapazität	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Wärmeleitfähigkeit	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
Leitungslänge	7,930	3,980	0,095	0,095	2,116
Innendurchmesser	19,60	16,00	16,00	19,60	16,00
Wandstärke	1,20	1,00	1,00	1,20	1,00
Elemente Rohrschicht	5	5	5	5	5
Isoliertyp 1	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle
Dichte	100	100	100	100	100
spez. Wärmekapazität	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Wärmeleitfähigkeit	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Aussendurchmesser	74,000	70,000	70,000	74,000	70,000
Wandstärke	26,000	26,000	26,000	26,000	26,000
Elemente Isolierschicht 1	5	5	5	5	5
Isoliertyp 2	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle	Steinwolle
Dichte	100	100	100	100	100
spez. Wärmekapazität	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Wärmeleitfähigkeit	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Aussendurchmesser	74,000	70,000	70,000	74,000	70,000
Wandstärke	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Elemente Isolierschicht 2	0	0	0	0	0
Randbedingung Innen	3	3	3	3	3
Randbedingung Außen	3	3	3	3	3
Raumtemperatur	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Emissionsgrad	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Leitungsführung	frei waagrecht	frei waagrecht	frei waagrecht	frei waagrecht	frei waagrecht

Abbildung 4-13: Eingabemaske „Vorgabewerte Warmwasserleitung“

Als Rohrleitungswerkstoffe stehen Edelstahl, Kupfer, Stahl und Kunststoff zur Verfügung. Die Stoffwerte und handelsüblichen Rohrdimensionen der einzelnen Werkstoffe sind im Programm fest hinterlegt.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Zuteilung der einzelnen Zapfungen der entwickelten Zapfprofile zu den festgelegten Zapfstellen. Für jeden Entnahmevorgang ist ein bestimmter Zapfvolumenstrom und eine bestimmte Zapftemperatur einstellbar. Am Warmwasserspeicher besteht die Auswahl zwischen der Vorgabe einer konstanten oder einer minimalen und maximalen Temperatur. Bei Unterschreitung der Minimaltemperatur wird der Warmwasserspeicher sowohl über ein leistungs-, als auch zeitabhängig einstellbares Profil geladen. Somit ist es möglich, am Prüfstand aufgenommene Ladecharakteristika des Warmwasserspeichers zu hinterlegen. Zirkulationsvolumenstrom und Betriebszeiten der Zirkulationspumpe sind ebenfalls frei wählbar. Zur Vermeidung von Eingabefehlern stehen für jedes Referenzobjekt

Vorgabedateien zur Verfügung, die je nach Bedarf einlesbar sind. Darin sind die Zapfstellenanzahl und -positionen sowie das Verteilsystem hinterlegt. Nach Eingabe aller Parameter ist die Simulation startbereit.

Die Simulation arbeitet auf Basis des Differenzenverfahrens, wobei das gesamte Leitungssystem axial in sehr kleine Rohrleitungselemente untergliedert wird. Anschließend findet eine Unterteilung der einzelnen Rohrleitungselemente in sehr kleine Schichten in radialer Richtung, abhängig von den gewählten Randbedingungen an den Rohrrinnen- und -außenseiten, statt. Für jeden Zeitschritt lassen sich damit die Temperaturen aller Schichten und Elementgrenzen auf Grundlage der vorhergehenden Temperatur berechnen. Bei Zapfvorgängen beziehungsweise beim Betrieb der Zirkulationspumpe werden die dem Warmwasserspeicher entnommenen Wasservolumina in diskreten Schritten durch die einzelnen Rohrleitungselemente geschoben. Dabei berechnet das Tool die Auskühlung oder Aufheizung des Wasservolumens und deren Auswirkungen auf die Rohr- und Isolierschichten.

Für den Wärmestrom durch die Rohraußenfläche (Rohr inklusive Isolierung) gilt allgemein für jeden Zeitpunkt:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t_{wa} - t_L) \cdot A = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \quad (4.4)$$

beziehungsweise für die Rohrinneinnenseite:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t_F - t_{wi}) \cdot A = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \quad (4.5)$$

- mit \dot{Q} : Wärmestrom W
 α : Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)
 $t_{w,i/a}$: Wandtemperatur innen/außen in °C
 t_L : Lufttemperatur in °C
 t_F : Fluidtemperatur in °C
 A : Oberfläche m²
 λ : Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)

An den Elementgrenzen zwischen Rohr und Isolierung gilt für jeden Zeitpunkt:

$$\dot{Q} = -\lambda_1 \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_1 \cdot A = -\lambda_2 \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_2 \cdot A \quad (4.6)$$

- mit \dot{Q} : Wärmestrom W
 A : Trennfläche m²
 $\lambda_{1,2}$: Wärmeleitfähigkeit Werkstoff 1 bzw. Werkstoff 2 in W/(m·K)

Während der Simulation können in den einzelnen Ergebnismasken die Temperatur-, Durchfluss-, Verlust- und Energiemengen für jedes Leitungsstück, jede Warmwasserzapfstelle, die

gesamte Kaltwasser-, Warmwasser- und Zirkulationsleitung sowie der Warmwasserspeicher betrachtet werden. In **Abbildung 4-14** ist beispielhaft die Anzeigemaske „Ergebnisse Zirkulationskreis“ demonstriert.

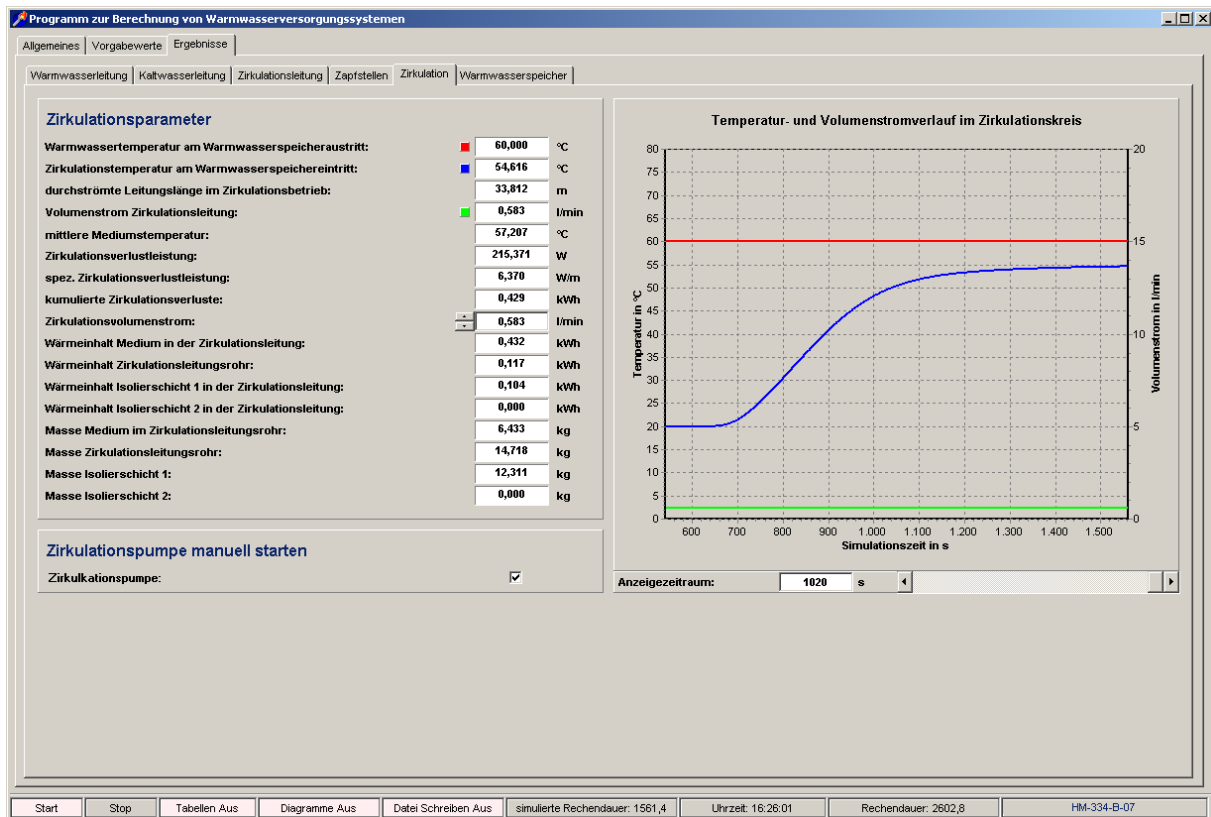


Abbildung 4-14: Anzeigemaske „Ergebnisse Zirkulationskreis“

Nach der Berechnung eines ganzen Tages liegt als Ergebnis ein Warmwasserspeicherentnahmeprofil vor, das aufgrund der durchgeführten Zapfungen differenziert ist nach Zapfstellen, Energieentnahmemengen und Verlusten. Beim Betrieb einer Zirkulationspumpe wird ein zusätzliches Profil erstellt, das die einzelnen Verlustarten und Durchflüsse enthält. Darüber hinaus speichert das Programm alle während der Simulation durchgeführten Bilanzierungen, die einzelnen Temperaturen und Durchflüsse.

Das Simulationstool erlaubt es somit, einzelne Parameter wie

- Geometrie der Verteilungen,
- Rohrwerkstoff,
- Anzahl und Dauer von Zapfvorgängen,
- Zirkulationsstarts und -dauer sowie -durchfluss,
- Eigenheiten des Prüflings und
- Isolierstandards

als Einflussgröße zu identifizieren und in den Auswirkungen zu quantifizieren. Einige Ergebnisse der durchgeführten Simulationen sind nachfolgend aufgeführt und kurz beschrieben.

4.3.1 Simulationsergebnisse

Zur Überprüfung der Ergebnisse des Simulationstools erfolgte ein Vergleich mit real gemessenen Verläufen. Dabei floss das vorhandene Verteilsystem der Vor-Ort-Objekte (zum Beispiel Leitungslängen, Rohrwerkstoffe und -geometrie sowie Isolierstärken) nach einer detaillierten Bestandsaufnahme in die Berechnung ein. In **Abbildung 4-15** ist exemplarisch der gemessene und berechnete Anlaufvorgang bei einer Warmwasserzapfung an einem Küchenspülbecken dargestellt. Dies zeigt, dass die Ergebnisse der Berechnung den realen Fall widerspiegeln.

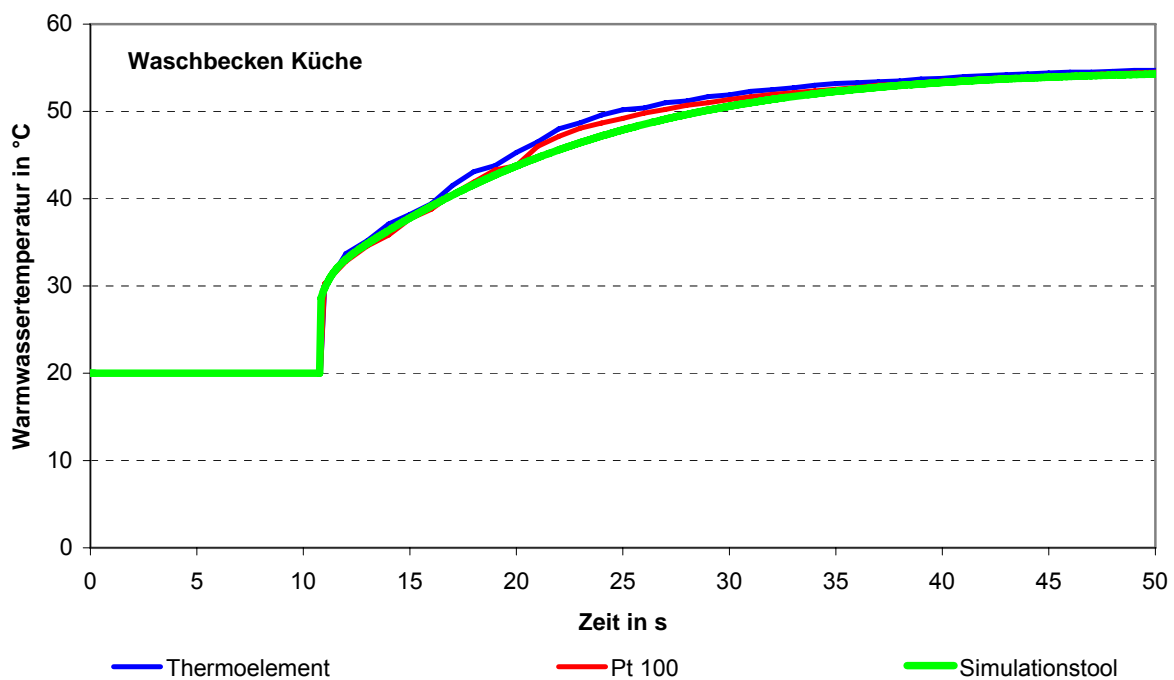


Abbildung 4-15: Messergebnisse und rechnerische Simulation eines Temperaturverlaufs am Beispiel einer Küchenzapfstelle

In **Abbildung 4-16** ist im linken Diagramm die Zirkulationsverlustleistung eines Warmwasserverteilsystems aus Edelstahl für das definierte Referenzgebäude „Einfamilienhaus“, abhängig von der Warmwasserspeicheraustrittstemperatur für mehrere Isolierstandards, zu sehen. Die Zirkulationsverlustleistung erreicht dabei Werte zwischen rund 530 W und 1000 W bei unisolierten Leitungen und 150 W bis 250 W bei Isolierung nach /HeizAnIV/ und Entnahmetemperaturen zwischen 50 °C und 70 °C.

Um am Prüfstand unterschiedliche Warmwasserspeichertemperaturen und somit sich in der Realität ändernde Zirkulationsverlustleistungen abbilden zu können, wurde, wie im rechten Bild veranschaulicht, ein Korrekturfaktor ermittelt. Dieser erlaubt es, durch Vorgabe der Zirkulationsverlustleistung für eine Temperatur von 60 °C die tatsächliche Verlustleistung abhängig von der vorhandenen Temperatur zu bestimmen. Je besser der Isolierstandard, um so geringer die Steigung des Korrekturfaktors.

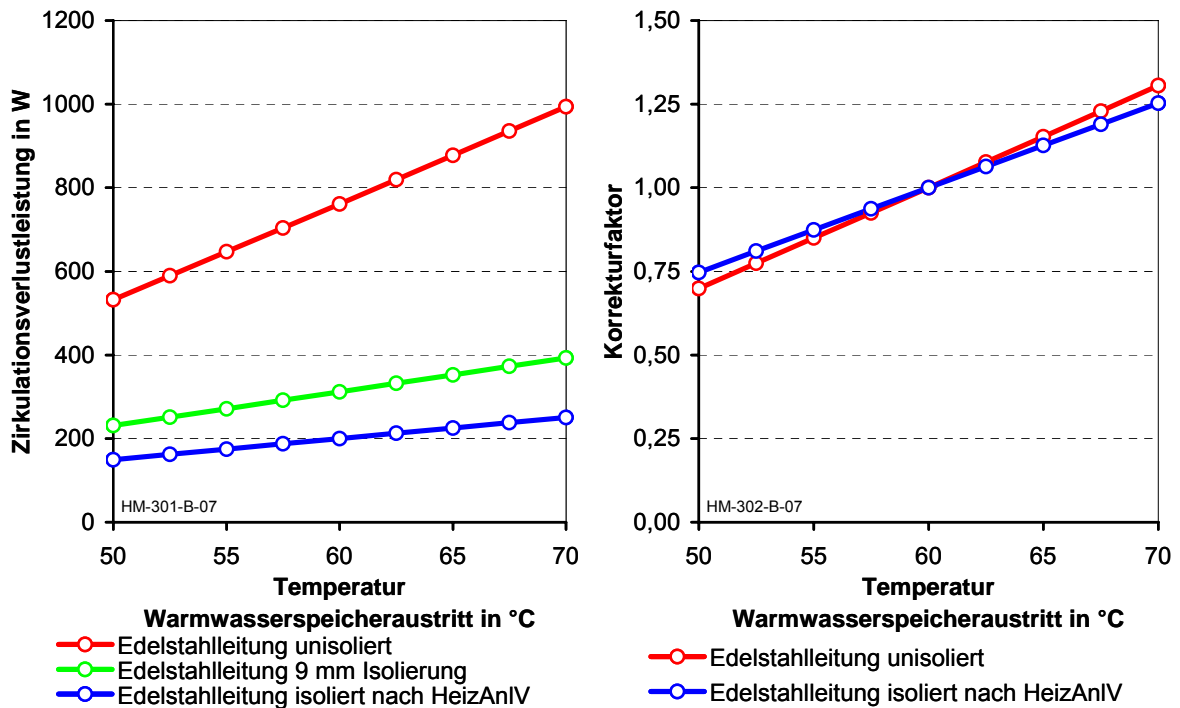


Abbildung 4-16: Zirkulationsverlustleistung und Temperaturkorrekturfaktor eines Zirkulationssystems aus Edelstahl mit unterschiedlichen Isolierstandards

Die zugehörigen Verläufe der Zirkulationstemperatur am Eintritt in den Warmwasserspeicher und die mittlere Mediumtemperatur in der Zirkulationsleitung beim Start- und Stoppvorgang der Zirkulationspumpe zeigt **Abbildung 4-17**. Das Kriterium für die Auswahl des Durchflusses im Zirkulationskreis ist die Vorgabe, dass bei einer Warmwasseraustrittstemperatur von 60 °C die maximal nach Arbeitsblatt W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ erlaubte Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Warmwasserspeicheraustritt und Zirkulationswiedereintritt eingehalten wird. Dies bedingt einen höheren Durchfluss im Zirkulationskreis wegen der größeren Verlustleistung im unisolierten Verteilsystem und damit einen schnelleren Anstieg der Zirkulationskreismittel- und -endtemperatur. Ist ohne Isolierung ein Durchfluss von rund 2,6 l/min nötig, reicht dagegen bei einer Isolierung nach der /HeizAnIV/ ein Durchfluss von rund 0,6 l/min aus, um die gewünschte Temperaturdifferenz einzuhalten.

Während die Mediummitteltemperatur ab dem Startzeitpunkt der Zirkulationspumpe zu steigen beginnt, nimmt die Temperatur am Wiedereintritt in den Warmwasserspeicher erst nach einer bestimmten Totzeit zu. Die Steigung des Temperaturverlaufs nimmt dabei mit geringerem Durchfluss ab. Schaltet die Zirkulationspumpe aus, kommt es abhängig von der Isoliergüte zum Auskühlen der Rohrleitung. Während im unisolierten Zirkulationssystem bereits nach rund zwei Stunden die Raumtemperatur erreicht ist, liegt die Temperatur im gut isolierten System noch bei rund 30 °C.

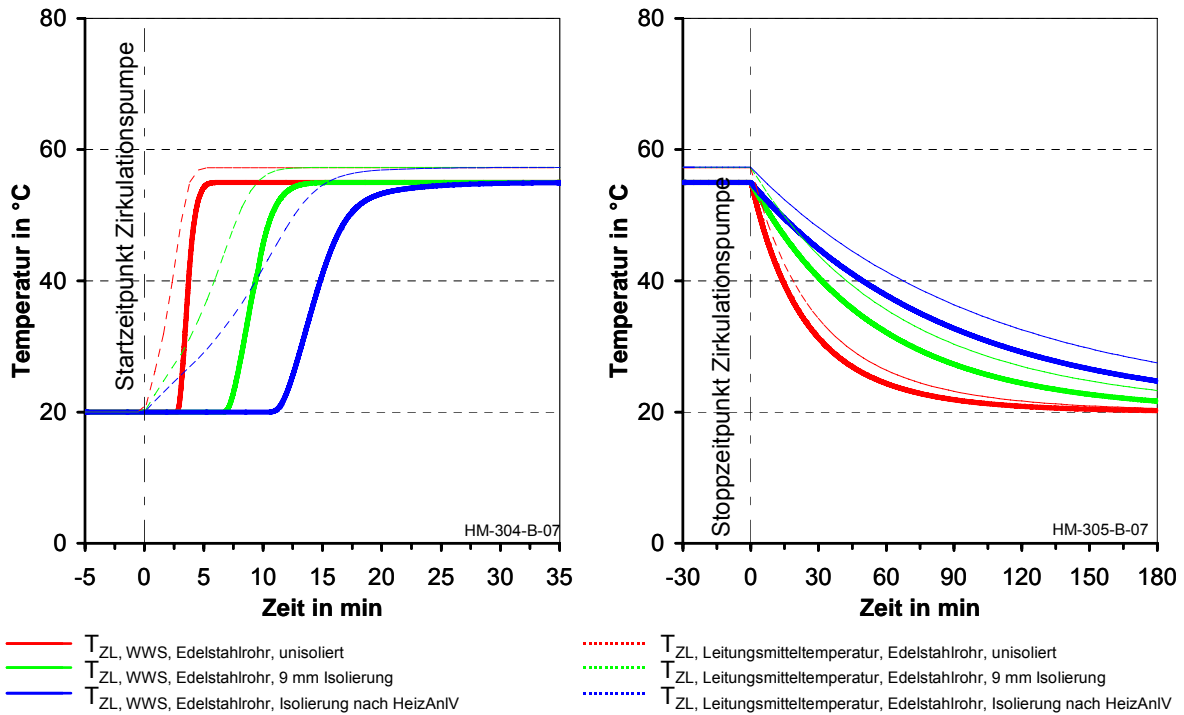


Abbildung 4-17: Temperaturverlauf beim Zirkulationsstart- und -stoppvorgang eines Zirkulationssystems aus Edelstahl mit unterschiedlichen Isolierstandards

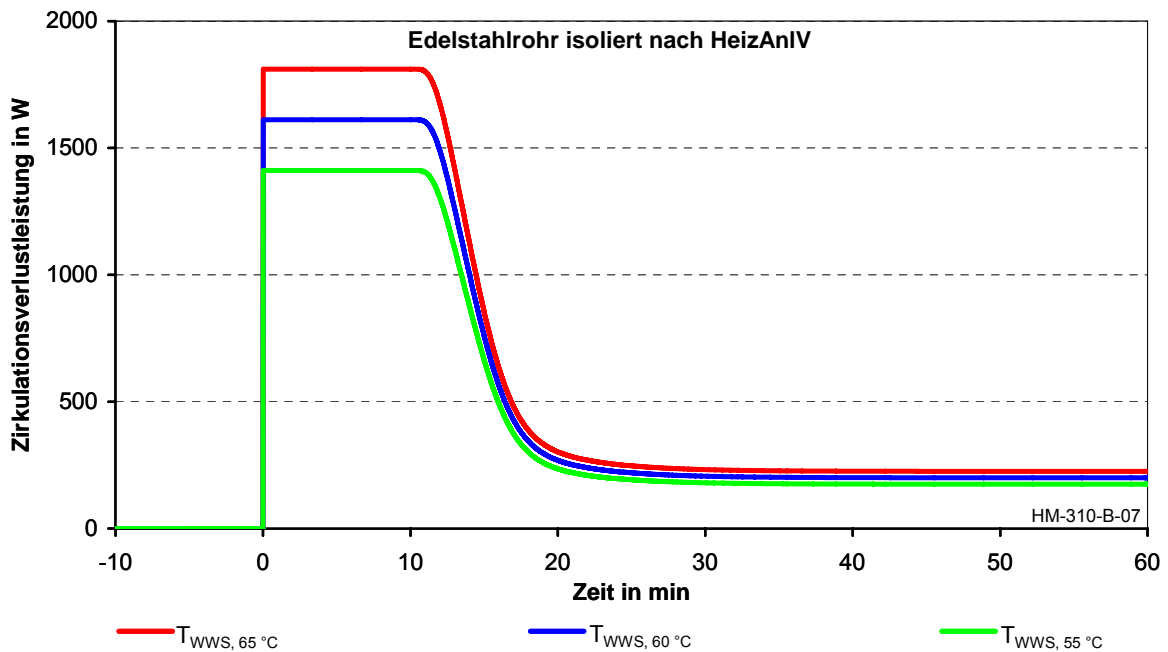


Abbildung 4-18: Zirkulationsverlustleistung bei unterschiedlichen Warmwasserspeichertemperaturen (T_{WWS})

Abbildung 4-18 zeigt die Zirkulationsverlustleistung beim Zirkulationsstart in Abhängigkeit von der Laufzeit mit der Warmwasserspeicheraustrittstemperatur als Parameter. Während die Verlustleistungen im eingeschwungenen Zustand bei 175 W beziehungsweise 225 W liegen,

werden beim Zirkulationsstart Anlaufverlustleistungen von 1400 W bis 1800 W in den ersten 15 Minuten erreicht.

Der Verlauf der Verlustleistung für unterschiedliche, nach /HeizAnIV/ isolierte Rohrwerkstoffe beim Anlaufvorgang der Zirkulationspumpe und bei ausgekühltem Warmwasserverteilsystem ist in **Abbildung 4-19** dargestellt. In **Tabelle 4-8** sind die zugehörigen Aufheiz- und stationären Rohrleitungsverluste angeführt.

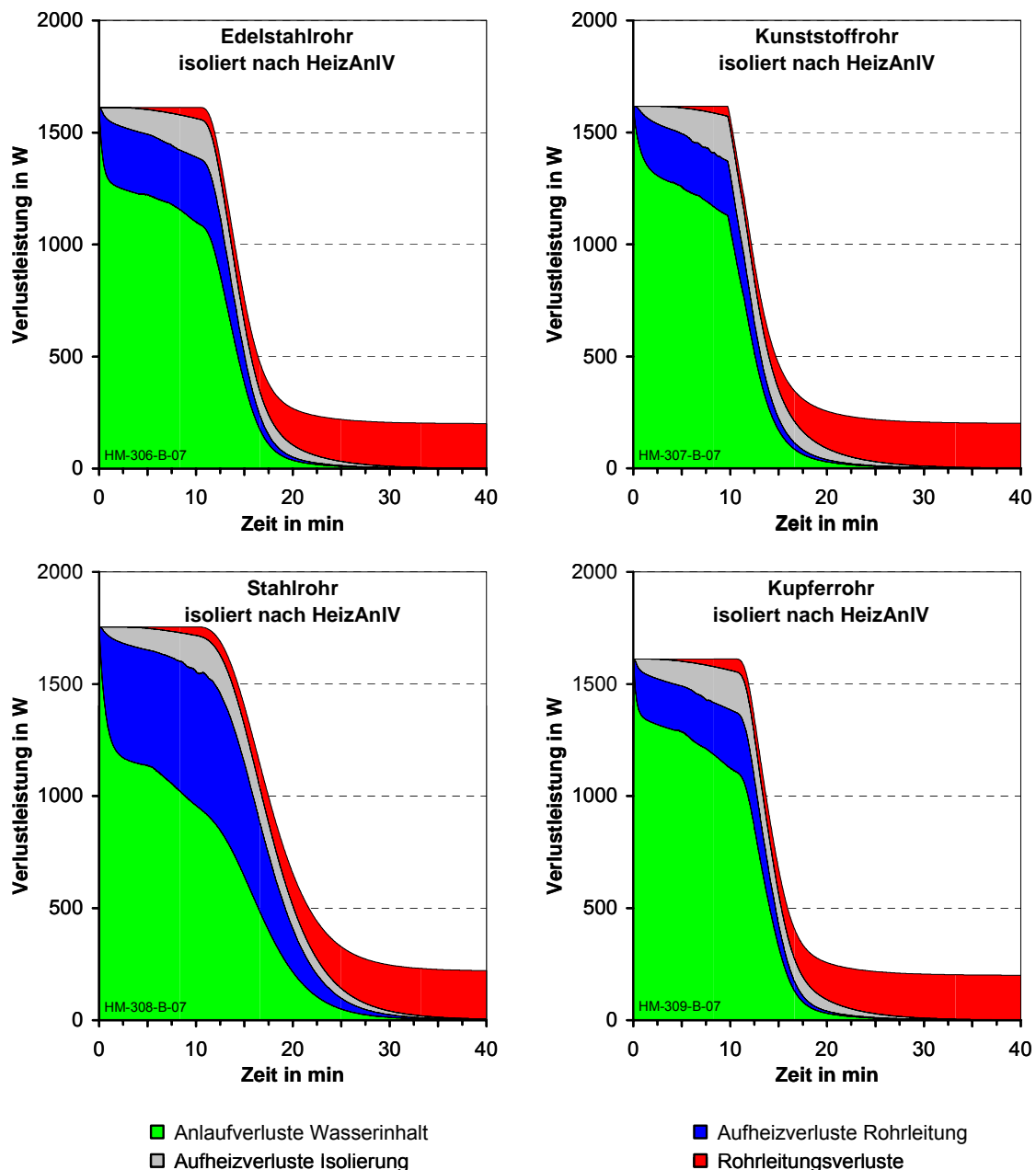


Abbildung 4-19: Verlustleistung unterschiedlicher Rohrleitungsmaterialien beim Zirkulationsstart und bei ausgekühltem Verteilsystem

Den größten Verlustanteil stellt mit circa 0,26 kWh bis 0,30 kWh der Aufheizverlust des Wasserinhalts dar. Bei optimaler Auslegung des Verteilsystems im Referenzgebäude ist der

Wasserinhalt bei Kunststoffrohren aufgrund der im Handel erhältlichen Rohrquerschnitte am geringsten, gefolgt von Edelstahl, Kupfer und Stahl. Die Aufheizverluste der Rohrleitung sind von der Masse und der spezifischen Wärmekapazität des verbauten Rohrwerkstoffes abhängig. Wegen der großen Wandstärken und der daraus resultierenden hohen Massen liegt der Aufheizverlust der Stahlrohrverteilsystems rund dreimal so hoch wie bei Kunststoff- oder Kupferrohren, was sich auch in der gesamten Anlaufverlustleistung widerspiegelt.

Tabelle 4-8: Verluste beim Start der Zirkulationspumpe bei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen

Bezeichnung	Einheit	Edelstahlrohr	Kunststoffrohr	Stahlrohr	Kupferrohr
Aufheizverluste Medium	kWh	0,280	0,259	0,299	0,285
	%	69,45	71,10	56,08	72,13
Aufheizverluste Rohrleitung	kWh	0,076	0,058	0,183	0,063
	%	18,80	15,80	34,20	15,87
Aufheizverluste Isolierung	kWh	0,047	0,048	0,052	0,047
	%	11,75	13,10	9,72	11,90
Summe Aufheizverluste	kWh	0,40	0,37	0,53	0,40
stationäre Rohrleitungsverluste	W/m	5,9	5,9	6,4	5,9

Die unterschiedlichen Rohraufheizverluste führen dazu, dass die Zirkulationstemperatur am Warmwasserspeichereintritt, wie in **Abbildung 4-20** veranschaulicht, bei Kunststoffrohren schneller ansteigt als bei Stahlrohren. Edelstahl- und Kupferrohre verfügen über ähnliche Eigenschaften.

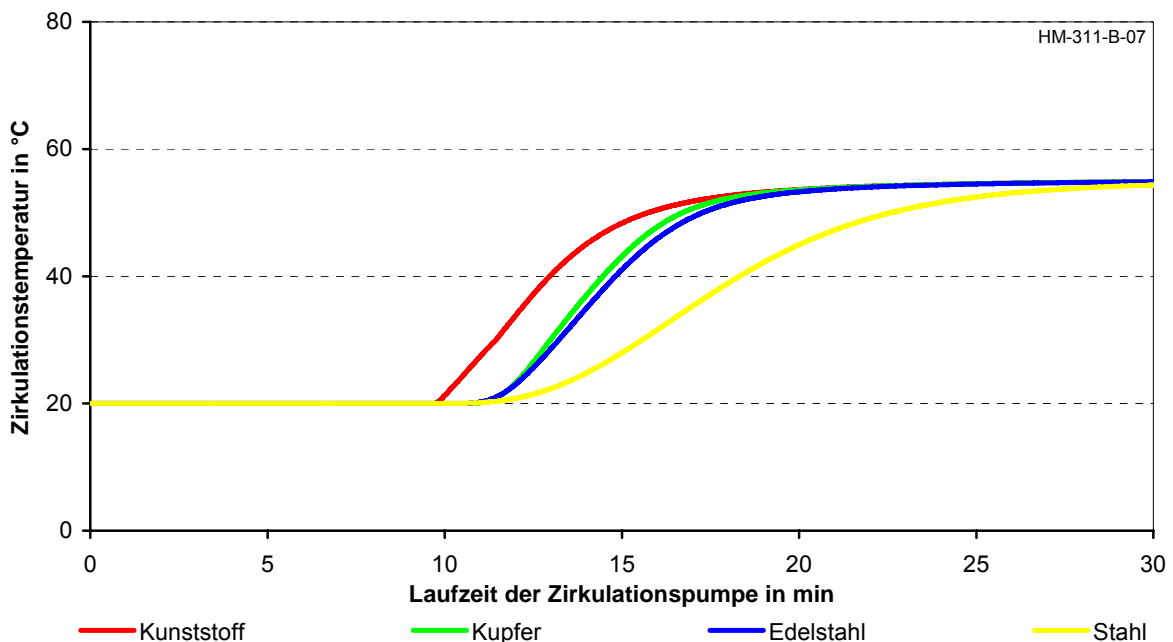


Abbildung 4-20: Temperaturverlauf beim Start der Zirkulationspumpe bei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen

Während die gesamte Anlaufverlustleistung des Edelstahl-, Kunststoff- und Kupfersystems bei rund 1600 W liegt, treten beim Stahlsystem Verlustleistungen von rund 1750 W auf. Da die Isolierstärke bei allen Werkstoffen ähnlich ist, weisen die Aufheizverluste der Isolierung keine gravierenden Unterschiede auf und bewegen sich zwischen 0,047 kWh und 0,052 kWh. Bei stationären Rohrleitungsverlusten zwischen 5,9 W/m und 6,4 W/m können für die unterschiedlichen Rohrwerkstoffe Aufheizverluste von 0,37 kWh bis 0,53 kWh ermittelt werden.

4.3.2 Fahrprofile für Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb

Fahrplandaten für Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb, die sich aus dem Simulationsprogramm ergeben, sind am Beispiel des Referenzgebäudes „Einfamilienhaus“ in **Tabelle 4-9** verzeichnet.

Tabelle 4-9: Fahrplandaten für Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb

Bezeichnung	Einheit	Stichleitungsbetrieb	Zirkulationsbetrieb
Referenzgebäude	-	EFH	EFH
Rohrwerkstoff des Verteilsystems	-	Edelstahl	Edelstahl
Isolierstandard	-	HeizAnIV	HeizAnIV
Zapfprofil	-	Normaltag	Normaltag
Zapfmenge	kg	216,0	202,7
Ausgussverlustmenge	kg	16,7	4,1
nutzbare Zapfmenge	kg	199,3	198,6
spez. nutzbare Zapfmenge	kg/Pers.	49,8	49,6
Zapfenergiemenge ¹	kWh	6,92	6,67
Ausgussverluste ¹	kWh	0,36	0,11
nutzbare Zapfenergiemenge ¹	kWh	6,56	6,56
spez. nutzbare Zapfenergiemenge ¹	kWh/Pers.	1,64	1,64
Aufheizverluste	kWh	1,36	0,52
spez. Aufheizverluste	kWh/Pers.	0,34	0,13
Zirkulationsverluste ²	kWh	-	2,11
spez. Zirkulationsverlustleistung ³	W/m	-	8,9
Laufzeit Umwälzpumpe Zirkulation	h	-	7
Energiemenge Warmwasserspeicherentnahme ⁴	kWh	7,66	8,63
spez. Energiemenge Warmwasserspeicherentnahme ⁴	kWh/Pers.	1,91	2,16

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

² bezogen auf eine Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C

³ inklusive Anlaufverluste

⁴ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C

Dabei wurden ein nach /HeizAnIV/ isoliertes Warmwasserverteilsystem aus Edelstahl und das Warmwasserzapfprofil „Normaltag“ mit einer nutzbaren Zapfenergiemenge von 6,56 kWh als Verbrauchsgang zugrunde gelegt. Unter „nutzbarer Zapfenergiemenge“ beziehungsweise „Zapfmenge“ ist die mit der gewünschten Zapftemperatur zur Verfügung gestellte Zapfenergie- beziehungsweise Zapfmenge gemeint. Bei einer nutzbaren Zapfmenge von rund 199 kg bei beiden Betriebsarten liegt die gesamte Zapfmenge bei Stichleitungsbetrieb mit 216,0 kg um 13,3 kg über der bei Zirkulationsbetrieb. Dies hängt damit zusammen, dass bei Zirkulationsbetrieb die gewünschte Temperatur während der Zirkulationszeiten schneller an der

Warmwasserzapfstelle zur Verfügung steht. Dadurch liegen sowohl die Ausgussverluste beim Stichleitungssystem mit 0,36 kWh, als auch die Aufheizverluste mit 1,36 kWh über denen bei Zirkulationsbetrieb. Bei einer Betriebsdauer der Zirkulationspumpe von sieben Stunden treten Zirkulationsverluste von 2,11 kWh auf. Daraus ergeben sich aus dem Warmwasserspeicher entnommene Energiemengen von 7,66 kWh beziehungsweise 8,63 kWh, bezogen auf eine Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C und eine Kaltwassertemperatur von 10 °C. Die zugehörigen Entnahmeprofile aus dem Warmwasserspeicher sind in **Abbildung 4-21** und **Abbildung 4-22** dargestellt.

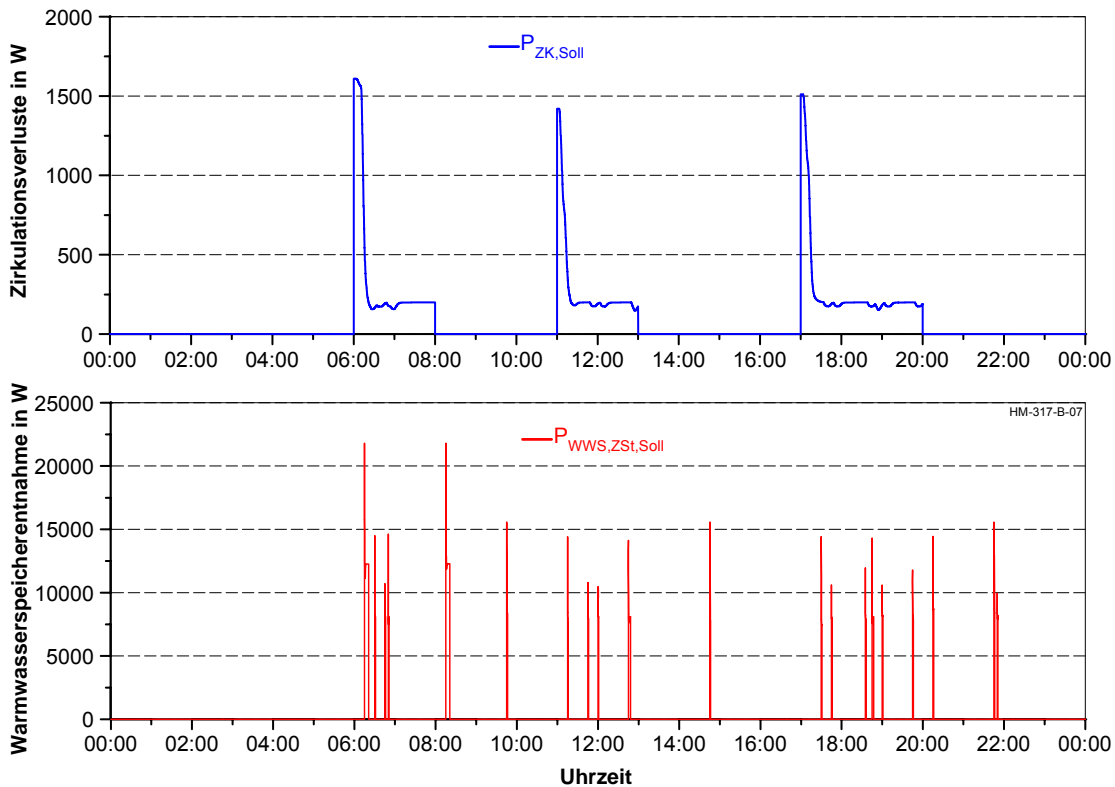


Abbildung 4-21: Fahrprofile für Zirkulationsbetrieb

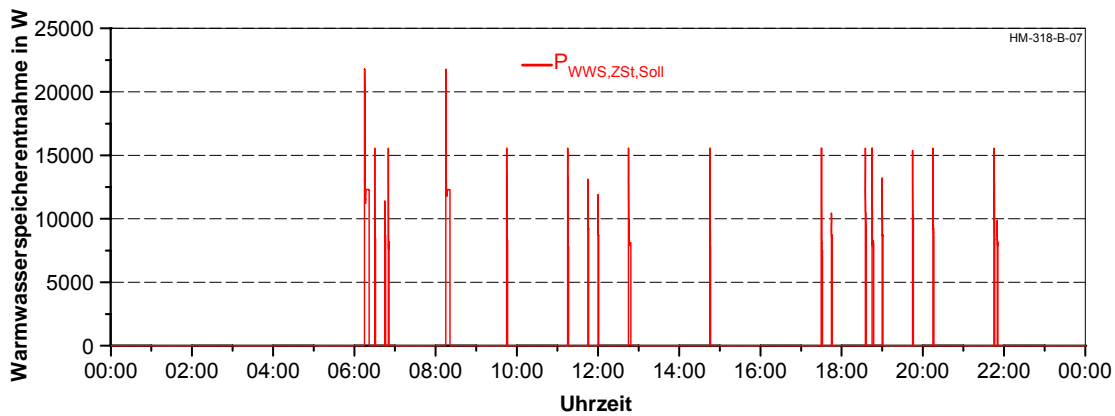


Abbildung 4-22: Fahrprofil für Stichleitungsbetrieb

5 Konzeption und Aufbau des Wärmeerzeugerprüfstands

Zur Untersuchung von verschiedenen Wärmeerzeugern für die Raumheizung und Warmwasserbereitung wurde in der Laborhalle des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München ein Prüfstand aufgebaut (siehe **Abbildung 11-3** bis **Abbildung 11-5** im Anhang). Die Verwendung von Standardinstallationskomponenten, die auch in Gebäuden zum Einsatz kommen, war ein wichtiges Kriterium, um praxisnahe Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Zur Minimierung der Stillstandszeiten des Prüfstands legte man großen Wert auf die schnelle Umrüstbarkeit auf andere Geräte. Die Konzeption der verwendeten Komponenten erfolgte für eine maximal abzuführende Heizwärmeleistung von 100 kW, was je nach Gebäudebaujahr und Sanierungszustand einem Mehrfamilienhaus mit bis zu 20 Haushalten entspricht. Dies fand auch bei der Dimensionierung des Warmwasserverteilsystems und der einzelnen Zapfstellen Berücksichtigung.

Der Aufbau des Wärmeerzeugerprüfstands (siehe **Abbildung 5-1**) lässt sich prinzipiell in drei Komponenten unterteilen:

- Einhausung (Heizraum) mit Prüfling und Brennstoffversorgung
- Heizkreissimulator mit Wärmesenke
- Warmwasserbereitung und -verbrauchssimulator

Der Beschreibung dieser Komponenten widmen sich die folgenden Abschnitte.

5.1 Aufbau der Heizwärme- und Warmwasserversorgung

5.1.1 Einhausung und Brennstoffversorgung

Da die Umgebungsbedingungen Einfluss auf den Betrieb des Wärmeerzeugers haben, erfolgt die Einbindung des Prüflings an das Heiz- und Warmwasserverteilsystem des Prüfstands in einer Einhausung, die mit einem Heizraum vergleichbar ist. Dies gewährleistet vor allem bei Geräten älteren Baujahrs mit größeren Strahlungsverlusten auch höhere Umgebungstemperaturen und somit realistische Betriebsbedingungen. Der hydraulische Aufbau, die Brennstoffversorgung und die zur Bilanzierung notwendigen Messstellen sind in **Abbildung 5-2** erläutert. Als Brennstoff findet sowohl Erdgas als auch Heizöl EL Verwendung. Die Versorgung mit Erdgas ist über das öffentliche Erdgasnetz sichergestellt. Der Erdgasdruck an der Einspeisestelle liegt bei 50 mbar und lässt sich mit Hilfe eines Gasdruckreglers an die Erfordernisse der jeweiligen Geräte anpassen. Für die Erfassung des Drucks sowohl vor als auch nach dem Druckregler sind Gaskapsel Federmanometer installiert. Zur Verbrauchsbestimmung kommt ein Experimentiergaszähler zum Einsatz. Über eine Gassteckdose mit thermischem Sicherheitsventil ist ein Anschluss der einzelnen Prüflinge mit einem speziellen Gassteckschlauch möglich.

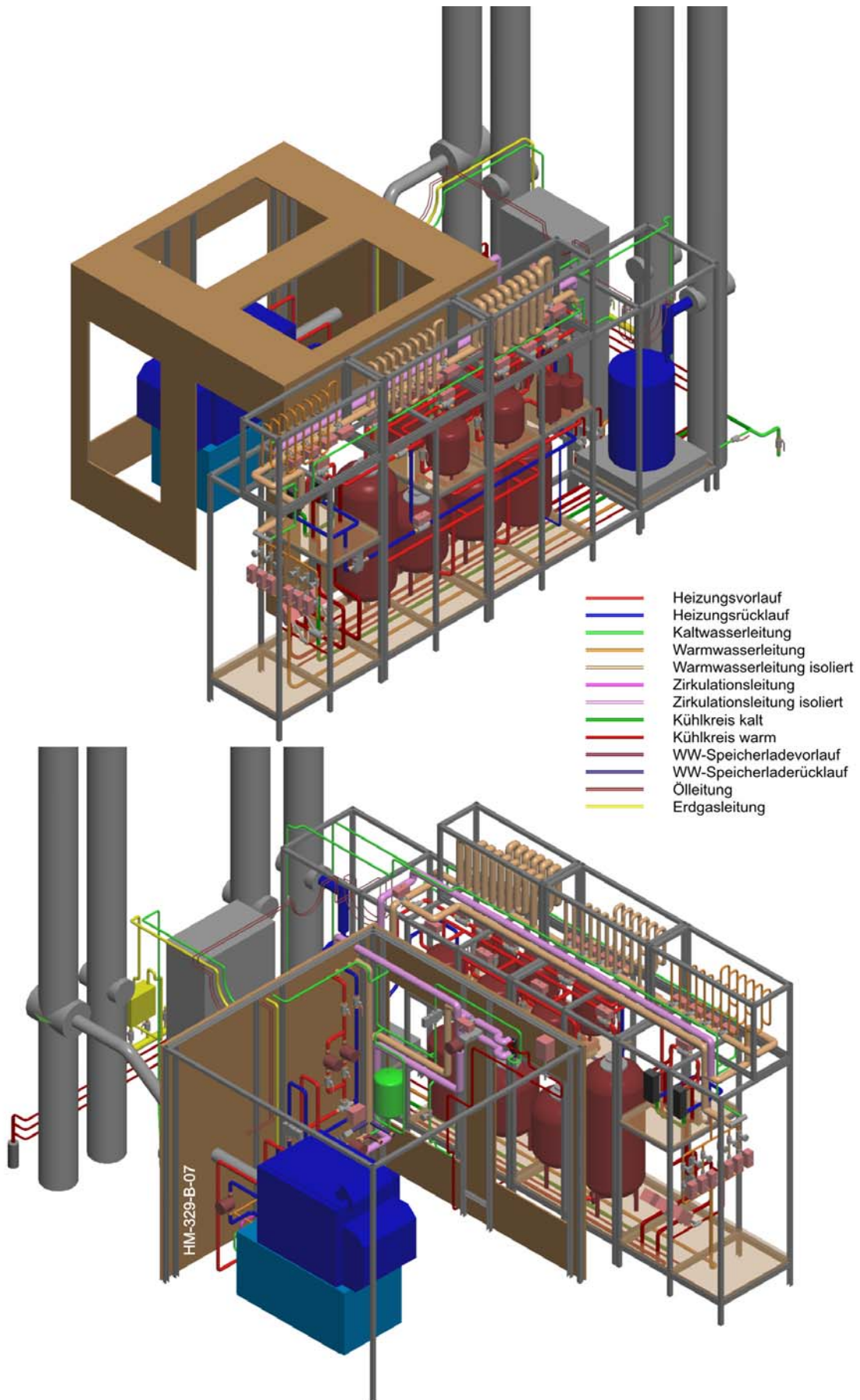


Abbildung 5-1: 3D-Ansichten des Wärmeerzeugerprüfstands

Die Ölleitungen von einem Ölfass in die Einhausung sind im Zweistrangsystem verlegt, da es im Einstrangsystem zu unterschiedlichen Füllständen im Ölfilter kommen kann, was einen Fehler in der Bestimmung des Ölverbrauchs zur Folge hätte. Vor Versuchsbeginn wird das Ölfass mit einer Ölförderpumpe aus dem Reservetank befüllt. Um ein Überfüllen des Ölfasses zu verhindern, ist ein Grenzwertgeber installiert, der die Ölförderpumpe bei Überschreitung eines bestimmten Füllstands automatisch abschaltet. Die eingebauten Armaturen und Sicherheitseinrichtungen sind entsprechend /DIN 4755/ ausgeführt.

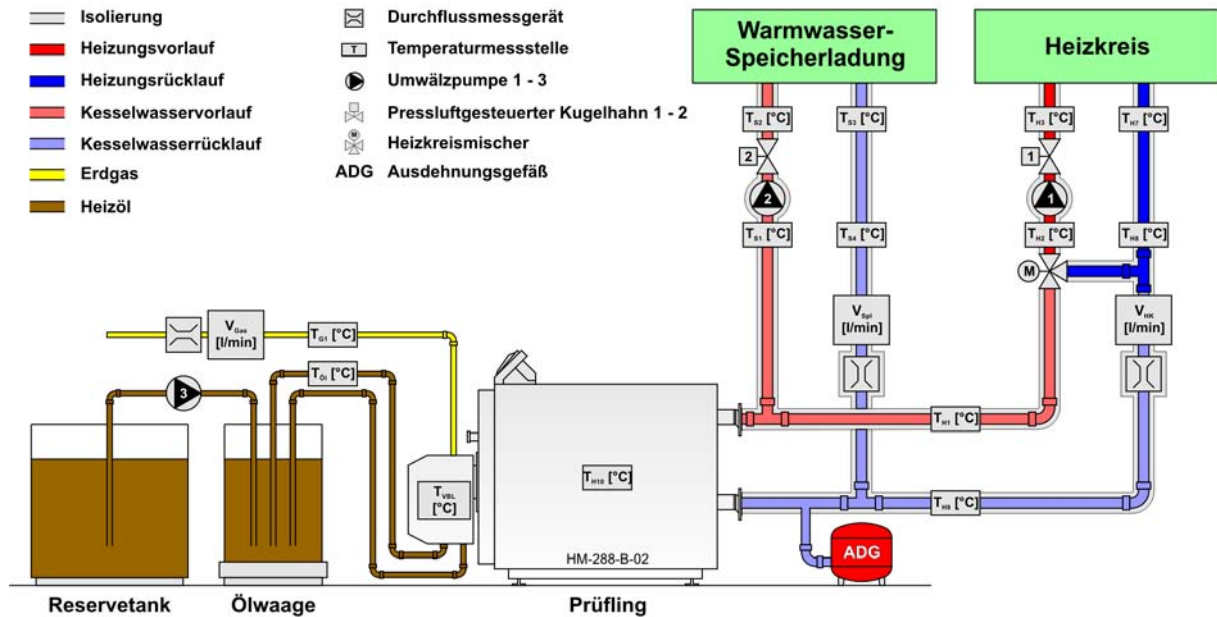


Abbildung 5-2: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau der Einhausung und der Brennstoffversorgung am Wärmeerzeugerprüfstand

Der Anschluss des Prüflings an den Heizkreis und die Warmwasserspeicherladung erfolgt mit flexiblen Edelstahlwellrohren. Die Anbindung der zwei Vor- und Rückläufe an den Prüfling ist dabei gemeinsam oder – wie dies bei Brennwertgeräten oft der Fall ist – über separate Abgänge realisierbar. Speziell zur Untersuchung von Wärmeerzeugern älteren Baujahrs (Standardheizkessel), wo es nicht möglich ist, eine gleitende Kesselwassertemperatur vorzugeben, sowie zur Nachbildung von Niedertemperatursystemen ist im Heizkreisvorlauf ein motorgesteuerter Heizkreismischer installiert. Dieser kann entweder manuell reguliert oder über die Heizkesselregelung beziehungsweise den PC angesteuert werden. Die Ansteuerung über den PC bietet, wie in **Abbildung 11-6** im Anhang beschrieben, die Möglichkeit, die Heizungsvorlauftemperatur konstant oder abhängig von der Außentemperatur einzustellen. Zusätzlich kann noch eine Absenkung der Vorlauftemperatur während der Nachtstunden vorgenommen werden. Zur Erfassung des Temperatureintrags der Umwälzpumpen ist sowohl vor als auch nach jeder Pumpe eine Temperaturmessstelle angebracht. Um ein Ansprechen des Sicherheitsventils zu verhindern, ist zur Aufnahme der Volumenänderung im Heiz- und Warmwasserspeicherladekreis, im Rücklauf zum Wärmeerzeuger und im Kaltwasserzulauf

zum Warmwasserspeicher je ein Druckausdehnungsgefäß mit einem Inhalt von 140 l installiert.

5.1.2 Heizkreissimulator mit Wärmesenke

Die praxisnahe Abbildung der Heizungsverteilungen und der Raumheizflächen geschieht mittels eines eigens entwickelten Heizkreissimulators mit Wärmesenke, der in **Abbildung 5-3** schematisch skizziert ist. Der Rohrwasserinhalt des gewählten Heizsystems lässt sich dabei mit vier in Serie schaltbaren Behältern einstellen. Da jeder Behälter einzeln angesteuert werden kann, ist eine Stufung des Wasserinhalts zwischen 10 l und 110 l möglich. Dies ist notwendig, um reale Heizwasserumlaufzeiten (Totzeiten) zu erhalten.

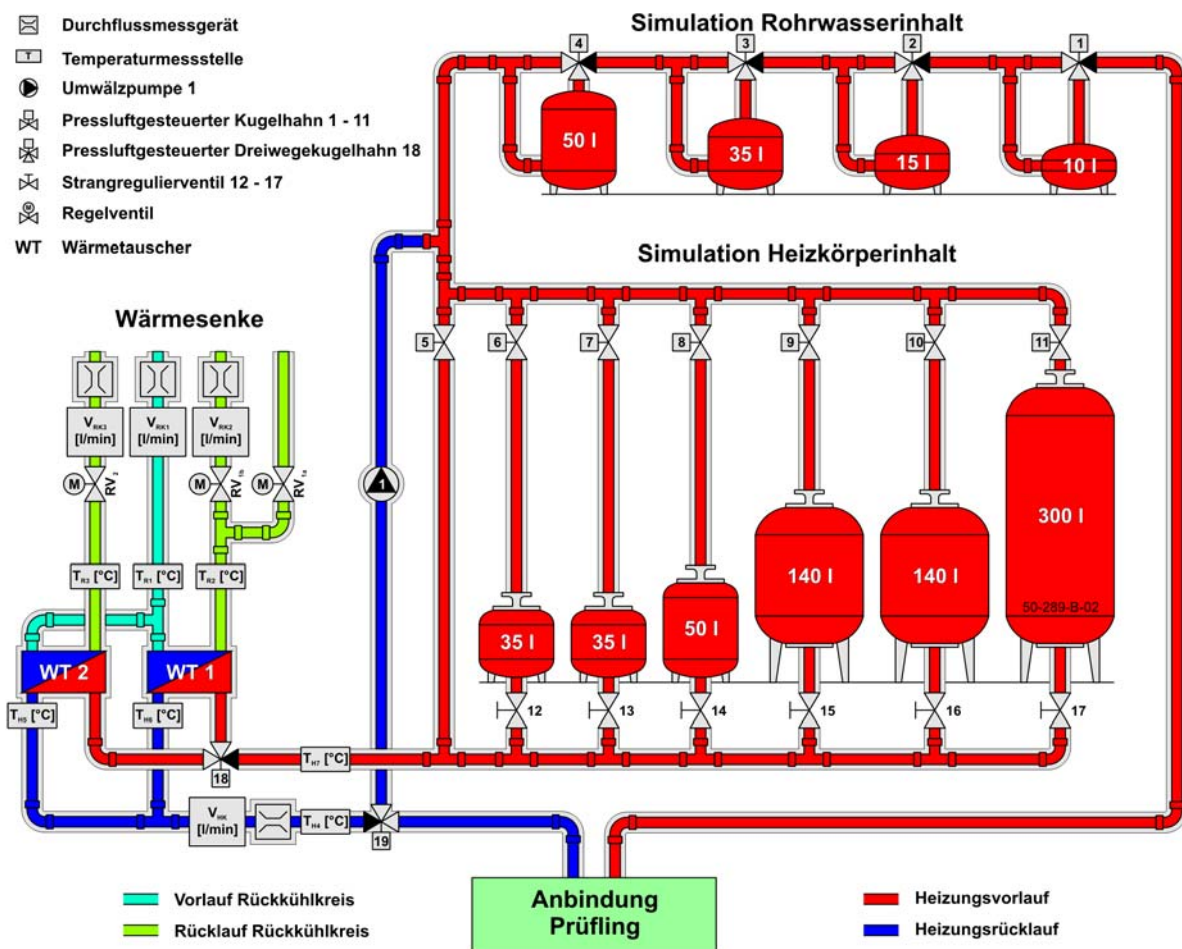


Abbildung 5-3: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau des Heizkreissimulators

Der Wasserinhalt der Heizkörper kann ebenfalls mit Hilfe von sechs Behältern, die ein Fassungsvermögen von 35 l bis 700 l ergeben, frei ausgewählt werden. Betreibt man mehrere Behälter parallel, entspricht dies dem – in den meisten Gebäuden eingesetzten – Zweirohrsystem. Bei der Ausführung der Verrohrung im gewählten Gebäudetyp als Einrohrsystem kommt immer nur ein Behälter zum Einsatz. Die eingebauten Strangregulierventile gestatten es, den Durchfluss durch jeden einzelnen Behälter zu drosseln und somit „kesselnähe“ und

„kesselferne“ Heizkörper zu simulieren. Für stationäre Messungen sind die einzelnen Rohrwasser- und Heizkörperbehälter über einen sogenannten „Bypass“ umgehbar.

Das Herzstück des Heizkreissimulators bildet die regelbare Wärmesenke, die die geforderten Heizleistungen abzüglich der am Prüfstand anfallenden Wärmeverluste abführt. Zur besseren Regelbarkeit sind zwei parallel geschaltete, typgleiche Wärmetauscher installiert, wobei für Leistungen unter 35 kW nur einer in Betrieb ist. Bei höherem Leistungsbedarf wird der zweite Wärmetauscher automatisch zugeschaltet. Die Leistungsregelung der Wärmetauscher findet über drei im Kühlkreis eingebaute, motorgesteuerte Ventile statt. Das Regelventil RV 1a mit einem maximalen Durchfluss von 150 l/min ist dabei als Nadelventil ausgeführt, um sehr kleine Leistungsänderungen realisieren zu können. Für größere Leistungssprünge lassen sich die Regelventile RV 1b und RV 2 verwenden.

Um ein gezieltes Auskühlen der Heizkörper nachzubilden, zum Beispiel während einer Warmwasserspeicherladung bei einer Warmwasservorrangschaltung, ist eine zusätzliche Umwälzpumpe installiert. Sie kann die Temperatur der einzelnen Heizkörperbehälter ganz gezielt, je nach eingestelltem Heizkörpertyp und der damit verbundenen Auskühlkurve, während der Stillstandszeit der Heizungsumwälzpumpe absenken. Dies gewährleistet beim Einschalten der Heizungsumwälzpumpe reale Heizungsrücklauftemperaturen am Wärmeerzeuger.

5.1.3 Warmwasserbereitung und -verbrauchssimulation

Für die Messung von Kombisystemen zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung wurde die in **Abbildung 5-4** skizzierte Warmwasserverbrauchssimulation entwickelt. Als Warmwasserbereiter sind sowohl elektrische oder gasbefeuerte Warmwasserspeicher als auch Kombisysteme in den Prüfstand integrierbar. Das Warmwasserverteilsystem ist am Prüfstand als Stichleitungs- beziehungsweise als Zirkulations- und Stichleitungssystem ausgeführt. Der reine Stichleitungsbetrieb findet meist nur in Einfamilien- oder kleinen Mehrfamilienhäusern Verwendung. Beim Betrieb mit Stichleitungssystem sind verschiedene vordefinierte Leitungslängen zur Zapfstelle wählbar. Dazu stehen drei Gruppen frei schaltbarer Rohrleitungen unterschiedlicher Länge und Isolierstandards zur Verfügung. Damit lässt sich die Leitungslänge „speichernaher“ und „speicherferner“ Zapfstellen festlegen. Beim Betrieb mit Zirkulationsleitung ist die Umgehung dieser Stichleitungen über einen Bypass möglich. Zum Abführen der Zirkulationsleitungsverluste dient ein in den Zirkulationskreis integrierter Wärmetauscher. Der Durchfluss im Zirkulationskreis ist über die Zirkulationspumpe oder ein Drosselventil so einstellbar, dass die Bedingungen des Arbeitsblatts W 551 des DVGW-Regelwerks /DVGW 02/ eingehalten werden. Dieses schreibt unter anderem die maximale Temperaturdifferenz zwischen Warmwasserspeicheraustritt und Zirkulationsleitungseintritt von 5 K vor. Beim Start der Zirkulationspumpe entstehen Anlaufverluste, da das Rohrsystem aufzuheizen ist und das ausgekühlte Wasser aus der Leitung in den Warmwasserspeicher gelangt. Durch

den Einbau eines Bypass zur realen Abbildung verschiedener Zirkulationsleitungslängen ist es möglich, dem Zirkulationskreis Wasser zu entnehmen und dieses durch kaltes Wasser zu ersetzen, um den Warmwasserspeicher praxisnah zu betreiben.

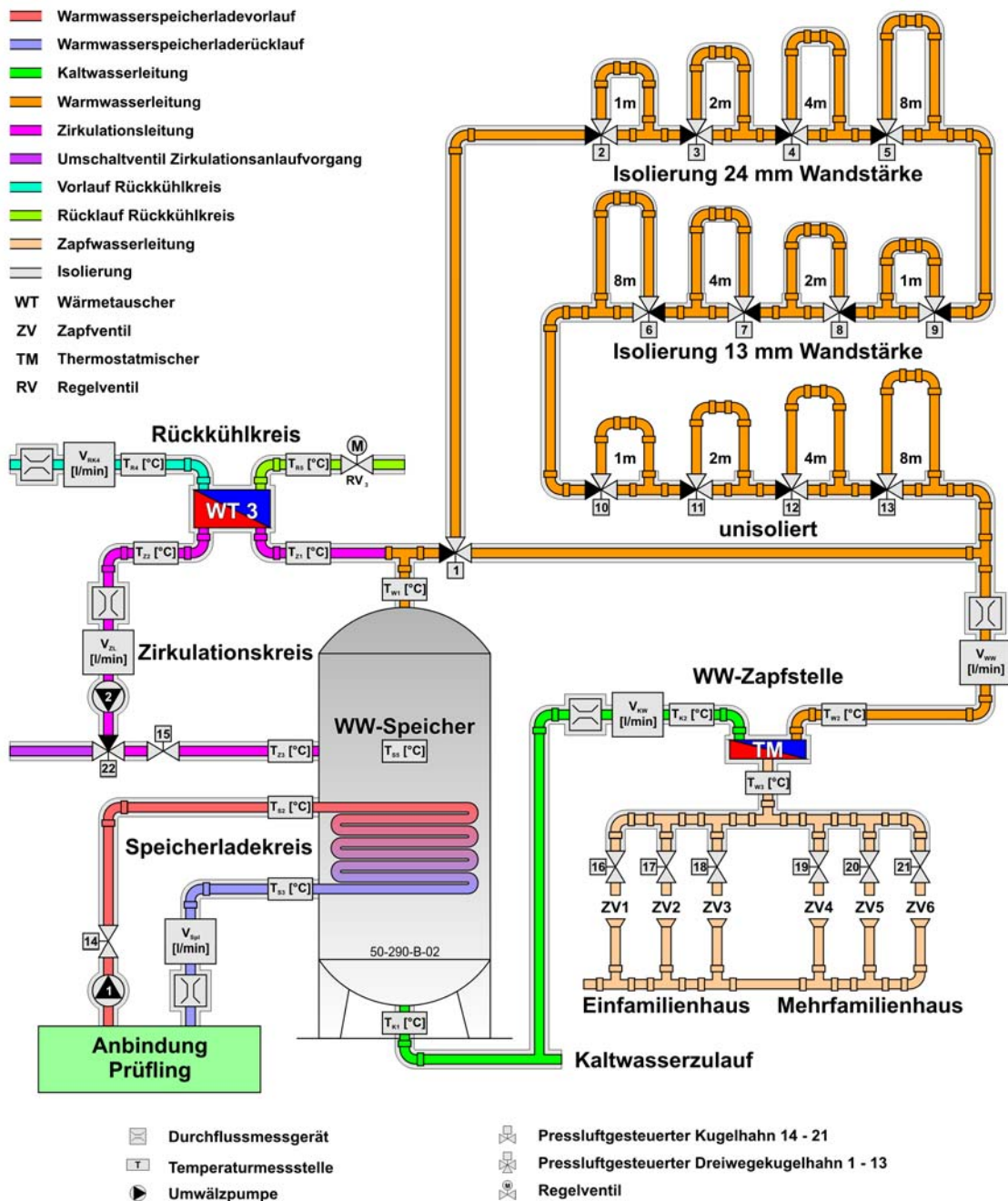


Abbildung 5-4: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau der Warmwasserbereitung und Warmwasserverbrauchssimulation

Zur Entnahme von Warmwasser aus dem Speicher sind sechs Zapfstellen installiert. Die Zapfventile ZV 1 bis ZV 3 kommen bei Einfamilienhäusern und die Zapfventile ZV 1 bis ZV 6 – der Gleichzeitigkeiten wegen – bei Mehrfamilienhäusern zum Einsatz. Der Zapfvolumenstrom jedes einzelnen Ventils ist über ein Drosselventil regulierbar. Mit dem ZV 1 zum

Beispiel wird die Entnahme an einem Handwaschbecken mit einem Durchfluss von 5 l/min durchgeführt. Die Ventile ZV 2 und ZV 3 dagegen sind Dusch- und Badewannenzapfstellen. Mit Hilfe einer vorgeschalteten Thermostatmischerbatterie lässt sich die gewünschte Zapftemperatur durch Zumischung von Kaltwasser erreichen.

5.2 Messtechnische Ausstattung des Wärmeerzeugerprüfstands

Im nachfolgenden Abschnitt wird die zur Analyse des energetischen Verhaltens der untersuchten Heizwärme- und Warmwassererzeuger am Wärmeerzeugerprüfstand eingesetzte Messtechnik dargestellt und erläutert.

Die Erfassung der einzelnen Temperaturen erfolgt mittels 36 4-Leiter-Pt-100-Sensoren der Genauigkeitsklasse A. Um ein verzögerungsarmes Ansprechen der Sensoren bei sich schnell ändernden Temperaturen zu gewährleisten, kommen Mantel-Widerstandsthermometer mit einem Manteldurchmesser von 3 mm und einer Manteldicke von 0,5 mm zur Anwendung. Aufgrund der sich sehr schnell ändernden Temperatur im Abgasstrom des Wärmeerzeugers wird dort zusätzlich zu den zwei Pt-100-Sensoren noch ein Thermoelement montiert. Die in den Rohrleitungen verwendeten Montagearten sind in **Abbildung 5-5** veranschaulicht.

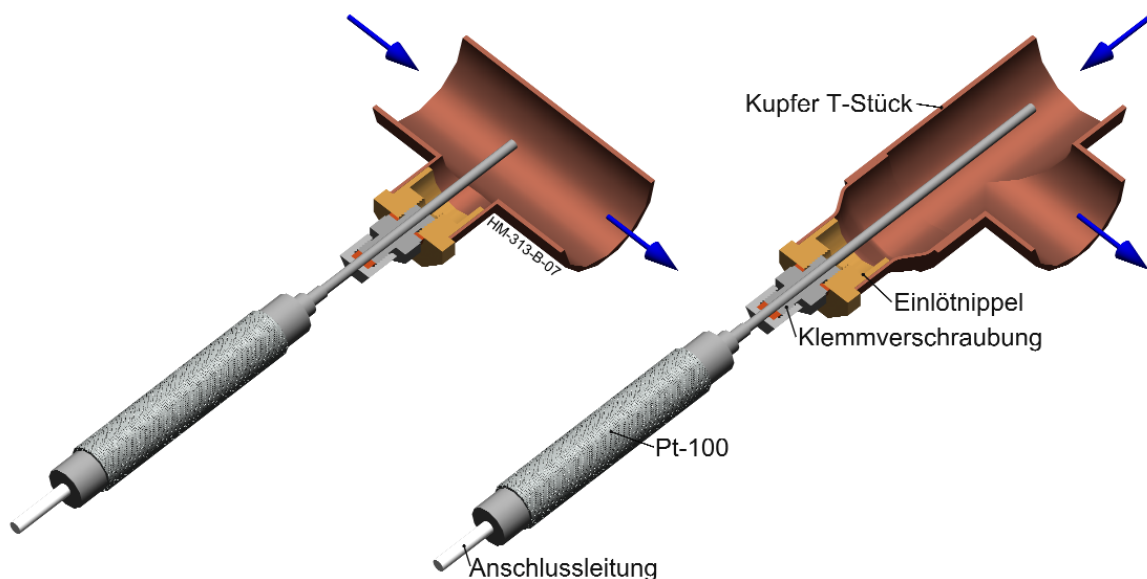


Abbildung 5-5: Unterschiedliche Montagemethoden von Pt-100-Sensoren

An den für die Bilanzierung relevanten Messstellen sind die Sensoren in Kniestücke entgegen der Strömungsrichtung mit ausreichender Tauchtiefe angebracht (vergleiche /DIN 4702 Teil 2/). Ist diese Einbauvariante nicht einsetzbar beziehungsweise notwendig, wie zum Beispiel bei Sensoren, die ausschließlich zur Regelung dienen, werden sie senkrecht zur Strömungsrichtung eingebaut. Um keine zusätzliche Ansprechverzögerung zu erhalten, sind die Sensoren direkt über eine Klemmverschraubung mit Teflondichtring und nicht mittels einer Tauchhülse im Rohr eingebaut.

Zur Kalibrierung der einzelnen Pt-100-Sensoren kommt ein Trockenblock-Kalibrator mit einem Temperaturbereich von -23 °C bis 155 °C zum Einsatz. Die aus der Kalibrierung der einzelnen Sensoren ermittelten Korrekturkurven sind im Messwerte-Erfassungsprogramm hinterlegt. Während der messtechnischen Untersuchungen der einzelnen Wärmeerzeuger dient der Trockenblock-Kalibrator zur Nachbildung der Außentemperatur für die herstellereigenspezifischen Außentemperatursensoren. Das dem entsprechenden Tagtyp zugrunde liegende Außentemperaturprofil mit einer zeitlichen Auflösung von einer bis 15 Minuten kann dem Kalibrator und somit dem installierten Wärmeerzeuger über eine EIA-232 Schnittstelle vorgegeben werden.

Zur Messung der verschiedenen Durchflüsse sind magnetisch induktive Durchflussmessgeräte (MID) installiert. Sie beruhen auf dem Faradayschen Induktionsprinzip, nach dem in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert wird, wobei das Medium dem Leiter entspricht. Die dabei induzierte Spannung verhält sich proportional zur Durchflussgeschwindigkeit und wird über zwei radial angeordnete Messelektroden dem Messverstärker zugeführt. Das Durchflussvolumen lässt sich anschließend über den Rohrquerschnitt errechnen. Die Installation von MIDs anstatt Woltmannzählern am Wärmeerzeugerprüfstand hat folgende Vorteile:

- freier Rohrquerschnitt und daher fast kein zusätzlicher Druckverlust
- verschleißfest, da keine mechanisch bewegten Teile
- keine Anlaufschwelle, deshalb auch niedrigste Fließgeschwindigkeiten messbar
- fast keine Einlaufstrecken nötig
- sehr geringe Messabweichungen von $< 0,2\%$ gegenüber 2 - 5% beim Flügelradzähler
- weitestgehend unabhängig vom Strömungsprofil
- Messung in beide Durchflussrichtungen und von pulsierendem Durchfluss möglich

Zur Bestimmung des Heizölverbrauchs dient eine hochpräzise Waageplattform mit einem Messbereich von 0 kg bis 300 kg, auf der sich ein Ölfass befindet, das ein maximales Fassungsvermögen von 200 kg aufweist. Der Verbrauch kann dabei auf 5 g genau bestimmt und mit Hilfe einer EIA-232-Schnittstelle an den Prüfstandsrechner übertragen werden.

Die Erfassung der zugeführten Gasmenge erfolgt mittels eines am Gaszulauf zum Wärmeerzeuger installierten Experimentiergaszählers mit einem Messbereich von $0,06\text{ m}^3/\text{h}$ bis $10\text{ m}^3/\text{h}$. Ein Counter-Modul der Messtechnik erfasst kontinuierlich das Signal des am Gaszähler angebrachten Impulsgebers mit einer Impulswertigkeit von $1\text{ dm}^3/\text{Impuls}$. Zur Korrektur des auf Normbedingungen bezogenen Heizwerts werden zusätzlich die Erdgastemperatur T_B und der Erdgasdruck p_e am Zulauf zum Wärmeerzeuger messtechnisch aufgezeichnet. Über ein eigenständiges Programm (siehe **Abbildung 5-6**) wird der benötigte aktuelle Luftdruck p_{amb} alle fünf Minuten über die Internetseite des meteorologischen Instituts der TU München für die nächstgelegene Stadtklimastation Theresienstraße 37 abgefragt und an das

Prüfstandshauptprogramm übergeben. Zusätzlich ist in diesem Programm auch die Eingabe beziehungsweise das Einlesen des Heizwerts des verwendeten Brennstoffs erforderlich.

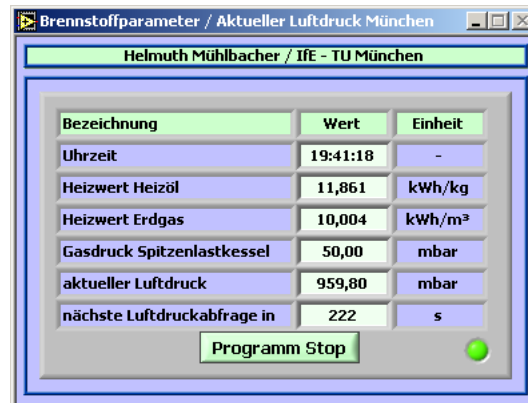


Abbildung 5-6: Programm zur Luftdruckabfrage und Heizwertvorgabe

Die Ermittlung des auf den Betriebszustand bezogenen Heizwerts $H_{u,B}$ erfolgt bei Erdgaseinsatz unter Zuhilfenahme des von den Münchner Stadtwerken täglich angegebenen und auf den Normzustand bezogenen Heizwerts $H_{u,n}$ nach folgender Gleichung:

$$H_{u,B} = \frac{p_B}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_B} \cdot H_{u,N} \quad (5.1)$$

wobei $p_B = p_{amb} + p_e$

- mit
- $H_{u,N}$: Heizwert Erdgas bezogen auf den Normzustand in kWh/m³
 - $H_{u,B}$: Heizwert Erdgas bezogen auf den Betriebszustand in kWh/m³
 - p_N : Normdruck in bar ($p_N = 1,01325$ bar)
 - p_B : Druck im Betriebszustand in bar
 - p_{amb} : Luftdruck in bar
 - p_e : effektiver Gasdruck in bar
 - T_N : Normtemperatur in K ($T_N = 273,15$ K)
 - T_B : Temperatur im Betriebszustand in K

Um den elektrischen Hilfsenergiebedarf einzelner Komponenten, wie zum Beispiel Brenner, Regelung oder Umwälzpumpen, messtechnisch erfassen zu können, sind Wirkleistungskonverter mit einem Messbereich von 0 bis 500 W installiert. Über die Laufzeiten der einzelnen Komponenten lässt sich damit der tägliche beziehungsweise jährliche elektrische Hilfsenergiebedarf ermitteln.

Zur Beurteilung des Emissionsverhaltens der am Wärmeerzeugerprüfstand zu untersuchenden Heizkessel ist die Erfassung der einzelnen Emissionskonzentrationen während aller Betriebsphasen notwendig. Speziell die kontinuierliche Messung der Emissionen während der instationären Betriebszustände (Start- und Stoppvorgänge) stellt hier sehr hohe Anforderungen an

die installierte Messtechnik. Der zur Ermittlung der Abgasemissionen CO, CO₂, O₂, NO/NO_x, CH₄ und THC notwendige Versuchsaufbau ist in **Abbildung 5-7** schematisch dargestellt.

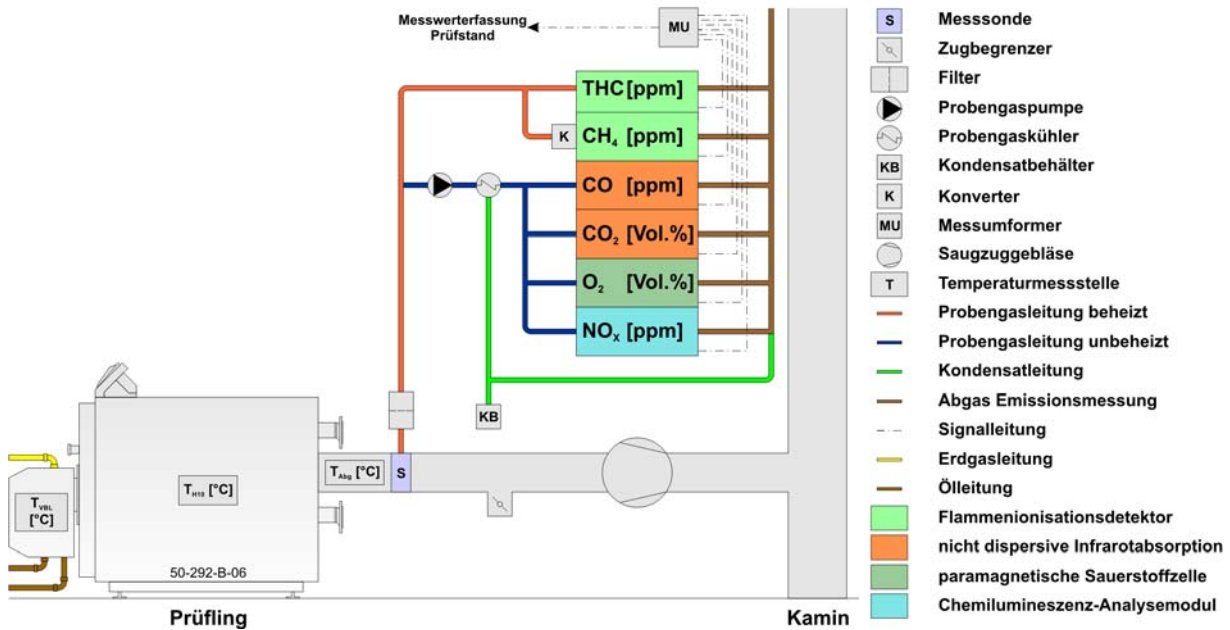


Abbildung 5-7: Schematischer Versuchsaufbau zur Messung der Abgasemissionen

Ein an den jeweiligen Prüfling angepasstes Abgasrohr leitet das Abgas des Wärmeerzeugers in den Kamin. Zur Gewährleistung des von den Herstellern angegebenen Kaminzugs kommen ein Saugzuggebläse und ein Zugregler zum Einsatz, mit deren Hilfe der gewünschte Kaminzug eingestellt und konstant gehalten werden kann. Die Messstrecke mit den erforderlichen Öffnungen zur Temperaturmessung und Probengasentnahme ist direkt auf den Abgasstutzen des Prüflings montiert. Die Probengasentnahme erfolgt dabei mittels einer im Abgasrohrquerschnitt gemäß /DIN 4702-3/ montierten und gelochten Sonde. Das Probengas fließt von der Sonde über einen Filter und eine beheizte Leitung in den Analyseschrank und gelangt dort in die Gasanalysatoren zur Messung der Kohlenwasserstoffe. Der Gasanalysator zur Messung der CH₄-Konzentration ist zusätzlich mit einem beheizten Konverter ausgestattet, der alle Kohlenwasserstoffe außer CH₄ verbrennt. Eine Pumpe leitet einen Teil des Probengases im Analyseschrank durch einen Messgaskühler und anschließend zur Messung der restlichen Konzentrationen in die einzelnen Gasanalysatoren. Das überschüssige Probengas und das Abgas aus den Analysatoren kann über den Abluftkamin entweichen. Die Konzentrationen von HC und CH₄ werden somit im feuchten und die übrigen Konzentrationen im trockenen Abgas erfasst, über den Messumformer an die Datenerfassung transferiert und entsprechend der eingestellten Abtastrate aufgezeichnet. Um Messfehler zu minimieren, sind die einzelnen Gasanalysatoren vor Versuchsdurchführung unter Verwendung von speziellen Prüfgasen zu kalibrieren. Zur Bestimmung der einzelnen Emissionen stehen eine Vielzahl von Analysemethoden zur Verfügung. Die am Prüfstand angewandten Messverfahren werden nachfolgend kurz erläutert.

Die Bestimmung der Emissionskomponenten CO und CO₂ erfolgt mit Hilfe der nichtdispersiven Infrarotspektroskopie (NDIR), wie in **Abbildung 5-8** zu sehen. Erfasst wird dabei die durch das Messgas verursachte Absorption von Infrarotstrahlung. Die Gasart ist hier durch die Wellenlänge der Absorptionsbanden charakterisiert, während die Stärke der Absorption ein Maß für die Konzentration der Komponente ist. Eine Heizwendel erzeugt die notwendige Infrarotstrahlung. Durch die besondere Form des Chopperrads gelangt die Infrarotstrahlung mit gleicher Intensität abwechselnd durch eine Filterküvette in die Mess- und Vergleichsseite der geteilten Analyseküvette. Kommt die Infrarotstrahlung durch die Messseite in den Detektor, wird ein Teil der Strahlung absorbiert, was zu einer Auskühlung des Gases im Detektor führt. Auf der Vergleichsseite findet keine Absorption der Strahlung statt; die Folge ist eine Erwärmung des Gases am Aufnehmer. Der am Detektor entstehende Messeffekt ist ein mit der Chopperfrequenz einhergehender Druckeffekt. Dieser lässt sich über einen Membrankondensator aufnehmen und über einen Vorverstärker in intensitätsproportionale Spannungssignale umsetzen.

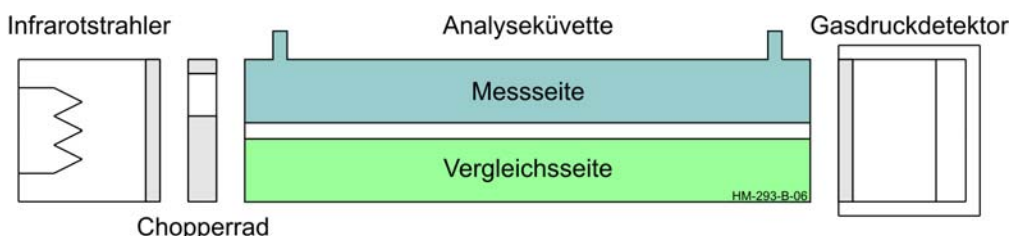
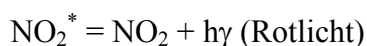
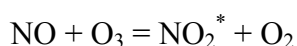


Abbildung 5-8: Schematischer Aufbau der nichtdispersiven Infrarotspektroskopie

Zur Messung von O₂ kommt eine paramagnetische Sauerstoffzelle zur Anwendung, die auf der Messung der magnetischen Suszeptibilität der Gasprobe beruht. In der Messzelle sind zwei mit N₂ gefüllte Quarzkugeln hantelförmig an einem dünnen Platindraht drehbar aufgehängt, an dem sich ein Spiegel befindet, der einen Lichtstrahl in Richtung eines Fotodetektors leitet. Ein starker Permanentmagnet erzeugt außerhalb der Messzelle ein inhomogenes Magnetfeld. Gelangt ein Sauerstoffmolekül zwischen die Pole des Magneten und die Quarzkugeln, wird eine Kraft in Form einer Drehbewegung auf die Kugeln ausgeübt. An eine um die Kugeln geführte Drahtschleife legt man nun eine Spannung an. Der resultierende Strom erzeugt ein Magnetfeld, das die Drehbewegung der Hantel kompensiert. Diese Stromstärke ist ein direktes Maß für die Sauerstoffkonzentration.

Zur Erfassung der Stickoxide im Abgas kommt die Chemilumineszenz zum Einsatz, die auf nachfolgender Reaktion basiert:



Das elektrisch angeregte Stickstoffdioxid NO₂^{*} bildet sich durch die Reaktion von Stickstoffmonoxid und Ozon. Unter Abgabe von Rotlicht kehrt das angeregte Stickstoffdioxid wieder in

den Normalzustand zurück. Das emittierte Licht ist per Fotoelektrode messbar. Vorausgesetzt, dass der O₃-Gehalt im Überschuss vorliegt, ist die Intensität der Chemilumineszenz direkt proportional zum NO-Gehalt. Bei der Messung von NO_x werden vor der Mischung mit O₃ alle NO₂-Moleküle über einen Kohlenstoffkonverter geführt und dadurch zu NO reduziert.

Die Messung der Abgaskomponenten THC und CH₄ erfolgt mit zwei Flammenionisationsdetektoren (FID). Im Gegensatz zur reinen Wasserstoffflamme mit sehr kleiner Grundionisation bilden sich bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in einer Wasserstoffflamme große Ionisationsströme. Diese liegen etwa um eine Zehnerpotenz über dem Grundionisationsstrom der reinen Wasserstoffflamme. Ein konstanter Massestrom des Messgases wird mit einem konstanten Wasserstoffstrom und kohlenwasserstofffreier Luft gemischt und über eine Brenndüse geführt. Unter der Wirkung der Flamme entstehen Elektronen und positive Ionen. Entsprechende Elektroden ziehen diese an, was einen Stromfluss von einer Elektrode zur anderen über den Messkreis zur Folge hat. Der Ionisationsstrom ist dabei ein Maß für den im Messgas enthaltenen Kohlenwasserstoff. Zur Messung von Methan im Abgas ist der zweite FID zusätzlich mit einem beheizten Konverter versehen, der selektiv und quantitativ alle Kohlenwasserstoffe außer CH₄ verbrennt.

Tabelle 5-1: Messgrößen, Messprinzip und Messbereiche der untersuchten Emissionen

Messgröße	Messprinzip	Messbereich	
		minimal	maximal
CO	nicht dispersive Infrarotabsorption	0 – 100 ppm	0 – 5000 ppm
CO ₂	nicht dispersive Infrarotabsorption	0 – 2 Vol.%	0 – 30 Vol.%
O ₂	paramagnetische Sauerstoffzelle	0 – 5 Vol.%	0 – 100 Vol.%
NO/NO _x	Chemilumineszenz	0 – 100 ppm	0 – 1000 ppm
CH ₄	Flammenionisation	0 – 100 ppm	0 – 10000 ppm
THC	Flammenionisation	0 – 100 ppm	0 – 10000 ppm

Eine Aufstellung der am Prüfstand erfassten Größen, der eingesetzten Messprinzipien und der minimal und maximal einstellbaren Messbereiche ist **Tabelle 5-1** zu entnehmen. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Messungen ist jedes Analysemodul mit vier frei einstell- und kalibrierbaren Messbereichen, die sich bei einer Messbereichsüberschreitung automatisch umschalten lassen, ausgestattet.

6 Validierung des Wärmeerzeugerprüfstands

Nach Abschluss der Aufbauarbeiten fanden Versuche zur Validierung des Wärmeerzeugerprüfstands statt. Dafür wurde jede einzelne Komponente des Prüfstands kontrolliert, deren Regelungsparameter identifiziert und ausgetestet sowie die Auswirkungen von Vorgabesprüngen auf das System überprüft. Nachfolgende Beschreibung erläutert, wo die jeweils entwickelten Vorgabeprofile am Prüfstand eingespeist werden und wie die Nachbildung des Heizwärmebedarfs, der Zirkulationsverluste und der Warmwasserzapfungen umzusetzen ist.

6.1 Umsetzung der Lastgänge am Prüfstand

Die in Abschnitt 4 entwickelten Vorgabefahrpläne und die Erkenntnisse aus den Feldversuchen aus Abschnitt 3 liefern die zum Betrieb des Prüfstands notwendigen Eingangsdaten. **Abbildung 6-1** zeigt die Einbindung der einzelnen Lastgänge und weiterer Einflussgrößen am Wärmeerzeugerprüfstand. Grundsätzlich sind dabei zwei Arten von Vorgaben zu unterscheiden:

- feste Einstellwerte vor Versuchsbeginn, wie zum Beispiel die Einstellungen an der Regelung des Wärmeerzeugers und Warmwasserspeichers
- sich dynamisch ändernde Vorgabewerte, wie etwa der Heizwärmebedarfsgang an der Wärmesenke im Heizkreis

Je nach zu untersuchendem Prüfling findet vor Versuchsbeginn eine Anpassung der Heizungsregelung an das zugrundegelegte Referenzgebäude statt. Einzustellen sind unter anderem Parameter wie Gebäudetyp, Heizkurve, Betriebszeiten der Heizung (Tag-/Nachtbetrieb) und der Warmwasserspeicherladung sowie Sommer- oder Winterbetrieb, sofern dies nicht automatisch über die vorgegebene Außentemperatur geschieht. Der Außentemperaturverlauf, der in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vorliegt, wird mittels eines Temperaturkalibrators, in dem sich der Außentemperaturfühler des Kessel befindet, vorgegeben. Bei Bedarf ist über eine im Prüfstandsprogramm integrierte Regelung die Vorlauftemperatur im Heizkreis mittels eines installierten Heizkreismischers außentemperaturabhängig regulierbar. Die Nachbildung des Heizwärmebedarfsgangs inklusive der auftretenden Verteilungsverluste des Referenzgebäudes erfolgt an der Wärmesenke im Heizkreis. Abhängig vom eingestellten Heizkörperotyp werden bei Nichtversorgung des Heizkreises die einzelnen Heizkörper nach hinterlegten Kurven ausgekühlt. Der gewählte Rohrwasser- und Heizkörperinhalt hängt dabei von der Geometrie des Verteilsystems, der installierten Heizkörperleistung und dem Heizkörperotyp im Referenzgebäude ab. Die Warmwasserentnahme aus dem Warmwasserspeicher ist über sechs alternativ anwählbare Zapfventile möglich, die einen jeweils unterschiedlichen Volumenstrom aufweisen.

Der im Zirkulationskreis installierte Wärmetauscher dient zum Abfahren des Zirkulationsfahrprofils. Da die zugrunde gelegten Fahrprofile die auftretenden Verluste im Referenzgebäude bereits beinhalten, müssen die am Prüfstand auftretenden Verluste beim Betrieb Beachtung finden.

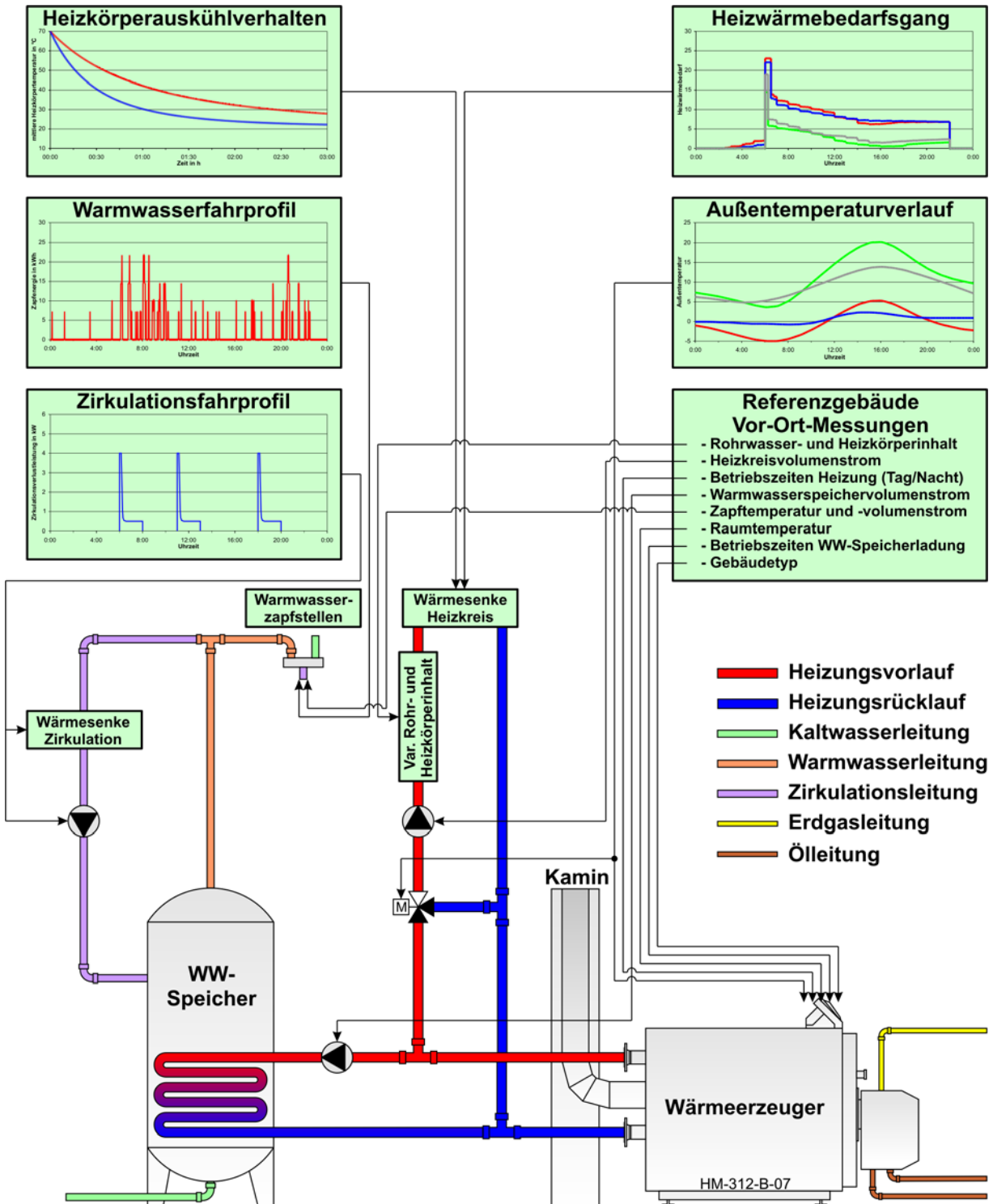


Abbildung 6-1: Schema der Einbindung von Lastgängen und Einflussgrößen am Prüfstand

6.2 Nachbildung der Bedarfsgänge am Prüfstand

6.2.1 Heizwärmebedarf

Grundlage für den Betrieb der Wärmesenke im Heizkreis bilden die in Abschnitt 4.2 entwickelten Referenzlastgänge des Heizwärmebedarfs der einzelnen Tagtypen. Die jeweiligen Bedarfsgänge liegen dabei in einer zeitlichen Auflösung von einer Viertelstunde vor. Da in den einzelnen Abschnitten des Prüfstands Wärmeverluste auftreten, muss die Soll-Vorgabe um diese Verluste korrigiert werden. Dazu ist es notwendig, die auftretenden Verluste in den einzelnen Teilen des Prüfstands zu ermitteln und anschließend von der Sollvorgabe des Gebäudes $P_{HK, Soll, Gebäude}$ zu subtrahieren. Im Falle einer Nichtversorgung des Heizkreises mit Wärme, wie dies bei einer Warmwasserspeichervorrangschaltung auftritt, entzieht man den einzelnen Heizkörperbehältern über eine definierte Heizkörperauskühlkurve Wärme, und bringt sie damit auf ein geringeres Temperaturniveau. Hier handelt es sich nicht um eine Besonderheit des Prüfstands, sondern um einen Vorgang, der in einem real existierenden Gebäude analog abläuft.

Die dem Gebäude nicht zur Verfügung gestellte Wärme wird bei Wiederversorgung in einer frei bestimmbaren Zeitspanne t_N nachgeholt. Zur Korrektur der an der Wärmesenke abzuführenden Leistung ist die vom Kessel in den Heizkreis eingespeiste Energiemenge $Q_{Kessel, HK}$ von der Soll-Vorgabe $Q_{HK, Soll, Gebäude}$ des Gebäudes zu subtrahieren und durch die Zeitspanne zu teilen. Daraus ergibt sich dann die an der Wärmesenke einzustellende Leistung $P_{HK, Soll, WS}$ nach folgender Gleichung:

$$P_{HK, Soll, WS} = P_{HK, Soll, Gebäude} - P_{HK, Verluste} + \frac{Q_{HK, Soll, Gebäude} - Q_{Kessel, HK}}{t_N} \quad (6.1)$$

- mit $P_{HK, Soll, WS}$: Leistung an der Wärmesenke in kW
 $P_{HK, Soll, Gebäude}$: Sollleistung Gebäude in kW
 $P_{HK, Verluste}$: Heizkreisverluste am Prüfstand in kW
 $Q_{HK, Soll, Gebäude}$: kumulierte Soll-Wärmemenge Gebäude in kWh
 $Q_{Kessel, HK}$: kumulierte, in den Heizkreis eingespeiste Wärmemenge in kWh
 t_N : Zeitspanne, in der die Unterversorgung auszugleichen ist, in h

Abbildung 6-2 zeigt die Umsetzung dieser Vorgaben am Prüfstand für einen „Wintertag heiter“ in einem Einfamilienhaus. Darin ist ein Tagesausschnitt aus einem mehrtägigen Versuchslauf abgebildet. Die Leistung $P_{HK, Ist, WS}$ stellt dabei die tatsächlich an der Wärmesenke aus dem Heizkreis abgeführte Leistung dar. Der leicht sägezahnähnliche Leistungsverlauf ist auf das Takten des Kessels zurückzuführen. Dieses Vorgehen ergibt eine sehr gute Übereinstimmung der vom Wärmeerzeuger in den Heizkreis eingebrachten Wärmemenge $Q_{Kessel, HK}$ mit der Sollvorgabe $Q_{HK, Soll, Gebäude}$. Dadurch sind Tagesverläufe im Heizkreis sehr gut reproduzierbar. Die vom Heizkessel erzeugte Wärmemenge $Q_{Kessel, Gesamt}$ setzt sich aus der in den

Heizkreis $Q_{Kessel, HK}$ und in den Warmwasserspeicher $Q_{Kessel, WWS}$ eingebrachten Wärmemenge zusammen.

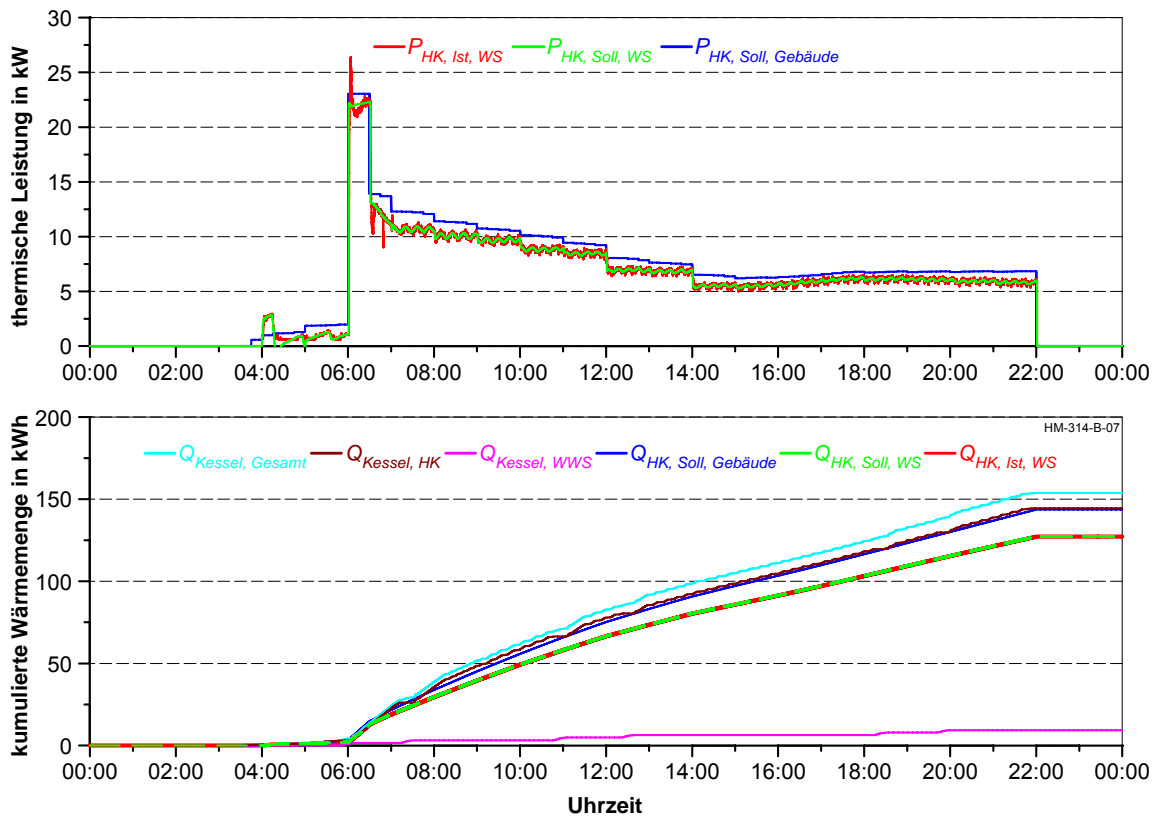


Abbildung 6-2: Thermische Leistungs- und Wärmemengenverläufe an der Wärmesenke im Heizkreis („Wintertag heiter“)

6.2.2 Zirkulationsverluste

Die Aufgabe des Wärmetauschers im Zirkulationskreis besteht darin, die vorgegebenen Zirkulationsverluste aus dem Warmwasserspeicher abzuführen. Die Entnahme der Zirkulationsverluste erfolgt zweistufig mittels Regelung der

- Anlaufverluste über einen Bypass und den Zirkulationswärmetauscher zu Beginn sowie
- der quasistationären Verluste über den Wärmetauscher.

Beim Start des Zirkulationsvorgangs treten im realen Gebäude wegen der Aufheizvorgänge Leistungspitzen auf, die – abhängig von der Temperatur in den einzelnen Leitungsstücken – meist um ein Vielfaches über den reinen Rohrleitungsverlusten liegen. Bei vollständig ausgekühltem Warmwasserverteilsystem wäre somit eine starke Abkühlung des dem Warmwasserspeicher entnommenen Wassers am Zirkulationsanschluss notwendig. Hierfür wäre ein sehr leistungsstarker und großer Wärmetauscher erforderlich, was eine erschwerte Regelung kleiner Leistungsstufen mit sich brächte. Deshalb kann beim Start der Zirkulationspumpe über einen Bypass kaltes Wasser nachgespeist werden, um die tiefen Temperaturen am Rücklauf

zum Warmwasserspeicher zu realisieren. Durch die Einstellung des Zirkulationswärmetauschers schon während des Anlaufvorgangs auf die vorgegebene Leistung lässt sich ein langes Einregeln vermeiden.

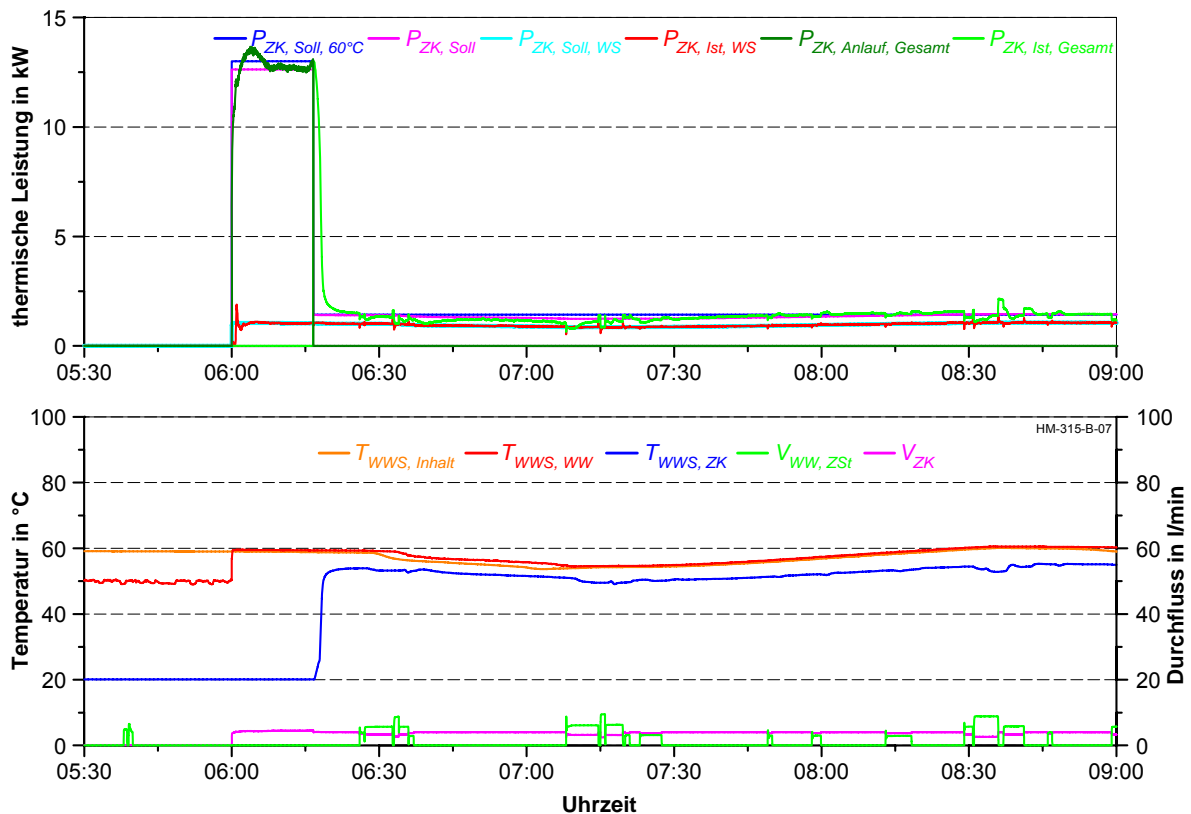


Abbildung 6-3: Thermische Leistungs- und Temperaturverläufe an der Wärmesenke im Zirkulationskreis

Die einzelnen Leistungs- und Temperaturverläufe am Warmwasserspeicher und am Zirkulationswärmetauscher sind in **Abbildung 6-3** am Beispiel eines Zirkulationssystems in einem Mehrfamilienhaus wiedergegeben. Gut zu erkennen ist die erforderliche Höhe der abzuführenden Leistung beim Startvorgang der Zirkulationspumpe. Die Dauer des Anlaufvorgangs wird dabei bestimmt vom Durchfluss im Zirkulationskreis, während die Höhe der Leistung von der mittleren Mediumtemperatur, dem Rohrwerkstoff und Isolierstandard sowie der Länge des Warmwasserverteilsystems abhängt. Am Ende des Anlaufvorgangs kommt es zu einem Anstieg der Temperatur am Zirkulationsanschluss des Warmwasserspeichers.

Ähnlich der Regelung der Wärmesenke im Heizkreis werden auch hier die Verluste im Zirkulationskreis berücksichtigt und die an der Wärmesenke abzuführende Leistung $P_{ZK, Soll, WS}$ korrigiert. Zusätzlich findet noch eine Korrektur der Sollleistung $P_{ZK, Soll, 60^\circ C}$, die auf eine Warmwasserspeichertemperatur von $60^\circ C$ bezogen ist, mittels des in Abschnitt 4.3 beschriebenen Korrekturfaktors statt. Wie im realen Gebäude treten auch am Wärmeerzeugerprüfstand

bei Warmwasserzapfvorgängen Leistungsänderungen bedingt durch Schwankungen des Durchflusses im Zirkulationskreis auf.

6.2.3 Warmwasserzapfvorgänge

Zur realitätsnahen Entnahme von Warmwasser aus dem Warmwasserspeicher dienen die am Prüfstand installierten Zapfventile. Die Zapftemperatur ist dabei über einen Thermostatmischer und der Zapfvolumenstrom über Drosselventile frei einstellbar. **Abbildung 6-4** zeigt eine am Prüfstand vorgenommene Duschzapfung mit einer Zapfmenge von 40 l. Der Beginn des Zapfvorgangs ist durch den Anstieg der Warmwassertemperatur an der Zapfstelle geprägt. Nach Erreichen der gewünschten Zapftemperatur wird kaltes Wasser zugemischt. Dies führt zu einer Verringerung des Volumenstroms aus dem Warmwasserspeicher. Nach Entnahme der vorgegebenen Zapfenergie von 1,32 kWh kommt es um 8:06 Uhr zum Schließen des Zapfventils.

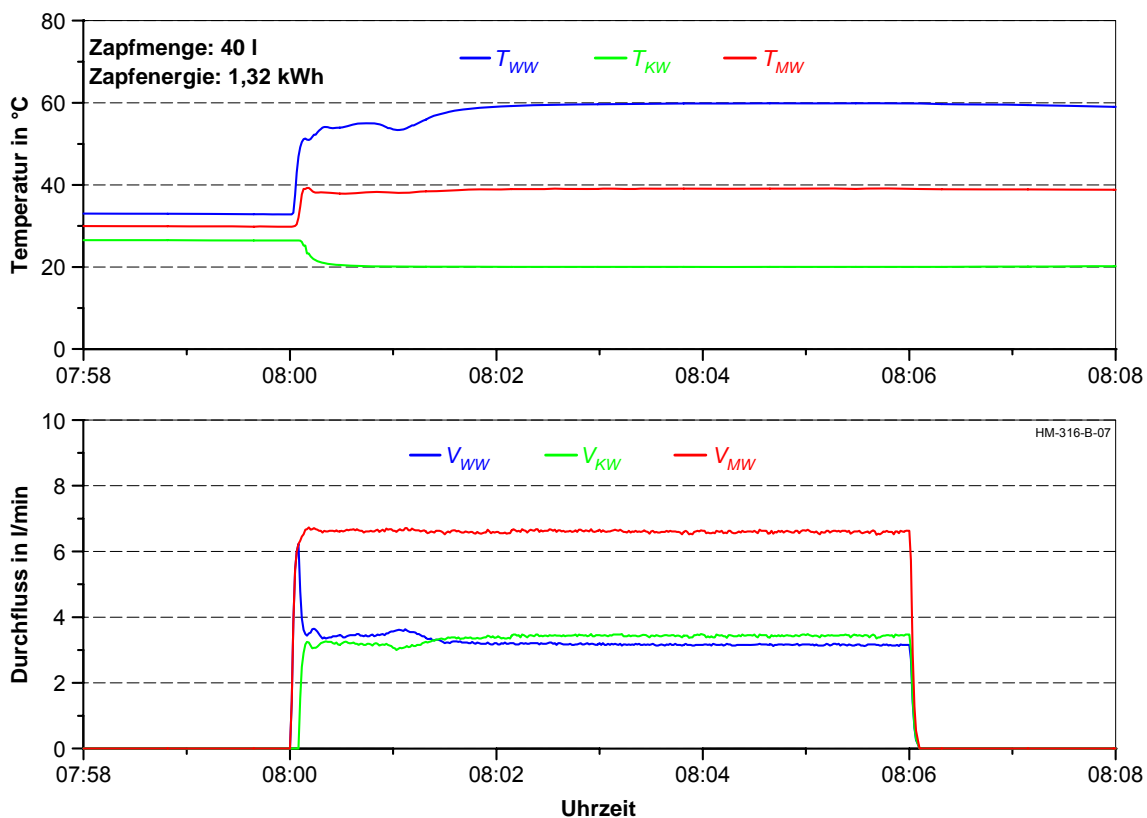


Abbildung 6-4: Temperatur- und Durchflussverläufe an der Warmwasserzapfstelle am Beispiel einer Duschzapfung

7 Prüfstandsversuche und Ergebnisse

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Durchführung einer Prüfstandsuntersuchung anhand eines Öl-Niedertemperaturkessels im Referenzgebäude „Einfamilienhaus“ und der Jahreshochrechnung der einzelnen Verbrauchswerte. Im Anschluss stehen der Vergleich mit einer Vor-Ort-Messung, verschiedene Parametervariationen sowie Messergebnisse ausgewählter Heizkessel im Mittelpunkt.

7.1 Messtechnische Untersuchungen eines Öl-Niedertemperaturkessels

Zunächst wird am Beispiel eines Heizkessels die Durchführung der messtechnischen Untersuchungen am Wärmeerzeugerprüfstands erläutert. Bei dem untersuchten Wärmeerzeuger handelt es sich um einen Öl-Niedertemperaturkessel (Baujahr 2000) mit einer Nennwärmeleistung von 21 kW. Laut Hersteller beträgt der Kesselwasserinhalt 33 l, bei einem Gesamtgewicht von 175 kg. Über einen Außentemperaturfühler kann die Heizwassertemperatur abhängig von der vorgegebenen Heizkurve gleitend eingestellt werden. Der Warmwasserspeicher mit einem Inhalt von 160 l, einer maximal zulässigen Warmwasserspeichertemperatur von 95 °C sowie einer Dauerleistung von 25,8 kW ist liegend unterhalb des Kessels montiert. Die Hersteller- und Typenschildangaben des Wärmeerzeugers und Warmwasserspeichers sind in **Tabelle 7-1** zusammengefasst.

Zum optimalen Betrieb des Öl-Niedertemperaturkessels war eine Anpassung der Heizkesselregelung an das Referenzgebäude und die einzelnen Bedarfsgänge notwendig. **Tabelle 7-2** gibt eine Übersicht der an der Heizkesselregelung vorgenommenen Einstellungen. Diese basieren auf den Empfehlungen des Herstellers. Die Frostschutzgrenztemperatur wurde mit 1 °C festgesetzt. Liegt die Außentemperatur unter dieser Grenztemperatur, führt das im Winterbetrieb zu einem automatischen Einschalten der Heizungsumwälzpumpe. Aufgrund des verwendeten Heizwärmebedarfsprofils war die Vorgabe für den Tagbetrieb von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr eine Raumtemperatur von 21 °C. Im Nachtbetrieb lag die hinterlegte Raumtemperatur bei 17 °C.

Um ein unnötiges Laden des Warmwasserspeichers während der Nachtstunden zu verhindern, erfolgte eine Programmierung des Warmwasserautomatikbetriebs auf die Zeiten von 5:30 Uhr bis 22:00 Uhr mit einer Warmwasserspeichertemperatur von 60 °C. Die Startzeitpunkte der Zirkulationspumpe wurden jeweils auf 6:00 Uhr und 11:00 Uhr mit einer Laufzeit von zwei Stunden sowie auf 17:00 Uhr mit einer Betriebszeit von drei Stunden festgelegt.

Tabelle 7-1: Herstellerangaben des untersuchten Öl-Niedertemperaturkessels

Daten Wärmeerzeuger	
Kesstyp	Öl-Niedertemperaturkessel
Baujahr	2000
Nennleistung	21 kW
Feuerungsleistung	22,4 kW
zulässiger Betriebsüberdruck	4 bar
zulässige Vorlauftemperatur	110 °C
Gewicht	175 kg
Kesselwassereinhalten	33 l
Daten Brenner	
Brennertyp	Ölbrenner
Baujahr	2000
Öldurchsatz	1,8 kg/h
Brennstoff	Heizöl EL
Daten Heizungsregelung	
Außentempersensor	vorhanden
Daten Warmwasserspeicher	
Baujahr	2000
Gewicht	100 kg
Inhalt Warmwasser	160 l
Inhalt Heizwasser	6 l
zulässige Temperatur Warmwasser	95 °C
zulässige Temperatur Heizwasser	160 °C
zulässiger Betriebsüberdruck Warmwasser	10 bar
zulässiger Betriebsüberdruck Heizwasser	25 bar
Dauerleistung	25,8 kW
Wärmeverluste	1,4 kWh/d

Tabelle 7-2: Voreinstellungen der Heizkesselregelung des Öl-Niedertemperaturkessels

Voreinstellungen Wärmeerzeuger	
Frostschutzgrenze	1 °C
Gebäudetyp	2
Brennersystem	1-stufig
Maximale Kessel-Ausschalttemperatur	80 °C
Voreinstellungen Heizkreis	
Betriebsart	automatischer Heizbetrieb
Tag-/Nachtbetrieb	06:00 Uhr – 22:00 Uhr / 22:00 Uhr – 06:00 Uhr
Raumtemperatur Tag/Nacht	21 °C / 17 °C
Heizsystem Heizkreis	Heizkörper
Auslegungstemperatur	75 °C
Absenkungsart	außentemperaturabhängig
Heizkennlinie (Vorlauf-/Außentemperatur)	45 °C / +10 °C 62 °C / 0 °C 75 °C / -10 °C
Sommer-Winterumschaltung	17 °C
Voreinstellungen Warmwasserspeicher	
Warmwasservorrangschaltung	Ein
Warmwasserbetrieb	Automatikbetrieb 05:30 Uhr – 22:00 Uhr
Warmwassertemperatur	60 °C
Warmwasserbetriebsweise	Zirkulationsbetrieb
Betriebszeit Zirkulationspumpe	06:00 Uhr – 08:00 Uhr 11:00 Uhr – 13:00 Uhr 17:00 Uhr – 20:00 Uhr

Nachfolgend sind exemplarisch für den Tagtyp „Wintertag heiter“ einige der am Prüfstand aufgenommenen Mess- und Bilanzdaten dargestellt. **Abbildung 7-1** zeigt die zeitlichen Verläufe der Heizungsparameter eines untersuchten Öl-Niedertemperaturkessels. Deutlich zu sehen ist der Zeitraum der Nachtabenkung von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr, der durch eine abgesenkte Heizungsvorlauftemperatur $T_{HK, VL}$ und eine geringere Takthäufigkeit gekennzeichnet ist. Während des Tagbetriebs ist die Abhängigkeit der Vorlauftemperatur im Heizkreis von der Außentemperatur erkennbar. Der sägezahnähnliche Verlauf der Heizungsvorlauftemperatur ist wegen der Warmwasserspeichervorrangschaltung nur zu Zeiten der Warmwasserspeicherladung unterbrochen. Kommt es zu einer Warmwasserspeicherladung, schaltet die Heizungsumwälzpumpe ab, und der Heizkreis wird nicht mehr mit Wärme versorgt. Schaltet sie wieder ein, sinkt die Rücklauftemperatur am Wärmeerzeuger wegen der Auskühlung während der Warmwasserspeicherladung sehr stark ab.

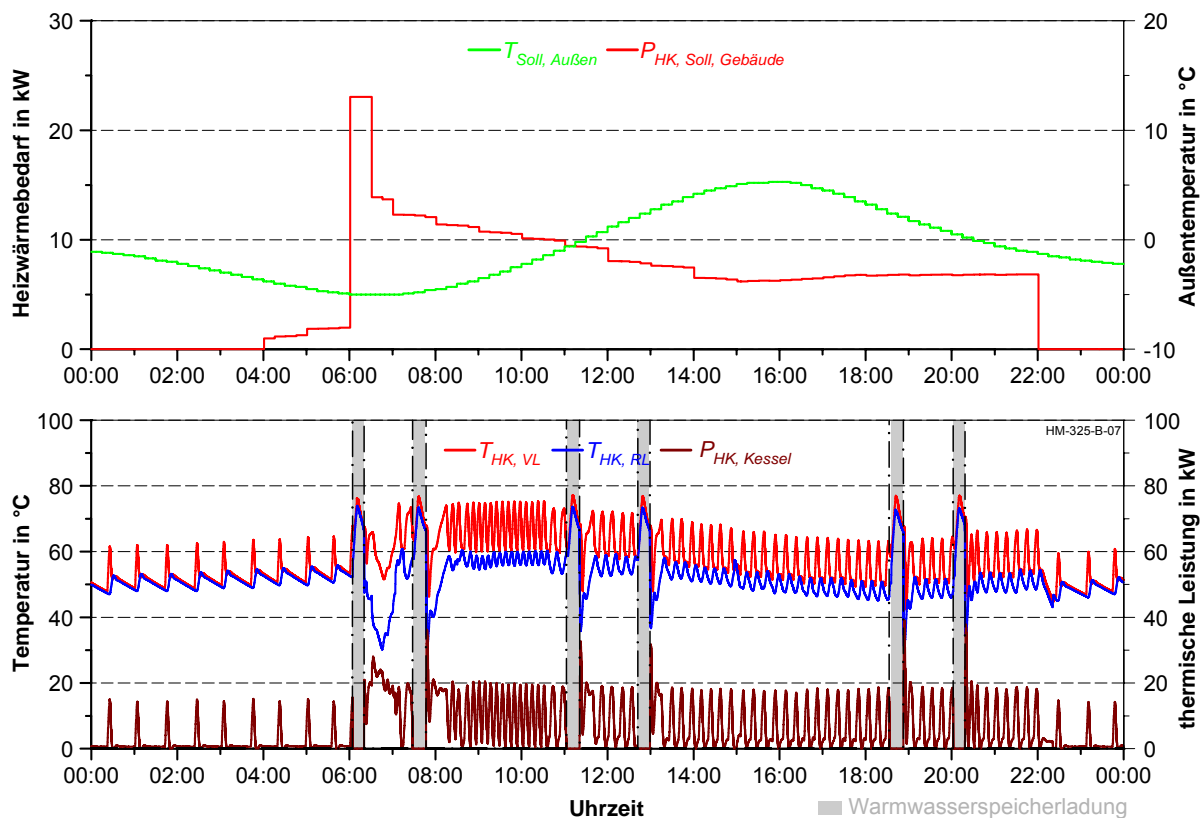


Abbildung 7-1: Betriebsdaten der Raumwärmeversorgung mit einem Öl-Niedertemperaturkessel („Wintertag heiter“)

Die Temperatur- und Leistungsverläufe am Warmwasserspeicher sind aus **Abbildung 7-2** ablesbar. Zur Deckung der erforderlichen Zapfleistung $P_{Soll, ZSt}$ und der Zirkulationsverlustleistung $P_{Soll, ZK}$ sind während des Tages sechs Warmwasserspeicherladungen erforderlich. Sinkt die Warmwasserspeichertemperatur unter einen bestimmten Wert ab, läuft der Brenner an, und es kommt zur Ladung des Warmwasserspeichers. Ist eine Kesselwassertemperatur von rund 80 °C erreicht, schaltet der Heizkessel ab und die Warmwasserspeicherladeleistung

$P_{WWS, Ladung}$ sinkt, bedingt durch fallende Ladetemperaturen. Nach Erreichen einer eingestellten Warmwasserspeichertemperatur schaltet der Wärmeerzeuger wieder auf Heizbetrieb um.

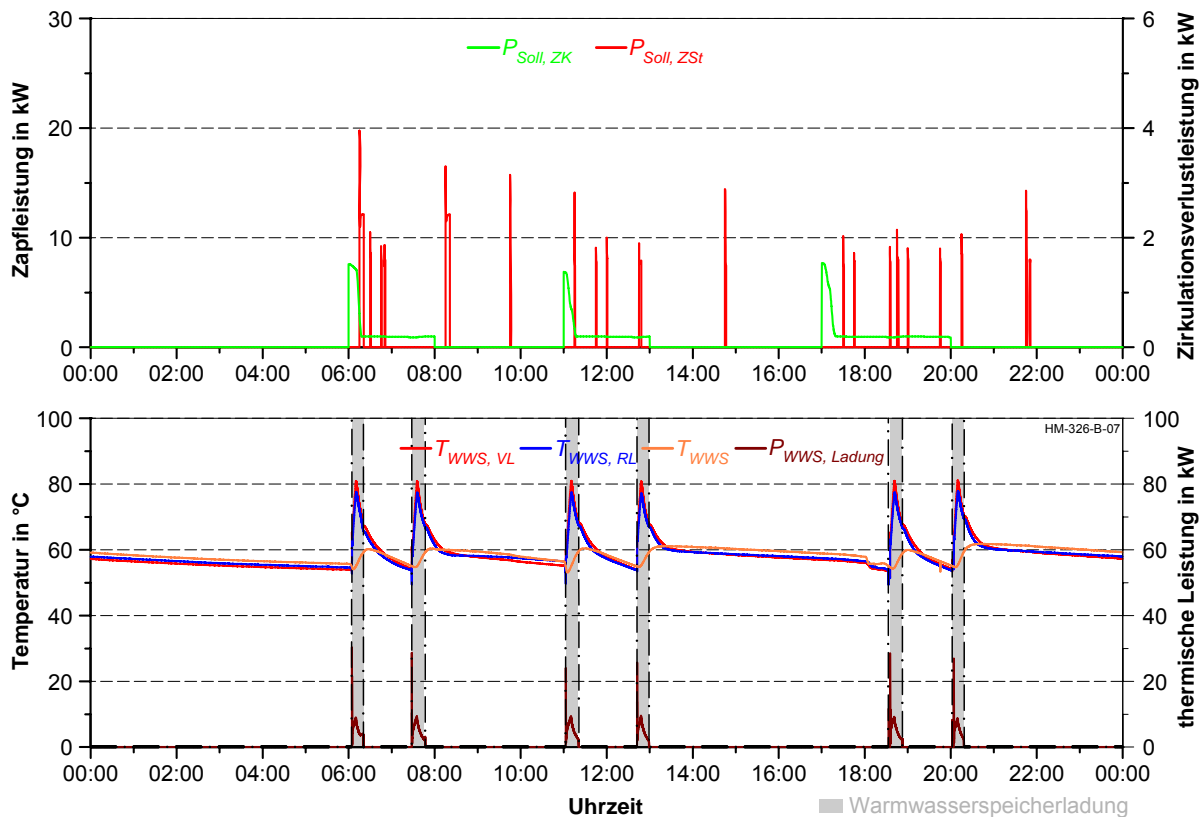


Abbildung 7-2: Temperatur- und Leistungsverlauf am Warmwasserspeicher (Zapfprofil „Normaltag“ / Zirkulationsbetrieb)

Die Emissionskonzentrationen der einzelnen Betriebsphasen eines Brennerzyklusses sind in **Abbildung 7-3** verzeichnet. Sie bestehen aus:

- Startphase
- quasistationärer Betrieb
- Stoppvorgang

Die Startphase beginnt bei Öffnung des Brennstoffventils und endet bei Erreichen des quasistationären Betriebs. Im quasistationären Zustand kommt es bei zyklischer Wiederholung nur noch zu geringen Abweichungen von Leistung und Emissionen. Der Stoppvorgang wird durch das Schließen des Brennstoffventils eingeleitet und mit dem Erreichen der quasistationären Emissionen nach dem Stoppvorgang abgeschlossen. Auffällig sind die Mehremissionen während der Start- und Stoppvorgänge des Brenners. Ursachen hierfür sind unter anderem eine unvollständige Verbrennung zu Beginn und ein Nachtropfen der Öldüse am Ende der Brennerlaufzeit. In eine Emissionsbetrachtung müssen deshalb neben den Emissionen im stationären Betrieb auch die Emissionen während der Start- und Stoppvorgänge miteinfließen. Entscheidend für den zusätzlichen Beitrag der Start- und Stoppemissionen ist vor allem die

Takthäufigkeit des Brenners. Die Brennerlaufzeit setzt sich aus der Vorspülzeit und der Zeit der Brennstoffzufuhr zusammen. Beim Startvorgang des Brenners muss der Brennraum gespült werden, um brennbare Gase aus dem Brennraum zu entfernen. Das Vorspülen und die Zündfreigabe bedingen eine höhere elektrische Leistungsaufnahme zu Beginn der Brennerlaufzeit.

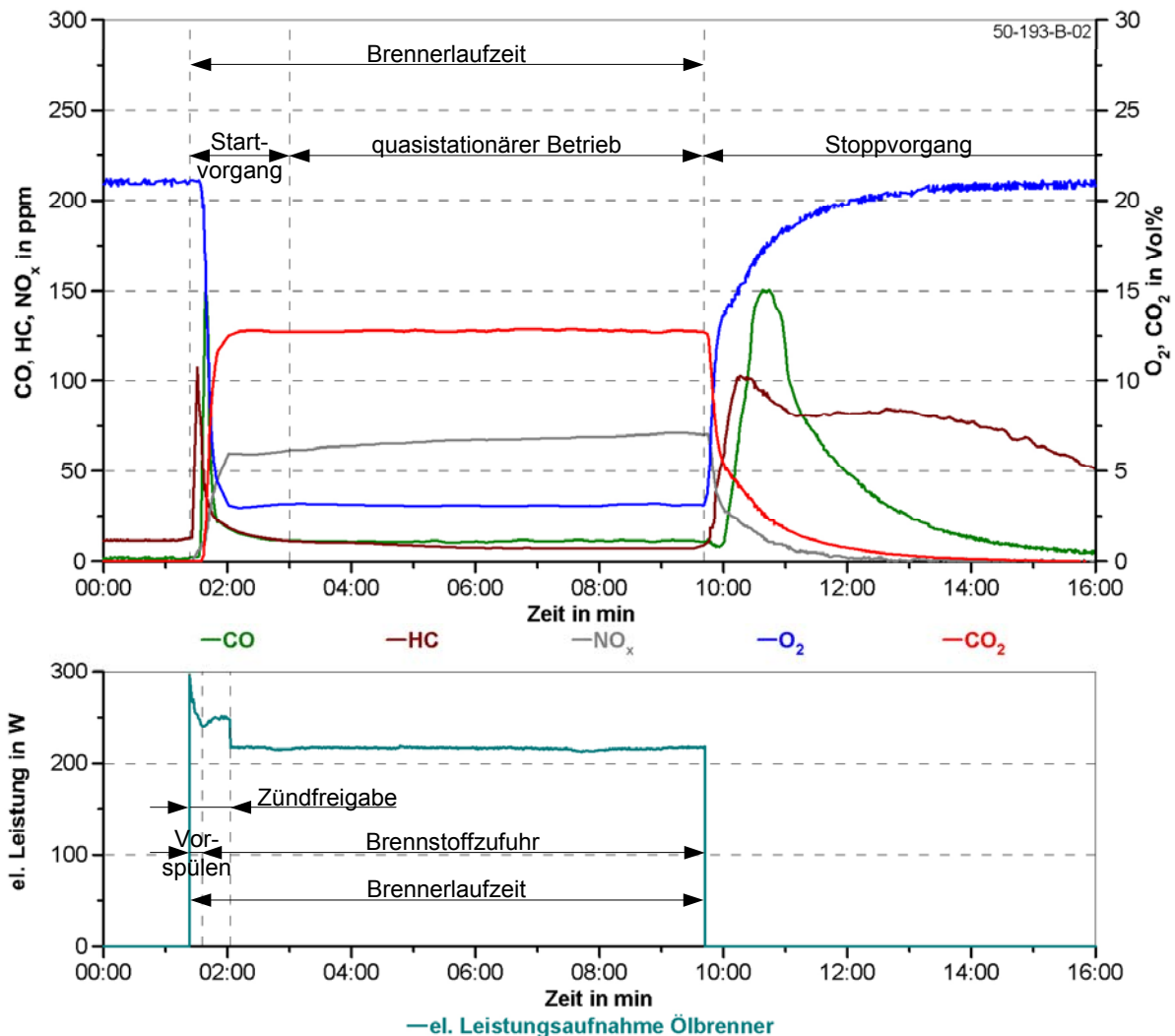


Abbildung 7-3: Emissionen der einzelnen Betriebsphasen eines Brennerzyklusses

Tabelle 7-3 fasst die Messergebnisse des untersuchten Öl-Niedertemperaturkessels für sämtliche Tagtypen zusammen. Die Messreihen reichen vom reinen Sommerbetrieb mit ausschließlicher Warmwasserbereitung bis zum „Wintertag“ mit einem Heizwärmebedarf von rund 150 kWh/d. Aufgrund des verwendeten Warmwasserzapfprofils „Normaltag“ liegen die einzelnen Verbrauchswerte zur Warmwasserversorgung an allen Tagen auf annähernd gleichen Niveaus. Die zur Deckung des Warmwasserbedarfs erforderliche Energiemenge für die Warmwasserspeicherladung am Wärmeerzeuger beträgt rund 9,5 kWh/d und setzt sich aus der Energieentnahme für Warmwasserzapfvorgänge, den Zirkulationsverlusten und Warmwasserspeicherverlusten sowie den Leitungsverlusten zwischen dem Wärmeerzeuger und dem

Warmwasserspeicher zusammen. Die in den Heizkreis eingebrachten Energiemengen liegen, bei Laufzeiten der Heizungsumwälzpumpe von 11,6 h bis 22,2 h, zwischen 39,8 kWh/d und 144,9 kWh/d. Zur Versorgung des Referenzgebäudes mit Nutzwärme sind Brennerlaufzeiten von 0,8 h am „Sommertag“ und 7,6 h am „Wintertag heiter“ erforderlich. Aus den einzelnen Verbräuchen resultieren Tagesnutzungsgrade zwischen 57,7 % („Sommertag“) und 94,2 % („Übergangstag trüb“).

Tabelle 7-3: Messergebnisse des Öl-Niedertemperaturkessel für die einzelnen Tagtypen (RO-EFH-1/1 / Zapfprofil „Normaltag“ / Zirkulationsbetrieb)

Bilanzkreis Wärmeerzeuger	Einheit	WT-H	WT-T	ÜT-H	ÜT-T	ST
Versuchsdauer	h	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
Brennstoffeinsatz	kg	13,9	13,4	4,5	6,2	1,4
Energiemenge Brennstoff	kWh	164,4	158,3	53,9	73,7	16,4
Gesamtenergiemenge Wärmeerzeugung	kWh	154,4	148,9	49,3	69,4	9,5
Energiemenge Heizkreis	kWh	144,9	139,5	39,8	59,9	0,0
Energiemenge Warmwasserspeicherladung	kWh	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Brennerlaufzeit	h	7,6	7,3	2,5	3,4	0,8
Brennerstillstandszeit	h	16,4	16,7	21,5	20,6	23,2
Brennerstarts	-	82	73	27	46	6
elektr. Leistung Brenner	W	204	204	204	204	204
elektr. Hilfsenergie Brenner	kWh	1,6	1,5	0,5	0,7	0,2
elektr. Leistung Regelung	W	9	9	9	9	9
elektr. Hilfsenergie Regelung	kWh	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Tagesnutzungsgrad	%	93,9	94,1	91,5	94,2	57,7
Bilanzkreis Heizkreis						
Energiemenge Heizkreis	kWh	144,9	139,5	39,8	59,9	0
Laufzeit UP Heizkreis	h	22,2	22,2	11,6	15,6	0
elektr. Leistung UP Heizkreis	W	65	65	65	65	0
elektr. Hilfsenergie UP Heizkreis	kWh	1,4	1,4	0,8	1,0	0
Bilanzkreis Warmwasserspeicher (WWS)						
Energieeintrag Warmwasserspeicherladung	kWh	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
Verluste Wärmeerzeuger – WWS	kWh	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Warmwasserspeicherverluste	kWh	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Laufzeit UP WWS-Ladung	h	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
elektr. Leistung UP WWS-Ladung	W	90	90	90	90	90
elektr. Hilfsenergie UP WWS-Ladung	kWh	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Zapfprofil	-	„Normaltag“	„Normaltag“	„Normaltag“	„Normaltag“	„Normaltag“
Zapfmenge	kg	204	204	204	204	204
Ausgussverlustmenge	kg	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
genutzte Zapfmenge	kg	198,6	198,6	198,6	198,6	198,6
spez. genutzte Zapfmenge	kg/Pers.	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7
genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh	6,57	6,57	6,57	6,57	6,57
spez. genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh/Pers.	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Zirkulationsverluste	kWh	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
spez. Zirkulationsverlustleistung ²	W/m	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
Laufzeit Umwälzpumpe Zirkulation	h	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
elektr. Leistung UP Zirkulation	W	25	25	25	25	25
elektr. Hilfsenergie UP Zirkulation	kWh	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

² inklusive Anlaufverluste

WT-H: „Wintertag heiter“, WT-T: „Wintertag trüb“, ÜT-H: „Übergangstag heiter“, ÜT-T: „Übergangstag trüb“, ST: „Sommertag“

In **Abbildung 7-4** sind die ermittelten Brennstoffverbrauchswerte der einzelnen Tagstypen in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge veranschaulicht. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass zwischen der abgegebenen Wärmemenge am Wärmeerzeuger und dem Brennstoffeinsatz ein deutlicher linearer Zusammenhang besteht.

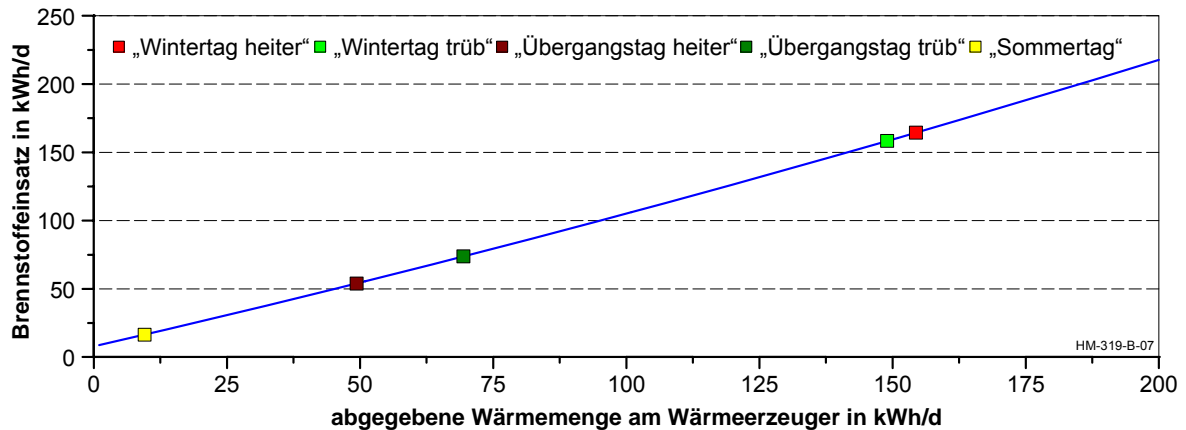


Abbildung 7-4: Brennstoffeinsatz in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge

Mit Hilfe der durchgeführten Regression kann der in **Abbildung 7-5** dargestellte Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge bestimmt werden. Bei geringer Auslastung, wie dies bei der reinen Warmwasserbereitung in den Sommermonaten der Fall ist, kommt es zu einem sehr starken Nutzungsgradabfall.

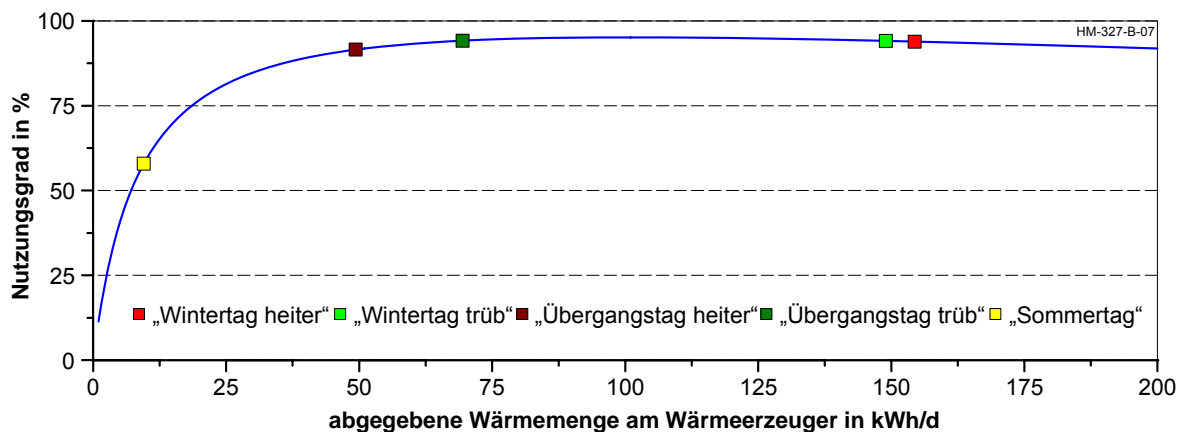


Abbildung 7-5: Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge

7.2 Analyse der Prüfstandsversuche in Bezug auf den Jahresnutzungsgrad

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der einzelnen Tagesnutzungsgrade und des Jahresnutzungsgrads zeigt **Abbildung 7-6**. Ausgehend von den einzelnen Tagesverbrauchswerten eines

Jahres, wie in Abschnitt 4 erläutert, können einerseits die Fahrpläne der fünf Tagtypen zum Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands ermittelt und andererseits der Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Außentemperatur durch eine Sigmoid-Funktion abgebildet werden. Mit Hilfe der Sigmoid-Funktion ist für jeden Tag des Jahres der Heizwärmebedarf Q_H über die zugehörige Außentemperatur bestimmbar. Bei Verwendung des Heizkessels zur Heizwärme- und Warmwasserbedarfsdeckung erhöht sich die zu erzeugende Wärmemenge um die vom Wärmeerzeuger für die Warmwasserspeicherladung zur Verfügung zu stellende Wärmemenge $Q_{W,i}$.

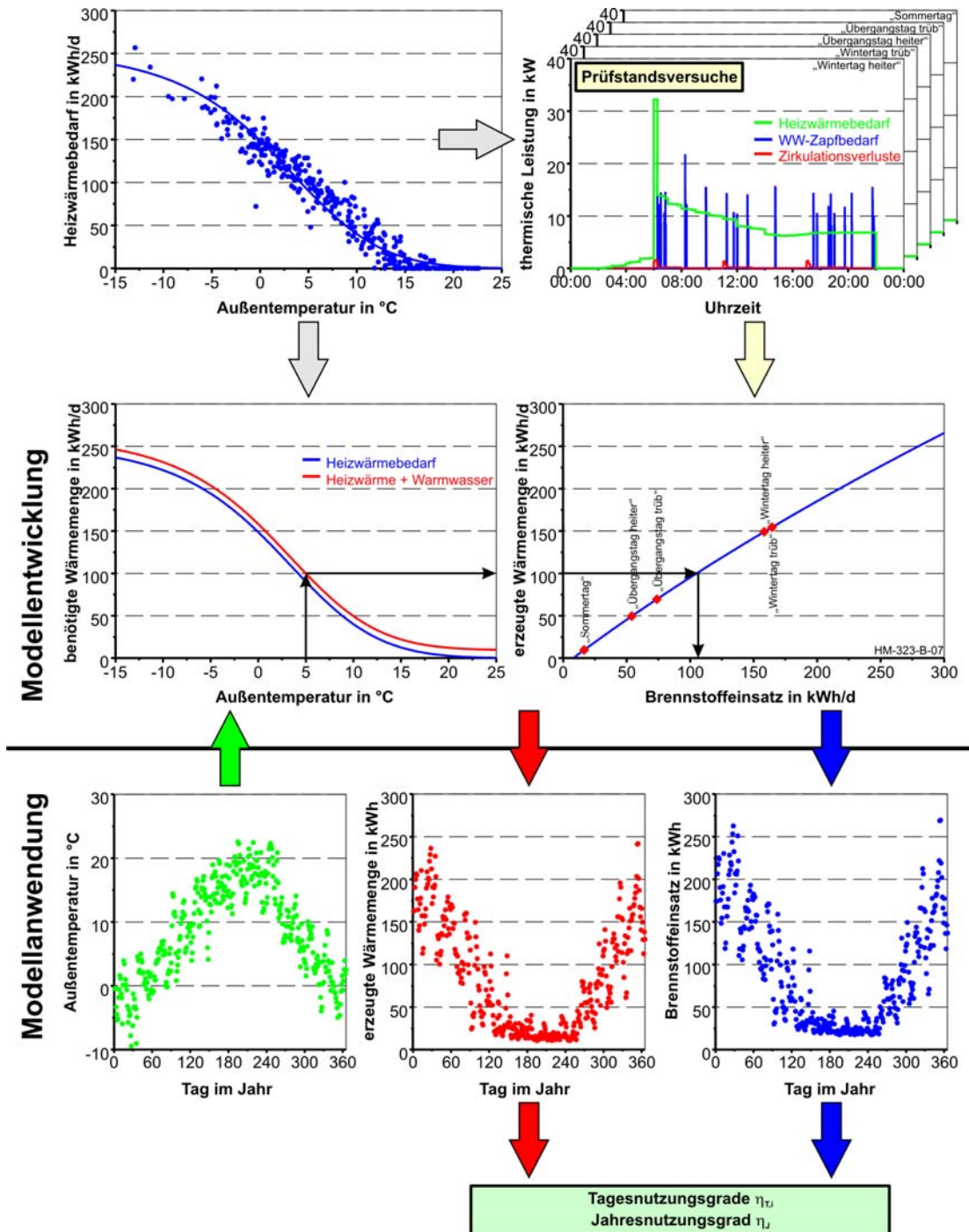


Abbildung 7-6: Jahreshochrechnung

Die am Prüfstand durchgeführten Versuchsreihen der einzelnen Tagtypen liefern den Brennstoffeinsatz in Abhängigkeit von der am Heizkessel erzeugten Wärmemenge. Mittels der Brennstoffkennlinie ist es anschließend möglich, den Brennstoffeinsatz $Q_{BR,i}$ für jeden Tag des Jahres festzustellen. Die einzelnen Verbrauchswerte für Heizung und Warmwasser, die Tagesnutzungsgrade $\eta_{T,i}$ und der Jahresnutzungsgrad η_J ergeben sich aus folgendem Zusammenhang:

$$\eta_{T,i} = \frac{Q_{H,W,i}}{Q_{BR,i}} \quad (7.1)$$

$$\eta_J = \frac{\sum_{i=1}^{365} Q_{H,W,i}}{\sum_{i=1}^{365} Q_{BR,i}} \quad (7.2)$$

wobei $Q_{H,W,i} = Q_{H,i} + Q_{W,i}$

$$\text{und } Q_{H,i} = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T_{A,i} - 40} \right)^C}$$

mit η_T : Tagesnutzungsgrad

η_J : Jahresnutzungsgrad

$Q_{H,W}$: gesamte erzeugte Wärmemenge in kWh/d

Q_H : erzeugte Wärmemenge zur Heizwärmebedarfsdeckung in kWh/d

Q_W : erzeugte Wärmemenge zur Warmwasserbedarfsdeckung in kWh/d

Q_{BR} : Brennstoffeinsatz in kWh/d

A, B, C : Koeffizienten

T_A : mittlere Tagesaußentemperatur in °C

i : Tagnummer

Alternativ kann zur Bestimmung des Jahresbrennstoffeinsatzes nachstehende Formel verwendet werden:

$$Q_{BR,J} = Q_{BR,WTH} \cdot a_{WTH} + Q_{BR,WTT} \cdot a_{WTT} + Q_{BR,ÜTH} \cdot a_{ÜTH} + Q_{BR,ÜTT} \cdot a_{ÜTT} + Q_{BR,ST} \cdot a_{ST} \quad (7.3)$$

mit $Q_{BR,J}$: Jahresbrennstoffeinsatz in kWh/a

$Q_{BR,\dots}$: Brennstoffeinsatz des Tagtyps in kWh/d

a : Anzahl der Tage

Indizes WTH : „Wintertage heiter“

WTT : „Wintertage trüb“

$ÜTH$: „Übergangstage heiter“

$ÜTT$: „Übergangstage trüb“

ST : „Sommertage“

Dabei werden die an den Tagtypen benötigten Brennstoffmengen entsprechend ihrer statistischen Häufigkeit gewichtet und auf den Zeitraum eines Jahres hochgerechnet. Die Ergebnisse aus der täglichen Bestimmung und der gewichteten Hochrechnung stimmen aufgrund der in Abschnitt 4 definierten und gewichteten Tagtypen überein. Damit ist eine rationelle, auf nur wenigen Tagtypen beruhende, umfassende Effizienzbewertung einer Kesselanlage möglich. Wenige Versuchstage erlauben folglich eine Beurteilung des täglichen und saisonalen Betriebsverhaltens von Wärmeerzeugern sowie Aussagen zur Jahresbilanz.

Die Ergebnisse aus der Jahreshochrechnung des untersuchten Öl-Niedertemperaturkessels sind in **Tabelle 7-4** aufgeführt. Zur Versorgung des Gebäudes mit Nutzwärme ist eine am Heizkessel zu erzeugende Wärmemenge von 30196 kWh/a, bei einem Jahresbrennstoffverbrauch von 2777 l Heizöl, notwendig. Die Nutzwärme teilt sich dabei auf in 26736 kWh/a für Heizzwecke und 3460 kWh/a zur Warmwasserbedarfsdeckung. Daraus ergibt sich der Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers von 91,7 %. Um den spezifischen elektrischen Hilfsenergieverbrauch des Wärmeerzeugers ausweisen zu können, ist es erforderlich, sowohl die elektrische Leistungsaufnahme der Regelung als auch die des Brenners getrennt messtechnisch zu erfassen und hochzurechnen.

Da die Leistungsaufnahme der Regelung bei diesem Heizkessel konstant ist, ist sie mit der Betriebszeit zu multiplizieren. Zur Berechnung des elektrischen Hilfsenergiebedarfs des Brenners ist es notwendig, die Brennerlaufzeit über den am Prüfstand ermittelten, tatsächlich vorhandenen Brennstoffdurchsatz zu bestimmen.

Mittels nachfolgender Formel lässt sich die Brennerlauf- und -stillstandszeit errechnen:

$$t_{BrL} = \frac{B_a}{\dot{m}_{Düse}} \quad (7.4)$$

$$t_{BrS} = 8760 - t_{BrL} \quad (7.5)$$

mit B_a : Jahresbrennstoffbedarf in kg/a
 t_{BrL} : Brennerlaufzeit in h/a
 t_{BrS} : Brennerstillstandszeit in h/a
 $\dot{m}_{Düse}$: Brennstoffdurchsatz in kg/h

Die Brennerlaufzeit des Prüflings beträgt – bei einem Brennstoffdurchsatz $\dot{m}_{Düse}$ durch die Düse von 1,84 kg/h – 1520 h/a. Aus dem elektrischen Hilfsenergiebedarf des Brenners von 310 kWh/a und der Regelung von 79 kWh/a folgt ein spezifischer elektrischer Hilfsenergieverbrauch des Wärmeerzeugers von 3,8 kWh/(m²·a).

Die Ergebnisse aus den Prüfstandsuntersuchungen der Warmwasserbereitung der einzelnen Tagtypen lassen sich entsprechend ihrer statistischen Häufigkeit gewichten und zu Jahreswerten hochrechnen. Bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur

von 38 °C ergibt sich bei Zirkulationsverlusten von 738 kWh/a und Ausgussverlusten von 51 kWh/a eine spezifisch genutzte Zapfenergiemenge von 599 kWh/(Pers.·a).

Für die Berechnung der Laufzeiten der Heizungsumwälzpumpe sind die in der jeweiligen Heizkesselregelung hinterlegten Grenztemperaturen zum Ausschalten der Pumpen heranzuziehen. Über die Viertelstundenwerte der Außentemperatur kann man damit nicht nur die Laufzeit, sondern auch den elektrischen Hilfsenergiebedarf ausweisen.

Tabelle 7-4: Ergebnisse der Jahreshochrechnung für den Öl-Niedertemperaturkessel

Allgemeines	Einheit	
Anzahl der Tage	-	365
beheizte Fläche	m ²	102
Bewohner	Pers.	4
Bilanzkreis Wärmeerzeuger		
Jahresbrennstoffverbrauch	kg/a	2777
Heizwert Brennstoff	kWh/kg	11,86
Jahresenergiemenge Brennstoff	kWh/a	32937
Gesamtenergiemenge Wärmeerzeugung	kWh/a	30196
Jahresenergiemenge Heizkreis	kWh/a	26736
Jahresenergiemenge Warmwasserspeicherladung	kWh/a	3460
Brennerlaufzeit	h/a	1520
Brennerstillstandszeit	h/a	7240
Brennerstarts	-	16403
Hilfsenergie Brenner	kWh/a	310
Hilfsenergie Regelung	kWh/a	79
spezifischer elektr. Hilfsenergieverbrauch Wärmeerzeuger	kWh/(m ² ·a)	3,8
Jahresnutzungsgrad	%	91,7
Bilanzkreis Heizkreis		
Jahresenergiemenge Heizkreis	kWh/a	26736
spez. Energiemenge Heizkreis	kWh/(m ² ·a)	262
Laufzeit UP Heizkreis	h/a	4600
elektr. Hilfsenergie UP Heizkreis	kWh /a	299
spez. elektr. Hilfsenergie UP Heizkreis	kWh/(m ² ·a)	2,9
Bilanzkreis Warmwasserspeicher		
Jahresenergiemenge Warmwasserspeicherladung	kWh/a	3372
spez. Jahresenergiemenge Warmwasserspeicherladung	kWh/(Pers.·a)	843
Verluste Wärmeerzeuger – Warmwasserspeicher	kWh/a	88
Warmwasserspeicherverluste	kWh/a	511
Laufzeit UP Warmwasserspeicherladung	h/a	652
elektr. Hilfsenergie UP Warmwasserspeicherladung	kWh/a	59
Zapfmenge	kg/a	74450
Ausgussverlustmenge	kg/a	1965
genutzte Zapfmenge	kg/a	72485
spez. genutzte Zapfmenge	kg/(Pers·a)	18121
Zapfenergiemenge ¹	kWh/a	2448
Ausgussverluste	kWh/a	51
genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh/a	2397
spez. genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh/(Pers.·a)	599
Zirkulationsverluste	kWh/a	738
spez. Zirkulationsverlustleistung ²	W/m	8,6
Laufzeit Umwälzpumpe Zirkulation	h/a	2555
elektr. Hilfsenergie UP Zirkulation	kWh/a	64

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

² inklusive Anlaufverlusten

7.3 Vergleich der Messergebnisse mit Feldversuchen

Zur Überprüfung der am Wärmeerzeugerprüfstand durchgeführten Messungen wurde nach Abschluss der Feldversuche ein Heizkessel ausgebaut und am Prüfstand untersucht. Der Verlauf des Brennstoffeinsatzes und des Nutzungsgrads über der vom Wärmeerzeuger abgegebene Wärmemenge sowohl für die Vor-Ort-, als auch für die Prüfstandsmessung ist in **Abbildung 7-7** zu sehen. Die auf Prüfstandsuntersuchungen beruhenden Verläufe stimmen sehr gut mit den Messungen vor Ort überein. Die Abweichungen der Tagesnutzungsgrade liegen durchweg unter einem halben Prozentpunkt.

Der praxisnahe Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands ist für diesen Fall nachgewiesen. Man kann davon ausgehen, dass bei experimenteller Prüfung weiterer Wärmeerzeuger realitätsnahe und belastbare Ergebnisse zum typischen Betriebsverhalten und zur Energieeffizienz im Jahresbetrieb möglich und testierbar sind.

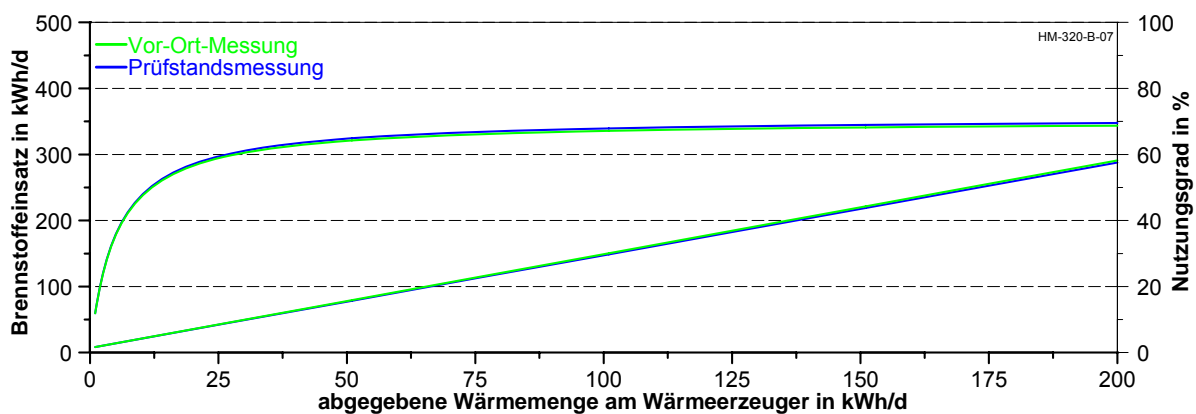


Abbildung 7-7: Brennstoffeinsatz und Nutzungsgradverlauf eines vor Ort und am Prüfstand untersuchten atmosphärischen Gaskessels

7.4 Analyse ausgewählter Einflussfaktoren

Der effiziente Betrieb von Wärmeerzeugern ist von einer Vielzahl verschiedener Parameter abhängig. Jeder dieser Faktoren wirkt sich auf die Güte der Wärmeerzeugung aus. Exemplarisch für die Fülle der Einflussgrößen wurden im Rahmen dieser Arbeit dazu folgende Versuche durchgeführt:

- Wärmeerzeuger mit und ohne Außentemperaturfühler
- Zirkulations- und/oder Stichleitungsbetrieb
- Zapfprofil „Normaltag“ oder „Badetag“

7.4.1 Wärmeerzeuger mit und ohne Außentemperaturfühler

Um die Auswirkungen eines Außentemperaturfühlers in Bezug auf den Jahresnutzungsgrad erkennen zu können, wurden an einem Heizkessel mit dem Baujahr 1985 Versuche sowohl

mit, als auch ohne Außentemperaturfühler, bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen, durchgeführt. Der Brennstoffeinsatz und der Nutzungsgrad über der vom Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge für beide Versuchsreihen ist in **Abbildung 7-8** skizziert.

Ist am Heizkessel ein Außentemperaturfühler montiert, besteht die Möglichkeit, den Kessel gleitend zu betreiben. Die Heizkesselregelung stellt die Kesselwassertemperatur abhängig von der Außentemperatur und der gewählten Heizkurve ein. Ist kein Außentemperaturfühler vorhanden, wird der Wärmeerzeuger auf einer vorgegebenen Temperatur gehalten.

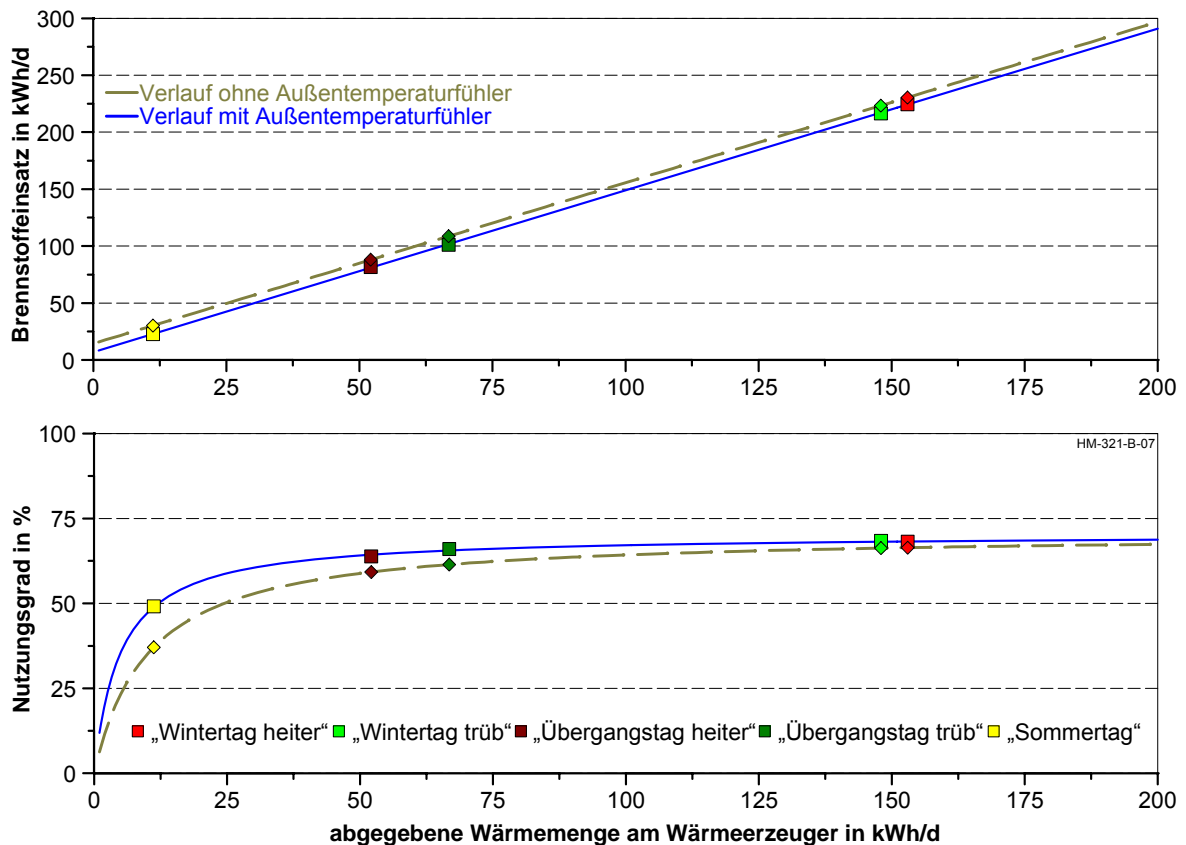


Abbildung 7-8: Brennstoffeinsatz und Nutzungsgradverlauf mit und ohne Außentemperaturfühler

Der Einsatz eines Heizkessels mit Außentemperaturfühler zeichnet sich durch eine meist geringere Kesselwassertemperatur aus, als das bei Kesseln ohne Außentemperaturfühler der Fall ist. Speziell in den Zeiten niedriger Auslastung wirkt sich dies vorteilhaft auf den Brennstoffverbrauch und – bei gleicher erzeugter Wärmemenge – damit auch auf den Nutzungsgrad aus. Der Grund dafür sind höhere Verluste beim Betrieb ohne Außentemperaturfühler. Beim untersuchten Wärmeerzeuger lag der Nutzungsgrad im Sommerbetrieb rund 12 % und der Jahresnutzungsgrad bei der Verwendung eines Außentemperaturfühler rund 5 % höher. Speziell bei Brennwertgeräten oder Niedertemperaturkesseln neueren Baujahrs, die noch tiefere Kesselwassertemperaturen gestatten, fiel dieser Unterschied noch gravierender aus.

7.4.2 Warmwasserverteilung als Zirkulations- oder Stichelungsbetrieb

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen mit Zirkulations- oder Stichelungsbetrieb sind der **Tabelle 7-5** zu entnehmen. Bei Zirkulationsbetrieb kommt es gegenüber dem reinen Stichelungsbetrieb wegen der Zirkulationsverluste zu einer größeren zu erzeugenden Wärmemenge am Heizkessel, was hier einen Brennstoffmehrverbrauch von 32 kg/a zur Folge hat. Trotz auftretender Zirkulationsverluste von 738 kWh/a liegt die zur Warmwasserspeicherladung benötigte Energiemenge nur rund 400 kWh/a höher.

Tabelle 7-5: Messergebnisse für Zirkulations- und/oder Stichelungsbetrieb

Bilanzkreis Wärmeerzeuger		Stichelungsbetrieb	Zirkulationsbetrieb
Jahresbrennstoffverbrauch	kg/a	2745	2777
Jahresenergiemenge Brennstoff	kWh/a	32562	32946
Gesamtenergiemenge Wärmeerzeugung	kWh/a	29830	30206
Jahresenergiemenge Heizkreis	kWh/a	26736	26736
Jahresenergiemenge Warmwasserspeicherladung	kWh/a	3094	3470
Jahresnutzungsgrad	%	91,6	91,7
Bilanzkreis Warmwasserspeicher			
Laufzeit UP Warmwasserspeicherladung	h/a	582	653
Zapfmenge	kg/a	79626	74450
Ausgussverlustmenge	kg/a	6888	1965
genutzte Zapfmenge	kg/a	72735	72485
spez. genutzte Zapfmenge	kg/(Pers.·a)	18185	18121
Zapfenergiemenge ¹	kWh/a	2548	2448
Ausgussverluste ²	kWh/a	153	51
genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh/a	2397	2397
spez. genutzte Zapfenergiemenge ¹	kWh/(Pers.·a)	599	599
Zirkulationsverluste	kWh/a	-	738
Hilfsenergieverbrauch			
elektr. Hilfsenergieverbrauch	kWh/a	736	811

¹ bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C und eine Zapftemperatur von 38 °C

² bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C

Ursächlich dafür sind vor allem die höheren Aufheiz- und Ausgussverluste beim Zapfvorgang im Stichelungsbetrieb. Bei gleicher genutzter Zapfenergiemenge von 2397 kWh/a beträgt die Ausgussverlustmenge beim Stichelungsbetrieb rund 5000 kg/a mehr. Angesichts der daraus resultierenden, sehr geringen Unterschiede in den Betriebsbedingungen des Heizkessels liegt der Jahresnutzungsgrad bei beiden Betriebsarten auf einem ähnlichen Niveau. Neben dem höheren Brennstoffverbrauch weist das Zirkulationssystem bedingt durch die Zirkulationspumpe einen um rund 70 kWh/a höheren elektrischen Hilfsenergieverbrauch auf.

7.4.3 Zapfprofil „Normal-“ oder „Badetag“

Zusätzlich zu den Versuchen mit dem Zapfprofil „Normaltag“ fanden Versuchsreihen mit dem Zapfprofil „Badetag“ statt, um den Einfluss veränderlicher Nutzergewohnheiten auf den Betrieb des Heizkessels aufzuzeigen. Das Zapfprofil „Badetag“ zeichnet sich dabei durch einen erhöhten Zapfenergiebedarf aus (siehe Abschnitt 4.3). Bei beiden Profilen wurde die

Betriebsart „Zirkulationsbetrieb“ gewählt. Der ermittelte Nutzungsgradverlauf und die Nutzungsgrade der einzelnen Tagtypen sind in **Abbildung 7-9** zu sehen.

Der höhere Warmwasserbedarf beim „Badetag“ führt an den Tagtypen zu einer höheren abzugebenden Wärmemenge am Heizkessel und dadurch zu einem Nutzungsgradanstieg am „Sommertag“. Da mit zunehmendem Warmwasserbedarf speziell an den „Übergangstagen“ eine höhere mittlere Kesselwassertemperatur entsteht, sinkt der Tagesnutzungsgrad beim Zapfprofil „Badetag“ um rund 1 % ab.

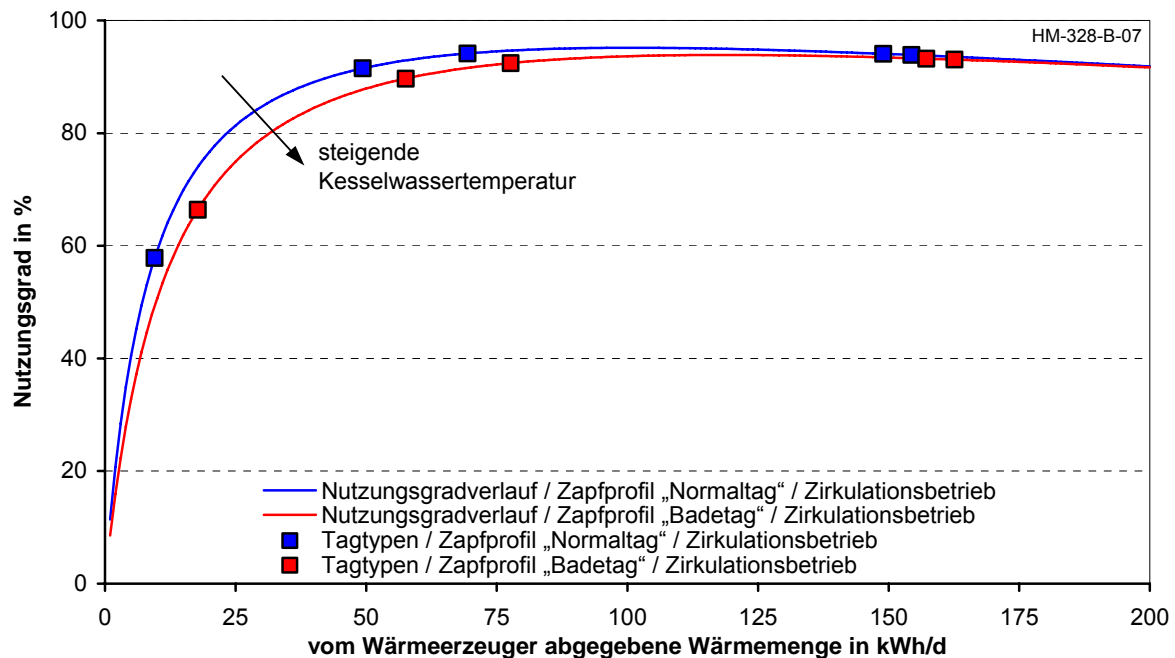


Abbildung 7-9: Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit vom Zapfprofil

7.5 Messergebnisse ausgewählter Heizkessel

Abbildung 7-10 zeigt die auslastungsabhängigen Verläufe einiger ausgewählter, am Prüfstand untersuchter, alter und neuer Wärmeerzeuger für den Einsatz in einem Einfamilienhaus. Auffällig ist die relativ große Bandbreite der Nutzungsgrade, die bis in den Teillastbetrieb reicht, wobei Bauart und Baualter eine wichtige Rolle spielen. Die große Fülle heute verfügbarer und noch betriebener Heizkesselanlagen konnte damit erfasst und dargestellt werden.

Der Öl-Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner (Baujahr 2000) weist über einen weiten Auslastungsbereich sehr hohe Teillastnutzungsgrade von über 90 % auf. Erst bei sehr geringer Auslastung im Sommerbetrieb kommt es zu einem Absinken des Nutzungsgrads. Dieser liegt beim herstellergleichen Öl-Standardkessel (Baujahr 1979) rund 20 % unter den Werten des Neugeräts.

Die Nutzungsgrade der untersuchten atmosphärischen Gaskessel sind geringer als die von vergleichbaren Heizkesseln mit Gebläsebrenner. Ein Grund dafür ist in der Bauart und dem

sehr geringen Kesselwasserinhalt bei atmosphärischen Geräten zu finden. Auch bei den neuen atmosphärischen Geräten waren deutliche Verbesserungen des Nutzungsgrads im Vergleich zu Altgeräten feststellbar. Der atmosphärische Gaskessel Baujahr 2000 weist einen Jahresnutzungsgrad von rund 80 % auf und liegt damit um rund 15 % über dem des Altgeräts aus dem Jahr 1985. Die Nutzungsgradverbesserung fällt hier niedriger aus als bei den erwähnten Öl-Gebläsekesseln und ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Altersunterschied bei den Ölgeräten 21 Jahre und bei den Gasgeräten 15 Jahre beträgt.

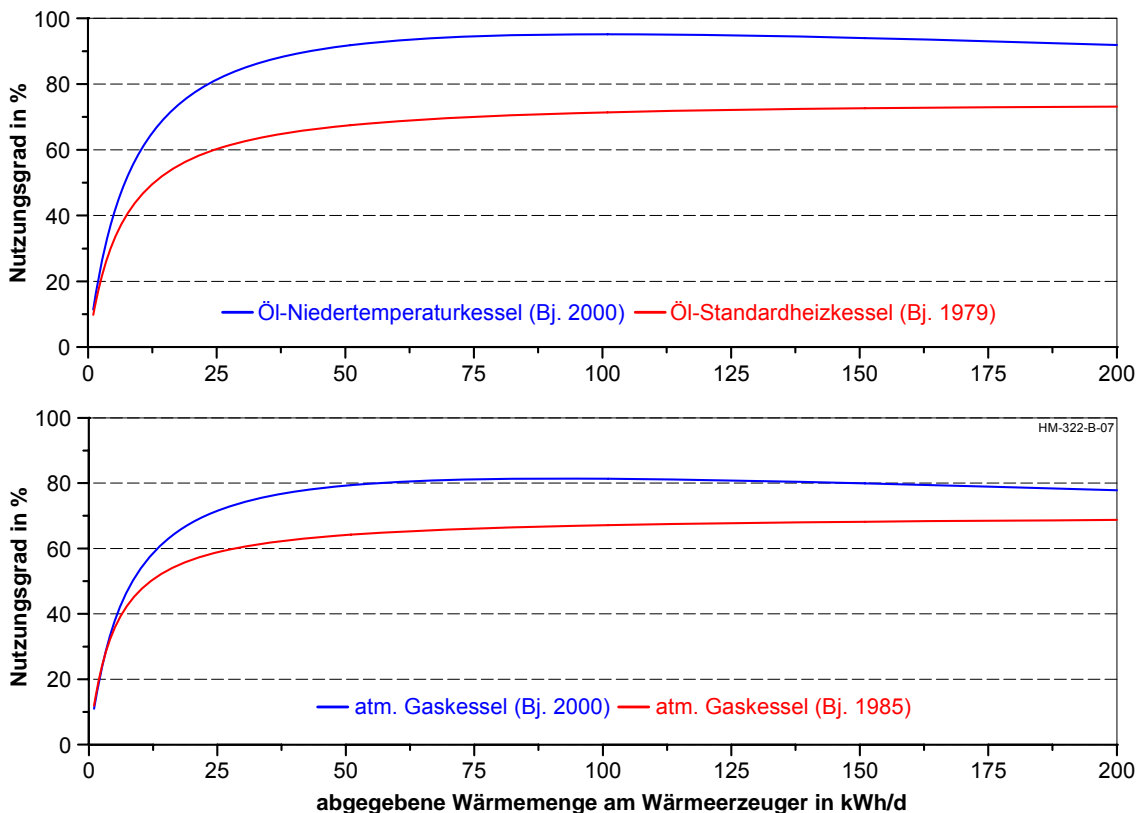


Abbildung 7-10: Nutzungsgradverlauf einiger untersuchter Wärmeerzeuger für den Einsatz in Einfamilienhäusern

8 Ausbau zum KWK-Prüfstand

Für die experimentellen Untersuchungen verschiedener Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme (KWK-Systeme) zur Hausenergieversorgung musste der Prüfstand sowohl hydraulisch als auch messtechnisch erweitert werden (siehe **Abbildung 8-1**). Als Planungsgrundlage für den hydraulischen Aufbau dienten die von den einzelnen Herstellern von KWK-Modulen vorgeschlagenen Verschaltungen. Für die Anlagenintegration der KWK-Produkte in bestehende Systeme gibt es vielfältige Möglichkeiten. Daher sind ausreichende Variationsmöglichkeiten bei anlagen- und systemgerechten Prüfstandslösungen erforderlich.

Das hierfür entwickelte Anlagenschema ist in **Abbildung 8-2** dargestellt. Ausgehend vom Wärmeerzeugerprüfstand, der die Komponenten „Spitzenlastkessel“, „Wärmesenke Heizkreis“ und „Wärmesenke Warmwasser“ enthält, wird der Prüfling, das KWK-Modul, in den zu analysierenden Bilanzkreis eingebunden. Er kann direkt auf die Wärmesenken wirken oder über die Heizungs- oder Warmwasserspeicher in die Versorgung integriert werden. In der realen Ausführung der KWK-Erweiterung sind die Heizungspufferspeicher abgestuft nach den Volumina zweimal 1000 l und einmal 500 l, die Warmwasserspeicher in den Größen 1000 l und 500 l Inhalt installiert.

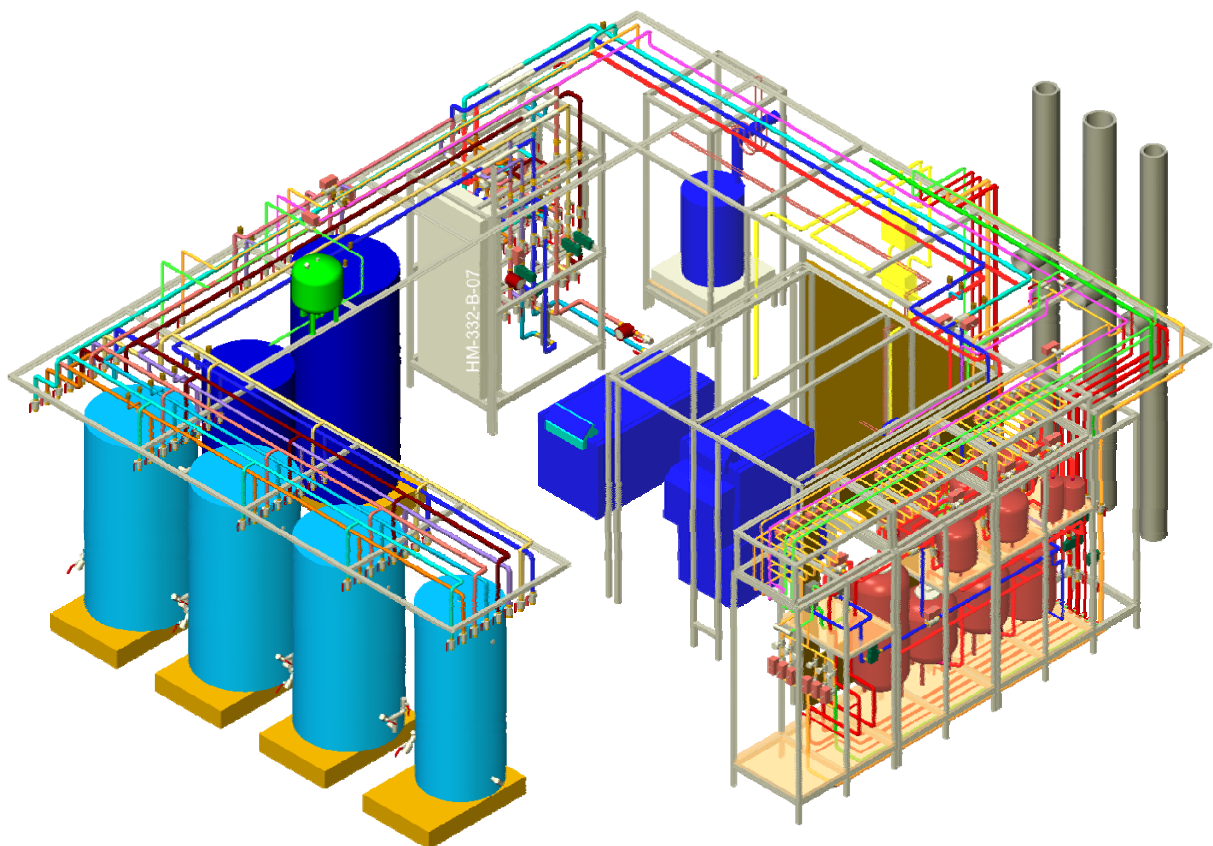


Abbildung 8-1: 3D-Ansicht des Wärmeerzeugerprüfstands mit KWK-Erweiterung

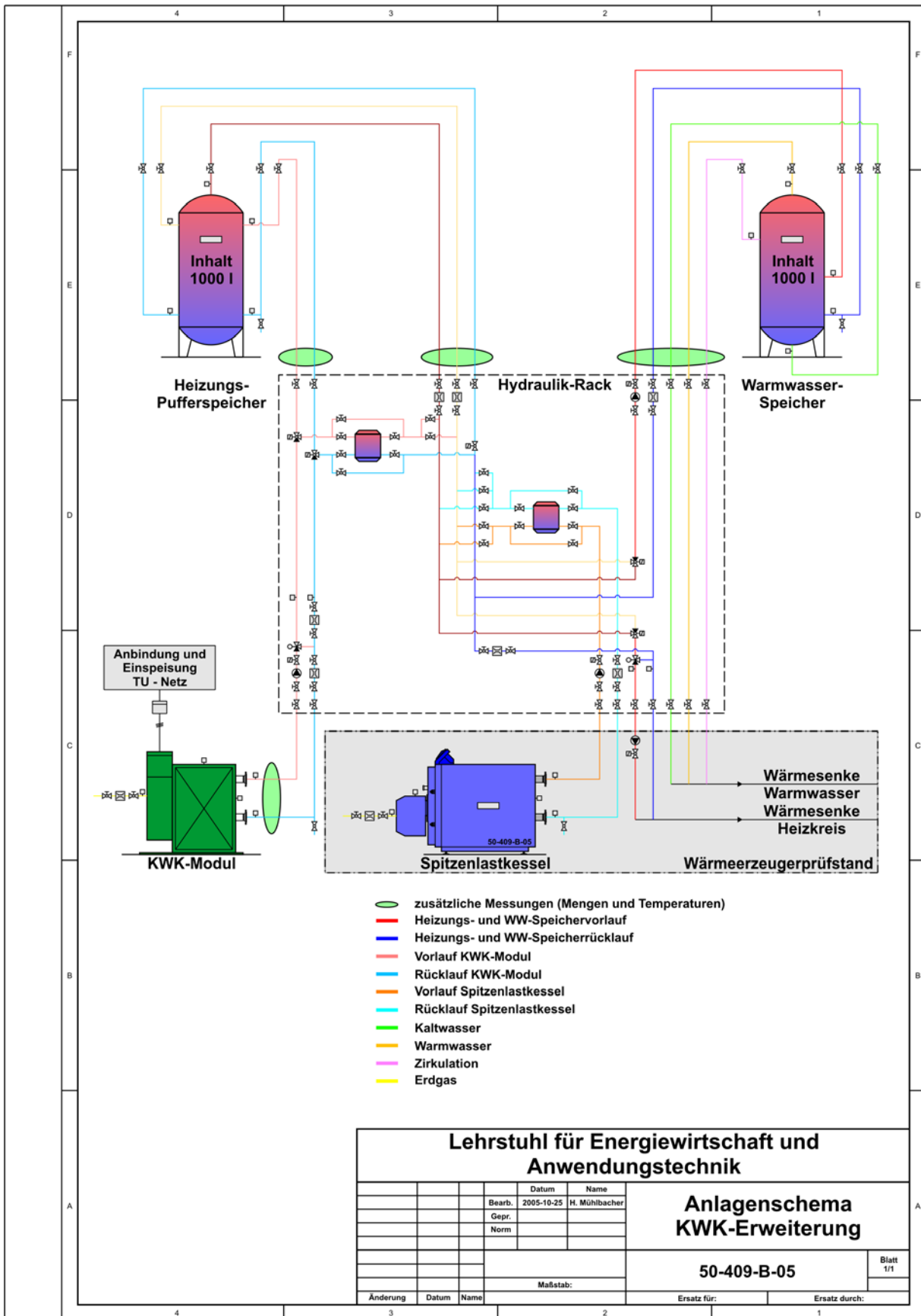


Abbildung 8-2: Anlagenschema zur KWK-Erweiterung

Für eine vorteilhafte energetische Einbindung eines KWK-Moduls in die Heizwärme- und Warmwasserbedarfsdeckung eines Gebäudes muss dieses KWK-Modul bevorzugt die Versorgungsaufgaben übernehmen, gegebenenfalls unter Einbezug von Wärmespeichern; die elektrische Netzeinspeisung ist dabei immer gewährleistet. Erst bei Überschreiten der möglichen Versorgungskapazität des KWK-Moduls soll der Spitzenlastkessel zuschalten. Für diese Anlagenkonzeption haben die einzelnen Hersteller verschiedene Optionen empfohlen.

Um möglichst alle Geräte ohne aufwändige hydraulische Umbauarbeiten messtechnisch untersuchen zu können, wurde ein Hydraulik-Rack, wie in **Abbildung 8-3** veranschaulicht, entwickelt, das eine Vielzahl von hydraulischen Verschaltungsvarianten bietet. Die heizungsseitige Anbindung des KWK-Moduls an das Rack erfolgt mittels flexibler Edelstahlrohre. Über die im Rack eingebauten Kugelhähne ist die gewünschte hydraulische Schaltung einzustellen. Das KWK-Modul kann dabei

- direkt in den Heizungspufferspeicher (Variante 1),
- den Heizkreis (Variante 2),
- den Warmwasserspeicher (Variante 3) einspeisen oder
- als Rücklaufanhebung (Variante 4) für den Spitzenlastkessel

arbeiten.

Um einen konstanten Durchfluss im KWK-Modul bei den Varianten 2 bis 4 zu gewährleisten, ist eine hydraulische Weiche eingebaut. Diese ist, wenn das KWK-Modul über keine eigene Umwälzpumpe verfügt, mittels zweier Kugelhähne umgehbar. Die Versorgung des Heiz- und Warmwasserspeicherladekreises ist sowohl über die Wärmeerzeuger als auch über die Heizungspufferspeicher möglich. Die drei austauschbar installierten Heizungspufferspeicher können dabei einzeln oder in Serie miteinander betrieben werden. Verfügen die Heizungspufferspeicher über fünf Anschlüsse, kann der Anschluss „heiß“ (oben am Pufferspeicher) zum Beispiel zur Warmwasserspeicherladung und der Anschluss „warm“ zur Versorgung des Heizkreises Verwendung finden. Die Versorgung des Heizkreises kann entweder direkt oder über einen motorgesteuerten Mischer erfolgen. Ähnlich den Heizungspufferspeichern können bis zu zwei Warmwasserspeicher seriell zum Einsatz kommen. Der Warmwasserspeicher deckt die für die Warmwasserzapfungen und die Zirkulationsverluste benötigten Wärmemengen.

Die zur Bilanzierung notwendigen Durchflussmessgeräte sind ebenfalls im Rack integriert. Pressluftgesteuerte Kugelhähne sind dort eingebaut, wo eine Umschaltung während der Prüfstandsversuche machbar sein soll, oder hinter Umwälzpumpen, um Schleichströmungen zu verhindern. Am heizungs- und warmwasserversorgungsseitigen Austritt aus dem Rack geschieht die Einbindung an den bestehenden Prüfstand.



Abbildung 8-3: Prüfling und Hydraulik-Rack

Zusätzlich zu den thermischen Leistungen werden am KWK-Modul auch die vom Generator erzeugte und die ins öffentliche Netz eingespeiste elektrische Leistung erfasst. Zur Beurteilung des energetischen Verhaltens der zu untersuchenden KWK-Module mit oder ohne Spitzenlastkessel sind folgende Versuchsreihen durchführbar:

- stationäre Versuche
- Kalt- und Warmstartversuche
- quasistationäre Tagtypversuche

Dabei kann das zugrunde gelegte Referenzgebäude mit der haustechnischen Ausführung modifiziert ausgelegt werden. Mit der durchgeführten Erweiterung zum KWK-Prüfstand ist es nun erstmals möglich, kleine KWK-Anlagen zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung realitätsnah und am Prüfstand reproduzierbar zu betreiben. Darüber hinaus gestatten die eben genannten Versuchsreihen repräsentative Aussagen zur Jahresbilanz von Blockheizkraftwerken /BWK 07/.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in den entsprechenden Normen vorgeschriebenen Verfahren zur Ermittlung des Normnutzungsgrads von Heizkesseln in Wohngebäuden erlauben es, verschiedene Geräte diverser Hersteller miteinander zu vergleichen. Sie repräsentieren allerdings keinen typischen oder durchschnittlichen Anwendungsfall. Das Ziel dieser Arbeit war deshalb die Entwicklung eines speziellen dynamischen Prüfverfahrens, das den Vergleich verschiedener Wärmeerzeuger und Warmwasserspeicher unter realitätsnahen Bedingungen am Prüfstand gestattet.

Dazu wurden zunächst umfangreiche messtechnische Untersuchungen in verschiedenen Einfamilien-, Zweifamilien- und Mehrfamilienhäusern durchgeführt. Aus den untersuchten Kombisystemen zur Raumwärme- und Warmwasserbereitung konnten die Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie Tagesgänge zur Heizwärme- und Warmwasserverbrauchsdeckung abgeleitet werden. Zudem ergaben sich charakteristische Verläufe für Werk- und Wochenendtage. Dadurch konnten Kennwerte der Energieeffizienz von Wärmeerzeugern im realen Betrieb gewonnen werden. Die messtechnisch erfassten Warmwasserversorgungssysteme lieferten ferner Verbrauchskennwerte zu Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb sowie typische Warmwasserzapfmengen in Abhängigkeit von der Anzahl der anwesenden Personen. Damit ließen sich der Saisonal- und Tagesgang der Zapfmenge sowie die mittleren Tagesleistungsgänge der Kollektive „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus“ für Werk- und Wochenendtage bestimmen.

Vergleichende messtechnische Untersuchungen einzelner Heizkessel über ein ganzes Kalenderjahr in Gebäuden sind erfahrungsgemäß sehr zeit- und kostenintensiv. Deshalb wurde ein Wärmeerzeugerprüfstand konzipiert und aufgebaut, an dem mittels typischer standardisierter Tageslastgänge zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung die für die Beurteilung interessanter Tages- und Jahresverbrauchswerte ermittelbar sind. Die entscheidenden Vorteile dieser Prüfstands- gegenüber Feldversuchen liegen darin, dass verschiedene Prüflinge unter Vorgabe gleicher klimatischer Verhältnisse sowie gleichen Nutzer- und Gebäudeverhaltens betrieben und damit reproduzierbar nachgefahren werden können. Der Prüfstand bietet darüber hinaus die Möglichkeit, komplette vordefinierte Referenzgebäude mit ihrer gesamten Anlagen- und Installationstechnik für die Heizungs- und Warmwasserversorgung abzubilden.

Zur Entwicklung der standardisierten dynamischen Heizungslastgänge wurden Referenztage bestimmt, deren Tagesgänge jeweils einen durchschnittlichen Tag einer Periode bezüglich Heizwärmebedarf, Außentemperatur und Bewölkungsgrad repräsentieren. Zusätzlich zu der dabei gewählten Unterscheidung in „Winter-“, „Übergangs-“ und „Sommertage“ erfolgte eine Aufteilung in „heitere“ und „trübe“ Tage, da der Bewölkungsgrad einen großen Einfluss auf den Heizwärmebedarfsgang und das thermische Verhalten des betrachteten Gebäudes hat. Die

Wärmebedarfsgänge für die einzelnen Referenzgebäude wurden mit Hilfe des Gebäudesimulationsprogramms /TRNSYS/ in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten erstellt.

Die Ableitung von Warmwasserfahrprofilen aus den Vor-Ort-Messungen, die ein typisches durchschnittliches Verbrauchsverhalten hinsichtlich Zapfmengen und -zeiten widerspiegeln, war erforderlich, da praxisnahe Daten in dieser Qualität bisher fehlten. Die dem Warmwasserspeicher entnommene Energiemenge bei Zapfvorgängen und während des Zirkulationsbetriebs ist sehr stark vom Aufbau des Warmwasserverteilsystems abhängig. Da die Umsetzung einer Vielzahl verschiedenster Aufbauten am Prüfstand nicht möglich ist, wurde ein eigenes Simulationstool zur Berechnung von Warmwasserversorgungssystemen bei dynamischem Betrieb entwickelt. Dieses liefert nicht nur Warmwasserfahrprofile für den Prüfstand, sondern lässt auch eine sehr detaillierte Betrachtung der auftretenden Verlustarten im Warmwasserverteilsystem zu.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Prüfverfahren steht somit erstmals ein Instrumentarium zur Verfügung, das es gestattet, die Effizienz von Wärme- und Warmwassererzeugern anhand weniger Versuchstage zu beurteilen. Als Vergleichsgrundlage liefert das Prüfverfahren neben dem typischen saisonalen Betriebsverhalten Aussagen zur Jahresbilanz und bildet damit den in der Praxis relevanten Betrieb über ein ganzes Jahr ab. Die Prüfstandsversuche reichen dabei vom reinen Warmwasserbetrieb im Sommer bis hin zum Heiz- und Warmwasserbetrieb an „Übergangs-“ und „Wintertagen“. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen an je zwei Öl- und atmosphärischen Gaskesseln zeigen einen Vergleich alter und neuer typgleicher Geräte. Die Resultate lassen deutlich die Effizienzsteigerung durch die Weiterentwicklung der einzelnen Geräte erkennen. Bei einem zunächst vor Ort und anschließend am Prüfstand untersuchten Wärmeerzeuger war eine außerordentlich gute Übereinstimmung der Prüfstandsergebnisse mit dem Feldversuch festzustellen.

Neben der Bestimmung von Tages- und Jahresverbrauchswerten wurden am Prüfstand auch Auswirkungen ausgewählter Einflussfaktoren auf die Effizienz und das Betriebsverhalten der Heizkessel untersucht. In einem weiteren Schritt könnten nun zusätzlich zu den durchgeführten Parametervariationen auch andere Einflussgrößen wie beispielsweise Nachtabsenkung, unterschiedliche Heizkörperarten sowie Regelungseinstellungen betrachtet werden. Speziell beim Betrieb von KWK-Systemen mit Spitzenlastkessel wären Auswirkungen von Heizungs-puffer- und Warmwasserspeichergröße sowie die hydraulische Verschaltung der einzelnen Komponenten wie etwa auf die Laufzeit des KWK-Moduls mögliche Ziele weiterer Untersuchungen. Der reproduzierbare Betrieb des Wärmeerzeugerprüfstands birgt darüber hinaus großes Potential im Hinblick auf künftige Untersuchungen zu Fragen regelungstechnischer Weiterentwicklungen von Heizwärme- und Warmwasserversorgungsanlagen.

10 Literatur

- DIN 4701-10 DIN 4701 Teil 10; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen, Ausgabe: August 2003
- DIN 4701-3 DIN 4701 Teil 3; Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden – Auslegung der Raumheizflächen, Ausgabe: August 1989
- DIN 4702-3 DIN 4702 Teil 3; Heizkessel – Gas-Spezialheizkessel mit Brenner ohne Gebläse, Ausgabe: März 1990
- DIN 4702-8 DIN 4702 Teil 8; Heizkessel – Ermittlung des Norm-Nutzungsgrads und des Norm-Emissionsfaktors, Ausgabe: März 1990
- DIN 4710 DIN 4710; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland, Ausgabe: Januar 2003
- DIN 4755 DIN 4755; Ölfeuerungsanlagen – Technische Regel Ölfeuerungsinstallation (TRÖ) – Prüfung, Ausgabe: November 2004
- DIN EN 13203-2 DIN EN 13203-2; Gasbeheizte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch – Bewertung des Energieverbrauchs, Ausgabe: November 2006
- DIN EN 442-2 DIN EN 442-2; Radiatoren und Konvektoren – Prüfverfahren und Leistungsangabe, Ausgabe: Februar 1997
- BWK 07 Mühlbacher, H.; Leistungs- und Energiebilanzen von KWK-Anlagen in der Praxis, in: BWK 2007 Heft 3, Seite 43-50
- DVGW 02 Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.; Entwurf zum Arbeitsblatt W 551/W 552, Trinkwassererwärmungs- und Leitungsanlagen, technische Massnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums, DVGW Regelwerk, Bonn 2002
- ELS 2001 Elsberger, M.; Nutzenergiebedarf klimatisierter Gebäude mittels Monatsbilanzierung, E&M Energie- und Managementverlagsgesellschaft mbH, München 2001
- FfE 01 Köhler, D.; Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie in Deutschland 1999, unveröffentlichte FfE Studie, München 2001
- HeizAnIV Heizungsanlagen-Verordnung; Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Warmwasseranlagen in der Fassung vom 4. Mai 1998

- GEI 03 Geiger, B., Hellwig, M.; Analyse und Synthese von Gaslastprofilen für Haushalts-, Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungskunden. In: Leistungsorientierte Energiewirtschaft, FfE Schriftenreihe, Band 26, 2003
- IKARUS IKARUS-Datenbank, Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien, Version 3.0, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 2000
- ISOTEG Verbundprojekt Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung, gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung
- MÜH 03 Mühlbacher, H.; Dynamisches Verhalten von Wärmeerzeugern, Feldmessungen und Prüfstandsversuche, in: Leistungsorientierte Energiewirtschaft, FfE Schriftenreihe, Band 26
- TRNSYS A TRaNsient SYstem Simulation program
- WSVO '95 Wärmeschutzverordnung; Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden in der Fassung vom 16. August 1994

11 Anhang

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Wärmeein- bzw. -austräge und Hilfsenergiebedarf von Wärmeerzeuger, Heizkreis, Warmwasserspeicher und Warmwasserverteilsystem	5
Abbildung 3-2: Anteil der Raumwärme, Warmwasserversorgung und Wärmeerzeugerverluste am spezifischen Brennstoffeinsatz.....	13
Abbildung 3-3: Jährlicher spezifischer elektrischer Hilfsenergieverbrauch in den untersuchten Messobjekten	14
Abbildung 3-4: Heizwärmeverbrauch der untersuchten Einfamilien-, Zweifamilien- sowie Reihenhäuser bezogen auf den Stundenmittelwert des Tagesverbrauchs an Werktagen	15
Abbildung 3-5: Heizwärmeverbrauch der untersuchten Mehrfamilienhäuser bezogen auf den Stundenmittelwert des Tagesverbrauchs an Werktagen.....	16
Abbildung 3-6: Temperatur-, Durchfluss- und thermischer Leistungsverlauf am Beispiel des Öl-Standardheizkessels (Baujahr 1963) im Einfamilienhaus MO 1.....	17
Abbildung 3-7: Temperatur-, Durchfluss- und thermischer Leistungsverlauf am Beispiel des Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997) im Mehrfamilienhaus MO 6	18
Abbildung 3-8: Temperatur- und Durchflussverlauf einer Warmwasserspeicherladung am Beispiel des in MO 6 eingebauten Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997) .	19
Abbildung 3-9: Leistungsverlauf und Gasverbrauch bei einer Warmwasserspeicherladung des in MO 6 eingebauten Gas-Brennwertkessels (Baujahr 1997)	19
Abbildung 3-10: Brennerlauf- und -stillstandszeiten	20
Abbildung 3-11: Bestimmung des Tagesnutzungsgrads mit und ohne Berücksichtigung von internen Aufheiz- und Entspeicherungs Vorgängen	22
Abbildung 3-12: Nutzungsgradverlauf des messtechnisch untersuchten atmosphärischen Gasheizkessels (Baujahr 1985) in Messobjekt MO 5	23
Abbildung 3-13: Energieflussbild des untersuchten Reihenhauses MO 2 und des Mehrfamilienhauses MO 6.....	24
Abbildung 3-14: Spez. Zapfenergieverbrauch, Anlauf-, Verteilungs- und Zirkulationsverluste für die messtechnisch untersuchten Gebäude in der Messkampagne 2	27
Abbildung 3-15: Aufteilung der ins Warmwasserverteilsystem eingespeisten Wärmemenge in Zapfenergie und die verschiedenen Verlustarten	28
Abbildung 3-16: Spezifische Leitungsverluste des Warmwasserverteilsystems der untersuchten Messobjekte (MO 5 – MO 16) mit Zirkulationsbetrieb	29
Abbildung 3-17: Energieentnahme am Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Personenanzahl, der Gebäudeart und der Warmwasserversorgungsvariante.....	31
Abbildung 3-18: Betriebs- und installationsbedingter Anteil an der am Warmwasserspeicher entnommenen Energiemenge.....	32

Abbildung 3-19: Monatsmittel der täglichen Zapfmenge für Werk- und Wochenendtage des Messobjekts MO 16 über ein Jahr	33
Abbildung 3-20: Mittlerer Tagesgang der Zapfmenge für die Winter- und Sommerperiode, unterteilt in Werk- und Wochenendtag, für MO 16	33
Abbildung 3-21: Mittlerer Tagesgang der Warmwasserzapfmenge aller Mehrfamilienhäuser an Werktagen.....	35
Abbildung 3-22: Mittlerer Tagesgang der Warmwasserzapfmenge aller Mehrfamilienhäuser an Wochenendtagen	35
Abbildung 3-23: Mittlere Zapfmenge in Abhängigkeit von der Personenanzahl und der Warmwasserversorgungsvariante	37
Abbildung 3-24: Temperaturverlauf und Verluste an einer Warmwasserzapfstelle.....	39
Abbildung 3-25: Mittlere Kennlinie der aufgenommenen Temperaturverläufe im Einfamilienhaus mit Stich- oder Zirkulationsleitung	40
Abbildung 3-26: Abbildung des Temperaturverlaufs eines Anlaufvorgangs mit einer Sigmoid-Funktion	42
Abbildung 3-27: Standardisierter Temperaturverlauf beim Zapfvorgang	42
Abbildung 4-1: Methode zur Bestimmung charakteristischer Lastgänge	43
Abbildung 4-2: Heizungs- und trinkwarmwasserseitiges Installationschema für das Referenzobjekt „Einfamilienhaus“	45
Abbildung 4-3: Auskühlverhalten verschiedener Heizkörperarten.....	47
Abbildung 4-4: Berechnungsmethodik zur Entwicklung der heizungsseitigen Referenzlastgänge für unsanierte Referenzobjekte.....	48
Abbildung 4-5: Verlauf des monatlichen Heizwärmebedarfs und der Monatsaußentemperatur über ein Jahr für das „Einfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“	49
Abbildung 4-6: Heizwärmebedarfswerte und sigmoide Approximation für das „Einfamilienhaus unsaniert“ und „saniert“ in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur.....	51
Abbildung 4-7: Heizwärmebedarfs- und Außentemperaturprofile der Referenztage für den Gebäudetyp „Einfamilienhaus unsaniert“	54
Abbildung 4-8: Warmwasserzapfprogramm ZP 120 (DIN 4702 Teil 8) und Nr. 3 (DIN EN 13203-2)	56
Abbildung 4-9: Zapfhäufigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Zeitabstand zweier Zapfungen am Beispiel der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme MO 9 und MO 10	57
Abbildung 4-10: Warmwasserzapfprofil für den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“	58
Abbildung 4-11: Warmwasserzapfprofile „Normaltag“, „Badetag“ und „Wochenendtag“ für einen Drei- bis Vierpersonenhaushalt in Abhängigkeit vom Zapfstellentyp	59
Abbildung 4-12: Übersicht der Ein- und Ausgangsgrößen zur Entwicklung der Warmwasserfahrprofile für den Wärmeerzeugerprüfstand	60
Abbildung 4-13: Eingabemaske „Vorgabewerte Warmwasserleitung“	61
Abbildung 4-14: Anzeigemaske „Ergebnisse Zirkulationskreis“	63
Abbildung 4-15: Messergebnisse und rechnerische Simulation eines Temperaturverlaufs am Beispiel einer Küchenzapfstelle.....	64
Abbildung 4-16: Zirkulationsverlustleistung und Temperaturkorrekturfaktor eines Zirkulationssystems aus Edelstahl mit unterschiedlichen Isolierstandards .	65

Abbildung 4-17: Temperaturverlauf beim Zirkulationsstart- und -stoppvorgang eines Zirkulationssystems aus Edelstahl mit unterschiedlichen Isolierstandards .	66
Abbildung 4-18: Zirkulationsverlustleistung bei unterschiedlichen Warmwasserspeichertemperaturen (T_{WWS}).....	66
Abbildung 4-19: Verlustleistung unterschiedlicher Rohrleitungsmaterialien beim Zirkulationsstart und bei ausgekühltem Verteilsystem.....	67
Abbildung 4-20: Temperaturverlauf beim Start der Zirkulationspumpe bei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen	68
Abbildung 4-21: Fahrprofile für Zirkulationsbetrieb	70
Abbildung 4-22: Fahrprofil für Stichleitungsbetrieb.....	70
Abbildung 5-1: 3D-Ansichten des Wärmeerzeugerprüfstands.....	72
Abbildung 5-2: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau der Einhausung und der Brennstoffversorgung am Wärmeerzeugerprüfstand.....	73
Abbildung 5-3: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau des Heizkreissimulators	74
Abbildung 5-4: Hydraulischer und messtechnischer Aufbau der Warmwasserbereitung und Warmwasserverbrauchssimulation	76
Abbildung 5-5: Unterschiedliche Montagemethoden von Pt-100-Sensoren.....	77
Abbildung 5-6: Programm zur Luftdruckabfrage und Heizwertvorgabe	79
Abbildung 5-7: Schematischer Versuchsaufbau zur Messung der Abgasemissionen.....	80
Abbildung 5-8: Schematischer Aufbau der nichtdispersiven Infrarotspektroskopie.....	81
Abbildung 6-1: Schema der Einbindung von Lastgängen und Einflussgrößen am Prüfstand	84
Abbildung 6-2: Thermische Leistungs- und Wärmemengenverläufe an der Wärmesenke im Heizkreis („Wintertag heiter“).....	86
Abbildung 6-3: Thermische Leistungs- und Temperaturverläufe an der Wärmesenke im Zirkulationskreis	87
Abbildung 6-4: Temperatur- und Durchflussverläufe an der Warmwasserzapfstelle am Beispiel einer Duschzapfung	88
Abbildung 7-1: Betriebsdaten der Raumwärmeversorgung mit einem Öl-Niedertemperaturkessel („Wintertag heiter“)	91
Abbildung 7-2: Temperatur- und Leistungsverlauf am Warmwasserspeicher (Zapfprofil „Normaltag“ / Zirkulationsbetrieb).....	92
Abbildung 7-3: Emissionen der einzelnen Betriebsphasen eines Brennerzyklusses.....	93
Abbildung 7-4: Brennstoffeinsatz in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge	95
Abbildung 7-5: Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit von der am Wärmeerzeuger abgegebenen Wärmemenge	95
Abbildung 7-6: Jahreshochrechnung	96
Abbildung 7-7: Brennstoffeinsatz und Nutzungsgradverlauf eines vor Ort und am Prüfstand untersuchten atmosphärischen Gaskessels	100
Abbildung 7-8: Brennstoffeinsatz und Nutzungsgradverlauf mit und ohne Außentemperaturfühler	101
Abbildung 7-9: Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit vom Zapfprofil	103
Abbildung 7-10: Nutzungsgradverlauf einiger untersuchter Wärmeerzeuger für den Einsatz in Einfamilienhäusern	104
Abbildung 8-1: 3D-Ansicht des Wärmeerzeugerprüfstands mit KWK-Erweiterung	105

Abbildung 8-2: Anlagenschema zur KWK-Erweiterung	106
Abbildung 8-3: Prüfling und Hydraulik-Rack	108
Abbildung 11-1: Sigmoide Approximation und Heizwärmebedarf des „Mehrfamilienhauses unsaniert“ und „saniert“	118
Abbildung 11-2: Heizwärmebedarfs- und Außentemperaturprofile für den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus unsaniert“	118
Abbildung 11-3: Wärmeerzeugerprüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (TU München)	119
Abbildung 11-4: Seitenansicht des Wärmeerzeugerprüfstands.....	119
Abbildung 11-5: Warmwasserzapfstellen am Wärmeerzeugerprüfstand.....	120
Abbildung 11-6: Heizkreismischeransteuerung	120

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Übersicht über die messtechnisch untersuchten Raumwärme- und Warmwasserversorgungssysteme	10
Tabelle 3-2:	Kennwerte der untersuchten Raumwärme- und Warmwasserversorgungssysteme (als Mittelwerte über die Messperiode)	11
Tabelle 3-3:	Übersicht über die messtechnisch untersuchten Warmwasserversorgungssysteme.....	25
Tabelle 3-4:	Kennwerte der untersuchten Warmwasserversorgungssysteme (Mittelwerte über den Messzeitraum).....	26
Tabelle 3-5:	Typische Energie- und Warmwasserentnahmemengen aus dem Warmwasserspeicher beim Zapfvorgang.....	36
Tabelle 3-6:	Mittlerer Verlust- und Zapfenergieanteil in Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäusern.....	36
Tabelle 3-7:	Mittlerer Verlust- und Zapfenergieanteil in Mehrfamilienhäusern	37
Tabelle 3-8:	Charakteristische Kenngrößen nach der Sigmoid-Funktion	42
Tabelle 4-1:	Kenndaten der Referenzobjekte	44
Tabelle 4-2:	Leitungslängen und Wasserinhalte des sanierten und unsanierten Warmwasserverteil- und Heizsystems des Referenzobjekts „Einfamilienhaus“	46
Tabelle 4-3:	Charakteristik der einzelnen Taggruppen des Testreferenzjahrs 8 für unsanierte und sanierte Gebäude	50
Tabelle 4-4:	Koeffizienten der Referenzobjekte „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus“	52
Tabelle 4-5:	Referenztage, Außentemperatur und Wärmebedarf der einzelnen Taggruppen für die Referenzobjekte „Ein-“ und „Mehrfamilienhaus unsaniert“	53
Tabelle 4-6:	Gegenüberstellung einiger Norm-Warmwasserzapfprofile	55
Tabelle 4-7:	Mittlere Zapfenergiemengen und -volumenströme abhängig vom Zapfstellentyp beim Zapfvorgang in einem Einfamilienhaus.....	56
Tabelle 4-8:	Verluste beim Start der Zirkulationspumpe bei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen	68
Tabelle 4-9:	Fahrplandaten für Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb	69
Tabelle 5-1:	Messgrößen, Messprinzip und Messbereiche der untersuchten Emissionen....	82
Tabelle 7-1:	Herstellerangaben des untersuchten Öl-Niedertemperaturkessels.....	90
Tabelle 7-2:	Voreinstellungen der Heizkesselregelung des Öl-Niedertemperaturkessels	90
Tabelle 7-3:	Messergebnisse des Öl-Niedertemperaturkessel für die einzelnen Tagtypen (RO-EFH-1/1 / Zapfprofil „Normaltag“ / Zirkulationsbetrieb).....	94
Tabelle 7-4:	Ergebnisse der Jahreshochrechnung für den Öl-Niedertemperaturkessel	99
Tabelle 7-5:	Messergebnisse für Zirkulations- und/oder Stichleitungsbetrieb	102
Tabelle 11-1:	Messobjekte zur Untersuchung von Anlaufvorgängen in Einfamilienhäusern	121
Tabelle 11-2:	Messobjekte zur Untersuchung von Anlaufvorgängen in Mehrfamilienhäusern	121

11.3 Abbildungen

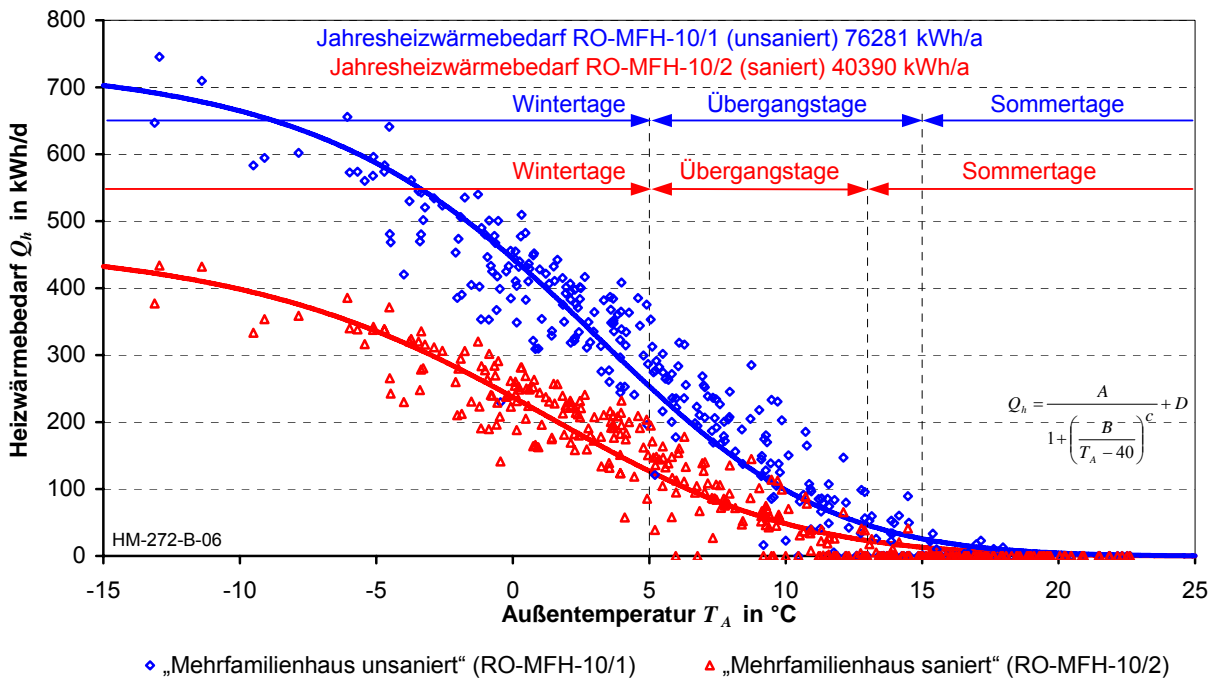


Abbildung 11-1: Sigmoide Approximation und Heizwärmebedarf des „Mehrfamilienhauses unsaniert“ und „saniert“

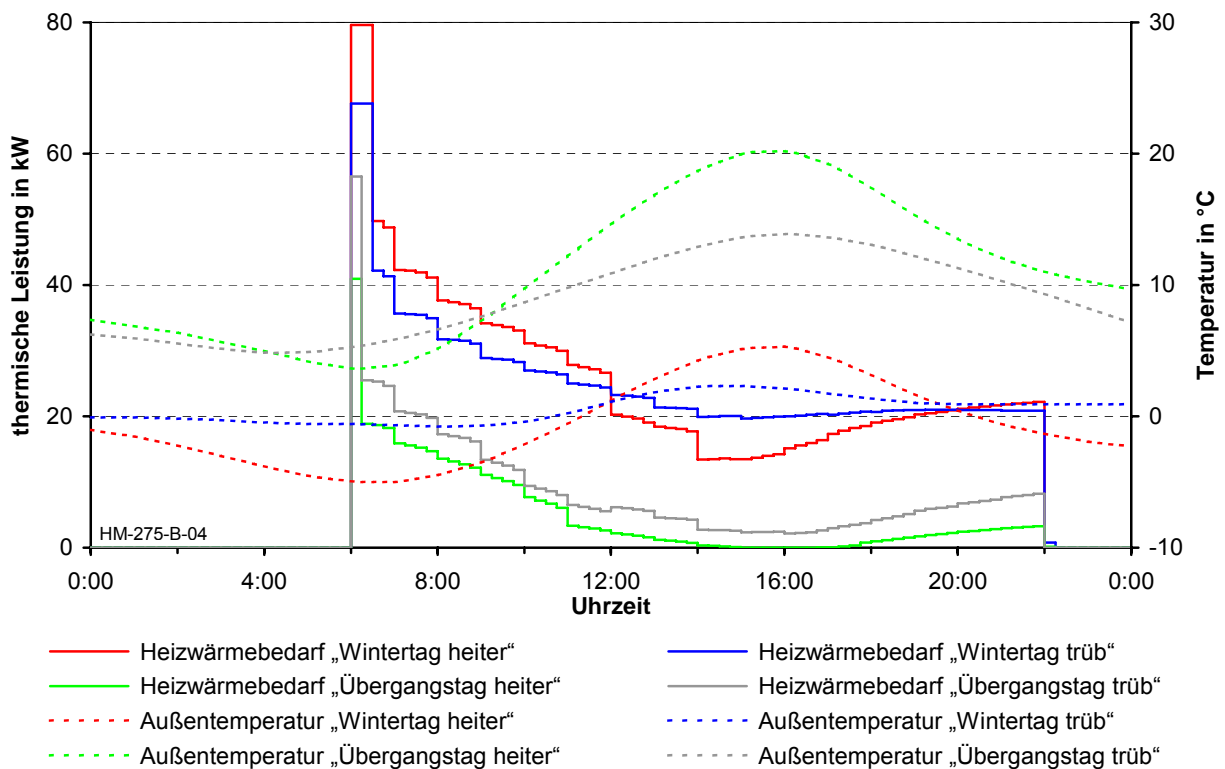


Abbildung 11-2: Heizwärmebedarfs- und Außentemperaturprofile für den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus unsaniert“



Abbildung 11-3: Wärmeerzeugerprüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (TU München)

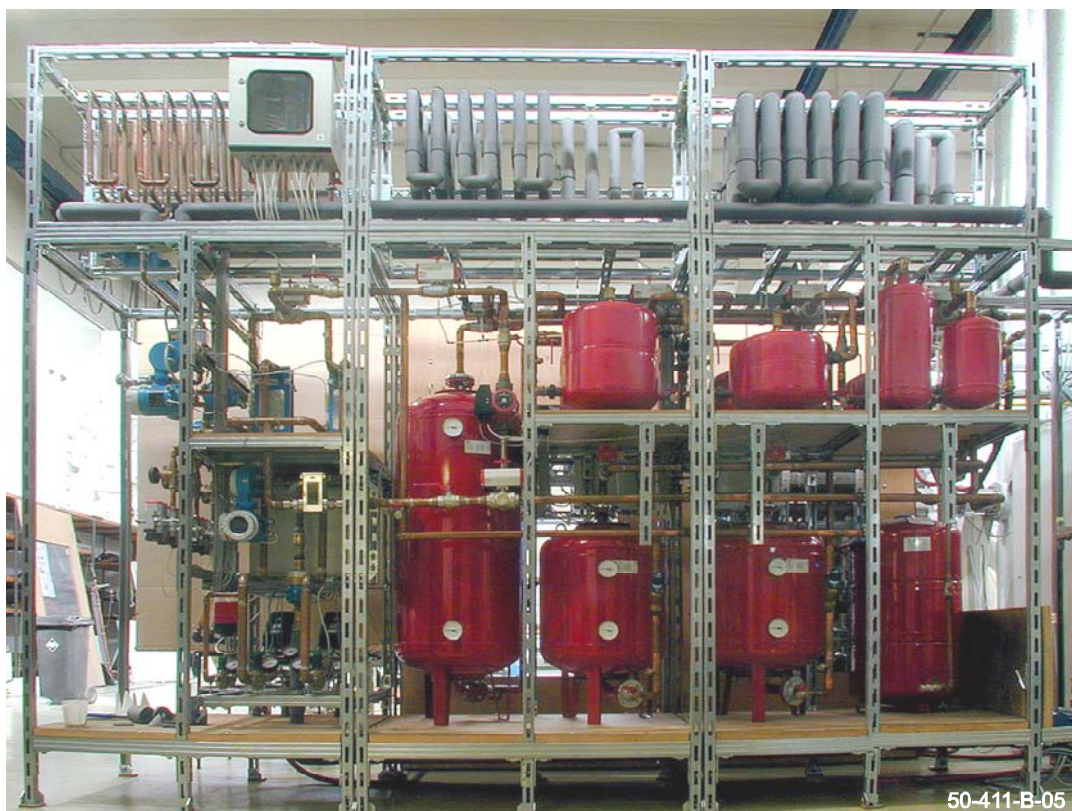


Abbildung 11-4: Seitenansicht des Wärmeerzeugerprüfstands



Abbildung 11-5: Warmwasserzapfstellen am Wärmeerzeugerprüfstand

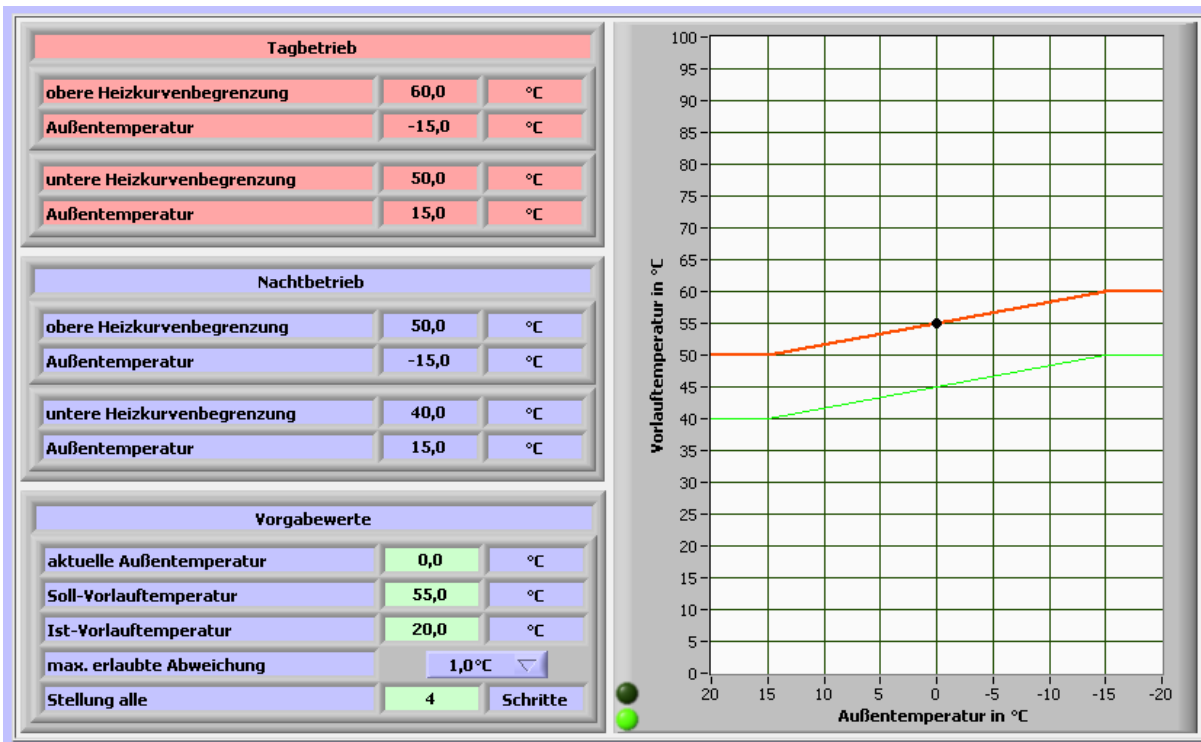


Abbildung 11-6: Heizkreismischeransteuerung

11.4 Tabellen

Tabelle 11-1: Messobjekte zur Untersuchung von Anlaufvorgängen in Einfamilienhäusern

Einfamilienhaus, nur Stichelungsbetrieb				
Messort	Standort	Art des Heizsystems	Alter des Versorgungsnetzes	Messungen
EFH 01	Landsberg	Elektrospeicher	vor 1975	4
EFH 02	München	Nachtspeicher	vor 1975	2
EFH 03	Eching	Gas-Zentral	nach 1975	3
EFH 04	München	Blockspeicher	vor 1975	3
EFH 05	Augsburg	Elektrospeicher	vor 1975	14
EFH 06	Augsburg	Elektrospeicher	vor 1975	6
EFH 07	Augsburg	Öl-Zentral	vor 1975	4
EFH 08	München	Öl-Zentral	nach 1975	6
Einfamilienhaus, Zirkulation mit unterschiedlich langer Stichelung				
Messobjekt	Standort	Art des Heizsystems	Alter des Versorgungsnetzes	Messungen
EFH 09	Augsburg	Öl-Zentral	vor 1975	12
EFH 10	München	Öl-Zentral	nach 1975	11
EFH 11	Augsburg	Öl-Zentral	nach 1975	7
EFH 12	Augsburg	Öl-Zentral	um 1975	6
EFH 13	Augsburg	Öl-Zentral	nach 1975	18
EFH 14	Augsburg	Öl-Zentral	nach 1975	4
EFH 15	Ottobrunn	Öl-Zentral	vor 1975	5
EFH 16	Ottobrunn	Öl-Zentral	nach 1975	6

Tabelle 11-2: Messobjekte zur Untersuchung von Anlaufvorgängen in Mehrfamilienhäusern

Mehrfamilienhaus, Zirkulation mit unterschiedlich langer Stichelung					
Messobjekt	Standort	Stockwerk	Art des Heizsystems	Alter des Versorgungsnetzes	Messungen
MFH 01	München	EG	Gas-Zentral	vor 1975	5
MFH 02	Weßling	1. OG	Gas-Zentral	nach 1975	18
MFH 03	Augsburg	2. OG	Gas-Zentral	vor 1975	12
MFH 04	München	3. OG	Gas-Zentral	nach 1975	4
MFH 05	München	1. OG	Gas-Zentral	vor 1975	9
MFH 06	München	EG	Gas-Zentral	nach 1975	3
MFH 07	Augsburg	1. OG	Öl-Zentral	vor 1975	24
MFH 08	München	1. OG	Gas-Zentral	vor 1975	12
MFH 09	Augsburg	2. OG	Gas-Zentral	vor 1975	7
MFH 10	München	2. OG	Öl-Zentral	vor 1975	9
MFH 11	Augsburg	4. OG	Gas-Zentral	nach 1975	6
MFH 12	Augsburg	3. OG	Gas-Zentral	nach 1975	2
MFH 13	München	3. OG	Fernwärme	nach 1975	23
MFH 14	München	4. OG	Öl-Zentral	nach 1975	12
MFH 15	München	3. OG	Öl-Zentral	vor 1975	12
MFH 16	München	2. OG	Öl-Zentral	vor 1975	18
MFH 17	München	10. OG	Öl-Zentral	vor 1975	5
MFH 18	Augsburg	3. OG	Öl-Zentral	nach 1975	8
MFH 19	Garching	5. OG	Öl-Zentral	vor 1975	12
MFH 20	Freising	2. OG	Öl-Zentral	nach 1975	6
MFH 21	München	1. OG	Fernwärme	vor 1975	10
MFH 22	München	3. OG	Fernwärme	vor 1975	15