

Abschlussbericht

Modelica-Simulation des Systems Nutzer/Gebäude/Anlagentechnik

Oktober 2013

Mustafa Flayyih, Frank Burmeister
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Sebastian Stinner
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)
an der RWTH Aachen

Walter Kraft
XRG Simulation GmbH (Hamburg)

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1–3
53123 Bonn

T +49 228 91885
F +49 228 9188990
info@dvgw.de
www.dvgw.de

Modelica-Simulation des Systems Nutzer/Gebäude/Anlagentechnik

Abschlussbericht
DVGW-Förderkennzeichen G 5-05-10

Management Summary

Simulationsverfahren sind aus allen Bereichen der Energietechnik nicht mehr wegzudenken. Sie stellen ein vielseitiges Werkzeug dar, um Anlagen und Prozesse zu untersuchen, auszulegen und zu optimieren. Im Rahmen dieses Projektes sollten verschiedene innovative Technologien zur Bereitstellung von Wärme unter Einbindung von Umweltwärme sowie im Falle der Kraft-Wärme-Kopplung die Bereitstellung von elektrischer Energie im Ein- und Mehrfamilienhausbereich modelliert und anschließend in energetisch unterschiedlichen Gebäudetypen dynamisch untersucht werden.

Dazu wurde die Open Source Programmiersprache „Modelica“ verwendet. Einfache Einzonen- und komplexere Mehrzonen-Modelle sowie das GWI-Demonstrationshaus mit den installierten Technologien wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes in Modelica abgebildet, dynamisch simuliert und anhand von Messdaten validiert.

Ziel dieses Projektes war die Validierung der existierenden und zu entwickelnden Modelica-Module für Gebäude und Technologien aus den technologisch orientierten Teilprojekten der Innovationsoffensive, so dass über Variantenberechnungen (u. a. Leistungsvariationen, unterschiedliche Energiespeicherkonzepte, Möglichkeiten zur effizienten Abwärmenutzung) die Effizienz der Systeme unter dynamischen Randbedingungen (z. B. Nutzereinfluss) ermittelt werden konnten. Nach Abschluss der Validierung der Einzel- und Gesamtmodelle können die Berechnungen dann auf die in den Projekten der Systemanalyse I und II definierten Gebäudeklassen übertragen und weiter im Detail untersucht werden.

MESSDATENBEREITSTELLUNG

Die Bereitstellung der gebäude- und anlagentechnischen Daten erfolgte durch das GWI. Die technischen Daten sowie Messdaten zum Betrieb im Labor und Haus wurden für die Projektpartner bereitgestellt. Die Wetterdaten, wie z. B. Außentemperatur an allen vier Außenwänden, relative Feuchte der Außenluft, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurden ebenfalls zur Verfügung gestellt. Die Simulationsergebnisse wurden dann mit den aufbereiteten Messdaten verglichen und die Modelle für das Haus sowie die Anlagentechnik validiert.

GEBÄUDEMODELL

Einzelnen-, Mehrzonen- und das Gesamtmodell wurden für das Demonstrationshaus am GWI physikalisch modelliert. Als Einzonen-Modell wurde ein einfaches Modell des Demonstrationshauses erstellt, in dem das komplette Gebäude mit einer thermischen Zone abgebildet und auch über einen einzigen virtuellen Heizkörper versorgt wurde. Beim Mehrzonen- und beim Gesamtmodell wurden alle Räume realitätsgetreu abgebildet. Die Nutzung der nicht beheizten Kellerräume, des Dachgeschosses und der Einzelräume kann über detaillierte Profile (interne Lasten sowie Lüftungsverhalten) im Gesamthausmodell vorgegeben werden.

ANLAGENTECHNIK-MODELLE

Die Anlagentechnik-Modelle und die zugehörigen Komponenten-Modelle wie Speicher, Rohre und Ventile wurden kennlinienbasiert, aber unter Berücksichtigung von physikalischen Effekten, z. B. Speicher Effekte, in Modelica 3.1 / Dymola 7.4, erstellt. Die folgenden Modelle wurden validiert:

Modell	Beschreibung
NT-Kessel	Niedertemperaturkessel ohne Brennwertnutzung
BW-Kessel	Brennwerteffekte im Modell berechnet. Mit/ohne Umweltwärmequelle abgebildet
GWP	Gasmotorische Wärmepumpe
ZWP	Zeolith-Wärmepumpe mit Solarthermie als Wärmequelle
Otto-Motor	Interne Verbrennung
Stirling-Motor	Externe Verbrennung
Brennstoffzelle	CFCL Brennstoffzelle
Speicher	Zwei-Schichten-Speicher
Flach (Platten) Kollektoren	Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung im Modell dargestellt

PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG UND VALIDIERUNG

Ziel des Projektes war es, neben der möglichst realistischen Abbildung der Anlagentechnik und des Gesamtsystems Einfamilienhaus eine Plausibilitätsüberprüfung des Verhaltens der erstellten Modelle vorzunehmen und gleichzeitig die Modelle mittels der am GWI-Demonstrationshaus gesammelten Messwerte zu validieren. Die dem Projekt zugrunde liegende Motivation war ein Werkzeug zu entwickeln, welches nicht nur die physikalisch genaue Abbildung von Gebäuden mit verschiedensten Anlagentechnologien ermöglicht, sondern darüber hinaus den Anwender in die Lage versetzt, auch Parameterstudien und dynamische Systemsimulationen durchzuführen.

Die Validierung des Modells konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Mittels des Gesamtmodells wurden Simulationen mit Wetter- und Messdaten aus dem Januar 2012 durchgeführt. Die im GWI-Demonstrationshaus aufgenommenen Wetterdaten und internen Lasten, wie die entstehende Wärme durch den Heiz- und Messgeräte, sind in die Simulationen mit eingeflossen. Die resultierenden Rücklauftemperaturen der Simulation liegen etwas über den realen Temperaturwerten. Der gemessene thermische Energieverbrauch liegt bei 354,2 kWh, der simulierte Energiebedarf bei 326,3 kWh,

d. h. insgesamt beträgt die Abweichung im betrachteten Zeitraum 7,9 %. Dieses Ergebnis kann im Rahmen eines Plausibilitätstests als hinreichend gut bewertet werden.

Im Gegensatz zur Validierung des Gesamtsystems wurden die jeweiligen Einzelmodelle analog zu den Versuchsstandsmessungen ohne Haus-Umgebung validiert. Auf diesem Wege konnte die Komplexität der Simulation stark reduziert werden, was zu einer Minimierung der Fehleranfälligkeit führt. Bei den Anlagen stimmen die simulierten Werte auch mit den gemessenen Werten (Abweichung und die Tendenz) überein. Die Abweichung lässt sich durch die Kennlinien-Modelle erklären. Die Modelle sind nach der Validierung so aufbereitet, dass jederzeit weitere Simulationen für andere Zeiträume durchgeführt werden können.

PARTNER

Das Projekt wurde gemeinsam mit den Partnern Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH), der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) und der XRG Simulation GmbH (XRG) durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	II
1 EINLEITUNG.....	- 9 -
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	- 9 -
1.2 Vorgehensweise	- 10 -
1.3 Einführung in Modelica / Dymola.....	- 15 -
2 METHODISCHES VORGEHEN.....	- 17 -
2.1 GWI-Demonstrationshaus	- 17 -
2.2 Konventionelle Wärmebereitstellungssysteme	- 22 -
Modellierung	- 24 -
2.3 Wärmepumpe	- 25 -
2.4 Mikro-KWK.....	- 31 -
2.5 Anlagentechnik mit solarer Unterstützung	- 34 -
3 VALIDIERUNG UND ERGEBNISSE	- 42 -
3.1 Validierung.....	- 42 -
3.1.1 GWI-DEMONSTRATIONSHAUS	- 44 -
3.1.2 KONVENTIONELLE WÄRMEBEREITSTELLUNGSSYSTEME.....	- 47 -
3.1.3 WÄRMEPUMPE.....	- 49 -
3.1.4 VALIDIERUNG DER KWK-MODELLE	- 50 -
3.1.5 WEITERE KOMPONENTEN.....	- 56 -
3.2 Ergebnisse.....	- 60 -
3.2.1 BERECHNUNG VON KWK-ANLAGEN IM WOHNUNGSBAU	- 63 -
3.2.2 DURCHFÜHREN VON GANZJAHRESSIMULATIONEN	- 68 -
4 LITERATURVERZEICHNIS.....	- 85 -
5 ANHANG	- 86 -

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.1: STRUKTUR DER „HVAC_GWI_v1_0“- (LINKS) SOWIE „BUILDING AND HVAC“- BIBLIOTHEK (RECHTS)	- 12 -
ABBILDUNG 1.2: VERSCHIEDENE EBENEN IN MODELICA / DYMOLA.	- 16 -
ABBILDUNG 2.1: DEMONSTRATIONSHAUS MIT SOLARKOLLEKTOREN IM HINTERGRUND UND TROCKENKÜHLER ZUM GLEICHZEITIGEN BETRIEB MEHRERER ANLAGEN. VOR DEM HAUS SIND 3 ERDKOLLEKTOREN FÜR WÄRMEPUMPEN INSTALLIERT	- 17 -
ABBILDUNG 2.2: IM DEMONSTRATIONSHAUS INSTALLIERTE KWK-GERÄTE (LINKS), WÄRMEPUMPEN, BRENNWERTKESSEL UND BRENNSTOFFZELLE (RECHTS)	- 18 -
ABBILDUNG 2.3: INSTALLATIONSSTATIONEN UND SPEICHER IN DEN KELLERRÄUMEN	- 18 -
ABBILDUNG 2.4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER HEIZKÖRPER UND DEREN WARMWASSERVERSORGUNG IM	- 19 -
ABBILDUNG 2.5: MODELLIERUNG DES GWI-DEMONSTRATIONSHAUSES ALS EINZONEN-MODELL IN MODELICA	- 20 -
ABBILDUNG 2.6: MODELL UND HYDRAULIK IM OBERGESCHOSS DES DEMONSTRATIONSHAUSES	- 21 -
ABBILDUNG 2.7: GESAMTHAUSMODELL MIT HYDRAULIK INKLUSIVE DACH UND KELLER	- 22 -
ABBILDUNG 2.8: MODELICA: STRUKTUR DES NIEDERTEMPERATUR- UND DER BRENNWERTKESSEL (LINKS) PARAMETER-MASKE DES KESSELS (RECHTS)	- 25 -
ABBILDUNG 2.9: MODELICA STRUKTUR DER GASMOTORISCHEN WÄRMEPUMPE	- 28 -
ABBILDUNG 2.10: HAUPTSTRUKTUR DES MODELLS DER ZWP	- 29 -
ABBILDUNG 2.11: MODELL DES ZEOLITH MODULS	- 30 -
ABBILDUNG 2.12: MODELL DES KWK OHNE STEUERUNG (STIRLIN, OTTO UND BRENNSTOFFZELLE)	- 33 -
ABBILDUNG 2.13: MODELICA STRUKTUR DER BRENNWERT UND SOLAR	- 35 -
ABBILDUNG 2.14: SCHEMA VOM BRENNWERT UND SOLAR ANLAGE MIT DEN MESSSTELLEN IM GWI-DEMONSTRATIONSHAUS	- 36 -
ABBILDUNG 2.15: MODELICA STRUKTUR DES WÄRMESPEICHER	- 37 -
ABBILDUNG 2.16: PARAMETERFENSTER DES WÄRMESPEICHERS	- 38 -
ABBILDUNG 2.17: MODELICA STRUKTUR DES SOLARKOLLEKTOR	- 40 -
ABBILDUNG 2.18: PARAMETERFENSTER DES SOLARKOLLEKTORS	- 41 -
ABBILDUNG 3.1: SCHEMA VOM STIRLING-GERÄT MIT DEN MESSSTELLEN IM GWI-DEMONSTRATIONSHAUS	- 43 -
ABBILDUNG 3.2: VERGLEICH VON GEMESSENER MIT SIMULIERTER RÜCKLAUFTEMPERATUR IM DEMONSTRATIONSHAUS	- 45 -
ABBILDUNG 3.3: VERGLEICH VON GEMESSENER MIT SIMULIERTER THERMISCHER LEISTUNG IM DEMONSTRATIONSHAUS	- 45 -
ABBILDUNG 3.4: VERLAUF DER SIMULIERTEN TEMPERATUR IM WOHNZIMMER SOWIE DIE BERECHNETE DURCHSCHNITTSTEMPERATUR ...	- 46 -
ABBILDUNG 3.5: VERGLEICH ZWISCHEN SIMULIERTER UND GEMESSENER VORLAUFTEMPERATUR	- 47 -
ABBILDUNG 3.6: VERGLEICH ZWISCHEN GEMESSENEM UND SIMULIERTEM GASBEDARF	- 48 -
ABBILDUNG 3.7: VERGLEICH VON GEMESSENER UND SIMULIERTER VORLAUFTEMPERATUR FÜR EINEN ZEITRAUM VON CA. 20 STUNDEN ..	- 51 -
ABBILDUNG 3.8: VERGLEICH ZWISCHEN GEMESSENEM UND SIMULIERTEM GASBEDARF	- 52 -
ABBILDUNG 3.9: VERGLEICH ZWISCHEN GEMESSENER UND SIMULIERTER ELEKTRISCHER LEISTUNG	- 53 -
ABBILDUNG 3.10: THERMISCHE LEISTUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER RÜCKLAUFTEMPERATUR BEI DER BLUEGEN-BRENNSTOFFZELLE ..	- 54 -
ABBILDUNG 3.11: VERGLEICH ZWISCHEN GEMESSENER UND SIMULIERTER VORLAUFTEMPERATUR DER BLUEGEN-BRENNSTOFFZELLE ...	- 55 -
ABBILDUNG 3.12: VERGLEICH ZWISCHEN GEMESSENER UND SIMULIERTER VORLAUFTEMPERATUR AM SOLARKOLLEKTOR	- 57 -
ABBILDUNG 3.13: TEMPERATURVERLAUF IM SPEICHER ÜBER DIE HÖHE ZU VERSCHIEDENEN ZEITPUNKTEN	- 58 -
ABBILDUNG 3.14: PRIMÄRENERGIEEINSPARUNG OHNE BASISDÄMMUNG	- 60 -
ABBILDUNG 3.15: PRIMÄRENERGIEEINSPARUNG MIT 5 CM BASISDÄMMUNG	- 61 -
ABBILDUNG 3.16: PRIMÄRENERGIEEINSPARUNGEN MIT 10 CM BASISDÄMMUNG	- 61 -
ABBILDUNG 3.17: DAS HAUSMODELL (EFH)	- 64 -
ABBILDUNG 3.18: HYDRAULIK DES ERDGESCHOSSES (EFH)	- 65 -
ABBILDUNG 3.19: MODELL DES MFH INKLUSIVE HYDRAULIK	- 66 -
ABBILDUNG 3.20: HYDRAULIK DES MFH (EIN STRANG)	- 67 -
ABBILDUNG 3.21: IN MODELICA ABGEBILDETES GESAMTSYSTEM	- 69 -
ABBILDUNG 3.22: PRIMÄRENERGIEBEDARF IM EFH ENEV 2009 BEI VARIATION DER SPEICHERGRÖÖE	- 70 -
ABBILDUNG 3.23: VERÄNDERUNG DER ANZAHL DER EINSCHALTVOGÄNGE DURCH VARIATION DER SPEICHERGRÖÖE	- 70 -
ABBILDUNG 3.24: TEMPERATURVERLAUF IN ZWEI THERMISCHEN ZONEN MIT EINEM VORGEGEBENEN SOLLWERT	- 72 -
ABBILDUNG 3.25: TEMPERATURVERLAUF IM SPEICHER UND ZUGEHÖRIGES BETRIEBSVERHALTEN DES BHKW SOWIE DES KESSELS	- 73 -
ABBILDUNG 3.26: ERZEUGTE ELEKTRISCHE ENERGIE DER VERSCHIEDENEN KWK-TYPEN FÜR VERSCHIEDENE HAUSTYPEN	- 74 -

ABBILDUNG β.27: GESAMTE THERMISCHE VERLUSTE DER EINZELNEN ANLAGENTYPEN BESTEHEND AUS SPEICHERVERLUSTEN IM HEIZUNGSSPEICHER UND IM TRINKWARMWASSERSPEICHER	- 75 -
ABBILDUNG β.28: PRIMÄRENERGIEBEDARF DER VERSCHIEDENEN HÄUSER MIT UNTERSCHIEDLICHEN VERSORGUNGSSYSTEMEN	- 76 -
ABBILDUNG β.29: TAKTVERHALTEN VON BHKW UND STIRLING.....	- 78 -
ABBILDUNG β.30: BETRIEBSSTUNDENZAHL VON BHKW UND STIRLING	- 79 -
ABBILDUNG β.31: PE-BEDARF FÜR ZWEI MEHRFAMILIENHÄUSER MIT UNTERSCHIEDLICHEN TECHNIKEN FÜR DEN ZEITRAUM VON JANUAR BIS APRIL	- 81 -
ABBILDUNG β.32: BETRIEBSZEITEN DER KWK-ANLAGEN IN DEN MONATEN JANUAR BIS APRIL	- 81 -

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.1: WICHTIGSTE KOMPONENTEN DER HVAC-BIBLIOTHEK (TUHH/XRG).....	- 13 -
TABELLE 1.2: BESCHREIBUNG DER UNTERGETEILTE BIBLIOTHEKEN IN BUILDING AND HVAC (RWTH/EBC).....	- 14 -
TABELLE 2.1: BESCHREIBUNG DER PARAMETER FÜR DEN WÄRMESPEICHER	- 38 -
TABELLE 3.1: SCHNITT VON DEN VORBEREITETEN MESSDATEN FÜR DIE MODELICA-VALIDIERUNG.....	- 43 -
TABELLE 3.2: U-WERTE FÜR DIE VERSCHIEDENEN BAUTEILE IN $W/(m^2K)$	- 63 -
TABELLE 3.3: KENNDATEN ZU DEN BETRACHTETEN MIKRO-KWK-ANLAGEN.....	- 64 -
TABELLE 3.4: MATRIX DER ZU KOPPELNDEN SYSTEME	- 71 -

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Energieversorgung unterliegt einem grundlegenden Wandel. In künftigen Versorgungsstrukturen ist eine Sicherstellung der Wärmeversorgung allein nicht ausreichend. Neben Wärme werden Strom und Kälte bzw. Klimatisierung eine große Rolle spielen. Die Versorgungskonzepte sind nicht mehr nur für das einzelne Objekt zu sehen, sondern Objekte werden eingebunden sein in gekoppelte Energienetze. Dafür sind neue, smarte Strukturen erforderlich, Smart Grids für Gas und Strom spielen daher schon jetzt bei der Planung neuer Versorgungsstrukturen eine bedeutende Rolle.

Für die Auslegung, Planung und Überprüfung zukünftiger Energieversorgungskonzepte und dafür optimierte Systeme zur Wärme- und Strombereitstellung ist ein Simulationsprogramm erforderlich, das die Berücksichtigung sämtlicher systemrelevanter Parameter gestattet und speziell dynamische Systeme abbilden kann. Insbesondere vor dem Hintergrund der gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung sowie einer Integration von Smart Grid-Funktionen ist eine dynamische Simulation über Zeiträume von wenigen Stunden bis hin zu einem Jahr ein erforderliches Instrument, um für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Stadtquartiere und auch größere urbane Strukturen die technische Machbarkeit und insbesondere die Wirtschaftlichkeit von Anlagen (bei wechselnden Ein- und Ausspeisetarifen) aufzuzeigen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollte eine innovative Software entwickelt werden, die es ermöglicht, auf Basis von Simulationsrechnungen für die oben genannten Anforderungen in beliebigen Häusern:

- die Anlagentechnik auszulegen und auf den Anwendungsfall zu optimieren
- die Anlagentechnik hinsichtlich der Energieverbräuche und der Wirtschaftlichkeit zu überprüfen (auch in zukünftigen Smart Grid Strukturen) und
- in Quartieren eine innovative Energieversorgung darzustellen, zu optimieren und zu überprüfen.

Für diese Zwecke ist die Open Source-Programmiersprache Modelica sehr gut geeignet, die von der (non-profit) Modelica Association seit 1996 entwickelt wird. Modelica ist eine objektorientierte und gleichungsbasierte Beschreibungssprache für physikalische Modelle. Modelica-Modelle werden mathematisch durch Differentialgleichungen, algebraische und diskrete Gleichungen beschrieben (1).

Als grafische Entwicklungsumgebung wird Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), ein Werkzeug zur objektorientierten Modellierung und Lösung komplexer, multiphysikalischer Systeme eingesetzt, das auf der offenen Modellierungssprache „Modelica“ basiert. Die Entwicklungsumgebung Dymola bietet im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben folgende Vorteile:

- Umgang mit großen, komplexen Multi-Physik-Modellen
- schnelle Modellierung mittels grafischer Benutzeroberfläche
- geringe Rechenzeiten
- offen für benutzerdefinierte Modellkomponenten
- direkter Zugriff auf Quelltextebene
- Möglichkeit der Simulation von dynamischen Systemen
- sehr einfaches Einlesen zeitlich veränderlicher Prozessparameter (z. B. Schwankung / Änderung der Leistung und oder Gaszusammensetzung über einen Tag / Woche etc.)
- offene Schnittstelle zu anderen Programmen (Functional Mock-up Interface (FMI))
- Echtzeit-Simulation
- im Hinblick auf Folgeprojekte eine Implementierung von Regelungstechnik
- Prozess- und Parameteroptimierung mittels Zielwertsuche

Die Ziele dieses Projektes sind:

- I. Abbildung von Technologien zur Wärme- und Strombereitstellung, insbesondere von innovativen Anlagen (Kessel, KWK, WP, ...)
- II. Validierung der Anlagentechnik auf Basis von GWI-Messdaten
- III. Erstellung eines Ein- und Mehrzonenmodells sowie eines Gesamtmodells, dem GWI-Demonstrationshaus
- IV. Überprüfung des Hausmodells auf Plausibilität
- V. Durchführung von Jahressimulationen – Vergleich von Dämmung und Einsatz verschiedener KWK-Technik

1.2 Vorgehensweise

Zunächst werden zwei verschiedenen Bibliotheken von den Projektpartnern in Modelica / Dymola entwickelt.

Das Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) hat bereits in Modelica die Gebäudephysik, Wärmeübergabesysteme sowie ein Wettermodell basierend auf den Testreferenzjahren des

Deutschen Wetterdienstes modelliert. Damit können im Rahmen dieses Projekts die physikalischen Effekte in einem Gebäude abgebildet und simuliert werden.

Des Weiteren sind die *Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)* und die *XRG Simulation GmbH (XRG)* ebenfalls seit mehreren Jahren mit Modelica befasst. Die Projektpartner waren für die Erstellung der dynamischen Modelle der unterschiedlichen Anlagenkomponenten sowie für das GWI-Demonstrationshaus zur Energieversorgung zuständig, *HVAC_GWI_v1_0* (Heating, Ventilation and Air Conditioning) und *Building and HVAC*-Bibliothek.

Das *Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)* hat die Techologiedaten sowie die Messdaten für die Modelle, die für die Aufgabenstellung zur Modellvalidierung erforderlich sind, zur Verfügung gestellt. Unter *HVAC_GWI_v1_0* befinden sich die Anlagentechnik-Modelle, Systeme und die dazu gehörigen Komponenten in einer Bibliothek angeordnet (TUHH und RWTH). Die Gebäude und Hydraulik-Modellabbildung sowie die Kopplung zwischen beiden Modellen sind unter *Building and HVAC* bereitgestellt. Beide Bibliotheken sind - wie in Abbildung 1.1 dargestellt - aufgebaut. Es wurden verschiedene Komponenten für die unterschiedlichen Technologien erarbeitet.

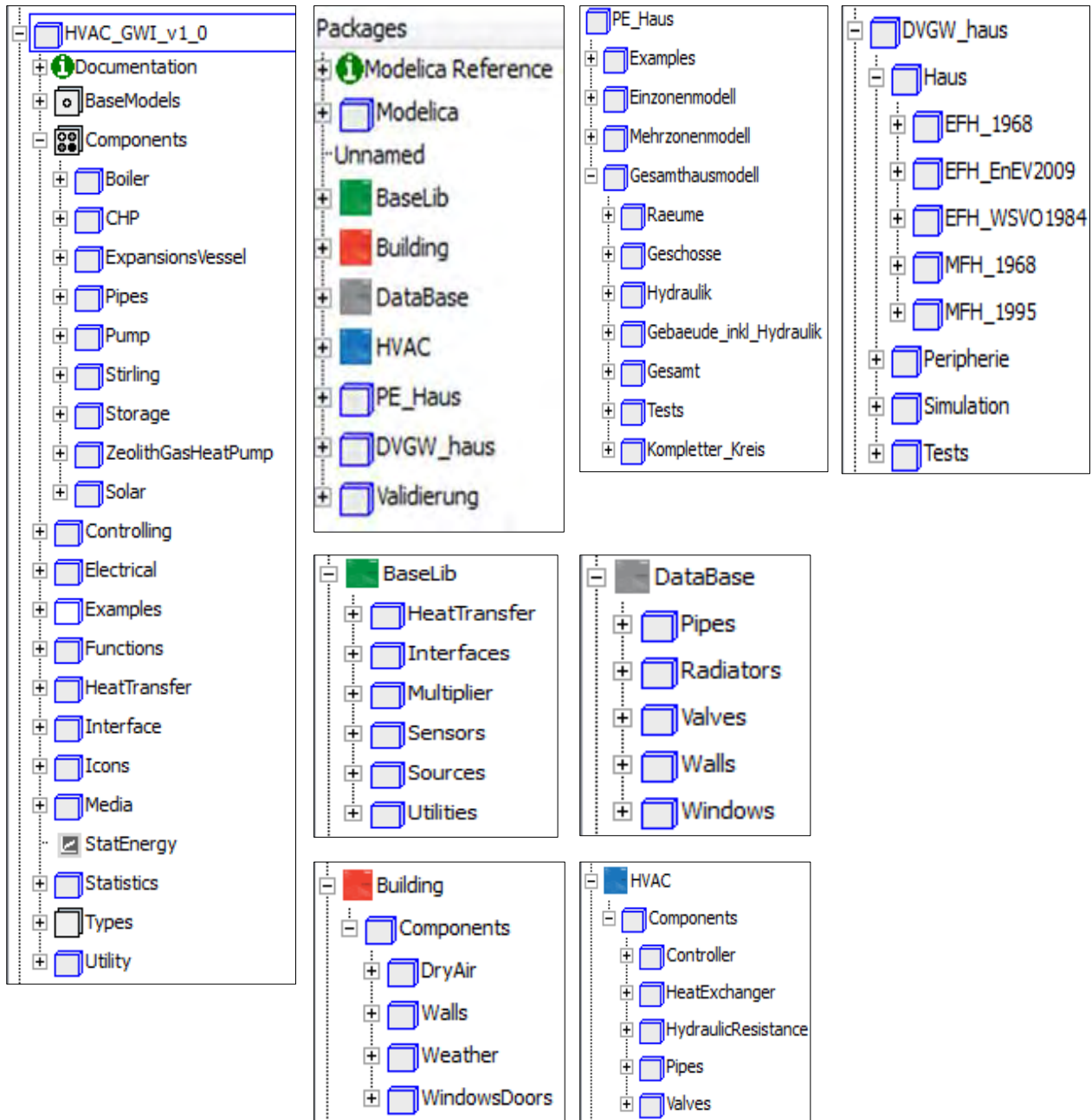


Abbildung 1.1: Struktur der „HVAC_GWI_v1_0“- (links) sowie „Building and HVAC“- Bibliothek (rechts)

Die HVAC_GWI_v1_0 Bibliothek der TUHH/XRG beinhaltet - wie in **Tabelle 1.1** dargestellt - Wärmeerzeugermodelle, Hydraulik / Rohrleitungen, Heizkreis und weitere Modelle, z. B. für Speicher.

Die Wärmeerzeugermodelle wie Kessel, KWK oder Wärmepumpe (WP) basieren auf Kennlinien-Modellen. Der Wirkungsgrad kann als konstant, linear oder interpoliert gewählt werden. Die Heizleistung wird über eine Solltemperatur bestimmt. Die Rohrleitungs-Modelle haben zwei spezielle Eigenschaften: Druckverluste werden berücksichtigt und die komplexen Volumenelemente werden mit

einer PartialLumpedVolume (Lumped volume with mass and energy balance; Punktmassenband mit Masse und Energiebilanz) oder mit einer Diskretisierung basierend auf PartialDistributedVolume (Base class for distributed volume models; Basisklasse für verteilte Volumenmodelle) aus der „Modelica.Fluid“ Bibliothek modelliert. Als Beispiel ist hier ist das Volumen des Speicher-Modelles mit der o. g. Diskretisierung modelliert worden. Zusätzlich sind weitere Modelle in der HVAC Bibliothek vorhanden, wie z. B. das Dreiwegeventil, Pumpe und HeatPipe aus der Modelica.Fluid-Bibliothek. Diese wurden so modifiziert, dass eine Erfassung des Energieverbrauchs sowie der Leistung möglich ist. Mit Hilfe eines „StateEnergy“-Modells ist in Summe ein Abgreifen aller Wärmeströme, Brennstoffströme und Leistungen sowie die integrierten Werte, also Wärme-, Brennstoffmengen, Stromverbrauch und die Stromerzeugung möglich.

Tabelle 1.1: Wichtigste Komponenten der HVAC-Bibliothek (TUHH/XRG)				
	Package	Modell	Hersteller	Beschreibung
HVAC_GWI_v1_0 Bibliothek (TUHH/XRG)	Kessel (Boiler)	1- NT-Kessel	Brötje	reiner Kessel ohne Brennwertnutzung
		2- BW-Kessel	Junkers	Brennwerteffekte im Modell berechnet. Mit/ohne Umweltwärme-Quelle abgebildet
	WP (HP)	1- GWP	Vaillant	Gasmotorische Wärmepumpe mit R134a
		2- ZWP	Vaillant	Zeolith-Wärmepumpe mit Solar als Wärme-Quelle
	KWK (CHP)	1- Otto-Motor	EcoPower	Verbrennungsmotor
		2- Stirling	Dachs	externe Verbrennung
	Speicher (Storage)	Hygiene Speicher	Vaillant	Zwei-Schichten-Speicher
	Solar Kollektor (Solar panel)	Flach (Platten) Kollektoren	Viessmann	Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung im Modell dargestellt
	Pumpen, Pipes, StateEnergy			

In der *Building & HVAC* - Bibliothek von EBC sind die Gebäude-Komponenten, Gebäude-Modelle und die zugehörige Hydraulik zu finden. Die *Building & HVAC* – Bibliothek ist insgesamt auf 6 Bibliotheken unterteilt: In den Bibliotheken BaseLib-, Building-, DataBase- und HVAC sind die einzelnen Komponenten enthalten, um vollständige Modelle, Gebäude sowie Hydrauliken zu modellieren.

Tabelle 1.2: Beschreibung der untergeteilte Bibliotheken in Building and HVAC (RWTH/EBC)			
Building and HVAC Bibliothek Inhalt (RWTH/EBC)	Package	Modell	Beschreibung
	BaseLib		Einzelne Komponenten wie Wärmeübertragung, Knoten, Sensoren sowie konstante und variable Wärmequellen, die für weitere Modelle wichtig sind.
	Building		Luft (Innenraum), Wetter (Außenumgebung), Wände, Fenster und Türen sind in dieser Bibliothek abgebildet. In diesen Modellen sind die Energiebilanz sowie die Wärmeübertragungs-Gleichungen beschrieben. Alle Modelle in der Building-Bibliothek können durch Einstellungen im Parameterfenster leicht parametrisiert werden. Geometrien, Materialien etc. sind ebenfalls einfach und schnell variierbar.
	DataBase		Eine Datenbank für alle Bibliotheken. Verschiedene Medien, Materialien, Anlagentypen und Geometrien sind in dieser Bibliothek dargestellt.
	HVAC		Heizkörper, Ventile, Pumpen und Regler sind die Hauptkomponenten der Bibliothek HVAC.
	PE-Haus	1- Einzonenmodell	Ein-Raum-Modell des GWI-PE-Hauses (alle Luftvolumina im Gebäude werden zu einem zusammengefasst). Keine Hydraulik vorhanden.
		2- Mehrzonenmodell	Nach Grundriss des PE-Haus (GWI-Demonstrationshaus) modelliert, aber ohne Keller und Dach. Hier ist die Hydraulik für EG und OG vorhanden.
		3- Gesamthausmodell	Komplett modelliertes GWI-Demonstrationshaus; Hydraulik vollständig.
	DVGW		Ein- und Mehrfamilienhausmodelle, die zur Berechnung im Bereich der KWK im Wohnungsbau benötigt werden..

Tabelle 1.1 und **Tabelle 1.2** erläutern die Struktur für die *Building and HVAC* Bibliothek dar. Bauelemente wie Wände, Türen, Fenster und auch die Hydraulikelemente wie Ventile, Rohrleitungen sind Kern dieser Bibliothek.

Alle Bauelemente wie Wände, Böden, Decken, Fenster und Türen sind physikalisch modelliert. Der Wärmestrom (die Konduktion, die Konvektion und die Wärmestrahlung) und eine Energiebilanz sind in den Modellen beschrieben. Materialdaten können aus der DataBase-Bibliothek übernommen werden. In der DataBase-Bibliothek können Daten für verschiedene Baustoffe wie Beton oder auch Dämmstoffe hinterlegt werden. Auch in den hydraulischen Komponenten kann die Bibliothek DataBase verwendet werden, beispielsweise für das Einstellen verschiedener Ventiltypen oder Heizkörper.

1.3 Einführung in Modelica / Dymola

Modelica ist eine objektorientierte und deklarative Programmiersprache, welche vor allem zur Beschreibung komplexer physikalischer nichtlinearer Systeme genutzt wird. Das zu betrachtende physikalische Gesamtsystem wird dabei hinsichtlich seiner realen Bestandteile und physikalischen Vorgänge in Objekte aufgeteilt, die dann anhand von differentiellen, algebraischen und diskretisierten Gleichungen beschrieben werden. Die einzelnen Objekte werden mittels der entsprechenden Energie- und Massenbilanzen miteinander gekoppelt und zu einem Gleichungssystem zusammengefasst.

Die Implementierung der entwickelten Ansätze sind im Rahmen dieses Projektes in der grafischen Entwicklungsumgebung Dymola realisiert worden.

Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) ist ein Werkzeug zur objektorientierten Modellierung und Lösung komplexer, multiphysikalischer Systeme, das auf der offenen Modellierungssprache „Modelica“ basiert. Dymola zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es den Anwender in die Lage versetzt, eigene Modellbibliotheken zu erstellen oder vorhandene Modellbibliotheken zu nutzen oder diese den eigenen Bedürfnissen anzupassen. Der Nutzer kann über die grafische Oberfläche mittels „Drag and Drop“ verschiedenste Modelle miteinander koppeln und somit auch sehr komplexe Systeme erstellen, welche immer noch ein hohes Maß an Übersichtlichkeit bieten. Ein Eingreifen auf Quelltextebene ist speziell bei der Modellentwicklung ebenfalls möglich, s. Abbildung 1.2.

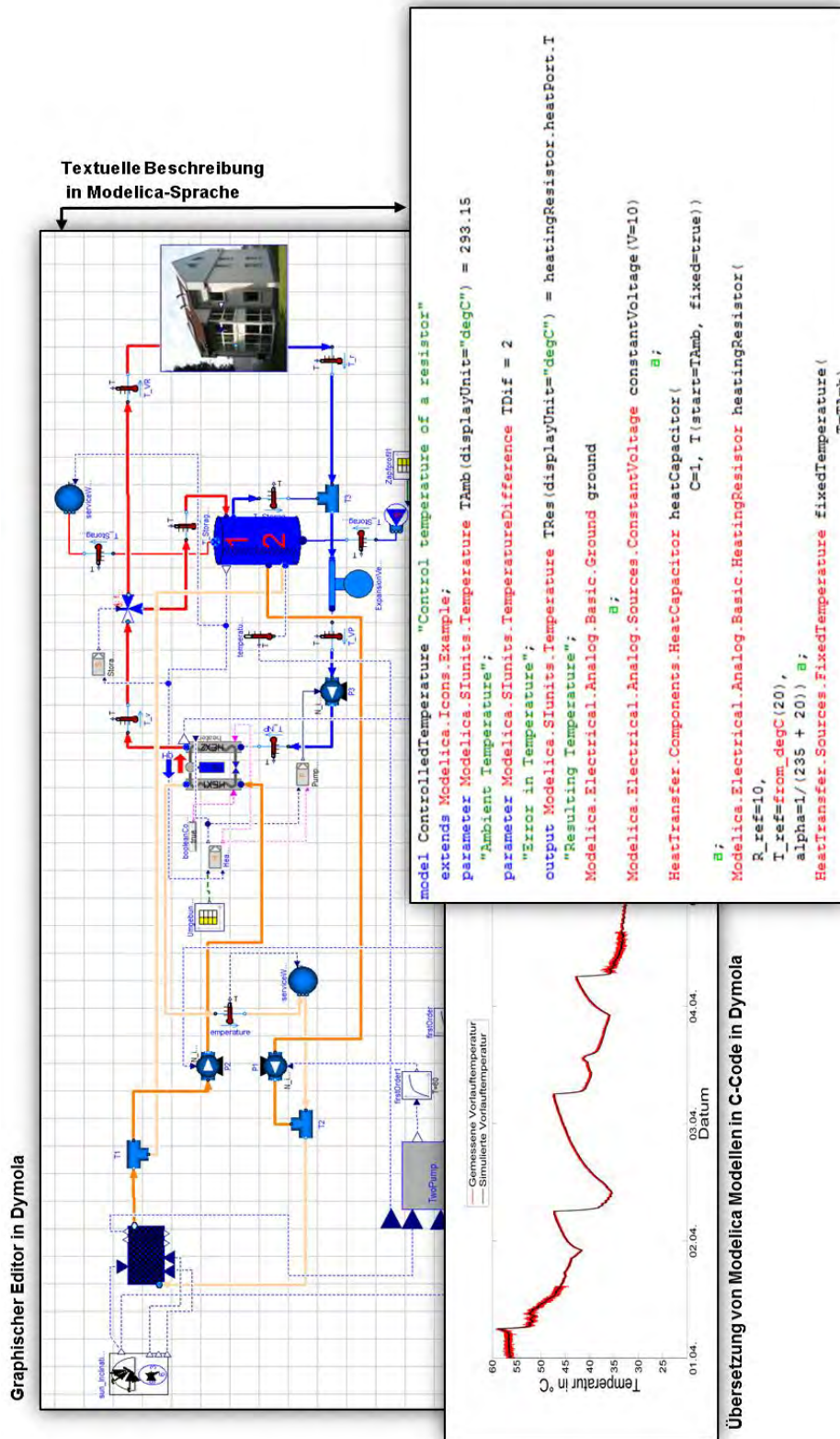


Abbildung 1.2: Verschiedene Ebenen in Modelica / DYMOLA.

2 Methodisches Vorgehen

2.1 GWI-Demonstrationshaus

Beschreibung

Das Demonstrationshaus am Standort Essen wurde im Jahr 1998 gebaut und wird hauptsächlich zu Demonstrations- und Experimentierzwecken sowie Schulungen genutzt. Es handelt sich hierbei um ein vollunterkellertes, freistehendes Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 125 m² im Erd-, und Ober-, Dachgeschoss und Wintergarten. Die Grundfläche beträgt 85 m², die Gebäudenutzfläche liegt bei 297 m², das umbaute Volumen beträgt 930 m³. Das Demonstrationshaus ist nach dem Wärmedämmstandard WSVO 95 gebaut worden. Es weist einen spezifischen Heizwärmebedarf von 70 kWh/m²a auf. Abbildung 2.1 zeigt eine Außenansicht des Demonstrationshauses mit einer Thermografieaufnahme. Damit die im Erdgeschoss installierten Gas-Plus-Technologien auch gleichzeitig ohne Einschränkungen betrieben werden können, wird ein Trockenkühler eingesetzt, um die anfallende Wärme regelbar abzuführen.

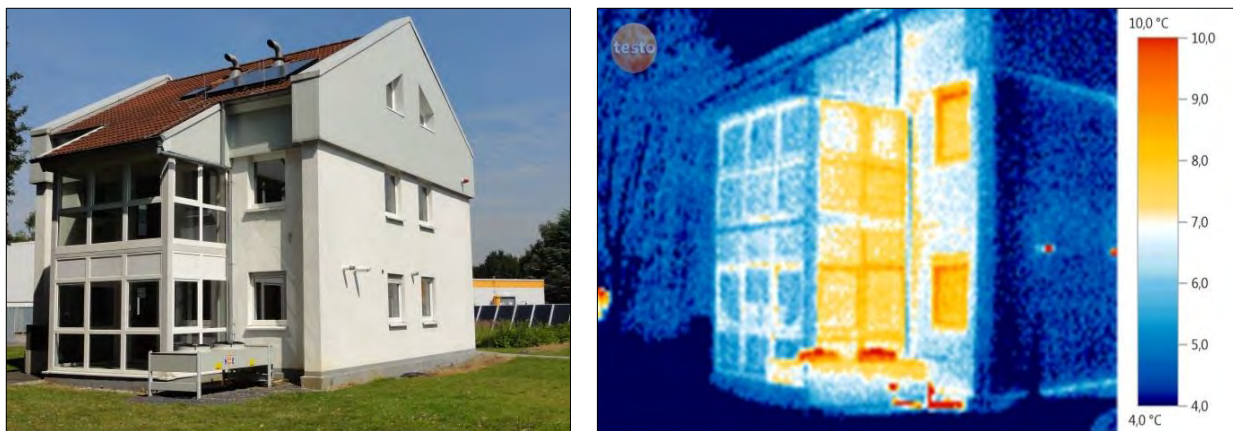


Abbildung 2.1: Demonstrationshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.

Im Demonstrationshaus kann das Nutzerverhalten gezielt simuliert und die jeweiligen Auswirkungen mit Hilfe modernster Messtechnik detailliert erfasst und ausgewertet werden.

Die nachstehenden Fotos (Abbildung 2.2) zeigen die Mikro-KWK-Geräte (links) und die Gaswärmepumpen sowie das Brennwertgerät und die Brennstoffzelle, die die Wärme- und Stromversorgung des Hauses übernehmen. Alle anderen Geräte werden nach dem Bedarf des Objektes geführt. Die

dabei zusätzlich anfallende Wärme wird über den Trockenkühler an die Umgebung abgeführt. Die Hydraulik ist so angelegt, dass im Prinzip jedes Gerät als „führendes“ Gerät betrieben werden kann. Alle Geräte verfügen über ihre eigene Systemtechnik mit zugehörigem Speicher, wie vom Hersteller vorgegeben. Der Installationsaufwand wird in der Abbildung 2.3 deutlich. Schematisch sind in Abbildung 2.4 die Heizkörper und deren Warmwasserversorgung im GWI-Demonstrationshaus abgebildet.



Abbildung 2.2: Im Demonstrationshaus installierte KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts)

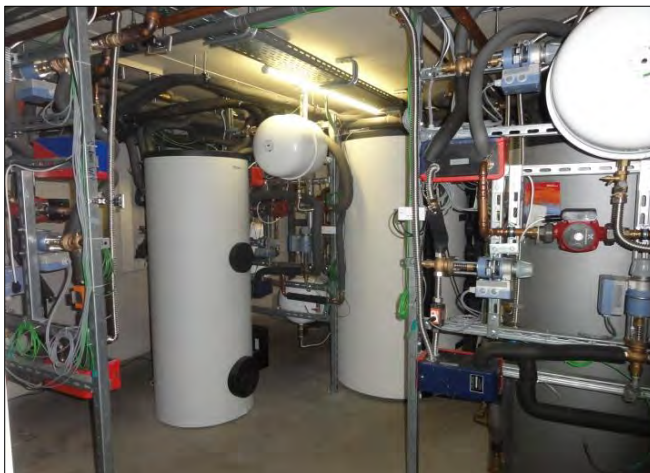


Abbildung 2.3: Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen

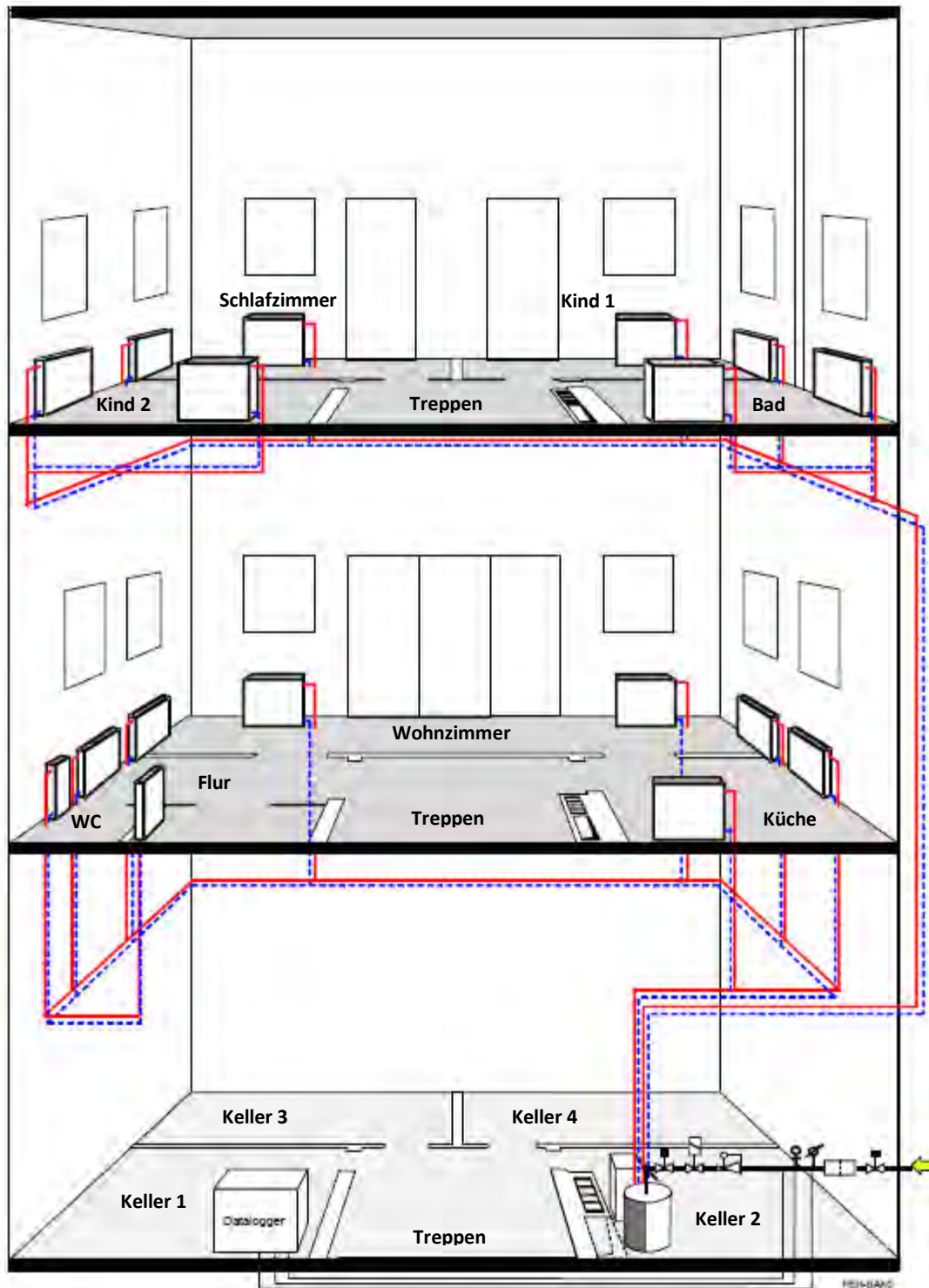


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Heizkörper und deren Warmwasserversorgung im GWI-Demonstrationshaus

Modellierung

Um ein komplexes Modell wie das GWI-Demonstrationshaus komplett darstellen zu können, wurde das Hausmodell in drei Schritten erstellt.

➤ Ein-Zonen-Modell

Als erster Schritt wurde ein einfaches Modell des Demonstrationshauses erstellt, in dem das komplette Gebäude mit **einer** thermischen Zone abgebildet und über **einen** virtuellen Heizkörper versorgt wurde. Das Modell ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Mit diesem Modell sind einfache dynamische Berechnungen der benötigten Heizleistung oder Ähnliches möglich.

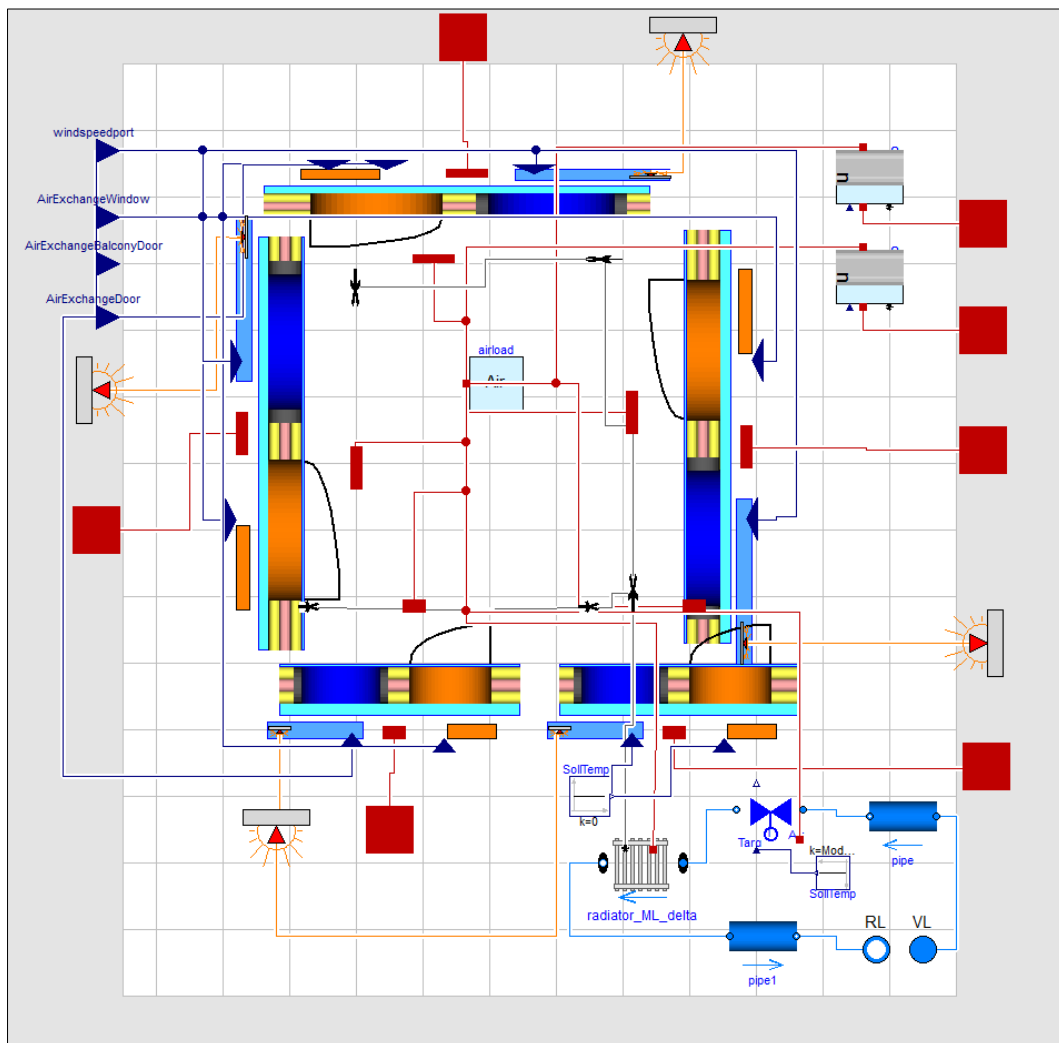


Abbildung 2.5: Modellierung des GWI-Demonstrationshauses als Einzonen-Modell in Modelica

➤ Mehrzonenmodell

Der zweite Schritt in der Modellierung ist ein Mehrzonenmodell, in dem die Hydraulik sowie die einzelnen Räume des Demonstrationshauses detailliert abgebildet wurden. Jeder Raum erhält eine eigene Zone; die Nutzungsbedingungen können detailliert für jede Zone eingestellt werden. Alle in der Realität miteinander verbundenen Zonen sind auch im Modell entsprechend miteinander gekoppelt, s. Abbildung 2.4. Zudem wurden im Hydraulikmodell alle Heizkörper, die auch im realen Gebäude vorhanden sind, integriert. Beispielhaft wird in Abbildung 2.6 die komplette Hydraulik im Erdgeschoss des Demonstrationshauses dargestellt.

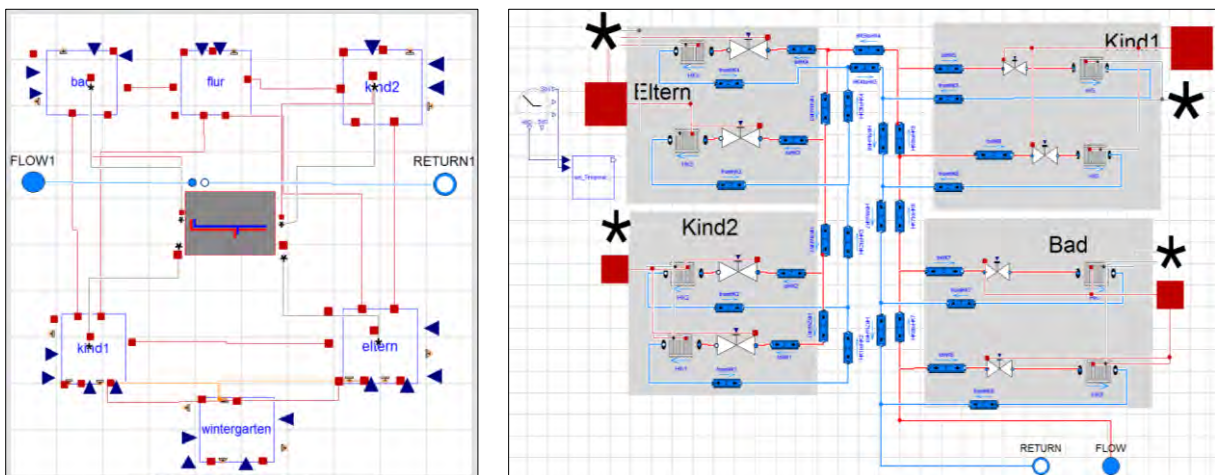


Abbildung 2.6: Modell und Hydraulik im Obergeschoss des Demonstrationshauses

➤ Gesamtmodell

Abschließend wurde ein Gesamtmodell erstellt, in das auch eine detaillierte Modellierung der nicht beheizten Kellerräume und des Dachraumes integriert wurde. Dieses Modell ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Es können für jeden Raum detaillierte Nutzungsprofile (interne Lasten sowie Lüftungsverhalten) über eine CSV-Text¹ Tabelle vorgegeben werden. So kann unterschiedliches Nutzerverhalten mit verschiedenen Technologien verbunden werden, um eine Bewertung, z. B. hinsichtlich der Anlageneffizienz vorzunehmen. Das Hydraulikmodell basiert auf dem des Mehrzonenmodells.

Eine vollständige Darstellung, Quelltext, der Gesamtmodell im Modelica ist im Anhang unter Abschnitt A.1 vorhanden.

¹ CSV: Comma-separated values

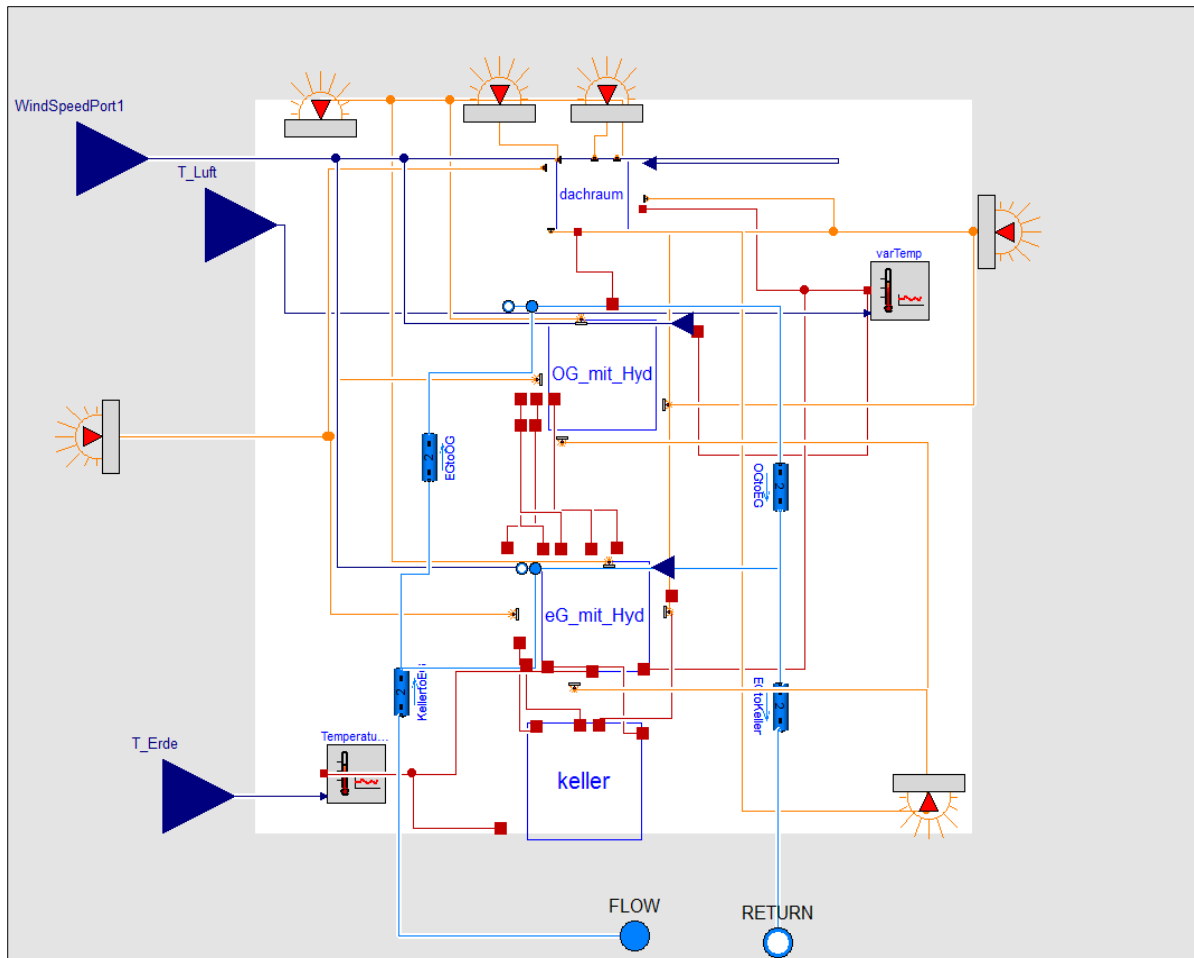


Abbildung 2.7: Gesamthausmodell mit Hydraulik inklusive Dach und Keller

2.2 Konventionelle Wärmebereitstellungssysteme

Im Rahmen der Innovationsoffensive wurde das Demonstrationshaus mit konventionellen Wärmeerzeugern wie Niedertemperatur- und Brennwertkessel sowie mit Gas-Plus-Technologien, beispielsweise Brennwert Plus Solar, Wärmepumpe Plus Solar, Mikro-KWK-Geräte mit Stirling- oder Ottomotor, ausgestattet.

Die Hauptkomponenten eines konventionellen Wärmeerzeugers, als bodenstehendes oder wandhängendes Gerät ausgeführt, sind der Brenner, die Brennkammer und der Wärmeübertrager. Die Nutz-Energie wird über den Wärmeübertrager an das Wärmeträgermedium (Wasser) übertragen und über die Heizungshydraulik in die Wärmeverteilungssysteme in den Räumen (Heizkörper, Fußboden, ...) transportiert.

Beschreibung

➤ **Niedertemperaturkessel**

Seit den 80er-Jahren sind „Niedertemperaturheizkessel“ (NT-Kessel) im Einsatz. Der NT-Kessel ist eine Weiterentwicklung des früher üblichen Konstanttemperaturkessels. Das Besondere an diesen Kesseln ist, dass sie auch mit niedrigen Kesseltemperaturen betrieben werden können: Die Kesseltemperatur ändert sich (gleitende Betriebsweise) oder ist konstant niedrig.

Nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) ist ein Niedertemperatur-Heizkessel ein Heizkessel, der kontinuierlich mit einer Eintrittstemperatur von 35 bis 40 °C betrieben werden kann und in dem es unter bestimmten Umständen zur Kondensation des in den Rauchgasen enthaltenen Wasserdampfes kommen kann. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen sind die Wärmeverluste im Wärmeverteilsystem verringert. Die Heizflächen müssen aber auf die Niedertemperaturheizung abgestimmt sein. Je größer die Heizflächen, desto niedriger kann die Temperatur des Heizwassers gewählt werden.

Für Niedertemperaturheizungen kommen sowohl Heizkörper als auch Flächenheizungen infrage. Die maximale Vorlauftemperatur sollte nicht größer als 70 °C sein, um ein gutes Raumklima mit wenig Luftbewegung zu erreichen.

➤ **Brennwertgerät**

Die Gas-Brennwerttechnik bietet für die häusliche Wärmeversorgung eine sehr effiziente und ausgereifte Technik. Sie nutzt, in Ergänzung zum NT-Kessel, auch die in den Verbrennungsabgasen enthaltene Kondensationswärme des Wasserdampfes. Nach annähernd 20 Jahren auf dem Markt und stetiger Weiterentwicklung kann mit der modernen Brennwerttechnik annähernd das physikalische Optimum bei der Verbrennung von Energieträgern erreicht werden. Auf den Heizwert des Energieträgers bezogene Wirkungsgrade von bis zu 111 % bei Gas und 106 % bei Heizöl sind möglich. Brennwertkessel zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit und Zuverlässigkeit aus. Wandhängende Geräte liefern Leistungen bis zu 100 kW und können in Kaskaden hintereinandergeschaltet werden, um eine höhere Wärmeleistung zu erreichen. Bodenstehende Brennwertkessel sind in der Lage, mehr als 10.000 kW Wärmeleistung bereitzustellen.

Modellierung

Die Simulation dynamischer Systeme mit einer Vielzahl voneinander abhängiger, zeitabhängiger Variablen wird auch in der Gerätetechnik zur Gebäudeenergieversorgung immer bedeutsamer, da auch hier die Komplexität der Technologie immer größer wird.

Die Pumpenmodelle und Rohrmodelle sowie alle Hauptmodelle wurden soweit modifiziert, dass die dort umgesetzten Leistungen bzw. Wärmemengen in dem Modell der *statEnergy* aufgenommen werden. Das *statEnergy* Modell bewirkt, dass die generierten und verbrauchten Leistungen und Wärmeströme sowie die dabei verrichteten Arbeiten und Wärmemengen, aller in einem Heizungskreis eingebauten Modelle, zusammenaddiert werden. Die Voraussetzung dafür ist, dass in den Modellen des Heizungskreises die Modelle aus der Bibliothek *HVAC_GWI* implementiert wurden. Deswegen ist *statEnergy* in allen Gerätetechnik-Modellen zu finden. Zusätzlich zur Berechnung der Summen können die Kosten für die Verbrauchten und erzeugten Energien bestimmt werden. Dafür ist der Parameter *useMeter* auf *true* zu setzen.

➤ Niedertemperatur- und Brennwert-Gerät

Der Niedertemperatur- (*Boiler_simple*) und der Brennwertkessel (*CondensingBoiler*) sind ähnlich modelliert. Der Hauptunterschied besteht im Wirkungsgrad. Bezogen auf den Heizwert kann aufgrund des Brennwerteffekts ein Wirkungsgrad von über 100 % erreicht werden.

Das Modell *Boiler_simple* kann für unterschiedliche Heizkesseltypen (Ölheizkessel, Gasheizkessel usw.) eingesetzt werden, wobei hier der maximale Wirkungsgrad auf 100 % (1 in Modelica Parameter-Maske) begrenzt werden sollte. Der *CondensingBoiler* ist in Modelica der Brennwertkessel mit einem maximalen Wirkungsgrad von 111 %², theoretisch erreicht der BW-Kessel einen maximalen Wirkungsgrad von 111 % (bezogen auf Heizwert) (2).

Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau und die Parameter-Maske des gesamten Kesselmodells. Eine weitere Komponente in diesem Modell ist das „*Pipe_simple*“ wo Medium, Volumen und Massenstrom definiert werden können. Die Bilanzierung der Energieströme erfolgt im *StatEnergy* Modell. Die Einschaltung und die erreichte Vorlauftemperatur sind über Konnektoren als Boolesch oder Realwert festgelegt. Die Beschreibung der Konnektoren ist wie folgt:

powerOn: der Boolean Input *powerOn* Konnektor erwartet einen: **true**, wenn der *Boiler* an sein soll oder **false**, wenn der *Boiler* aus sein soll.

² Die Eingabe für 111% ist 1.11 in Modelica Parameter-Maske.

Real Input-Connector **T_target**: Durch diesen Konnektor wird die **Vorlauftemperatur** für den Kessel vorgegeben.

P_therm: Er ist ein Real Output-Konnektor und gibt die **thermische Leistung** des Kessels zurück.

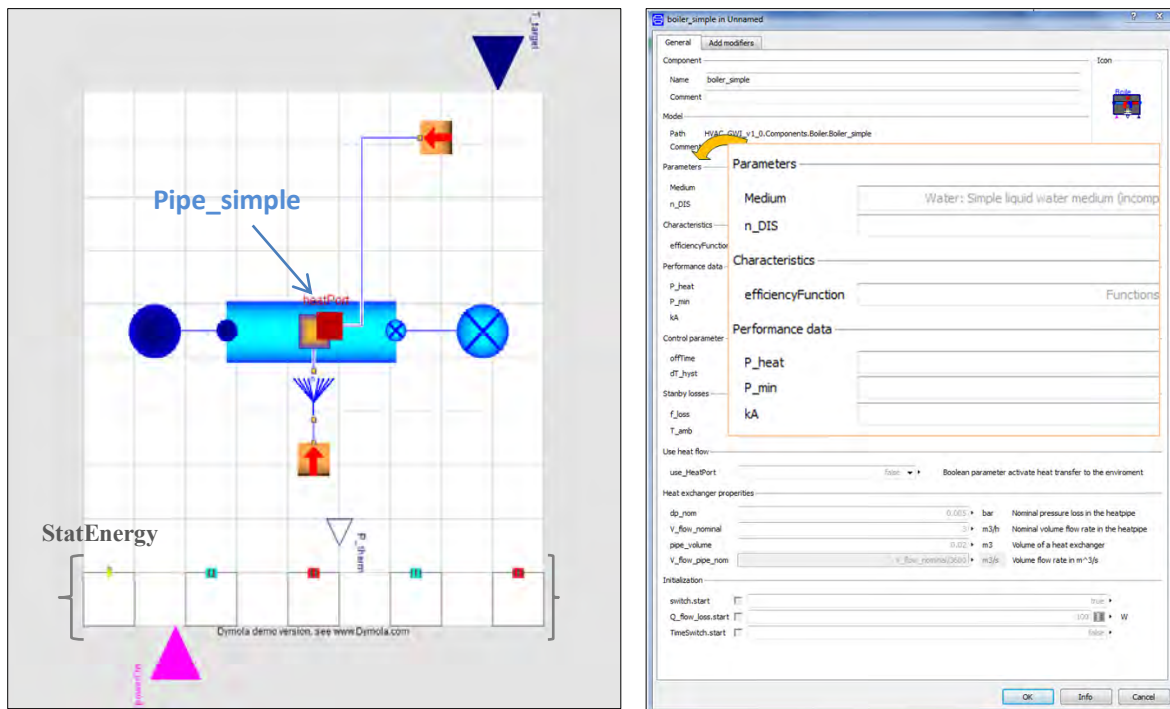


Abbildung 2.8: Modelica: Struktur des Niedertemperatur- und der Brennwertkessel (links) Parameter-Maske des Kessels (rechts)

2.3 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe (WP) koppelt Umweltwärme über eine Nutzung von Solar-, Erd- oder Luftwärme ein. Entscheidend für den Wärmepumpenbetrieb sind das Zusammenwirken von Wärmequelle bzw. Wärmesenke, Umgebungsrandbedingungen, Gebäude, Anlage und Nutzerverhalten.

In diesem Projekt wurden zwei verschiedenen Typen von Wärmepumpen modelliert: Eine gasmotorisch betriebene Wärmepumpe und eine Zeolithwärmepumpe bzw. Adsorptionswärmepumpe, die Umweltwärme mit Hilfe eines Adsorptionsprozesses für das Heizen nutzbar macht.

Beschreibung

➤ Gasmotorisch betriebene Wärmepumpe

Das Prinzip der motorisch betriebenen Gaswärmepumpe wird über die Modellierung eines vorhandenen Kältemaschinenmodells abgebildet. Verdichter, Kondensator, Drossel und Verdampfer sind auch hier Bestandteile der Anlagentechnik. Im Gegensatz zu Sorptionswärmepumpen wird hier die Verdichtung mit einem Gasmotor herbeigeführt. Zusätzlich zur Umweltwärme wird die Abwärme des Motors genutzt und in den Energiekreislauf mit einbezogen.

Ein Vorteil der Gaswärmepumpen gegenüber Elektrowärmepumpen ist die Möglichkeit, den Spitzenlast- und den Warmwasserbedarf durch eine Gasfeuerung anstatt mit einer Stromheizung zu decken. Die Kennzahl für die Effizienz einer Gaswärmepumpe ist die Heizzahl, die das Verhältnis von gewonnener Wärmeenergie zu eingesetzter externer Energie beschreibt. Die Heizzahl ist immer kleiner als die Arbeitszahl (Kennzahl der Elektrowärmepumpe), da unter anderem die Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung nicht berücksichtigt werden.

Gaswärmepumpen sind in einem Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis in den Megawattbereich verfügbar und können somit sowohl in Einfamilienhäusern als auch in großen Betrieben eingesetzt werden.

➤ Zeolith-Wärmepumpe

Das Prinzip der Adsorptionswärmepumpe in diesem Projekt basiert auf einem Feststoff, hier Zeolith. Zeolith ist ein Mineral, das Wasserdampf an sich bindet (adsorbiert) und dabei Wärme mit einer Temperatur bis zu 300 °C abgibt. Die Adsorptionswärmepumpe arbeitet nicht wie die anderen Wärmepumpen in einem Kreisprozess, der Prozess läuft periodisch ab und unter der Voraussetzung eines Vakuumsystems. Der apparative Aufwand ist allerdings wegen der Vakuumtechnik recht groß bei dieser WP-Bauart. In der so genannten Desorptionsphase wird dem Wärmetauscher, der mit Silicagel oder Zeolith beschichtet ist, mit einem Gasbrenner Wärme zugeführt. Das zuvor adsorbierte Wasser wird als Dampf freigesetzt und gelangt zum zweiten Wärmetauscher.

Dieser Wärmetauscher gibt in einer ersten Phase die Wärme, die bei der Kondensation des Dampfes frei wird, an das Heizsystem ab. Wenn das Zeolith-Medium wasserfrei ist, der erwünschte Trocknungsgrad erreicht und das Wasser am zweiten Wärmetauscher kondensiert, ist die erste Phase beendet und der Gas-Brenner wird abgeschaltet. In der zweiten Phase wirkt der Wärmetauscher als Verdampfer - er leitet dem Wasser Umweltwärme zu. In dieser Phase befinden sich im System

Druckverhältnisse von etwa 6 mbar, so dass das Kältemittel Wasser bei der Aufnahme von Umweltwärme verdampft. Der Wasserdampf gelangt wieder zum Wärmetauscher, wo ihn Silicagel oder Zeolith erneut aufnehmen (adsorbieren). Die Wärme, die von Silicagel oder Zeolith abgegeben wird, wird per Wärmetauscher an das Heizsystem gegeben. Die komplette Periode ist dann abgeschlossen, wenn der Wasserdampf vollständig adsorbiert ist.

Modellierung

➤ Gasmotorisch betriebene Wärmepumpe

Abbildung 2.9 zeigt den Aufbau des gesamten Wärmepumpenmodells. Die gasmotorische Wärmepumpe (GWP) ist so aufgebaut, dass die Motorleistung direkt an den Verdichter des Kältekreis übergeben wird. Das über dem Verdichter komprimierte Kältemittel verdampft über dem Verdampfer und nach einer Expansion über das Expansionsventil kondensiert es in dem Kondensator. Der über dem Verdampfer aufgenommener Wärmestrom wird von der Umgebung eingefangen. Der Kondensatorwärmestrom wird an den Heizkreis übergeben. Der Abgaswärmestrom der GWP wird zusätzlich, nachdem der Kondensator seine Wärme übertragen hat, dem Heizmittel zugeführt.

Das Modell *Pipe_simple* ist identisch mit dem verwendeten Modell für Niedertemperatur- und Brennwert-Gerät.

Die Berechnung der Kältemittelzustände erfolgt auf Basis von Funktionen im Wärmepumpenmodell *R134a*, welche den thermodynamischen Zustand von *R134a* beschreiben und Bestandteil der Modelica Standard Library sind.

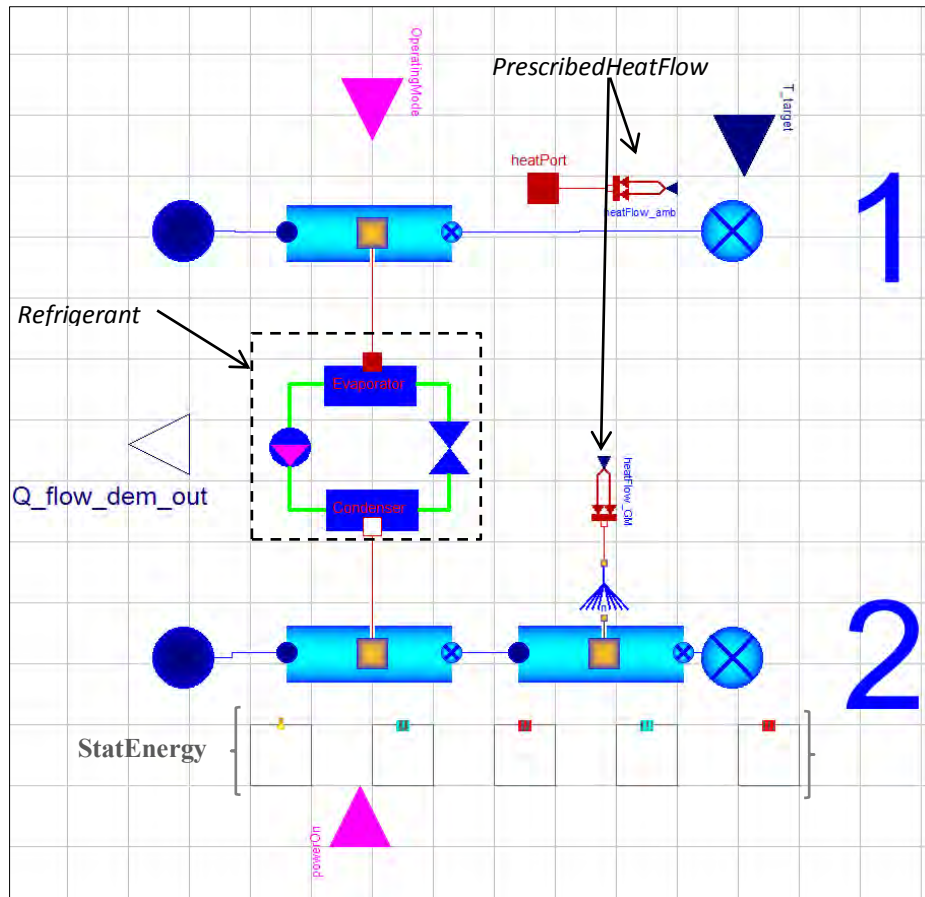


Abbildung 2.9: Modelica Struktur der gasmotorischen Wärmepumpe

➤ **Zeolith-Wärmepumpe**

Das mit Modelica erstellte Modell zur Simulation und Parameteruntersuchung der Zeolithwärmepumpe Vaillant zeOTHERM inklusive der Technologieperipherie wird im Folgenden näher beschrieben.

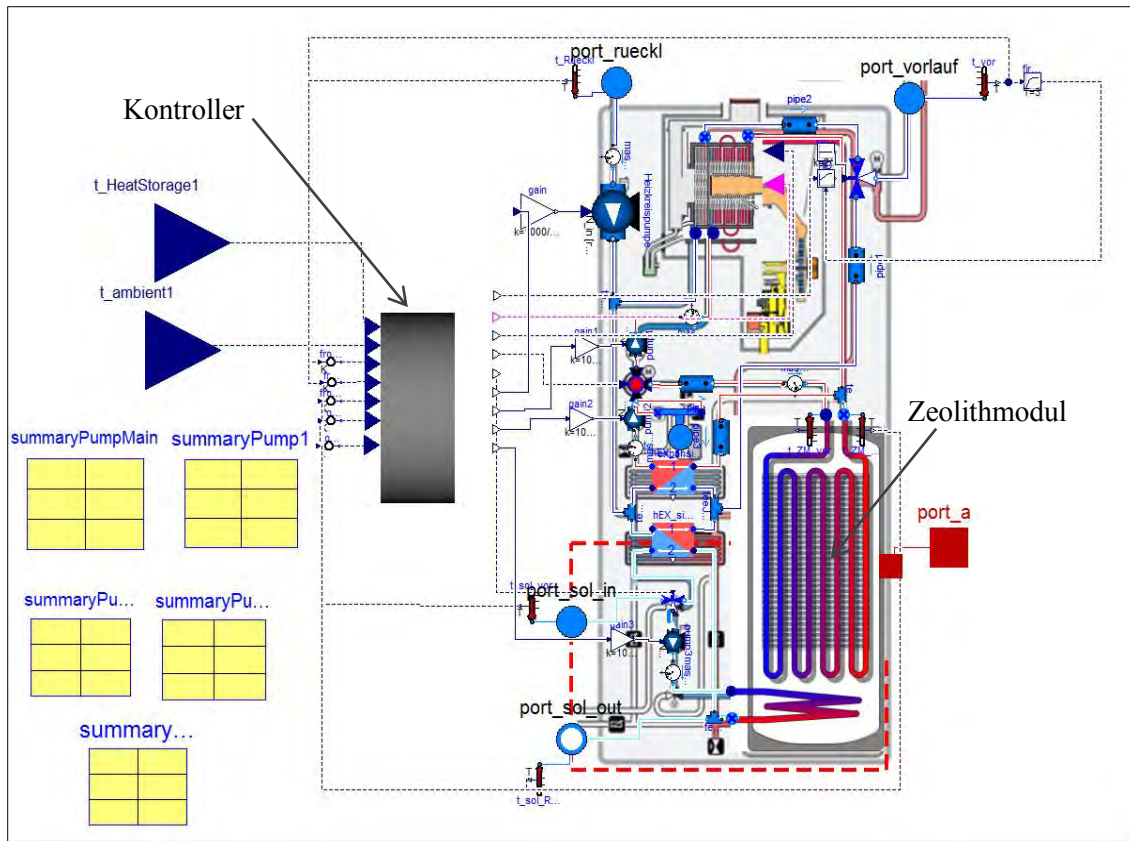


Abbildung 2.10: Hauptstruktur des Modells der ZWP

Die Hauptstruktur der ZWP ist durch Herstellerinformationen und verschiedene Daten und Kennlinien abgebildet. Mit diesem Modell wird der gesamte Wärmepumpenprozess beschrieben. Die meisten Parameter sind nach Herstellerangaben modelliert worden. Zusätzlich dazu mussten Annahmen getroffen werden, wie z. B. Gesamtgewicht der ZWP zur Berechnung der thermischen Trägheit oder Wärmeübergangskoeffizienten der ZWP-Einhausung.

Das Zeolithmodul ist wie in Abbildung 2.11 modelliert.

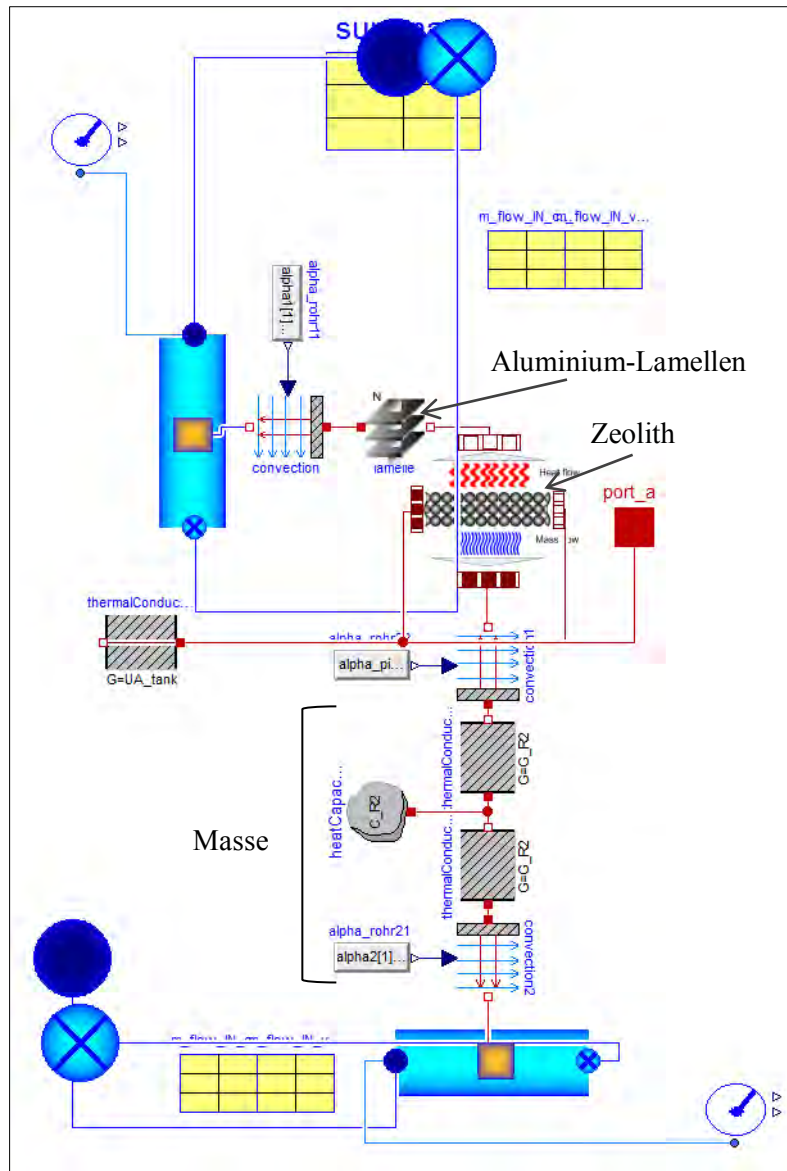


Abbildung 2.11: Modell des Zeolith Moduls

Im Zeolithmodul befindet sich eine bestimmte Menge an Zeolith, das auf Aluminium-Lamellen, deren Masse ebenfalls durch den Hersteller bekannt ist, verteilt ist, um die Wärme besser abgeben zu können. Das zusätzlich eingesetzte Medium ist Wasser, was unter bekannten Randbedingungen vorliegt. In diesem Modul finden sowohl die Desorption als auch die Adsorption statt.

Ein *Controller* steuert die gesamte ZWP. Hier wird die De- bzw. Adsorption gestartet oder beendet, z. B. laufen die Pumpen bei jedem Parameter mit einer unterschiedlichen Drehzahl, und es werden somit unterschiedliche Mengen gefördert (3).

2.4 Mikro-KWK

Der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird auf politischer Ebene eine große Bedeutung für die Wärme- und Stromversorgung beigemessen. In der Hausenergieversorgung stellen Mikro-KWK-Anlagen aufgrund ihrer Brennstoffnutzungsgrade eine hocheffiziente Alternative zu konventionellen Technologien dar. Viele der Anlagen stehen kurz vor der Markteinführung bzw. sind schon marktverfügbar wie beispielsweise der Otto-Motor oder auch einzelne Stirling-Geräte. Die Brennstoffzelle zeigt vielversprechende Ansätze in Feldtestuntersuchungen sowie im Laborbetrieb und stellt die nächste Generation von Mikro-KWK-Anlagen dar.

Beschreibung

➤ **Ottomotor**

„Der Ottomotor, als derzeit wohl bekannteste KWK-Technologie, ist in sämtlichen Leistungsgrößen erhältlich. Hier wird der Generator über eine Welle durch den Verbrennungsmotor angetrieben. Für den häuslichen Einsatz werden Anlagen mit elektrischen Leistungen von ca. 1-5,5 kW eingesetzt. KWK-Anlagen mit Ottomotor sind im großen Leistungsbereich sehr weit verbreitet und technisch ausgereift. Auch im Mikro-KWK-Bereich gibt es bereits marktverfügbare Geräte. Diese profitieren vom Erfahrungsschatz der großen Leistungsklassen und können daher auch im kleinen Leistungsbereich als Stand der Technik angesehen werden. Mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu 30 % weisen sie von den motorisch betriebenen KWK-Anlagen die höchste Effizienz bei der Stromerzeugung auf. Durch Nutzung der Abwärme werden Brennstoffnutzungsgrade von über 90 % erreicht. Ähnlich wie bei den im Automobilbereich verwendeten Ottomotoren ist eine regelmäßige Wartung (Ölwechsel etc.) notwendig. Die Emissionen bei der Verbrennungsreaktion im geschlossenen Brennraum erfordern etwas mehr Aufmerksamkeit als bei anderen Mikro-KWK-Technologien mit externer Wärmezufuhr. Schwingungen beim Betrieb des Motors können Schallemissionen zur Folge haben, welche durch konstruktive Einbauten zwar gemindert aber nicht vollständig ausgeschlossen werden können“ (4).

➤ **Stirlingmotor**

„Das Prinzip des Stirlingmotors ist bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt und damit nach der Dampfmaschine die älteste Wärmekraftmaschine. Sie wird durch eine externe Wärmequelle angetrieben. Durch ein abwechselndes Erhitzen und Abkühlen eines Arbeitsgases wird ein Arbeitskolben

angetrieben, welcher mit dem Generator verbunden ist. Neben der eigentlichen KWK-Einheit besitzen die meisten Geräte ein integriertes Brennwertzusatzheizgerät, womit hohe thermische Leistungen erreicht werden können. Mit einer guten Modulationsfähigkeit kann ein großer Lastbereich mit einem Gerät bedient werden. Die elektrische Leistung bei Mikro-KWK-Anlagen mit Stirlingprinzip reicht von ca. 0,2 bis 9 kW. Ein Großteil der kurz vor der Markteinführung stehenden Geräte weist eine elektrische Leistung von 1 kW auf. Die elektrischen Wirkungsgrade liegen im Bereich von 14 - 24 % und sind damit kleiner als die des Ottomotors. Im Gegensatz zum Ottomotor ist der Brennstoffnutzungsgrad von über 90 % höher. Auch die Schadstoffemissionen können durch gezieltes Einwirken auf die außenliegende Verbrennung gering gehalten werden. Zudem ist der Stirlingmotor leiser und wartungsärmer als der Ottomotor“ (4).

➤ **Brennstoffzellen**

„Neben den motorisch betriebenen KWK-Anlagen befindet sich derzeit mit der Brennstoffzelle eine weitere Technologie zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme in der Entwicklung. Unterschieden werden hierbei die Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Merkmal ist das eingesetzte Elektrolyt und die Betriebstemperatur. Das Funktionsprinzip ist in beiden Fällen gleich. Es werden zwei Elektroden, die Anode und die Kathode durch einen Elektrolyten voneinander getrennt. An der Anode wird zugeführter Wasserstoff in Elektronen und Protonen getrennt. Die Protonen wandern über das Elektrolyt zur Kathode, während die Elektronen über einen externen Stromkreis zur Kathode geleitet werden und dabei elektrische Arbeit verrichten. An der Kathode verbinden sich Protonen und Elektronen unter Zuführung von Sauerstoff zu Wasserdampf. Der Wasserdampf wird über einen Wärmetauscher geleitet und die Abwärme dem Heizsystem zugeführt. Brennstoffzellen zeichnen sich durch die höchsten elektrischen Wirkungsgrade der hier genannten Systeme aus. Bei der Hochtemperatur-Brennstoffzelle kann ein elektrischer Wirkungsgrad von 60 % erreicht werden. Die elektrische Leistungsfähigkeit der sich in der Entwicklung befindlichen Brennstoffzellen liegt bei 1 kW bis zu 5 kW. Thermische Leistungen können mit Hilfe von integrierten Zusatzbrennern bei über 20 kW liegen“ (4).

Modellierung

➤ Stirling-, Ottomotor und Brennstoffzellen

Im Prinzip sind die Modelle für Stirling-, Ottomotoren und Brennstoffzellen sehr ähnlich. Der größte Unterschied ist das Stirling- und Brennstoffzellen-Modell besitzen ein Extra Brennwertmodell um die Thermische Leistung, wegen der geringere thermische Leistung, zu erhöhen. Dadurch ist die Regelung bei Stirlingmotoren und bei der Brennstoffzelle anderes als bei Ottomotoren. In allen Modellen ist *Pipe_simple* Modell verwendet, in dem Medium zu- und abgeführt werden kann. Über das Modell *Wall*, Abbildung 2.12, können die wärmespeichernden Eigenschaften des Motors angepasst werden. Die Beschreibung den Konnektoren ist mit der Niedertemperatur- und Brennwertkessels identisch.

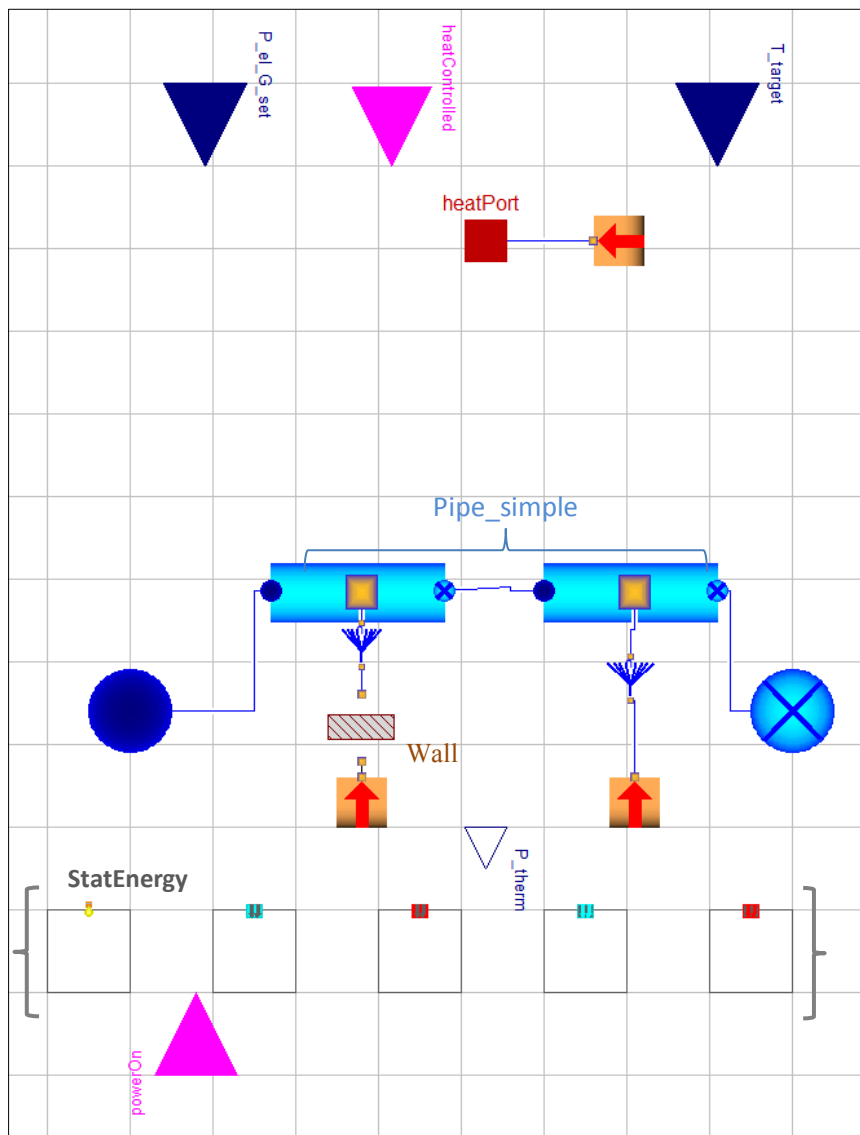


Abbildung 2.12: Modell des KWK ohne Steuerung (Stirlin, Otto und Brennstoffzelle)

2.5 Anlagentechnik mit solarer Unterstützung

Eine bewährte und weitgehend ausgereifte Methode, die zuvor beschriebene Brennwerttechnik zu verbessern, ist die zusätzliche Einbindung einer Solaranlage. In Deutschland treffen durchschnittlich im Jahr 1.000 kWh/m² Sonnenenergie auf die Erdoberfläche. Diese Strahlung kann zwar nur begrenzt genutzt werden, führt jedoch bei geschickter Einbindung zu einer Verbesserung des Heizsystems. Prinzipiell kann bei den Solaranlagen zwischen zwei Systemvarianten unterschieden werden. Entweder kann die von der Sonne kostenlos gelieferte Energie ausschließlich zur Trinkwassererwärmung genutzt werden, oder zur kombinierten Trinkwassererwärmung mit Heizungsunterstützung (4).

Beschreibung

➤ Brennwertkessel + Solarunterstützung

Die erneuerbare Energie soll vorrangig zur Deckung des Wärmebedarfes genutzt werden, solange keine hygienischen oder Komforteinbußen zu erwarten sind. Der Solarspeicher ist das zentrale Anlagenbauteil, sämtliche Wärmelieferanten und Wärmenutzer sind daran angeschlossen. Das Kollektorfeld wandelt die solare Strahlung in Wärme um und gibt diese an das zirkulierende Wärmeträgermedium ab.

Bei der Planung eines solchen Systems gibt es einige zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen, die bei einem konventionellen System nicht erforderlich sind, z. B. der Speicher: Dieser sorgt für den Ausgleich der zeitlich versetzten Wärmebedarfe und Wärmelieferung und trägt somit einen großen Anteil zur Effizienz des Systems bei. Je nach System und Auslegung werden Warmwasserspeicher mit 300 l bis über 1.000 l notwendig.

Das Kollektorfeld und die damit erzielbare Leistung sind abhängig von dem Aufstellort, der Dachneigung, der Ausrichtung und zusätzlich von der Verschattung durch Bäume oder andere schattenbildende Gegenstände. Daher wird eine genaue Begutachtung des Aufstellortes dringend empfohlen.

Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei diesem System um eine Verbesserung des Brennwertgerätes. Wirk- und Nutzungsgrade werden ebenfalls auf den Heizwert des Brennstoffes bezogen und liegen bei einwandfreiem Einbau und einer gut durchdachten Regelstrategie über denen des reinen Brennwertgerätes. Bei gut gedämmten Gebäuden können die Deckungsanteile der Solaranlage 35 % des gesamten Wärmebedarfes betragen, dies verdeutlicht das Potential solcher Anlagen. Die gängige

Praxis zeigt jedoch, dass die Wärmebedarfe von Gebäuden höher sind und die Deckungsanteile entsprechend geringer.

Die Wirkungsgrade der Kollektoren geben zwar Aufschluss über die nutzbare solare Strahlung, jedoch lässt sich einzig darüber kein Rückschluss auf die erzielbaren Einsparungen treffen (4).

Modellierung

Der Aufbau des Gesamtsystems in der Entwicklungsumgebung Dymola / Modelica ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Sie zeigt den Verlauf des geschlossenen Heizkreises mit den Komponenten Brennwertkessel, Gebäude, Wärmespeicher, Solarkollektor und Regler. Hier wird eine komplette Darstellung des Systems Brennwert und Solar mit GWI-Demonstrationshaus modelliert. Das Modell hat der gleiche Aufbau wie in Versuchshaus verbaut wurde. und Abbildung 2.14 zeigt die Struktur von dem gesamte System in Versuchshaus.

Neben dem Brennwertkessel und die Gebäude sind ein Wärmespeicher und ein Solarkollektor zusätzlich modelliert.

Um dauerhaft hohe Wirkungsgrade durch möglichst lange Laufzeiten, niedrige Taktraten und damit eine optimierte Effizienz zu erzielen, ist der Einsatz eines Pufferspeichers wichtig.

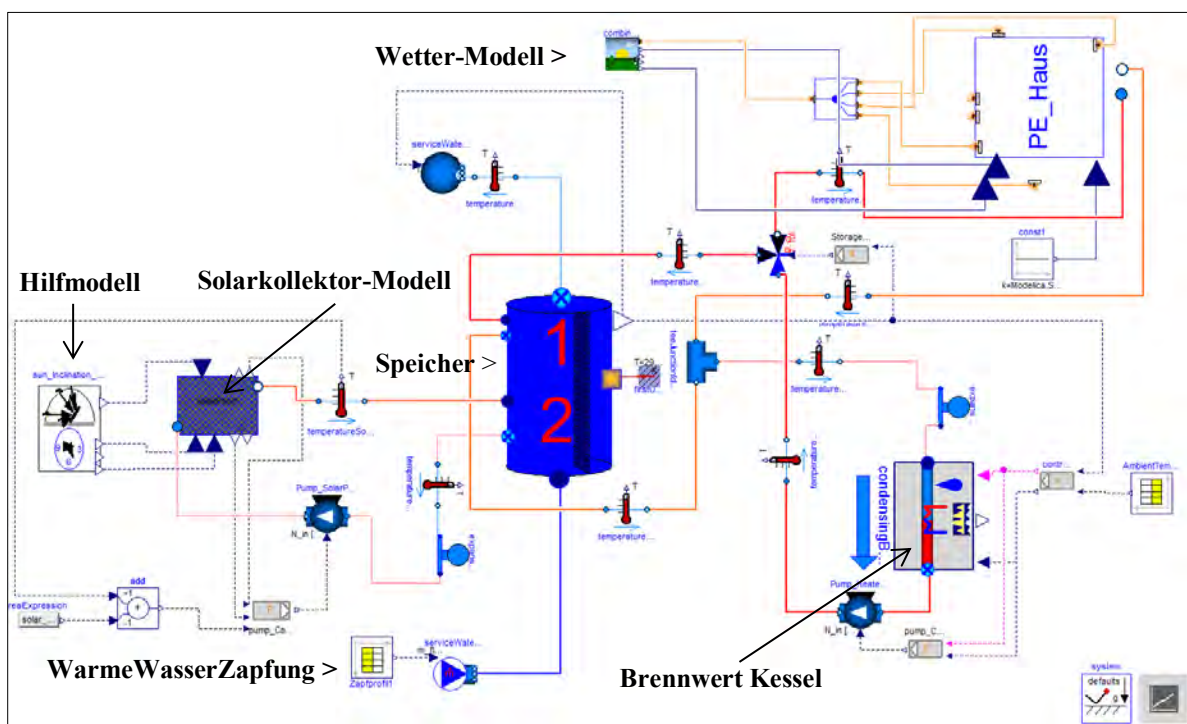


Abbildung 2.13: Modelica Struktur der Brennwert und Solar

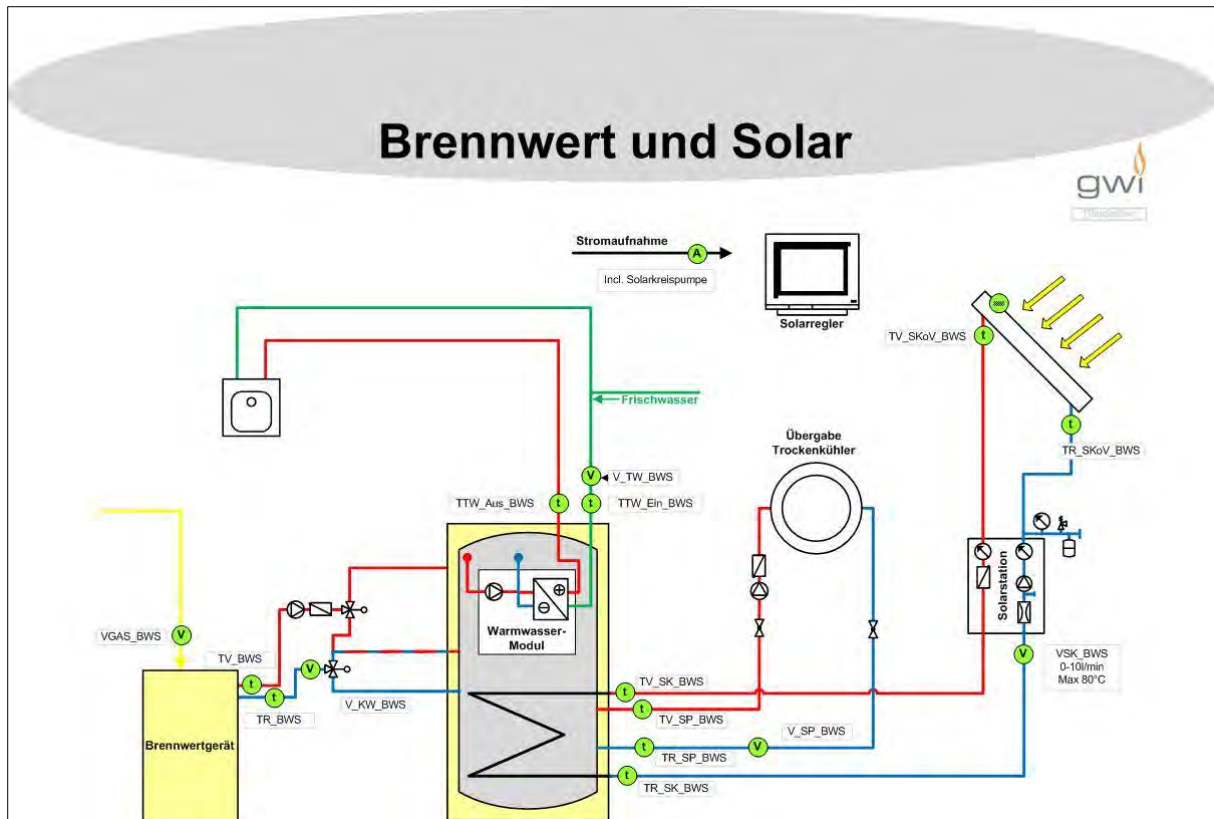


Abbildung 2.14: Schema vom Brennwert und Solar Anlage mit den Messstellen im GWI-Demonstrationshaus
 Die realen Vorgänge in einem Wärmespeicher sind weitaus komplexer als hier dargestellt. Eine exakte Beschreibung des Temperaturverlaufes und der Strömungsverhältnisse wäre nur durch ein aufwändig abgestimmtes dreidimensionales, fluidmechanisches Finite-Elemente-Modell möglich. Da die expliziten strömungsmechanischen Eigenschaften des Speichers jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen sind, sondern in erster Linie die globalen thermische Einflüsse auf das gesamte Anlage, ist die Modellierung ausreichend.

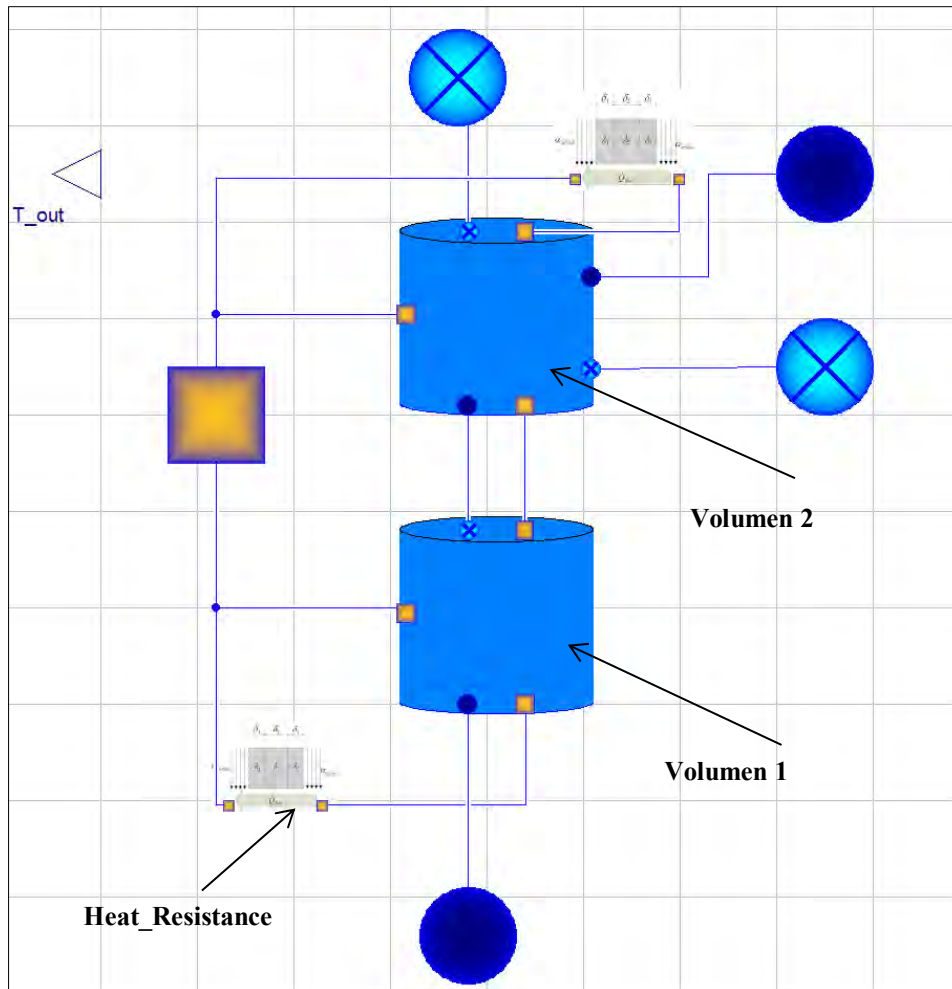


Abbildung 2.15: Modelica Struktur des Wärmespeicher

Die Modelle *Volumen 1* und *Volumen 2* bedienen sich als Wärmetauscher mit unterschiedlichen Eingangsdaten. Geometrie und Wärmeübertragungskoeffizient sind als Parameter einstellbar. Die Wärmeverluste, *Heat_Resistance*, Berechnungen sind in diesem Modell auch integriert.

In der **Abbildung 2.16** ist das Parameterfenster des Speichers dargestellt. In der **Tabelle 2.1** werden diese Parameter erläutert.

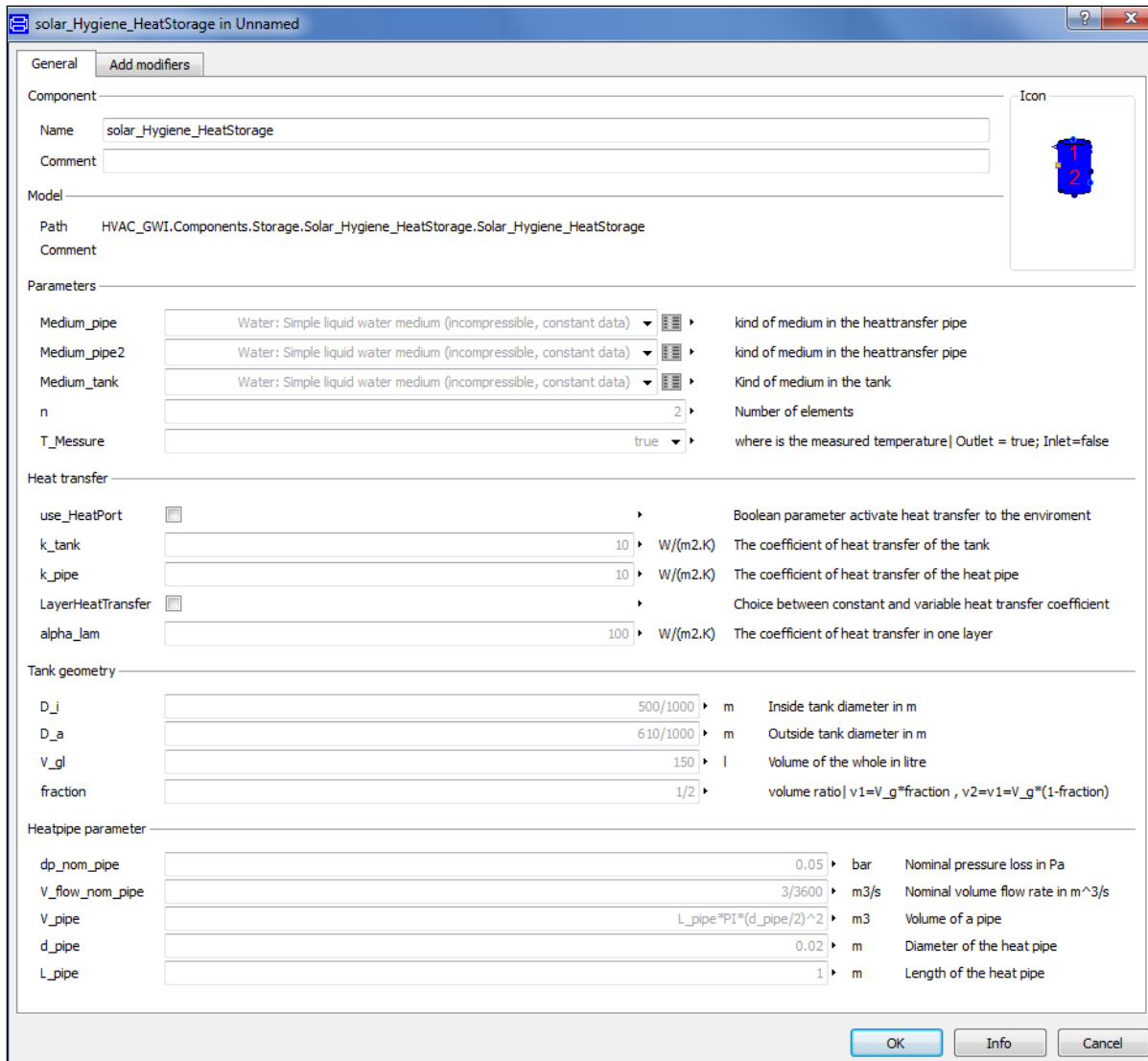


Abbildung 2.16: Parameterfenster des Wärmespeichers

Tabelle 2.1: Beschreibung der Parameter für den Wärmespeicher				
Gruppe	Parameter	Einheit	Standardwerte	Beschreibung
Parameters	Medium_pipe		Constant-Property-LiquidWater	bietet die Auswahl an Mediummodellen für das Medium, welches durch die Rohre strömt
	Medium_tank		Constant-Property-LiquidWater	bietet die Auswahl an Mediummodellen für das Medium, welches durch den Speicher strömt
	T_Messure		true	Dieser Parameter ist „wahr“, wenn die Warmwassertempe-

				ratur am Austritt des Speichers gemessen werden sollte. Andernfalls wird es am Eintritt abgegriffen
Heat transfer	use_HeatPort		false	bietet die Auswahl für den Wärmeübergang an die Umgebung
	k_tank		10	Wärmeübergangskoeffizient für den Speicher
	k_pipe		10	Wärmeübergangskoeffizient für das Rohr
	LayerHeat-Transfer		false	bietet die Auswahl zwischen dem einem konstanten und einen berechnetem Wärmeübergangskoeffizienten für die Speicherschichten.
Tank geometry	D_i	m	500/1000	Speicherinnendurchmesser
	D_a	m	610/1000	Speicheraußendurchmesser
	V_gl	L	150	gesamtes Tankvolumen
	fraction	-	½	Volumenverhältnis

Hier wurde im Rahmen des Projekts ein flacher Solarkollektor modelliert. Im Modell sind die Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung berechnet. Wärmeverluste, thermische und nicht thermische (z. B. optische) Verluste sind im Modell integriert.

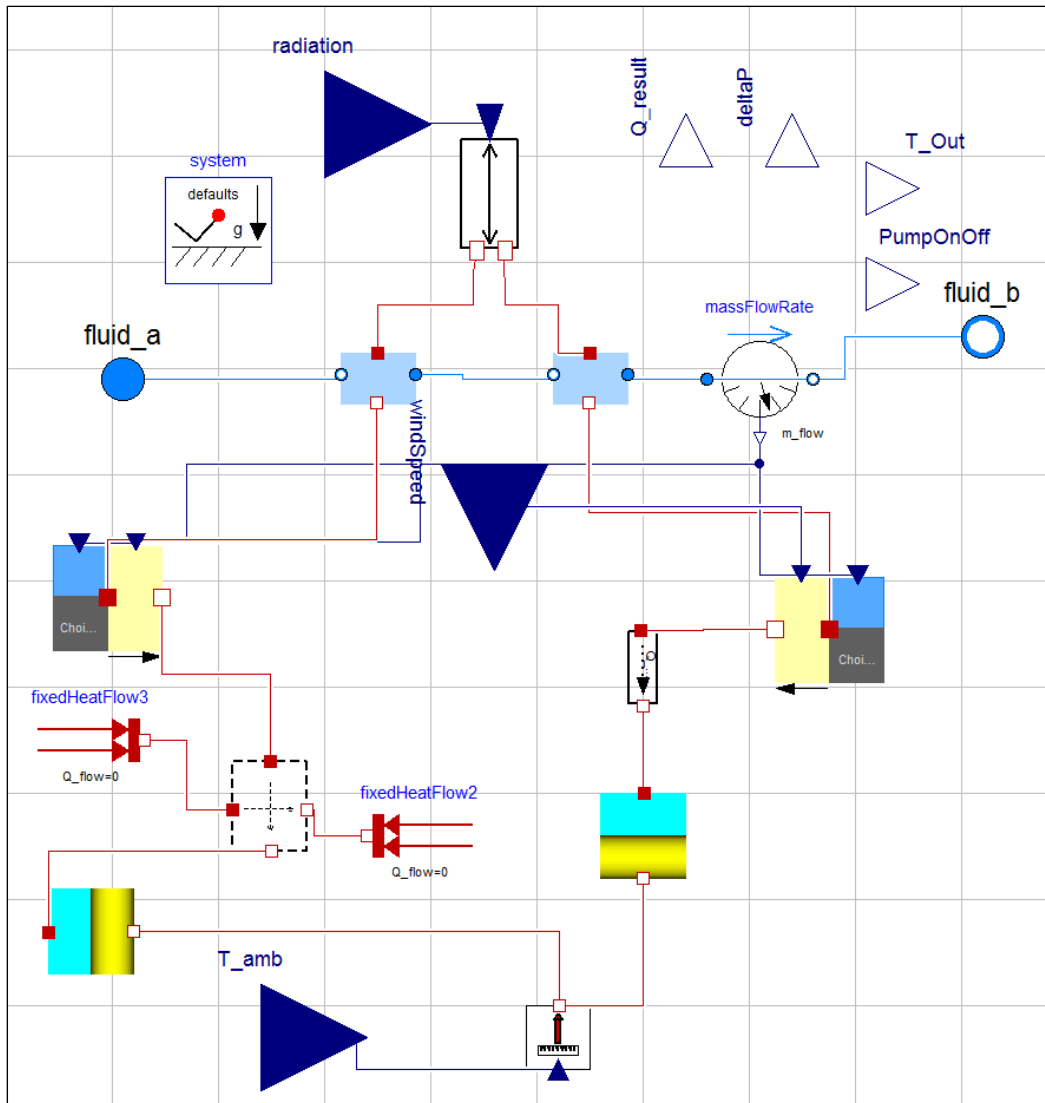


Abbildung 2.17: Modelica Struktur des Solarkollektor

Die Beschreibung der Konnektoren für das Solarkollektor-Modell ist wie folgt:

T_amb: Durch diesen Connector wird die Umgebungstemperatur in K vorgegeben.

radiation: Dieser Connector gibt die Strahlungsintensität vor.

windSpeed: Dieser Connector gibt die Windgeschwindigkeit vor.

Q_result: Gibt die über den Simulierten Zeitraum aufgenommene Wärme zurück.

T_out: Rückgabe der Temperatur des Solarpanels.

PumpOnOFF: gibt den Schaltvorgang für die Solarpanelpumpe aus.

delta_P: Dieser Connector dient als Rückgabe des Druckverlustes

In der **Abbildung 2.16** ist das Parameterfenster des Solarkollektors dargestellt.

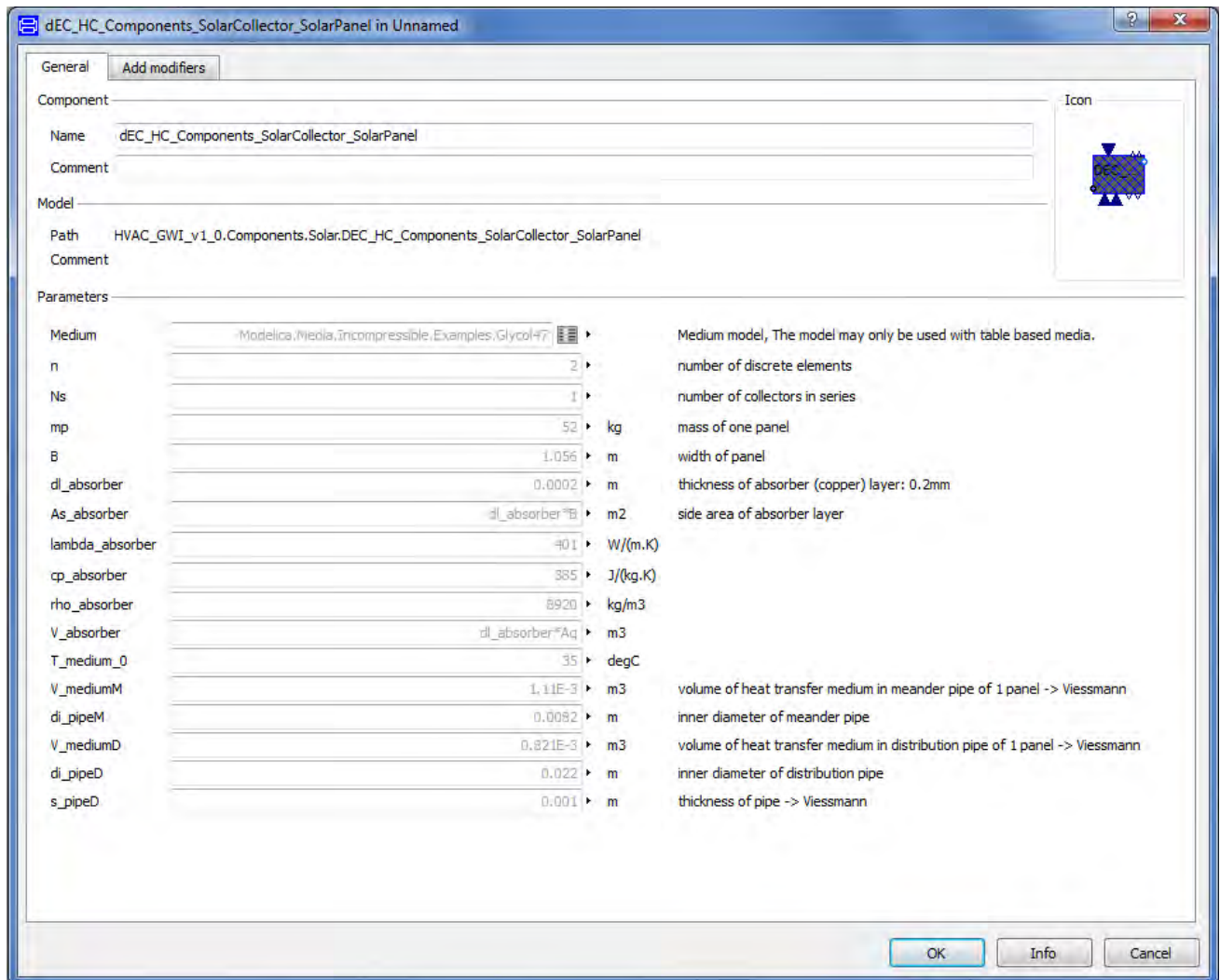


Abbildung 2.18: Parameterfenster des Solarkollektors

3 Validierung und Ergebnisse

3.1 Validierung

Zur Überprüfung, ob die gewählten Modelle im dynamischen Verhalten die Eigenschaften aufweisen, die auch in realen Anlagen zu beobachten sind, werden die Modelle mit Messdaten validiert. Dies geschieht durch die Aufprägung ausgewählter Messdaten (Zulaufmassenstrom, Eintrittstemperatur)³. Im Anschluss werden die berechneten Größen (z. B. Austrittstemperatur, Gas-Leistung) mit den gemessenen verglichen. Die Ergebnisse dieser Validierung werden im Folgenden kurz dargestellt.

Für die Bereitstellung der gebäude- und anlagentechnischen Daten war das GWI zuständig. Die technischen Daten des Demonstrationshauses wurden dem Projektpartner zu Verfügung gestellt. Dies sind Grundrisse, Flächen und Materialien der Innen- sowie Außenwände, Fenster und Türen. Zur Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen vor Ort ist eine Wetterstation am Demonstrationshaus installiert worden. Die aufgenommenen Wetterdaten wurden ausgewertet und den Partnern zur Verfügung gestellt. Die Wetterdaten beinhalten die Außentemperaturen an allen vier Seiten des Hauses, den Feuchtigkeitsgehalt, die Windgeschwindigkeiten sowie diffuse- und direkte Sonnenstrahlung. Die Wärmequellen, die durch Nutzer, Elektrogeräte usw. dargestellt werden, sind mittels leistungsäquivalenter Leuchtmittel simuliert worden und mit den vorgegebenen Daten aus der DIN-Norm 1946 Teil 2 (5) abgeglichen. Die Installationen von Brennwertgerät, KWK-Anlagen (Otto, Stirling und Dampf) und WP-Anlagen (ZWP) sind ebenfalls im Demonstrationszentrum erfolgt. Die Erfassung der Messdaten erfolgt kontinuierlich. Die Daten sind zur Validierung der Modelle aufbereitet worden. Abbildung 3.1 zeigt die Messdatenstellen, wie sie im Demonstrationshaus vorhanden sind. In diesem Schema sind beispielweise die Gas- und Wasser Volumenströme, Vor- und Rücklauftemperaturen usw. berücksichtigt. Die Messdaten sind auch in Tabelle 3.1 aufgelistet. Sie sind so erzeugt, um die Validierung des Modelles zu ermöglichen. In diesem Beispiel wird die Validierung des Stirling-Modelles berücksichtigt. Die Vorlauftemperaturen des Stirling-Gerätes „T_VL_Gerät“ und die Volumenströme „V_Gerät“ sind als Eingangsdaten für das Modell implementiert. Um die Simulationsergebnisse realitätsnah zu halten, sollten die Werte den Rücklauftemperaturen und der Verlauf mit den gemessenen Daten übereinstimmen. Bei möglichen Abweichungen der Simulationsergebnisse von den Messdaten müssen jedoch auch die Messdaten hinterfragt werden, da jede Messung mit Messungenauigkeiten behaftet ist. Verschiedene Messverfahren erlauben unterschiedlich hohe Genauigkei-

³ Alle Messdaten sind im Demonstrationshaus erfasst worden. Massen- oder Volumenströme, Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sind an der Heizungsanlage des Hauses gemessen.

ten. Dieser Zusammenhang sollte bei den im Folgenden vorgestellten Validierungen in die Bewertung der Güte der Ergebnisse einbezogen werden. Die Messdaten liegen für die unterschiedlichen Systeme (Demonstrationshaus, Anlagentechnik) für verschiedene Zeiträume vor. Daher sind die betrachteten Zeiträume für die Validierung nicht immer identisch. Teilweise sind die gemessenen Datensätze auch nicht vollständig verwendbar. In diesen Fällen wurden Ausschnitte ausgewählt, die repräsentativ sind.

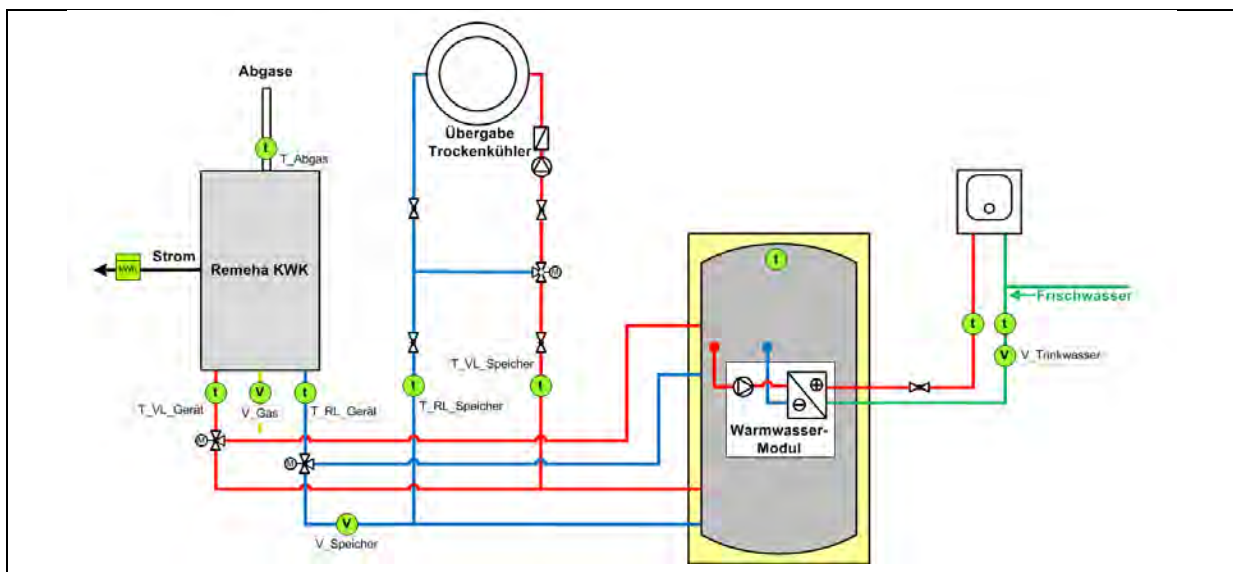


Abbildung 3.1: Schema vom Stirling-Gerät mit den Messstellen im GWI-Demonstrationshaus

Tabelle 3.1: Schnitt von den vorbereiteten Messdaten für die Modelica-Validierung

Zeit	V Gas [m ³ /h]	T Abgas [°C]	T Vorlauf Gerät [°C]	T Rücklauf Gerät [°C]	T Vorlauf Speicher [°C]	T Rücklauf Speicher [°C]	V Kühlwasser Gerät [l/min]	Q therm KWK [kW]	P el [kW]
00:00:12	0.43	61.6	63.4	68.5	61.0	39.9	12.17	-4.24	0.00
00:00:27	0.43	62.5	67.8	67.4	57.4	35.3	12.23	0.36	0.00
00:00:41	0.43	63.2	69.5	67.2	56.7	36.0	12.28	1.94	0.00
00:00:55	0.73	64.2	70.0	66.5	61.3	37.1	12.31	2.96	0.00
00:01:10	0.72	64.6	70.2	64.8	62.7	35.3	12.24	4.54	0.00
00:01:24	0.72	65.0	70.5	65.9	63.0	32.6	12.19	3.85	0.08
00:01:39	0.72	64.5	70.5	67.1	62.4	31.1	12.33	2.93	0.15
00:01:53	0.72	64.8	70.4	63.1	62.9	31.9	12.22	6.19	0.22
00:02:07	0.72	64.7	70.2	62.6	63.1	33.3	12.12	6.37	0.27
00:02:22	0.72	64.9	69.6	66.7	62.6	34.6	12.32	2.50	0.33
00:02:36	0.72	65.2	70.0	66.3	62.6	34.8	12.36	3.23	0.39
00:02:50	0.71	65.5	70.2	63.7	62.8	34.1	10.96	4.98	0.42
00:03:05	0.71	58.8	71.0	66.2	63.0	33.2	10.68	3.52	0.47
00:03:19	0.71	59.0	71.5	64.0	62.6	32.9	10.77	5.61	0.50
00:03:34	0.67	60.4	71.2	62.8	62.9	33.8	10.68	6.19	0.53
00:03:48	0.62	60.5	70.8	65.4	63.2	34.7	8.85	3.33	0.56
00:04:02	0.62	60.7	70.3	63.8	63.1	35.0	8.24	3.70	0.57
00:04:17	0.60	60.7	71.6	61.7	62.9	34.3	8.24	5.67	0.58
00:04:31	0.60	60.8	71.7	61.2	62.7	33.1	8.08	5.89	0.59

3.1.1 GWI-Demonstrationshaus

Neben den Anlagen soll auch das thermische Verhalten des Gebäudemodells auf plausible Ergebnisse hin überprüft werden. Dies soll beispielhaft am Modell des Demonstrationshauses des GWI gezeigt werden. Für den Messzeitraum 01.01.2013 - 07.01.2013 wurden daher Messdaten aus dem Gebäude bereitgestellt. Die Daten enthalten den Heizwassermassenstrom, der durch das komplette Gebäude geflossen ist, die zugehörige Vorlauf- sowie die Rücklauftemperatur. Hieraus lässt sich eine gemessene Leistung ermitteln. Die Vorlauftemperatur sowie der Massenstrom wurden auf das Gebäude aufgebracht und die Reaktion in Form der Rücklauftemperatur beobachtet. Für die internen Lasten wurden für die Kellerräume 2 und 3 jeweils eine interne Last von 400 W und für Kellerraum 1 und den Heizraum eine interne Last von jeweils 100 W eingesetzt. Auf Grund der Undichtigkeit des Gebäudes wurde in jedem Raum ein konstanter Luftwechsel über die komplette Zeit angenommen. Dieser liegt bei 0.3 1/h.

Die resultierenden Rücklauftemperaturen im Vergleich zu den gemessenen Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 3.2 zu sehen. Hier zeigt sich, dass die simulierte Temperatur ab dem 04.01. leicht oberhalb der gemessenen Temperatur liegt. Dies bedeutet, dass die Auskühlung des Wassers nicht in dem Maße beobachtet werden kann, wie dies in der Messung der Fall war. Die äquivalente Aussage kann mit Abbildung 3.3 getätigt werden, in der zu sehen ist, dass im zweiten Teil der Woche die simulierte Leistung leicht unterhalb der gemessenen Leistung liegt. Wenn die in der gesamten Woche übertragenen Energiemengen verglichen werden, ist hier ein thermischer Energieverbrauch von 354,2 kWh für die Messung zu verbuchen und ein thermischer Energiebedarf von 326,3 kWh für die Simulation. Das bedeutet, dass es in der Gesamtbetrachtung eine Abweichung von 7,9 % zwischen Messung und Simulation vorliegt. Dieses Ergebnis kann im Rahmen eines Plausibilitätstests als gut bewertet werden. Das Modell ist so aufbereitet, dass jederzeit weitere Tests für andere Zeiträume durchgeführt werden können.

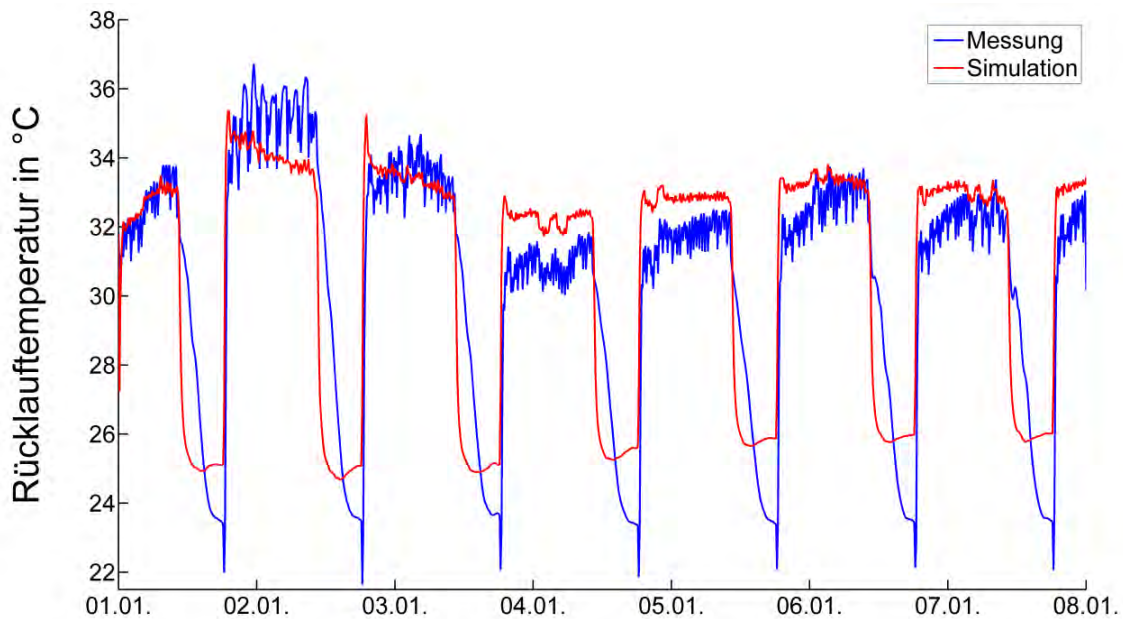


Abbildung 3.2: Vergleich von gemessener mit simulierter Rücklauf Temperatur im Demonstrationshaus

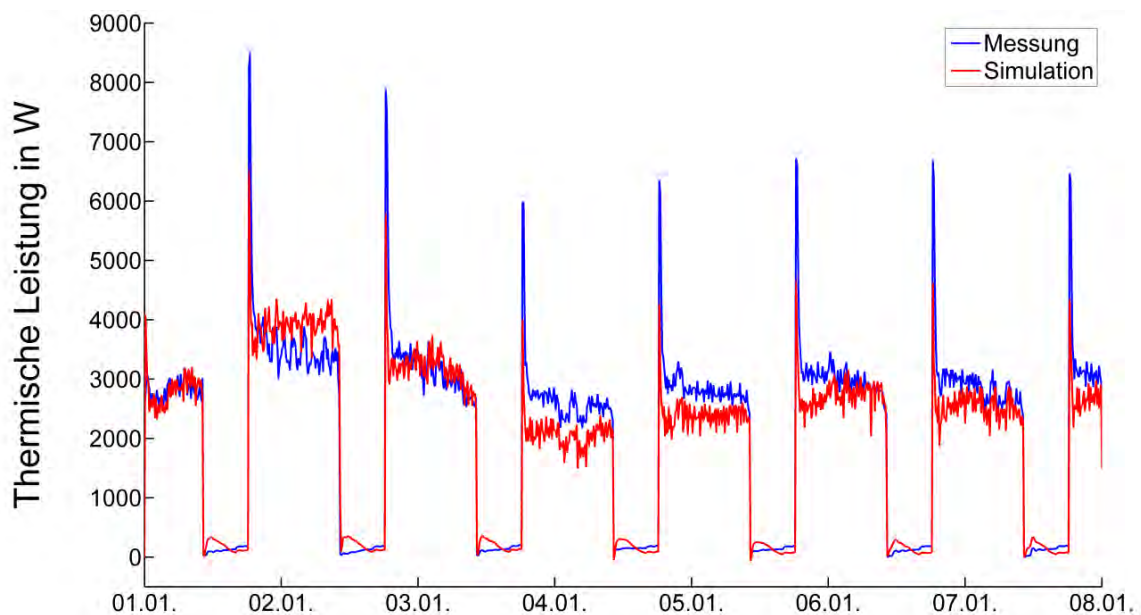


Abbildung 3.3: Vergleich von gemessener mit simulierter thermischer Leistung im Demonstrationshaus

Neben der energetischen Betrachtung muss auch berücksichtigt werden, inwiefern die Innenraumtemperaturen den gemessenen Temperaturen entsprechen. Für die Temperaturen in den Räumen liegen Mittelwerte vor, so dass aus den einzelnen simulierten Temperaturverläufen auch Mittelwerte

gebildet wurden, die dann mit den angegebenen gemessenen Mittelwerten verglichen werden. Hier soll dies exemplarisch am Beispiel des Wohnzimmers des Demonstrationshauses gezeigt werden. In Abbildung 3.4 ist der Verlauf der simulierten Temperatur im Wohnzimmer und die aus diesem Verlauf ermittelte Durchschnittstemperatur zu sehen.

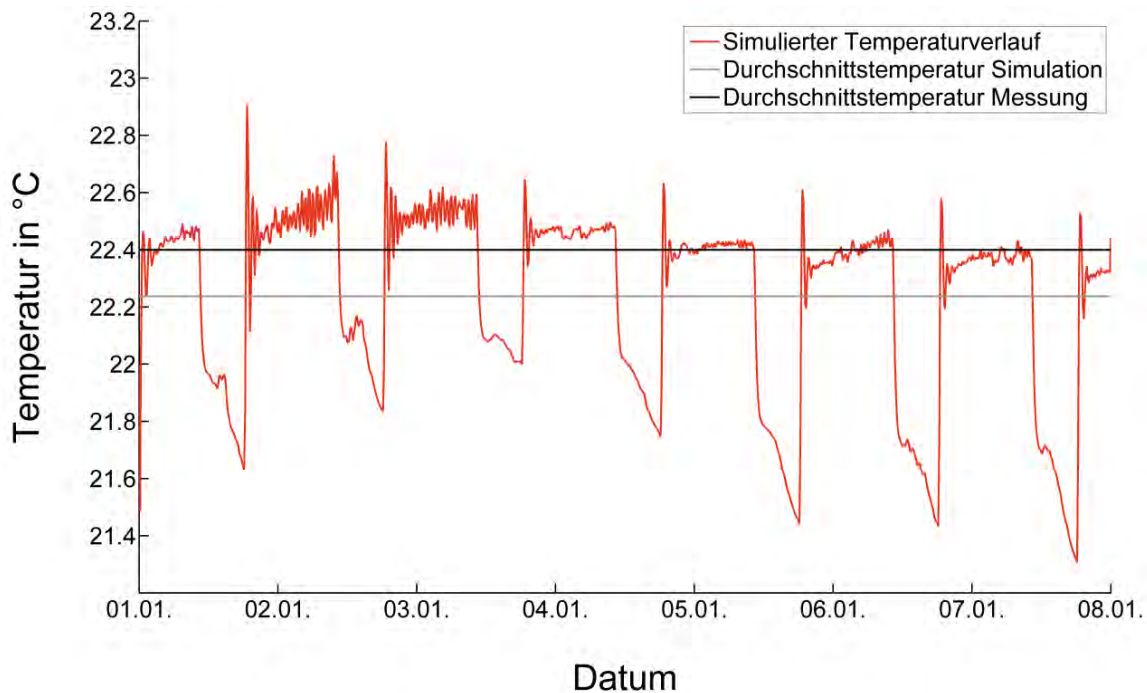


Abbildung 3.4: Verlauf der simulierten Temperatur im Wohnzimmer sowie die berechnete Durchschnittstemperatur

Da aus den Messungen auch nur eine Durchschnittstemperatur bekannt ist, können diese beiden Größen miteinander verglichen werden. Die gemessene Durchschnittstemperatur für das Wohnzimmer liegt bei 22,4 °C und damit nur geringfügig über der Durchschnittstemperatur in der Simulation. Generell liegen die simulierten Durchschnittstemperaturen in den Räumen leicht unter den gemessenen Durchschnittstemperaturen. Dies passt auch zu den in den Leistungsdiagrammen beobachteten leicht geringeren Leistungen bei der Wärmeabgabe. Hier könnte durch die detaillierte Untersuchung einzelner Heizkörper oder der Bilanz um einzelne Räume ein weiterer Abgleich stattfinden, indem weitere Messdaten ausgewertet werden.

3.1.2 Konventionelle Wärmebereitstellungssysteme

Da in allen Varianten ein Kessel eingesetzt wird und die Berechnung der Komponente entscheidend für die Ermittlung des Gasbedarfs im System ist, wird die Validierung dieser Komponente voran gestellt.

Für den Kessel liegen lediglich bei der Variante „Brennwert + Solar“ isolierte Messwerte vor. Daher werden diese Daten herangezogen, um das Verhalten des Kessels zu analysieren. Für den Kessel werden der Wassermassenstrom und die Kessel-Eintrittstemperatur als Eingangsgrößen gewählt. Anschließend soll verglichen werden, in welchem Maß die simulierte Austrittstemperatur und der Gasbedarf mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

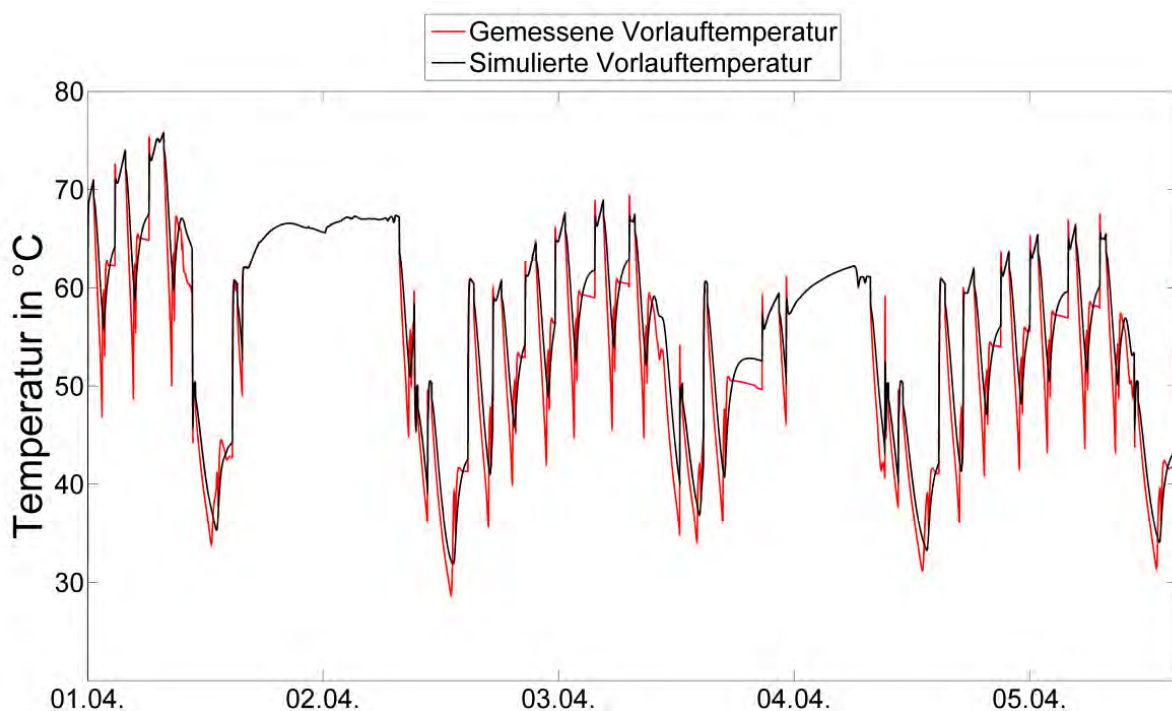


Abbildung 3.5: Vergleich zwischen simulierter und gemessener Vorlauftemperatur

Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, sind die Verläufe von simulierter und gemessener Temperatur sehr ähnlich. Vor allem in Perioden, in denen der Kessel für längere Zeit läuft (z.B. am Abend des 01. April sowie am Morgen des 02. April), verlaufen die Kurven nahezu identisch. Wenn der Kessel ausgeschaltet ist, weichen die Temperaturen etwas voneinander ab. Allerdings ist in diesem Fall der Wassermassenstrom nahe Null, wodurch der Fehler in der Energiebilanzierung vernachlässigbar ist.

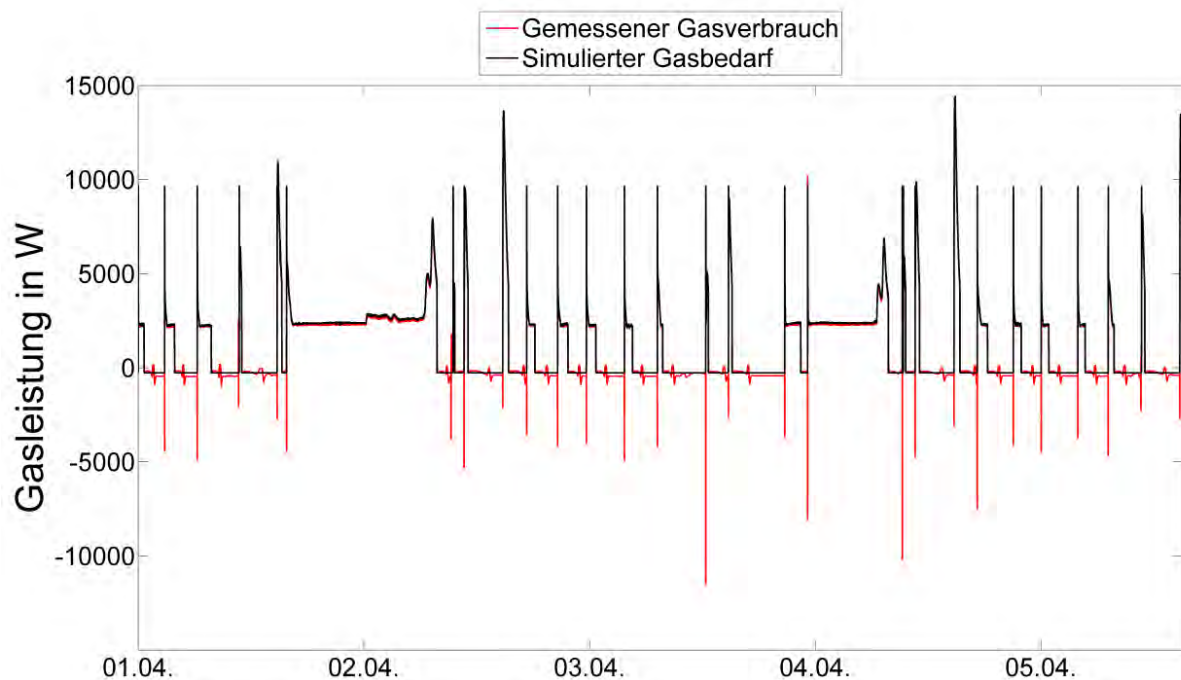


Abbildung 3.6: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Gasbedarf

Abbildung 3.6 zeigt sowohl den simulierten Gasbedarf als auch den gemessenen Gasverbrauch des Kessels. Es wird ein thermischer Kesselwirkungsgrad von 99 % angenommen. Auch hier stimmen Simulation und Messung über weite Teile sehr gut überein. Damit dies erreicht wird, wird zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Modell das Anfahrverhalten der Anlage modelliert. Hierdurch ergibt sich die Spitze in der berechneten Gasleistung, die teilweise auch in den Messdaten zu finden ist. Da dieses Verhalten nicht regelmäßig auftritt, können hier mit einem einfachen Modell sehr gute Ergebnisse erreicht werden.

Der in dieser Abbildung erkennbare negativ gemessene Gasverbrauch, der während der Stand-By-Phasen auftritt, ist nicht in die Optimierung des Modells eingeflossen, da er aus Messungenauigkeiten oder Messstörungen resultieren muss. Ein Gasmassenstrom, der aus dem Kessel herausströmt, kann nicht als realistisch angesehen werden. Aufgrund der vorangegangenen Analysen kann bestätigt werden, dass das modifizierte Kesselmodell im dynamischen Verhalten sinnvolle Ergebnisse liefert und somit für die Gesamtsystembetrachtungen verwendet werden kann.

3.1.3 Wärmepumpe

Die Modelica-Simulation wurde mit Hilfe der Messdaten am Versuchsstand validiert. Eine Validierung durch Messdaten, die während des Betriebs im Versuchshaus aufgenommen wurden, war auf Grund der Komplexität und der zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch unfertigen Abbildung der Gebäudestrukturen in Modelica nicht zielführend. Da die Wärmepumpe mit 4 festen Parametern arbeitet, wurde die Validierung für die einzelnen Parameter durchgeführt. Parameter IV stellt den reinen Brennwertbetrieb ohne Wärmepumpenbeitrag dar. Hier wurde auf ein existierendes Brennwertmodul zurückgegriffen, so dass auf eine Validierung verzichtet werden konnte. Da das Hauptziel in der Validierung des Wärmepumpenbetriebs bestand, werden im Folgenden nur die Parameter I und II betrachtet, da Parameter III bereits eine Kombination aus Wärmepumpenbetrieb und Brennwertbetrieb darstellt.

Parameter I:

Beim Wärmepumpenbetrieb mit einer Fahrweise gemäß Parameter I wurden folgende Werte am Versuchsstand gemessen:

Messwerte Versuchsstand:

- Vorlauftemperatur, *TVorlauf* Mittelwert = 22,5°C
- Rücklauftemperatur, *TRücklauf* Mittelwert = 21,34°C
- Zugeführte Leistung (Brenngas), *PGas* Summe = 1,78 KW

Die Simulation liefert folgende Daten:

- Vorlauftemperatur, *TVorlauf* Mittelwert = 22,3°C (Abweichung < 1 %)
- Rücklauftemperatur, *TRücklauf* Mittelwert = 20,75°C (Abweichung ~ 3 %)
- Zugeführte Leistung (Brenngas), *PGas* Summe = 2,2 KW (Abweichung ~ 20 %)

Parameter II

Bei Parameter II ergaben sich folgende Werte

Messwerte Versuchsstand:

- Vorlauftemperatur, *TVorlauf* Mittelwert = 23,5°C
- Rücklauftemperatur, *TRücklauf* Mittelwert = 22,8°C
- Zugeführte Leistung (Brenngas), *PGas* Summe = 3,05 KW

Die Simulation liefert folgende Daten:

- Vorlauftemperatur, *TVorlauf* Mittelwert = 22,3°C (Abweichung ~ 5 %)
- Rücklauftemperatur, *TRücklauf* Mittelwert = 20,75°C (Abweichung ~ 10 %)

- Zuführte Leistung (Brenngas), *P*Gas Summe = 3,46 KW (Abweichung ~ 12 %)

Die Simulationsgenauigkeit ist zufriedenstellend, nur bei dem Gaseinsatz in den Parametern I und II gibt es größere Abweichungen. So ist keine exakte Abbildung der Ad- bzw. Desorptionsprozesse möglich, allerdings ist die richtige Funktionsweise sichergestellt und durch Vergleiche einzelner Simulationen untereinander kann der Einfluss einzelner Parameter ermittelt werden.

3.1.4 Validierung der KWK-Modelle

➤ Stirlingmotor

Eine weitere Komponente, die in den Gesamtsystemsimulationen untersucht werden soll, ist der Stirling-Motor. Das bereitgestellte Modell wird zunächst modifiziert, um auch die An- und Abfahrvorgänge beschreiben zu können. Hierzu werden der elektrische Leistungsverlauf und der Verlauf des Gasbedarfs, vor allem bei Anfahrvorgängen, modifiziert. Der betrachtete Stirling-Motor wurde von der Firma Remeha hergestellt. Im Simulationsmodell werden ein Brennstoffausnutzungsgrad von 103 % und ein elektrischer Wirkungsgrad von 11,5 % zu Grunde gelegt. Zur Validierung werden dem Modell die Rücklauftemperatur und der Wassermassenstrom aufgeprägt. Das Einschaltsignal wird von außen gesetzt und leitet sich aus dem gemessenen Gas-Volumenstrom ab. Da keine Daten zur eingestellten Solltemperatur vorhanden sind, wird hier einheitlich von einer Solltemperatur von ca. 71 °C ausgegangen. Mit dieser Annahme können die in Abbildung 3.7 dargestellten Temperaturen ermittelt werden, die den Zeitraum vom 21. bis 22. Januar 2012 abdecken.

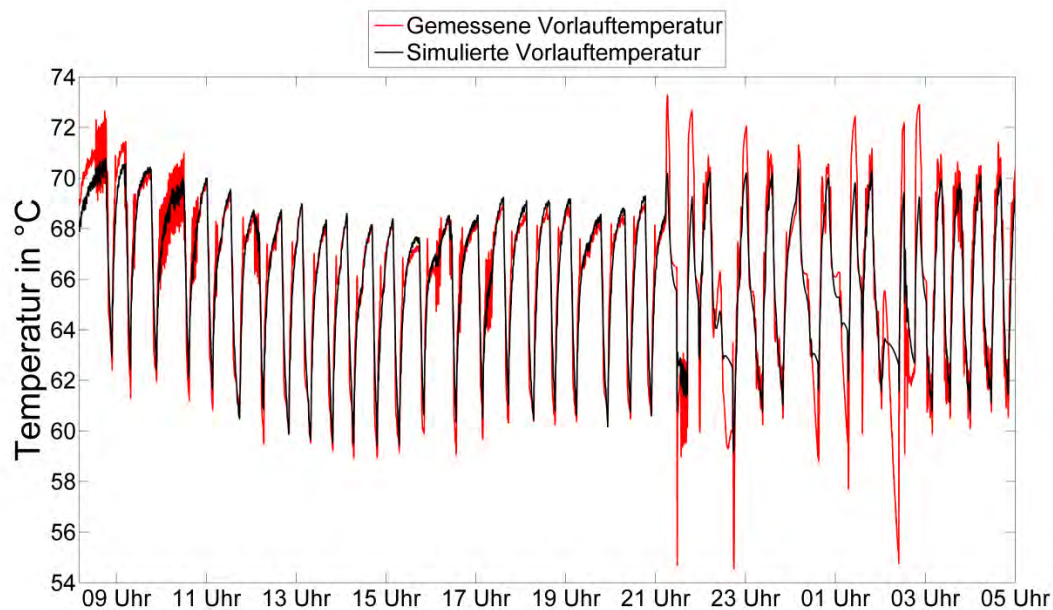


Abbildung 3.7: Vergleich von gemessener und simulierter Vorlauftemperatur für einen Zeitraum von ca. 20 Stunden

Der in der Messung ermittelte Temperaturverlauf wird durch die Simulation sehr gut wiedergegeben. Bei geringeren Temperaturen gibt es leichte Abweichungen. Diese treten jedoch in Zeiten auf, in denen die Anlage nicht in Betrieb ist. Somit sind hier die Abweichungen in der Leistung vernachlässigbar. Lediglich zwischen 21 Uhr und 3 Uhr morgens werden im Betrieb der Anlage die Peaks nicht exakt getroffen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass hier eventuell eine andere Soll-Temperatur eingestellt wurde. Dies ist aber aus den vorhandenen Messdaten nicht zu entnehmen. Da der Stirling und der zugehörige Spitzenlastkessel nicht baulich getrennt sind und somit die resultierenden Temperaturen immer von beiden Anlagen beeinflusst werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Spitzenlastkessel eingesetzt wurde. Die gemessenen Gas-Volumenströme geben zwar keinen Hinweis darauf, allerdings kann dies auch nicht ausgeschlossen werden. In Abbildung 3.8 ist jedoch zu sehen, dass in den Zeiten auch sehr schwankende Gasverbräuche gemessen werden. Dies könnte auch Abweichungen in der Temperatur erklären.

Beim Stirling-Motor spielt neben dem bereits beschriebenen thermischen Verhalten, das sich durch die Temperaturverläufe darstellen lässt, auch das Verhalten des Gasbedarfs und der elektrischen Stromerzeugung eine Rolle. Daher wird auch der in der Simulation ermittelte Gasbedarf mit dem gemessenen Gasverbrauch im PE-Haus verglichen. Dies zeigt Abbildung 3.8.

Der Verlauf des simulierten Gasbedarfs liegt nach Durchführung der Veränderungen in der Anfahr-
dynamik sehr nah am gemessenen Verlauf. Es ist deutlich zu sehen, dass die Anlage ein stark taktendes
Verhalten zeigt, das auch schon in Abbildung 3.7 zu sehen war. Beim Start ist jeweils eine Spitze in
der Leistung zu sehen, die durch die Modifikationen des Modells auch in der Simulation wiederge-
spiegelt wird. Anschließend fällt der Gasbedarf der Anlage auf ein nahezu konstantes Niveau. An zwei
Zeitpunkten (kurz nach 21 Uhr und kurz vor 03 Uhr) stimmen das simulierte und das gemessene Pro-
fil schlecht überein. Dies ist jedoch auf eine Druckstörung o.ä. in der Messung zurückzuführen, da
hier sehr kurzfristige Schwankungen zu beobachten sind.

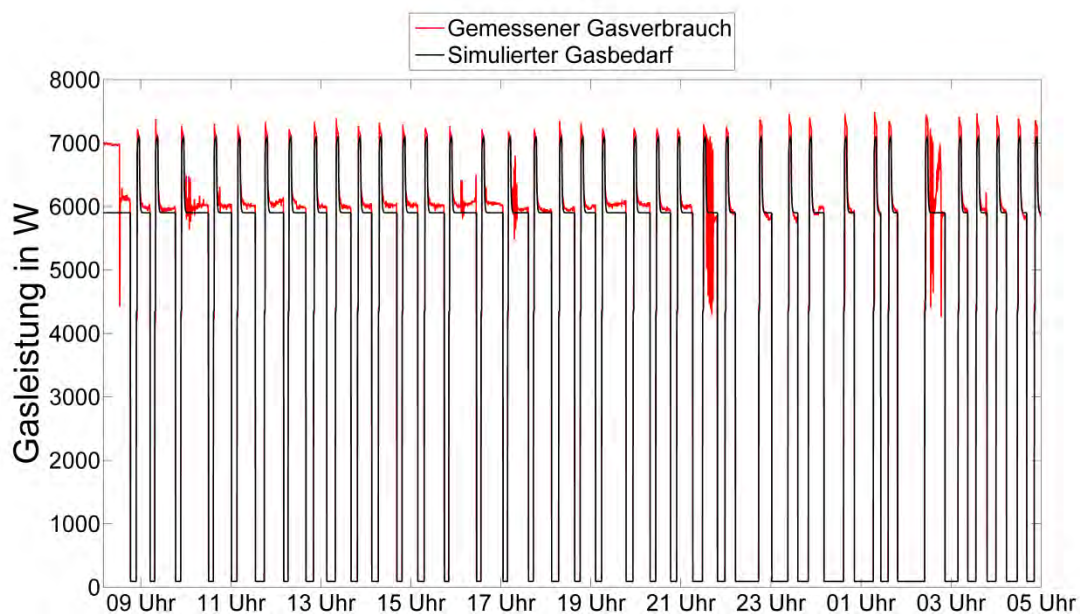


Abbildung 3.8: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Gasbedarf

Neben der thermischen Leistung und der Gasleistung muss auch die elektrische Leistung betrachtet
werden. Hier sind vor allem die Anfahrvorgänge interessant. Wie bei der vorangegangenen Betrach-
tung des Gasbedarfs wird auch hier eine Modifizierung im Startverhalten implementiert.

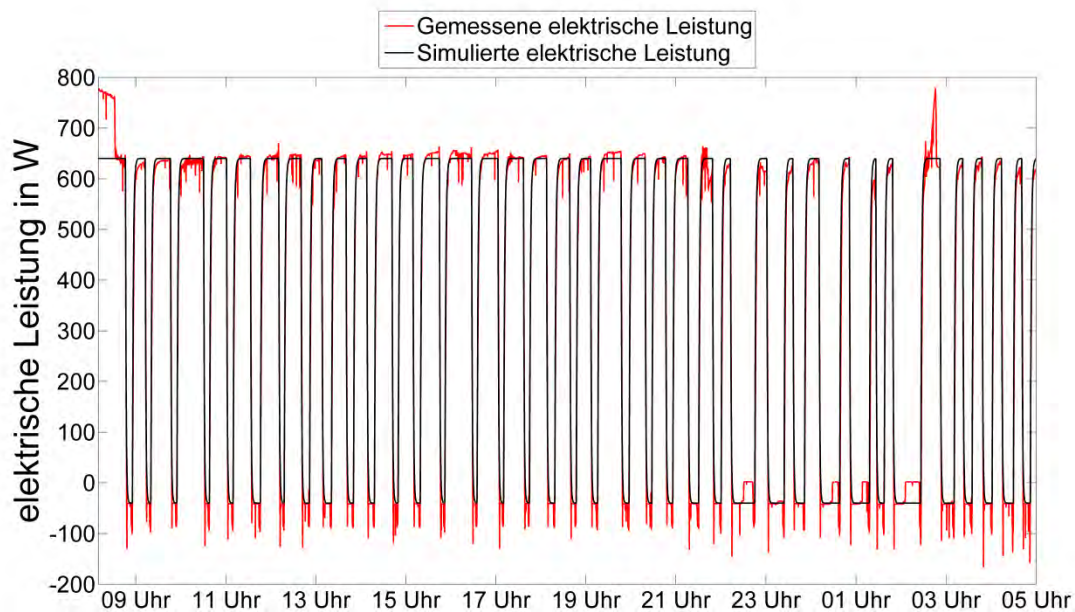


Abbildung 3.9: Vergleich zwischen gemessener und simulierter elektrischer Leistung

Der Verlauf der simulierten und der gemessenen elektrischen Leistung ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Es ist erkennbar, dass Leistungsspitzen im Ein- und Ausschaltverhalten vorhanden sind, die nicht durch die Simulation abgedeckt werden. Im übrigen Bereich der Simulation stimmen die beiden Profile gut überein, wobei einzelne Schwankungen der elektrischen Leistung im Rahmen der hier betrachteten Genauigkeit sehr schwierig zu simulieren sind. Hierfür wären detailliertere Kenntnisse und daraus resultierend eine detailliertere Simulation der einzelnen Komponenten der Anlage nötig. Dieses Vorgehen würde aber die Möglichkeit einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation nahezu ausschließen, weil die Komplexität sehr stark ansteigen würde. Daher kann die Simulation des elektrischen Erzeugungsprofils als genügend genau bezeichnet werden. Das gesamte Modell mit den betrachteten Änderungen eignet sich somit für den Einsatz in Systemsimulationen. Für andere Geräte des Typs Stirling müssen weitere Validierungen vorgenommen werden.

➤ **Brennstoffzelle (CFC)**

Eine weitere Komponente, deren Systemverhalten analysiert werden soll, ist die Brennstoffzelle BlueGen der Firma CFC. Diese Brennstoffzelle weist einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 % auf und hat somit einen ähnlichen Wirkungsgrad wie ein zentrales kombiniertes Gas- und Dampfkraftwerk.

Da diese Anlage auf Grund des hohen elektrischen Wirkungsgrades und der langen An- und Abfahrzeiten, die durch hohe Betriebstemperaturen hervorgerufen werden, möglichst kontinuierlich betrieben werden sollte, müssen bei der Validierung der Anlage weniger Parameter berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass die Anlage eine nahezu konstante elektrische Leistung liefert und einen nahezu konstanten Gasbedarf aufweist. Daher soll die Validierung hauptsächlich auf die Betrachtung der thermischen Seite abzielen. In den vorliegenden Messungen zeigt sich, dass die thermische Leistung der Anlage bei geringen Rücklauftemperaturen, die unter dem Taupunkt des Abgases (ca. 40 °C) liegen, deutlich oberhalb der vom Hersteller CFC angegebenen Leistung liegt. Die gemessenen, ungefilterten Leistungen sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Die von CFC angegebene maximale thermische Leistung in diesem Betriebspunkt beträgt 600 W. Die bei geringen Rücklauftemperaturen höheren Leistungen sind auch im verwendeten modifizierten Modell berücksichtigt worden. Allerdings sollten diese Ergebnisse durch weitere Messungen, speziell bei geringen Rücklauftemperaturen, verifiziert werden.

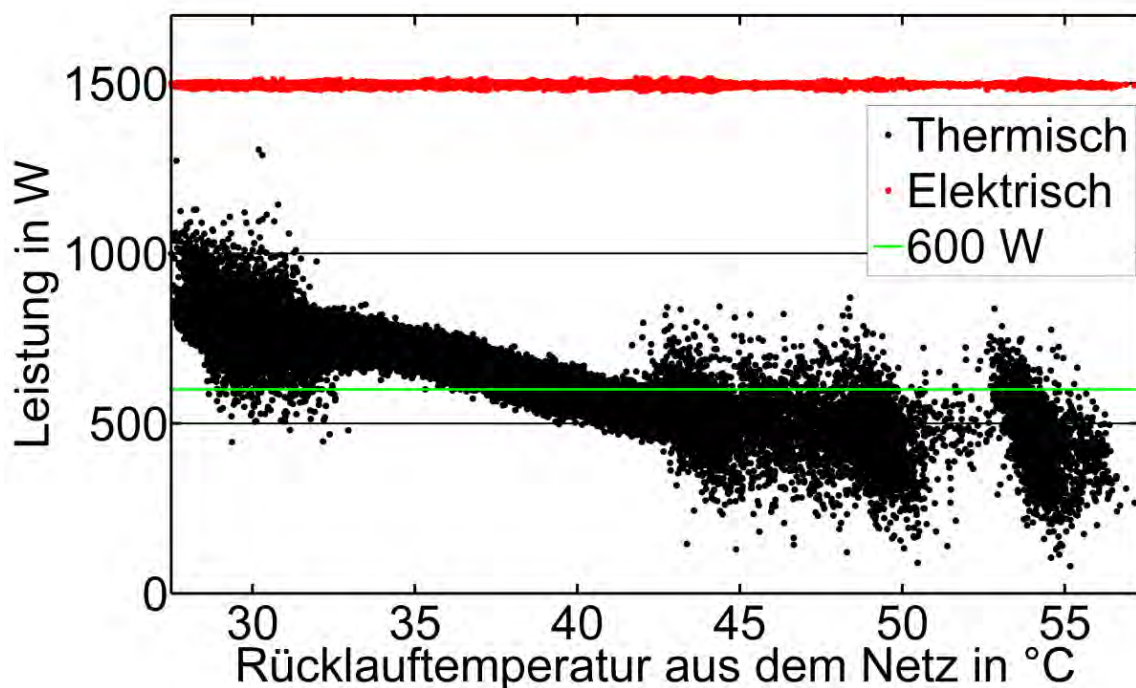


Abbildung 3.10: Thermische Leistung in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur bei der BlueGen-Brennstoffzelle

Es wurde ein alternatives Modell der Brennstoffzelle entwickelt, um den durchgängigen Betrieb in der Simulation sicherzustellen. Dies ist mit dem BHKW-Modell der TU HH nach unserer Einschätzung nicht möglich, d. h., es müssen einzelne Betriebssequenzen abgebildet werden. Mit dem modifizierten Modell wird die Validierung durchgeführt. Wie zuvor beim Kessel und Stirling-Motor werden dem Modell ein Massenstrom und eine Rücklauftemperatur aufgeprägt. Diese beiden Zeitreihen werden aus der Messung entnommen. Da die elektrische Leistung und der Gasverbrauch nahezu konstant sind, kann hier keine sinnvolle dynamische Betrachtung vorgenommen werden. Die Validierung beschränkt sich daher auf den Verlauf der Vorlauftemperaturen, die das Gerät liefert. Diese sind in Abbildung 3.11 dargestellt.

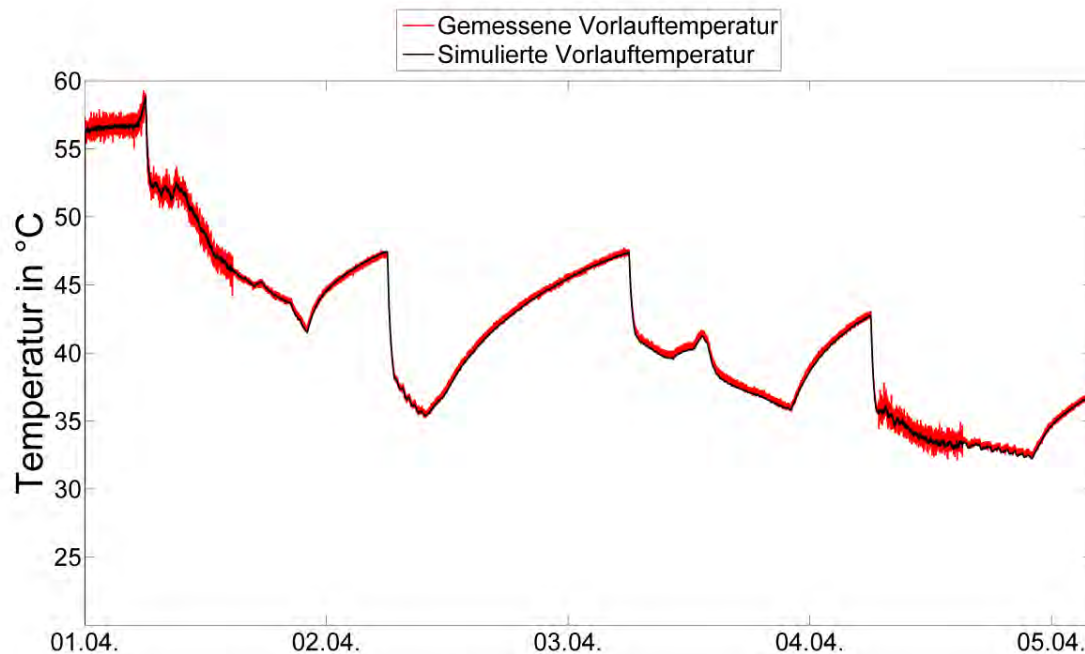


Abbildung 3.11: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Vorlauftemperatur der BlueGen-Brennstoffzelle

Es zeigt sich, dass mit der modifizierten Variante des Brennstoffzellenmodells über alle Temperaturbereiche eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Vorlauftemperatur erzielt werden kann. Somit ist das Modell sehr gut für den Einsatz in Ganzjahressimulationen geeignet. Bei der Betrachtung der Brennstoffzelle wird die Degradation, die mit der Zeit im Brennstoffzellenstack auftritt noch nicht berücksichtigt. Dies könnte für eine Analyse über mehrere Jahre die Modellgenauigkeit noch verbessern.

3.1.5 Weitere Komponenten

Um ein System simulieren zu können was auch die Realität abbildet, sind weitere Komponenten modelliert und mit den im GWI-Demonstrationszentrum erzeugten Messdaten validiert worden. Im System befinden sich Ventile, Pumpen, Regler sowie weitere Komponenten der Modelica Standard Bibliothek. Die Komponenten der Modelica Standard Bibliothek sind bereits extern validiert worden. Im Folgenden werden weitere wichtige Komponenten wie Wärmespeicher und Solarkollektor validiert. Die Ergebnisse sind nach folgend dargestellt:

➤ **Solarkollektor**

Da für die Einfamilienhäuser auch ein Referenzfall unter Berücksichtigung einer solaren Trinkwasserunterstützung simuliert werden soll, wird nachfolgend auf die Validierung des Solarkollektormodells eingegangen. Der Vergleich der gemessenen Vorlauftemperatur mit der simulierten Vorlauftemperatur ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Auf Grund der großen Auswirkungen der solaren Einstrahlung auf die Vorlauftemperatur sind hier erhebliche Schwankungen erkennbar. Tendenziell haben die beiden Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf. Die Strahlungsmessung kann generell mit Unsicherheiten behaftet sein, eine quantitative Bewertung der Abweichungen ist jedoch nicht möglich. Diese möglichen Abweichungen in der Strahlung könnten die Abweichungen in den Temperaturverläufen erklären. Da der qualitative Verlauf der Temperaturen übereinstimmt, wird dieses Modell für die weiteren Simulationen verwendet.

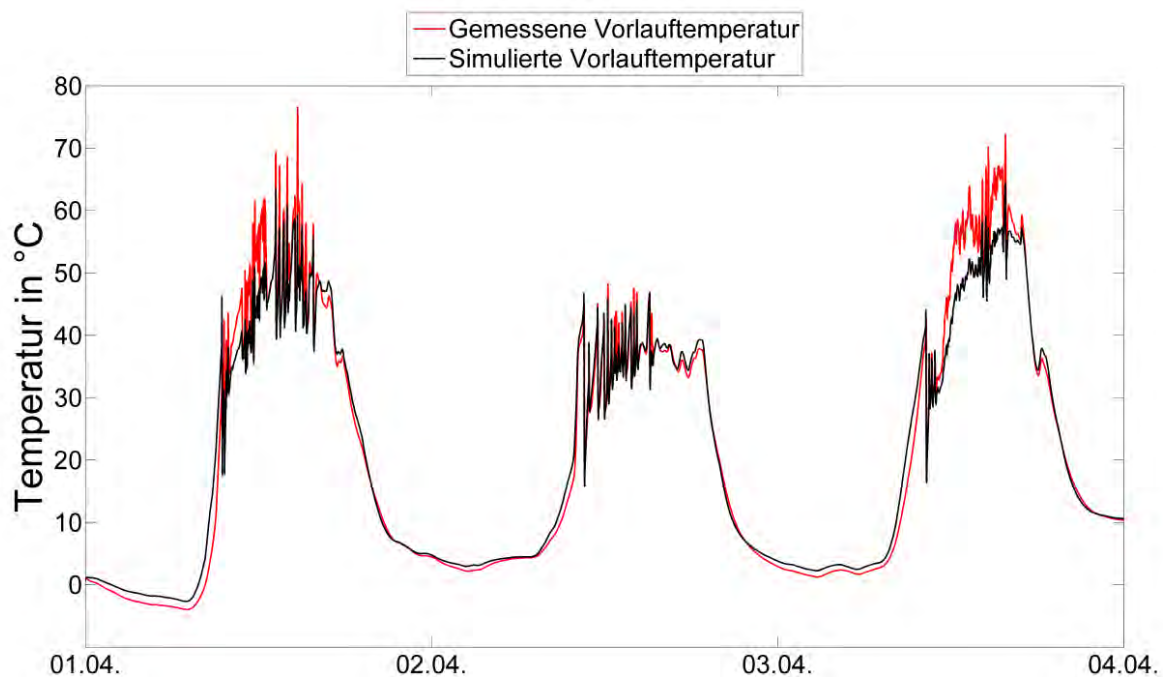


Abbildung 3.12: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Vorlauftemperatur am Solarkollektor

➤ **Wärmespeicher**

Eine weitere zentrale Komponente stellt der Speicher dar, da dieser sowohl als Pufferspeicher als auch als Trinkwarmwasserspeicher verwendet wird und in allen Gesamtmodellen mindestens einer dieser Speicher genutzt wird. Für die Beurteilung des Speichers ist neben den eigentlichen Verlusten durch die Speicherhülle auch die Temperaturverteilung im Speicher von Bedeutung. Diese ist maßgebend für die Nutzbarkeit der gespeicherten Energie.

Zur Validierung des Speichermodells müssen die Randbedingungen des Speichers sehr detailliert bekannt sein. Zu- und Abflussmassenströme sowie deren Temperatur, die Umgebungstemperatur und alle physikalischen Eigenschaften des Speichers (Abmessungen, Dämmmaterial und –stärke etc.) spielen eine Rolle für sein physikalisches Verhalten des Speichers.

Um trotz unvollständiger Datensätze diese wichtige Komponente validieren zu können, wird auf einen gut dokumentierten Fall aus der Literatur (6) zurückgegriffen. Hier wird ein Speicher betrachtet, der zu Beginn eine homogene Temperatur von 82 °C aufweist und anschließend ohne Be- und Entladung abkühlt. Der Aufbau des Speichers und die Positionierung der Temperatursensoren sind bekannt, wodurch ein Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten vorgenommen werden kann. Der als Referenz gewählte Speicher verfügt über 14 Temperaturmessstellen, die in ungleich-

mäßigen Abständen über der Speicherhöhe verteilt sind. Dies kann durch die Berechnung von 14 Speicherschichten gleicher Höhe abgedeckt werden. In Abbildung 3.13 ist der Temperaturverlauf im Speicher zu verschiedenen Zeitpunkten zu sehen. Die gemessenen Schichttemperaturen wurden durch Interpolieren der Messwerte der 14 Temperaturmessstellen erzeugt, wodurch für jede Speicherschicht aus der Simulation ein repräsentativer Messwert zur Verfügung steht.

Für die Gesamtsystem-Berechnung wurde ein nicht von der TU HH entwickeltes Modell verwendet, welches auch die Möglichkeit bietet, mit einem direkt beladenen Speicher zu arbeiten sowie die Schichtung genauer abzubilden. Da dieses Modell auch im Weiteren verwendet wurde, soll hier nur die Validierung dieses Modells gezeigt werden. Die Entwicklung dieses Modells war nicht Teil des Projekts, allerdings können die Berechnungsergebnisse für das Projekt verwendet werden.

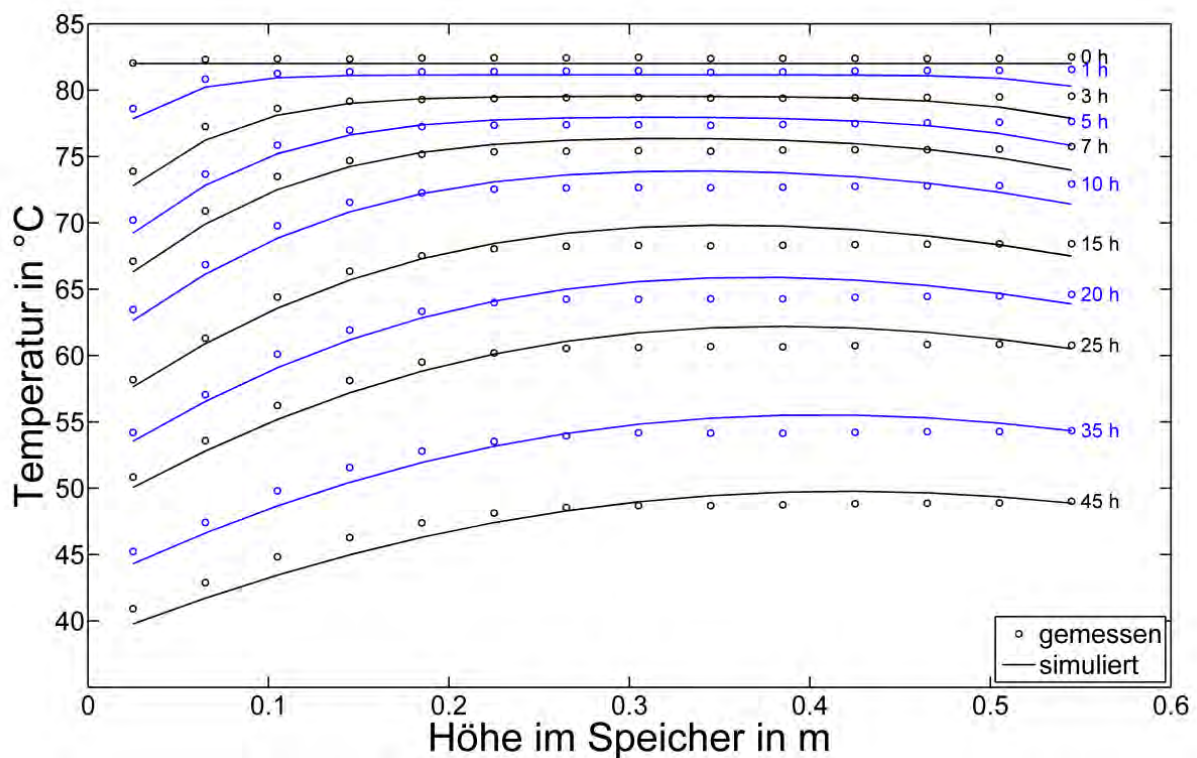


Abbildung 3.13: Temperaturverlauf im Speicher über die Höhe zu verschiedenen Zeitpunkten

Der betrachtete Speicher hat ein Fundament, in dem metallische Bauteile für Verluste sorgen und somit die Speichertemperatur absenken. Es ist erkennbar, dass sich auf Grund der stärkeren Abkühlung im unteren Bereich eine Schichtung ausbildet, die über den gesamten Betrachtungszeitraum von 45 Stunden erhalten bleibt. Im oberen Teil des simulierten Speichers knicken die Temperaturen leicht

nach unten ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für die oberste Schicht ein größerer Wärmeübergang durch die größere Fläche angenommen wird und damit die Verluste in dieser Schicht besonders hoch sind. Insgesamt stimmen die simulierten Temperaturen zu den verschiedenen Zeitpunkten aber nach weiteren Optimierungen durch das ERC sehr gut mit den gemessenen Temperaturen überein. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass das Speichermodell für die Simulation geeignet ist.

3.2 Ergebnisse

Primärenergiebedarfsberechnung

Parallel zur Entwicklung der Berechnungswerkzeuge in Modelica wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt, die die Bewertung rein KWK-versorgter Gebäude mit Kessel-versorgten Gebäuden vergleichen. Hierbei wurde die Stärke der am Haus angebrachten Dämmung variiert, um so auch einen weiteren Einfluss auf den Primärenergiebedarf zu berücksichtigen. Methodisch wurden die statischen Bewertungsverfahren der DIN V 18599 (7) angewandt, die auch beispielsweise die Grundlage für die Nachweise der Energieeinsparverordnung 2009 bilden.

Es ist zu sehen, dass bei einem als Ausgangssituation ungedämmten Haus aus den 1960er Jahren eine Basisdämmung eine größere Primärenergieeinsparung bringt, als eine Lösung mit KWK-Systemen.

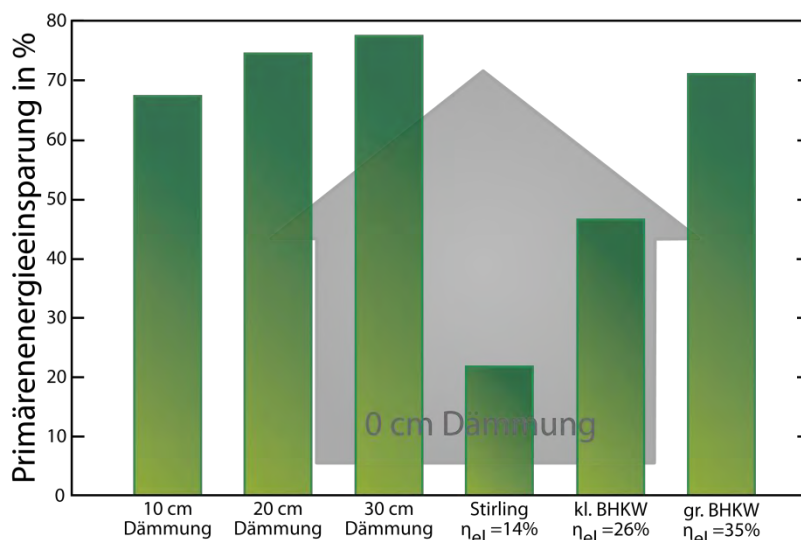


Abbildung 3.14: Primärenergieeinsparung ohne Basisdämmung

Wenn man allerdings eine Basisdämmung von 5 cm bereits als gegeben annimmt, dann sind die zusätzlichen Einsparungen durch weiteren Einsatz von Dämmstoffen deutlich geringer. Hier können mit kleinen KWK-Anlagen (η_{el} = 26 %) komplettversorgte Gebäude bereits gleich große Einsparungen erzielen wie der Einsatz von 15 cm zusätzlichem Dämmstoff.

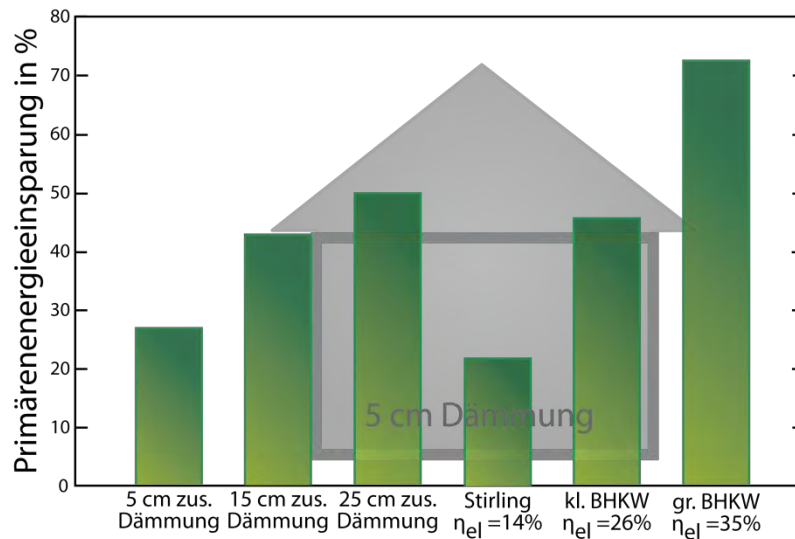


Abbildung 3.15: Primärenergieeinsparung mit 5 cm Basisdämmung

Wenn man abschließend bereits 10 cm an Dämmung als gegeben annimmt, sind die KWK-Systeme den zusätzlichen Dämmstoffen im Bereich der Primärenergieeinsparung bereits überlegen.

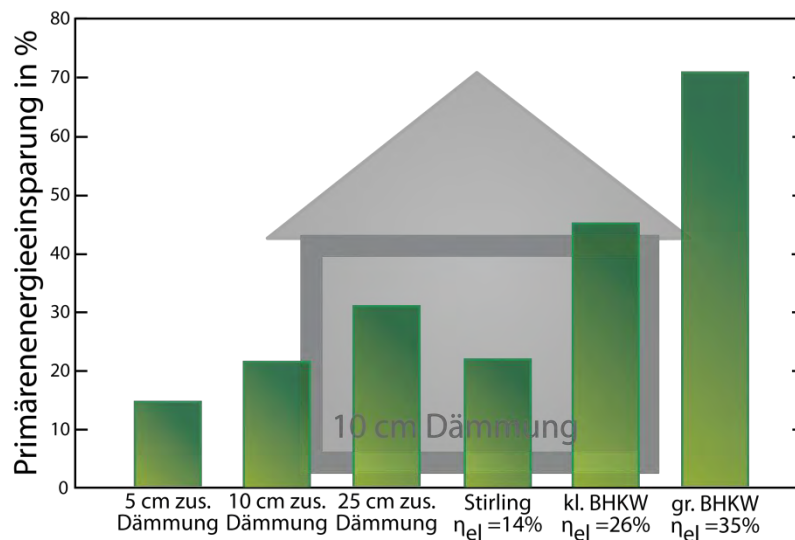


Abbildung 3.16: Primärenergieeinsparungen mit 10 cm Basisdämmung

Diese Betrachtungen sind auch in der Veröffentlichung „Chancen der Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau“ (8) detailliert ausgeführt.

Die genannten Betrachtungen gelten dann, wenn die Versorgung der Gebäude mit 100 % KWK durchgeführt wird. Da dies in den meisten Fällen (vor allem im Bereich der momentan am Markt verfügbaren Mikro-KWK) nicht der Fall sein wird, sondern dort häufig zusätzlich Spitzenlastkessel

eingesetzt werden, muss dieses Verhalten in dynamischen Betrachtungen mit Modelica untersucht werden, um den Primärenergiebedarf solcher hybrider Systeme mit denen reiner KWK-Systeme und anderen Energieversorgungssystemen für Gebäude zu vergleichen.

Aktivhaus/Powerhaus-Konzept

KWK-Systeme können je nach ihrer technischen Beschaffenheit zum Ausgleich von Lastschwankungen im elektrischen Netz eingesetzt werden. Anlagen auf Basis eines Verbrennungsmotors sind hierfür aufgrund ihrer guten Dynamik beispielsweise gut geeignet. Somit können Gebäudeenergiesysteme nicht mehr nur die Versorgung von Gebäuden sicherstellen, sondern auch mit übergeordneten Systemen interagieren und so einen Beitrag zur Einbindung regenerativer Energiesysteme leisten. Somit kann hier von einem „Aktivhaus“ gesprochen werden.

Bei der Nutzung einer SOFC-Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 60\%$ im Gebäude hat man einen Stromerzeuger, der vergleichbar mit dem momentan besten existierenden zentralen Kraftwerk ist und kann zusätzlich zur Wärmeversorgung eines Gebäudes genutzt werden. Aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades und der beschränkten An- und Abfahrmöglichkeit dieser Anlagen sollten sie möglichst durchgängig betrieben werden, um so den besten Nutzen für das Energiesystem zu erreichen. Trotz der geringen Wärmeauskopplung der Brennstoffzelle kann bereits mit zwei am Markt erhältlichen Modulen die komplette Wärmeversorgung eines Einfamilienhauses sichergestellt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind ebenfalls in der Veröffentlichung „Chancen der Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau“ detailliert ausgeführt.

3.2.1 Berechnung von KWK-Anlagen im Wohnungsbau

Aufbau von Berechnungsmodellen für 5 Gebäudetypen

Für die Bewertung von Gebäudeenergiesystemen sind sowohl die Bauphysik als auch die Gebäudetechnik von Bedeutung. Die Bausubstanz in Deutschland ist sehr heterogen, so dass nicht jede Technologie und jeder Gebäudetyp mit der gleichen Güte miteinander kombiniert werden können bzw. sollen.

Um einen guten Überblick über den Einsatz verschiedener KWK-Systeme mit verschiedenen Gebäudetypen zu haben, werden fünf repräsentative Gebäudetypen ausgewählt, die in einer gekoppelten Anlagen- und Gebäudesimulation analysiert werden sollen. Dies sind zum einen drei Einfamilienhäuser und zum anderen zwei Mehrfamilienhäuser.

Für die Einfamilienhäuser werden die Dämmstandards der Energieeinsparverordnung 2009 und der Wärmeschutzverordnung 1984 angewandt. Das dritte Haus entspricht einer Häuserklasse, die in Deutschland noch sehr häufig vertreten ist. Dies ist ein Haus aus den 1960er Jahren mit einem sehr geringen Dämmstandard. Dies soll dazu dienen, einen breiten Querschnitt zu analysieren und sowohl die technischen Lösungen für ganz neue Gebäude als auch für Bestandsgebäude zu betrachten.

Die verschiedenen Wandaufbauten werden in Schichtbauweise realisiert und physikalisch abgebildet, da neben dem Wärmedurchgang auch die Wärmespeicherung (speziell in Beton) berücksichtigt wird. Die U-Werte für die verschiedenen Bauteile sind in Tabelle 3.2 zu finden.

Tabelle 3.2: U-Werte für die verschiedenen Bauteile in $W/(m^2K)$

Haus	Außenwand	Fenster	Boden zum Erdreich	Decke zum unbeheizten Dach
EFH 1960er	1,41	2,9	0,76	0,67
EFH 1984	0,59	2,53	0,69	0,44
EFH EnEV 2009	0,28	1,3	0,34	0,2
MFH 1960er	1,16	2,57	0,76	0,67
MFH 1995	0,475	1,8	0,495	0,3 (Flachdach)

Bei den Mehrfamilienhäusern wird ebenfalls auf ein Haus mit den Baustandards aus den 1960er Jahren zurückgegriffen und auf ein Haus, das nach Wärmeschutzverordnung 1995 gebaut wurde.

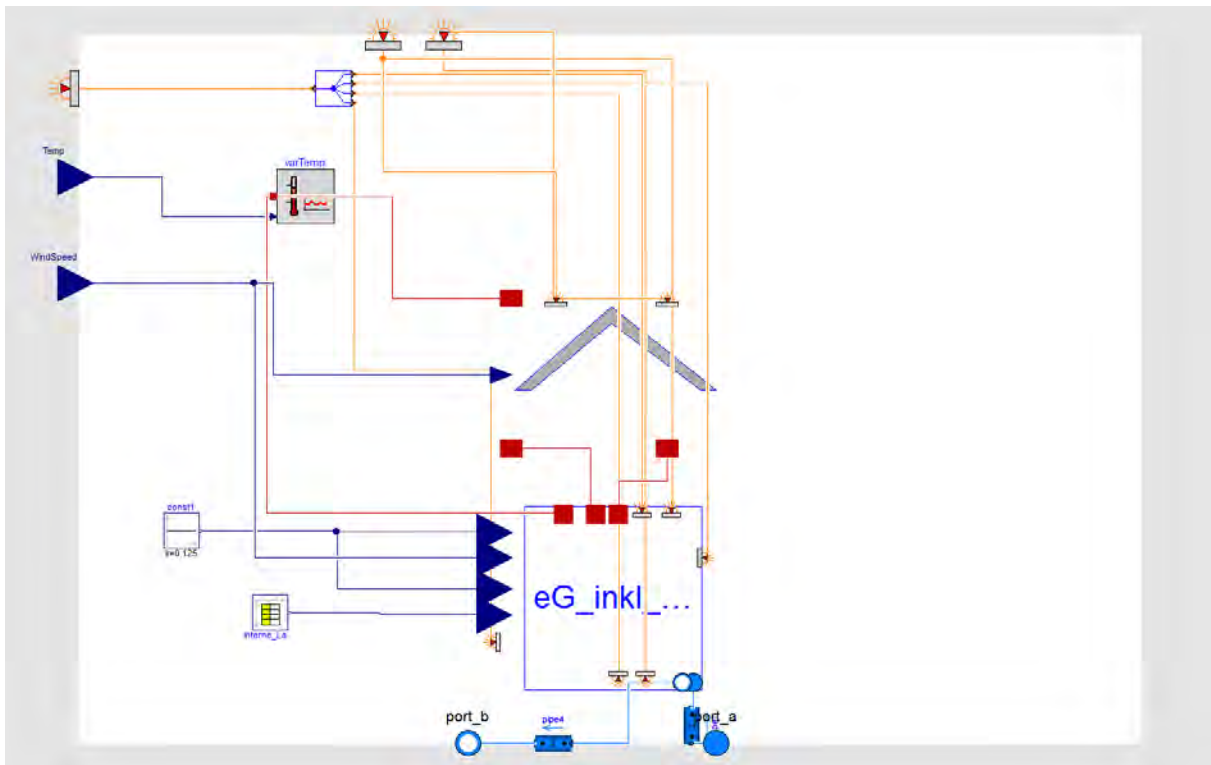


Abbildung 3.17: Das Hausmodell (EFH)

In Abbildung 3.17 ist das Hausmodell in Modelica zu sehen, auf das verschiedene Einflüsse von außen einwirken, in dem aber auch die Bauphysik abgebildet ist. Die Häuser wurden jeweils in Modelica aufgebaut und anschließend mit den technischen Anlagen verknüpft. Im Rahmen dieses Projekts werden vor allem Mikro-KWK-Anlagen in der Kopplung mit dem Gebäude untersucht. Dies sind im Speziellen Stirling-Motoren, Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen. Eine Übersicht über die verwendeten KWK-Anlagen bietet Tabelle 3.3. Alle KWK-Anlagen sind zusätzlich mit einem Spitzenlastkessel ausgestattet. Als Referenzsysteme zu den Mikro-KWK-Systemen werden auch reine Kesselsysteme und vor allem Brennwertkesselsysteme mit solarer Trinkwarmwasserunterstützung untersucht.

Tabelle 3.3: Kenndaten zu den betrachteten Mikro-KWK-Anlagen

	Stirling	Ecopower 1.0	Hexis Brennstoffzelle	CFCL Brennstoffzelle
Elektrischer Wirkungsgrad	14 %	26 %	35 %	60 %
Thermischer Wirkungsgrad	83 %	66 %	63 %	25 %
Brennstoffausnutzungsgrad	97 %	92 %	98 %	85 %
Max. elektrische Leistung	1 kW	1 kW	1 kW	1,5 kW
Max. thermische Leistung	6 kW	2,5 kW	1,8 kW	ca. 0,6 kW

Im Bereich der Gebäude wird neben der reinen Bausubstanz (Wände, Fenster, Türen etc.) auch das hydraulische Netz inklusive der Wärmeübergabe an den Raum über Heizkörper berücksichtigt. In Abbildung 3.18 ist beispielhaft die Hydraulik des Erdgeschosses des Gebäudes mit den Heizkörpern (Nummer 1), Thermostatventilen (Nummer 2) und Verbindungsleitungen (Nummer 3) zu sehen. Die Verbindung zum Raummodell geschieht über die in der Abbildung mit den roten Quadraten (konvektiver Wärmeübergang) bzw. den schwarzen Sternen (Strahlungswärme) symbolisierten Konnektoren. Die Verbindung zum hydraulischen System der Wärmeversorgung geschieht durch die unten rechts mit „RETURN“ und „FLOW“ bezeichneten Konnektoren, die die Weiterleitung eines Fluids (im hier betrachteten Fall Wasser) mit allen Fluideigenschaften (z.B. Wärmekapazität) und allen Zuständen (z.B. Druck, Temperatur) ermöglichen.

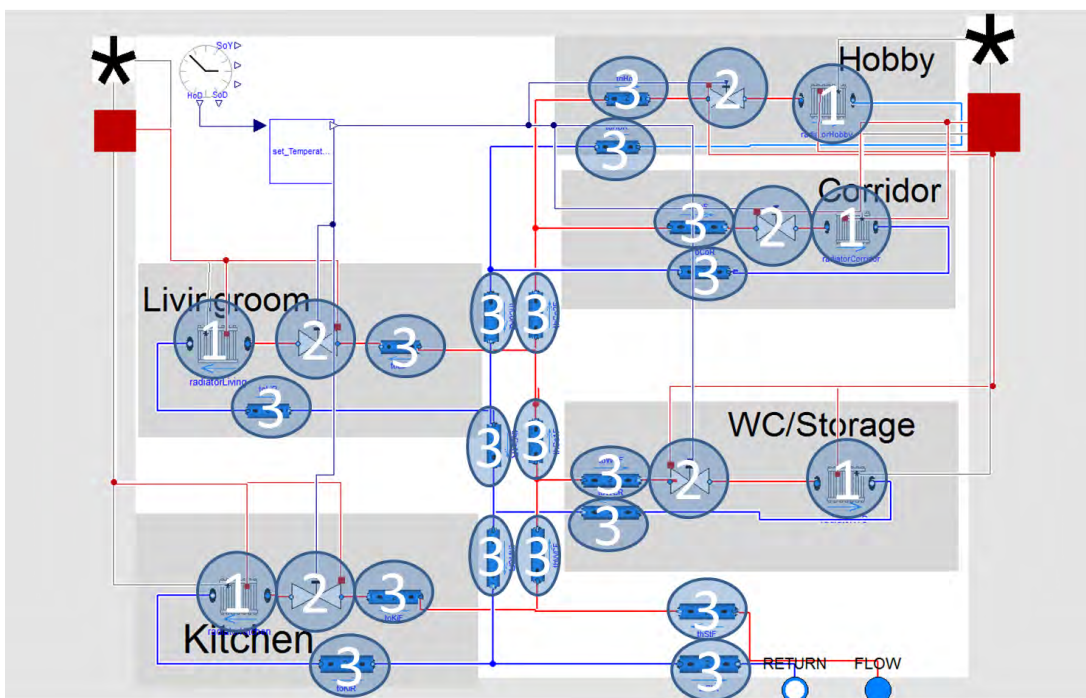


Abbildung 3.18: Hydraulik des Erdgeschosses (EFH)

Neben den verschiedenen physikalischen Einflüssen werden auch die Nutzereinflüsse in Form von Lüftungsprofilen, internen Lasten (Menschen und Geräte) sowie Warmwasserprofilen berücksichtigt. Diese können auf verschiedene Nutzerarten individuell angepasst und mit einer hohen zeitlichen Auflösung (falls gewünscht) an das Modell übergeben werden. Meist werden diese Größen über die

mit den blauen Dreiecken gekennzeichneten Real-Konnektoren, die nur einen Wert übertragen, übergeben.

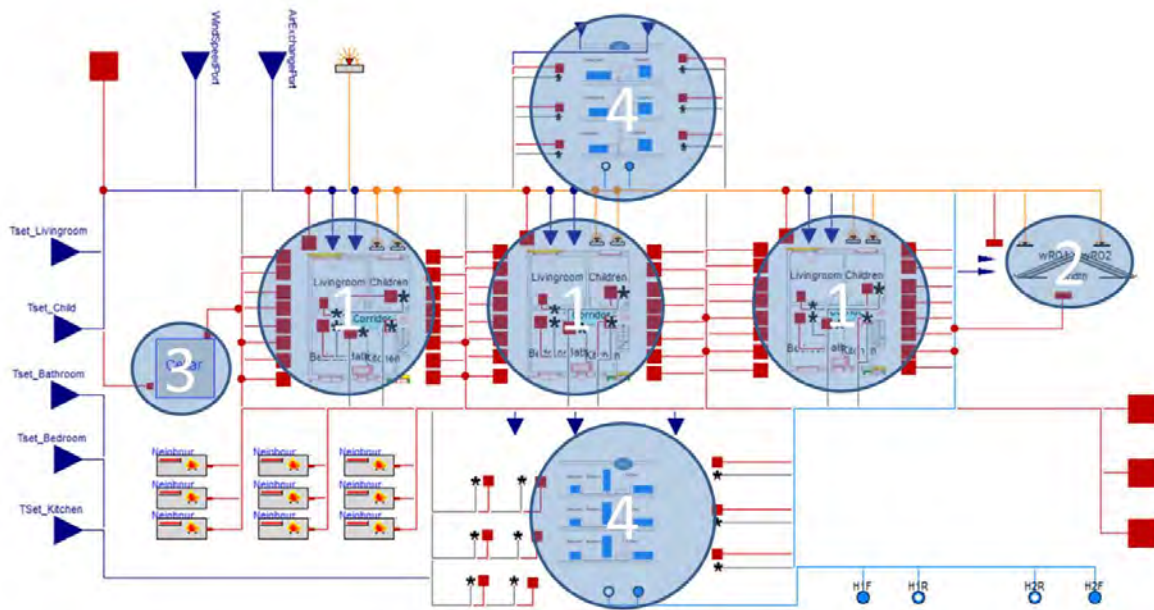


Abbildung 3.19: Modell des MFH inklusive Hydraulik

Abbildung 3.21: In Modelica abgebildetes Gesamtsystem

Die gesamte Rechenzeit auf einem handelsüblichen Computer beträgt für eine Einzelsimulation über ein Jahr für das Einfamilienhausmodell mit Anlagentechnik ca. 1,5 Tage. Dies kann aber je nach Komplexität der Verschaltung oder auch der Regelungstechnik variieren. In Abbildung 3.21 wird ein solches gekoppeltes System gezeigt, wobei mit 1 das KWK-Modul, mit 2 der Spitzenlastkessel, mit 3 der Pufferspeicher, mit 4 der Trinkwarmwasserspeicher und mit 5 das Hausmodell gekennzeichnet ist. Somit können sowohl die Einflüsse der Anlagentechnik auf das Gebäude und umgekehrt ermittelt werden, als auch die Einflüsse beispielsweise der Speicher auf die Betriebszeiten der KWK-Anlagen. Durch die dynamischen Betrachtungen können diese Speichereffekte sowohl in der Gebäudemasse (Abkühlung / Aufheizung des Betons) als auch in der Gebäudetechnik (Wasserspeicher) berücksichtigt werden. Beim Aufbau der hydraulischen Systeme ist darauf zu achten, dass es immer einen Punkt im hydraulischen Kreislauf geben muss, der das System bestimmt. Dies ist in der Haustechnik ein Ausdehnungsgefäß, das dafür sorgt, dass das System überhaupt simuliert werden kann. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass beim Einsatz von Ventilen (vor allem Dreiwegeventile) der genaue hydraulische Abgleich gewährleistet ist. Ansonsten kann es hier zu Simulationsabbrüchen bzw. sehr langsamen Simulationen kommen.

Optimierung der Speichergröße

Im Rahmen dynamischer Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Speichergröße keinen signifikanten Einfluss auf den Primärenergiebedarf eines mit KWK versorgten Hauses hat. Vereinfacht führt ein größerer Speicher dazu, dass die KWK-Anlagen länger betrieben werden können, auf der anderen Seite vergrößert aber auch der größere Speicher die thermischen Verluste. Es könnte allerdings versucht werden, über eine geschickte Regelung, die die Temperatur im Speicher möglichst gering hält, die Speicherverluste zu verringern und damit einen größeren Speicher effizienter zu machen. Welche Variante dann die wirtschaftlichste ist, muss im Einzelfall untersucht werden. Beispielhaft ist der Primärenergiebedarf bei veränderten Speichergrößen für das Haus nach EnEV 2009 in Abbildung 3.22 zu sehen. Die Veränderungen durch die Variation sind sehr klein, wobei davon auszugehen ist, dass bei den vorliegenden Anlagengrößen größere Speicher definitiv zu schlechteren Ergebnissen führen werden. Der Einfluss, der zu beobachten ist, ist bei Stirling und BHKW etwas unterschiedlich. Die Werte variieren jedoch nur in sehr geringem Maße. Für das BHKW lässt sich nach dieser Voruntersuchung eine primärenergetisch optimale Speichergröße von 1000 Litern festhalten. Dies liegt daran, dass der kleinere Speicher zu wenig Wärme zwischenspeichert und der größere Speicher zu große Wärmever-

luste aufweist. Da die Variationen im Primärenergiebedarf aber nur sehr klein ausfallen, sollte dieses Resultat nicht überbewertet werden.

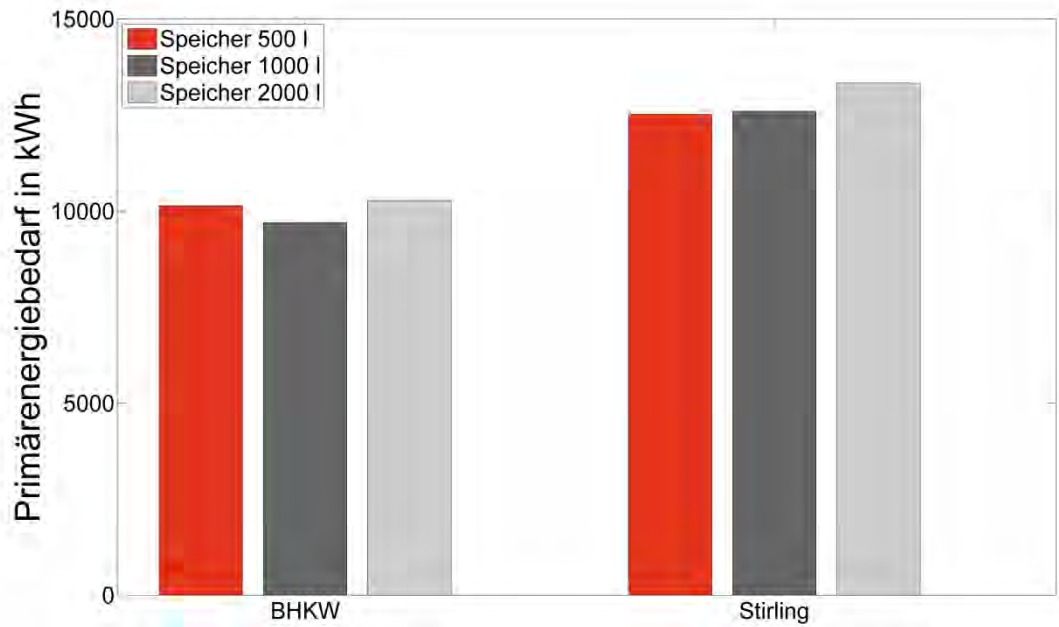


Abbildung 3.22: Primärenergiebedarf im EFH EnEV 2009 bei Variation der Speichergröße

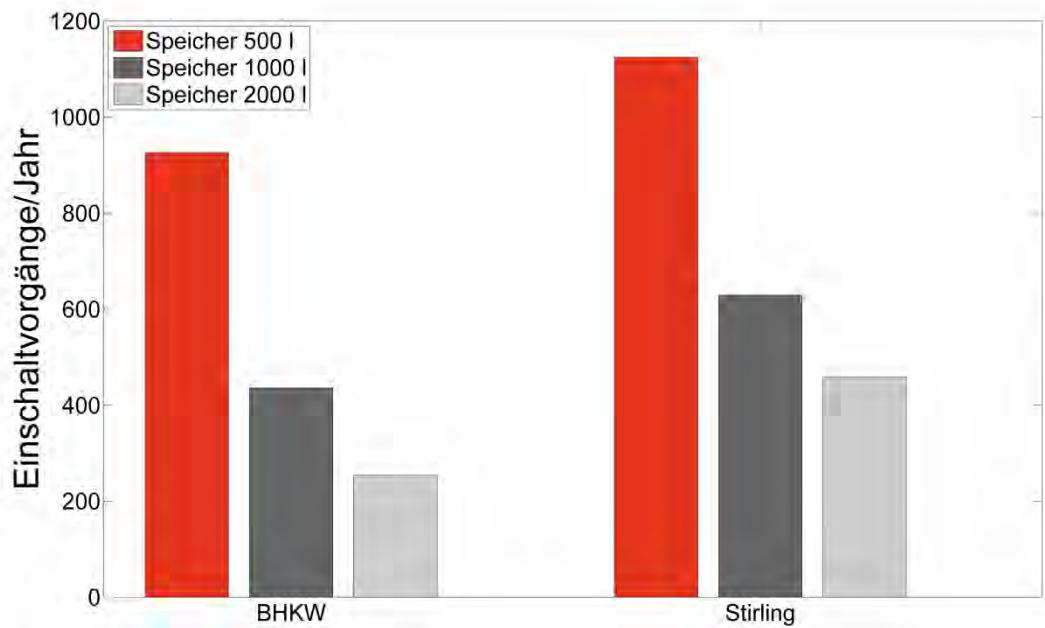


Abbildung 3.23: Veränderung der Anzahl der Einschaltvorgänge durch Variation der Speichergröße

Die Größe, die durch die Variation der Speichergröße verändert werden kann, ist die Zahl der Taktspiele beispielsweise eines BHKW-Motors oder eines Stirlings. Der Zusammenhang ist in Abbildung 3.23 zu sehen. Ein größerer Speicher reduziert also deutlich die Anzahl der Taktspiele. Dies spielt dann eine signifikante Rolle, wenn Wartungskosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Einschaltvorgänge o.ä. auch betrachtet werden sollen. Dies kann in zukünftigen Betrachtungen weiter ausgeführt werden. Der genaue Einfluss der Speichergröße auch im Zusammenhang mit stromgeführter KWK kann mit dem Tool in Zukunft ebenfalls untersucht werden.

Matrix

Im Rahmen des Projekts wurde eine Matrix zur Kombination von Anlagentechnik und Gebäude abgestimmt. Diese Matrix ist in Tabelle 3.4 zu finden. X steht hier für eine sinnvolle Kombination, O für eine bedingt sinnvolle Kombination, ? für eine zu überprüfende Kombination und – für eine energetisch nicht sinnvolle Kombination.

Tabelle 3.4: Matrix der zu koppelnden Systeme

	BW + Solar	CFCL-BZ + Zusatzheizgerät	Ottomotor + Zusatzheizgerät	Stirlingmotor	Hexis-BZ + Zusatzheizgerät
EFH 1960	X	X	X	X	X
EFH 1984	X	X	X	X	X
EFH 2009	X	X	X	X	X
MFH 1958	-	-	X	X	-
MFH 1995	-	-	X	X	-
Demonstrationshaus	X	X	??	X	-

Die Priorität liegt auch aufgrund der betrachteten eingeschränkten Menge an Mikro-KWK-Anlagen zunächst auf den Einfamilienhäusern. Anschließend werden auch die Resultate für die Mehrfamilienhäuser dargestellt. Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse der dynamischen Simulationen im Bereich der Einfamilienhäuser genauer vorgestellt werden. Für die Simulationen wurden aus Gründen erhöhter Rechengeschwindigkeit und Stabilität der Simulation auch Modelle verwendet, die nicht von der TU HH im Rahmen dieses Projekts zur Verfügung gestellt worden sind. Nur so konnten alle Aufgabenstellungen im Rahmen der Projektlaufzeit abgearbeitet werden. Die Ergebnisse und Aussagen werden dadurch nicht beeinträchtigt.

Für die einzelnen Gebäude wurden Solltemperaturprofile vorgegeben. Der sich dann ergebende Temperaturverlauf ist beispielhaft in Abbildung 3.24 zu sehen. Aufgrund des Proportionalitätsbereichs des Thermostatventils wird die Solltemperatur am Tag um bis zu 1 Kelvin überschritten. Ebenfalls in Abbildung 3.24 ist das Auskühlverhalten des Gebäudes in der Nacht zu sehen.

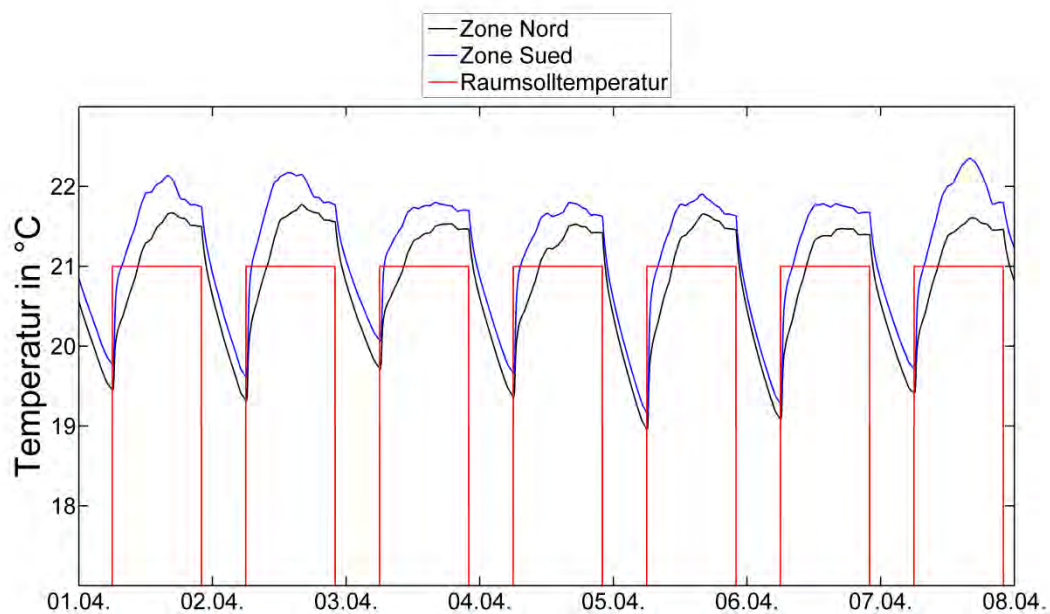


Abbildung 3.24: Temperaturverlauf in zwei thermischen Zonen mit einem vorgegebenen Sollwert

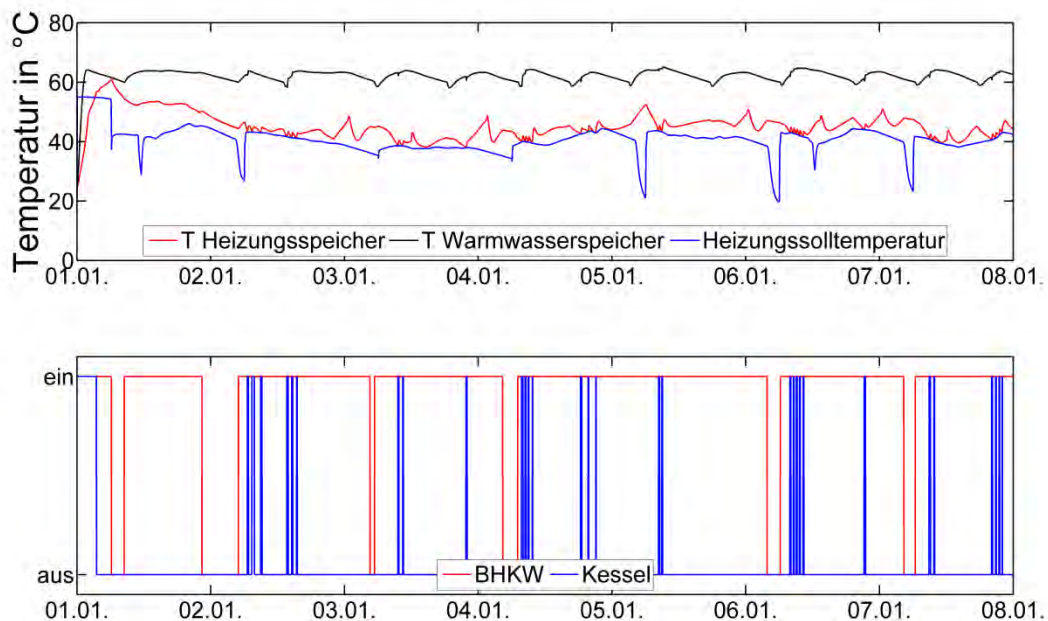


Abbildung 3.25: Temperaturverlauf im Speicher und zugehöriges Betriebsverhalten des BHKW sowie des Kessels

Die KWK-Anlagen können unterschiedlich betrieben werden. Hier soll auf eine wärmegeführte Betriebsweise für die Anlagen BHKW und Stirling eingegangen werden. Wärmegeführt bedeutet in dem Fall, dass die Anlagen einen thermischen Warmwasserspeicher beladen und ab einer bestimmten Speichertemperatur abschalten. Sobald der Speicher auf eine untere Grenze abgekühlt ist, wird die KWK-Anlage wieder eingeschaltet. Sowohl die Temperatur des Heizungsspeichers als auch die des Trinkwarmwasserspeichers werden bei der Regelung berücksichtigt. Das Betriebsverhalten ist in Abbildung 3.25 zu sehen. Sollte die Anlage bereits eingeschaltet sein, die Leistung aber trotzdem nicht ausreichen, wird zusätzlich der Spitzenlastkessel eingesetzt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3.25 zu beobachten, wenn die Warmwasserspeicher-Temperatur hoch genug liegt, aber die Heizungsspeichertemperatur unter den Sollwert sinkt. Dann wird der Zusatzkessel für kurze Zeit eingeschaltet, um die Temperatur im Heizungsspeicher wieder anzuheben. Für die Brennstoffzellen wurden zwei unterschiedliche Arten des Betriebs untersucht. Dies ist zum einen der ganzjährige durchgängige Betrieb bei voller Leistung, um so einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten. Des Weiteren sind die Anlagen aufgrund der hohen Betriebstemperaturen nicht sehr schnell an- und abschaltbar, was ebenfalls für einen durchgängigen Betrieb spricht. Des Weiteren wird auch noch die Möglichkeit analysiert, die Anlagen im Sommer abzuschalten. Die durch diese unterschiedlichen Betriebsarten erzeugte Strommenge der verschiedenen KWK-Anlagen ist in Abbildung 3.26 zu sehen. Die erzeugten Strommengen

der jeweiligen Betriebsarten der Brennstoffzellen unterscheiden sich zwischen den Haustypen nicht, da hier ein zeitlich vorgegebener Zeitplan abgefahren wurde und keine weitere Regelung erfolgte.

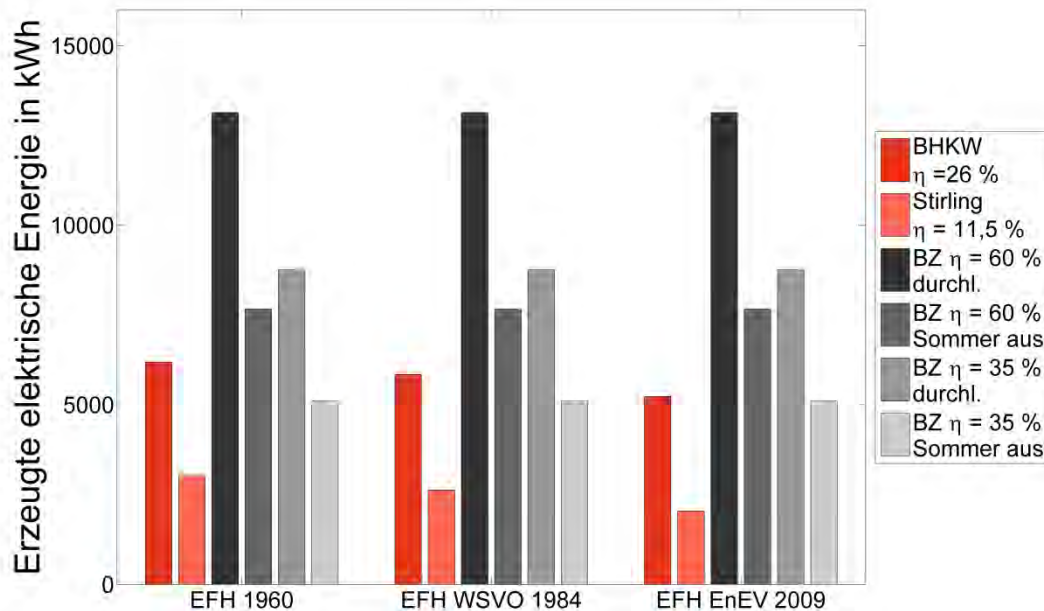


Abbildung 3.26: Erzeugte elektrische Energie der verschiedenen KWK-Typen für verschiedene Haustypen

Bei den KWK-Anlagen auf Verbrennungsmotor- oder Stirling-Basis ist zu beobachten, dass sich die erzeugte elektrische Energie mit dem steigenden Dämmstandard verringert. Dies liegt daran, dass der Wärmebedarf insgesamt geringer ist und somit auch die Betriebszeiten dieser Anlagen zurückgehen. Für alle Systeme treten im Pufferspeicher als auch im Warmwasserspeicher thermische Verluste auf. Die sich insgesamt ergebenden Verluste sind in Abbildung 3.27 zu sehen. Die Verluste in den Speichern sind für alle Varianten mit KWK-Technik mit über 3.000 kWh sehr hoch. Die Verluste durch den Betrieb des Systems „Brennwert+Solar“ sind zum einen geringer, weil es nur einen statt zwei Speicher gibt und weil dieser Speicher im unteren Bereich mit Solarthermie beladen wird und dort bei geringer Sonneneinstrahlung deutlich geringere Temperaturen vorliegen. Die KWK-Anlagen sind hingegen so geregelt, dass sie im Betrieb immer sowohl den Warmwasserspeicher als auch den Pufferspeicher voll beladen, um so eine möglichst lange Laufzeit und ein geringes Taktverhalten zu ermöglichen. Dadurch werden jedoch vergleichsweise hohe Durchschnittstemperaturen erreicht, was die hohen Verluste erklärt. Ein Ansatz zur Reduktion der Verluste könnte die Betrachtung eines Kombispeichers oder einer Trinkwasserzapfstation am Pufferspeicher sein, um so die Nachteile durch den Betrieb von zwei Speichern auszugleichen. Vor allem für die Brennstoffzelle mit einem elektrischen

Wirkungsgrad von 35 % sind diese Verluste sehr hoch und dieser Betrieb sollte nicht in Erwägung gezogen werden. Die Verluste aller Varianten differieren zwischen den einzelnen Gebäudetypen nicht sehr stark. Die Verluste bei den beiden durchlaufenden Brennstoffzellentypen sind höher als bei den anderen Varianten. Dies lässt sich durch die geringere Wärmeabnahme im Sommer und die daraus resultierenden höheren Speichertemperaturen erklären. Diese führen direkt zu höheren thermischen Verlusten in den Speichern, da diese auch dann beladen werden, wenn die Wärme nicht in dem Maße benötigt wird.

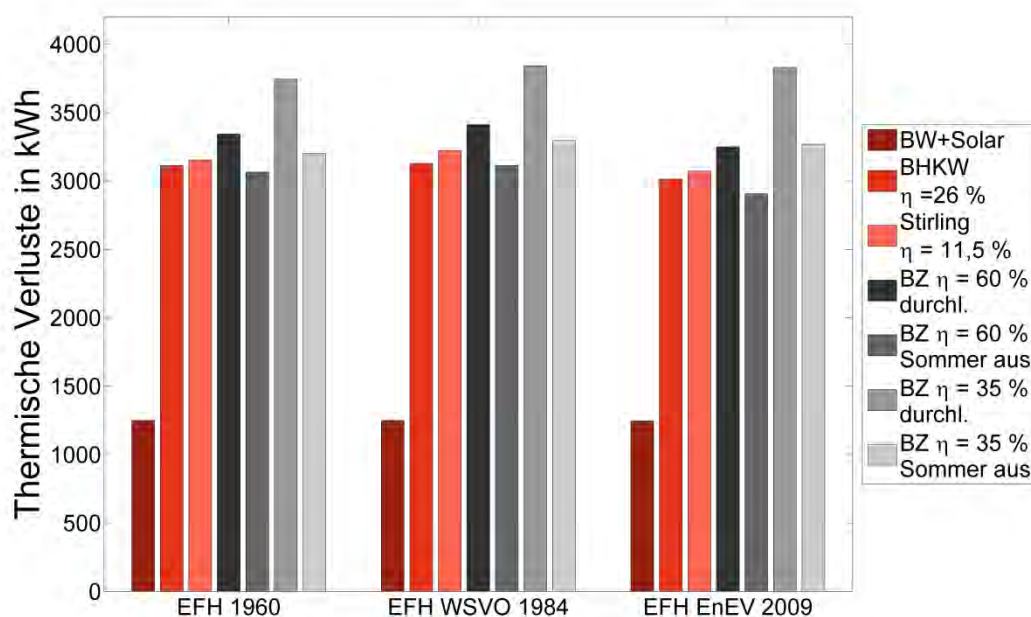


Abbildung 3.27: Gesamte thermische Verluste der einzelnen Anlagentypen bestehend aus Speicherverlusten im Heizungsspeicher und im Trinkwarmwasserspeicher

Die Auswirkungen, die die unterschiedlichen Betriebsarten der verschiedenen Anlagentypen in Kombination mit den verschiedenen Häusertypen auf die primärenergetische Bewertung haben, sind in Abbildung 3.28 zu sehen.

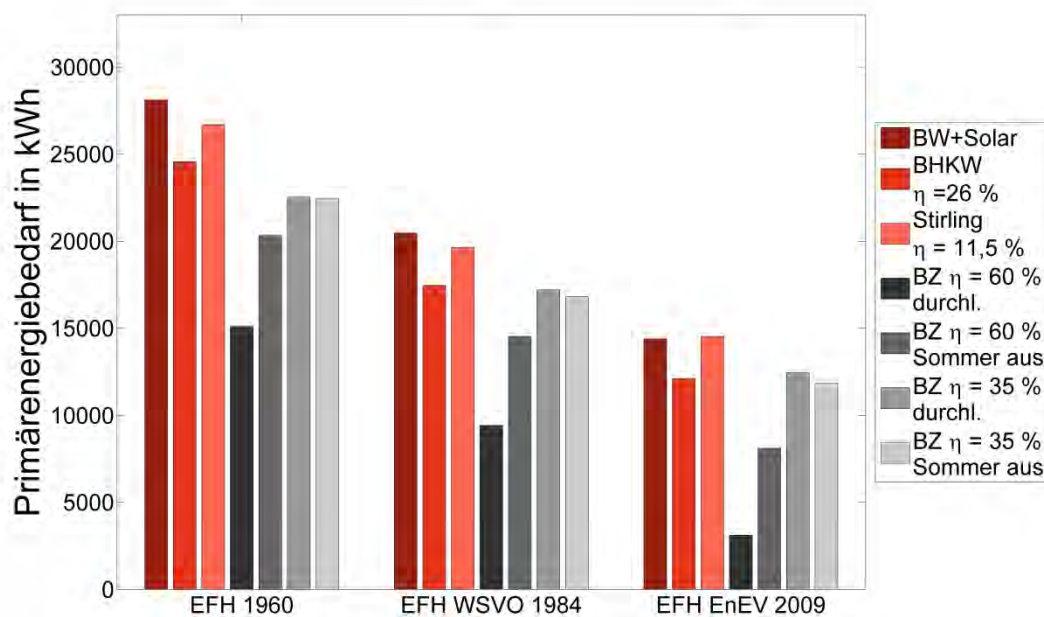


Abbildung 3.28: Primärenergiebedarf der verschiedenen Häuser mit unterschiedlichen Versorgungssystemen

Es ist deutlich zu sehen, dass unabhängig von der gewählten Technologie der Primärenergiebedarf für die Beheizung und Warmwasser mit verbessertem Dämmstandard stark abnimmt. Allerdings ist es bereits möglich, mit einer durchgehend betriebenen Brennstoffzelle mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 % in einem Haus aus den 1960er Jahren einen Primärenergiebedarf zu erreichen, der unter dem eines mit dem System „Brennwert+Solar“ versorgten Hauses nach Energieeinsparverordnung 2009 liegt. Wenn die Brennstoffzelle in einem Haus nach Energieeinsparverordnung 2009 durchgängig betrieben wird, kann ein sehr geringer Primärenergiebedarf von ca. 3.100 kWh ermittelt werden. Im Vergleich ist es primärenergetisch besser, die Brennstoffzelle mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 % durchgängig zu betreiben, als sie im Sommer auszuschalten. Die Brennstoffzelle mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % sollte dagegen aus primärenergetischer Sicht im Sommer ausgeschaltet werden. Dies liegt vor allem an der geringen Wärmeausnutzung im Sommer. Diese fällt bei der Brennstoffzelle mit 60 % nicht so schwer ins Gewicht, da diese einen so hohen elektrischen Wirkungsgrad aufweist und damit das Haus prinzipiell als „Kühlturm“ eines sehr guten Wärmeerzeugers angesehen werden kann. Außerdem ist die thermische Leistung deutlich geringer

und kann somit zur Deckung der Warmwasserversorgung gut eingesetzt werden. Allerdings sind die primärenergetischen Unterschiede bei der Berechnung zwischen einem kontinuierlich betriebenen und einem im Sommer abgeschalteten System bei der Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von 35 % nicht sehr groß. Bei der Betrachtung eines anderen Nutzerprofils könnte sich diese Bewertung verschieben.

Auch die anderen KWK-Technologien können Primärenergieeinsparungen erzielen. Allerdings sind vor allem die durch den Einsatz eines Stirlingmotors erreichbaren Primärenergieeinsparungen deutlich geringer als die durch die Brennstoffzellen. Hier ist bei einem nach Energieeinsparverordnung gedämmten Haus sogar zu sehen, dass der Primärenergiebedarf des Systems „Brennwert+Solar“ unter dem des mit einem Stirling beheizten Hauses liegt. Mit besserem Dämmstandard nähert sich die Variante mit BHKW immer mehr an die Variante der Brennstoffzelle mit 35 % Wirkungsgrad an, obwohl das BHKW einen deutlich geringeren elektrischen Wirkungsgrad von 26 % aufweist. Dies deutet darauf hin, dass die gezielte Wärmeproduktion speziell bei gut gedämmten Gebäuden hier ein Defizit im elektrischen Wirkungsgrad kompensieren kann. Eine weitere bemerkenswerte Tatsache ist, dass der Stirling im Betrieb im Haus, das nach der Energieeinsparverordnung 2009 gedämmt ist, fast keinen Zusatzkessel mehr benötigt. Die Gasmenge für den Kesselbetrieb liegt bei nur noch 239 kWh. Wenn also eine Anlage mit dem gleichen thermischen Verhalten und einem höheren elektrischen Wirkungsgrad eingesetzt würde, könnte hier noch deutliches Verbesserungspotential hinsichtlich der Gesamtenergieeinsparung genutzt werden.

Diese Technologien (vor allem das verbrennungsmotorische BHKW) sind allerdings sehr gut für dynamische Anforderungen geeignet und könnten somit Regelenergie im elektrischen Netz bereitstellen. In Abbildung 3.29 ist zu sehen, wie viele Ein- und Ausschaltvorgänge die BHKWs und die Stirlingmotoren erreichen. Es ist zu sehen, dass die verbrennungsmotorisch betriebenen BHKWs deutlich geringere Anzahlen erreichen.

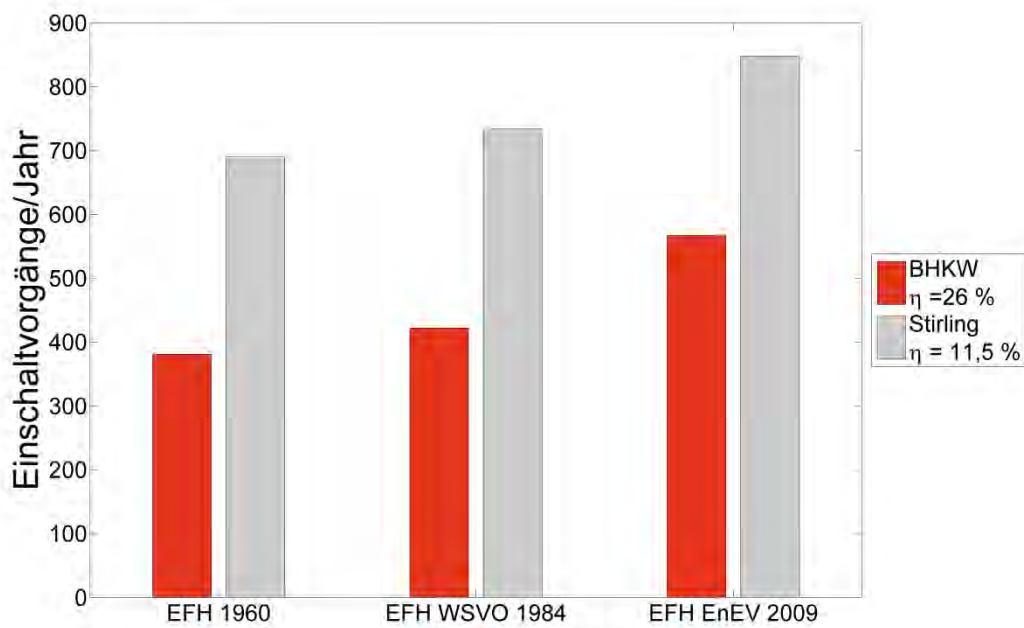


Abbildung 3.29: Taktverhalten von BHKW und Stirling

Dies ist vor allem durch die kleinere thermische Leistung zu erklären. Der Anstieg der Takte bei beiden Anlagentypen bei steigenden Dämmstandards ist durch die abnehmende Wärmeabfuhr zu begründen. Dies fällt beim Stirling nicht so stark ins Gewicht, da hier die Betriebszeiten aufgrund der großen Leistung prozentual stärker abnehmen, wie in Abbildung 3.29 dargestellt ist. Die Anzahl der Einschaltvorgänge beim BHKW steigt vom Dämmstandard der 1960er Jahre bis zum Dämmstandard der Energieeinsparverordnung um ca. 49 % an. Beim Stirling liegt dieser Zuwachs nur bei ca. 23 %. Die Betriebsstundenzahl, siehe Abbildung 3.30, nimmt beim verbrennungsmotorischen BHKW um ca.

16 Prozent ab, während die Betriebsstundenzahl des Stirlings um 34 % abnimmt.

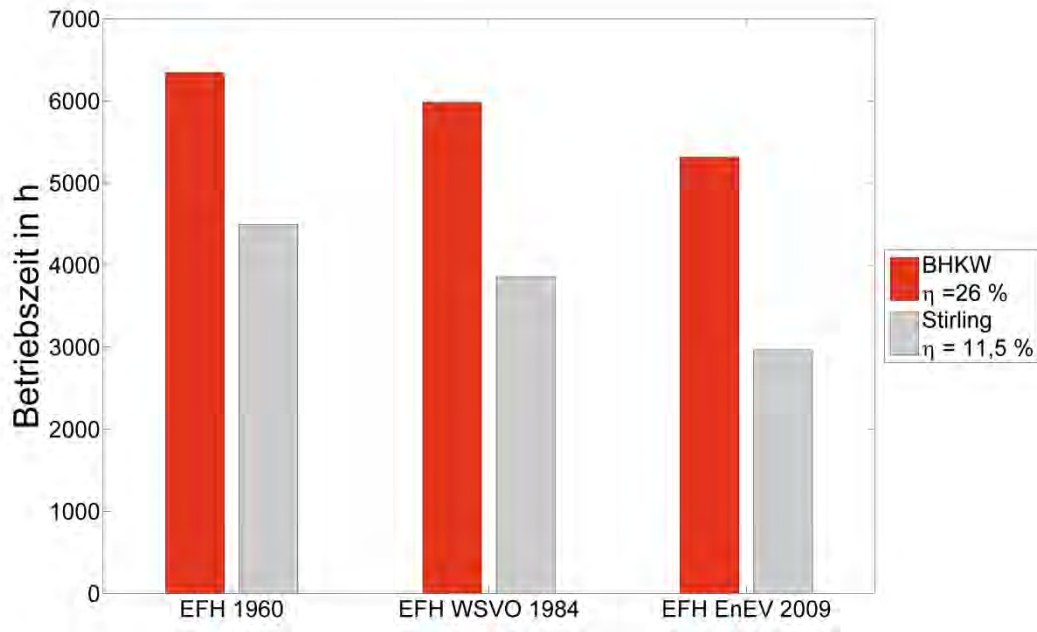


Abbildung 3.30: Betriebsstundenzahl von BHKW und Stirling

Dieses mögliche Taktverhalten kann in weiteren Untersuchungen genutzt werden, um elektrische Regelenergie bereit zu stellen und die Speicherung der „Abwärme“ detailliert zu untersuchen. Dazu müssten die Betriebszeiten der Anlagen zu den Zeiten hin verschoben werden, in denen die Leistung aus regenerativen Quellen im elektrischen Netz nicht ausreicht, um die Versorgung mit elektrischem Strom sicher zu stellen. Momentan sind hierfür aber noch keine ausreichenden Anreize gegeben, so dass häufig eine Auslegung der BHKWs mit einer Volllaststundenzahl von mindestens 5000 h/a angestrebt wird. Dadurch wird die Leistung des BHKWs klein gehalten und somit der Anteil des selbst genutzten Stroms möglichst groß. Dies ist momentan die wirtschaftlichste Betriebsweise, da durch die Eigennutzung der Elektrizität Strom ersetzt wird, der ansonsten aus dem Netz bezogen werden müsste. Inwiefern diese Förderung der Eigennutzung gesamtwirtschaftlich sinnvoll ist, sollte in weiteren Untersuchungen gezeigt werden.

Auch für die ausgewählten Mehrfamilienhaustypen sind Gesamtsystemsimulationen durchgeführt worden. Auf Grund der sehr hohen Rechenzeiten der gekoppelten Modelle wird hier kein ganzes Jahr bilanziert, sondern nur ein Abschnitt von vier Monaten (Januar-April). Der PE-Bedarf für die beiden Techniken ist in Abbildung 3.31 zu beobachten. Wie erwartet, weist das System mit Kessel den

höchsten Primärenergiebedarf auf. Das System mit motorisch betriebenem BHKW hat jeweils einen geringeren Bedarf als das System mit Stirling. Es ist außerdem zu sehen, dass der Primärenergiebedarf des Systems mit BHKW im Haus aus den 1960er-Jahren genauso hoch liegt wie der eines mit Kessel versorgten Hauses, das nach Wärmeschutzverordnung 1995 gedämmt ist. Die Betriebszeiten der Anlagen sind in Abbildung 3.32 zu sehen. Es ist zu beobachten, dass die Betriebszeiten des Stirlings in beiden Fällen kürzer sind als die des BHKWs. Allerdings fällt auf, dass das BHKW im Haus mit der Dämmung nach Wärmeschutzverordnung 1995 eine längere Betriebszeit aufweist als im Haus aus den 1960er Jahren. Dies liegt vermutlich daran, dass das Haus aus den 1960er-Jahren einen höheren Wärmebedarf aufweist und vor allem sehr hohe Spitzenleistungen in der Aufheizphase am Morgen benötigt. In diesen Phasen wird der Heizungsspeicher jeweils teilweise mit einer sehr hohen Kesselleistung beladen. Dies kann dann dazu führen, dass Speichervolumen durch den Kessel belegt wird, das dann nicht mehr vom BHKW genutzt werden kann. Dies könnte durch weitere Optimierungen in der Regelung noch verbessert werden, so dass dann das BHKW vielleicht im 1960er-Mehrfamilienhaus zu einem durchlaufenden Wärmeversorger wird. Wenn dies annähernd gelänge, könnte auch der Einsatz der Brennstoffzellentechnik in diesen Häusern weitergehend untersucht werden, wobei allerdings nicht ein Gerät, das momentan verfügbar ist, verwendet werden dürfte, sondern eines, das mit einer höheren thermischen Leistung ausgestattet ist.

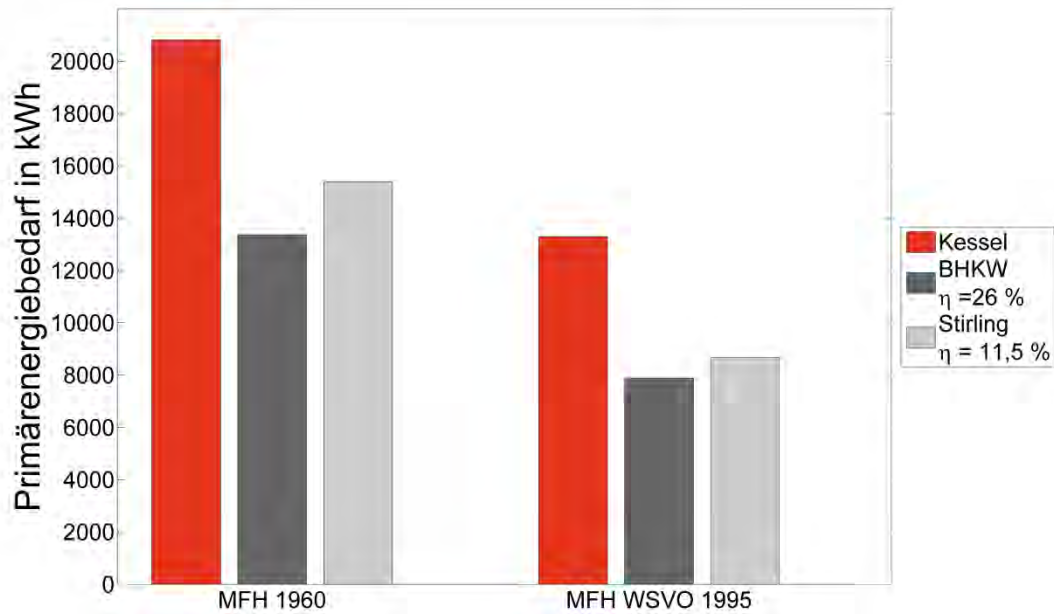


Abbildung 3.31: PE-Bedarf für zwei Mehrfamilienhäuser mit unterschiedlichen Techniken für den Zeitraum von Januar bis April

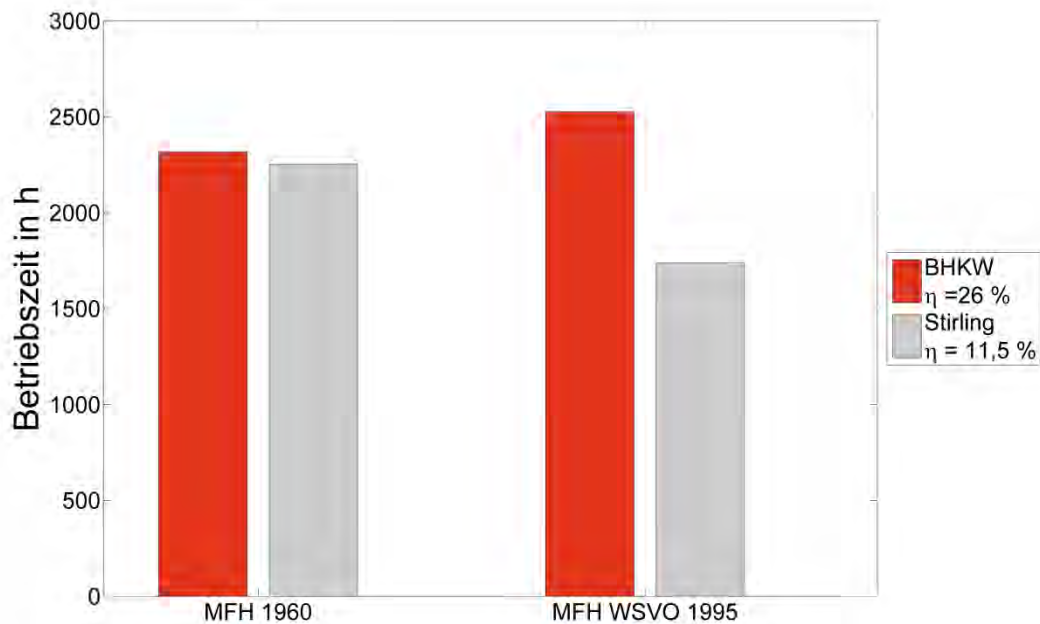


Abbildung 3.32: Betriebszeiten der KWK-Anlagen in den Monaten Januar bis April

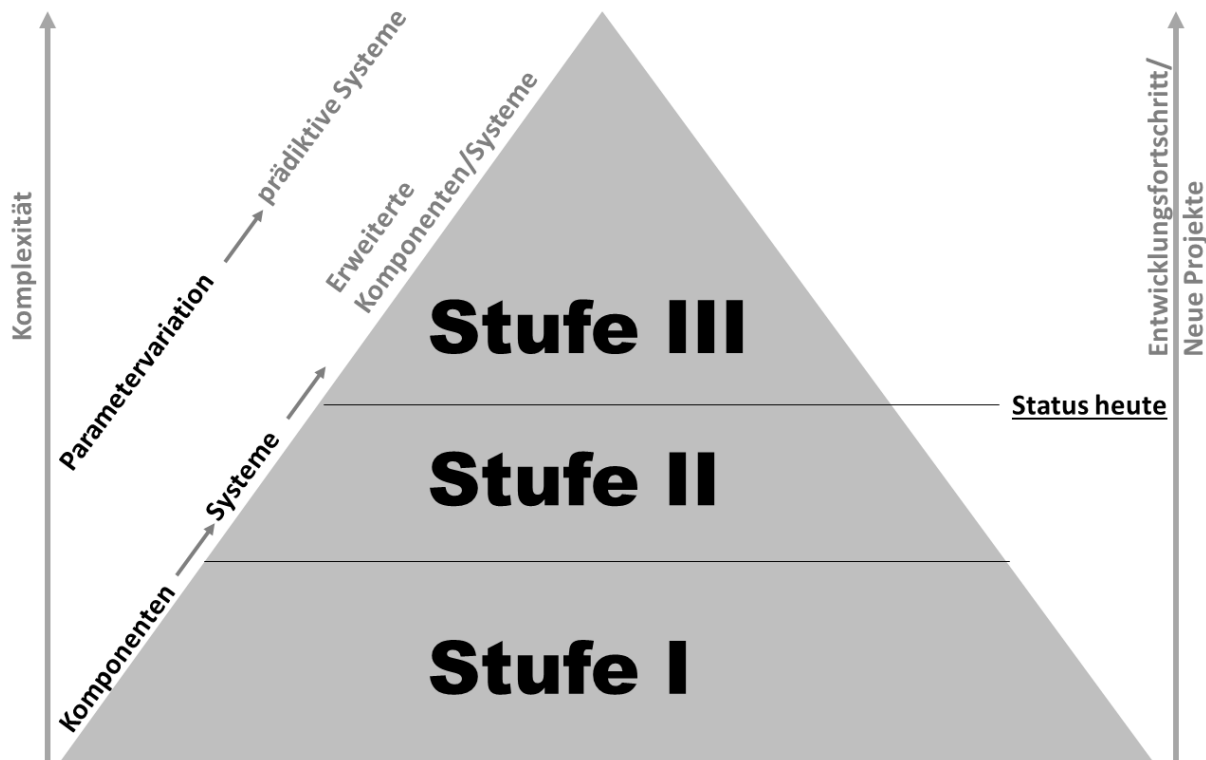
Fazit und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnten durch die Zusammenarbeit der Projektpartner erfolgreich die verschiedenen am Markt erhältlichen Anlagen- und Gerätetechnologien in Modelica umgesetzt werden. Es wurden NT-Kessel, BW-Kessel, ZWP, Otto-Motor, Stirling und weitere Modelle (u.a. Wärmespeicher und Solarkollektor) modelliert und validiert. Mit der Implementierung und Kombination der erstellten Teilmodelle, welche in der nun zugänglichen Building and HVAC Bibliothek enthalten sind, ist es möglich, Gesamtsysteme wie z. B. Häuser und Gebäudekomplexe instationär abzubilden. Zur Plausibilitätsprüfung der Teilmodelle wurde das GWI-Demonstrationshaus in Modelica umgesetzt, dabei wurden die vor Ort erfassten Messdaten als Eingangsparameter verwendet, um das Gesamtsystem zu validieren. Als Referenzzeitraum wurde dabei die Heizperiode vom 01-07 Januar im Jahr 2013 verwendet. Es wurde ein Einzonen- und eine Mehrzonenmodell des Hauses angefertigt. Dies bietet die Möglichkeit detaillierte Studien eines einzelnen freistehenden Hauses, mit Blick in die einzelnen Räume (Zonen), vorzunehmen oder mittels des Einzonenmodells das Gesamthaus als Energieverbraucher zu betrachten.

Ersteres Modell bietet die Möglichkeit einfache Analysen des Gebäudes im Zusammenwirken mit verschiedenen Technologien zu untersuchen. Zusätzlich können schnell verschiedene Technologien analysiert oder auch die Unterschiede zwischen einer wärme- und einer stromgeführten Betriebsweise betrachtet werden. Die Nutzungsprofile können variiert werden, je nachdem wie viele Menschen, in welchem Alter und in welcher geografischen Region, das Haus bewohnen. Die Nutzungsprofile sind dabei reine Parametervariationen am vorhandenen Modell und bedürfen keiner weiteren programmiertechnischen Arbeit.

Die Simulation des Gesamthauses als eine Zone schafft die Voraussetzung, um Problemstellungen der Interaktion in ganzen Siedlungsgebieten zu untersuchen. Das Zusammenwirken verschiedenster Haustypen (Alter, Technologie, Dämmung, Nutzungsgrad, Größe) an einem Standort, die in Zukunft stattfindende Konvergenz und geplante prädiktive Regelung der Energienetze sind dabei nur ein paar der in Zukunft aufkommenden Themenfelder. Im Zusammenspiel der genannten Ansätze wird es nun somit das erste Mal möglich sein, ökologische und energetische Aspekte im dynamischen Betrieb von Gebäuden und Technologien über längere Zeiträume hinweg und ihre Interaktion zu analysieren.

Die Ergebnisse des Projektes wurden abschließend zusammengeführt und bilden die Basis des am GWI entwickelten Konzeptes zur fortführenden Nutzung und Weiterentwicklung der erhaltenen Simulationsmodelle. Das Konzept sieht 3 Stufen vor und ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



In der nachkommenden Tabelle sind die jeweiligen Ausbaustufen mit den entsprechenden Entwicklungsschritten zusammengefasst. Stufe 1 beinhaltet dabei die Entwicklung der Einzelkomponenten und Technologien. Diese Stufe bildet die Basis für die folgenden beiden Ausbaustufen. In Stufe 2 werden die Einzelmodelle der Technologien miteinander verknüpft und zu einem Gesamtsystem verbunden. Dieses System kann nun über Parameter an verschiedene Szenarien angepasst werden, um die einzelnen Technologien im Verbund und unter verschiedenen Randbedingungen (Jahreszeit, geographische Lage, Anzahl der Bewohner im Haus, etc.) zu testen. Mit Abschluss des vorliegenden Projektes befindet sich das GWI auf Stufe 2 und wird in folgenden Projekten die systemische Integration der Einzelmodelle fortführen. Stufe 3 sieht vor den systemischen Gedanken weiterzuentwickeln und die Einzelmodelle für Geräte und Räume neu zu kombinieren um auch komplexere Gebäudesysteme und Siedlungen betrachten zu können. Diese Neuverknüpfung der Einzelmodelle geht mit einer weitergehenden Integration von Steuerungs- und Regelansätzen einher und bedarf einer weiteren

Ergänzung der Technologiebibliotheken. Genannt seien hierbei die Stichpunkte Klimatisierung, Photovoltaik, Stromspeicher (z.B. Redox-Flow-Zellen), Wärmespeicher (Paraffin, Wasser, ionische Flüssigkeiten/Salzschmelzen) und die darauf aufbauenden Steuerungs- und Regelansätze im strom- oder wärmegeführten Betrieb. Diese Ansätze können dann in einer gesamtheitlichen Systembetrachtung zusammengeführt werden um Technologien wie z.B. Smartmeter, Energiebutler, Kälte- und Wärmenetze, Konvergenz der Netze zu erforschen und weiterzuentwickeln. Die dynamische Systemsimulation mittels Modelica stellt damit aufgrund seiner Open-Source-Lizensierung und der damit einhergehenden freien Verfügbarkeit für die Gas- und Wasserwirtschaft ein enorm großes Potential dar. Dieser Vorteil kann zum einen zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit im Rahmen der deutschen Energiewende genutzt werden als auch zum Ausbau der internationalen Konkurrenzfähigkeit durch Entwicklung neuartiger systemischer Ansätze im Energiesektor.

Die Abschließende Tabelle fasst noch einmal kurz die einzelnen Entwicklungsstufen und ihre Bestandteile in Ansätzen zusammen.

	Stufe I	Stufe II	Stufe III
Geräte/ Technologien	NT, BW, WP (GWP, EWP), KWK (Otto, Stirling), BZ (CFC), Solarthermische Kollektoren (SK), therm. Speicher (Pufferspeicher)	BW, KWK (Otto und Stirling), WP (ZWP) + therm. Speicher + Wetter + Nutzer + Wärmebedarfsprofil/Demo-Haus	PV-Modell, Batterie-Modell, Regelungsmodelle, Gerät + Speicher + SK + Objekt + Wetter + Regelung -> Optimierung
Gebäudestandards/ Objekte/ Systeme	Baustandard 1960, WSVO 1984, EnEV 2009, GWI-Demo-Haus (Ein- und Mehr-Zonen-Modell, EFH: 1960er Jahre, WSVO 1984, MFH: 1960er Jahre, WSVO 1995		Gewerbeobjekte, Quartiere, Siedlung, Stadt, Klimatisierung, „Energie-Butler“, energetische, ökonomische Optimierung

4 Literaturverzeichnis

1. **Otter, Martin und Schweiger, Christian.** *Modellierung mechatronischer Systeme mit Modelica.* Darmstadt : VDI-Verlag, 2004. ISBN ISBN 3-18-091842-X.
2. **Beitzke, Dipl.-Ing Dietrich.** heizungsbetrieb. [Online] VDI.
<http://www.fweb.de/info/haustech/brennwert.html>.
3. **Albus, Rolf, et al., et al.** *Gaswärmepumpe mit Solarthermie für die DVGW-Innovationsffensive "Gastechologie" zum Themencluster: Anwendungstechnologie.* 2012.
4. **Fischer, Markus, Scherber, Benedikt und Burmeister, Frank.** *Systemanalyse - Abschlußbericht Teil I: Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern Analyse der Energieflussketten der dezentralen Erzeugungsketten.* 2010.
5. **DIN EN 1946-2.** *Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät Deutsche Fassung EN.* 1999.
6. **Oliveskia, Rejane De César, Krenzingerb, Arno und Vielmoc, Horácio A.** Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks. *Solar Energy.* Volume 75, Issue 2, 2003.
7. **DIN V 18599.** *Energetische Bewertung von Gebäude des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung.* 2007.
8. **Stinner, Sebastian, Müller, Dirk.** Chancen für die Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau. *E.ON Energy Research Center Series.* Volume 3, Issue 7, 2011.
9. **Hans-Peter Blank .** Hans-Peter Blank . [Online] Heizung-Sanitär-Haustechnik. <http://www.blank-haustechnik.de/index.html>.

5 Anhang

A Quelltexte

A.1 GWI-Demonstrationshaus – Gesamtmodell

```
model Gesamtmodell
replaceable package Medium =
  Modelica.Media.Water.ConstantPropertyLiquidWater
constrainedby Modelica.Media.Interfaces.PartialMedium
  "Global medium of a heat system";
Gebaeude_inkl_Hydraulik.OG_mit_Hyd OG_mit_Hyd
  annotation (Placement(transformation(extent={{8,16},{38,46}})));
BaseLib.Sources.VarTemp varTemp
  annotation (Placement(transformation(extent={{96,46},{116,66}})));
Gebaeude_inkl_Hydraulik.EG_mit_Hyd eG_mit_Hyd
  annotation (Placement(transformation(extent={{6,-50},{36,-20}})));
Geschosse.Keller keller
  annotation (Placement(transformation(extent={{2,-96},{34,-64}})));
BaseLib.Sources.VarTemp Temperatur_Erde
  annotation (Placement(transformation(extent={{-56,-86},{-36,-66}})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput T_Erde
  annotation (Placement(transformation(extent={{-120,-104},{-80,-64}})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput T_Luft
  annotation (Placement(transformation(extent={{-108,52},{-68,92}})));
Geschosse.Dachraum dachraum
  annotation (Placement(transformation(extent={{10,70},{30,90}})));
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad Solar_Nord annotation (Placement(
  transformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270,
    origin={-56,106})););
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad Solar_East annotation (Placement(
  transformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=180,
    origin={138,70})););
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad Solar_west
  annotation (Placement(transformation(extent={{-132,4},{-112,24}})));
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad Solar_Sued annotation (Placement(
  transformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=90,
    origin={114,-88})););
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput WindSpeedPort1
  annotation (Placement(transformation(extent={{-144,70},{-104,110}})));
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad Solar_Dach_Sued annotation (Placement(
  transformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270,
    origin={-6,110})););
BaseLib.Interfaces.ic_total_rad SolarDach_Nord annotation (Placement(
  transformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270,
    origin={24,110})););
Modelica.Fluid.Pipes.DynamicPipe KellertoEG(
  redeclare package Medium = Medium,
  length=1,
  diameter=0.015,
  height_ab=1)
  annotation (Placement(transformation(
    extent={{6.5,4.5},{-6.5,-4.5}},
    rotation=270,
```



```
origin={-33.5,-55.5}));  
Modelica.Fluid.Pipes.DynamicPipe EGtoKeller(  
  redeclare package Medium = Medium,  
  length=1,  
  diameter=0.015,  
  height_ab=1)  
  annotation (Placement(transformation(  
    extent={{6.5,4.5},{-6.5,-4.5}},  
    rotation=90,  
    origin={72.5,-59.5})));  
Modelica.Fluid.Interfaces.FluidPort_b RETURN(redeclare package Medium =  
  Medium)  
  "Fluid connector b (positive design flow direction is from port_a to port_b)"  
  annotation (Placement(transformation(extent={{62,-134},{82,-114}})));  
Modelica.Fluid.Interfaces.FluidPort_a FLOW(redeclare package Medium =  
  Medium)  
  "Fluid connector a (positive design flow direction is from port_a to port_b)"  
  annotation (Placement(transformation(extent={{22,-132},{42,-112}})));  
equation  
connect(varTemp.Therm1, OG_mit_Hyd.Therm_aussenluft1) annotation (Line(  
  points={{97,54},{97,9},{49.7,9},{49.7,43}},  
  color={191,0,0},  
  smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.ThermOutside1, varTemp.Therm1) annotation (Line(  
  points={{34.5,-49.4},{79.5,-49.4},{79.5,54},{97,54}},  
  color={191,0,0},  
  smooth=Smooth.None));  
connect(OG_mit_Hyd.Therm_Flur_EG, eG_mit_Hyd.Therm_Flur) annotation (Line(  
  points={{4.7,24.4},{4.7,-5.8},{27,-5.8},{27,-16.4}},  
  color={191,0,0},  
  smooth=Smooth.None));  
connect(OG_mit_Hyd.Therm_Eingang_WC, eG_mit_Hyd.Therm_Kind2) annotation (  
  Line(  
    points={{9.5,24.4},{9.5,-5.8},{19.8,-5.8},{19.8,-16.7}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Wintergarten, OG_mit_Hyd.Therm_Wintergarten)  
  annotation (Line(  
    points={{-3.6,-16.4},{-3.6,-10.2},{4.1,-10.2},{4.1,17.2}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Schlafzimmer_Kinderzimmer, OG_mit_Hyd.Therm_Wohnzimmer_EG)  
  annotation (Line(  
    points={{6.3,-16.7},{6.3,-10.35},{0.2,-10.35},{0.2,17.2}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Bad, OG_mit_Hyd.Therm_kueche_EG) annotation (  
  Line(  
    points={{11.4,-16.7},{11.4,-6.35},{0.2,-6.35},{0.2,24.4}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Keller_2_3, keller.Therm_Wohnzimmer_EG)  
  annotation (Line(  
    points={{7.5,-48.8},{28.75,-48.8},{28.75,-66.88},{34.32,-66.88}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Keller1, keller.Therm_Eingang_WC) annotation (  
  Line(  
    points={{42.3,-29.3},{42.3,-62.65},{22.16,-62.65},{22.16,-64.64}},  
    color={191,0,0},  
    smooth=Smooth.None));  
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Flur_Keller, keller.Therm_Flur_EG) annotation (  
  Line(  
    points={{1.5,-48.2},{1.5,-60.1},{16.72,-60.1},{16.72,-64.64}},  
    color={191,0,0},
```

```
smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.Therm_Heizraum, keller.Therm_kueche_EG) annotation (
  Line(
    points={{-0.3,-42.2},{-0.3,-66.1},{4.56,-66.1},{4.56,-64.96}},
    color={191,0,0},
    smooth=Smooth.None));
connect(Temperatur_Erde.Therm1, keller.Therm_Erdboden) annotation (Line(
  points={{-55,-78},{-30,-78},{-30,-92.8},{-5.68,-92.8}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(Temperatur_Erde.Therm1, eG_mit_Hyd.Therm_Erde) annotation (Line(
  points={{-55,-78},{-18,-78},{-18,-50},{20.1,-50}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(Temperatur_Erde.InPort, T_Erde) annotation (Line(
  points={{-55,-84},{-100,-84}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(varTemp.InPort, T_Luft) annotation (Line(
  points={{97,48},{-66,48},{-66,72},{-88,72}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.ThermOutside1, varTemp.Therm1) annotation (Line(
  points={{34.2,76.2},{66.1,76.2},{66.1,54},{97,54}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.Therm_Dachboden, dachraum.OG) annotation (Line(
  points={{25.7,50.5},{25.7,59.25},{15.8,59.25},{15.8,70}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.Solar_Nord, Solar_Nord) annotation (Line(
  points={{27,90.2},{28.5,90.2},{28.5,106},{-56,106}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.Solar_Nord, Solar_Nord) annotation (Line(
  points={{17,46.3},{-19.5,46.3},{-19.5,106},{-56,106}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.SolarRadiationNorth, Solar_Nord) annotation (Line(
  points={{24.9,-20},{-36,-20},{-36,106},{-56,106}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.Solar_East, Solar_East) annotation (Line(
  points={{35.4,79.2},{87.7,79.2},{87.7,70},{138,70}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.SolarRadiationEast, Solar_East) annotation (Line(
  points={{41.3,22.9},{126.65,22.9},{126.65,70},{138,70}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.SolarRadiation_East1, Solar_East) annotation (Line(
  points={{41.7,-33.8},{41.7,70},{138,70}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.Solar_west1, Solar_west) annotation (Line(
  points={{-2.1,-34.4},{-53.05,-34.4},{-53.05,14},{-122,14}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.SolarRadiation_West, Solar_west) annotation (Line(
  points={{4.7,29.8},{-51.65,29.8},{-51.65,14},{-122,14}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.Solar_West, Solar_west) annotation (Line(
  points={{6.4,87.4},{-53.8,87.4},{-53.8,14},{-122,14}},
  color={255,128,0},
```

```
smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.Solar_Sued, Solar_Sued) annotation (Line(
  points={{8.4,70},{62,70},{62,-88},{114,-88}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.SolarRadiation_South, Solar_Sued) annotation (Line(
  points={{11.6,12.7},{113.8,12.7},{113.8,-88},{114,-88}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.SolarRadiation_Sued1, Solar_Sued) annotation (Line(
  points={{15,-54.8},{113.5,-54.8},{113.5,-88},{114,-88}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.WindSpeedPort1, WindSpeedPort1) annotation (Line(
  points={{35.8,88.8},{88.9,88.8},{88.9,90},{-124,90}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.WindSpeedPort1, WindSpeedPort1) annotation (Line(
  points={{45.2,45.1},{-32.4,45.1},{-32.4,90},{-124,90}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.WindSpeedPort1, WindSpeedPort1) annotation (Line(
  points={{39.6,-21.5},{-51.2,-21.5},{-51.2,90},{-124,90}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.Solar_Dach_Sued, Solar_Dach_Sued) annotation (Line(
  points={{10.4,89.8},{10.4,93.9},{-6,93.9},{-6,110}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(dachraum.SolarDach_Nord, SolarDach_Nord) annotation (Line(
  points={{20.6,90.4},{20.6,96.2},{24,96.2},{24,110}},
  color={255,128,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(EGtoKeller.port_b, RETURN) annotation (Line(
  points={{72.5,-66},{72,-66},{72,-124}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(KellertoEG.port_a, FLOW) annotation (Line(
  points={{-33.5,-62},{-34,-62},{-34,-122},{32,-122}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(KellertoEG.port_b, OG_mit_Hyd.FLOW) annotation (Line(
  points={{-33.5,-49},{-33.5,35.5},{3.2,35.5},{3.2,49.9}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(OG_mit_Hyd.RETURN, EGtoKeller.port_a) annotation (Line(
  points={{-3.1,49.9},{-3.1,-53.05},{72.5,-53.05},{72.5,-53}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(KellertoEG.port_b, eG_mit_Hyd.FLOW) annotation (Line(
  points={{-33.5,-49},{-14.75,-49},{-14.75,-21.8},{4.2,-21.8}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(eG_mit_Hyd.RETURN, EGtoKeller.port_a) annotation (Line(
  points={{0.3,-21.8},{37.15,-21.8},{37.15,-53},{72.5,-53}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
annotation (Diagram(coordinateSystem(preserveAspectRatio=false, extent={{-150,
  -150},{150,150}}),
  graphics),
  experiment(StopTime=86400, Algorithm="Lsodar"),
  experimentSetupOutput,
  Icon(coordinateSystem(preserveAspectRatio=false, extent={{-150,-150},{150,150}})));
end Gesamtmodell;
```

A.2 Kessel

```

package Boiler
model Boiler_simple
  extends BaseModels.BaseDeviceClass;
  extends Statistics.StatModell(n=1);
  #####
  ##### parameter #####
  #####
  //parameter SI.SpecificHeatCapacity cp_boiler=5000
  // "Specific heat capacity of the boiler" annotation (Dialog(group="Performance data"));
  // parameter SI.Mass m_boiler=500 "Total mass of the boiler" annotation (Dialog(group="Performance data"));
  #####
  ##### variables #####
  #####
  Medium.ThermodynamicState state_a
    "Thermodynamic states of the inlet of the heater";
  Medium.ThermodynamicState state_b
    "Thermodynamic states of the outlet of the heater";
  Boolean TimeSwitch(start=false);
  //Real eta_b_min(min=0, max=1) "Heating efficiency at P_min";
  // output Real eta_b_x(min=0, max=1) "Actual efficiency";
  SI.HeatFlowRate Q_flow_b "Heat flow burner";
  SI.HeatFlowRate Q_flow_heat "Burner heat flow";
  // Real x "Adjustment factor";
  Pipes.Pipe_simple pipe_simple(redeclare package Medium = Medium,V=pipe_volume,dp_nom=dp_nom,n=n_DIS,
    V_flow_nom_pipe=V_flow_pipe_nom)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-34,-22},{32,44}})));
  Interface.fluidPort_in fluidPort_in(redeclare package Medium = Medium)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-72,4},{-52,24}}),
      iconTransformation(extent={{-90,-24},{-70,-4}})));
  Interface.fluidPort_out fluidPort_out(redeclare package Medium = Medium)
    annotation (Placement(transformation(extent={{64,4},{84,24}}),
      iconTransformation(extent={{70,-24},{90,-4}})));
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput P_therm annotation (Placement(
    transformation(
      origin={0,-70},
      extent={{-10,-10},{10,10}},
      rotation=270), iconTransformation(
      extent={{-10,-10},{10,10}},
      rotation=270,
      origin={6,-96})));
  BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler annotation (Placement(
    transformation(
      origin={0,-34},
      extent={{-10,-10},{10,10}},
      rotation=90)));
  BaseModels.Split_n split_n(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-20},{10,0}})));
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a heatPort if use_HeatPort
    annotation (Placement(transformation(extent={{-4,6},{16,26}}),
      iconTransformation(extent={{-4,6},{16,26}})));
  BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler1 annotation (Placement(
    transformation(
      origin={38,82},
      extent={{-10,-10},{10,10}},
      rotation=180)));
equation
  state_a=Medium.setState_phX(fluidPort_in.p,actualStream(fluidPort_in.h_outflow),actualStream(fluidPort_in.Xi_outflow));
  state_b=Medium.setState_phX(fluidPort_out.p,actualStream(fluidPort_out.h_outflow),actualStream(fluidPort_out.Xi_outflow));
  state_a=state_1E;
  state_b=state_1A;
  TimeSwitch=if entryTime<time then true else false;
  Q_flow_dem = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
  
```

```

        if noEvent(TimeSwitch) then 0 else
        if noEvent(state_a.T>state_b.T) then 0 else
            fluidPort_in.m_flow*cp*(dT);//- sum(Q_flow_loss);
    Q_flow_b = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
        if noEvent(switch == false) then 0 else
        if noEvent(TimeSwitch) then 0 else
            min(P_heat, max(Q_flow_dem, P_min))+ sum(Q_flow_loss);
    Q_flow_heat = (Q_flow_b - sum(Q_flow_loss));
    Q_flow_loss_room = {P_min*f_loss*(max(pipe_simple.heatPort.T) - T_amb) /60};
    Q_flow_loss_exhaust = if noEvent(powerOn == false) then {0} else {P_fuel*(1-eta_h)}-Q_flow_loss_room;
    Q_flow_loss = Q_flow_loss_room+Q_flow_loss_exhaust;
    heatFlow_boiler.Q_flow = -Q_flow_heat;
    P_fuel = Q_flow_heat/eta_h;
    heatFlow_boiler1.Q_flow = sum(Q_flow_loss_room)+kA*(system.T_ambient - heatFlow_boiler1.heatPort.T);
    #####
    #####    Calculation of effeciency    #####
    #####
    //eta_h = if noEvent(not powerOn or not switch) then 0 else efficiencyFunction(Q_flow_heat);
    eta_h = efficiencyFunction(Q_flow_heat);
    // eta_b_min = eta_h*0.95;
    // eta_b_x = noEvent(max((max(sum(Q_flow_heat), P_min)/P_heat)^x*eta_h, eta_b_min));
    // x = if noEvent(P_min < P_heat) then Modelica.Math.log(eta_b_min/eta_h)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1;
    #####
    #####    Energy calculation    #####
    #####
    P_el = P_elC;
    Q_flow_real = sum(Q_flow_b);
    P_therm = P_fuel*eta_h;
    P_elG = 0;
    Q_flow_demand_gen = 0;
    Q_flow_real_gen = 0;
    connect(fluidPort_in, pipe_simple.fluidPort_in) annotation (Line(
        points = {{-62,14},{-60.03,14},{-60.03,14.3},{-34,14.3}},
        color = {0,0,255},
        smooth = Smooth.None));
    connect(pipe_simple.fluidPort_out, fluidPort_out) annotation (Line(
        points = {{32,14.3},{59.35,14.3},{59.35,14},{74,14}},
        color = {0,0,255},
        smooth = Smooth.None));
    connect(heatFlow_boiler.heatPort, split_n.heatPort_in) annotation (Line(
        points = {{3.91887e-016,-27.6},{3.91887e-016,-22.8},{0,-22.8},{0,-19}},
        color = {0,0,255},
        smooth = Smooth.None));
    connect(split_n.heatPort_out, pipe_simple.heatPort) annotation (Line(
        points = {{0,-1},{0,13.97},{0.32,13.97}},
        color = {0,0,255},
        smooth = Smooth.None));
    connect(heatFlow_boiler1.heatPort, heatPort) annotation (Line(
        points = {{31.6,82},{18.8,82},{18.8,16},{6,16}},
        color = {0,0,255},
        smooth = Smooth.None));
end Boiler_simple;
model CondensingBoiler
extends BaseModels.BaseDeviceClass;
extends Statistics.StatModell(n=1);
#####
#####    parameter    #####
#####
parameter SI.SpecificHeatCapacity cp_boiler=5000
    "Specific heat capacity of the boiler" annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter SI.Mass m_boiler=500 "Total mass of the boiler" annotation (Dialog(group="Performance data"));
Medium.ThermodynamicState state_a
    "Thermodynamic states of the inlet of the heater";
Medium.ThermodynamicState state_b
    "Thermodynamic states of the outlet of the heater";
    
```

```

    Boolean TimeSwitch;
//parameter Boolean use_HeatTransfer = false
// "= true to use a HeatTransfer model, e.g. for a housing"
// annotation (Dialog(tab="Assumptions",group="Heat transfer"));
#####
##### variables #####
#####
Real eta_b_min(min=0, max=1) "Heating efficiency at P_min";
output Real eta_b_x(min=0, max=1) "Actual efficiency";
SI.HeatFlowRate Q_flow_b "Heat flow burner";
SI.HeatFlowRate Q_flow_heat "Burner heat flow";
Real x "Adjustment factor";
SI.Power P_fuel_real "real fuel Power";
Pipes.Pipe_simple pipe_simple(redeclare package Medium = Medium,V=pipe_volume,dp_nom=dp_nom,n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-34,-22},{32,44}})));
Interface.fluidPort_in fluidPort_in(redeclare package Medium = Medium)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-72,4},{-52,24}}),
        iconTransformation(extent={{-90,-24},{-70,-4}})));
Interface.fluidPort_out fluidPort_out(redeclare package Medium = Medium)
    annotation (Placement(transformation(extent={{64,4},{84,24}}),
        iconTransformation(extent={{70,-24},{90,-4}})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput P_therm annotation (Placement(
    transformation(
        origin={0,-70},
        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=270), iconTransformation(
        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=270,
        origin={6,-96})));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler annotation (Placement(
    transformation(
        origin={0,-34},
        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=90)));
BaseModels.Split_n split_n(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-20},{10,0}})));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a heatPort if use_HeatPort
    annotation (Placement(transformation(extent={{-4,6},{16,26}}),
        iconTransformation(extent={{-4,6},{16,26}})));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler1 annotation (Placement(
    transformation(
        origin={38,82},
        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=180)));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch1
    annotation (Placement(transformation(extent={{-4,-4},{4,4}},
        rotation=90,
        origin={-104,8})));
Modelica.Blocks.Logical.Timer timer
    annotation (Placement(transformation(extent={{-5,-5},{5,5}},
        rotation=90,
        origin={-97,-53})));
Modelica.Blocks.Logical.LessThreshold lessThreshold(threshold=15) annotation (
    Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
        origin={-97,-37})));
Modelica.Blocks.Logical.GreaterThreshold greaterThreshold annotation (
    Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
        origin={-105,-37})));
Modelica.Blocks.Logical.And and1 annotation (Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
    
```

```

        origin={-105,-23}));
    Modelica.Blocks.Tables.CombiTable1D combiTable1D(table=[0,0; 15,10000; 16,10000])
    annotation (Placement(transformation(
        extent={{-4,-4},{4,4}},
        rotation=90,
        origin={-118,-38})));
    Modelica.Blocks.Tables.CombiTable1D1 combiTable1D1(table=[0,0; 15,0; 65,1; 66,1])
    annotation (Placement(transformation(
        extent={{-4,-4},{4,4}},
        rotation=90,
        origin={-66,-22})));
    Modelica.Blocks.Tables.CombiTable1D2 combiTable1D2(table=[0,1; 15,1; 65,0; 66,0])
    annotation (Placement(transformation(
        extent={{-4,-4},{4,4}},
        rotation=90,
        origin={-86,-24})));
    Modelica.Blocks.Math.Product product annotation (Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
        origin={-89,-11})));
    Modelica.Blocks.Math.Product product1 annotation (Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
        origin={-75,-11})));
    Modelica.Blocks.Math.Add add annotation (Placement(transformation(
        extent={{-3,-3},{3,3}},
        rotation=90,
        origin={-85,-1})));
    equation
    ##### if use_HeatPort
    #####
    #####
    state_a=Medium.setState_phX(fluidPort_in.p,actualStream(fluidPort_in.h_outflow),actualStream(fluidPort_in.Xi_outflow));
    state_b=Medium.setState_phX(fluidPort_out.p,actualStream(fluidPort_out.h_outflow),actualStream(fluidPort_out.Xi_outflow));
    state_a=state_1E;
    state_b=state_1A;
    product1.u1 = P_fuel;
    P_fuel_real = switch1.y;
    /* Q_flow_dem= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
        if noEvent(switch == false) then 0 else
            if noEvent(time - entryTime < offTime) then 0 else
                fluidPort_in.m_flow*cp*(dT);/- sum(Q_flow_loss);
    Q_flow_b = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
        if noEvent(switch == false) then 0 else
            if noEvent(time - entryTime < offTime) then 0 else
                min(P_heat, max(Q_flow_dem, P_min))- sum(Q_flow_loss);*/
    TimeSwitch=if entryTime<time then true else false;
    Q_flow_dem= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
        if noEvent(switch == false) then 0 else
            if noEvent(TimeSwitch) then 0 else
                fluidPort_in.m_flow*cp*(dT);/- sum(Q_flow_loss);
    Q_flow_b = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
        if noEvent(switch == false) then 0 else
            if noEvent(TimeSwitch) then 0 else
                min(P_heat, max(Q_flow_dem, P_min))+ sum(Q_flow_loss);
    Q_flow_heat = (Q_flow_b - sum(Q_flow_loss));
    Q_flow_loss_room={P_min*f_loss*(max(pipe_simple.heatPort.T) - T_amb) /60};
    Q_flow_loss_exhaust=if noEvent(powerOn == false) then {0} else {P_fuel*(1-eta_h)}-Q_flow_loss_room;
    Q_flow_loss = Q_flow_loss_room+Q_flow_loss_exhaust;
    heatFlow_boiler.Q_flow = -Q_flow_heat;
    P_fuel = Q_flow_heat/eta_h;
    heatFlow_boiler1.Q_flow=sum(Q_flow_loss_room)+kA*(system.T_ambient - heatFlow_boiler1.heatPort.T);
    #####
    ##### Calculation of efficiency #####
    #####
    
```

```

//eta_h=efficiencyFunction(Q_flow_heat);
eta_h=efficiencyFunction(state_a.T);
eta_b_min=eta_h*0.95;
eta_b_x = noEvent(max((max(sum(Q_flow_heat), P_min)/P_heat)^x*eta_h, eta_b_min));
x= if P_min < P_heat then Modelica.Math.log(eta_b_min/eta_h)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1;
#####
##### Energy calculation #####
#####
P_el=P_elC;
Q_flow_real=sum(Q_flow_b);
P_therm=P_fuel*eta_h;
P_elG=0;
Q_flow_demand_gen=0;
Q_flow_real_gen=0;
connect(fluidPort_in, pipe_simple.fluidPort_in) annotation (Line(
  points={{-62,14},{-60.03,14},{-60.03,14.3},{-34,14.3}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_simple.fluidPort_out, fluidPort_out) annotation (Line(
  points={{32,14.3},{59.35,14.3},{59.35,14},{74,14}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_boiler.heatPort, split_n.heatPort_in) annotation (Line(
  points={{3.91887e-016,-27.6},{3.91887e-016,-22.8},{0,-22.8},{0,-19}}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(split_n.heatPort_out, pipe_simple.heatPort) annotation (Line(
  points={{0,-1},{0,13.97},{0.32,13.97}}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_boiler1.heatPort, heatPort) annotation (Line(
  points={{31.6,82},{18.8,82},{18.8,16},{6,16}}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(powerOn, timer.u) annotation (Line(
  points={{-64,-120},{-96,-120},{-96,-59},{-97,-59}},
  color={255,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold.y, and1.u1) annotation (Line(
  points={{-105,-33.7},{-105,-26.6}}},
  color={255,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(lessThreshold.y, and1.u2) annotation (Line(
  points={{-97,-33.7},{-102,-33.7},{-102,-26.6},{-102.6,-26.6}}},
  color={255,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, greaterThreshold.u) annotation (Line(
  points={{-97,-47.5},{-100.5,-47.5},{-100.5,-40.6},{-105,-40.6}}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, lessThreshold.u) annotation (Line(
  points={{-97,-47.5},{-96,-44},{-96,-40.6},{-97,-40.6}}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(and1.y, switch1.u2) annotation (Line(
  points={{-105,-19.7},{-105,-18.85},{-104,-18.85},{-104,3.2}}},
  color={255,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(combiTable1D.u[1], timer.y) annotation (Line(
  points={{-118,-42.8},{-117,-42.8},{-117,-47.5},{-97,-47.5}}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(combiTable1D.y[1], switch1.u1) annotation (Line(
  points={{-118,-33.6},{-118,3.2},{-107.2,3.2}}},
  color={0,0,127},

```



```

    smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, combiTable1D1.u[1]) annotation (Line(
  points={{-97,-47.5},{-97,-47.75},{-66,-47.75},{-66,-26.8}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, combiTable1D2.u[1]) annotation (Line(
  points={{-97,-47.5},{-76.5,-47.5},{-76.5,-28.8},{-86,-28.8}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(combiTable1D.y[1], product.u1) annotation (Line(
  points={{-118,-33.6},{-118,-14.6},{-90.8,-14.6}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(combiTable1D2.y[1], product.u2) annotation (Line(
  points={{-86,-19.6},{-86,-17.1},{-86,-14.6},{-87.2,-14.6}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(product1.u2, combiTable1D1.y[1]) annotation (Line(
  points={{-73.2,-14.6},{-69.6,-14.6},{-69.6,-17.6},{-66,-17.6}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(product.y, add.u1) annotation (Line(
  points={{-89,-7.7},{-89,-6.85},{-86.8,-6.85},{-86.8,-4.6}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(add.u2, product1.y) annotation (Line(
  points={{-83.2,-4.6},{-78.6,-4.6},{-78.6,-7.7},{-75,-7.7}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(add.y, switch1.u3) annotation (Line(
  points={{-85.2,3},{-93.5,2.3},{-93.5,3.2},{-100.8,3.2}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
end CondensingBoiler;
end Boiler;

```

A.3 Stirling

```

model Stirling_new
extends BaseModels.BaseDeviceClass;
extends Statistics.StatModell(n=2);
Modelica.Blocks.Interfaces.BooleanInput heatControlled
  "If true, device is controlled by heat demand else by electricity demand"
annotation (Placement(transformation(
  origin={-61,119},
  extent={{-19,-19},{19,19}},
  rotation=270), iconTransformation(
  extent={{-9,-9},{9,9}},
  rotation=270,
  origin={-69,109})));
Pipes.Pipe_simple pipe_simple(
  redeclare package Medium = Medium,
  V=pipe_volume,
  dp_nom=dp_nom,
  n=n_DIS,
  V_flow_nom_pipe=V_flow_pipe_nom)
annotation (Placement(transformation(extent={{-46,-26},{-4,16}})));
Interface.fluidPort_in fluidPort_in(redeclare package Medium = Medium)
annotation (Placement(transformation(extent={{-90,-14},{-70,6}},
  iconTransformation(extent={{-90,-14},{-70,6}})));
Interface.fluidPort_out fluidPort_out(redeclare package Medium =
  Medium)
annotation (Placement(transformation(extent={{70,-16},{90,4}})));

```

```

    iconTransformation(extent={{70,-16},{90,4}}));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_motor      annotation (Placement(
    transformation(
    origin={-24,-54},
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=90));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_exhaust    annotation (Placement(
    transformation(
    origin={42,-38},
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=90));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput P_therm annotation (Placement(
    transformation(extent={{-10,-10},{10,10}}, rotation=270,
    origin={6,-70}),
    iconTransformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270,
    origin={-32,-98}));
Pipes.Pipe_simple pipe_simple1(
    redeclare package Medium = Medium,
    V=pipe_volume,
    dp_nom=dp_nom,
    n=n_DIS,
    V_flow_nom_pipe=V_flow_pipe_nom)
    annotation (Placement(transformation(extent={{20,-26},{62,16}})));
HeatTransfer.Walls.Wall_planar wall_engine( V=m_engine/wall_engine.rho,
    redeclare record Material =
        Media.SolidMedia.CastIron,
    heatCapacitor(T(start=333.15)))
    annotation (Placement(transformation(
    origin={-22,-36},
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270));
#####
##### Performance data #####
#####
parameter SI.Power P_el_max=0.94e3 "Maximal electrical generation";
parameter Real eta_el(min=0, max=1)=0.14 "Stirlingmotor electrical efficiency"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_h_min(min=0, max=1)=0.82
    "Stirlingmotor heating efficiency at P_min"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_h_max(min=0, max=1)=0.98
    "Stirlingmotor heating efficiency at P_min"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_e_min(min=0, max=1)=eta_el*0.85
    "Stirlingmotor electrical efficiency at P_min"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real heatFrac(min=0, max=1)=0.67
    "Fraction of heat delivered by motor bloc"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Modelica.SIunits.Mass m_engine=1000 "Approximate mass of motor"
    annotation (Dialog(group="Engine data"));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput P_el_G_set(final unit="W") "in Watt"
    annotation (Placement(
    transformation(
    extent={{-20,-20},{20,20}},
    rotation=90,
    origin={60,-120}),iconTransformation(
    extent={{-9,-9},{9,9}},
    rotation=270,
    origin={69,109}));
Medium.ThermodynamicState state_a
    "Thermodynamic states of the inlet of the heater";
Medium.ThermodynamicState state_b

```

```

"Thermodynamic states of the outlet of the heater";
#####
#####
#####
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_engine "Heat flow from motor";
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_exhaust "Heat flow from exhaust";
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_useful;
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_dem_calc;
Modelica.SIunits.Power P_el_real;
Modelica.SIunits.Power P_fuel_real;
Real x_h;
Real x_e;
#####
#####
#####
output Real fullLoadHours(unit="h")
    "annual hours of full load operation (Vollaststunden)";
output Real eta_h_x "Actual efficiency";
output Real eta_e_x "Actual efficiency";
BaseModels.Split_n split_n(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-30,-22},{-18,-10}})));
BaseModels.Split_n split_n1(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{34,-24},{48,-12}})));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a heatPort if use_HeatPort
    annotation (Placement(transformation(extent={{-8,72},{12,92}}),
        iconTransformation(extent={{-8,72},{12,92}})));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler1 annotation (Placement(
    transformation(
        origin={38,82},
        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=180));
Modelica.Fluid.Sensors.TemperatureTwoPort T_a(redeclare package Medium =
    Medium)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-72,16},{-52,36}})));
Modelica.Fluid.Sensors.TemperatureTwoPort T_b(redeclare package Medium =
    Medium) annotation (Placement(transformation(extent={{60,20},{80,40}})));
Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder sensorDynamics_heat(
    k=1,
    y_start=0,
    T=5)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-10,40},{10,60}})));
Modelica.Blocks.Logical.Timer timer
    annotation (Placement(transformation(extent={{14,-62},{24,-52}})));
Modelica.Blocks.Logical.LessThreshold lessThreshold(threshold=75)
    annotation (Placement(transformation(extent={{46,-54},{54,-46}})));
Modelica.Blocks.Logical.GreaterThreshold greaterThreshold(threshold=15)
    annotation (Placement(transformation(extent={{44,-66},{52,-58}})));
Modelica.Blocks.Logical.And and1
    annotation (Placement(transformation(extent={{66,-62},{74,-54}})));
Modelica.Blocks.Sources.Constant const3(k=4350)
    annotation (Placement(transformation(extent={{62,-46},{72,-36}})));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch4
    annotation (Placement(transformation(extent={{128,-76},{138,-66}})));
Modelica.Blocks.Sources.Constant const4(k=90)
    annotation (Placement(transformation(extent={{106,-94},{116,-84}})));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch5
    annotation (Placement(transformation(extent={{104,-62},{114,-52}})));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch6
    annotation (Placement(transformation(extent={{70,-76},{76,-70}})));
Modelica.Blocks.Logical.And and2
    annotation (Placement(transformation(extent={{58,-76},{64,-70}})));
Modelica.Blocks.Logical.LessThreshold lessThreshold1(threshold=245)
    annotation (Placement(transformation(extent={{42,-80},{50,-72}})));
Modelica.Blocks.Sources.Constant const2(k=7100)
    annotation (Placement(transformation(extent={{128,-104},{138,-94}})));
    
```

```

Modelica.Blocks.Sources.Constant const5(k=5900)
  annotation (Placement(transformation(extent={{44,-92},{54,-82}})));
Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder Dynamics_electricity_offl(
  k=1,
  y_start=-38.35,
  T=40)
  annotation (Placement(transformation(extent={{86,-68},{94,-60}})));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch3
  annotation (Placement(transformation(extent={{166,72},{186,92}})));
Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder Dynamics_electricity(
  k=1,
  y_start=-38.35,
  T=70)
  annotation (Placement(transformation(extent={{146,88},{152,94}})));
Modelica.Blocks.Logical.Switch switch7
  annotation (Placement(transformation(extent={{132,72},{142,82}})));
Modelica.Blocks.Sources.Constant const6(
  k=640)
  annotation (Placement(transformation(extent={{94,76},{104,86}})));
Modelica.Blocks.Sources.Constant const7(k=-40)
  annotation (Placement(transformation(extent={{92,52},{102,62}})));
Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder Dynamics_electricity_off(
  k=1,
  y_start=-38.35,
  T=50)
  annotation (Placement(transformation(extent={{146,50},{154,58}})));
Modelica.Blocks.Logical.Timer timer1
  annotation (Placement(transformation(extent={{100,32},{110,42}})));
Modelica.Blocks.Logical.GreaterThreshold greaterThreshold1(threshold=100)
  annotation (Placement(transformation(extent={{118,32},{126,40}})));
equation
state_a=Medium.setState_phX(fluidPort_in.p,actualStream(fluidPort_in.h_outflow),actualStream(fluidPort_in.Xi_outflow));
state_b=Medium.setState_phX(fluidPort_out.p,actualStream(fluidPort_out.h_outflow),actualStream(fluidPort_out.Xi_outflow));
state_a=state_1E;
state_b=state_1A;
// Efficiency
eta_h_x = noEvent(max(( (max(0,Q_flow_engine + Q_flow_exhaust))/P_heat)^x_h*eta_h,
  eta_h_min));
eta_e_x = noEvent(max(((max(0,Q_flow_engine + Q_flow_exhaust))/P_heat)^x_e*eta_e,
  eta_e_min));
assert(Q_flow_engine + Q_flow_exhaust<=P_heat, "Q_up is greater as P_heat");
// Heat Flow
P_el_real = switch3.y;
P_fuel_real = switch4.y;
#####
##### Integral values #####
#####
if heatControlled==true then
Q_flow_dem_calc = fluidPort_in.m_flow*cp*(T_target-T_a.T)+sum(Q_flow_loss);
sensorDynamics_heat.u = if noEvent(T_a.T>T_b.T or T_a.T>T_target) then 0 else Q_flow_dem_calc;
Q_flow_dem = sensorDynamics_heat.y;
//Q_flow_dem=if noEvent(state_a.T>state_b.T or state_a.T>T_target) then 0 else fluidPort_in.m_flow*cp*(dT)+ sum(Q_flow_loss)
;
Q_flow_useful = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
  if noEvent(entryTime<time) then 0 else
  noEvent(min(P_heat, max( Q_flow_dem, P_min)));
P_fuel= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
  if noEvent(entryTime<time) then 0 else (P_elG+Q_flow_useful)/eta_h;
P_elG = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
  if noEvent(entryTime<time) then 0 else
  if noEvent(P_fuel<=0) then 0 else eta_el*P_fuel;
else
    
```

```

P_fuel=(P_elG+Q_flow_dem)/eta_h;
sensorDynamics_heat.u = 0;
Q_flow_dem_calc = 0;
Q_flow_useful = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
      min(P_heat, max( Q_flow_dem, P_min));
P_fuel= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else P_elG/eta_el;
P_elG = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
      P_el_G_set;
//if noEvent(P_fuel<0) then 0 else
end if;
Q_flow_useful=Q_flow_engine + Q_flow_exhaust;
Q_flow_exhaust = (1 - heatFrac)/heatFrac*Q_flow_useful;
heatFlow_exhaust.Q_flow = -Q_flow_exhaust;
heatFlow_motor.Q_flow = -Q_flow_engine;
//heatFlow_exhaust.Q_flow = Q_flow_exhaust;
// heatFlow_motor.Q_flow = Q_flow_engine;
// Stand by losses
Q_flow_loss_room=P_min*f_loss*({max(pipe_simple.heatPort.T),max(pipe_simple1.heatPort.T)} - fill(T_amb, 2))/60;
Q_flow_loss_exhaust= {Q_flow_engine*(1-eta_h), 0};-Q_flow_loss_room;
Q_flow_loss = noEvent(if powerOn == true then Q_flow_loss_room+Q_flow_loss_exhaust else Q_flow_loss_room);
  heatFlow_boiler1.Q_flow=sum(Q_flow_loss_room)+kA*(system.T_ambient - heatFlow_boiler1.heatPort.T);
// Calculation of efficiency
// eta_h=efficiencyFunction2.eta;
// Q_flow_engine + Q_flow_exhaust=efficiencyFunction2.x;
eta_h=efficiencyFunction(Q_flow_engine + Q_flow_exhaust);
x_h=min(0.01, max(if P_min < P_heat then Modelica.Math.log(eta_h_min/eta_h)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1, 1));
x_e=if P_min < P_heat then Modelica.Math.log(eta_e_min/eta_el)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1;
// Output
P_therm = Q_flow_engine + Q_flow_exhaust;
#####
#####   Integral values   #####
#####
Q_flow_real=Q_flow_useful+sum(Q_flow_loss);
fullLoadHours = Q_real/P_heat*1000;
P_el=P_elC;
Q_flow_demand_gen=Q_flow_dem;
Q_flow_real_gen=Q_flow_useful+sum(Q_flow_loss);
connect(pipe_simple.fluidPort_out, pipe_simple1.fluidPort_in) annotation (
  Line(
    points={{-4,-2.9},{12,-2},{12,-2.9},{20,-2.9}},
    color={0,0,255},
    smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_motor.heatPort, wall_engine.heatPort_b) annotation (Line(
  points={{-24,-47.6},{-24,-44},{-22,-44}},
  color={0,0,0},
  smooth=Smooth.None));
initial equation
pre(switch) = false;
pre(entryTime) = 0;
equation
connect(wall_engine.heatPort_a, split_n.heatPort_in) annotation (Line(
  points={{-22,-28},{-22,-24},{-24,-24},{-24,-21.4}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(split_n.heatPort_out, pipe_simple.heatPort) annotation (Line(
  points={{-24,-10.6},{-24,-3.11},{-24.16,-3.11}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_exhaust.heatPort, split_n1.heatPort_in) annotation (Line(

```

```
points={{42,-31.6},{42,-23.4},{41,-23.4}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(split_n1.heatPort_out, pipe_simple1.heatPort) annotation (Line(
points={{41,-12.6},{41,-8.3},{41.84,-8.3},{41.84,-3.11}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_boiler1.heatPort, heatPort) annotation (Line(
points={{31.6,82},{2,82}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(fluidPort_in, T_a.port_a) annotation (Line(
points={{-80,-4},{-78,-4},{-78,26},{-72,26}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(T_a.port_b, pipe_simple.fluidPort_in) annotation (Line(
points={{-52,26},{-50,26},{-50,-2.9},{-46,-2.9}},
color={0,127,255},
smooth=Smooth.None));
connect(pipe_simple1.fluidPort_out, T_b.port_a) annotation (Line(
points={{62,-2.9},{62,30},{60,30}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(T_b.port_b, fluidPort_out) annotation (Line(
points={{80,30},{80,-6}},
color={0,127,255},
smooth=Smooth.None));
connect(powerOn, timer.u) annotation (Line(
points={{-64,-120},{-64,-57},{13,-57}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, lessThreshold.u) annotation (Line(
points={{24.5,-57},{24.5,-53.5},{45.2,-53.5},{45.2,-50}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, greaterThreshold.u) annotation (Line(
points={{24.5,-57},{40.25,-57},{40.25,-62},{43.2,-62}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(timer.y, lessThreshold1.u) annotation (Line(
points={{24.5,-57},{24.5,-66.5},{41.2,-66.5},{41.2,-76}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(lessThreshold.y, and1.u1) annotation (Line(
points={{54.4,-50},{58,-50},{58,-58},{65.2,-58}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold.y, and1.u2) annotation (Line(
points={{52.4,-62},{58.8,-62},{58.8,-61.2},{65.2,-61.2}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold.y, and2.u1) annotation (Line(
points={{52.4,-62},{54,-62},{54,-73},{57.4,-73}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(lessThreshold1.y, and2.u2) annotation (Line(
points={{50.4,-76},{54,-76},{54,-75.4},{57.4,-75.4}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(and2.y, switch6.u2) annotation (Line(
points={{64.3,-73},{69.4,-73}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(const3.y, switch5.u1) annotation (Line(
points={{72.5,-41},{72.5,-44.5},{103,-44.5},{103,-53}},
```

```
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(const4.y, switch4.u3) annotation (Line(
points={{116.5,-89},{123.25,-89},{123.25,-75},{127,-75}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold.y, switch4.u2) annotation (Line(
points={{52.4,-62},{78,-62},{78,-71},{127,-71}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(and1.y, switch5.u2) annotation (Line(
points={{74.4,-58},{78.7,-58},{78.7,-57},{103,-57}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(switch5.y, switch4.u1) annotation (Line(
points={{114.5,-57},{120.25,-57},{120.25,-67},{127,-67}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(const2.y, switch6.u1) annotation (Line(
points={{138.5,-99},{64.25,-99},{64.25,-70.6},{69.4,-70.6}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(const5.y, switch6.u3) annotation (Line(
points={{54.5,-87},{62.25,-87},{62.25,-75.4},{69.4,-75.4}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(switch6.y, Dynamics_electricity_off1.u) annotation (Line(
points={{76.3,-73},{81.15,-73},{81.15,-64},{85.2,-64}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(Dynamics_electricity_off1.y, switch5.u3) annotation (Line(
points={{94.4,-64},{100,-64},{100,-61},{103,-61}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(Dynamics_electricity.y, switch3.u1) annotation (Line(
points={{152.3,91},{153.15,91},{153.15,90},{164,90}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(switch7.y, Dynamics_electricity.u) annotation (Line(
points={{142.5,77},{142.5,92.5},{145.4,92.5},{145.4,91}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(const6.y, switch7.u1)
annotation (Line(
points={{104.5,81},{114,80},{114,81},{131,81}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(const7.y,switch7. u3) annotation (Line(
points={{102.5,57},{102.5,71.5},{131,71.5},{131,73}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(Dynamics_electricity_off.y, switch3.u3) annotation (Line(
points={{154.4,54},{160,54},{160,74},{164,74}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(switch7.y, Dynamics_electricity_off.u) annotation (Line(
points={{142.5,77},{142.5,52.5},{145.2,52.5},{145.2,54}},
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(powerOn, timer1.u) annotation (Line(
points={{-64,-120},{24,-120},{24,37},{99,37}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(timer1.y, greaterThreshold1.u) annotation (Line(
points={{110.5,37},{117.25,37},{117.25,36},{117.2,36}},
```

```
color={0,0,127},
smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold1.y, switch7.u2) annotation (Line(
points={{126,4,36},{128,36},{128,77},{131,77}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(greaterThreshold1.y, switch3.u2) annotation (Line(
points={{126,4,36},{138,36},{138,82},{164,82}},
color={255,0,255},
smooth=Smooth.None));
end Stirling_new;
```

A.4 Otto Motor

```
model CHP
extends Icons.CHPIcon;
extends BaseModels.BaseDeviceClass;
extends Statistics.StatModell(n=2);
Modelica.Blocks.Interfaces.BooleanInput heatControlled
  "If true, device is controlled by heat demand else by electricity demand"
  annotation (Placement(transformation(
origin={-17,119},
extent={{-19,-19},{19,19}},
rotation=270), iconTransformation(
extent={{-9,-9},{9,9}},
rotation=270,
origin={41,37})));
Pipes.Pipe_simple pipe_simple(
  redeclare package Medium = Medium,
  V=pipe_volume,
  dp_nom=dp_nom,
  n=n_DIS,
  V_flow_nom_pipe=V_flow_pipe_nom)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-46,-26},{-4,16}})));
Interface.fluidPort_in fluidPort_in(redeclare package Medium = Medium)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-90,-42},{-70,-22}}),
  iconTransformation(extent={{-90,-42},{-70,-22}})));
Interface.fluidPort_out fluidPort_out(redeclare package Medium =
  Medium)
  annotation (Placement(transformation(extent={{70,-42},{90,-22}}),
  iconTransformation(extent={{70,-42},{90,-22}})));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_motor annotation (Placement(
  transformation(
  origin={-24,-54},
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_exhaust annotation (Placement(
  transformation(
  origin={42,-54},
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput P_therm annotation (Placement(
  transformation(extent={{-10,-10},{10,10}}, rotation=270,
  origin={6,-70}),
  iconTransformation(
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=270,
  origin={0,-100}));
Pipes.Pipe_simple pipe_simple1(
  redeclare package Medium = Medium,
  V=pipe_volume,
  dp_nom=dp_nom,
  n=n_DIS,
```



```

V_flow_nom_pipe=V_flow_pipe_nom)
annotation (Placement(transformation(extent={{20,-26},{62,16}})));
HeatTransfer.Walls.Wall_planar wall_engine( V=m_engine/wall_engine.rho,
redeclare record Material =
    Media.SolidMedia.CastIron)
annotation (Placement(transformation(
    origin={-24,-36},
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=270)));
#####
##### Performance data #####
#####
parameter SI.Power P_el_max=0.94e3 "Maximal electrical generation";
parameter Real eta_el(min=0, max=1)=0.14
    "Electrical efficiency for generating"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_h_min(min=0, max=1)=0.82 "Heating efficiency at P_max"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_h_max(min=0, max=1)=0.98 "Heating efficiency at P_min"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real eta_e_min(min=0, max=1)=eta_el*0.85
    "Electrical efficiency at P_min"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Real heatFrac(min=0, max=1)=0.67
    "Fraction of heat delivered by motor bloc"
    annotation (Dialog(group="Performance data"));
parameter Modelica.SIunits.Mass m_engine=1000 "Approximate mass of motor"
    annotation (Dialog(group="Engine data"));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput P_el_G_set(final unit="W") "in Watt"
    annotation (Placement(
        transformation(
            extent={{-20,-20},{20,20}},
            rotation=270,
            origin={-62,120}),iconTransformation(
            extent={{-9,-9},{9,9}},
            rotation=270,
            origin={-57,35}));#####
##### variables #####
#####
Medium.ThermodynamicState state_a
    "Thermodynamic states of the inlet of the heater";
Medium.ThermodynamicState state_b
    "Thermodynamic states of the outlet of the heater";
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_engine "Heat flow from motor";
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_exhaust "Heat flow from exhaust";
Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow_useful;
Real x_h;
Real x_e;
#####
#####
#####
output Real fullLoadHours(unit="h")
    "annual hours of full load operation (Vollaststunden)";
output Real eta_h_x "Actual efficiency";
output Real eta_e_x "Actual efficiency";
BaseModels.Split_n split_n(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{-30,-22},{-18,-10}})));
BaseModels.Split_n split_n1(n=n_DIS)
    annotation (Placement(transformation(extent={{34,-30},{48,-18}})));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a heatPort if use_HeatPort
    annotation (Placement(transformation(extent={{-4,72},{16,92}}),
        iconTransformation(extent={{-10,4},{10,24}})));
BaseModels.HeatFlow heatFlow_boiler1 annotation (Placement(
    transformation(
        origin={38,82},
    
```

```

        extent={{-10,-10},{10,10}},
        rotation=180));
equation
state_a=Medium.setState_phX(fluidPort_in.p,actualStream(fluidPort_in.h_outflow),actualStream(fluidPort_in.Xi_outflow));
state_b=Medium.setState_phX(fluidPort_out.p,actualStream(fluidPort_out.h_outflow),actualStream(fluidPort_out.Xi_outflow));
state_a=state_1E;
state_b=state_1A;
// Efficiency
eta_h_x = noEvent(max(( (max(0,Q_flow_engine + Q_flow_exhaust))/P_heat)^x_h*eta_h,
eta_h_min));
eta_e_x = noEvent(max(((max(0,Q_flow_engine + Q_flow_exhaust))/P_heat)^x_e*eta_e,
eta_e_min));
assert(Q_flow_engine + Q_flow_exhaust<=P_heat, "Q_up is greater as P_heat");
// Heat Flow
#####
##### Integral values #####
#####
if heatControlled==true then
Q_flow_dem=if noEvent(state_a.T>state_b.T) then 0 else fluidPort_in.m_flow*cp*(dT)+ sum(Q_flow_loss);
Q_flow_useful = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
        min(P_heat, max( Q_flow_dem, P_min));
P_fuel= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else (P_elG+Q_flow_useful)/eta_h;
P_elG = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
    if noEvent(P_fuel<=0) then 0 else eta_el*P_fuel;
else
P_fuel=(P_elG+Q_flow_dem)/eta_h;
Q_flow_useful = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
        min(P_heat, max( Q_flow_dem, P_min));
P_fuel= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else P_elG/eta_el;
P_elG = if noEvent(powerOn == false) then 0 else
    if noEvent(switch == false) then 0 else
    if noEvent(entryTime<time) then 0 else
        P_el_G_set;
//if noEvent(P_fuel<0) then 0 else
end if;
Q_flow_useful=Q_flow_engine + Q_flow_exhaust;
Q_flow_exhaust = (1 - heatFrac)/heatFrac*Q_flow_useful;
heatFlow_exhaust.Q_flow = -Q_flow_exhaust;
heatFlow_motor.Q_flow = -Q_flow_engine;
//heatFlow_exhaust.Q_flow = Q_flow_exhaust;
//heatFlow_motor.Q_flow = Q_flow_engine;
// Stand by losses
Q_flow_loss_room=P_min*f_loss*({max(pipe_simple.heatPort.T),max(pipe_simple1.heatPort.T)} - fill(T_amb, 2))/60;
Q_flow_loss_exhaust= {Q_flow_engine*(1-eta_h), 0}-Q_flow_loss_room;
Q_flow_loss = noEvent(if powerOn == true then Q_flow_loss_room+Q_flow_loss_exhaust else Q_flow_loss_room);
heatFlow_boiler1.Q_flow=sum(Q_flow_loss_room)+kA*(system.T_ambient - heatFlow_boiler1.heatPort.T);
// Calculation of efficiency
eta_h=efficiencyFunction(Q_flow_engine + Q_flow_exhaust);
//eta_el=efficiencyFunction(P_el);
x_h=min(0.01, max(if P_min < P_heat then Modelica.Math.log(eta_h_min/eta_h)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1, 1));
x_e=if P_min < P_heat then Modelica.Math.log(eta_e_min/eta_el)/Modelica.Math.log(P_min/P_heat) else 1;
// Output
P_therm = Q_flow_engine + Q_flow_exhaust;
#####
##### Integral values #####

```

```
#####
Q_flow_real=Q_flow_useful+sum(Q_flow_loss);
fullLoadHours = Q_real/P_heat*1000;
P_el=P_elC;
Q_flow_demand_gen=Q_flow_useful;
Q_flow_real_gen=Q_flow_useful;
connect(fluidPort_in, pipe_simple.fluidPort_in) annotation (Line(
  points={{-80,-32},{-50,-32},{-50,-2.9},{-46,-2.9}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_simple.fluidPort_out, pipe_simple1.fluidPort_in) annotation (
  Line(
  points={{-4,-2.9},{12,-2},{12,-2.9},{20,-2.9}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_simple1.fluidPort_out, fluidPort_out) annotation (Line(
  points={{62,-2.9},{64.95,-2.9},{64.95,-32},{80,-32}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_motor.heatPort, wall_engine.heatPort_b) annotation (Line(
  points={{-24,-47.6},{-24,-44}},
  color={0,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(wall_engine.heatPort_a, split_n.heatPort_in) annotation (Line(
  points={{-24,-28},{-24,-21.4}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(split_n.heatPort_out, pipe_simple.heatPort) annotation (Line(
  points={{-24,-10.6},{-24,-3.11},{-24.16,-3.11}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_exhaust.heatPort, split_n1.heatPort_in) annotation (Line(
  points={{42,-47.6},{42,-29.4},{41,-29.4}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(split_n1.heatPort_out, pipe_simple1.heatPort) annotation (Line(
  points={{41,-18.6},{41,-12.3},{41.84,-12.3},{41.84,-3.11}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
initial equation
pre(switch) = false;
pre(entryTime) = 0;
equation
connect(heatFlow_boiler1.heatPort, heatPort) annotation (Line(
  points={{31.6,82},{6,82}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
end CHP;
```

A.5 WP

```
model GasHeatPump
"gas-engine-driven heat pump, constant compressor speed"
extends HVAC_GWI_v1_0.BaseModels.BaseDeviceClass(redeclare package Medium=Medium_2,
  redeclare function efficiencyFunction =
    HVAC_GWI_v1_0.Functions.Efficiency.ConstantEfficiency (eta_const=eta_h_const));
extends HVAC_GWI_v1_0.Statistics.StatModell(n=1);
#####
#####
#####
replaceable package Medium_1 =
Modelica.Media.Water.ConstantPropertyLiquidWater constrainedby
  Modelica.Media.Interfaces.PartialSimpleMedium "Medium of HEX1"
```

```

    annotation (choicesAllMatching=true);
  replaceable package Medium_2 =
    Modelica.Media.Water.ConstantPropertyLiquidWater constrainedby
      Modelica.Media.Interfaces.PartialSimpleMedium "Medium of HEX2"
    annotation (choicesAllMatching=true);
  replaceable model Refrigerant =
    HVAC_GWI_v1_0.Components.GasHeatPump.Functions.R134a constrainedby
      HVAC_GWI_v1_0.Components.GasHeatPump.Functions.Refrigerant
      "Medium of the heat system"
    annotation (choicesAllMatching=true);
  #####
  ##### parameters #####
  #####
  parameter Real P_Mot_max=3000 "Maximal motor power";
  parameter Real eta_v(min=0.01, max=1)=0.99
    "Efficiency of coupling between the compressor and gas engine";
  parameter Real eta_M(min=0.01, max=0.7)=0.3
    "Efficiency of the gas engine | eta_M=P_mech/P_fuel";
  parameter Real eta_h_const(min=0.01, max=1)=0.95
    "Heat-
  ing efficiency in the condenser of the heat pump | eta_h_const = (Q_flow_2_used/Q_flow_2)=(Q_flow_1_used/Q_flow_1)";
  parameter Real eta_h_GM(min=0.01, max=1)=1-eta_M
    "Heating efficiency in the gas motor | eta_h_GM = (P_mech+Q_flow_GM)/P_fuel";
  parameter SI.TemperatureDifference delta_t1(min=0)=5
    "Temperature difference on HEX1| delta_t1=abs(theta_c-t_1E)";
  parameter SI.TemperatureDifference delta_t2(min=0)=5
    "Temperature difference on HEX2| delta_t2=abs(theta_0-t_2E)";
  parameter Real eta_evap = 0.5
    "Evaporator temperature efficiency | abs(t_1_A-t_1_E) = eta_evap * delta_t1";
  parameter Real eta_cond = 0.5
    "Condenser temperature efficiency | abs(t_2_A-t_2_E) = eta_cond * delta_t2";
  /*parameter SI.TemperatureDifference delta_1=4
    "Temperature difference on HEX1| delta_t1=abs(t_1A-t_1E)";
  parameter SI.TemperatureDifference delta_2=4
    "Temperature difference on HEX2| delta_t2=abs(t_2A-t_2E)";*/
  parameter SI.Volume pipe_volume2= 0.02 "Volume of a heat exchanger" annotation (Dialog(group="HEX2 properties"));
  parameter SI.Temp_C t_amb_min=-20 "minimal ambient temperature";
  /*parameter SI.MassFlowRate m_dot_max1=1 "Max. mass flow rate at HEX 1";
  parameter SI.MassFlowRate m_dot_max2=1 "Max. mass flow rate at HEX 2";*/
  /*SI.HeatFlowRate Q_flow_1_max=m_dot_max1*Medium.specificHeatCapacityCp(state_1E)*delta_1;
  SI.HeatFlowRate Q_flow_2_max=m_dot_max2*Medium.specificHeatCapacityCp(state_2E)*delta_2;*/
  SI.HeatFlowRate Q_flow_1_max=fluidPort_1E.m_flow*Medium_1.specificHeatCapacityCp(state_1E)*eta_evap*delta_t1;
  SI.HeatFlowRate Q_flow_2_max=fluidPort_2E.m_flow*Medium_2.specificHeatCapacityCp(state_2E)*eta_cond*delta_t2;
protected
  parameter SI.MassFlowRate m_flow_min=1e-10 "min. mass flow rate";
  #####
  ##### variables #####
  #####
public
  SI.HeatFlowRate Q_flow_dem;
  SI.Heat Q_dem;
  SI.Power P_Mot "Power of the gas motor";
  SI.HeatFlowRate Q_flow_heat;
  SI.HeatFlowRate Q_flow_GM "Heat flow rate of the gas motor";
  SI.Heat Q_GM "GM energy";
  Medium.ThermodynamicState state_2E
    "Thermodynamic states of the inlet of the heater";
  Medium.ThermodynamicState state_2A
    "Thermodynamic states of the outlet of the heater";
  SI.SpecificEnthalpy h_set "Specific enthalpy that is to be reach";
  Boolean TimeSwitch(start=false, fixed = true)
    "Boolean variable which enables or disables the heater";
  Boolean switch2(start=true);
  SI.Time entryTime2 "Time instant when powerOn became false";
protected
  parameter Real Time_const=3600;

```

```

parameter Real W_in_kW=1000;
public
HVAC_GWI_v1_0.Components.Pipes.Pipe_simple pipe_21(
  redeclare package Medium = Medium,
  V=pipe_volume,
  n=1)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-86,-98},{-32,-44}})));
HVAC_GWI_v1_0.Interface.fluidPort_out fluidPort_2A(redeclare package Medium
= Medium)
  annotation (Placement(transformation(extent={{50,-80},{70,-60}}),
  iconTransformation(extent={{92,-80},{112,-60}})));
HVAC_GWI_v1_0.Interface.fluidPort_in fluidPort_2E(redeclare package Medium =
Medium)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-130,-80},{-110,-60}}),
  iconTransformation(extent={{-90,-80},{-70,-60}})));
Modelica.Blocks.Interfaces.BooleanInput OperatingMode
  "if true heating else cooling" annotation (Placement(transformation(extent={{-20,-20},
  {20,20}},
  rotation=270,
  origin={-60,120}), iconTransformation(extent={{-9,-9},{9,9}},
  rotation=270,
  origin={-55,87})));
HVAC_GWI_v1_0.Components.Pipes.Pipe_simple pipe_1(
  redeclare package Medium = Medium_1,
  V=pipe_volume2,
  n=1)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-86,40},{-32,94}})));
HVAC_GWI_v1_0.Interface.fluidPort_in fluidPort_1E(redeclare package Medium =
Medium_1)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-130,60},{-110,80}}),
  iconTransformation(extent={{-90,50},{-70,70}})));
HVAC_GWI_v1_0.Interface.fluidPort_out fluidPort_1A(redeclare package Medium
= Medium_1)
  annotation (Placement(transformation(extent={{50,60},{70,80}}),
  iconTransformation(extent={{90,50},{110,70}})));
HVAC_GWI_v1_0.BaseModels.Split_n split_n2(
  n=n_DIS) annotation (Placement(transformation(
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=180,
  origin={18,-48})));
HVAC_GWI_v1_0.Components.Pipes.Pipe_simple pipe_22(
  redeclare package Medium = Medium,
  V=pipe_volume,
  n=n_DIS)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-98},{44,-44}})));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a heatPort if use_HeatPort
  annotation (Placement(transformation(extent={{-12,74},{8,94}}),
  iconTransformation(extent={{-4,72},{16,92}})));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.PrescribedHeatFlow heatFlow_amb(T_ref=393.15,
  alpha=1) "Heat flow rate to the ambient" annotation (Placement(
  transformation(
  origin={30,84},
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=180));
HVAC_GWI_v1_0.Components.GasHeatPump.RefrigerationCycle RefCycle(
  OperatingMode=OperatingMode,
  t_amb_min=t_amb_min,
  delta_tc=delta_t1,
  delta_t0=delta_t2,
  redeclare model Refrigerant = Refrigerant,
  T_KE(displayUnit="K") = state_1E.T,
  T_WE(displayUnit="K") = state_2E.T,
  P_comp_max=P_Mot_max,
  Q_flow_1_max=Q_flow_1_max,
  Q_flow_2_max=Q_flow_2_max,

```

```

Q_flow_heat_dem=Q_flow_heat - sum(Q_flow_loss) "Refrigeration Cycle"
  annotation (Placement(transformation(
    extent={{-33,-30},{33,30}},
    rotation=180,
    origin={{-64,0}}));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.PrescribedHeatFlow heatFlow_GM(
  T_ref=393.15) annotation (Placement(
    transformation(
      extent={{-10,-10},{10,10}},
      rotation=270,
      origin={{18,-16}}));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Q_flow_dem_out
  annotation (Placement(transformation(extent={{-20,-20},{20,20}},
    rotation=180,
    origin={{-142,0}}, iconTransformation(
      extent={{-20,-20},{20,20}},
      rotation=180,
      origin={{-120,0}}));
equation
if OperatingMode == true then
  if ((pre(switch2) == true) and (state_2A.T > T_target + dT_hyst)) then
    switch2 = false;
  elseif ((pre(switch2) == false) and (state_2A.T < T_target - dT_hyst)) then
    switch2 = true;
  else
    switch2 = pre(switch2);
  end if;
else
  if ((pre(switch2) == true) and (state_2A.T < T_target - dT_hyst)) then
    switch2 = false;
  elseif ((pre(switch2) == false) and (state_2A.T > T_target + dT_hyst)) then
    switch2 = true;
  else
    switch2 = pre(switch2);
  end if;
end if;
entryTime2=if noEvent(not powerOn or switch2) then time else delay(time,offTime);
state_1E=Medium_1.setState_phX(fluidPort_1E.p,actualStream(fluidPort_1E.h_outflow),actualStream(fluidPort_1E.Xi_outflow));
state_1A=Medium_1.setState_phX(fluidPort_1A.p,actualStream(fluidPort_1A.h_outflow),actualStream(fluidPort_1A.Xi_outflow));
state_2E=Medium.setState_phX(fluidPort_2E.p,actualStream(fluidPort_2E.h_outflow),actualStream(fluidPort_2E.Xi_outflow));
state_2A=Medium.setState_phX(fluidPort_2A.p,actualStream(fluidPort_2A.h_outflow),actualStream(fluidPort_2A.Xi_outflow));/*
*/
TimeSwitch=if entryTime2<time then true else false;
#####
#####
#####
h_set=Medium.specificEnthalpy_pTX(1e5,T_target,Medium.reference_X);
Q_flow_dem= max(1e-20,((fluidPort_2E.m_flow*(h_set-inStream(fluidPort_2E.h_outflow)))-Q_flow_GM));
#####
#####
#####
RefCycle.P_comp = P_Mot*eta_v;
P_fuel=P_Mot/eta_M;
Q_flow_dem_out=Q_flow_dem;
heatFlow_GM.Q_flow=if noEvent(OperatingMode == true) then Q_flow_GM else 0;
P_fuel=(Q_flow_GM+P_Mot)/eta_h_GM;
Q_flow_heat= if noEvent(powerOn == false) then 0 else
  if noEvent(switch2 == false) then 0 else
    if noEvent(TimeSwitch) then 0 else
      min(P_heat, max(Q_flow_dem, P_min))+ sum(Q_flow_loss);
  // if OperatingMode==true then min(Q_flow_dem,Q_flow_1_max) else min(Q_flow_dem+sum(Q_flow_loss),Q_flow_2_max);
Q_flow_loss_room=P_heat*f_loss*({max(pipe_21.heatPort.T)} - fill(system.T_ambient, n))/60;
Q_flow_loss_exhaust={Q_flow_heat*(1-eta_h)}-Q_flow_loss_room;
Q_flow_loss = noEvent(if powerOn == true then Q_flow_loss_room+Q_flow_loss_exhaust else Q_flow_loss_room);
heatFlow_amb.Q_flow=sum(P_heat*f_loss*({max(pipe_21.heatPort.T)} - fill(system.T_ambient, n))/60);

```

```

eta_h=efficiencyFunction(Q_flow_heat);
#####
##### Integral values #####
#####
3.6e6*der(Q_GM)=Q_flow_GM;
Q_flow_real = Q_flow_heat;
P_el = P_elC;
P_elG = 0;
Q_flow_demand_gen = Q_flow_heat;
Q_flow_real_gen = Q_flow_heat+sum(Q_flow_loss);
3.6e6*der(Q_dem) = Q_flow_dem;
connect(heatFlow_GM.port, split_n2.heatPort_in) annotation (Line(
  points={{18,-26},{18,-32.5},{18,-32.5},{18,-39}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(split_n2.heatPort_out, pipe_22.heatPort) annotation (Line(
  points={{18,-57},{18,-68.57},{18.08,-68.57}},
  color={0,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(RefCycle.port_cond, pipe_21.heatPort[1]) annotation (Line(
  points={{-58,-27},{-58,-68.57},{-57.92,-68.57}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(RefCycle.port_evap, pipe_1.heatPort[1]) annotation (Line(
  points={{-58,27},{-57.92,27},{-57.92,69.43}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_21.fluidPort_out, pipe_22.fluidPort_in) annotation (Line(
  points={{-32,-68.3},{-21,-68.3},{-21,-68.3},{-10,-68.3}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_22.fluidPort_out, fluidPort_2A) annotation (Line(
  points={{44,-68.3},{52,-68.3},{52,-70},{60,-70}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluidPort_2E, pipe_21.fluidPort_in) annotation (Line(
  points={{-120,-70},{-104,-70},{-104,-68.3},{-86,-68.3}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluidPort_1E, pipe_1.fluidPort_in) annotation (Line(
  points={{-120,70},{-103,70},{-103,69.7},{-86,69.7}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(pipe_1.fluidPort_out, fluidPort_1A) annotation (Line(
  points={{-32,69.7},{10,69.7},{10,70},{60,70}},
  color={0,0,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(heatFlow_amb.port, heatPort) annotation (Line(
  points={{20,84},{-2,84}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
end GasHeatPump;

```

A.6 Wärmespeicher

```

model HeatStorage
import SINON = Modelica.SIunits.Conversions.NonSIunits;
import SI = Modelica.SIunits;
import PI = Modelica.Constants.pi;
replaceable package Medium_pipe =
  Modelica.Media.Water.ConstantPropertyLiquidWater
constrainedby Modelica.Media.Interfaces.PartialMedium
"kind of medium in the heattransfer pipe"

```

```

    annotation(choicesAllMatching);
    replaceable package Medium_tank =
        Modelica.Media.Water.ConstantPropertyLiquidWater
    constrainedby Modelica.Media.Interfaces.PartialMedium
    "Kind of medium in the tank" annotation(choicesAllMatching);
    #####
    ##### parameters public #####
    #####
    parameter Boolean use_HeatPort=false
    "Boole-
    an parameter activate heat transfer to the enviroment " annotation(Dialog(group="Heat transfer"), choices(ch
    eckBox=true));
    parameter Integer n=2 "Number of elements";
    parameter SI.Diameter D_i=500/1000 "Inside tank diameter in m" annotation(Dialog(group="Tank geometry"));
    parameter SI.Diameter D_a= 610/1000 "Outside tank diameter in m" annotation(Dialog(group="Tank geometry"));
    parameter SINON.Volume_litre V_gl=150 "Volume of the whole in litre" annotation(Dialog(group="Tank geometry"));
    parameter Real fraction=1/2
    "volume ratio| v1=V_g*fraction , v2=v1=V_g*(1-fraction)" annotation(Dialog(group="Tank geometry"));
    protected
    parameter SI.ThermalConductance U_pipe=1000 "for one element" annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = use_U));
    parameter SI.ThermalConductance U_tank=0 "for one element" annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = use_U));
    parameter SI.ThermalConductance U_top=0 "for one element" annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = use_U));
    public
    parameter SI.CoefficientOfHeatTransfer k_tank(min=1e-10)=10
    "The coefficient of heat transfer of the tank"annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = not use_U));
    parameter SI.CoefficientOfHeatTransfer k_pipe(min=1e-10)=10
    "The coefficient of heat transfer of the heat pipe"annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = not use_U));
    parameter Boolean LayerHeatTransfer=false
    "Choice between constant and variable heat transfer coefficient" annotation(Dialog(group="Heat transfer"), choices(checkBox=tru
    e));
    parameter SI.CoefficientOfHeatTransfer alpha_lam=100
    "The coefficient of heat transfer in one layer" annotation(Dialog(group="Heat transfer", enable = not LayerHeatTransfer));
    parameter SI.Pressure dp_nom_pipe=5000 "Nominal pressure loss" annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter"));
    parame-
    ter SI.VolumeFlowRate V_flow_nom_pipe=3/3600 "Nominal volume flow rate" annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter"));
    parameter Boolean use_V = true annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter"), choices(checkBox=true));
    parame-
    ter SI.Volume V_pipe=L_pipe*PI*(d_pipe/2)^2 "Volume of a pipe"annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter",enable= use_V)
    );
    parameter SI.Length d_pipe=0.02 "Diameter of the heat pipe" annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter",enable= not use_V));
    parameter SI.Length L_pipe=1 "Length of the heat pipe" annotation(Dialog(group="Heatpipe parameter",enable= not use_V));
    parameter Boolean T_Messure=true
    "where is the measured temperature| Outlet = true; Inlet=false";
    #####
    ##### parameters protected #####
    #####
    protected
    parameter SI.Volume V_1= V_g*fraction "total volume of a tank";
    parameter SI.Volume V_2= V_g*(1-fraction) "total volume of a tank";
    parameter SI.Volume V_g= V_gl/1000 "total volume of a tank in m^3";
    parameter SI.Volume dV1=V_1/n "of volume element" annotation(Dialog(group="Geometry", enable=false));
    parameter SI.Volume dV2=V_2/n "of volume element" annotation(Dialog(group="Geometry", enable=false));
    parameter SI.Length h=V_g/A_quer "Height of the whole tank";
    parameter SI.Area A_Tank_Mantel=PI*(D_a/2+D_i/2)*h
    "lateral surface of the whole tank";
    parameter SI.Area dA_Tank_Mantel_upper=fraction*A_Tank_Mantel/n
    "lateral surface of a discretized element from the tank";
    parameter SI.Area dA_Tank_Mantel_lower=(1-fraction)*A_Tank_Mantel/n
    "lateral surface of a discretized element from the tank";
    parameter SI.Area A_top=PI*((D_i/2+D_a/2)/2)^2 "Top area";
    parameter SI.Area A_pipe_Mantel=L_pipe*PI*d_pipe
    "lateral surface of the heat pipe";
    parameter SI.Area dA_pipe_Mantel=A_pipe_Mantel/n
    "lateral surface of a discretized element from the heat pipe";
    //parameter SI.ThermalConductance U_pipe_A= if use_U==true then U_pipe else k_pipe*dA_pipe_Mantel
    
```



```

parameter SI.ThermalConductance U_pipe_A= k_pipe*dA_pipe_Mantel
  "for one discretized element";
//parameter SI.ThermalConductance U_tank_A= if use_U==true then U_tank else dA_Tank_Mantel*k_tank
parameter SI.ThermalConductance U_tank_A_upper= dA_Tank_Mantel_upper*k_tank
  "for one discretized element";
parameter SI.ThermalConductance U_tank_A_lower= dA_Tank_Mantel_lower*k_tank
  "for one discretized element";
//parameter SI.ThermalConductance U_top_A= if use_U==true then U_top else k_tank*A_top
parameter SI.ThermalConductance U_top_A= k_tank*A_top
  "for one discretized element";
parameter SI.Area A_quer=PI*D_i^2/4 "Querschnittsfläche";
//parameter SI.CoefficientOfHeatTransfer[2] alpha_s= {10,10} "The coefficient of heat transfer in one layer";
parameter SI.Area A_schicht=A_quer "Layer area";
#####
##### variables #####
#####
public
Medium_tank.ThermodynamicState state_a;
Medium_tank.ThermodynamicState state_b;
Medium_tank.ThermodynamicState state_b_pipe12;
Medium_tank.ThermodynamicState state_b_pipe11;
SI.HeatFlowRate Q_flow_heat;
SI.HeatFlowRate Q_flow_heat_pipe1;
SI.HeatFlowRate Q_flow_heat_servWater;
SI.HeatFlowRate Q_flow_loss;
Types.Work Q_loss;
Types.Work Q_heat;
Types.Work Q_flow_servWater;
Types.Work Q_pipe1;
Interface.fluidPort_in flowPort_in(redeclare package Medium =
  Medium_tank) annotation (Placement(transformation(extent={{0,-100},
    {20,-80}})),
  iconTransformation(extent={{0,-100},{20,-80}}));
Interface.fluidPort_out flowPort_out(redeclare package Medium =
  Medium_tank) annotation (Placement(transformation(extent={{0,80},{
    20,100}})), iconTransformation(extent={{0,80},{20,100}}));
Interface.fluidPort_out flowPort_out_pipe1(redeclare package Medium =
  Medium_pipe) annotation (Placement(transformation(extent={{60,20},{80,40}})),
  iconTransformation(extent={{54,50},{64,60}}));
Interface.fluidPort_in flowPort_in_pipe1(redeclare package Medium =
  Medium_pipe) annotation (Placement(transformation(extent={{60,60},{80,80}})),
  iconTransformation(extent={{54,66},{64,76}}));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput T_out(final unit="K") "in Kelvin"
  annotation (Placement(
    transformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=180,
    origin={-60,64}),
    iconTransformation(
    extent={{-10,-10},{10,10}},
    rotation=180,
    origin={-60,64}));
HVAC_GWI_v1_0.Components.Storage.BaseVolume.Volume volume2(
  D_i=D_i,
  empty_volume=true,
  V=V_2,
  n=n,
  U_pipe=U_pipe_A,
  A=A_quer,
  LayerHeatTransfer=LayerHeatTransfer,
  redeclare package Medium_pipe = Medium_tank,
  redeclare package Medium_tank = Medium_tank,
  A_schicht=A_schicht,
  alpha_lam=alpha_lam,
  U_tank=U_tank_A_lower)
  annotation (Placement(transformation(extent={{-18,-42},{22,-2}}));
HVAC_GWI_v1_0.Components.Storage.BaseVolume.Volume volume1(

```

```

D_i=D_i,
V=V_1,
n=n,
U_pipe=U_pipe_A,
A=A_quer,
LayerHeatTransfer=LayerHeatTransfer,
dp_nom_pipe=dp_nom_pipe,
V_pipe=V_pipe,
V_flow_nom_pipe=V_flow_nom_pipe,
redeclare package Medium_pipe = Medium_tank,
redeclare package Medium_tank = Medium_tank,
A_schicht=A_schicht,
alpha_lam=alpha_lam,
U_tank=U_tank_A_upper)
annotation (Placement(transformation(extent={{-18,20},{22,60}})));
protected
parameter SI.CoefficientOfHeatTransfer alpha_c=alpha_lam;
public
BaseClasses.heat_resistance heat_resistance2(U=U_top_A)
annotation (Placement(transformation(extent={{18,66},{38,86}})));
BaseClasses.heat_resistance heat_resistance1(U=U_top_A)
annotation (Placement(transformation(extent={{-54,-62},{-34,-42}})));
Interface.HeatPort heatPort2[2*n + 2] if
use_HeatPort annotation (Placement(transformation(extent={{-66,10},
{-46,30}})),
iconTransformation(extent={{-60,30},{-40,50}}));
equation
state_a=Medium_tank.setState_phX(flowPort_in.p,actualStream(flowPort_in.h_outflow),actualStream(flowPort_in.Xi_outflow));
state_b=Medium_tank.setState_phX(flowPort_out.p,actualStream(flowPort_out.h_outflow),actualStream(flowPort_out.Xi_outflow));
state_b_pipe11=Medium_tank.setState_phX(flowPort_in_pipe1.p,actualStream(flowPort_in_pipe1.h_outflow),actualStream(flowPort_out_pipe1.Xi_outflow));
state_b_pipe12=Medium_tank.setState_phX(flowPort_out_pipe1.p,actualStream(flowPort_out_pipe1.h_outflow),actualStream(flowPort_in_pipe1.Xi_outflow));
T_out=if T_Messure then state_b.T else state_a.T;
Q_flow_heat= sum(volume1.nPipe.heatPort[i].Q_flow for i in 1:n);
Q_flow_heat_servWater=(state_b.T-state_a.T)*Medium_tank.cp_const*flowPort_in.m_flow;
3.6e6*der(Q_flow_servWater)= Q_flow_heat_servWater;
Q_flow_heat_pipe1=(actualStream(flowPort_out_pipe1.h_outflow)-
actualStream(flowPort_in_pipe1.h_outflow))*flowPort_out_pipe1.m_flow;
3.6e6*der(Q_pipe1)=Q_flow_heat_pipe1;
Q_flow_loss= sum( volume1.heatPort2[i].Q_flow for i in 1:n)+sum( volume2.heatPort2[i].Q_flow for i in 1:n)+volume1.heatPort.
Q_flow+volume2.heatPort1.Q_flow;
3.6e6*der(Q_loss)= Q_flow_loss;
3.6e6*der(Q_heat)= Q_flow_heat;
connect(volume1.flowPort_in_pipe, flowPort_out_pipe1)
annotation (Line(
points={{21.6,29.6},{60,32},{66,32},{66,30},{70,30}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume1.flowPort_out_pipe, flowPort_in_pipe1)
annotation (Line(
points={{21.6,48.8},{45.8,48.8},{45.8,70},{70,70}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume1.flowPort_out, flowPort_out) annotation (Line(
points={{-3.6,58},{-4,58},{-4,76},{10,76},{10,90}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
for i in 1:n loop
connect(volume2.heatPort2[i], heatPort2[i+1]) annotation (Line(
points={{-16.8,-21.2},{-16,-20},{-56,-20},{-56,20}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume1.heatPort2[i], heatPort2[i+1+n]) annotation (Line(

```

```

points={{-16.8,40.8},{-56,40.8},{-56,20}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
end for;
connect(heat_resistance2.IN, volume1.heatPort) annotation (Line(
points={{37.8,68.8},{37.8,58.1},{7.8,58.1}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(heat_resistance2.OUT, heatPort2[2*n+2]) annotation (Line(
points={{18.4,68.8},{-56,68.8},{-56,20}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(heat_resistance1.OUT, heatPort2[1]) annotation (Line(
points={{-53.6,-59.2},{-56,-59.2},{-56,20}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume1.flowPort_in, volume2.flowPort_out) annotation (Line(
points={{-4,22},{-4,-4},{-3.6,-4}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume1.heatPort1, volume2.heatPort) annotation (Line(
points={{7.8,22},{7.8,15.525},{7.8,15.525},{7.8,9.05},{7.8,-3.9},{7.8,-3.9}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume2.heatPort1, heat_resistance1.IN) annotation (Line(
points={{7.8,-40},{8,-40},{8,-59.2},{-34.2,-59.2}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));
connect(volume2.flowPort_in, flowPort_in) annotation (Line(
points={{-4,-40},{4,-40},{4,-90},{10,-90}},
color={0,0,255},
smooth=Smooth.None));

end HeatStorage;

```

A.7 Solarkollektor

model SolarPanel

"The model SolarPanel describes a line of solar panels connected in series to calculate the resulting heat flow of incoming solar radiation."

```

import SI = Modelica.SIunits;
replaceable package Medium =
  Modelica.Media.Incompressible.Examples.Glycol47
  "Medium model, The model may only be used with table based media.";
// General parameter
parameter Integer n(min=1)=2 "number of discrete elements";
parameter Integer Ns=1 "number of collectors in series";
parameter SI.Mass mp=52 "mass of one panel";
parameter SI.Length B=1.056 "width of panel";
final parameter SI.Length Umf=2*(L/(n+1)+B) "circumference of collector";
final parameter SI.Length L=2.380*Ns "length of all panels in series";
parameter SI.Length dl_absorber=0.0002
  "thickness of absorber (copper) layer: 0.2mm";
parameter SI.Area As_absorber=dl_absorber*B "side area of absorber layer";
parameter SI.ThermalConductivity lambda_absorber=401; //copper 401
parameter SI.SpecificHeatCapacity cp_absorber=385;
parameter SI.Density rho_absorber=8920;
parameter SI.Volume V_absorber=dl_absorber*Aq;
final parameter SI.Mass m_absorber=V_absorber*rho_absorber;
parameter SI.Temperature T_medium_0 = 308.15;
//Meander pipe (M)
parameter SI.Volume V_mediumM=1.11E-3
  "volume of heat transfer medium in meander pipe of 1 panel -> Viessmann";

```

```

parameter SI.Diameter di_pipeM=0.0082 "inner diameter of meander pipe";
final parameter SI.Area A_pipeM=Modelica.Constants.pi/4*di_pipeM^2;
final parameter SI.Length l_totalM=21*Ns
  "total length of meander pipe of all collectors in series, 21 for 1 collector -> Viessmann";
final parameter SI.Length l_iM=l_totalM/n;
final parameter SI.Area A_pipeshellM=Modelica.Constants.pi*di_pipeM*l_iM;
//Distribution pipe (D) (2 pipes with l=1.08 m per collector)
parameter SI.Volume V_mediumD=0.821E-3
  "volume of heat transfer medium in distribution pipe of 1 panel -> Viessmann";
parameter SI.Diameter di_pipeD=0.022 "inner diameter of distribution pipe";
parameter SI.Length s_pipeD=0.001 "thickness of pipe -> Viessmann";
final parameter SI.Area A_pipeD=Modelica.Constants.pi/4*di_pipeD^2;
final parameter SI.Area A_pipeshellD=Modelica.Constants.pi*di_pipeD*l_iD;
final parameter SI.Length l_totalD=2*1.08*Ns
  "total length of distribution pipe of all collectors in series, 2*1.08 for 1 collector -> Viessmann";
final parameter SI.Length l_iD=l_totalD;
final parameter SI.Length l_total=l_totalM+l_totalD "total pipe length";
final parameter SI.Length l_itotal=l_iM+l_iD;
final parameter SI.Area A_total=2.33*Ns
  "total surface area of all collectors in series";
final parameter SI.Area Aq=A_total/(n+1);
// Pressure Loss
Real frictionM "friction factor in meander pipe, Widerstandsbeiwert";
Real frictionD "friction factor in distribution pipe, Widerstandsbeiwert";
SI.Pressure pressureLossM[n]
  "pressure loss due to friction over the length of the meander pipe";
SI.Pressure pressureLossD
  "pressure loss due to friction over the length of the distribution pipe";
Real pressureLoss_m "pressure loss per meter";
SI.Velocity vM "in meander pipe";
SI.Velocity vD "in distribution pipe";
SI.Density rho_pipeM=sum((fluidM[n].medium.d) for i in 1:n)/n;
SI.Density rho_pipeD=(fluidD.medium.d);
SI.DynamicViscosity eta_pipeM=sum(Medium.dynamicViscosity(fluidM[n].stateDegC) for i in 1:n)/n;
SI.DynamicViscosity eta_pipeD=Medium.dynamicViscosity(fluidD.stateDegC);
SI.KinematicViscosity nue_pipeM=eta_pipeM/rho_pipeM;
SI.KinematicViscosity nue_pipeD=eta_pipeD/rho_pipeD;
// Outputs of the model SolarPanel
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput PumpOnOff annotation (Placement(
  transformation(extent={{62,46},{82,66}}), iconTransformation(
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=270,
  origin={32,-70})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput deltaP( unit="Pa")
  "pressure loss in the panel"
  annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90,
  origin={48,88}),
  iconTransformation(
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=270,
  origin={60,-70})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput T_Out "resulting temperature"
  annotation (Placement(transformation(extent={{62,64},{82,84}}),
  iconTransformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90,
  origin={66,76})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Q_result "resulting total heat flow"
  annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90,
  origin={28,88}), iconTransformation(
  extent={{-10,-10},{10,10}},
  rotation=90,
  origin={42,76})));
DEC_HC.BaseClasses.Fluid.FluidFlow fluidM[n](

```

```
redeclare package Medium = Medium,
each di_pipe=di_pipeM,
each l_pipe=l_iM)
annotation (Placement(transformation(extent={{-20,28},{-40,48}})));
DEC_HC.BaseClasses.Radiation.Eta_Optic radiation_In(
A_total=A_total,
A_i=Aq,
n=n) annotation (Placement(
transformation(
extent={{-17,13},{17,-13}},
rotation=270,
origin={-9,73}));
DEC_HC.BaseClasses.Thermal.Convection convectionM[n](
each ChoiceNu=5,
redeclare package Medium = Medium,
each TS_0=T_medium_0,
each l=l_iM,
each d=di_pipeM,
each A=A_pipeshellM,
each L=di_pipeM,
each p_amb=system.p_ambient) annotation (Placement(
transformation(
extent={{16,15},{-16,-15}},
rotation=180,
origin={-81,-4}));
Modelica.Fluid.Sensors.MassFlowRate massFlowRate( redeclare package Medium=Medium) annotation (Placement(
transformation(
extent={{10,-10},{-10,10}},
rotation=180,
origin={42,38}));
DEC_HC.BaseClasses.Fluid.FluidFlow fluidD(
redeclare package Medium = Medium,
di_pipe=di_pipeD,
l_pipe=l_iD)
annotation (Placement(transformation(extent={{20,28},{0,48}})));
DEC_HC.BaseClasses.Thermal.Convection convectionD(
each ChoiceNu=5,
redeclare package Medium = Medium,
each TS_0=T_medium_0,
each l=l_iD,
each d=di_pipeD,
each A=A_pipeshellD,
each L=di_pipeD,
each p_amb=system.p_ambient) annotation (Placement(
transformation(
extent={{-16,15},{16,-15}},
rotation=180,
origin={55,-10}));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedHeatFlow fixedHeatFlow3(
Q_flow=0,
alpha=0,
T_ref=313.15)
"Typ II Boundary condition: No heat flow over the the sides of the plate is assumed"
annotation (Placement(transformation(extent={{-94,-40},{-74,-20}})));
DEC_HC.BaseClasses.Thermal.Solid_Conductance2D absorberM[n](
each dl=dl_absorber,
each As=As_absorber,
each L=l_iM,
each Aq=Aq,
each lambda_eff=lambda_absorber,
each cp=cp_absorber,
each rho=rho_absorber,
each V=V_absorber,
each m=m_absorber,
each C=m_absorber*cp_absorber)
```

```
annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
rotation=270,
origin={{-52,-42}}));
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedHeatFlow fixedHeatFlow2(
Q_flow=0,
alpha=0,
T_ref=313.15)
annotation (Placement(transformation(extent={{-12,-58},{-32,-38}})));
public
DEC_HC.BaseClasses.Radiation.HeatLossesPanel heatLossesPanelM[n](
each U=3.95,
each U1=0.0122,
each A=Aq) annotation (
Placement(transformation(
extent={{10,-10},{-10,10}},
rotation=180,
origin={{-84,-66}}));
DEC_HC.BaseClasses.Thermal.TempSensor tempSensor
annotation (Placement(transformation(
extent={{-10,-10},{10,10}},
rotation=90,
origin={{4,-86}}));
DEC_HC.BaseClasses.Thermal.Solid_Conductance1D absorberD(
each dl=dl_absorber,
each Aq=Aq,
each lambda_eff=lambda_absorber,
each cp=cp_absorber,
each rho=rho_absorber,
each m=m_absorber,
each V=V_absorber,
each C=m_absorber*cp_absorber)
annotation (Placement(transformation(extent={{-10,-10},{10,10}},
rotation=180,
origin={{20,-16}}));
DEC_HC.BaseClasses.Radiation.HeatLossesPanel heatLossesPanelD(
each U=3.95,
each U1=0.0122,
each A=Aq) annotation (
Placement(transformation(
extent={{-10,-10},{10,10}},
rotation=270,
origin={{20,-48}}));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput radiation annotation (Placement(
transformation(extent={{-60,66},{-20,106}}), iconTransformation(
extent={{-20,-20},{20,20}},
rotation=270,
origin={{-40,86}}));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput T_amb annotation (Placement(
transformation(extent={{-72,-106},{-32,-66}}), iconTransformation(
extent={{-20,-20},{20,20}},
rotation=90,
origin={{-54,-80}}));
Modelica.Fluid.Interfaces.FluidPort_b fluid_b( redeclare package Medium = Medium)
annotation (Placement(transformation(extent={{74,36},{94,56}}),
iconTransformation(extent={{74,36},{94,56}})));
Modelica.Fluid.Interfaces.FluidPort_a fluid_a( redeclare package Medium = Medium)
annotation (Placement(transformation(extent={{-88,28},{-68,48}}),
iconTransformation(extent={{-104,-54},{-84,-34}})));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput windSpeed annotation (Placement(
transformation(
extent={{20,-20},{-20,20}},
rotation=90,
origin={{-8,22}}), iconTransformation(
extent={{-20,-20},{20,20}},
rotation=90,
```

```

        origin={-12,-80}));
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Q_Losses "total thermal losses";
inner Modelica.Fluid.System system
    annotation (Placement(transformation(extent={{-70,56},{-50,76}})));
equation
    PumpOnOff=if noEvent(radiation_In.Radiation>0) then 1 else 0;
    // calculation of pressure loss in pipe
    // meander pipe
    vM=abs(sum(fluidM[n].fluid_b.m_flow for i in 1:n))/(n*rho_pipeM*A_pipeM);
    for i in 1:n loop
        pressureLossM[i]=(frictionM*1_iM*i*vM^2*rho_pipeM)/(2*di_pipeM);
    end for;
    frictionM = if noEvent(
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vM,
            di_pipeM,
            nue_pipeM) <= 2320) then 64/
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vM,
            di_pipeM,
            nue_pipeM) else (100*
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vM,
            di_pipeM,
            nue_pipeM))^(1/4);
                                                    // laminar flow
                                                    // for 2320 < Re < 10e5 described by Blasius

    // distribution pipe
    vD=abs(fluidD.fluid_b.m_flow)/(rho_pipeD*A_pipeD);
    pressureLossD=(frictionD*1_iD*vD^2*rho_pipeD)/(2*di_pipeD);
    frictionD = if noEvent(
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vD,
            di_pipeD,
            nue_pipeD) <= 2320) then 64/
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vD,
            di_pipeD,
            nue_pipeD) else (100*
        DEC_HC.Functions.CharacteristicNumbers.Reynolds(
            vD,
            di_pipeD,
            nue_pipeD))^(1/4);
                                                    // laminar flow
                                                    //for 2320 < Re < 10e5 described by Blasius

    deltaP=pressureLossM[n]+pressureLossD;
    pressureLoss_m=deltaP/l_total;
    // Temperature of the outflowing water
    T_Out=fluidM[n].medium.T;
    // Total heat loss of the panel
    Q_Losses=sum(fluidM[i].heat_b.Q_flow for i in 1:n)+fluidD.heat_b.Q_flow;
    Q_result=sum(fluidM[i].heat_a.Q_flow for i in 1:n)+fluidD.heat_a.Q_flow+Q_Losses;
    // Connections
    // local discretization of meander pipe
    for i in 1:n loop
        connect(massFlowRate.m_flow,convectionM[i].massFlow) annotation (Line(
            points={{42,27},{42,22},{-66,22},{-66,7.1},{-86.44,7.1}},
            color={0,0,127},
            smooth=Smooth.None));
        connect(windSpeed,convectionM[i].windSpeed) annotation (Line(
            points={{-8,22},{-22,22},{-22,7.25},{-75.72,7.25}},
            color={0,0,127},
            smooth=Smooth.None));
        connect(tempSensor.heat_b,heatLossesPanelM[i].heat_b) annotation (Line(
            points={{4.2,-80},{4.2,-66},{-76,-66}},
    
```

```
        color={191,0,0},
        smooth=Smooth.None));
end for;
// connection in Series
for i in 1:n-1 loop
connect(fluidM[i].fluid_b,fluidM[i+1].fluid_a);
connect( absorberM[i].layer_b,absorberM[i+1].layer_a);
end for;
connect(fluidM.heat_b, convectionM.heat_a) annotation (Line(
  points={{-30.2,33.6},{-30.2,7.8},{-81,7.8},{-81,-3.1}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(radiation_In.heatPortM, fluidM.heat_a) annotation (Line(
  points={{-11.34,62.46},{-12,58},{-12,52},{-30,52},{-30,42.8}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluidD.fluid_b, fluidM[1].fluid_a) annotation (Line(
  points={{3,39},{2,38},{-14,38},{-14,38.8},{-23,38.8}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(massFlowRate.port_b, fluidD.fluid_a) annotation (Line(
  points={{52,38},{17,38},{17,38.8}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluidD.heat_b, convectionD.heat_a) annotation (Line(
  points={{9.8,33.6},{9.8,12.8},{55,12.8},{55,-9.1}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(massFlowRate.m_flow, convectionD.massFlow) annotation (Line(
  points={{42,27},{42,1.1},{60.44,1.1}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(absorberD.heat_b,heatLossesPanelD. heat_a) annotation (Line(
  points={{20,-23.6},{20,-40},{20.2,-40}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(convectionD.heat_b, absorberD.heat_a) annotation (Line(
  points={{44.76,-9.1},{31.38,-9.1},{31.38,-9.4},{19.6,-9.4}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(tempSensor.heat_b, heatLossesPanelD.heat_b) annotation (Line(
  points={{4.2,-80},{20,-80},{20,-56}},
  color={191,0,0},
  smooth=Smooth.None));
connect(radiation, radiation_In.Radiation) annotation (Line(
  points={{-40,86},{-20,86},{-20,86.26},{-9,86.26}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(T_amb, tempSensor.T_control) annotation (Line(
  points={{-52,-86},{-34,-86},{-34,-92},{4,-92}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluidM[n].fluid_b, fluid_a) annotation (Line(
  points={{-37,39},{-38,39},{-38,38},{-78,38}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(fluid_b, massFlowRate.port_a) annotation (Line(
  points={{84,46},{58,46},{58,38},{32,38}},
  color={0,127,255},
  smooth=Smooth.None));
connect(windSpeed, convectionD.windSpeed) annotation (Line(
  points={{-8,22},{-8,14},{49.72,14},{49.72,1.25}},
  color={0,0,127},
  smooth=Smooth.None));
connect(absorberM.heat_b, heatLossesPanelM.heat_a) annotation (Line(
```



```
points={{-50,-50.8},{-92,-50.8},{-92,-66.2}},  
color={191,0,0},  
smooth=Smooth.None));  
connect(absorberM[n].layer_b, fixedHeatFlow2.port) annotation (Line(  
points={{-43.4,-43},{-42,-43},{-42,-48},{-32,-48}},  
color={191,0,0},  
smooth=Smooth.None));  
connect(absorberM[1].layer_a, fixedHeatFlow3.port) annotation (Line(  
points={{-57.4,-43},{-66,-43},{-66,-30},{-74,-30}},  
color={191,0,0},  
smooth=Smooth.None));  
connect(convectionM.heat_b, absorberM.heat_a) annotation (Line(  
points={{-70.76,-3.1},{-70.76,-17.45},{-50.2,-17.45},{-50.2,-34}},  
color={191,0,0},  
smooth=Smooth.None));  
connect(radiation_In.heatPortD, fluidD.heat_a) annotation (Line(  
points={{-6.14,62.46},{-6,52},{4,52},{4,42.8},{10,42.8}},  
color={191,0,0},  
smooth=Smooth.None));  
end SolarPanel;
```

Management Summary

Chancen für die Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau

Oktober 2011

Sebastian Stinner

Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Management Summary

Chancen für die Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau (E.ON Energy Research Center an der RWTH Aachen)

Kernaussage:

Die optimale Kombination innovativer Technologien der gasbetriebenen, dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit moderater Gebäudedämmung erzielt Spitzenwerte bei der Energieeffizienz. Durch den Einsatz hocheffizienter KWK kann bis zu 20 Zentimeter Dämmstärke eingespart und trotzdem die gleiche Primärenergieeinsparung erreicht werden. Die Kosten dieser Kombination liegen deutlich unter denen der reinen Isolierung.

Durch den Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung kann auf übermäßige Gebäudedämmung verzichtet werden. Gerade für Bestandsgebäude und Altbauten eröffnet sich hiermit eine hochinteressante technische und wirtschaftliche Option, bei gleicher Primärenergieeinsparung innovative Technologien zur Strom- und Wärmeproduktion einzusetzen, statt eine starke Außenwandisolierung vorzunehmen, die oft auch gar nicht möglich ist. Die Einführung einer dezentralen Energieversorgung für Wohngebäude ist besonders im Kontext der laufenden Umstellung der Stromerzeugung von fossilen Brennstoffen zu regenerativen Systemen (Wind, Photovoltaik) eine große Herausforderung und Chance zur Stabilisierung des regenerativen Stromerzeugungssystems.

Bereits bei einer Kombination hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung mit einer gemäßigten Gebäudedämmung von fünf Zentimetern wird eine Energieeffizienz erzielt, die einer 25 Zentimeter dicken Dämmung entspricht. So konnte für die Kombination verschiedener Dämmstoffe und unterschiedlicher dezentraler KWK-Technologien jeweils das energetische Optimum ermittelt werden. Damit wird energetisches Sanieren des Gebäudebestandes deutlich kostengünstiger. Ein Zusatznutzen entsteht dadurch, dass die KWK-Technologie preiswerter und in kürzeren Zeitabständen erneuert werden kann als die Fassade eines Gebäudes. Somit nimmt das Gebäude durch neue und innovative Technologie energetisch verbessert kontinuierlich am technischen Fortschritt teil.

Aufgrund der Flexibilität von verbrennungsmotorisch betriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) ist die Mikro-KWK-Anlagentechnik im Rahmen des „Aktivhaus“-Konzepts der ideale Partner für die Erneuerbaren Energien, da sie deren Erzeugungsschwankungen ausgleichen kann. Somit kann die Mikro-KWK auf zwei verschiedene Weisen eingesetzt werden, da Sie sowohl

Regelenergie bereitstellen („Aktivhaus“) als auch für die Abdeckung der Grundlast unter konstanten Betriebsbedingungen eingesetzt werden kann („Powerhaus“).

Mit der „Powerhaus“-Technologie produziert ein Hausbesitzer selbst elektrischen Strom und kann zusätzlich die Wärmeversorgung seines Gebäudes ganzjährig sichern. Im „Powerhaus“ steht Abwärme zur Verfügung, die durch den Einsatz einfacher Wärmespeichertechnik ganzjährig genutzt werden kann. Dadurch wird eine weitere Effizienzsteigerung erzielt. Hinzu kommt, dass durch den geplanten Ausbau der regenerativen Stromproduktion in Deutschland in Zukunft auf allen Spannungsebenen des Stromnetzes Speicherkapazität bereitgestellt werden muss, um Strom zur Verfügung zu haben, wenn die regenerative Stromerzeugung nicht den Bedarf deckt. Die thermischen Speicher können dann die in einem stromgeführten Blockheizkraftwerk („Aktivhaus“) produzierte Wärme speichern und zu einem späteren Zeitpunkt zur Beheizung und Warmwasserversorgung im Gebäude genutzt werden.

Beim Einsatz der Brennstoffzellentechnik mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu 60 Prozent kann diese Art der dezentralen Stromerzeugung mit dem besten Referenzsystem der zentralen Stromerzeugung, einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk, konkurrieren. In Zukunft wird sowohl in der Hoch- als auch in der Mittelspannungsebene der Stromnetze eine erhebliche Volatilität in der Erzeugung erheblich zunehmen. Diese muss insbesondere durch eine flexible, komplementäre Stromerzeugung und eine geeignete Speichertechnik kompensiert werden.

Die oben beschriebene dezentrale KWK-Lösung ist in der Lage, eine stromgeführte, flexible Stromerzeugung darzustellen. Diese „Netzkompatibilität“ der Gebäude kann einen wesentlichen Beitrag zur Einbindung von Wind- und Solarstrom in unsere Energieversorgung leisten. Damit werden erstmalig die Anforderungen der lokalen Energiesysteme mit denen der übergeordneten Netzinfrastruktur verbunden. Gebäude müssen somit nicht nur effizient, sondern auch netzkompatibel sein.



E.ON Energy Research Center



E.ON Energy Research Center Series

Chancen für die Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau

Sebastian Stinner

Dirk Müller

Volume 3, Issue 7

Unterstützt durch den DVGW Deutscher Verein des Gas- und
Wasserfaches e.V. im Rahmen der Innovationsoffensive Gas.



Die DVGW-Innovationsoffensive.
www.dvgw-innovation.de



E.ON Energy Research Center

E.ON Energy Research Center Series

Chancen für die Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnungsbau

Sebastian Stinner

Dirk Müller

Volume 3, Issue 7

Unterstützt durch den DVGW Deutscher Verein des Gas- und
Wasserfaches e.V. im Rahmen der Innovationsoffensive Gas.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Einleitung	3
3	Energetische Anforderungen an den Neubau	5
4	Kraft-Wärme-Kopplung für Wohngebäude	7
5	Energetische Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung	11
6	Kostenoptimale Kombinationen aus Dämmung und Anlagentechnik	17
7	Netzkompatibilität der Gebäude - Die Konzepte Aktivhaus und Powerhaus	23
8	Zusammenfassung	29
9	Literatur	31
10	Anhang	34
	10.1 Abbildungsverzeichnis	34
	10.2 Tabellenverzeichnis	35
11	Danksagung	36

1 Kurzfassung

Die Wärmeerzeugung in Deutschland wird heute in Bestandswohngebäuden überwiegend mit Niedertemperatur- beziehungsweise Brennwertkesseln gewährleistet. Im Wohnungsneubau konkurrieren Brennwertkessel, meist in Kombination mit einer solaren Trinkwassererwärmung, und elektrische Wärmepumpen um die Gunst der Käufer. Zunehmend werden auch Lösungen mit Kraft-Wärme-Kopplung angeboten, deren Leistungsbereich in den letzten Jahren auf Ein- und Mehrfamilienhäuser abgestimmt worden ist. Dabei wird neben der in Großanlagen bewährten Technik der Gasmotoren intensiv an Lösungen mit Brennstoffzellentechnik gearbeitet.

Die Energieeffizienz eines Gebäudes kann auf zwei unterschiedliche Arten verbessert werden. Einerseits können durch den Einsatz von Dämmtechnik an der gesamten Gebäudehülle die Wärmeverlustströme deutlich reduziert werden. Andererseits kann durch die Art der Wärmeerzeugung Primärenergie eingespart werden, indem natürlich vorkommende Ressourcen oder eine kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt wird.

Berechnungen für ein typisches Einfamilienhaus zeigen, dass eine moderate Dämmung der Gebäudehülle sowohl aus energetischer als auch aus hygienischer Sicht sinnvoll ist. Die Dämmstärke sollte dabei auch den Anforderungen des thermischen Komforts der Nutzer genügen. Eine zusätzliche Dämmung, wie bereits heute durch den Mindestdämmstandard gefordert, muss sich jedoch an den Möglichkeiten einer verbesserten Anlagentechnik messen lassen. Hier zeigt sich, dass insbesondere eine konsequente Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung wesentlich zur energetischen Aufwertung von Bestands- und Neubauten beitragen kann. Die Kraft-Wärme-Kopplung ist damit in moderat gedämmten Gebäuden eine attraktive Alternative zu zusätzlichen Dämmmaßnahmen, die auch in Bestandsgebäuden mit hochwertigen Fassaden eingesetzt werden kann.

Hinzu kommt, dass durch den geplanten Ausbau der regenerativen Stromproduktion in Deutschland in Zukunft auf allen Spannungsebenen des Stromnetzes Speicherkapazität bereitgestellt werden muss. In Gebäuden kann durch die Vorwegnahme der letzten Energiewandlung eine kostspielige Stromspeicherung durch eine Wärmespeicherung ersetzt werden. So können Gebäude mit Kraft-Wärme-Kopplung und elektrischen Wärmepumpen zur Lastverschiebung eingesetzt werden. Diese „Netzkompatibilität“ der Gebäude kann einen wesentlichen Beitrag zur Einbindung von Wind- und Solarstrom in unsere Energieversorgung leisten. Dieses „Aktivhaus“ weist zwar einen höheren Endenergiebedarf als ein Passivhaus auf, es bietet jedoch im Rahmen eines Demand-Side-Managements (Nachfragesteuerung) viele Vorteile für eine regenerativ dominierte Energieversorgung.

Einen Schritt weiter geht das hier vorgestellte Konzept des „Powerhauses“. Durch den Einsatz einer hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis der Brennstoffzellentechnik kann diese Form einer dezentralen Stromerzeugung mit dem besten Referenzsystem, einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk, konkurrieren. Dadurch steht dem Powerhaus „Abwärme“ zur Verfügung, die durch den Einsatz einfacher Wärmespeichertechnik ganzjährig genutzt werden kann. Das „Powerhaus“ ist somit kein Wärmeverbraucher, sondern ein Ersatz für den Kühlturm eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerks. Aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrads kann diese Technik auch für die Abdeckung der Grundlast unter konstanten Betriebsbedingungen eingesetzt werden.

2 Einleitung

In den letzten Jahren wurden im Rahmen von Forschungsaktivitäten Einsparpotentiale für den End- und Primärenergieverbrauch von Neubau- und Bestandsgebäuden aufgezeigt. Insbesondere die Weiterentwicklung von Dämmsystemen und Fenstern hat zu einer deutlichen Reduktion der Transmissionswärmeverluste geführt, so dass im Fall eines Passivhauses vollständig auf eine klassische Heizungsanlage verzichtet werden kann [Reb02]. Parallel zu den Maßnahmen an der wärmeübertragenden Umfassungsfläche wurde die Anlagentechnik weiterentwickelt.

Neben den klassischen Wärmeerzeugern mit Brennwerttechnik etabliert sich in Deutschland die Wärmepumpentechnik mit und ohne Erdreichanbindung [HM09]. Die im Industriebereich durchaus erfolgreiche Technik der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) [SS10] konnte sich im Wohnungssektor bisher nicht durchsetzen. Zum einen gibt es bis heute nur ein kleines Angebot für den Einsatz von μ -KWK-Systemen und zum anderen sind die energetische Bewertung sowie die energiewirtschaftliche Einordnung dieser Systeme nicht abschließend geklärt [Die02]. Vor allem bei Gebäuden, in die verschiedene Anlagen zur Wärmeversorgung integriert sind, ist es schwierig, die von den einzelnen Anlagen beigesteuerte Wärme bereits in der Planungsphase zu ermitteln.

Die Einführung einer dezentralen Energieversorgung für Wohngebäude ist besonders im Kontext der laufenden Umstellung der Stromerzeugung von fossilen Brennstoffen zu regenerativen Systemen (Wind, Solar) eine Herausforderung [Bun09]. In Zukunft wird sowohl in der Hoch- als auch in der Mittelspannungsebene der Stromnetze eine erhebliche Volatilität in der Erzeugung auftreten, die u.a. durch eine geeignete Speichertechnik kompensiert werden muss [Pop10].

Da wirtschaftlich betreibbare Stromspeicher noch nicht im benötigten Maße vorhanden sind [Sau07], kann durch eine Verlagerung des Lastausgleichs in den Bereich der thermischen Speicher eine Verbesserung erzielt werden.

Diese thermischen Speicher sind für verschiedene Anwendungen bereits in großer Zahl und vergleichsweise günstig erhältlich. Die Versorgungssysteme von Gebäuden sowie die Gebäudemassen selbst können hier als ein intelligentes und wirtschaftliches Speichersystem dienen (s. Abbildung 2.1), das nicht nur auf Basis der Wärmepumpentechnik, sondern auch mit der Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten kann. Durch einen intelligenten Betrieb der Gebäude kann eine Lastkompensation im Sinne eines „Demand Side Management“ (Nachfragesteuerung) erreicht werden [Gel85]. Damit werden erstmalig die Anforderungen der lokalen Energiesysteme mit denen der übergeordneten Netzinfrastruktur verbunden. Gebäude müssen somit nicht nur effizient, sondern auch netzkompatibel sein (s. Abbildung 2.2).

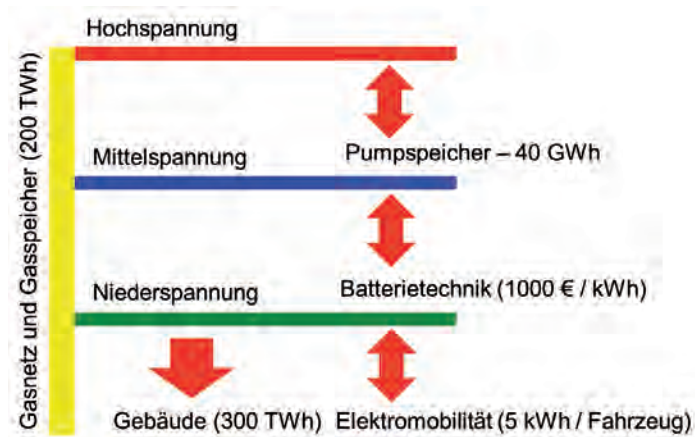


Abbildung 2.1: Abschätzung der Speicherkapazitäten und der Kosten auf den verschiedenen Spannungsebenen des elektrischen Netzes

Diese Veröffentlichung stellt neue μ -KWK Techniken vor und bewertet dieses energetisch sowie wirtschaftlich im Zusammenhang mit Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle. Abschließend wird das Thema einer netzkompatiblen Gebäudetechnik anhand eines ausgewählten Systems diskutiert und ein Aktivhaus-Konzept für hocheffiziente μ -KWK-Technik vorgestellt.

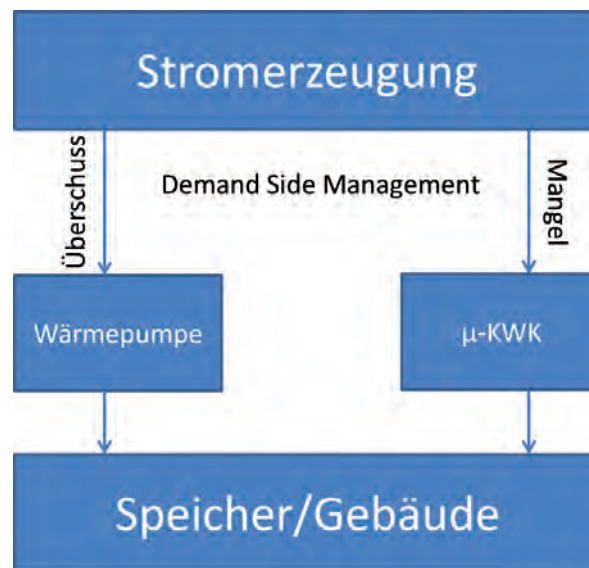


Abbildung 2.2: Das Konzept des Demand Side Managements

3 Energetische Anforderungen an den Neubau

In den vergangenen Jahrzehnten haben die normativen Anforderungen an neu gebaute Gebäude stetig zugenommen. Zunächst legten die Wärmeschutzverordnungen (WSVO) (z.B. [WSV77]) die Anforderungen an die Gebäudehülle bezüglich der Dämmung und damit der Transmissionswärmeverluste fest. Durch die Heizungsanlagen-Verordnung (HeizAnV) (z.B. [HAV78]) wurden die Anforderungen an die Anlagentechnik vorgegeben. Seit 2001 bewertet die Energieeinsparverordnung (EnEV) das Zusammenspiel zwischen Gebäudedämmung und Anlagentechnik. In ihr werden die Gebäudehülle (vor allem Wände, Dach und Fenster), die eingesetzte Heizungstechnik inklusive Verteilung und Übergabe und die eingesetzten Brennstoffe in die Bilanz mit einbezogen. Die aktuelle Fassung ist die Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29.4.2009 [ENE09]. In Abbildung 3.1 ist u.a. die Entwicklung der Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf zu sehen. Die in Abbildung 3.1 aufgeführten Stufen verdeutlichen die Mei-

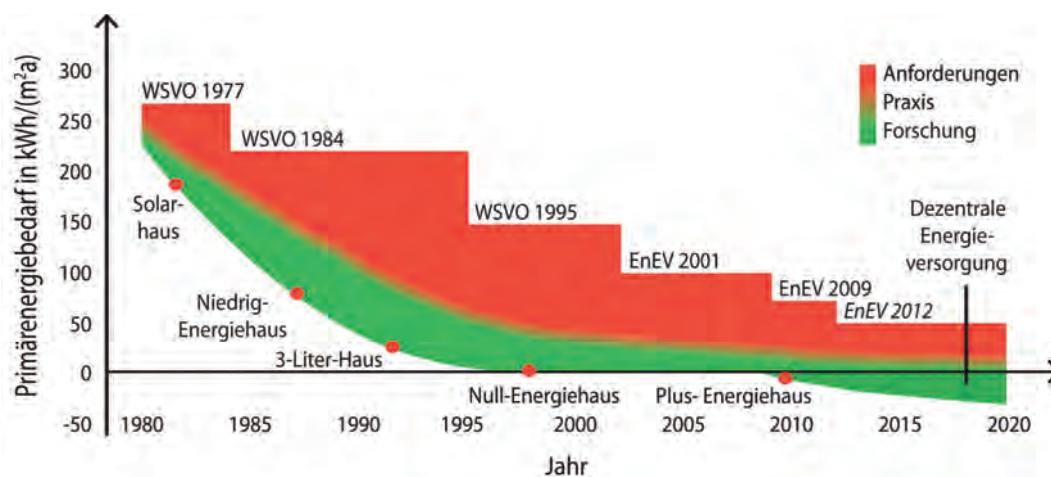


Abbildung 3.1: Entwicklung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf in Anlehnung an das Fraunhofer Institut für Bauphysik

lensteine für den Wohngebäudebereich, wie beispielsweise das Niedrigenergiehaus oder das Null-Energiehaus. Die im Rahmen von Demonstrationsvorhaben entwickelten Gebäudekonzepte werden allerdings nur mit erheblicher zeitlicher Verzögerung in der Baupraxis umgesetzt. So wird das Niedrigenergiehaus aus den 80er Jahren heute als Standard für den Neubau angesetzt. In der Bilanzierung nach EnEV muss grundsätzlich zwischen drei Anforderungsgrößen - dem Nutz-, End- und Primärenergiebedarf - unterschieden werden. Der Nutzenergiebedarf bezeichnet die vom Gebäude benötigte Energie, um bestimmte Anforderungen an die Innenraumtemperatur, den Warm-

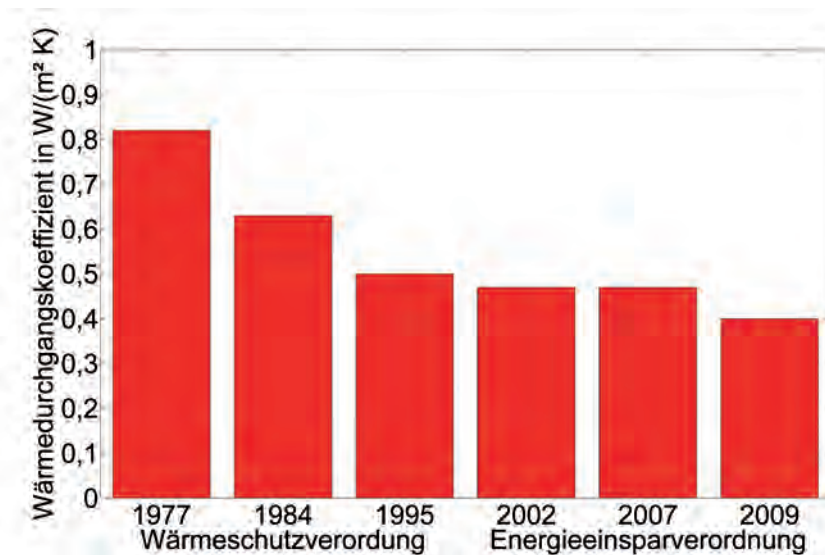


Abbildung 3.2: Entwicklung der Mindestanforderungen an den auf die wärmeübertragende Fläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten

wasserbedarf oder die Lüftung einzuhalten. Der Endenergiebedarf umfasst die Menge an Energie, die dem Gebäude von außen zugeführt werden muss, um die genannten Anforderungen einzuhalten. Um daraus den notwendigen Energiebedarf an natürlich vorkommenden Energieträgern (den Primärenergiebedarf) zu berechnen, muss die von außen zugeführte Energie noch mit dem Primärenergiefaktor f_p multipliziert werden, der die Wandlungsprozesse und den Transport innerhalb der Energieversorgungskette pauschal berücksichtigt. Hierbei wird nur der nicht-erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs berücksichtigt. Neben der Festlegung des Maximalwertes für den Primärenergiebedarf eines Hauses durch den Vergleich mit einem Referenzgebäude gemäß Anlage 1 Tab. 1 der EnEV 2009 werden zusätzlich Mindestanforderungen an die Transmissionswärmeverluste der wärmeübertragenden Umfassungsfläche gestellt. In Abbildung 3.2 ist zu sehen, wie sich die Mindestanforderungen an den auf die wärmeübertragende Fläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten im Laufe der Gesetzgebung verändert haben.

Die Hauptanforderungsgröße für Neubauten ist in der EnEV 2009 - ebenso wie in den vorangegangenen Versionen der EnEV - der Jahresprimärenergiebedarf im Vergleich zu einem Referenzgebäude gleicher Geometrie und Abmessung und vorgegebenen technischen Eigenschaften. Zusätzlich einzuhalten ist ein vom Gebäudetyp abhängiger Grenzwert für den auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust. Für Bestandsbauten gilt, dass bestimmte Maximalwerte für die U-Werte nach bestimmten baulichen Veränderungen von Außenbauteilen eingehalten werden müssen. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der Putz erneuert werden muss und die Wände im ursprünglichen Zustand einen U-Wert größer als $0,9 W/(m^2K)$ aufweisen.

4 Kraft-Wärme-Kopplung für Wohngebäude

Neben der Weiterentwicklung der Dämmstoffe und der im vorherigen Abschnitt geschilderten Verschärfung der Regularien bezüglich der Dämmung von Gebäuden hat auch die Gebäudetechnik in den vergangenen Jahren Fortschritte gemacht. In industriellen Anwendungen hat sich die Kraft-Wärme-Kopplung als dezentrale Strom- und Wärmebereitstellungseinheit bereits etabliert. Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung basiert darauf, dass eine Anlage sowohl elektrischen Strom erzeugt als auch die in dem stromerzeugenden Prozess anfallende Wärme als Prozesswärme nutzt oder diese Wärme für die Beheizung und Warmwasserversorgung von Gebäuden eingesetzt wird. Die in der Industrie eingesetzten Anlagen haben aufgrund der Anforderungen häufig Leistungen im hohen Kilowatt- bzw. Megawattbereich. Bei den Verbrennungsmotoren steigt der elektrische Wirkungsgrad üblicherweise mit der elektrischen Leistung der Anlage.

Thermodynamisch betrachtet ist die Kraft-Wärme-Kopplung grundsätzlich wünschenswert, da Strom reine Exergie, also eine beliebig wandelbare Energieform, darstellt und damit das höherwertigere Produkt im Vergleich zur Wärme ist [BK09]. Für Wohngebäude sind diese Anlagen nur bedingt geeignet, da die Abnahme der großen Leistungen nur bei einem Anschluss größerer Mehrfamilienhäuser oder ganzer Quartiere erfolgen kann. Dazu müssen ausreichend viele Wohneigentümer dem Anschluss und einer gemeinsamen Anwendung zustimmen. Auch die Investition in das KWK-System und das notwendige Nahwärmenetz sowie dessen thermische Verluste müssen berücksichtigt werden. Der dynamische Wärmebedarf von Gebäuden wird wesentlich durch die Außentemperatur beeinflusst. Bei einer vollständigen Abdeckung des Wärmebedarfs durch das KWK-System kann nur eine geringe Anzahl von Volllaststunden erreicht werden (s. Abbildung 4.1). Um den Schwierigkeiten eines Wärmenetzes der KWK im Bereich der Wohngebäude zu entgehen, wird intensiv an der Entwicklung so genannter μ -KWK Techniken gearbeitet. Diese Anlagen besitzen eine geringere thermische Leistung, so dass sie auch in Ein- und kleineren Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden können. Hier sind vor allem zwei aktuell marktfähige Techniken zu nennen: Dies ist zum einen der Stirling-Motor und zum anderen das so genannte Blockheizkraftwerk auf Basis von Verbrennungsmotoren (im Folgenden nur Blockheizkraftwerk oder BHKW genannt). Ergänzend wird in der Zukunft die Technik der Feststoffkeramikbrennstoffzelle (SOFC) verfügbar sein.

Beim Stirling-Motor handelt es sich um eine Wärmekraftmaschine, in der ein Kolben mittels Erhitzen und Abkühlen eines Arbeitsmediums (z.B. Luft oder Helium) in Bewegung versetzt wird. Damit wird neben der bei der Verbrennung entstehenden Wärme auch mechanische Energie und über einen Generator elektrischer Strom erzeugt. Die Besonderheit des Stirling-Motors ist, dass

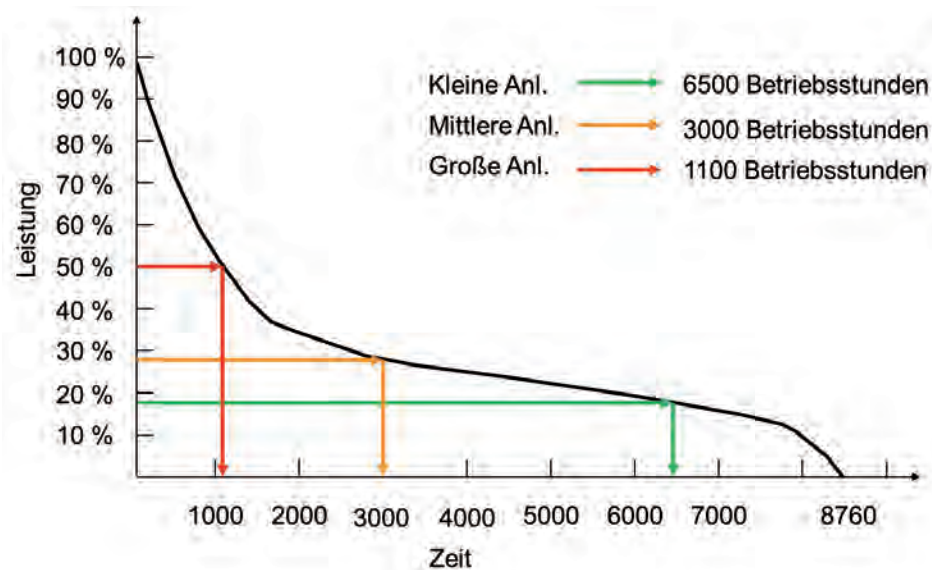


Abbildung 4.1: Typische geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs eines Wohngebäudes sowie die Einordnung von KWK-Anlagen verschiedener Leistungen (Quelle: Buderus)

der Kolben von außen beheizt wird und damit die Stromproduktion unabhängig von einer Verbrennung bzw. der Art des Brennstoffs ist. Allein die Temperaturniveaus der Wärmez- und -abfuhrung sind entscheidend [Org92]. Auf dem Markt sind Anlagen verschiedener Hersteller für Einfamilienhäuser mit Leistungen von 1 kW_{el} und 6 kW_{th} erhältlich. Um das Problem der geringen Volllaststundenzahl zu umgehen, wird zusätzlich ein Spitzenlastkessel vorgesehen. In den marktfähigen Anwendungen sind diese Anlagen in einem Gerät kombiniert. Der elektrische Wirkungsgrad des Stirling-Motors liegt bei diesen Anlagen bei ca. $\eta_{el} = 14 \%$. Die Gesamtanlage hat durch den Einfluss des Spitzenlastkessels einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad. Blockheizkraftwerke basieren auf klassischen Verbrennungsmotoren und werden mit Gas oder Dieselmotoren betrieben. Hier sind verschiedene Leistungsklassen am Markt erhältlich. Je kleiner die abgegebene Leistung ist, desto geringer ist der elektrische Wirkungsgrad der Anlagen (s. Abbildung 4.2). Bei Anlagen für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern liegt der elektrische Wirkungsgrad heute bei ca. $\eta_{el} = 25 \%$, während bei großen Blockheizkraftwerken für industrielle Anforderungen der elektrische Wirkungsgrad bei bis zu $\eta_{el} = 40 \%$ liegen kann.

Zusätzlich zu den bereits genannten und auf dem Markt befindlichen Techniken wurde in den letzten Jahren an der Entwicklung der Brennstoffzelle gearbeitet [CFC11][IBZ11]. Die ersten dieser μ -KWK-Anlagen auf Brennstoffzellenbasis befinden sich ebenfalls bereits auf dem Markt. Die Brennstoffzelle hat den Vorteil, dass sie nicht an die Wirkungsgradlimitierung des Carnot-Prozesses [BK09] gebunden ist. Der Brennstoff wird ohne eine externe Verbrennung direkt durch einen elektrochemischen Prozess (Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser) in elektrischen Strom gewandelt. Dadurch lassen sich theoretische Wandlungsverfahren ohne oder nur mit sehr geringen

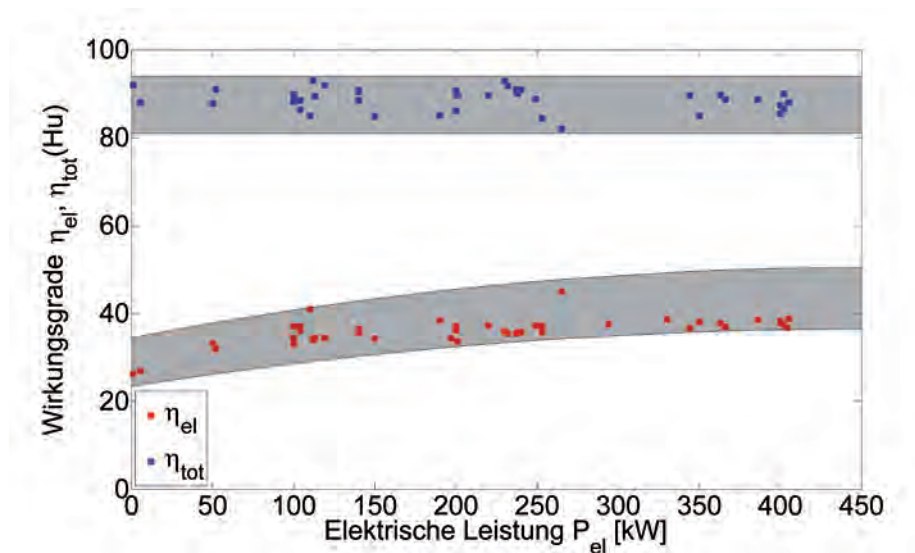


Abbildung 4.2: Wirkungsgrade von Blockheizkraftwerken in verschiedenen Leistungsklassen (Quelle: Herstellerdatenblätter)

Exergieverlusten umsetzen.

Hier soll speziell auf die Festoxidkeramikbrennstoffzelle (SOFC) eingegangen werden. Diese Brennstoffzelle wird bei Temperaturen von über 600 °C betrieben. Aufgrund dieser hohen Temperaturen kann die Brennstoffzelle direkt mit Erdgas betrieben werden, da die Reformierung zu Wasserstoff intern bewerkstelligt werden kann.

Beispielhaft soll eine SOFC-Brennstoffzelle, die kurz vor der Markteinführung steht und in ersten Leistungstests einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu $\eta_{el} = 60\%$ erreicht [CFC11], betrachtet werden. Dies entspricht dem elektrischen Wirkungsgrad der modernsten Gas- und Dampfturbinenkraftwerke, die sich aktuell im Bau befinden oder seit kurzem im Betrieb sind [Sie11]. Zusätzlich kann bei einer Nutzung der Brennstoffzelle im Gebäudebereich die Abwärme genutzt werden, um, wie bei den anderen KWK-Techniken, Wärme für Heizung und Warmwasser bereitzustellen. Dies wäre bei GuD-Kraftwerken theoretisch ebenfalls möglich, allerdings stehen diesem Ansatz die Kosten und der Planungsaufwand für die Fernwärmeleitungen entgegen.

Aufgrund der hohen Betriebstemperatur der SOFC sind An- und Abfahrvorgänge sehr langwierig (Anfahren: ca. 1 Tag). Aus diesem Grund ist der Dauerbetrieb einer solchen Brennstoffzelle in Erwägung zu ziehen, um so die Nachteile durch An- und Abfahrvorgänge zu vermeiden und die Grundlast in der Stromversorgung abzudecken. Die entstehende Wärme muss dafür zwischengespeichert werden, da eine konstante thermische Leistung erzeugt wird und das Bedarfsprofil der Gebäude in der Realität nicht konstant sein wird. Ein erstes Beispiel mit diesem System aus einer Brennstoffzelle im Dauerbetrieb mit thermischem Speicher soll in dieser Veröffentlichung im Rahmen des Powerhaus-Konzepts vorgestellt werden.

5 Energetische Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung

Um KWK-Anlagen mit anderen Arten der Energieversorgung zu vergleichen, müssen Möglichkeiten gefunden werden, die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme energetisch zu bewerten. Die Bewertungsverfahren zielen in der Regel darauf ab, den Energiebedarf für die Wärmebereitstellung zu bilanzieren und dafür die eingesetzte Brennstoffmenge für beide Produkte zu analysieren und den produzierten Strom in Form einer Gutschrift davon zu subtrahieren. Dieses Verfahren setzt voraus, dass der elektrische Strom ohnehin benötigt wird und somit die Energie, aus einem zentralen Kraftwerk für die Stromerzeugung eingespart wird. Im Folgenden sollen drei Ansätze vorgestellt werden, mit denen die Bewertung der in KWK-Anlagen erzeugten Wärme vorgenommen werden kann. Dies ist zum einen ein primärenergetischer Einsatz nach DIN V 4701 [DIN03], zum zweiten die Bewertung nach DIN V 18599 [DIN07] und zum Abschluss die gasbezogene Jahresarbeitszahl, mit der vergleichsweise einfach verschiedene gasbasierte Systeme miteinander verglichen werden können.

Beim primärenergetischen Ansatz wird die für die beiden Koppelprodukte Strom und Wärme insgesamt eingesetzte Brennstoffmenge um die mit dem Primärenergiefaktor von Strom bewertete Menge an produziertem elektrischem Strom reduziert. So wird der Primärenergiefaktor ermittelt, der nötig ist, um die erzeugte Wärme zu bewerten:

$$f_{PE,WV} = \frac{\sum_j Q_{Br,j} \cdot f_{PE,Br,j} + (\Delta W_{KW,netto} - W_{HKW,netto}) \cdot f_{PE,el}}{\sum_i Q_{H,i}} \quad (5.1)$$

Dabei bezeichnet:

- $f_{PE,WV}$ den Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung in kWh Primärenergie je kWh Heizenergie an der Gebäudehülle
- $Q_{Br,j}$ die Menge an eingesetztem Brennstoff j
- $Q_{H,i}$ Jahresheizenergie an der Übergabestelle zum Gebäude i
- $f_{PE,Br,j}$ den Primärenergiefaktor des Brennstoffs j
- $f_{PE,el}$ den Primärenergiefaktor für Strom

$\Delta W_{KW,netto}$ die Arbeitsminderung eines großen Kondensations-Kraftwerkes (sog. Ohnehin-Kraftwerk) mit Fernwärmeauskopplung bei gleichem Brennstoffeinsatz wie im Kondensationsbetrieb und nach Abzug der elektrischen Pumparbeit für die Fernwärme-Transportleitung

$W_{HKW,netto}$ die elektrische Jahresnettoarbeit der Heizkraftwerke des Wärmeversorgungssystems nach Abzug des elektrischen Heizkraftwerkseigenbedarfs und der Antriebsenergie für den Heiznetzbetrieb (Umwälzung, Druckhaltung)

Mit Heizkraftwerk und Kondensationskraftwerk werden zwei separate Anlagen bezeichnet, die auch separat betrachtet werden können, je nachdem, welche der beiden Anlagen in dem jeweiligen Heiznetz vorhanden sind. In Tabelle 5.1 sind die Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger zu sehen, die zur Bewertung der KWK-Anlagen herangezogen werden. Eine weitere Mög-

Tabelle 5.1: Primärenergiefaktoren verschiedener Energieträger (Quelle: [DIN07], ergänzt durch [ENE09])

Energieträger	Primärenergiefaktor für den erneuerbaren Anteil
Heizöl EL	1,1
Erdgas H	1,1
Braunkohle	1,2
Steinkohle	1,1
Holz	0,2
Strom	2,6
Solarenergie, Umgebungswärme	0

lichkeit der energetischen Bewertung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist in der DIN V 18599 festgelegt. Mit dieser können Bewertungen von Gebäuden inklusive Anlagentechnik nach EnEV 2009 vorgenommen werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass neben der KWK-Anlage noch ein weiterer (konventioneller) Wärmeerzeuger beteiligt ist. Um dann die Bewertung vorzunehmen, muss bekannt sein, wieviel Wärme der konventionelle Erzeuger bereitstellt und wieviel die KWK-Anlage beisteuert. Die Bewertung der Endenergie, die ein Gebäude zum Heizen verwendet, wird mit folgender Formel berechnet:

$$Q_{h,f,a} = \left[\frac{1-\beta}{\eta_{HP}} + \frac{(1+C)\cdot\beta}{\eta_{KWK}} - \frac{f_{p,Strom}}{f_p} \cdot C \cdot \beta \right] \cdot \frac{Q_{h,aus,a}}{\eta_{HN}} \quad (5.2)$$

Dabei ist

- $Q_{h,f,a}$ der Endenergiebedarf
- $Q_{h,aus,a}$ der für die Beheizung benötigte Energiebedarf
- β der Anteil der mit der KWK-Anlage erzeugten Wärme
- C die Stromkennzahl der KWK-Anlage

- η_{HP} der Wirkungsgrad des konventionellen Wärmeerzeugers
 η_{KWK} der Gesamtwirkungsgrad der KWK-Anlage
 η_{HN} der Wirkungsgrad des Heiznetzes
 f_p der Primärenergiefaktor des eingesetzten Brennstoffs bzw. von Strom

Um die Güte der Energieumwandlung in einer KWK-Anlage mit anderen Anlagen vergleichen zu können, kann die gasbezogene Jahresarbeitszahl (JAZ_{gas}) verwendet werden, die auch für die Bewertung von anderen, gasbetriebenen Anlagen wie Gas-Wärmepumpen, Brennwertkessel mit solarer Unterstützung oder der Kombination aus Brennwertkessel mit einer Grundlast-Wärmepumpe genutzt werden kann. Die Elektro-Wärmepumpen werden in diesem Fall so bewertet, dass sie aus einem Kondensationskraftwerk gespeist werden, das ebenfalls mit Gas betrieben wird, so dass bei dieser Analyse die Wertigkeit des Brennstoffes Gas berücksichtigt wird. Die Arbeitszahl im Falle einer Kraft-Wärme-Kopplung berechnet sich nach:

$$JAZ_{gas} = \frac{Q_{heiz}}{Q_{gas} - Q_{gas,el}} = \frac{\eta_{th,KWK}}{1 - \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{el,KKW}}} \quad (5.3)$$

Hierbei bezeichnet:

- Q_{heiz} die erzeugte Heizenergie
 Q_{gas} die in der Anlage benötigte Gasmenge
 $Q_{gas,el}$ die in einer Strom erzeugenden Anlage benötigte Menge an Gas, um die gleiche Menge Strom zu produzieren
 $\eta_{th,KWK}$ den thermischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage
 $\eta_{el,KWK}$ den elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage
 $\eta_{el,KKW}$ den elektrischen Wirkungsgrad des Kondensationskraftwerkes

Es ist also entscheidend für die Bewertung, mit welcher Art von Kondensationskraftwerk eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage verglichen wird. Sowohl der Vergleichswirkungsgrad der KWK-Anlage als auch der Vergleichswirkungsgrad der Elektro-Wärmepumpe hängt vom Wirkungsgrad des gewählten Kondensationskraftwerkes ab. Die beiden zunächst vorgestellten Bewertungsverfahren lassen sich bei der Annahme einer vollständigen Versorgung durch μ -KWK (kein Spitzenlastkessel) und ausbleibender Verteilverluste durch ein Heiznetz ineinander überführen. Die gasbezogene Jahresarbeitszahl kann nicht direkt mit den anderen beiden Verfahren verglichen werden, da sie den Gasverwertungsweg beschreibt und somit die Bewertung der einzelnen Energieformen durch Primärenergiefaktoren nicht durchführt. Es wird direkt mit einem Wirkungsgrad für gasbetriebene zentrale Kraftwerke gerechnet und nicht mit dem durchschnittlichen Kraftwerkswirkungsgrad, der die Grundlage für den Primärenergiefaktor von Strom darstellt. Im Folgenden sollen die verschiedenen Systeme zur Wärmeversorgung von Häusern mit Hilfe der gasbezogenen Jahresarbeitszahl vergleichend nebeneinander gestellt werden. Für die Luftwärmepumpe mit Kesselunterstützung

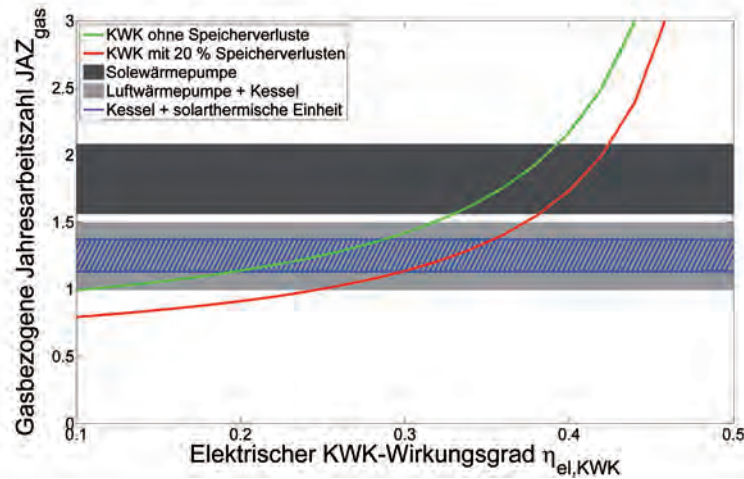


Abbildung 5.1: Vergleich der Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmeerzeugungssysteme bei einem Kraftwerkswirkungsgrad inklusive Netzverluste von 52 %

wird eine elektrische Jahresarbeitszahl JAZ_{el} zwischen 2 und 3 angenommen, für die Solewärmepumpe eine elektrische Jahresarbeitszahl zwischen 3 und 4. Der Jahresnutzungsgrad des Brennkessels wird mit 96 % angenommen und der Jahresnutzungsgrad eines Niedertemperaturkessels mit 93 %. Ausgehend von diesen Annahmen wird nun der Einfluss des Wirkungsgrades des zentralen Kraftwerks auf die energetische Bewertung der verschiedenen Wärmebereitstellungssysteme untersucht.

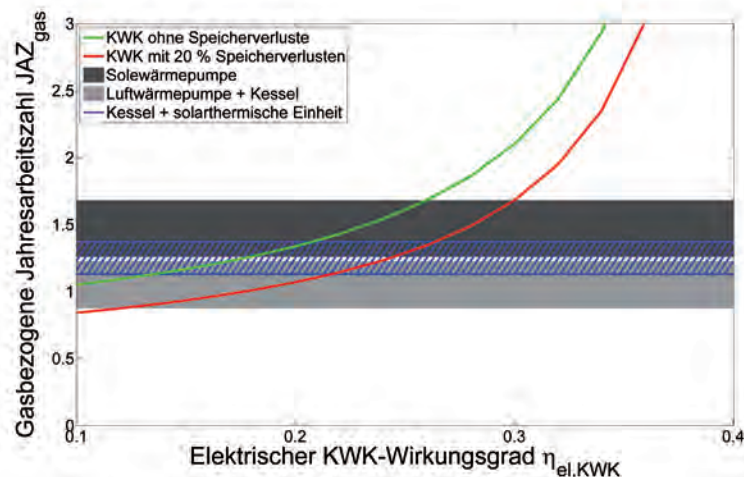


Abbildung 5.2: Vergleich der Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmeerzeugungssysteme bei einem Kraftwerkswirkungsgrad inklusive Netzverluste von 42 %

In Abbildung 5.1 ist der Vergleich für die verschiedenen Systeme bei einem angenommenen Kraftwerkswirkungsgrad von 52 % zu sehen. Dies bezeichnet den durchschnittlichen Jahresnutzungs-

grad des Gas- und Dampfturbinenprozesses von ca. 55 % [ED10] abzüglich der Netzverluste von 5 – 6 % des eingespeisten Stroms [Bun10a]. Es zeigt sich, dass in diesem Fall nur KWK-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von ca. 40 % mit den besten Wärmepumpen, die aus einem solchen effizienten Kraftwerk gespeist werden, konkurrieren können.

Wenn zusätzlich zur Spitzenlastabdeckung der Betrieb von reinen Gasturbinen mit einem Wirkungsgrad von 35 % [LS03] berücksichtigt wird, kann hier ein durchschnittlicher Jahresnutzungsgrad von 45 % angesetzt werden, der sich abzüglich der Netzverluste dann auf ca. 42 % beläuft. Der Vergleich der verschiedenen Techniken für diesen Fall ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Hier zeigt sich, dass in diesem Fall bereits KWK-Systeme mit aktuell für μ -KWK-Anlagen erreichbaren 25–30 % mit der Kombination aus zentralem Kraftwerk und Wärmepumpe konkurrieren können.

6 Kostenoptimale Kombinationen aus Dämmung und Anlagentechnik

In den vergangenen Jahren ist der Heizenergiebedarf von Gebäuden aufgrund der steigenden Energiepreise und der stärkeren Reglementierung durch die Gesetzgebung stetig gesunken [Bun10b]. Im Folgenden soll untersucht werden, welche Kombinationen aus Dämmung und Anlagentechnik sich besonders zur Erreichung der Energieeffizienzziele eignen.

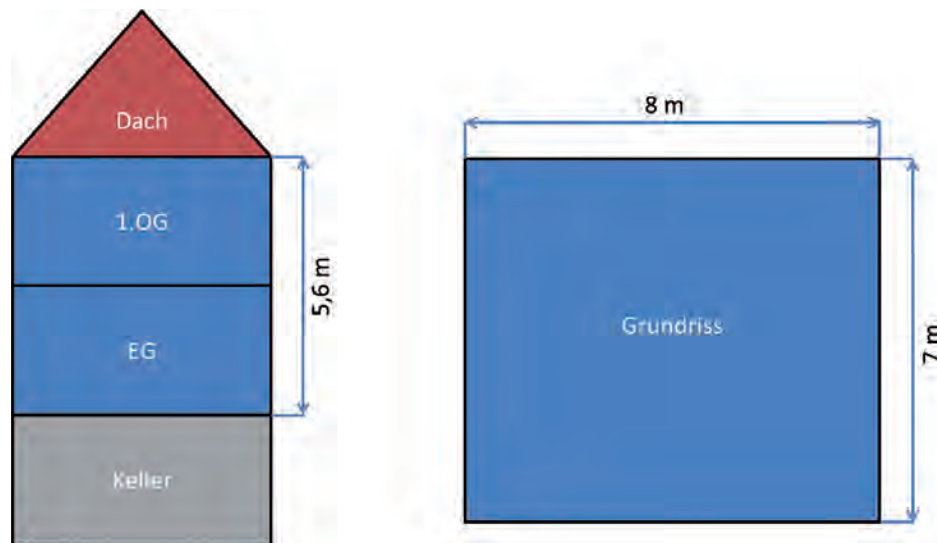


Abbildung 6.1: Grundriss und Schnitt des betrachteten Gebäudes

Die Energieeinsparung durch den Einsatz von Dämmstoffen ist bereits mit kleinen Dämmstärken sehr groß, wie in Abbildung 6.2 zu sehen ist. Diese zeigt den Primärenergiebedarf eines Einfamilienhauses (Abbildung 6.1) mit einem Brennwertkessel als Wärmequelle bei Veränderung der Dämmstärke. Zusätzlich zu den energetischen Effekten kann auch die Innenraumbehaglichkeit bereits durch geringe Dämmstärken deutlich erhöht werden. Allerdings muss in diesem Zusammenhang der so genannte Rebound-Effekt erwähnt werden. Hiermit können Effekte erklärt werden, die bei energetisch verbesserten Gebäudehüllen nicht zu den gewünschten Energieeinsparungen führen, da sich das Nutzerverhalten verändert [GG98].

Als Basis für die Berechnung sind typische Wände und Böden aus den 1960er Jahren gewählt worden. Die Verglasung wird in den kalkulierten Maßnahmen nicht verändert und mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt. Der Luftwechsel wird mit $0,54 \text{ h}^{-1}$ für das freistehende Haus angesetzt. Wärmebrücken werden pauschal mit $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ berücksichtigt.

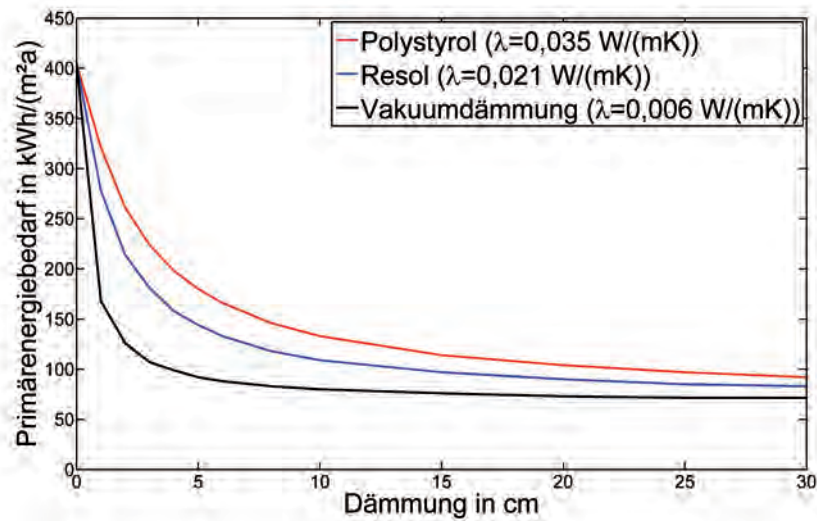


Abbildung 6.2: Primärenergiebedarf eines Einfamilienhauses beim Einsatz verschiedener Dämmstoffe in verschiedenen Dämmstärken

Die einzigen Variablen sind somit die U-Werte der Wandaufbauten, die für die unterschiedlichen betrachteten Dämmstoffe nur von der Stärke der Dämmung abhängen. Als Dämmmaterial wird zum einen Polyurethan mit einem Wärmeleitkoeffizienten $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ angesetzt. Die weiteren betrachteten Materialien sind Resol mit einem Wärmeleitkoeffizienten $\lambda = 0,021 \text{ W/(mK)}$ sowie ein Vakuumdämmsystem mit $\lambda = 0,006 \text{ W/(mK)}$. Die verschiedenen Materialien werden gleichermaßen bei den Außenwänden, der Kellerdecke und der obersten Geschossdecke verwendet.

Wie in Abbildung 6.2 zu sehen ist, sinkt der Primärenergieverbrauch für die Materialien Polystyrol und Resol mit den ersten fünf bis zehn Zentimetern der Dämmung stark ab und nähert sich dann mit zusätzlicher Dämmung asymptotisch einem konstanten Wert an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zusätzlicher Dämmung die Verluste durch Transmission in den wärmeübertragenden Bauteilen im Vergleich zu den Verlusten durch Lüftung und Wärmebrücken klein werden.

Somit sind die Transmissionswärmeverluste nicht mehr das dominante Kriterium zur Reduktion des Primärenergiebedarfs. Bei der Vakuumdämmung, die einen geringen Wärmeleitkoeffizienten besitzt, ist die asymptotische Näherung bereits bei geringeren Dämmstärken zu beobachten. Aufgrund der guten Dämmeigenschaften ist dieses Material allerdings auch nur in geringen Dämmstärken erhältlich. Eine weitere Reduktion des Primärenergiebedarfs kann neben einem Ausbau des Dämmstandards auch durch den Einsatz neuer und effizienterer Anlagentechnik bewirkt werden. Das Konzept der Kraft-Wärme-Kopplung kann durch seine Technik zum einen die Wärme für die Versorgung der Häuser mit Heiz- und Warmwasser bereitstellen. Zum anderen kann auch Strom sowohl im Gebäude selbst verbraucht als auch in das Stromnetz eingespeist werden.

Im Folgenden soll untersucht werden, für welche Ausgangssituationen des Hauses sich welche Maßnahmen eignen. Hierzu wird betrachtet, wie sich der Einsatz von verschiedenen Dicken von Dämmmaterial auf den Primärenergiebedarf auswirkt und wie sich im Gegensatz dazu der Einsatz von drei unterschiedlichen KWK-Techniken bemerkbar macht. Als Dämmmaterial wird hierzu ein Dämmstoff der WL 035 ($\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$) angesetzt. Die KWK-Anlagen werden so bewertet, dass sie die Wärmeversorgung komplett sicherstellen. Im Rahmen dieser Betrachtungen sind die Speicherverluste, die durch den Betrieb der KWK entstehen, nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die endgültige Bewertung der KWK-Anlagen etwas schlechter ausfallen wird als in den Berechnungen angegeben. Alle folgenden Berechnungen wurden nach den Vorschriften der DIN V 18599 durchgeführt.

Zunächst soll analysiert werden, welche Auswirkungen die verschiedenen Maßnahmen bei einem ungedämmten Haus haben. In Abbildung 6.3 ist zu sehen, dass der Einsatz von 10 Zentimeter Dämmstoff eine gleich große Primärenergieeinsparung bringt wie ein Einsatz eines BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 %. Gleichzeitig kann angemerkt werden, dass auch hier die weiteren Einsparungen durch 20 oder 30 Zentimeter Dämmung im Vergleich zu 10 Zentimetern Dämmung mit weiteren 10 Prozentpunkten nicht sehr groß ist.

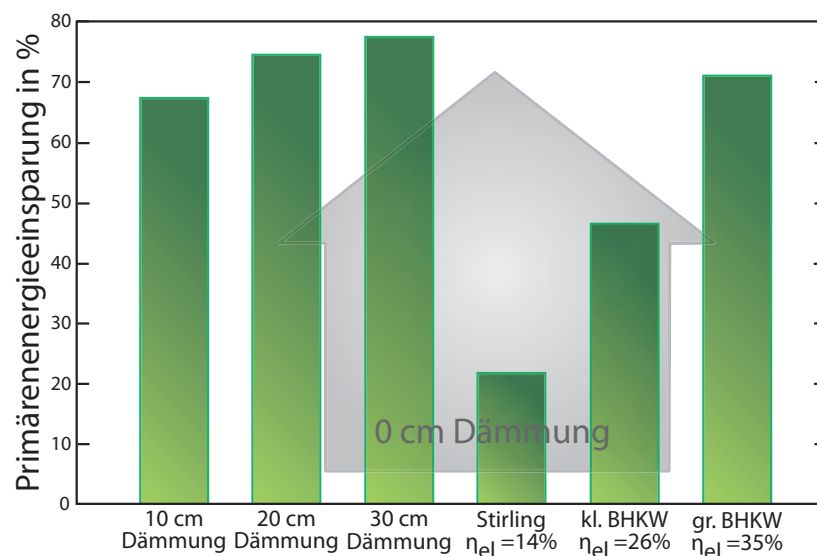


Abbildung 6.3: Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch Dämmung bei einem ungedämmten Haus

Für die in Abbildung 6.4 gezeigten Berechnungen wurde das bereits bekannte Einfamilienhaus mit einer Dämmung von 5 Zentimetern des Standarddämmstoffes Polystyrol ($\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$) als Basis gewählt. Diese geringe Dämmung ist vorteilhaft, da die thermische Behaglichkeit der In-

nenräume durch höhere Oberflächentemperaturen an den Innenseiten positiv beeinflusst wird. Geringe Oberflächentemperaturen können zudem Feuchteschäden und Schimmelpilzbildung fördern und sollten daher auch aus hygienischen Gründen vermieden werden. Wie in Abbildung 6.4 zu sehen ist, wird ein Haus mit 5 Zentimetern Dämmstärke mit einer KWK-Anlage auf Basis eines Stirling-Motors mit 21 % eine geringere Primärenergieersparnis bewirken als ein Haus mit einer Dämmstärke von ca. 10 Zentimeter (Einsparung von 26 %). Da der elektrische Wirkungsgrad mit 14 % bei einem Stirling-Motor vergleichsweise gering ist, kann man hier eine geringere Primärenergieeinsparung erzielen als mit 5 Zentimetern zusätzlichem Dämmstoff. Wenn man anstelle des Stirling-Motors ein BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 26 % als Wärmequelle einsetzt, ist die Ersparnis ungefähr genauso groß wie mit 10 Zentimetern zusätzlichem Dämmstoff. Beim Einsatz eines großen BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % ist die Primärenergieersparnis mit knapp über 70 % deutlich höher als bei einer zusätzlichen Dämmung von 25 Zentimetern, wo die Einsparung bei ca. 50 % liegt. Dies zeigt, dass der Einsatz einer neuen Anlagentechnik in diesem Fall zu einer signifikanten Primärenergieeinsparung führen kann und somit die Kosten für den Dämmstoff reduziert.

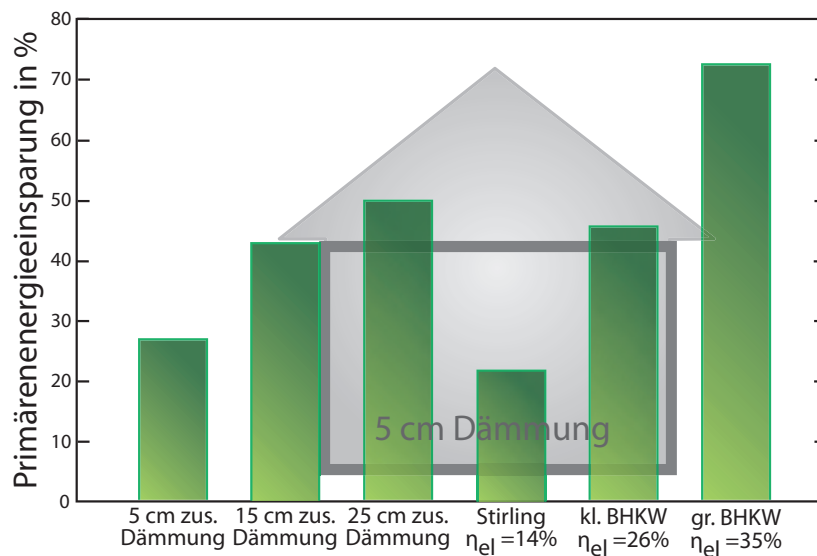


Abbildung 6.4: Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch zusätzliche Dämmung bei einer Basisdämmung von 5 Zentimetern

Abschließend sollen an dieser Stelle noch die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen beim Einsatz in einem Haus, das im Ausgangszustand mit 10 Zentimetern Dämmung versehen ist, analysiert werden. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Abbildung 6.5 zu sehen. Hier ist ersichtlich, dass mit 20 Zentimetern zusätzlicher Dämmung nur noch ca. 31 % an Primärenergie gegen-

über dem Ausgangszustand eingespart werden können. Demgegenüber kann bereits mit einem kleinen BHKW ($\eta_{el} = 26\%$), das bereits auf dem Markt erhältlich ist, Primärenergieeinsparungen von 45 % erreicht werden können. Dies bedeutet, dass hier die Grenze des energetisch sinnvollen Einsatzes von weiterem Dämmstoff erreicht wurde. Es ist möglich, durch für Einfamilienhäuser bereits vorhandene Technik in diesem Fall eine höhere Primärenergieeinsparung zu erzielen.

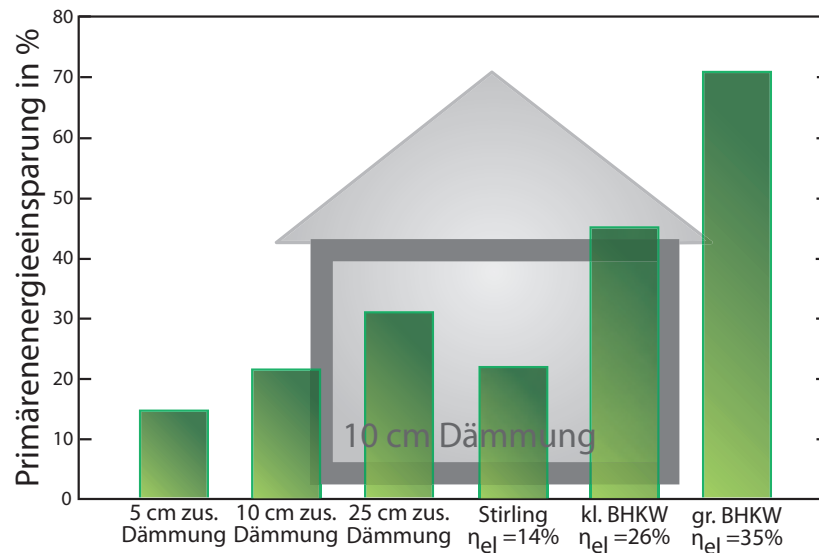


Abbildung 6.5: Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch zusätzliche Dämmung bei einer Basisdämmung von 10 Zentimetern

Insgesamt wird deutlich, dass der Einsatz von Dämmstoffen insbesondere bei bisher nicht gedämmten Gebäuden mit einfachen Wandaufbauten sinnvoll ist, da bereits mit geringen Dämmstärken eines Standard-Dämmstoffes der Primärenergiebedarf deutlich gesenkt werden kann. Die erzielbare Energieeinsparung ist hier größer als die, die mit dem Einsatz von neuer Technik erzielt werden kann. Sobald die Auswirkungen verschiedener Sanierungsmaßnahmen bei einem bereits gedämmten Gebäude untersucht werden, verschieben sich die Daten zu Gunsten der KWK. Bei einer Basisdämmung von fünf Zentimetern liegt die Primärenergieeinsparung durch ein kleines BHKW ($\eta_{el} = 26\%$) schon fast gleichauf mit einer Verstärkung der Dämmung um weitere 25 Zentimeter (insgesamt 30 Zentimeter). Wenn eine Basisdämmung von zehn Zentimetern betrachtet wird, liegt die Primärenergieeinsparung durch das BHKW ($\eta_{el} = 26\%$) deutlich über der, die durch einen Einsatz von 20 Zentimetern weiterer Dämmung (insgesamt 30 Zentimeter) erzielt werden kann.

Abschließend sollen zwei Fälle wirtschaftlich betrachtet werden. Hierzu wird die Kapitalwertme-

Tabelle 6.1: Zusätzliche Kosten, die für ein BHKW im Vergleich zu der Dämmung entstehen dürfen, die die gleiche Primärenergieeinsparung bewirkt

Basisdämmung	Eingesparter Dämmstoff	Art der Kostenbetrachtung	BHKW + Speicher
5 cm	23 cm	nur zus. Materialkosten	€5.500
5 cm	23 cm	Vollkosten der Dämmung	€9.300
10 cm	49 cm	nur zus. Materialkosten	€10.100
10 cm	49 cm	Vollkosten der Dämmung	€13.900

thode mit einem Zinssatz von 5 % angewendet. Die Technik des kleinen BHKWs ($\eta_{el} = 26\%$) wird mit einer bestimmten Menge an Dämmstoff verglichen. Diese Menge an Dämmstoff wird so bemessen, dass die gleiche Primärenergieeinsparung erzielt wird wie mit dem kleinen BHKW. Für die Berechnung wird eine Haltbarkeit der Dämmung von 50 Jahren angenommen sowie eine Laufzeit eines BHKWs sowie des alternativen Wärmeversorgungssystems (Brennwertkessel) von 15 Jahren. Das bedeutet, dass in der Lebenszeit einer Dämmung drei KWK-Anlagen gekauft werden müssen. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten eines BHKWs werden mit 8 % der Investitionssumme angesetzt. Die Haltbarkeit sowie die Wartungskosten werden an [VDI00] angelehnt. Außerdem werden die Erlöse der KWK durch elektrischen Strom sowie der Gasverbrauch nicht berücksichtigt, da sowohl die Gas- und Strompreise als auch mögliche Fördermaßnahmen nicht zuverlässig in die Zukunft berechnet werden können.

In Tabelle 6.1 wird der durch den Einsatz des BHKW eingesparte Dämmstoff sowie die Investitionssumme aufgeführt, die das BHKW kosten darf, um über die Laufzeit der Dämmung genau den gleichen Kapitalwert zu besitzen wie der Einsatz der Dämmung. Es werden zum einen die Kosten für das BHKW für eine Betrachtung der Dämmung mit Vollkosten aufgeführt. Das bedeutet, dass alle bei der Renovierung anfallenden Kosten berücksichtigt werden. Zum anderen werden die Kosten für das BHKW dargestellt, wenn nur die energiebedingten Mehrkosten berücksichtigt werden. In diesen sind nur die Kosten, die durch das Anbringen des Wärmedämmsystems zusätzlich zu einer generellen Sanierungsmaßnahme entstehen, berücksichtigt. Die Datenbasis für die Dämmstoffkostenpreise ist aus [IWU09] entnommen. Die Betrachtung nimmt an, dass der Ersatz der KWK-Anlage in jedem Fall den gleichen Preis hat. Dies kann durch Verbesserungen in der Technik, die in den kommenden Jahren zu erwarten ist, gerechtfertigt werden.

7 Netzkompatibilität der Gebäude - Die Konzepte Aktivhaus und Powerhaus

Die Erzeugung von elektrischem Strom mit erneuerbaren Quellen wie der Windkraft oder der Photovoltaik fluktuiert aufgrund der ungleichmäßigen Intensität der Quellen sehr stark. Um dies auszugleichen, werden momentan insbesondere Gaskraftwerke eingesetzt, um diese Fluktuationen auszugleichen und die Grundlast der Stromversorgung sicherzustellen. Die Regelbarkeit anderer Kraftwerke (vor allem Kohle- und Atomkraftwerke) ist begrenzt, so dass sie meist durchgängig betrieben werden und nicht in der Spitzenlast zum Einsatz kommen. Diese Kraftwerke weisen zudem die geringsten Brennstoffkosten auf. Gasturbinenkraftwerke sind sehr gut regelbar und können innerhalb einer kurzen Zeit aus dem Stillstand auf Maximalleistung gefahren werden [Zah10]. Aufgrund des vergleichsweise geringen Wirkungsgrades der Kraftwerke wird versucht, diese Technik nur für Lastspitzen einzusetzen. Auf der anderen Seite werden aktuell dezentrale KWK-Anlagen

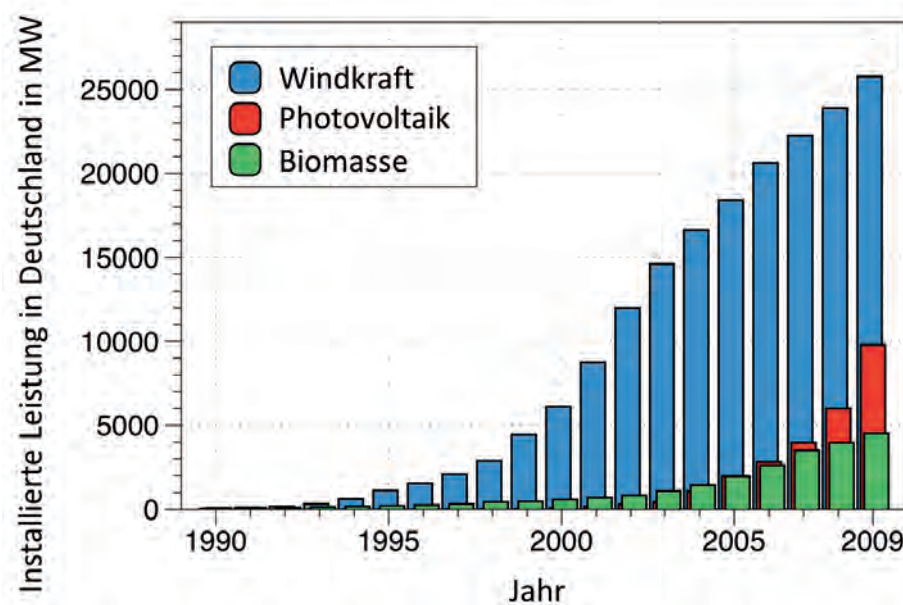


Abbildung 7.1: Kumulierte Leistung von regenerativen Energiequellen zwischen 1990 und 2009 [Mus10]

meist wärmegeführt betrieben, um den Wärmebedarf des jeweiligen Objektes zu decken. Der Strom wird dann häufig als „Nebenprodukt“ angesehen. Da elektrischer Strom die thermodynamisch

höherwertigere Energieform darstellt, sollte in Erwägung gezogen werden, die Anlagen der KWK stromgeführt zu betreiben, um so zum einen die höherwertigere Energieform in den Vordergrund zu stellen und zum anderen durch die stromgeführte Betriebsweise zum Ausgleich der größer werdenden Menge (s. Abbildung 7.1) fluktuierender regenerativer Energiequellen beizutragen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Tatsache, dass es zum heutigen Zeitpunkt, sehr aufwendig ist, größere Mengen elektrischer Energie zu speichern. Der Aufwand zeigt sich vor allem dann, wenn im Vergleich die Speichermöglichkeiten auf der thermischen Seite betrachtet werden, die deutlich zahlreicher und günstiger vorhanden sind.

Diese Rahmenbedingungen führen dazu, dass ein mit einer KWK-Anlage ausgestattetes Gebäude nicht nur die eigene Wärmeversorgung sicherstellt, sondern durch das gezielte Einspeisen von elektrischem Strom auch zur Sicherheit in der Versorgung mit elektrischem Strom beitragen kann. Die Primärenergieersparnis, die durch Anlagentechnik erzielt werden kann, ist - wie bereits gezeigt - vergleichsweise hoch und kann mehrere Zentimeter an Dämmstoff einsparen und damit Primärenergie in der Produktion des Dämmstoffes. Diese Einsparung geschieht durch Einsatz von (aktiver) Gebäudetechnik. Daher kann ein solches Konzept als Aktivhaus bezeichnet werden, das als alternative Möglichkeit zur Primärenergieeinsparung gesehen werden kann im Vergleich zum bereits seit einigen Jahren bekannten Passivhaus, das sich durch eine Fokussierung auf die Dämmung des Hauses auszeichnet. Für den stromgeführten Betrieb bieten sich motorische BHKWs an, die aufgrund ihrer dynamischen Eigenschaften dazu eingesetzt werden können, die Spitzenlast im elektrischen Netz zu bedienen.

Neben der Betrachtung von motorischen BHKWs existiert die Möglichkeit der Nutzung einer hocheffizienten SOFC-Brennstoffzelle. Diese sollte aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades und ihrer langen Zeitkonstanten zum An- und Abfahren möglichst konstant im Betriebspunkt mit dem maximalen Wirkungsgrad oder bei maximaler Last betrieben werden. Dies führt dazu, dass die Brennstoffzelle zur Abdeckung der Grundlast eingesetzt werden kann und hier die bisher in diesem Bereich eingesetzten Großkraftwerke ersetzen kann.

Hierbei ist zu bedenken, dass es im Jahr 2020 noch zu großen Teilen Bedarf für die Grundlastabdeckung geben wird [OSSD⁺09]. Im Jahr 2050 hingegen ist die Erzeugung bereits so volatil, dass ganzjährig nicht von einer Grundlast in der Residuallast aus Bedarf und erneuerbaren Energien gesprochen werden kann [OSSDG10]. Es muss dann beachtet werden, dass auch Vorkehrungen existieren müssen, die Brennstoffzelle abzuschalten, falls die Erzeugung durch regenerative Energiequellen die Last überschreitet. Außerdem könnte auch eine Möglichkeit der kurzfristigen Speicherung des elektrischen Stroms (z.B. durch Elektromobilität) integriert werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung soll zunächst der Einsatz der Brennstoffzelle genauer untersucht werden. Dies führt dann zum Konzept eines Powerhauses, das dezentral mit einer hocheffizienten Technik für die Versorgung mit elektrischem Strom genutzt werden kann.

Die Abgrenzung der beiden Konzepte Aktivhaus und Powerhaus kann anhand der elektrischen

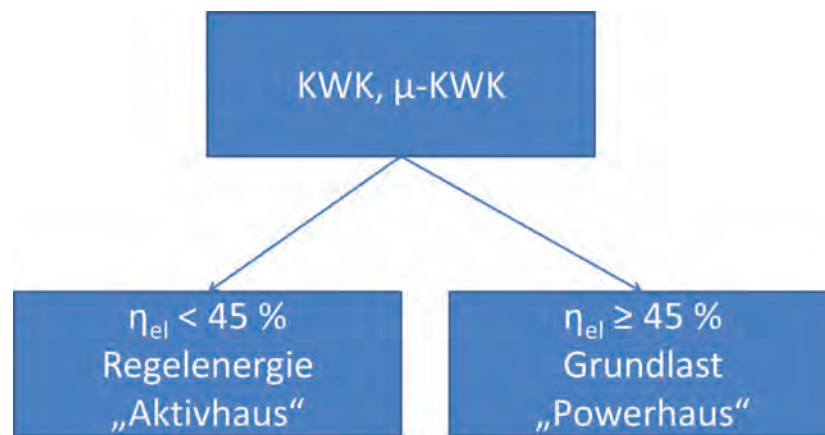


Abbildung 7.2: Konzept zur Verwendung von verschiedenen KWK-Techniken für verschiedene Zwecke

Wirkungsgrade der Anlagen durchgeführt werden (s. Abbildung 7.2). Wie in Kapitel 5 gezeigt wurde, sind alle KWK-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von mehr als 45 % besser als jeder Vergleichsprozess zur Wärmeerzeugung (s. Abbildung 5.1). Deshalb sollten alle KWK-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad, der höher als 45 % liegt, zur Grundlastabdeckung verwendet werden. In diese Kategorie fällt auch die bereits genannte SOFC-Brennstoffzelle. Alle KWK-Anlagen, deren Wirkungsgrad unter 45 % liegt, sollten aus energetischer Sicht nur zur Abdeckung von Spitzenlasten eingesetzt werden, da sie je nach Wirkungsgrad deutlich schlechter sein können als die Vergleichsprozesse. Hier fällt der KWK-Technik aber die Aufgabe zu, die Regelenergie bereitzustellen und damit in den Bereich eines anderen Vergleichsprozesses. Hier können dann schon elektrische Wirkungsgrade von 30 % (inklusive Speicherverlusten) konkurrenzfähig zu den bestehenden Prozessen sein.

Die Wärme, die im Brennstoffzellenprozess als Abwärme entsteht, kann für die Bereitstellung von Warmwasser und Heizung genutzt werden. Dies führt dazu, dass mit einer Brennstoffzelle unter Einbeziehung des aktuellen Primärenergiefaktors für Strom ein Primärenergiebedarf für die Wärmeversorgung des Gebäudes von 0 kWh/(m² a) und darunter ausgewiesen werden kann. Dies liegt an der Bewertung des gleichzeitig erzeugten elektrischen Stroms. Dessen Primärenergiefaktor liegt mit 2,6 deutlich höher als der von Erdgas mit 1,1. Dadurch, dass der elektrische Wirkungsgrad und damit die Stromkennzahl sehr hoch ist, kann die Stromgutschrift, die für die Brennstoffzelle verbucht wird, dazu führen, dass ein negativer Primärenergiebedarf für ein Gebäude ausgewiesen werden kann. Der in der Brennstoffzelle erreichbare elektrische Wirkungsgrad von 60 % liegt im Bereich der aktuell verfügbaren besten zentralen Kraftwerke auf Basis des Gas- und Dampfturbinenprozesses. Im Gegensatz zu den Großkraftwerken kann die Brennstoffzelle jedoch mit einem vergleichsweise geringen Aufwand durch die Aufstellung im Wohngebäude die Nutzung der Abwärme gewährleisten. Durch den Dauerbetrieb der Brennstoffzelle wird ein großer thermischer

Speicher benötigt, der die überschüssige Wärme einspeichert und in Zeiten, in denen die thermische Leistung der Brennstoffzelle nicht zur Versorgung des Hauses ausreicht, die Wärme wieder freigibt. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen.

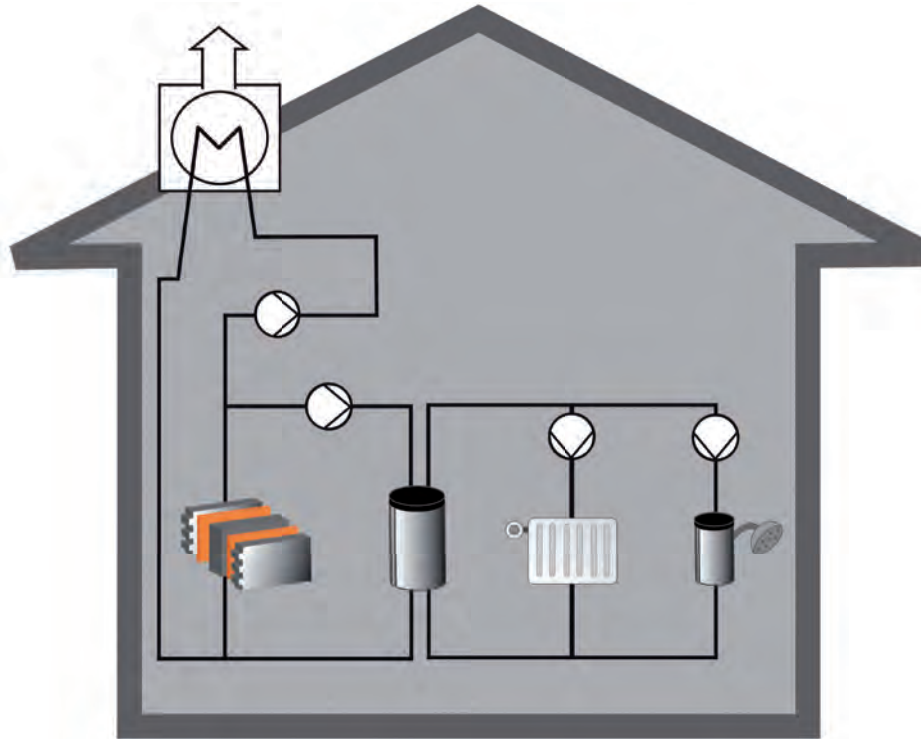


Abbildung 7.3: Schaltschema des Powerhauses

In einem Einfamilienhaus soll die gerade beschriebene Lösung eines Gebäudeenergiesystems mit einer SOFC-Brennstoffzelle installiert werden. Das Haus hat eine Grundfläche von 100 m² und ist nach dem Standard der EnEV 2009 gedämmt. Um Leistungsspitzen abzudecken, wird ein 1.000-Liter-Wasser-Speicher mit einem elektrischen Heizstab (2 kW) ausgestattet, der aus der elektrischen Leistung der Brennstoffzelle gespeist wird. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur der Brennstoffzelle ist mit 15 K angenommen und der Wärmeverlust des Speichers liegt bei 66 W.

In Abbildung 7.4 ist die reine Heizlast des Hauses (ohne Warmwasserbedarf) sowie die thermische Leistung der Brennstoffzelle und die abgegebene Leistung des elektrischen Heizstabs zu sehen. In dieser Betrachtung ist die Nutzung des elektrischen Heizstabs nur an den aktuellen Speicherzustand und die benötigte Wärme gekoppelt. Der Heizstab wird dann zugeschaltet, wenn die im thermischen Speicher gespeicherte Heizwassermenge 15 % der maximalen Speicherkapazität unterschreitet und ein Wärmebedarf vorhanden ist. Der Einsatz des elektrischen Heizstabs in dieser Konfiguration benötigt ca. 1,7 % des in der Brennstoffzelle insgesamt erzeugten elektrischen Stroms. Allerdings kann durch diese Lösung eine größere Brennstoffzelle sowie ein größerer Speicher vermieden werden. Für den elektrischen Wirkungsgrad bedeutet die Nutzung des elektri-

schen Heizstabes eine Einbuße von einem Prozentpunkt von ursprünglich veranschlagten 60 % auf 59 %. Dafür muss die aus dem elektrischen Strom erzeugte Wärme dem thermischen Teil des Wirkungsgrades zugeschlagen werden.

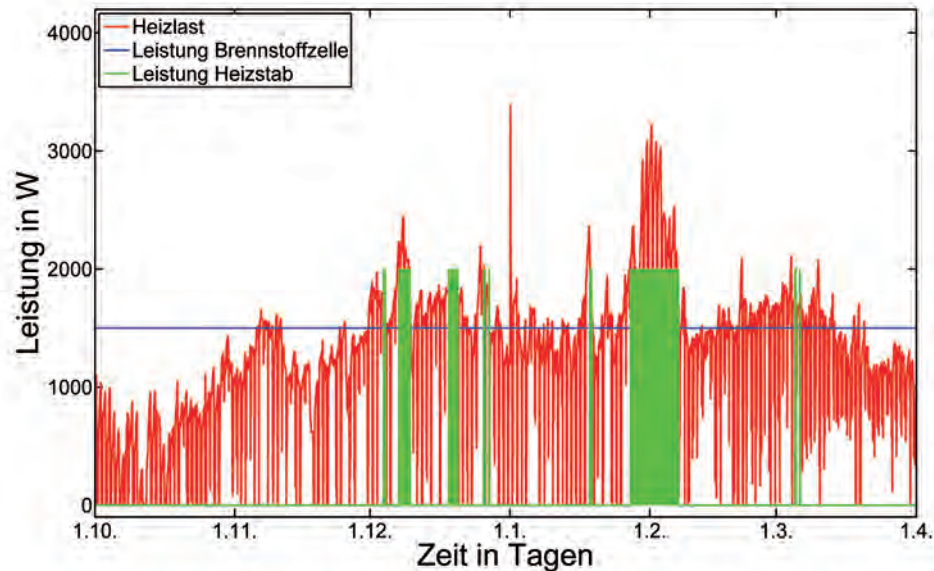


Abbildung 7.4: Heizlast des Gebäudes sowie thermische Leistung der Brennstoffzelle und des elektrischen Heizstabes über eine Heizperiode

Dass der vorhandene Speicher ausreichend ist, ist in Abbildung 7.5 zu sehen. Die Speicherladung sinkt nach der Aufheizphase zu Beginn nie unter 5 %. Der Speicher wurde in dieser Betrachtung als ideal geschichtet angenommen. Wie ebenfalls in Abbildung 7.5 zu sehen ist, ist der Speicher über bestimmte Zeiträume vollständig geladen. Das bedeutet für die Anlagentechnik, dass Wärme rückgekühlt werden muss. Diese rückgekühlte Wärme zuzüglich der Verluste durch den Speicher machen in dieser Konfiguration 23 % der von der Brennstoffzelle erzeugten Wärme aus.

Der Brennstoffnutzungsgrad wird durch die Wärmeverluste ebenfalls abgesenkt. Dies bedeutet eine Abnahme von sechs Prozentpunkten. Um diesen Betrag sinkt auch der Brennstoffnutzungsgrad von ursprünglich 85 % (60 % elektrisch und 25 % thermisch) auf 79 % (59 % elektrisch und 20 % thermisch). Da der elektrische Wirkungsgrad aber immer noch konkurrenzfähig zu einem zentralen Gas- und Dampfturbinenkraftwerk ist und die Brennstoffzelle zumindest in großen Teilen ohne die Verteilverluste des Großkraftwerkes auskommt, kann diese Lösung neben der Dämmung von Gebäuden als äußerst sinnvolle Ergänzung der Energieversorgung sowie zum sparsamen Umgang mit Ressourcen angesehen werden. Es muss durch den Einsatz der Brennstoffzelle im Regelfall elektrischer Strom in das Elektrizitätsnetz eingespeist werden. Dies wird jedoch nicht mit einer solchen Gleichzeitigkeit geschehen, wie es beispielsweise bei der Photovoltaik der Fall ist. Bei Be-

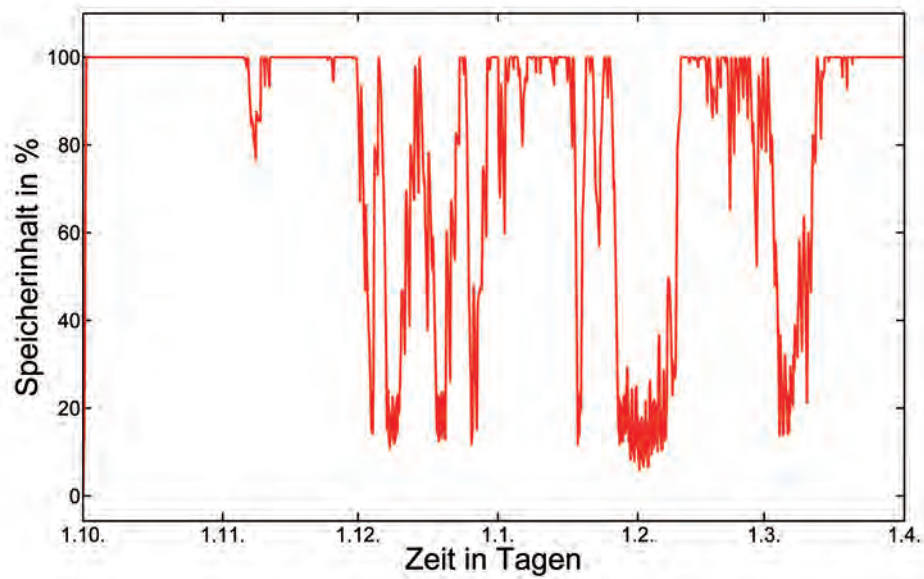


Abbildung 7.5: Speicherauslastung während der Heizperiode

trachtung der Photovoltaik gibt es für an ähnlichen Standorten platzierte Anlagen das gleiche Erzeugungssprofil. Diese addieren sich somit auf und bewirken große Spitzen in der Erzeugung. Dies sollte aufgrund der unterschiedlichen Struktur der Wärmeabnahme (Warmwasser, Lüftungsverhalten) auch durch den Einsatz des elektrischen Heizstabes nicht auftreten.

8 Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wird dargestellt, dass es im Wesentlichen zwei verschiedene Arten von Maßnahmen zur energetischen Verbesserung von Gebäuden gibt. Dies ist zum einen die Wärmedämmung für nicht oder nur schlecht gedämmte Gebäude. Die andere Möglichkeit ist der Einsatz von KWK-Anlagen in Häusern, die bereits eine gut gedämmte Gebäudehülle besitzen. Hier ist der Einsatz von neuer Technik gegenüber weiterem Dämmmaterial vorteilhaft.

Mittlerweile sind diverse marktreife KWK-Anlagen auf dem Markt, die für gebäudetechnische Applikationen geeignet sind. Bei Verwendung dieser Anlagen kann gegenüber der Verwendung eines Brennwertkessels als Wärmequelle eine signifikante Menge an Primärenergie eingespart werden. Diese liegt je nach Anlage auch in einem Bereich, der eine große Menge an Dämmstoff ersetzen kann. Allerdings sollte nicht auf ein Mindestmaß an Dämmung verzichtet werden, da sie sowohl aus Komfortgründen als auch aus hygienischen Gründen unverzichtbar ist. Außerdem bringen die ersten Zentimeter an Dämmstoff auch eine große Primärenergieeinsparung. Eine Kombination der Maßnahmen Gebäudedämmung und Einsatz neuer Technik (wie z.B. μ -KWK) ist also sinnvoll.

Die Energieversorgung der Zukunft muss neben der Versorgung von Gebäuden und Industriebetrieben mit Wärme auch die sichere Versorgung mit elektrischem Strom berücksichtigen. Hier kann die μ -KWK auf zwei unterschiedliche Arten einen Beitrag leisten. Zum einen können schnell regelbare Verbrennungsmotoren im Rahmen eines Aktivhaus-Konzeptes dazu eingesetzt werden, Spitzen im Strombedarf, die durch die volatile Einspeisung von regenerativen Energien entstehen, abzufangen. Diese Art des Betriebs von μ -KWK-Anlagen sollte in weiterführenden Betrachtungen detailliert untersucht werden.

Der zweite Aspekt in der Stromversorgung der Zukunft ist die Bereitstellung der notwendigen Grundlast, vor allem dann, wenn die regenerativen Energiequellen nur eine geringe Strommenge liefern. Diese Grundlast wird momentan von Kraftwerken abgedeckt, die keinen besonders hohen Wirkungsgrad aufweisen (z.B. Kohle- und Atomkraft). Eine andere Möglichkeit, die Abdeckung dieser Grundlast zu gewährleisten, ist das in dieser Veröffentlichung vorgestellte Powerhaus-Konzept für ein Gebäude, das einen Dauerbetrieb einer SOFC-Brennstoffzelle vorsieht. Diese weist einen sehr guten elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 % auf und ist somit als Stromerzeuger konkurrenzfähig zu den besten zentralen Applikationen. Gleichzeitig können aber große Transportverluste im elektrischen Netz durch die Nutzung in produktionsnahen Gebieten vermindert werden.

Im Rahmen dieser Publikation wird aufgezeigt, dass der Dauerbetrieb der Brennstoffzelle sowie die direkte Nutzung der Abwärme durch die Verwendung eines geeigneten Wärmespeichers möglich

ist. Die Verluste sind vergleichsweise gering. Durch eine Investition in diese Technologie ist ein Hausbesitzer anschließend nicht mehr auf den Bezug von extern erzeugtem elektrischem Strom angewiesen und kann zusätzlich die Wärmeversorgung seines Gebäudes ganzjährig sichern.

Inwieweit der durch die Brennstoffzelle erzeugte und nicht intern verbrauchte Strom das elektrische Netz belastet, soll in zukünftigen Untersuchungen erörtert werden. Hier sollte auch die auf das elektrische Netz abgestimmte intelligente Nutzung des elektrischen Heizstabs berücksichtigt werden. Allerdings ist nicht zu erwarten, dass hier dieselben Gleichzeitigkeitseffekte bei der Stromerzeugung auftreten, die bei der Photovoltaik vorhanden sind. Die Dimensionierung der Brennstoffzelle und des thermischen Speichers sollte in einer dynamischen Berechnung bewertet und gegebenenfalls angepasst werden, wenn die Betrachtung des Warmwasserbedarfs zusätzlich integriert wurde.

9 Literatur

- [BK09] BAEHR, H.D. ; KABELAC, S: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendung*. Springer, 2009
- [Bun09] BUNDESMINISTERIUM, BMU: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland-Leitszenario 2009 / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2009. – Forschungsbericht
- [Bun10a] BUNDESAMT, Statistisches: Monatsbericht über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung der Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung, 3. und 4. Quartal 2010 / Statistisches Bundesamt Deutschland. 2010. – Forschungsbericht
- [Bun10b] BUNDESAMT, Statistisches: Monatsbericht über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung der Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung, 3. und 4. Quartal 2010 / Statistisches Bundesamt Deutschland. 2010. – Forschungsbericht
- [CFC11] CFCL CERAMIC FUEL CELLS LTD.: *Was ist Bluegen?* <http://www.bluegen.info>, 2011. – zuletzt abgerufen am 05.10.2011
- [Die02] DIEFENBACH, N: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen. (2002)
- [DIN03] *DIN V 4701 - Energetische Bewertung heiz- und raumlufotechnischer Anlagen*. 2003
- [DIN07] *DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*. 2007
- [ED10] ERDMANN, G. ; DITTMAR, L.: Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland / TU Berlin. 2010. – Forschungsbericht
- [ENE09] *EnEV 2009 - Energieeinsparverordnung für Gebäude, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden veröffentlicht im Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23 vom 30. April 2009, Seite 954*. 2009
- [Gel85] GELLINGS, C.W.: The concept of demand-side management for electric utilities. In: *Proceedings of the IEEE* 73 (1985), Nr. 10, S. 1468–1470
- [GG98] GREENING, L.A. ; GREENE, D.L.: Energy use, technical efficiency, and the rebound effect: a review of the literature / Center for Transportation Analysis, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge. 1998. – Forschungsbericht

- [HAV78] *Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen (Heizungsanlagenverordnung), veröffentlicht im Bundesgesetzblatt Jahrgang 1978 Teil I Nr. 55 vom 22. September 1978, Seite 1581.* 1978
- [HM09] HUCHTEMANN, K. ; MÜLLER, D.: Analyse von Wärmepumpensystemen im Wohnungsbau. In: *KI Kälte Luft Klimatechnik* (2009)
- [IBZ11] IBZ - INITIATIVE BRENNSTOFFZELLE: *Callux, Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim.* <http://www.callux.net>, 2011. – zuletzt abgerufen am 05.10.2011
- [IWU09] *Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012, Teil 1 - Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile in der energetischen Modernisierung von Altbauten.* 2009
- [LS03] LECHNER, C. ; SEUME, J.: *Stationäre Gasturbinen.* Springer, 2003
- [Mus10] MUSIOL, F: Erneuerbare Energien in Zahlen / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2010. – Forschungsbericht
- [Org92] ORGAN, A.J.: *Thermodynamics and gas dynamics of the stirling cycle machine.* Cambridge University Press, 1992
- [OSSD⁺09] OEHSEN, A. von ; STERNER, M. ; SAINT-DRENAN, Y.-M. ; GERHARDT, N. ; BOFINGER, Rohrig-K. S.: Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche / Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. 2009. – Forschungsbericht
- [OSSDG10] OEHSEN, A. von ; STERNER, M. ; SAINT-DRENAN, Y.-M. ; GERHARDT, N.: Anforderungen an den Fluktuationsausgleich für die Stromversorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien. In: *Symposium Energieinnovation* Bd. 11, 2010
- [Pop10] POPP, M.: *Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien.* Springer, 2010
- [Reb02] REBHAHN, E.: *Energiehandbuch: Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie.* Springer, 2002
- [Sau07] SAUER, D.U.: *Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung.* http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/Sauer_Options_Speicher_regenerativ_okt06.pdf, 2007. – zuletzt abgerufen am 06.10.2011
- [Sie11] SIEMENS AG: *GuD-Kraftwerk mit Weltrekord-Wirkungsgrad.* <http://www.siemens.com/innovation/de/news/2011/gud-kraftwerk-mit-weltrekord-wirkungsgrad.htm>, 2011. – zuletzt abgerufen am 06.10.2011

-
- [SS10] SCHAUMANN, K. ; SCHMITZ, K.W.(Hrsg.): *Kraft-Wärme-Kopplung*. Springer, 2010
- [VDI00] *VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. 2000
- [WSV77] *WSVO 1977 - Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung) veröffentlicht im Bundesgesetzblatt Jahrgang aus 1977 Teil I Nr. 56 vom 17. August 1977, Seite 1554*. 1977
- [Zah10] ZAHORANSKY, R. et. a.: *Energietechnik*. Vieweg, 2010

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

2.1 Abschätzung der Speicherkapazitäten und der Kosten auf den verschiedenen Spannungsebenen des elektrischen Netzes	4
2.2 Das Konzept des Demand Side Managements	4
3.1 Entwicklung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf in Anlehnung an das Fraunhofer Institut für Bauphysik	5
3.2 Entwicklung der Mindestanforderungen an den auf die wärmeübertragende Fläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten	6
4.1 Typische geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs eines Wohngebäudes sowie die Einordnung von KWK-Anlagen verschiedener Leistungen (Quelle: Buderus)	8
4.2 Wirkungsgrade von Blockheizkraftwerken in verschiedenen Leistungsklassen (Quelle: Herstellerdatenblätter)	9
5.1 Vergleich der Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmeerzeugungssysteme bei einem Kraftwerkswirkungsgrad inklusive Netzverluste von 52 %	14
5.2 Vergleich der Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmeerzeugungssysteme bei einem Kraftwerkswirkungsgrad inklusive Netzverluste von 42 %	14
6.1 Grundriss und Schnitt des betrachteten Gebäudes	17
6.2 Primärenergiebedarf eines Einfamilienhauses beim Einsatz verschiedener Dämmstoffe in verschiedenen Dämmstärken	18
6.3 Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch Dämmung bei einem ungedämmten Haus	19
6.4 Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch zusätzliche Dämmung bei einer Basisdämmung von 5 Zentimetern	20

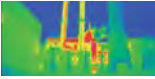
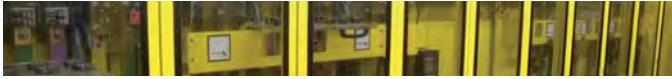
6.5 Vergleich der Primärenergieeinsparung durch Anlagentechnik mit der Primärenergieeinsparung durch zusätzliche Dämmung bei einer Basisdämmung von 10 Zentimetern	21
7.1 Kumulierte Leistung von regenerativen Energiequellen zwischen 1990 und 2009 [Mus10]	23
7.2 Konzept zur Verwendung von verschiedenen KWK-Techniken für verschiedene Zwecke	25
7.3 Schaltschema des Powerhauses	26
7.4 Heizlast des Gebäudes sowie thermische Leistung der Brennstoffzelle und des elektrischen Heizstabs über eine Heizperiode	27
7.5 Speicherauslastung während der Heizperiode	28

10.2 Tabellenverzeichnis

5.1 Primärenergiefaktoren verschiedener Energieträger (Quelle: [DIN07], ergänzt durch [ENE09]	12
6.1 Zusätzliche Kosten, die für ein BHKW im Vergleich zu der Dämmung entstehen dürfen, die die gleiche Primärenergieeinsparung bewirkt	22

11 Danksagung

Die Autoren danken dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) für die finanzielle Unterstützung der vorliegenden Veröffentlichung. Ein besonderer Dank geht hier an Herrn Dr. Lenz, den Vizepräsidenten Gas des DVGW. Des Weiteren danken die Autoren dem Gas-Wärme-Institut e.V. Essen und hier insbesondere Herrn Dr. Albus und Herrn Flayyih für die Projektleitung im Rahmen der Forschungsmaßnahme mit dem Förderkennzeichen G 5-05-10. Ein großer Dank sei auch Herrn Prof. Dr. Fishedick sowie dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH für die hilfreichen Kommentare während der Erstellung dieser Veröffentlichung ausgesprochen.



E.ON Energy Research Center Series

ISSN: 1868-7415

First Edition: Aachen, October 2011

E.ON Energy Research Center,
RWTH Aachen University

Mathieustraße
52074 Aachen
Germany

T +49 (0)241 80 49667
F +49 (0)241 80 49669
post_erc@eonerc.rwth-aachen.de
www.eonerc.rwth-aachen.de