

5 Analyse von Mikro-KWK-Systemen

Für eine präzise Analyse der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung im Einfamilienhaus ist es notwendig, deren spezifisches Verhalten genau zu bestimmen. Im nachfolgenden Abschnitt soll ein dafür geeignetes messtechnisches Konzept beschrieben werden. Neben der eigentlichen Beschreibung der verwendeten messtechnischen thermischen Komponenten wird dabei auch auf Kopplungsmöglichkeiten zu numerischen Simulationsprogrammen eingegangen. Abgerundet wird der messtechnische Teil durch eine detaillierte Fehlerbetrachtung.

Im zweiten Teil dieses Abschnittes werden die messtechnischen Ergebnisse ausgewählter Aggregate dokumentiert. Auf Basis dieser Analysen erfolgt eine mathematische Modellbildung und anschließend die Vorstellung von numerischen Simulationsergebnissen.

5.1 Messtechnik

5.1.1 Grundkonzept

Abbildung 5.1.1 zeigt prinzipiell den Aufbau eines Versuchsstandes, mit dem Mikro-KWK-Anlagen messtechnisch untersucht werden können. Bestandteile der Versuchsanlage sind:

- die Brennstoffversorgung (z. B. Erdgas) mit Gaszähler
- die elektrische Einbindung ins Stromnetz mit Elektroenergiezähler
- die hydraulische Einbindung mit entsprechender Rückkühlmöglichkeit sowie
- die Abgasstrecke mit Kondensatauffangeinrichtung

Mit der in Abb. 5.1.1 dargestellten Versuchsanordnung ist es möglich, sowohl stationäre als auch instationäre Untersuchungen durchzuführen. Darüber hinaus ist die Versuchsanordnung dazu geeignet die Auswirkung auf das Niederspannungsnetz zu analysieren. Ergänzt werden kann die Versuchsanordnung der Abb. 5.1.1 durch verschiedene Speicherkonzepte, die zwischen Erzeugersystem und Verbrauchersystem angeordnet werden (Entkopplung Erzeugung-Verbrauch). Damit ist es möglich, unterschiedliche hydraulische Schaltungen zu untersuchen. Resultierend aus dieser Flexibilität besitzt die Versuchsanordnung jedoch auch einige Nachteile. In erster Linie ist hier die Leitungslänge zwischen Erzeuger und den ersten PT-100 Elementen im Vor- und Rücklauf zu nennen, wodurch nicht die gesamte im Erzeuger an das Heizmedium übergebene Wärme bilanziert werden kann. Der von den Leitungen an den Raum übertragene Wärmestrom muss daher über eine zusätzliche analytische Berechnung in der Bilanzierung mit berücksichtigt werden. Zweiter Nachteil des Versuchsstandes ist das Fehlen einer Beruhigungsstrecke zwischen Rückkühlung und nachgeordneten PT-100 Element, wodurch alle Bilanzierungen auf die dem Wärmeezeuger nächste Temperaturmessstelle bezogen werden müssen.

Hinsichtlich der Durchführung der Messungen wurden zwei Konzepte umgesetzt. Das erste Konzept fokussiert auf die Ermittlung von stationären Leistungsdaten. Hierzu muss der Versuchsstand über einen längeren Zeitraum in Betrieb sein, um thermisch konstante Zustände zu erreichen. Als Optimum wurde durch Versuche eine „Einschwingphase“ von $\tau = 90$ min detektiert.

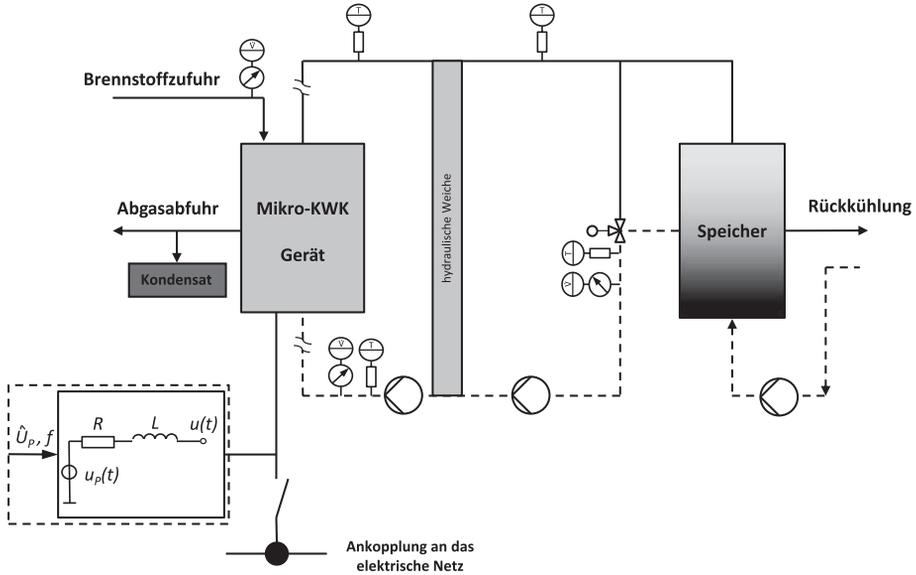


Abb. 5.1.1: Schematische Darstellung eines Mikro-KWK-Versuchsstandes inklusive Einrichtung zur Nachbildung des Niederspannungsnetzes

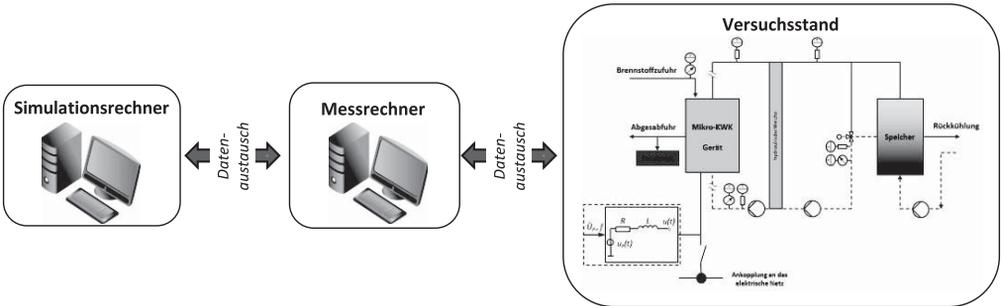


Abb. 5.1.2: „Hardware in the Loop“-Konzept des Versuchsstandes (HIL)

Das zweite messtechnische Konzept zielt auf dynamische Untersuchungen ab. Dieses im Weiteren als „Emulation“¹ bezeichnete Messkonzept verbindet die messtechnischen Analysen mit einer virtuellen Umgebung in der Art und Weise, dass für den Wärmeerzeuger die entsprechenden Rücklaufemperaturen und Masseströme als Funktion einer numerischen Gebäude- und Anlagensimulation vorgegeben werden (vollständige Kopplung). Hierzu ist es notwendig, die benannten Parameter (\dot{m} , ϑ_R) in

¹ Die Kopplung von realen Geräten innerhalb einer virtuellen Umgebung wird oft auch als „Hardware in the Loop“ bezeichnet.

bestimmten Zeitintervallen entsprechend den Ergebnissen der numerischen Simulation anzupassen. Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass die Zeitkonstanten für die einzelnen regelungstechnischen Vorgänge sehr klein sind. Um dies zu gewährleisten, wurden im Verbraucherkreis ausschließlich stetige Magnetventile eingesetzt, die eine sehr kurze Ansprechzeit besitzen. Der Informationsfluss zwischen dem Versuchsstand und dem Simulationsprogramm ist aus Abb. 5.1.2 zu erkennen. Zwischen Simulationsrechner und Messrechner erfolgt der Austausch der Signale sequentiell, d. h., zunächst werden mittels des numerischen Simulationsprogrammes z. B. die resultierende Rücklauftemperatur sowie der Massestrom an den Messrechner gesendet und dort als Sollwert im Verbraucherkreis an den entsprechenden Regeleinrichtungen gesetzt. Anschließend wird dem Simulationsprogramm über den Messrechner der aktuelle Wert der Vorlauftemperatur (ϑ_V) übermittelt. Das Intervall des Randbedingungs-austausches ist dabei stark von der Dynamik des zu untersuchenden Gerätes abhängig. Gängige Werte liegen zwischen $\tau = 1 - 60$ s.

Neben all den Vorteilen einer direkten Kopplung zwischen einer virtuellen Umgebung und einem realen Gerät existieren jedoch auch Nachteile. Beschränkend wirkt in erster Linie, dass die Analysen in Echtzeit vorgenommen werden müssen, wodurch es notwendig ist, typische Untersuchungsszenarien zu definieren (dynamische Lastfälle), mit deren Ergebnis z. B. die energetischen Verbräuche auf eine Heiz- bzw. Kühlperiode extrapoliert werden können.

5.1.2 Geräte

Der Versuchsstand umfasst Temperaturmesstechnik, Volumenstrommesstechnik, Messtechnik für die elektrischen Kennwerte sowie Abgasmesstechnik. Im Nachfolgenden sollen diese messtechnischen Einrichtungen detailliert beschrieben werden.

5.1.2.1 Temperaturmesstechnik

Um eine exakte kalorische Bilanzierung im Verbraucher- wie im Erzeugerkreis vornehmen zu können, wurden bei der Erstellung des Versuchsstandes Pt100-Sensoren verbaut (vgl. Abb. 5.1.3 / 5.1.4).

Die genannten Sensoren nutzen die elektrische Widerstandsänderung bei verschiedenen Temperaturen aus. Als Sensor-Material wird Platin verwendet (Messgenauigkeit entsprechend Abs. 5.1.2.5).



Abb. 5.1.3: Pt100 Sensor [162]



Abb. 5.1.4: Pt100 Sensor im eingebauten Zustand

5.1.2.2 Durchflussmesser

Für die Durchflussmessung im Verbraucher- wie im Erzeugerkreis werden ABB-Geräte [3] auf Basis eines magnetisch-induktiven Messprinzips eingesetzt.

Abb. 5.1.5 zeigt einen derartigen Durchflussmesser im eingebauten Zustand. Innerhalb des Gerätes wird senkrecht zur Flussrichtung des Fluids ein Magnetfeld erzeugt, welches die im Fluid (im vorliegenden Falle Wasser) vorhandenen Ladungsträger ablenkt. Wiederum senkrecht zum Magnetfeld sind Messelektroden angeordnet, in denen durch die Ablenkung der Ladungsträger (Ionen) eine Spannung induziert wird. Die Höhe der Spannung ist dabei proportional der Strömungsgeschwindigkeit. Wichtig ist bei der Installation derartiger Durchflussmesser, dass vor wie auch nach dem Gerät eine „Beruhigungsstrecke“ des Fluids vorhanden ist. Diese soll verhindern, dass mögliche Turbulenzen durch Rohrbögen bzw. andere Einbauten die Messung negativ beeinflussen. Im vorliegenden Fall wurde die Beruhigungsstrecke über eine Reduzierung und ein gerades Rohrstück gewährleistet. Abb. 5.1.5 zeigt dies im Bereich der Nachlaufstrecke. Die Messgenauigkeit des verwendeten Durchflussmessers wird vom Hersteller mit einem Wert von **0,5 %** bezogen auf den Messwert angegeben.



Abb. 5.1.5: ABB -Durchflussmesser [3] im eingebauten Zustand