

## INATIONÄRE ENERGETISCHE BEWERTUNG VON WÄRMEPUMPEN- UND MIKRO-KWK-SYSTEMEN – SIMULATION UND EMULATION

M. Knorr<sup>1</sup>, L. Schinke<sup>1</sup>, M. Beyer<sup>1</sup>, J. Seifert<sup>1</sup>, P. Mehrfeld<sup>2</sup>, M. Nürnberg<sup>2</sup>, K. Huchtemann<sup>2</sup>, D. Müller<sup>2</sup>, F. Riedesser<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, TU Dresden, Germany

<sup>2</sup>Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Germany

<sup>3</sup>Institut für Gebäudeenergetik, Universität Stuttgart, Germany

### KURZFASSUNG

Aktuell verfügbare energetische Bewertungsverfahren für Wärmepumpen- und Mikro-KWK-Systeme führen zu Ergebnissen, die von Feldmessungen teilweise stark abweichen. Um eine höhere Akzeptanz der Technologie beim Endnutzer zu erreichen, müssen energetische Prüfverfahren unter realitätsnahen Randbedingungen durchgeführt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse aus einem Forschungsvorhaben präsentiert, welches zum Ziel hat, Wärmepumpen und KWK-Systeme unter realitätsnahen, dynamischen Randbedingungen zu bewerten. Das Hardware-in-the-Loop (HiL) Verfahren steht als Untersuchungsmethodik hierbei im Fokus der Betrachtungen. Schwerpunkte bei der Entwicklung sind die Bestimmung geeigneter repräsentativer Tage sowie konzeptionelle Arbeiten an Prüfständen, worauf innerhalb des Beitrages näher eingegangen wird.

### ABSTRACT

Currently available energy evaluation methods for heat pumps and micro-cogeneration systems lead to results, which deviate partly strongly from field measurements. To achieve a higher acceptance of the technology by the end user, energetic testing procedures must be carried out under realistic boundary conditions.

In this paper first results from a research project are presented, which aims, to evaluate heat pumps and cogeneration systems under realistic, dynamic boundary conditions. For this purpose, the hardware-in-the-loop (HiL) method is the chosen research methodology. Priorities in the development are the determination of appropriate representative days and conceptual work on test rigs, which are discussed in more detail within the paper.

### EINLEITUNG

Wärmepumpen sowie Mini- / Mikro-KWK-Systeme sind Schlüsseltechnologien der dezentralen Energiebereitstellung im Kontext der Energiewende, da beide Technologien eine Kopplung an das Stromnetz benötigen. Deren energetische Bewertung erfolgt derzeit auf Basis statischer Verfahren und vereinfachter dynamischer Messungen, die jedoch reale Randbedingungen nur unzureichend abbilden.

Dies führt z. B. bei Wärmepumpen zu Abweichungen zwischen Feldmessungen und theoretischen Aussagen. Um diese Unzulänglichkeiten zu überwinden, wird derzeit in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der TU Dresden, der RWTH Aachen und der Universität Stuttgart ein praxisgerechtes Bewertungsverfahren auf Grundlage einer HiL-Methode, d. h. in diesem Kontext einer Kopplung von Experiment und Simulation, entwickelt. Das Vorhaben wird vom BMWi unter den Kennzeichen 03ET1211A / 03ET1211B / 03ET1211C gefördert. In der ersten Projektphase werden für Wärmepumpen- und Mikro-KWK-Systeme „HiL“-Versuchsstände errichtet, die eine detaillierte energetische Bilanzierung und Bewertung ermöglichen. Hierbei muss die Schnittgrenze zwischen Simulation und Hardware festgelegt werden, wobei eine umfängliche Einbindung der Hardware zur Anwendung kommt. Die Simulation dient mit ihren detaillierten Modellen für Gebäude und Wärmeübergabesysteme zur Bestimmung des aktuell angeforderten Heizwärmebedarfs. Dabei kommen die drei Modellierungssprachen bzw. Simulationstools TRNSYS TUD (Perschk, 2010), Modelica® / Dymola® und TRNSYS 17 zum Einsatz. Die messtechnische Erfassung des Erzeugungssystems beinhaltet somit auch periphere Komponenten, wie Speicher und Regelung. Zusätzlich wird ein Ringtest durch Austauschen der Wärmeerzeuger unter den Projektpartnern durchgeführt, um die Untersuchungsergebnisse zu validieren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in ein allgemeingültiges Bewertungsverfahren überführt, bei dem dynamische Effekte (z.B. Aufheizverhalten) im Gegensatz zu bisherigen Verfahren realitätsnäher abgebildet werden können. Der vorliegende Beitrag stellt die Identifikation repräsentativer Zeiträume für die möglichst genaue Ermittlung von Jahreswerten sowie die konzeptionelle Gestaltung der Emulation und Organisation der Kopplung zwischen Messung und Simulation in den Fokus der Betrachtungen.

### ENERGETISCHE BEWERTUNG VON WÄRMEPUMPEN UND MIKRO-KWK-SYSTEMEN

Zur Charakterisierung der momentanen Effizienz von Wärmepumpen wird als Kenngröße der Coefficient of Performance (COP) herangezogen. Dieser wird für

elektrisch angetriebene Wärmepumpen, auf denen auch im Projekt der Fokus liegt, nach Gleichung (1) über den Quotienten der zu einem Zeitpunkt vorliegenden Leistungen gebildet.

$$CoP = \frac{\dot{Q}_{th}}{P_{el}} \quad (1)$$

mit CoP - Coefficient of Performance

$\dot{Q}_{th}$  - abgegebene thermische Leistung

$P_{el}$  - aufgenommene elektrische Leistung

Gegenüber dieser Momentaufnahme steht die Effizienz über bestimmte Zeiträume, die durch aufintegrieren der Leistungen und somit aufgrund Quotientenbildung von Energiewerten entsteht (s. Gleichung (2)). Für die Dauer eines Jahres wird diese Kennzahl als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet.

$$JAZ = \frac{\int \dot{Q}_{th}}{\int P_{el}} = \frac{Q_{th}}{W_{el}} \quad (2)$$

mit JAZ - Jahresarbeitszahl

$Q_{th}$  - abgegebene thermische Energie

$W_{el}$  - aufgenommene elektrische Energie

Heutige normative Verfahren wie die DIN EN 14825 (DIN EN 14825, 2013) oder die Richtlinie VDI 4650 (VDI 4650, 2009) stellen Methoden zur Berechnung bzw. Prognose der JAZ zur Verfügung. Dabei greifen die Berechnungsverfahren jeweils auf COPs zurück, die nach DIN EN 14511 (DIN EN 14511, 2013) in quasi-stationären Betriebspunkten ermittelt werden. Die abgegebene thermische Leistung stellt hierbei die im Kondensator übertragene Wärme sowie ggf. durch unterstützende Heizer bereitgestellte Wärme dar. In die elektrische Bilanz werden die Verdichterleistung und ggf. der Strombedarf eines Heizstabes sowie weitere sich im System befindliche Verbraucher mit einbezogen. Außerdem basiert das aktuelle Energielabel für Wärmepumpensysteme nach der ErP-Richtlinie auf der DIN EN 14825 (DIN EN 14825, 2013).

In mehreren Feldstudien wurden in jüngster Vergangenheit Wärmepumpensysteme umfangreich vermessen. Hierbei zeigte sich, dass zwischen den mittels VDI 4650 (VDI 4650, 2009) theoretisch bestimmten Arbeitszahlen und den gemessenen Werten erhebliche Differenzen zu verzeichnen sind. Abbildung 1 zeigt dies beispielhaft.

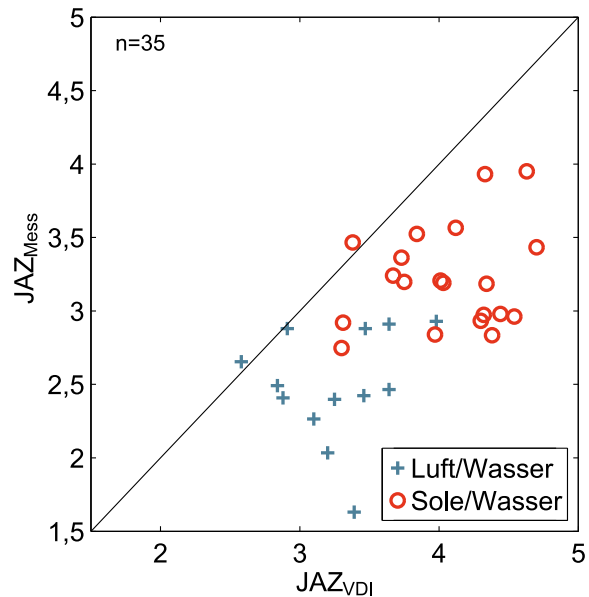


Abbildung 1: Feldmessungen gegenüber Berechnungen von Arbeitszahlen nach (VDI 4650, 2009) für verschiedene Wärmepumpensysteme (Huchtemann, 2015)

Ursachen dieser Differenzen sind beispielsweise in der Installation der Wärmepumpensysteme zu finden, die oftmals in vorhandene hydraulische Systeme nur suboptimal eingebunden sind. Darüber hinaus werden durch die Bewertungsverfahren der Richtlinien dynamische Aspekte kaum berücksichtigt. Für den Verbraucher (Nutzer) der angesprochenen Einheiten ist dies unbefriedigend, da Investitionsentscheidungen eine verlässliche Aussage über die Effizienz des zu installierenden Gesamtsystems benötigen.

Für die zweite in diesem Artikel betrachtete Technologie – Mikro-KWK-Systeme – liegen noch keine so umfangreichen Messdaten wie für Wärmepumpensysteme vor, da diese Technologie im Heizungsmarkt noch relativ neu ist. Für Geräte mit einer Leistungsklasse bis 70 kW Nennwärmebelastung erfolgt die Bewertung nach DIN 4709 (DIN 4709, 2011). In der Norm wird eine Prüfvorschrift festgelegt, welche die Ermittlung maßgeblicher Energien zur Nutzungsgradberechnung zum Ziel hat. Die Datenbasis für die Erstellung des Profils ist der VDI 4655 (VDI 4655, 2008) entnommen, welche eine Unterteilung in Typtagkategorien mit den Unterscheidungsmerkmalen Jahreszeit, Bewölkung und Wochentag vornimmt und reale gemessene Lastverläufe verwendet. Abbildung 2 zeigt den entsprechenden Prüfzyklus.

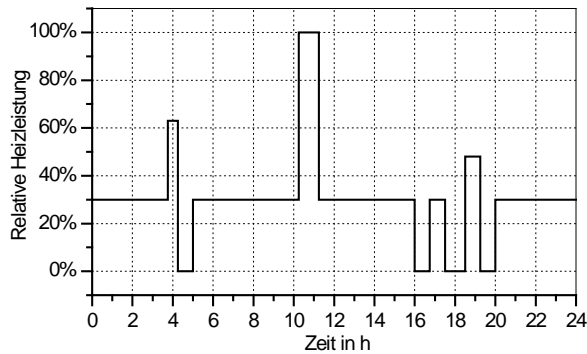


Abbildung 2: Lastprofil für die Prüfung nach DIN 4709 (DIN 4709, 2011)

Aus den mit der Prüfung bestimmten Energiewerten lassen sich mit den Gleichungen (3) bis (5) der thermische Nutzungsgrad  $\eta_{th,H}$ , der elektrische Nutzungsgrad  $\eta_{el,H}$  sowie der Gesamtnutzungsgrad  $\eta_{ges,H}$  berechnen.

$$\eta_{th,H} = \frac{Q_H}{Q_{Br}} \quad (3)$$

$$\eta_{el,H} = \frac{W_{ab}}{Q_{Br}} \quad (4)$$

$$\eta_{ges,H} = \eta_{th,H} + \frac{f_{p,el}}{f_{p,Br}} \cdot \eta_{el,H} \quad (5)$$

- mit  $Q_H$  - abgegebene Heizwärme  
 $Q_{Br}$  - umgesetzte Brennstoffenergie  
 $W_{ab}$  - abgegebene Elektroenergie  
 $f_{p,el}$  - Primärenergiefaktor Elektroenergie  
 $f_{p,Br}$  - Primärenergiefaktor Brennstoff

Alternativ zu den dokumentierten Bilanzierungsverfahren sind in Seifert weitere physikalische Bilanzierungsmethoden dokumentiert.

Die Bewertung des Gesamtnutzungsgrades mittels konstanter Primärenergiefaktoren ist derzeit jedoch hoch umstritten, da speziell die Primärenergiefaktoren im Rahmen der EnEV Novellierung permanent angepasst werden (Regett, 2015). Der Gesamtnutzungsgrad stellt somit einen politisch bewerteten Ansatz dar, der physikalisch jedoch zu hinterfragen ist.

Auch muss festgestellt werden, dass dynamische Aspekte in der Bewertung von KWK-Anlagen stark unterrepräsentiert sind, wodurch eine grundlegende Überarbeitung zwingend notwendig erscheint.

Ziel muss es dabei sein, ein Verfahren zu entwickeln, welches dynamische Aspekte zur Bewertung von Wärmepumpen und KWK-Systemen beinhaltet und sich an physikalisch fundierten Zusammenhängen orientiert.

## ERMITTLUNG REPRÄSENTATIVER TAGE

### Konzepte

Wie Abbildung 3 dokumentiert, ist bei der Bestimmung von repräsentativen Tagen einerseits anzustreben den zeitlichen Aufwand der experimentellen Prüfung durch eine geringe Anzahl von repräsentativen Tagen gering zu halten. Andererseits können mit einer steigenden Anzahl von repräsentativen Tagen die Auswirkungen der meteorologischen Verhältnisse auf die Effizienz des Wärmeerzeugers tendenziell besser wiedergespiegelt werden. Allgemein geht es darum, mithilfe dieser repräsentativen Tage die Gesamtheit aller Tage eines Jahres in einer wesentlich geringeren Anzahl von Prüftagen abzubilden. Datenbasis für die erstellten typischen Tage können künstlich erzeugte Wetterdaten (z. B. Mittelwerte) oder ausgewählte Abschnitte aus Messwerten bzw. Testreferenzjahren (TRY) sein.

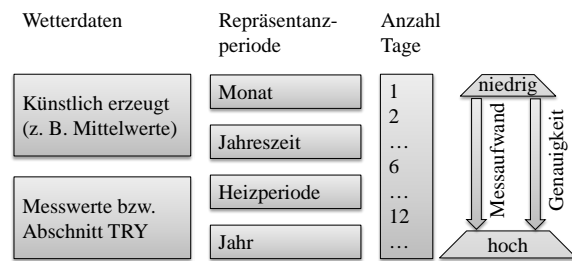


Abbildung 3: Randbedingungen für die Bestimmung repräsentativer Tage

Bedingt durch die hohe speicherwirksame Masse von Gebäuden müssen bei der Anwendung von Typtagen die Auswirkungen des sogenannten „energy shifting“ berücksichtigt bzw. minimiert werden. Unter „energy shifting“ ist die Beeinflussung des Energiebedarfs einer Zeitperiode von den Anfangs- und Endbedingungen der Speicher im Gebäude (z. B. Wände und Möbel) sowie der technischen Systeme (z. B. Pufferspeicher) zu verstehen. Schließt sich beispielsweise an einen für den Herbst typischen Tag direkt ein für eine kalte Winterperiode repräsentativer Tag an, so wird der Energiebedarf für diesen kalten Wintertag aufgrund des noch hohen Temperaturniveaus in der Gebäudemasse als zu gering eingeschätzt. Die Auswirkungen des „energy shifting“ auf der Gebäudeseite können weitestgehend vermieden werden, indem die Zeiträume zwischen den repräsentativen Tagen simuliert werden.

Hinsichtlich der Auswahl charakteristischer Tage können eine Reihe von Verfahren angewendet werden. Engel (Engel, 2015) beschreibt mehrere Verfahren und bewertet diese mit dynamischen Simulationen. Als Bewertungsmaßstab wird die Abweichung zwischen den Jahresarbeitszahlen einer Wärmepumpe verwendet, welche einerseits auf Grundlage der Typ-

tage und andererseits auf Grundlage einer Jahressimulation ermittelt wurden. Grundsätzlich werden in (Engel, 2015) drei unterschiedliche Herangehensweisen untersucht. Bei der ersten Methode wird das Jahr in gleichgroße Intervalle eingeteilt, in denen für verschiedene Wettermerkmale, wie Außenlufttemperatur oder Solarstrahlung, arithmetische Mittelwerte zu einer bestimmten Uhrzeit für das ganze Intervall gebildet werden. Hierbei kommt es zu keinem realen Wetterverlauf, da aufgrund der Mittelwertbildung fiktive Zustände kreiert werden. Die zweite Herangehensweise zielt darauf ab, typische Betriebszustände von Wärmepumpen zu erfassen und daraus repräsentative Tage abzuleiten. Dies kann anhand eines Kennfelds der Wärmepumpe geschehen, welches mithilfe eines Vortests erstellt wird. Im dritten Ansatz soll ein realer Tag (Messdaten oder TRY) aus einem definierten Intervall oder einem ganzen Jahr entnommen werden, welcher für alle Wettermerkmale die repräsentativsten Werte bereithält. Weiterführend soll das k-medoids-Clusteringverfahren, welches der zuletzt genannten Gruppe zugehörig ist, erläutert und verwendet werden, da es einen möglichst geringen Aufwand mit bestmöglichen Ergebnissen kombiniert. Im Allgemeinen geht es darum, eine Ansammlung von Datenpunkten in k Gruppen (Cluster) zu unterteilen, wobei der Datenpunkt mit dem geringsten Abstand zu allen anderen Daten des Clusters als Clusterschwerpunkt (medoid) definiert wird.

#### Ausgewähltes Verfahren – k-medoids-Clustering

Das Verfahren basiert auf der Verwendung realer Wetterdaten für den betrachteten Zeitraum, in aller Regel ein Jahr oder eine Heizperiode. Die repräsentativen Tage sind nicht einem festen zusammenhängenden Intervall zugeordnet. Vielmehr ist jeder Tag repräsentativ für ein Cluster von Tagen mit ähnlichen Wetterbedingungen, die ungeordnet im Verlauf des Betrachtungszeitraumes auftreten können. Die Zuordnung der Tage zu den einzelnen Clustern erfolgt gemäß der allgemeinen k-medoids-Clustering Methode (vgl. Gleichung (6)).

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (6)$$

mit  $x_j$  - Datenpunkt

$\mu_i$  - Clusterschwerpunkt (medoid)

$S_i$  - Cluster

$k$  - Anzahl Cluster

Im angewandten Algorithmus werden zunächst die Anzahl der Cluster festgelegt und dann per Zufallsgenerator Startwerte für die Clusterschwerpunkte (repräsentative Tage) gewählt. Zwischen jedem Tag und jedem Clusterschwerpunkt wird nach Gleichung (7) das Fehlerquadrat gebildet. Es erfolgt die Berücksichtigung der Wettergrößen Außentemperatur, direkte Strahlung und diffuse Strahlung sowie Windgeschwindigkeit. Zudem erhalten die Wettermerkmale

Gewichtungsfaktoren, die durch eine simulative Sensitivitätsanalyse quantifiziert werden können und den Einfluss der entsprechenden Merkmale auf die JAZ ausdrückt. Jeder Tag wird dem Clusterschwerpunkt zugeordnet, zu dem er das geringste Fehlerquadrat bzw. den geringsten Abstand aufweist.

$$FQ = \sum_{i=1}^n \left( \left[ \frac{\bar{x}_{Cl,i} - \bar{x}_i}{\bar{x}_{Cl,i}} \right]^2 \cdot f_i^2 \right) \quad (7)$$

mit  $FQ$  - Fehlerquadrat

$i$  - Index für Wettergröße

$n$  - Anzahl Wettergrößen

$\bar{x}_{Cl,i}$  - Mittelwert Wettergröße Clusterschwerp.

$\bar{x}_i$  - Mittelwert Wettergröße des i-ten Tags

$f_i$  - Gewichtungsfaktor Wettergröße

Anschließend werden neue Clusterschwerpunkte gebildet und die Zuordnung wird so lange wiederholt, bis sich die Schwerpunkte nicht mehr ändern. Da aufgrund der Startwertfestlegung lokale Optima entstehen können, wird der gesamte Algorithmus mehrfach wiederholt (z. B. 1000 Mal) und es werden die Clusterschwerpunkte ausgewählt, für die die Summe aller Fehlerquadrate zu den einzelnen Tagen minimal ist.

#### Simulationsergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der relativen Abweichung der Jahresarbeitszahl  $\Delta JAZ_{rel}$  für drei untersuchte Wärmepumpensysteme. Dabei ergibt sich die relative Abweichung der JAZ durch die Differenz zwischen der JAZ einer Jahressimulation und Simulation der typischen Tage bezogen auf die JAZ der Jahressimulation. Die simulierten Systeme sind eine konventionelle Luft/Wasser-Wärmepumpe, einmal ohne und einmal mit Unterstützung durch Solarthermie sowie eine Sole/Wasser-Wärmepumpe, die mittels U-Rohrsonde auf Wärme aus dem Erdreich zurückgreift. Tabelle 1 listet die verwendeten Gewichtungsfaktoren  $f_i$  auf.

Tabelle 1:  
Übersicht der Gewichtungsfaktoren

SYSTEM	$f_{T,A}$	$f_{sol,direkt}$	$f_{sol,diffus}$	$f_{v,Wind}$
Luft-Quelle ohne TWw	0,9914	0,0019	0,0055	0,0012
Luft-Quelle mit TWw	0,8264	0,0438	0,1173	0,0126
Solar-Kombi ohne TWw	0,9905	0,0053	0,0040	0,0003
Solar-Kombi mit TWw	0,9626	0,0149	0,0220	0,0004
Erdreich-Q. ohne TWw	0,9937	0,0017	0,0044	0,0002
Erdreich-Q. mit TWw	0,9737	0,0081	0,0172	0,0011

In allen Fällen ohne Betrachtung von Trinkwarmwasser (TWW) wird jeweils nur die Heizperiode simuliert, sodass die Anzahl der repräsentativen Tage / Testtage halbiert werden kann.

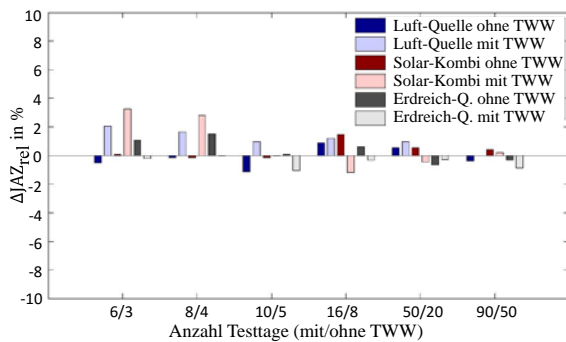


Abbildung 4: Ergebnisse für das k-medoids-Clustering (Engel, 2015)

Wie Abbildung 4 zu entnehmen ist, entstehen durch das Anwenden des k-medoids-Clustering lediglich kleine Abweichungen für die Jahresarbeitszahl von  $\Delta JAZ_{rel} < 3,25\%$ . Aufgrund dessen und der leichten Anwendbarkeit des Verfahrens, erweist sich diese Methode als die zu präferierende Wahl. Zudem wurde in (Engel, 2015), da es sich dort um eine simulative Untersuchung handelt, neben einer realistisch durchführbaren Anzahl an Testtagen auch eine hohe Anzahl von repräsentativen Tagen untersucht, um eine eventuell korrelierende Genauigkeitsverbesserung beobachten zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits bei einer verhältnismäßig geringen Anzahl an Testtagen tolerierbare Abweichungen auftreten und eine extreme Erhöhung der Testtageanzahl keinen sinnvollen Mehrwert bringt.

Im weiteren Verlauf des Projektes ist bereits eine Erweiterung des iterativ arbeitenden Algorithmus hin zu einer global konvergierenden Optimierung erfolgt, wozu jedoch noch keine Ergebnisse vorliegen. Jedoch ist durch die Nutzung eines Optimierers davon auszugehen, dass die gleichen oder geringere Abweichungen zwischen der Jahressimulation und der Simulation mit repräsentativen Tagen erreicht werden.

## EMULATIONS-KONZEPT

### Austauschparameter

Der Versuchsstand muss die Anforderungen einer „Hardware-in-the-Loop“-Untersuchungsmethodik erfüllen. Das grundsätzliche Konzept entsprechend der Abbildung 5 sieht die Kopplung des dynamischen Simulationsprogramms mit der zu untersuchenden Mikro KWK- bzw. Wärmepumpenanlage vor, wobei ein Datenaustausch von Randbedingungen in Echtzeit vorgenommen wird.

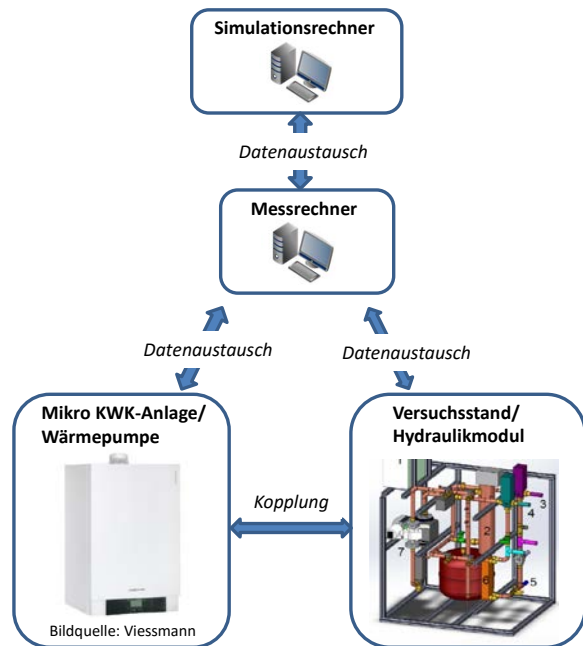


Abbildung 5: Prinzipieller Informationsfluss eines „HiL“-Versuchsstandes

Im Detail wird im Rahmen des HiL-Konzepts einerseits die sich einstellende Vorlauftemperatur des zu prüfenden Wärmeerzeugers der Simulation übergeben, andererseits liefert die Simulation den Massenstrom und die Rücklauftemperatur des Heizungsnetzes, welche sich aus der simulierten Systemdynamik ergeben. Ist die Pumpenkennlinie nicht oder nur unzureichend genau bekannt, so übergibt die Simulation statt dem Massestrom den Druckverlust des Heizungsnetzes und der sich daraufhin einstellende Massestrom durch den Wärmeerzeuger muss als Rückgabewert für den nächsten Zeitschritt zurückgeliefert werden. Für das „HiL“-Konzept ist von hoher Bedeutung, dass alle Regelorgane eine sehr kurze Ansprechzeit haben und die Kopplung mit der Simulation in Echtzeit erfolgt.

### Versuchsstands-aufbau

Für die Übergabe dieser Größen müssen geeignete Schnittstellen vorhanden sein. Zudem müssen die technischen Komponenten des Versuchsstandes in der Lage sein, die aus der Simulation erhaltenen Größen möglichst schnell einzustellen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Konzept für das hydraulische Modul entsprechend der Abbildung 6 festgelegt, welches bei den Analysen verwendet wird.

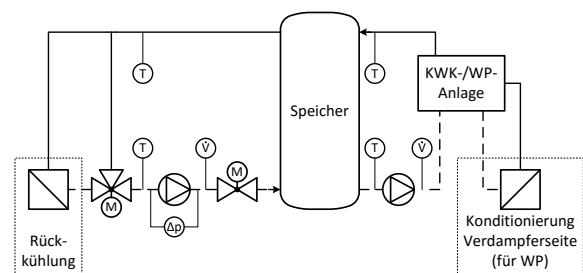


Abbildung 6: Hydraulischer Schaltplan des Versuchsstandes (Ausschnitt)

Die erforderliche Abkühlung des Massenstroms aus dem Speicher erfolgt in erster Linie durch die Einbindung einer Rückkühlung (z. B. Kältekreislauf, Kühltisch). Die Regelung der Rücklauftemperatur zum Speicher wird anschließend über ein Dreiwegeventil durch Beimischung des Vorlaufmassenstroms aus dem Speicher vorgenommen. Über ein Drosselventil mit Stellantrieb wird der Massenstrom / der Druckverlust geregelt.

### Kopplungsregime

Zunächst muss grundsätzlich die Systemgrenze zwischen Simulation und Messung festgelegt werden. Abbildung 7 zeigt, dass diese einerseits direkt am Erzeuger liegen kann (Variante I) und andererseits auch die Speicher mit in die Messung einbezogen werden können (Variante II).

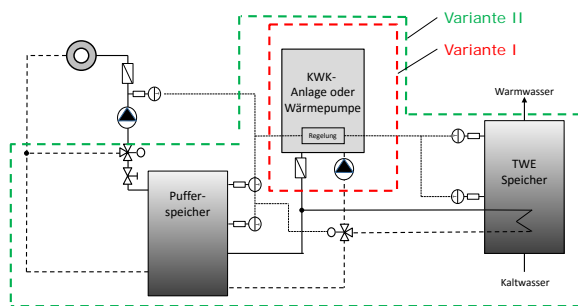


Abbildung 7: Systemgrenzen in der Emulation

Die Variante I hat den Vorteil, dass durch den Aufbau der Versuchseinrichtung die Gerätekonfiguration nicht vorgegeben und eine einfache Variation z. B. der Speichergröße in der Simulation möglich ist.

Wesentlicher Vorteil der Variante II ist dagegen, dass die geräteinterne Regelung des Erzeugers direkt auf die Sensoren in den Speichern zugreifen kann und somit keine Sensormanipulation erfolgen muss sowie keine Abhängigkeit von einem numerischen Speichermodell besteht. Für die weiterführenden Untersuchungen wurde daher die Variante II ausgewählt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Differenzen der jeweiligen Ladezustände der Speicher (bei Verwendung eines Kombispeichers kann auch nur ein Speicher erforderlich sein) zu Beginn und am Ende eines repräsentativen Tages den Energiebedarf des Prüflings beeinflussen. Dadurch ist eine Verzerrung der energetischen Bewertung zu erwarten. Eine mögliche Lösung zur Minimierung des Speichereinflusses ist die Kopplung der Länge des repräsentativen Tages an den Speicherzustand. Das heißt, dass zum Beispiel analog dem Vorgehen in der DIN 4709 (DIN 4709, 2011) ein repräsentativer Tag mit einem geladenem Heizungspufferspeicher beginnt und beendet ist, wenn mindestens 24 h vergangen sind und der Heizungspufferspeicher wieder vollgeladen ist. Zur Umsetzung variabler Längen der repräsentativen Tage muss jedoch gerätespezifisch geprüft werden, ob geräteinterne zeitabhängige Regelungsvorgänge starke Auswirkungen auf das Prüfergebnis haben.

Die Abbildung 8 verdeutlicht die Zeitsteuerung für die Prüfung eines Gerätes. Auf Simulationsseite wird zunächst ein Einschwingen der thermischen Zustände in der Gebäudemasse erreicht, indem die Rechnung mit ausreichender Vorlaufzeit vor dem ersten repräsentativen Tag gestartet wird. Parallel dazu erfolgt die thermische Vorkonditionierung des Versuchsstandes (Wärmerzeuger und Speicher).

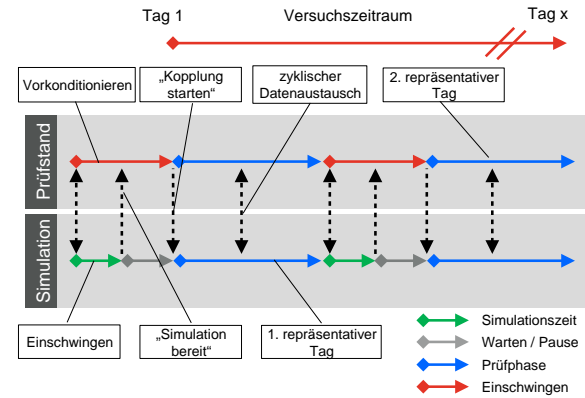


Abbildung 8: Datenaustausch im zeitlichen Verlauf innerhalb eines „HiL“- Versuchsstandes

Nach Ablauf einer Kopplung während eines repräsentativen Tages wird das Gebäude weiter in der Simulation berechnet und gleichzeitig werden eventuell erforderliche Konditionierungsmaßnahmen am Versuchsstand durchgeführt. Die Prüfung ist beendet, nachdem die Kopplung für den letzten repräsentativen Tag abgeschlossen ist.

### ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag stellt eine Untersuchungsmethodik dar, welche die Kopplung von numerischer Gebäude- und Anlagensimulation und Experiment am Beispiel von energetischen Analysen der Systeme Wärmepumpe und KWK-Anlage betrachtet. Die verlässliche und realitätsnahe Voraussage der energetischen Effizienz dieser Geräte ist von hoher Bedeutung, da sie Schlüsseltechnologien im Kontext der Energiewende darstellen. Hinsichtlich der Methodik zeigt der vorliegende Beitrag, dass bei der genannten Kopplung die Wahl der Bilanzzeiträume und Systemgrenzen von hoher Bedeutung ist. Besonders die Auswahl der repräsentativen Tage ist für die energetische Berechnung signifikant, da bei Kurzzeitanalysen die Speichervorgänge im System gesondert bewertet werden müssen. Hier zeigen Simulationsuntersuchungen, dass mit dem k-medoids-Clusteringverfahren geringe Abweichungen zwischen einer Jahresbilanz und der Bilanz über die repräsentativen Tage bei geringem Aufwand erzielt werden können.

Weiterhin ist es entscheidend, dass die Zeitkonstanten der Stellorgane des Emulationsversuchsstandes möglichst gering sind und die Kopplung in Echtzeit ablaufen kann.

Mit den an der TU Dresden, der RWTH Aachen und der Universität Stuttgart aufgebauten messtechnischen Einrichtungen werden nach einem Ringtest zukünftig

Wärmepumpen und KWK-Anlagen vermessen. Die Ergebnisse sollen in die Überarbeitung der entsprechenden normativen Verfahren einfließen.

### DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1211A / 03ET1211B / 03ET1211C gefördert.

### LITERATUR

Deutsches Institut für Normung e.V. 2011. DIN 4709 Normnutzungsgrad für Mikro-KWK-Geräte bis 70 kW Nennwärmebelastung, Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e.V. 2013. DIN EN 14511 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung, Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e.V. 2013. DIN EN 14825 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl, Berlin: Beuth Verlag.

Engel, H. 2015. Development of a procedure for dynamic evaluations of heat pump systems, Master's Thesis, RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Aachen, Deutschland.

Huchtemann, K. 2015. Supply Temperature Control Concepts in Heat Pump Heating Systems. Dissertation, RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Aachen, Deutschland

Perschke, A. 2010. Gebäude- und Anlagensimulation – Ein Dresdner Modell, In: gi Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik, Bd. 131, Nr. 4.

Regett, A.; Heller, C.:2015. Berücksichtigung von energiewirtschaftlichen Entwicklungen in der Ökobilanz - Emissions- und Primärenergiefaktoren im Studentakt, In: BWK, Bd. 67, Nr. 3.

Seifert, J. 2013: MIKRO BHKW Systeme für den Gebäudebereich, VDI Verlag 2013, ISBN 978-3-8007-3475-7

Verein Deutscher Ingenieure. 2009. VDI 4650 Berechnungen von Wärmepumpen - Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen -

Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung, Berlin: Beuth Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure. 2008. VDI 4655 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Berlin: Beuth Verlag.