

Bachelor-Arbeit

Aufbereitung von zwei vorhandenen BHKW-Modellen zur
Bereitstellung in der Carnot-User-Community

Diourane Mouhcin

Matrikel-Nr.506235

Betreuender Professor

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik

2. Prüfer

BEng Fabian Ille

Danksagung

Ich möchte noch ganz herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Mario Adam und Herrn BEng Fabian Ille danken, die mich bei der Erstellung meiner Bachelor-Arbeit betreut und unterstützt haben.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Frau und meinem Sohn bedanken. Ohne Ihre Geduld und Unterstützung hätte ich diese Bachelor-Arbeit nicht ausführen können.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	6
1 Einleitung	8
2 Mini-Blockheizkraftwerke	10
2.1 Aufbau und Funktionsweise eines Mini BHKWs	10
2.2 Wirkungsgrade	11
3 Modellierung eines BHKW mit konstanter Leistung	13
3.1 Altes Modell des BHKW Dachs.....	13
3.2 Weiterentwicklung des Modells	16
3.2.1 Messungen im Vorfeld	16
3.2.2 Modellbildung.....	22
3.2.2.1 Bestimmung der Vorlauftemperatur	23
3.2.2.2 Bestimmung der thermischen Leistung	24
3.2.2.3 Bestimmung des Massenstroms.....	25
3.2.2.4 Bestimmung der elektrischen Leistung	27
3.2.2.5 Bestimmung der zugeführten Brennstoffleistung.....	27
3.2.2.6 Berechnung der Wirkungsgrade	28
3.2.2.7 m-File	29
3.2.2.8 Sicherheitsabschaltung des BHKWs	29
3.3 Validierung des BHKW_Dachs.....	31
3.3.1 Validierung des stationären Zustands.....	32
3.3.2 Validierung des Dynamischen Verhaltens.....	34
4 Modellierung eines BHKWs mit modulierbarer Leistung	39
4.1 Altes Modell des BHKW Ecopower.....	40
4.2 Weiterentwicklung des Modells	42
4.2.1 Bestimmung der Vorlauftemperatur	43
4.2.2 Regelung des BHKWs.....	44
4.2.3 Bestimmung des Massenstroms.....	48

4.2.4	Bestimmung der elektrischen Leistung und der Brennstoffleistung	51
4.2.5	Berechnung der Energien und der Wirkungsgrade	53
4.3	Überprüfung der Regelung	54
5	Fazit	57
	Literaturverzeichnis	59
	Erklärung	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellvalidierung	8
Abbildung 2: Innenaufbau der Mini-BHKWs Dachs und Ecopower	9
Abbildung 3: Prinzipschaltbild des Mini-BHKWs	9
Abbildung 4: altes Modell des BHKW Dachs	13
Abbildung 5: Verschaltung des BHKW-Moduls	14
Abbildung 6: die Hydraulik des Dachs BHKWs	14
Abbildung 7: Verschaltung des Pumpe-Moduls	15
Abbildung 8: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{RL} = 44^{\circ}\text{C}$	17
Abbildung 9: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{RL} = 52^{\circ}\text{C}$	17
Abbildung 10: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{RL} = 60^{\circ}\text{C}$	18
Abbildung 11: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{RL} = 64^{\circ}\text{C}$	19
Abbildung 12: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{RL} = 74^{\circ}\text{C}$	20
Abbildung 13: Versuchsergebnisse des BHKW BHKW bei stationärem Verhalten	21
Abbildung 14: Baustein des BHKWs mit konstanter Leistung	22
Abbildung 15: Maske des Bausteins BHKW mit konstanter Leistung	22
Abbildung 16: Modellaufbau des Mini-BHKW mit konstanter Leistung	23
Abbildung 17: Darstellung des thermischen Leistungsfaktor_ Kennfelds	24
Abbildung 18: Baustein des Pumpe mit Thermostatregelung	25
Abbildung 19: die Verschaltung des Bausteins Pumpe mit Thermostatregelung	25
Abbildung 20: Darstellung der Leistungen des BHKW mit konstanter Leistung	27
Abbildung 21: Brenntechnische Kenndaten Erdgas LL g	28
Abbildung 22: Darstellung der Wirkungsgrade	28
Abbildung 23: m-File des BHKW mit konstanter Leistung	29
Abbildung 24: Sicherheitsabschaltungsblock	29
Abbildung 25: Stateflow-Chart des Mini-BHKWs	30
Abbildung 26: Sicherheitsabschaltung des BHKWs mit konstanter Leistung	30
Abbildung 27: Modellsimulation der Validierung	31
Abbildung 28: m-File der Validierung	31
Abbildung 29: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 44^{\circ}\text{C}$	32
Abbildung 30: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 59^{\circ}\text{C}$	32
Abbildung 31: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 64^{\circ}\text{C}$	33
Abbildung 32: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 74^{\circ}\text{C}$	33
Abbildung 33: Anpassungen der thermischen Trägheit	34
Abbildung 34: Modellsimulation mit Fehlerquadratsumme	35
Abbildung 35: Temperaturverlauf des Anfahrverhaltens	36
Abbildung 36: Temperaturverlauf bei unkonstanter Rücklauftemperatur	36

Abbildung 37: Wasservolumen als Funktion der thermischen Leistung.....	38
Abbildung 38: thermische Masse des BHKW	38
Abbildung 39: technische Daten des Mini-BHKW Ecopower	39
Abbildung 40: altes Modell des Mini-BHKW Ecopower	40
Abbildung 41: altes Stateflow-Chart des Mini-BHKW Ecopower	40
Abbildung 42: alte Drehzahlregelung des Mini-BHKW Ecopower	41
Abbildung 43: Baustein des BHKWs mit modulierbarer Leistung	42
Abbildung 44: Maske des Bausteins BHKW mit modulierbarer Leistung.	42
Abbildung 45: Modell des BHKW mit modulierbarer Leistung	43
Abbildung 46: Regelungsblock des BHKW mit modulierbarer Leistung.....	44
Abbildung 47: Stateflow-Chart des BHKW mit modulierbarer Leistung	45
Abbildung 48: Block Saturation	46
Abbildung 49: Schaltbedingungen und Anpassung der thermischen Leistung.	47
Abbildung 50: Hydraulikschema der Rücklaufhochhaltgruppe	48
Abbildung 51: Modul der Rücklaufhochhaltegruppe.	48
Abbildung 52: Maske der Pumpe.	49
Abbildung 53: Baustein der Pumpe	50
Abbildung 54: Darstellung der Leistungen des BHKWs mit modulierbarer Leistung...	51
Abbildung 55: Abbildung der Funktion X_{pth}	52
Abbildung 56: m-File des BHKW mit modulierbarer Leistung	52
Abbildung 57: Darstellung der Wirkungsgrade.....	53
Abbildung 58: Parameterblock des BHKW mit modulierbarer Leistung.....	54
Abbildung 59: Simulationsmodell zur Prüfung der Regelung	54
Abbildung 60: m-File der Simulation	55
Abbildung 61: Leistungs- und Temperaturverlauf bei Nachregelintervall=450 s	55
Abbildung 62: Parameterblock des BHKWs.	56
Abbildung 63: Leistungs- und Temperaturverlauf bei Nachregelintervall=120 s.....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: technische Daten des SenerTec Dachs G5,5.....	13
Tabelle 2: thermischer Leistungsfaktor in Anhängigkeit der thermischen Leistung.....	24
Tabelle 3: Massenstrom in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur	26
Tabelle 4: Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur.....	26
Tabelle 5: Fehlerquadrarsumme in Abhängigkeit des Volumens.....	35
Tabelle 6: Kenndaten verschiedener Mini-BHKWs	37
Tabelle 7: Speichervolumen in Abhängigkeit des Gewichts	37
Tabelle 9: Kennzahlen des modulierenden Mini- BHKWs	44
Tabelle 8: P _{el} und Gasverbrauch in Abhängigkeit der thermischen Leistung	51

1 Einleitung

Simulationen sind heutzutage ein Bestandteil der Entwicklung und Optimierung von Systemen und Prozessen. In der VDI-Richtlinie 3633 ist die Simulation wie folgt definiert: "Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind"¹.

Die Untersuchungen eines Systems durch Simulation können in wesentlich kürzerer Zeit durchgeführt werden, daher kann man ein Projekt zeitlich verkürzen und die Kosten reduzieren.

Mit Hilfe der Simulation kann man ein Systemverhalten ohne Gefahr durchlaufen im Vergleich zu einem Experiment, wenn das System in Grenzbereichen oder bei besonderen Bedingungen gefahren werden muss.

Um ein technisches System zu simulieren, muss zuerst ein Modell gebildet werden.

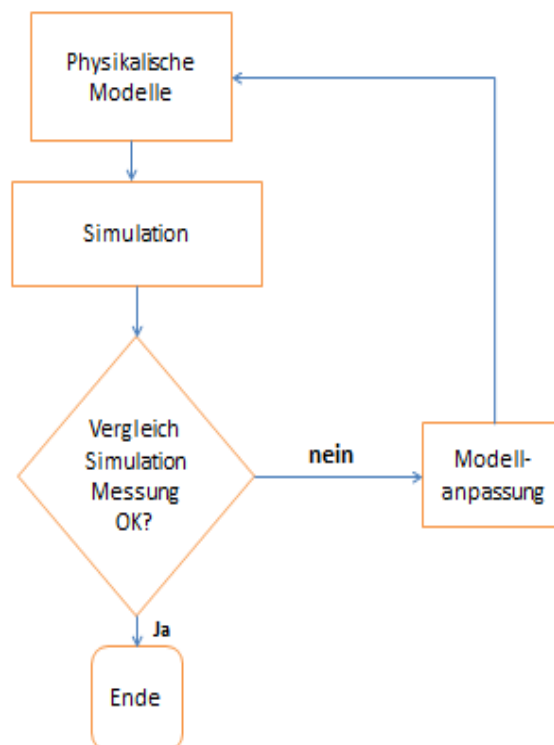


Abbildung 1: Modellvalidierung

Die Abbildung 1 zeigt, wie man ein Modell validieren kann. Es soll überprüft werden, ob das Modell mit der Realität übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, dann bedarf es

einer Nachbesserung. Das Modell muss dann nochmals überprüft werden und gegebenenfalls weiter System angepasst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Modelle zweier Mini-BHKWs (Dachs der Fa. Senertec und Ecopower der Fa. Vaillant) mittels der Softwareumgebung Matlab/Simulink in Verbindung mit den Toolboxen CARNOT und STATEFLOW erstellt. Darüber hinaus sollen die beiden Modelle soweit aufbereitet werden, dass sie in die neueste CARNOT-Modellbibliothek aufgenommen werden können. Die Hauptteile der Arbeit sind:

- Das stationäre- und instationäre Verhalten des Modells “BHKW Dachs“ soll validiert werden. Hierfür mussten am Prüfstand neue Messungen durchgeführt werden. Ziel der Messung ist die Darstellung eines Kennfelds, dass das stationäre Verhalten des BHKWs abbildet und Messdaten zum Anfahrverhalten zu generieren.
- Bei dem Modell des Ecopowers sollte eine neue allgemeingültige Regelung zur Modulation der thermischen Leistung und den Sicherheitsabschaltbedingungen entwickelt werden.
- Beide Modelle sollen in ihrer Leistung und in ihren sonstigen Eigenschaften frei skalierbar sein.

2 Mini-Blockheizkraftwerke

Mini-Blockheizkraftwerke sind Anlagen die aus Primärenergieträgern wie Erdgas, Strom und Wärme gleichzeitig erzeugen können. Ihre elektrische Leistung liegt im Bereich von 3 bis 15 kW und die thermische Leistung bewegt sich im Bereich von 5 bis 35 kW.

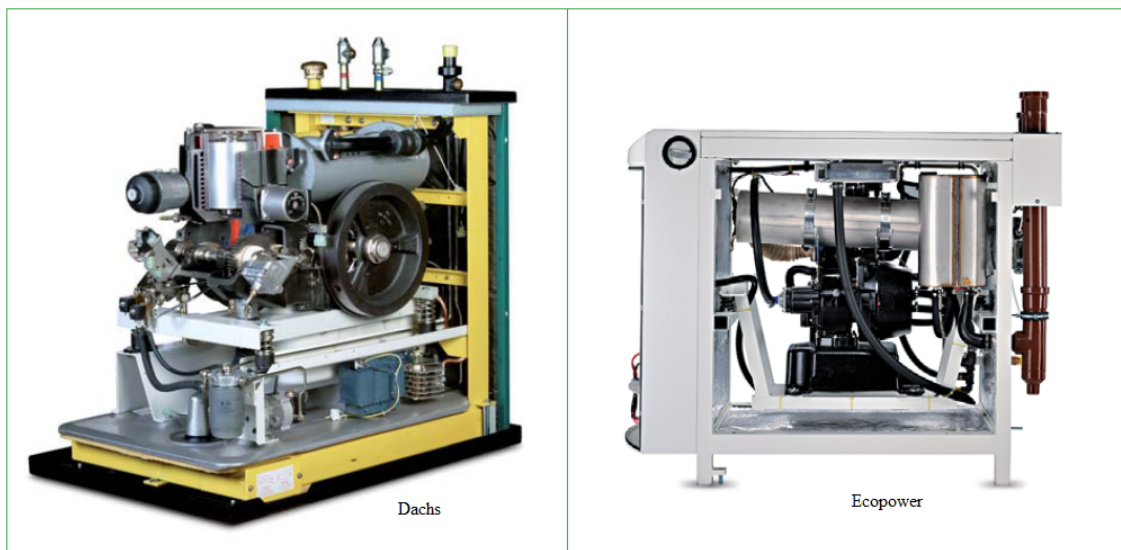


Abbildung 2: Innenaufbau der Mini-BHKWs Dachs² und Ecopower³

2.1 Aufbau und Funktionsweise eines Mini-BHKWs

Nachfolgend werden zunächst das Prinzip und die wichtigsten Bauteile des Mini-BHKWs erläutert, wie in der folgenden Abbildung skizziert.

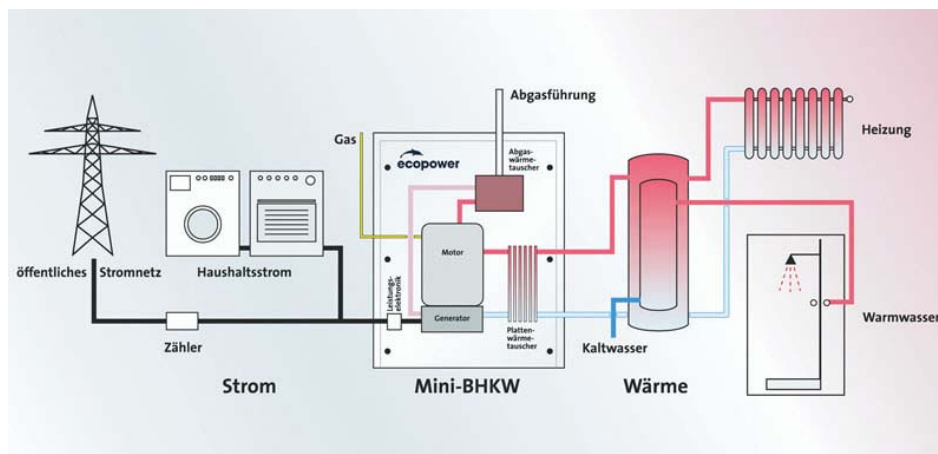


Abbildung 3: Prinzipschaltbild des Mini-BHKWs³.

Zur Umwandlung von Primärenergie in Strom und Wärme benötigt das BHKW vier Grundbauteile:

- Der Verbrennungsmotor, der als Generatorantrieb dient. Dabei unterscheidet man zwischen Stirlingmotor, Dampfmotor, Ottomotor und Dieselmotor.
- Der Generator wandelt die mechanische Bewegung des Motors in Strom um, der dann direkt genutzt oder ins Netz gespeist wird.
- Der Wärmetaucher wird zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Generator, Abgas, Motorabwärme und Ölkreislauf genutzt. Da Strom und Wärme gleichzeitig produziert werden, wird oft ein Pufferspeicher eingesetzt, der Wärme über einen längeren Zeitraum speichert.
- Jedes BHKW benötigt eine Steuerung, um die Betriebsparameter wie Motor-temperatur und Ein- bzw. Ausschaltbedingungen zu regeln.

2.2 Wirkungsgrade

Die Effizienz sowie die Leistungsfähigkeit des BHKW können durch Wirkungsgrade beschrieben und beurteilt werden. Ein Wirkungsgrad beschreibt allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

➤ Elektrischer Wirkungsgrad:

Der elektrische Wirkungsgrad stellt das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zur zugeführten Brennstoffleistung dar:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_{Brennstoff}} = \frac{P_{el}}{V_{B, Norm} \times H_{U, Norm}} \quad \text{mit:}$$

η_{el} : elektrischer Wirkungsgrad

P_{el} : abgegebene elektrische Leistung

$Q_{Brennstoff}$: zugeführte Brennstoffleistung

$V_{B, Norm}$: zugeführter Volumenstrom an Brenngas im Normzustand

$H_{U, Norm}$: Heizwert des Erdgases im Normzustand

➤ Thermischer Wirkungsgrad:

Der thermische Wirkungsgrad stellt das Verhältnis der vom BHKW abgegebenen thermischen Leistung zur zugeführten Brennstoffleistung dar und ergibt sich wie folgt:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{Brennstoff}} = \frac{\dot{Q}_{th}}{V_{B, Norm} \times H_{U, Norm}}$$

Die thermische Leistung beschreibt die vom BHKW abgegebene Nutzwärme und ergibt sich gemäß folgender Gleichung:

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \times c_p \times (T_{VL} - T_{RL})$$

\dot{Q}_{th} : abgegebene thermische Leistung

\dot{m} : Massenstrom des Heizwassers

c_p : spezifische Wärmekapazität

T_{VL} : Vorlauftemperatur

T_{RL} : Rücklauftemperatur

➤ **Gesamtwirkungsgrad:**

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus der Addition des thermischen Wirkungsgrads und des elektrischen Wirkungsgrads.

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th}$$

3 Modellierung eines BHKW mit konstanter Leistung

Mit Hilfe der Softwareumgebung MATLAB/ SIMULINK in Verbindung mit den Tool-boxen CARNOT und STATEFLOW wurde das Modell eines Mini-BHKWs (Dachs der Firma Senertec GmbH) weiterentwickelt.

Das Mini-BHKW Dachs kann nur mit konstanter Drehzahl betrieben werden. Dabei erzeugt dieses Mini-BHKW 5,5 kW Strom und 12,5 kW Wärme. In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten des BHKW Dachs angegeben.

Tabelle 1: technische Daten des SenerTec Dachs G5,5

Erzeugungsprinzip		Otto-Motor
Elektrische Leistung	kW_{el}	5,5
Thermische Leistung	kW_{th}	12,5
Aufgenommene Leistung	kW	20,5
Elektrischer Wirkungsgrad		ca. 27%
Thermischer Wirkungsgrad		ca. 61%
Gesamtwirkungsgrad		ca. 88%
Geräuschentwicklung	dB	52-56
Gewicht	kg	530
Abmessungen (BxHxT)	cm	72x 100 x 107

3.1 Altes Modell des BHKW Dachs

Im Rahmen eines alten Forschungsprojekts wurde bereits ein Simulationsmodell erstellt. Das Modell ist in der Abbildung 4 dargestellt.

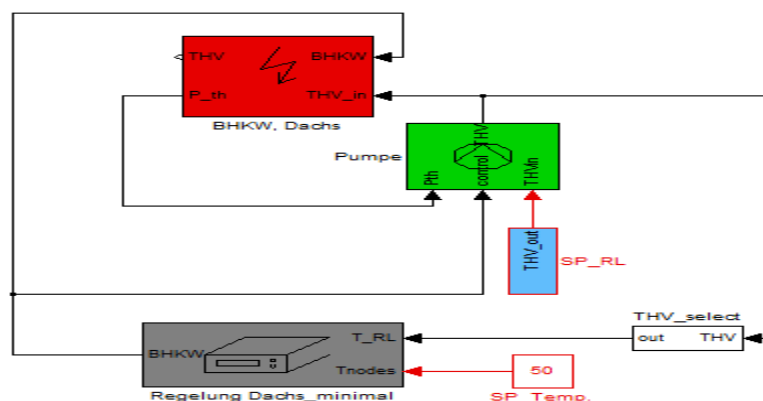


Abbildung 4: altes Modell des BHKW Dachs

Im Block BHKW Dachs wurden die thermische Leistung und die Vorlauftemperatur des BHKWs ermittelt. In Abbildung 5 wird die Verschaltung dieses Blocks dargestellt.

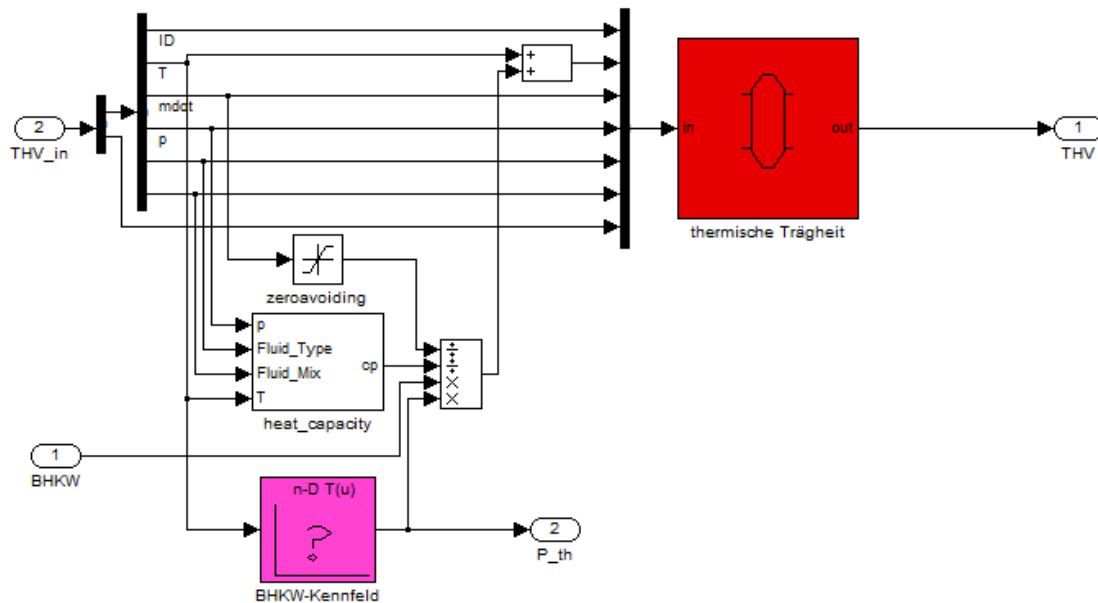


Abbildung 5: Verschaltung des BHKW-Moduls

Über das BHKW-Kennfeld wird die thermische Leistung ermittelt. Die thermische Leistung hängt von der Rücklaufftemperatur ab. Laut den Angaben der an der FH Reutlingen durchgeführten Messungen sinkt die thermische Leistung mit zunehmender Rücklaufftemperatur von 12,5 auf 11,5 kW ab.

Im Modul Pumpe wurde eine Thermostatregelung abgebildet. Die Abbildung 6 zeigt die Kühlwasserthermostatregelung des BHKW Dachs.

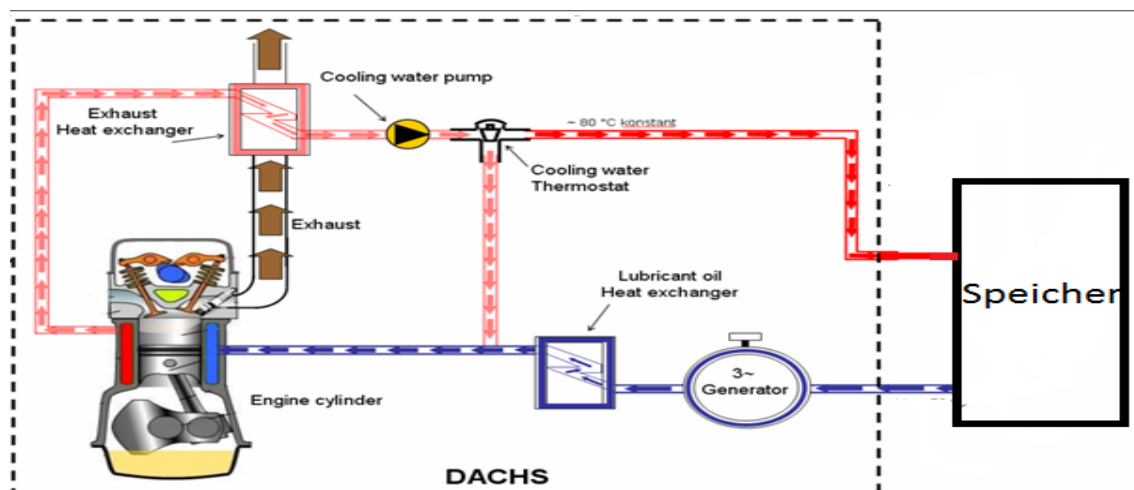


Abbildung 6: die Hydraulik des BHKW Dachs

Über die Thermostatregelung erfolgt eine Rücklauftemperaturanhebung. Bei niedriger Rücklauftemperatur fällt Kondensat im Abgaswärmetaucher an und der Gasmotor kann seine Betriebstemperatur nicht erreichen. Durch die Temperaturanhebung wird dieses Problem vermieden. Die Thermostatregelung ist im Modell berücksichtigt und wird nicht durch Abbildung eines Mischers realisiert, sondern berechnet.

Die Abbildung 7 zeigt die Verschaltung des Pumpe-Moduls. Dabei wurde der Massenstrom im Entladekreis, d.h. zwischen dem Thermostatmischer und dem Verbraucher nach der folgenden Formel berechnet:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{th}}{c_p (T_{set} - T_{RL})} \quad \text{dabei,}$$

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]

\dot{Q}_{th} : thermische Leistung [W]

T_{set} : Vorlaufsolltemperatur, die sich je nach eingebautem Thermostat einstellen soll

T_{RL} Rücklauftemperatur [°C]

c_p : Wärmekapazität [J/(kg*K)]

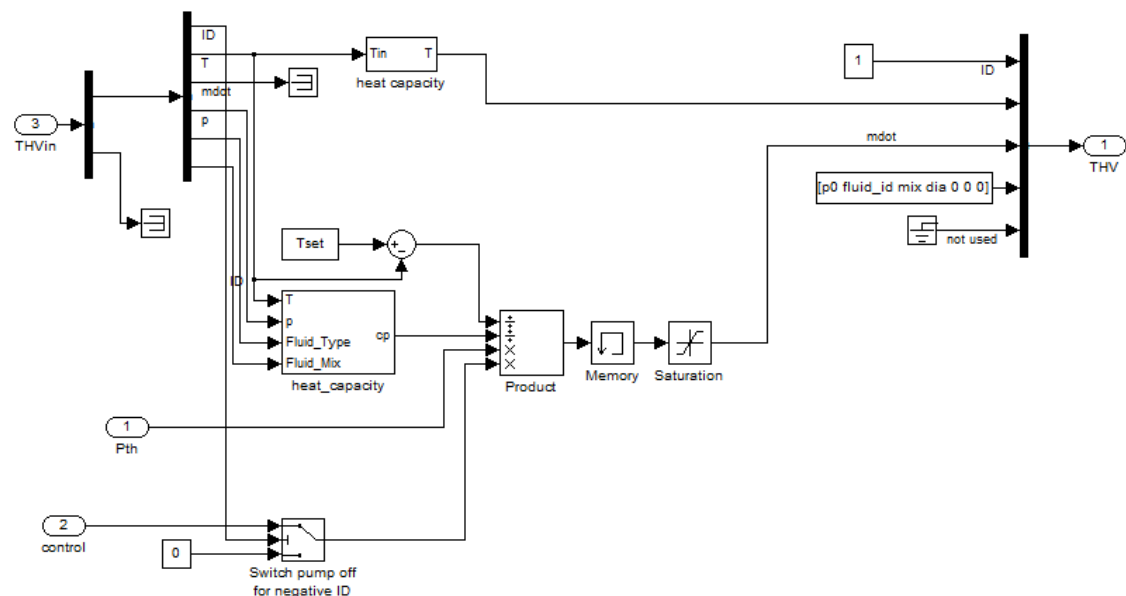


Abbildung 7: Verschaltung des Pumpe-Moduls

3.2 Weiterentwicklung des Modells

Das bereits vorhandene Modell wurde verändert und weiterentwickelt. Dies betraf folgende Komponenten des BHKWs: Pumpe und Regelung. Die Abbildung des stationären Verhaltens basiert nun vollständig auf Kennfeldern (inklusive der Abbildung der Thermostatregelung). Zur Ermittlung der Kennfelder wurden Prüfstanduntersuchungen an der FH Düsseldorf durchgeführt.

3.2.1 Messungen im Vorfeld

Erste Messungen sollten im stationären Zustand die thermische Leistung, den Volumenstrom und die zugeführte Kraftstoffmenge bei verschiedenen Rücklauftemperaturen ermitteln. Dabei wurden die T_{RL} zwischen 44°C und 74°C variiert. Für diesen Zweck musste die Speichertemperatur schon vor dem Start der Messung auf der gewünschten Rücklauftemperatur entsprechen. Entsprechend musste der Speicher mit dem BHKW aufgeheizt oder mit der Kältemaschine abgekühlt werden. Vor dem Messbeginn wurde das BHKW zudem vorgewärmt, da sonst die thermische Leistung beim Kaltstart langsam ansteigen und nicht mit Nennleistung betrieben werden würde. Die Sollvorlauftemperatur des Thermostats ist auf 80°C eingestellt.

Im Rahmen der stationären Versuche sind vier Versuchsreihen durchgeführt worden.

Dabei wurden die Messungen für die Rücklauftemperatur $T_{RL}=44^{\circ}\text{C}$, 52°C , 64°C , und 74°C vorgenommen. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 8 bis 12 dargestellt.

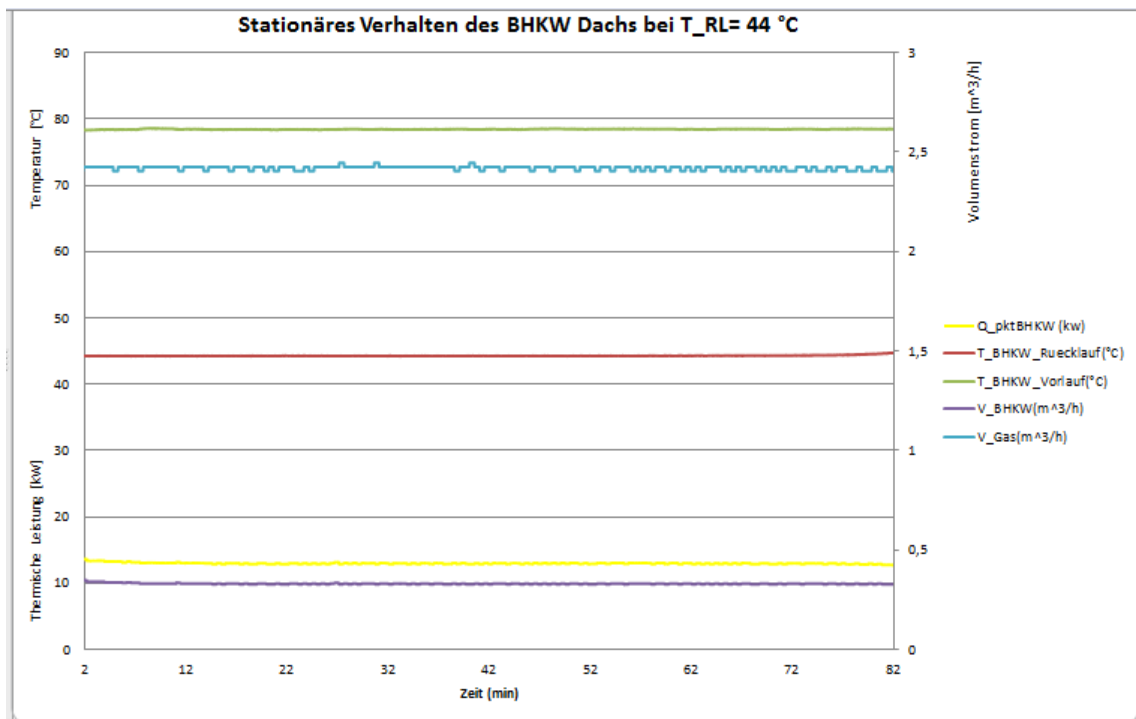


Abbildung 8: Messung zum stationären Verhalten des BHKW Dachs bei $T_{\text{RL}}= 44^{\circ}\text{C}$

Die Abbildung 8 zeigt, dass bei Mittelung von 82 Minuten bei einer Rücklauftemperatur von 44°C eine Vorlauftemperatur von etwa $78,5^{\circ}\text{C}$ und thermische Leistung von 12,9 kW gemessen wurde. Der Volumenstrom im Entladekreis des BHKW betrug $0,33 \text{ m}^3/\text{h}$ und der Gasverbrauch betrug $2,42 \text{ m}^3/\text{h}$.

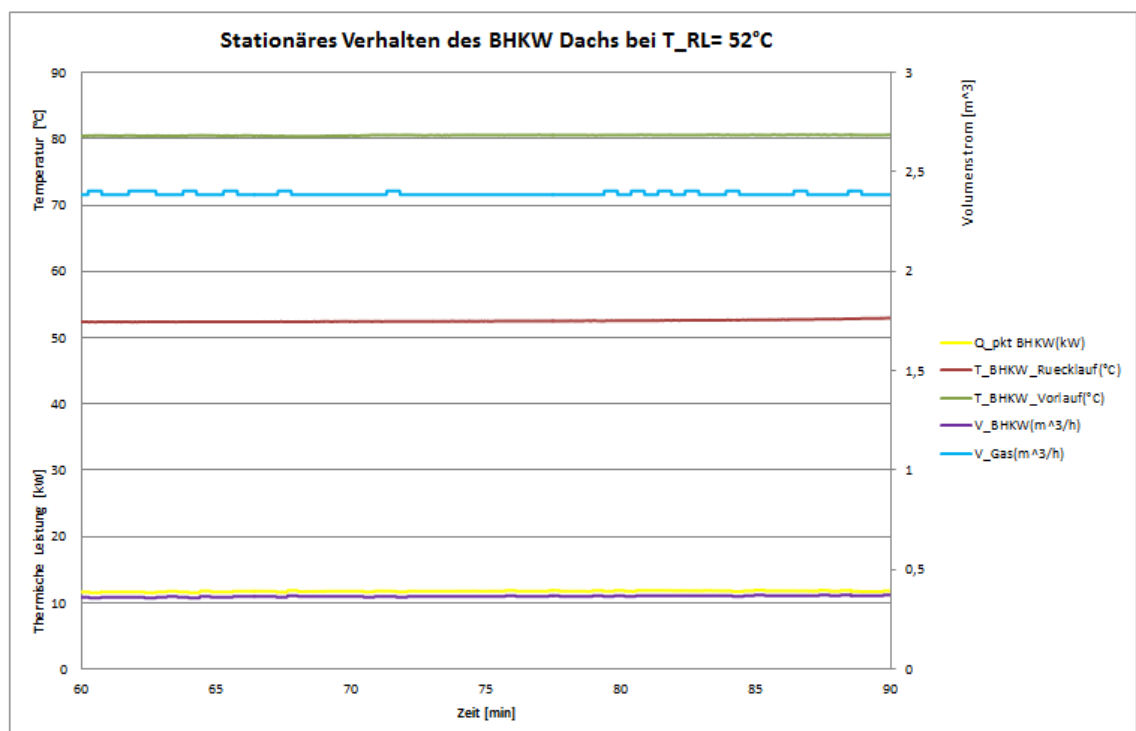


Abbildung 9: Messung zum stationären Verhalten des BHKW Dachs bei $T_{\text{RL}}= 52^{\circ}\text{C}$

Die zweite Messung wurde über einen Versuchszeitraum von 90 Minuten durchgeführt, aber nur die letzte Halbstunde wurde ausgewertet. Es wurde bei einer Rücklauftemperatur von $52,7^{\circ}\text{C}$ eine Vorlauftemperatur von $80,5^{\circ}\text{C}$, die thermische Leistung von $11,7\text{ kW}$ und der Volumenstrom des BHKW von $0,36\text{ m}^3/\text{h}$ gemessen. Der Gasverbrauch betrug $2,4\text{ m}^3/\text{h}$.

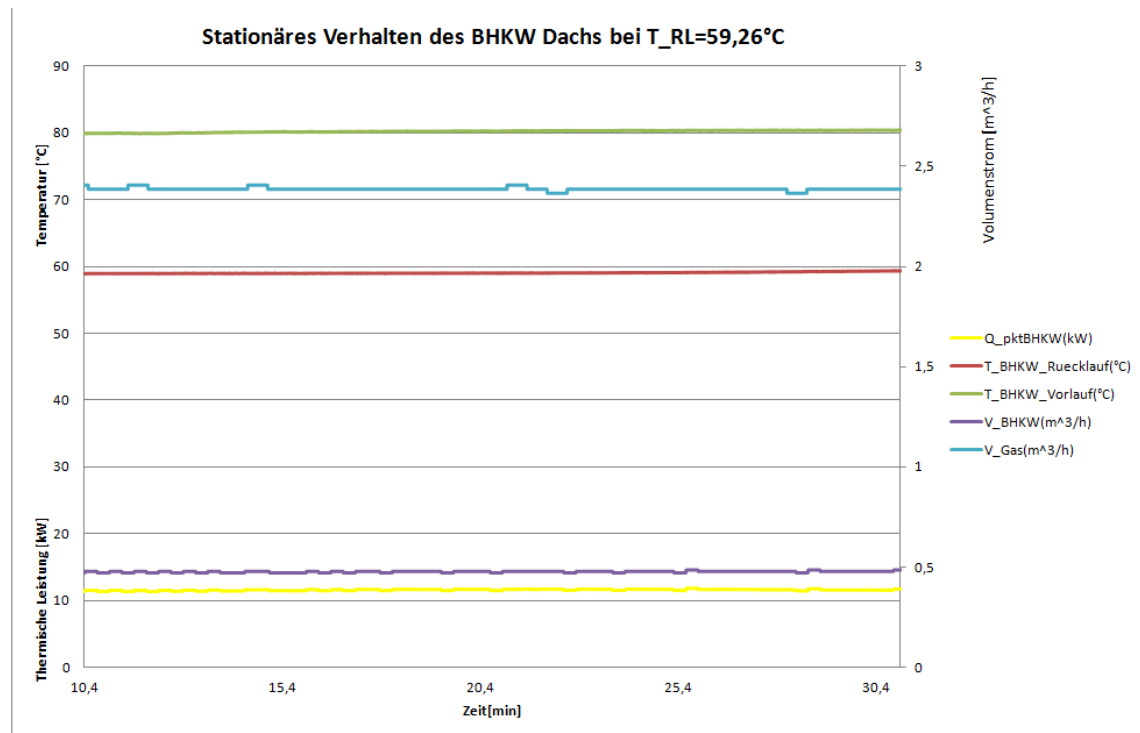


Abbildung 10: Messung zum stationären Verhalten des BHKW Dachs bei $T_{\text{RL}}=59,26^{\circ}\text{C}$

Aus der Abbildung 10 ist zu erkennen, dass bei Mittelung von 20 Minuten bei einer Rücklauftemperatur von $59,26^{\circ}\text{C}$ eine Vorlauftemperatur von etwa $80,55^{\circ}\text{C}$ und thermische Leistung von $11,54\text{ kW}$ gemessen wurde. Der Volumenstrom des BHKW betrug $0,48\text{ m}^3/\text{h}$ und der Gasverbrauch betrug $2,40\text{ m}^3/\text{h}$.

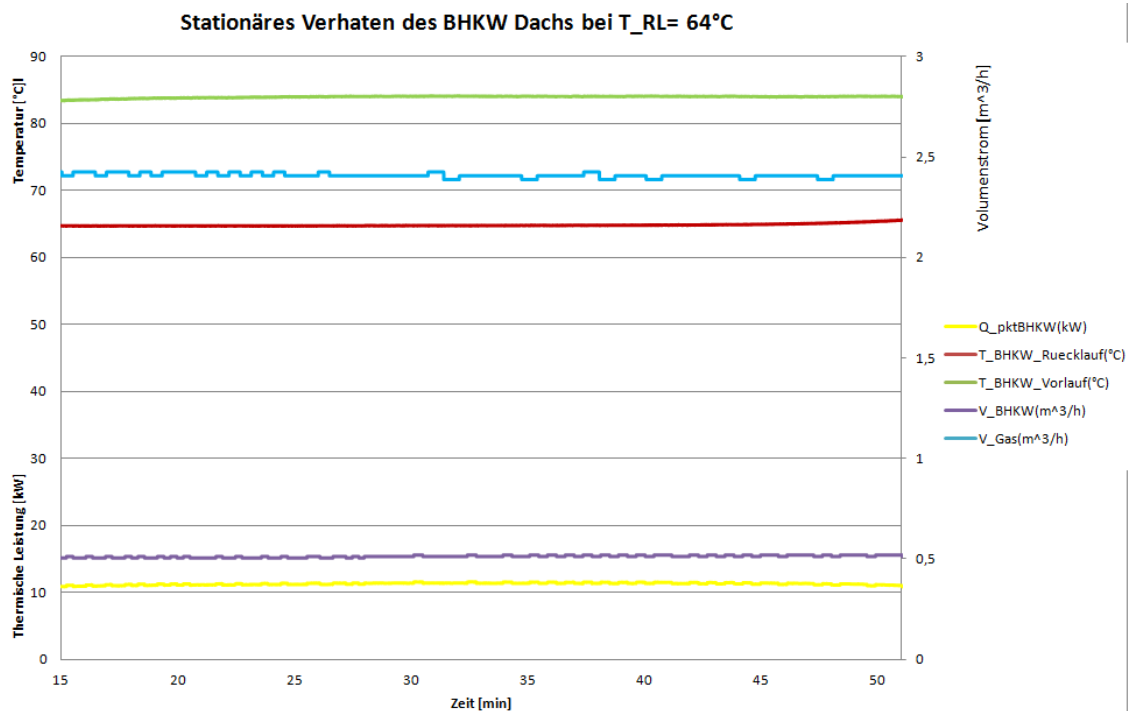


Abbildung 11: Messung zum stationären Verhalten des BHKW Dachs bei $T_{RL} = 64^{\circ}\text{C}$

Die Abbildung 11 zeigt, dass die Messung über einen Versuchszeitraum von 52 Minuten durchgeführt wurde, aber nur die letzten 37 Minuten ausgewertet wurden. Es wurde bei der Rücklafterperatur von 64°C die Vorlafterperatur von 84°C , die thermische Leistung von 11,24 kW und der Volumenstrom des BHKW von $0,513 \text{ m}^3/\text{h}$ gemessen. Der Gasverbrauch betrug $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

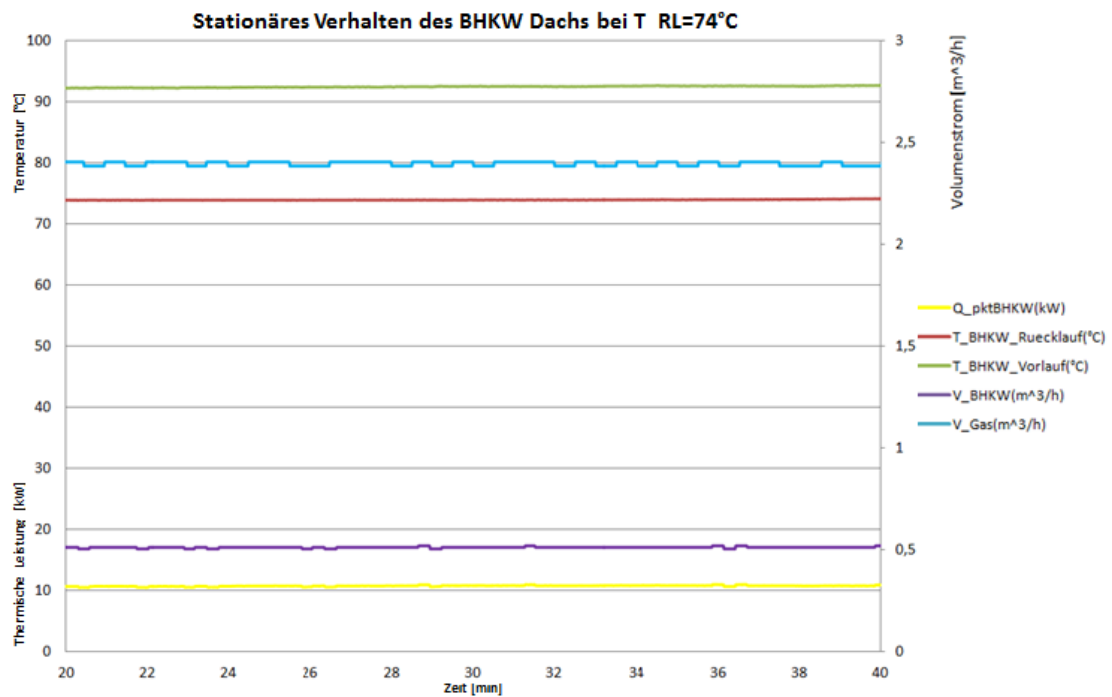


Abbildung 12: Messung zum stationären Verhalten des BHKW bei $T_{\text{RL}}=74^{\circ}\text{C}$

Die Abbildung 12 zeigt, dass die Messung über einen Versuchszeitraum von 40 Minuten durchgeführt wurde, aber nur die letzten 20 Minuten ausgewertet wurden. Es wurde bei einer Rücklauftemperatur von 74°C eine Vorlauftemperatur von 92.5°C , die thermische Leistung von 10,83 kW und ein Volumenstrom des BHKW von $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ gemessen. Der Gasverbrauch betrug $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Abbildung zusammengestellt:

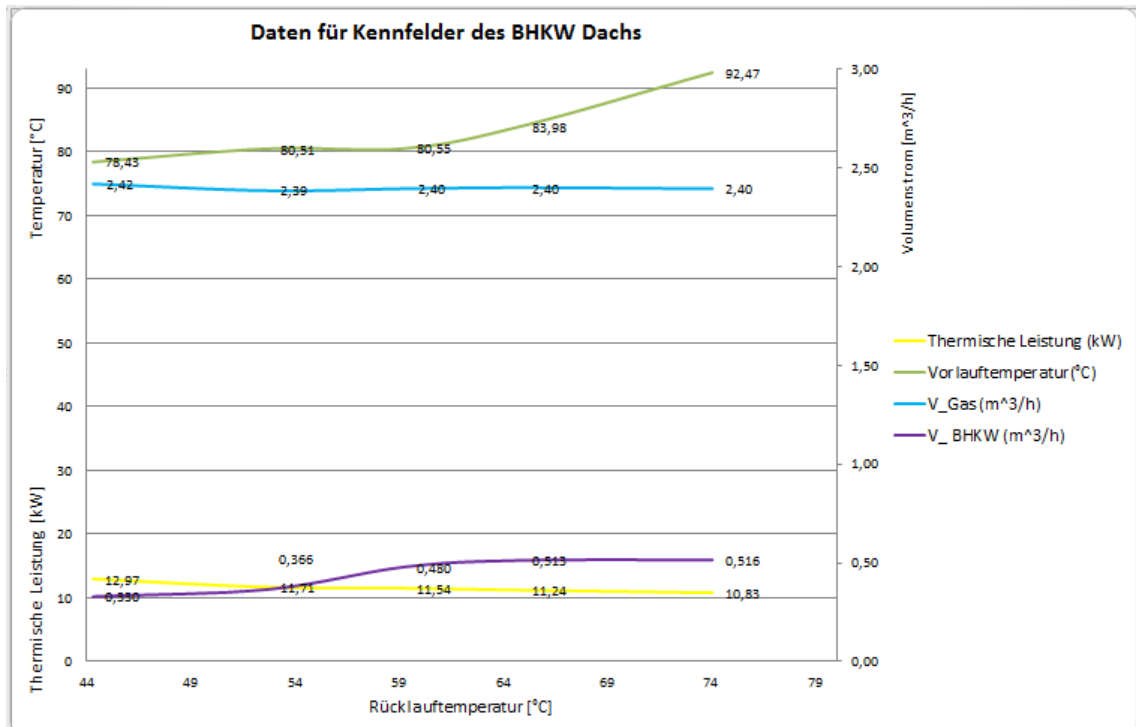


Abbildung 13: Versuchsergebnisse des BHKW Dachs bei stationärem Verhalten

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die thermische Leistung und die Vorlauftemperatur von der Rücklaufftemperatur abhängen. Mit zunehmender Rücklaufftemperatur sinkt die thermische Leistung von 12,97 kW auf 10,83 kW ab und die Vorlauftemperatur steigt von 78,43°C auf 92,47°C. Der Volumenstrom im Entladekreis des BHKW's steigt mit zunehmender Rücklaufftemperatur von 0,33 m³/h auf 0,52 m³/h. Ab einer Rücklaufftemperatur von 60°C ist das 3-Wege-Mischventil fast komplett geschlossen, so dass der maximale Volumenstrom im Entladekreis erreicht ist und somit die Vorlauftemperatur bei weiter steigenden Rücklaufftemperaturen entsprechend ansteigt.

Im Gegensatz dazu ist der Gasverbrauch nicht von der Rücklaufftemperatur abhängig. Da das BHKW Dachs nur mit einer konstanten Drehzahl betrieben wird, ist der Gasverbrauch unabhängig von der Rücklaufftemperatur konstant geblieben.

3.2.2 Modellbildung

Das Mini-BHKW mit konstanter Leistung wurde unter Matlab/Simulink und der Anwendung der Toolboxen Carnot und Stateflow modelliert (s. Abbildung 14). Das Modell basiert auf 3 Kennfeldern, die in Abhängigkeit der Rücklaufftemperatur die thermische Leistung, die Vorlauftemperatur und den Massenstrom des BHKW berechnen.

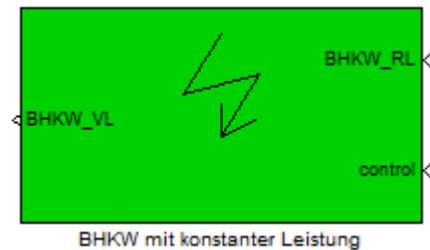


Abbildung 14: Baustein des BHKWs mit konstanter Leistung

In der Maske des Blocks BHKW können die thermische Nennleistung, die Sollvorlauftemperatur „T_VL_soll“ und die Sicherheitsabschalttemperatur im Rücklauf „T_RL_max“ eingestellt werden.

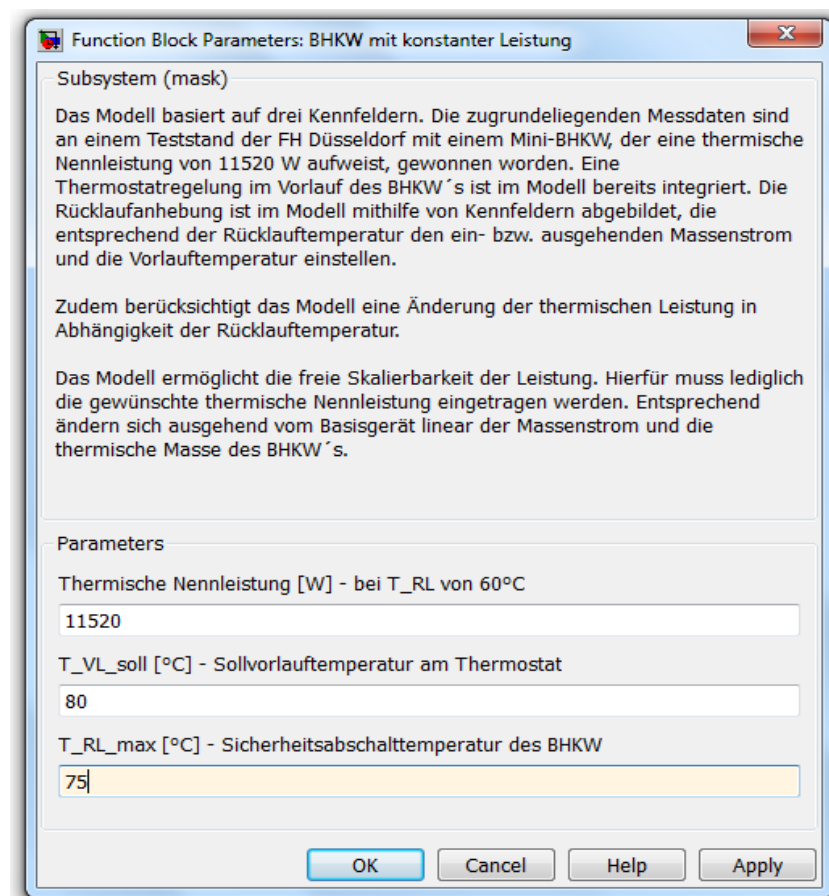


Abbildung 15: Maske des Bausteins BHKW mit konstanter Leistung

In Abbildung 16 ist das Innenleben des BHKW-Blocks dargestellt. Die wichtigsten Bauteilen des Modells sind: Die Pumpe mit Thermostatregelung, die thermische Trägheit, die Sicherheitsabschaltung, die Energiebilanzierung und Wirkungsgradbestimmung sowie die Berechnung der Vorlauftemperatur.

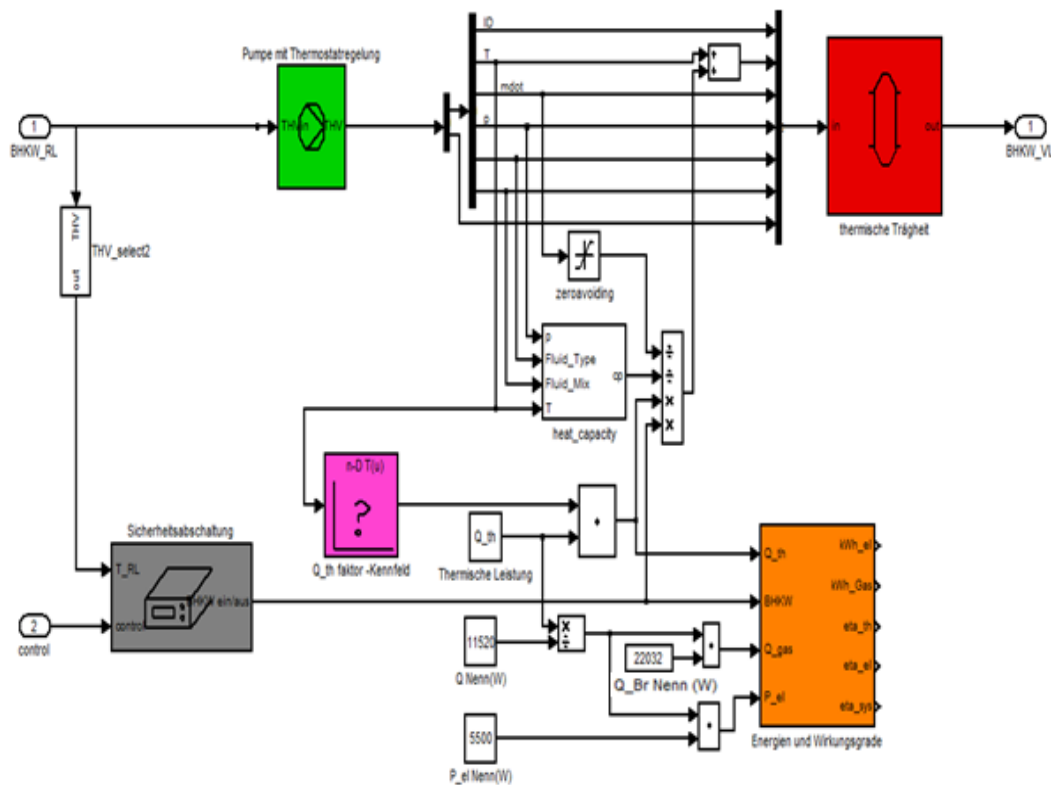


Abbildung 16: Modellaufbau des Mini-BHKWs mit konstanter Leistung

3.2.2.1 Bestimmung der Vorlauftemperatur

In diesem Model wird die Vorlauftemperatur nach der folgenden Formel berechnet:

$$T_{VL} = T_{RL} + \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m} \times c_p}$$

T_{VL} : Vorlauftemperatur [°C]

T_{RL} : Rücklauftemperatur [°C]

\dot{Q}_{th} : aktuelle thermische Leistung [W]

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]

c_p : Wärmekapazität [J/(kg*K)]

3.2.2.2 Bestimmung der thermischen Leistung

Das Modell des BHKW mit konstanter Leistung ist so aufgebaut, dass die thermische Leistung frei skalierbar ist. Hierfür sollte die gewünschte thermische Nennleistung in der Maske des BHKW-Moduls eingetragen werden (s. Abbildung 15).

Aus den vorhandenen gemessenen Daten des BHKW Dachs wird die Kennlinie des thermischen Leistungsfaktors gewonnen (s. Tabelle 2). Die thermische Nennleistung von 11,52 kW bei einer Rücklauftemperatur von 60°C soll hierfür einem Leistungsfaktor von eins (= 100%) entsprechen. Die anderen thermischen Leistungsfaktoren werden über eine Verhältnisrechnung berechnet.

Die anschließende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen der thermischen Leistung und dem thermischen Leistungsfaktor

Tabelle 2: thermischer Leistungsfaktor in Abhängigkeit der thermischen Leistung

Rücklauftemperatur(°C)	Thermische Leistung (kW)	Thermischer Leistungsfaktor
74	10,83	0,94
65	11,26	0,98
60	11,52	1,00
50	12,26	1,06
45	12,60	1,09

Im unten abgebildeten Subsystem ist das Kennfeld des thermischen Leistungsfaktors (Q_{th} faktor_kennfeld) grafisch dargestellt.

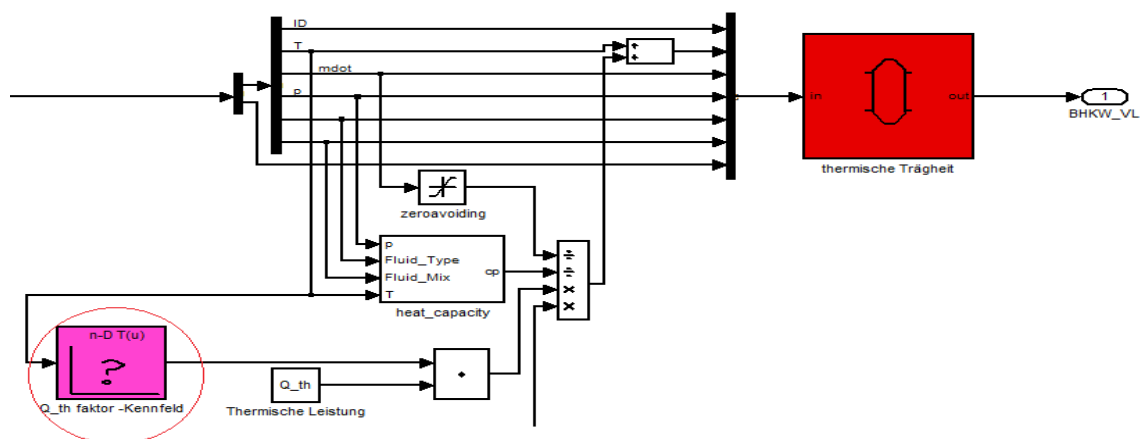


Abbildung 17: Darstellung des thermischen Leistungsfaktor_Kennfelds

Das Modell berechnet die thermische Leistung über die Kennlinie eines thermischen Leistungsfaktors, der anschließend mit der eingegebenen thermischen Nennleistung (Q_{th}) multipliziert wird.

$$\dot{Q}_{th} = f_{Q_{th}} \times Q_{th}$$

3.2.2.3 Bestimmung des Massenstroms

Im Baustein „Pumpe mit Thermostatregelung“ findet die Bestimmung des Massenstroms statt. Die Abbildung 19 zeigt die Verschaltung des Bausteins und die Ermittlung des Massenstroms im Entladekreis des BHKW.

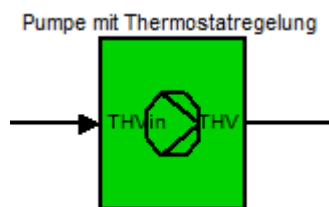


Abbildung 18: Baustein der Pumpe mit Thermostatregelung

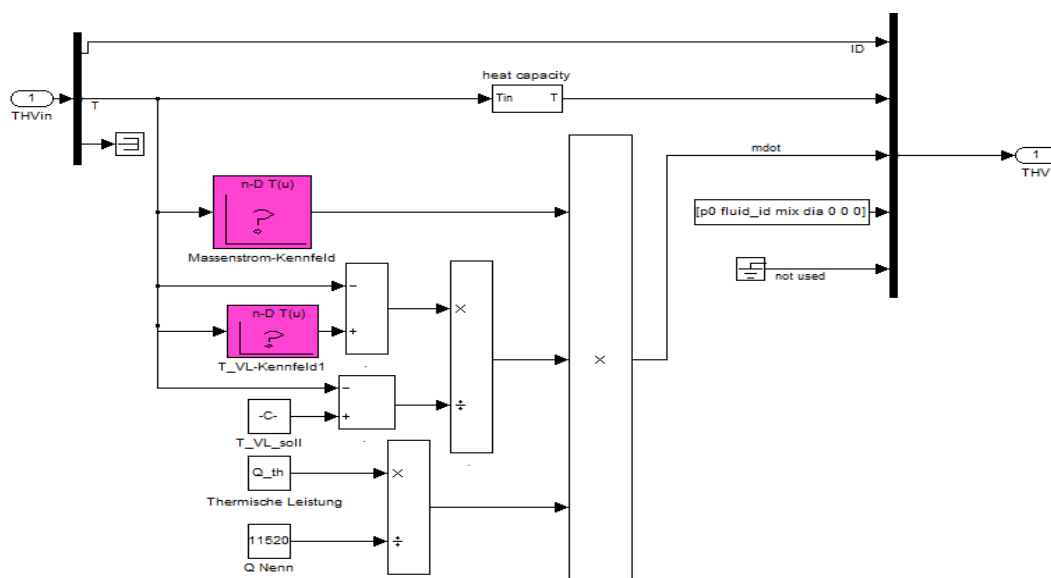


Abbildung 19: die Verschaltung des Bausteins Pumpe mit Thermostatregelung

Aus den zugrundeliegenden Messdaten des BHKW mit konstanter Leistung werden 2 Kennfelder abgeleitet.

Durch das Massenstrom-Kennfeld wird der sich durch die Thermostatregelung einstellende Massenstrom in Abhängigkeit der Rücklauf-Temperatur dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Rücklauf-Temperatur und dem Massenstrom ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Massenstrom in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur

Rücklauftemperatur [°C]	Massenstrom [kg/s]
74	0,140
65	0,139
60	0,129
50	0,1
45	0,09

Das T_VL-Kennfeld gibt die Vorlauftemperatur in Funktion der Rücklauftemperatur wieder.

Tabelle 4: Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur

Rücklauftemperatur [°C]	Vorlauftemperatur[°C]
74	92,47
65	84,18
60	81
50	79,65
45	78,5

Je nach eingestellter Sollvorlauftemperatur (T_{VL_soll}) im Thermostat verändert sich der Massenstrom (\dot{m}_{Basis}) mit dem Faktor $(T_{VL}-T_{RL}/T_{VL_soll}-T_{RL})$.

Analog zu der freien Skalierbarkeit der thermischen Leistung wird anschließend der Massenstrom mit dem Faktor (eingestellte thermische Nennleistung (Q_{th}) dividiert durch die Nennleistung des Basisgeräts von 11520) multipliziert.

Folglich berechnet sich der Massenstrom nach der folgenden Formel:

$$\dot{m} = \dot{m}_{Basis} * \frac{T_{VL} - T_{RL}}{T_{VL_soll} - T_{RL}} * \frac{Q_{th}}{11520} \quad \text{wobei,}$$

\dot{m} : Massenstrom im Entladekreis des BHKW [kg/s]

\dot{m}_{Basis} : Massenstrom des Basisgeräts aus dem Massenstrom-Kennfeld [kg/s]

T_{VL} : Vorlauftemperatur aus dem T_VL-Kennfeld [°C]

T_{RL} : Rücklauftemperatur [°C]

T_{VL_soll} : Vorlaufsolltemperatur, die sich je nach eingebautem Thermostat einstellen soll.

Q_{th} : eingestellte thermische Nennleistung [W]

11520: Wert der thermischen Nennleistung des Basisgeräts bei einer Rücklaufftemperatur von 60 °C [W]

3.2.2.4 Bestimmung der elektrischen Leistung

Analog zu der freien Skalierbarkeit der thermischen Leistung wird die elektrische Leistung ermittelt. Die Messdaten zeigen, dass die elektrische Leistung unabhängig von der thermischen Leistung konstant 5500 W erzeugt. Die Skalierung der elektrischen Leistung wird deshalb auf den eingestellten Wert der thermischen Nennleistung bezogen. Hierfür wird die elektrische Leistung von 5500 W mit dem Faktor (eingestellte thermische Leistung “Q_th“ des BHKWs dividiert durch die Nennleistung des Basisgeräts von 11520 W) multipliziert.

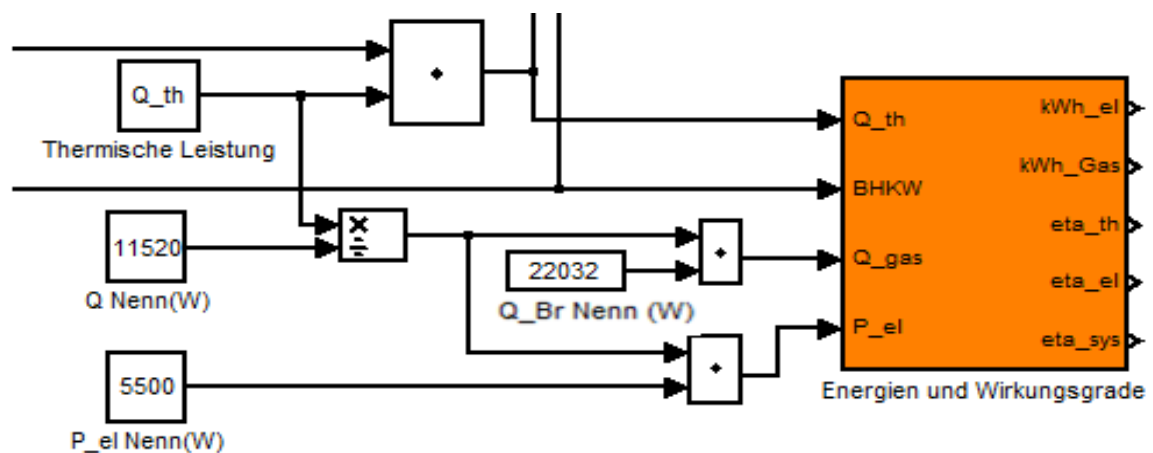


Abbildung 20: Darstellung der Leistungen des BHKW mit konstanter Leistung

3.2.2.5 Bestimmung der zugeführten Brennstoffleistung

Analog zur elektrischen Leistung wurde die zugeführte Brennstoffleistung (Q_{gas}) berechnet. Da diese unabhängig von der thermischen Leistung annähernd gleich bleibt, wurde hier der Wert am Nennpunkt des Basisgeräts gewählt. Um eine thermische Leistung von 11520 W zu erzeugen, hat das BHKW eine Brennstoffleistung von 22032 W gebraucht. Je nach eingestellter thermischer Nennleistung wird diese Brennstoffleistung im Nennpunkt mit dem Faktor eingestellte thermische Leistung “Q_th“ des BHKWs dividiert durch die Nennleistung des Basisgeräts von 11520 W) multipliziert.

Die Brennstoffleistung berechnet sich aus dem Brennstoffvolumenstrom und dem Heizwert des Erdgases:

$$Q_{\text{Brennstoff}} = V_{B, \text{Norm}} \times H_{U, \text{Norm}}$$

Aus den Messdaten wurde ein Gasverbrauch von 2,4 m³/h gemessen.

Nach Angabe der Stadtwerke Düsseldorf liegt der Heizwert des eingesetzten Erdgases bei 9,18 kWh/m³ (s. Abbildung 21).

Brenntechnische Kenndaten Erdgas LL



**Stadtwerke
Düsseldorf**
Netz GmbH

Brenntechnische Kenndaten Erdgas LL				
Wobbe Index	W _{s,n}	=	12,546	kWh/m ³
Betriebsbrennwert	H _{s,b}	=	9,86	kWh/m ³
Brennwert	H _{s,n}	=	10,205	kWh/m ³
Heizwert	H _{i,n}	=	9,18	kWh/m ³
Betriebsheizwert	H _{i,b}	=	8,91	kWh/m ³

Abbildung 21: Brenntechnische Kenndaten Erdgas LL der Stadtwerke Düsseldorf⁴

$$\dot{Q}_{\text{Brennstoff}} = 2,4 \text{ m}^3/\text{h} \times 9,18 \text{ kWh/m}^3$$

$$\dot{Q}_{\text{Brennstoff}} = 22032 \text{ W}$$

3.2.2.6 Berechnung der Wirkungsgrade

In dem Block „Energien und Wirkungsgrade“ werden der thermische Wirkungsgrad, der elektrische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad berechnet (s. Abbildung 22).

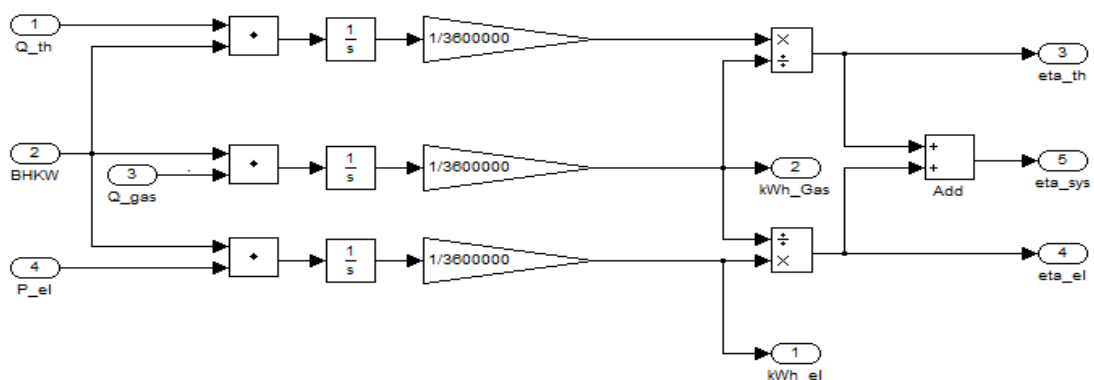


Abbildung 22: Darstellung der Wirkungsgrade

Als thermischer Wirkungsgrad (η_{th}) bezeichnet man das Verhältnis der abgegebenen thermischen Leistung zur Brennstoffleistung. Der elektrische Wirkungsgrad (η_{el}) beschreibt das Verhältnis der elektrischen Leistung zur Brennstoffleistung. Der Gesamtwirkungsgrad (η_{sys}) ergibt sich aus der Addition von (η_{el}) und (η_{th}).

3.2.2.7 m-File

Für die Simulation sollte eine Initialisierungsdatei erzeugt werden, damit die drei Kennfelder angerufen werden können. Dazu wird eine Matlab-Datei (m-File) erzeugt, in der Variablen definiert und ihre Werte zugewiesen werden. Die Abbildung 23 zeigt die drei hinterlegten Kennlinien im m-File.

```
%BHKW

%Kennfeld thermische Leistungsfaktor des BHKW
% Q_th_faktor für T_BHKW_RL =T_BHKW_RL =45 50 60 65 74[°C]
Q_th_faktor=[1.09 1.06 1 0.98 0.94];

%Kennfeld Vorlauftemperatur des BHKW
% T_VL [°C] für T_BHKW_RL =45 50 60 65 74 [°C]
T_VL_kennfeld=[78.5 79.65 81 84.18 92.47];

% Kennfeld Massenstrom des BHKW
% Massenstrom-Werte [Kg/s] für T_BHKW_RL =T_BHKW_RL =45 50 60 65 74[°C]
Massenstrom=[0.09 0.1 0.129 0.139 0.140]
```

Abbildung 23: m-File des BHKW mit konstanter Leistung

3.2.2.8 Sicherheitsabschaltung des BHKWs

Die Sicherheitsabschaltung wird mittels der Toolbox STATEFLOW umgesetzt und befindet sich im Block Sicherheitsabschaltung.

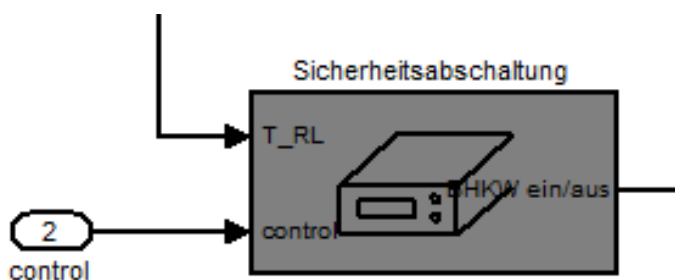


Abbildung 24: Sicherheitsabschaltungsblock

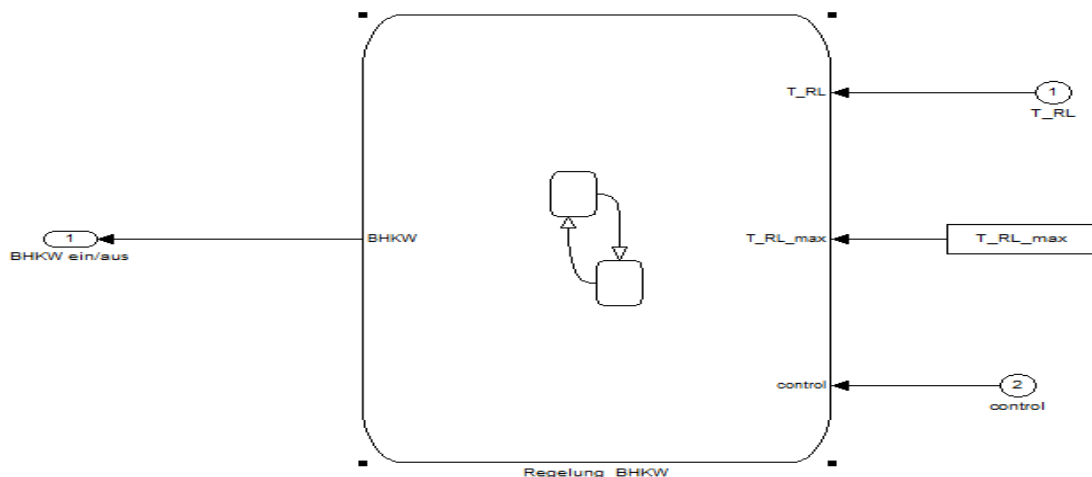


Abbildung 25: Stateflow-Chart des Mini-BHKWs

Die Abbildung 25 zeigt, dass in Abhängigkeit der T_{RL} , T_{RL_max} und $control$ ein Ein/Aus-Signal an das BHKW gegeben wird.

T_{RL_max} ist die maximale Rücklauftemperatur, die nicht überschritten werden darf, da sonst eine ausreichende Kühlung des Motors nicht mehr gewährleistet ist.

Das externe Steuersignal „control“ muss vom Verbraucher geliefert werden.

In der unten abgebildeten Verschaltung wird das Stateflow-Chart gezeigt.

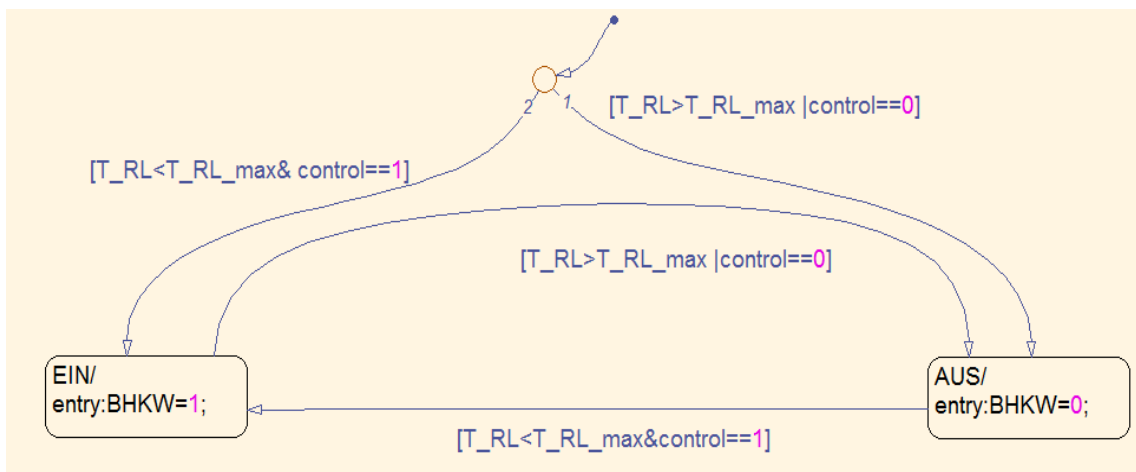


Abbildung 26: Sicherheitsabschaltung des BHKWs mit konstanter Leistung

Das Mini-BHKW wird eingeschaltet, wenn die Rücklauftemperatur kleiner als die maximale Rücklauftemperatur und wenn das Steuersignal von „control“ „1“ ist.

Die automatische Abschaltung erfolgt wenn die Rücklauftemperatur die maximalen Rücklauftemperatur überschreitet oder wenn das Steuersignal von „control“ „0“ ist.

3.3 Validierung des BHKW_Dachs

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Validierung des stationären und instationären Verhaltens des BHKW Dachs beschrieben. Dazu werden mithilfe einer Modelerweiterung die Ergebnisse der Simulation mit den realen Laborergebnissen verglichen.

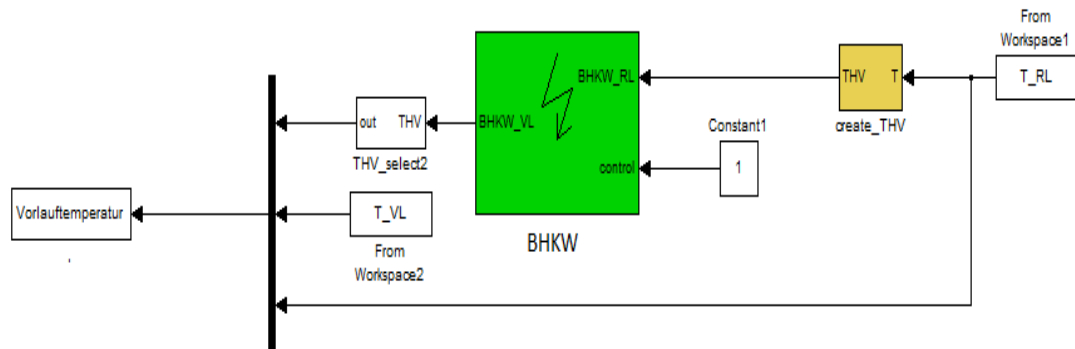


Abbildung 27: Modellsimulation der Validierung

Vom Workspace Block (T_RL) werden die vom m-File aufgerufenen Messdaten der Rücklauftemperatur aus der Excel-Datei „T_RL“ (s. Abbildung 28) eingelesen und als Eingangs-Signal für das BHKW gegeben. Dadurch wird die Vorlauftemperatur als Ausgangs-Signal des Mini-BHKWs erzeugt. Diese simulierte Vorlauftemperatur wird mit der Vorlauftemperatur aus der Excel-Tabelle „T_VL“ verglichen.

```
%BHKW

%Kennfeld thermische Leistungsfaktor des BHKW
% Q_th_faktor für T_BHKW_RL =T_BHKW_RL =45 50 60 65 74[°C]
Q_th_faktor=[1.09 1.06 1 0.98 0.94];

%Kennfeld Vorlauftemperatur des BHKW
% T_VL [°C] für T_BHKW_RL =45 50 60 65 74 [°C]
T_VL_kennfeld=[78.5 79.65 81 84.18 92.47];

% Kennfeld Massenstrom des BHKW
% Massenstrom-Werte [Kg/s] für T_BHKW_RL =T_BHKW_RL =45 50 60 65 74[°C]
Massenstrom=[0.09 0.1 0.129 0.139 0.140]

%lassen sich die Daten von Tabellen der Exceldatei einlesen
T_RL=xlsread('T_RL');
T_VL=xlsread('T_VL');
```

Abbildung 28: m-File der Validierung

3.3.1 Validierung des stationären Zustands

Im Folgenden werden die realen Messungen des BHKW-Dachs bei stationärem Zustand mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Dazu wird die Modellsimulation wie in der Abbildung 27 verwendet. Hierfür wird der Parameter „Volume“ in der Maske der thermischen Trägheit auf „Null“ eingestellt.

In den Abbildungen 29 bis 32 werden die Simulationsergebnisse mit den Messwerten dargestellt.

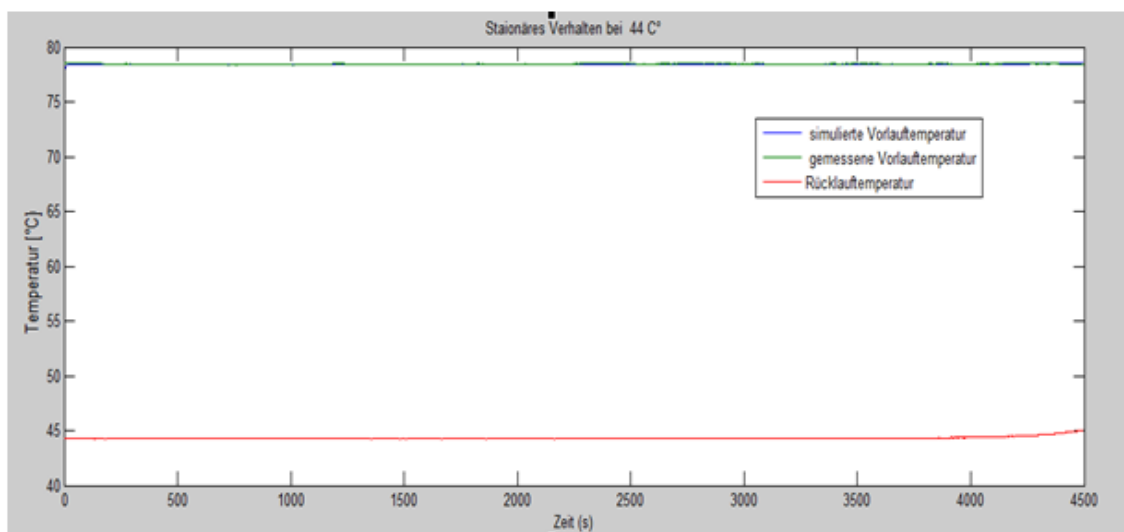


Abbildung 29: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 44^\circ\text{C}$

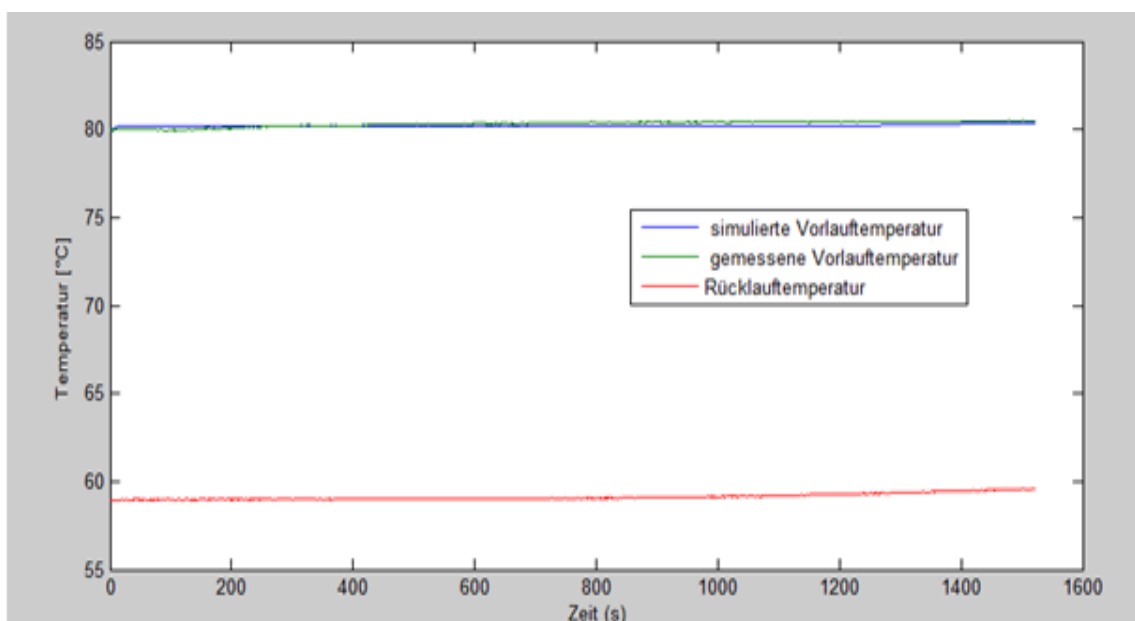
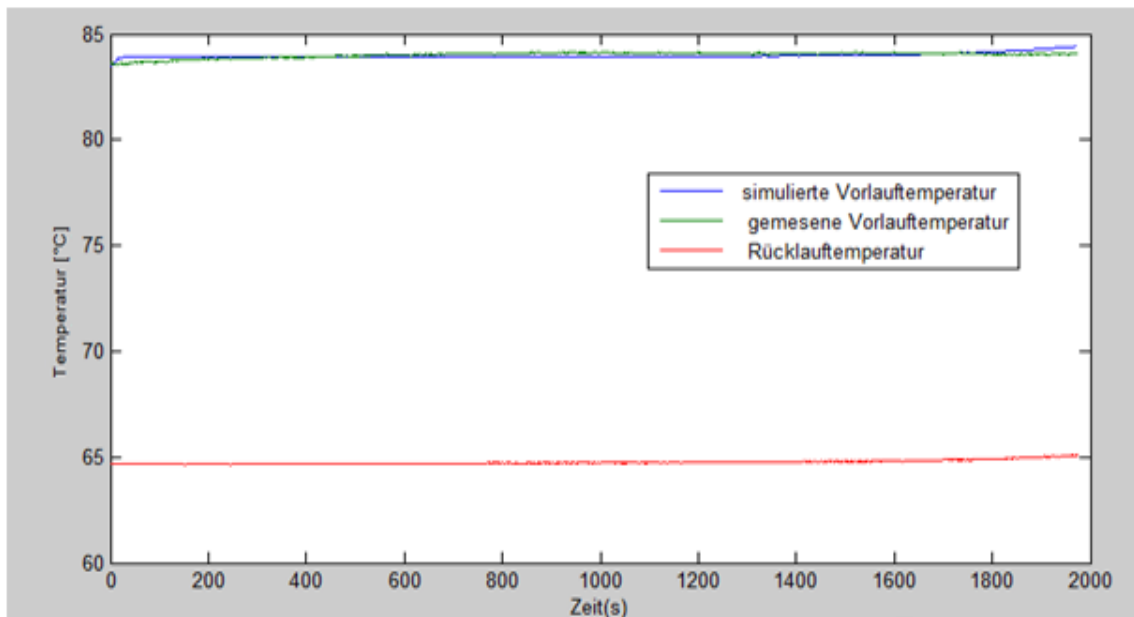
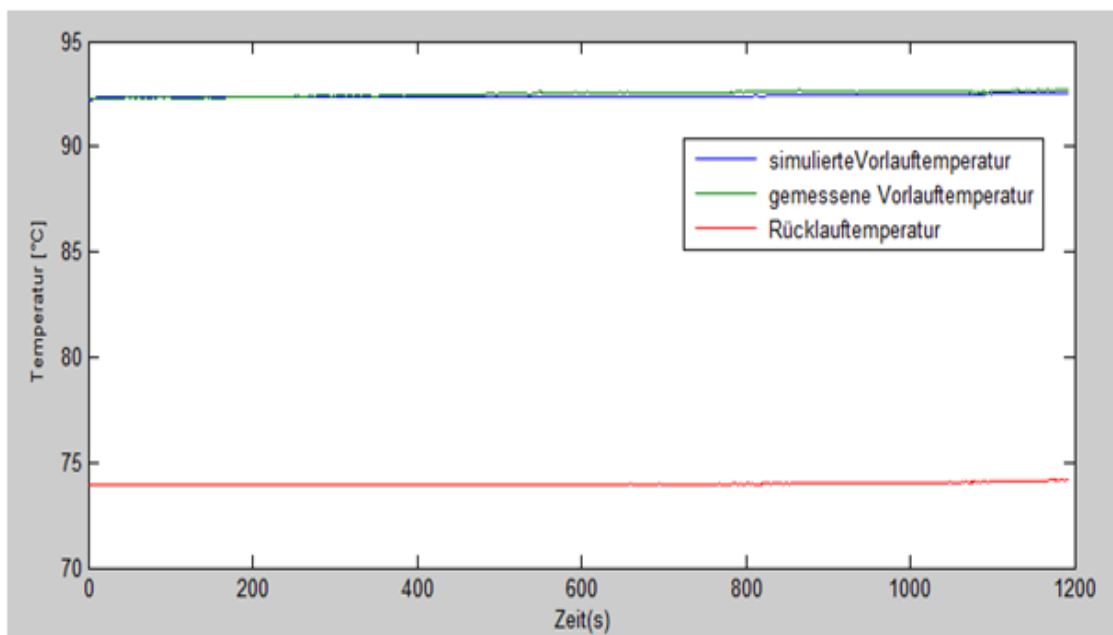


Abbildung 30: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 59^\circ\text{C}$

Abbildung 31: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 64^\circ\text{C}$ Abbildung 32: Temperaturverlauf bei $T_{RI} = 74^\circ\text{C}$

Aus den vorherigen Abbildungen erkennt man, dass die stationären Zustände von der Simulation nahezu perfekt abgebildet werden.

3.3.2 Validierung des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Verhalten wird in diesem Modell mithilfe eines kleinen Speichers im Vorlauf des BHKW erzeugt, der die thermische Masse des BHKW repräsentieren soll (s. Abbildung 33). Das Speichervolumen wird anhand der Messdaten eines Anfahrvorgangs des BHKW ermittelt. Vor Validierungsbeginn muss die Starttemperatur auf den Startwert der gemessenen Vorlauftemperatur von 26°C eingestellt werden.

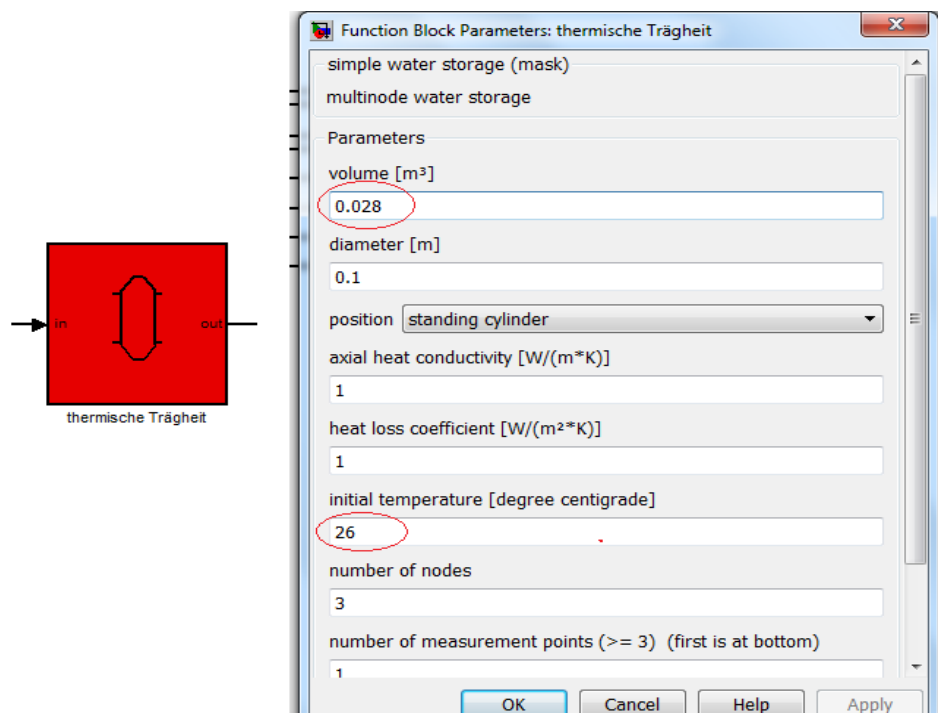


Abbildung:33 Anpassungen der thermischen Trägheit.

Mithilfe der Fehlerquadratsumme von simulierter und gemessener Vorlauftemperatur wird das optimale Speichervolumen ermittelt:

$$FQS = \sum_{i=1}^n (T_{sim} - T_{mess})^2$$

FQS: Fehlerquadratsumme

T_{sim}: simulierte Vorlauftemperatur

T_{mess}: gemessene Vorlauftemperatur

Hierfür wird das folgende Modellschaltbild verwendet.

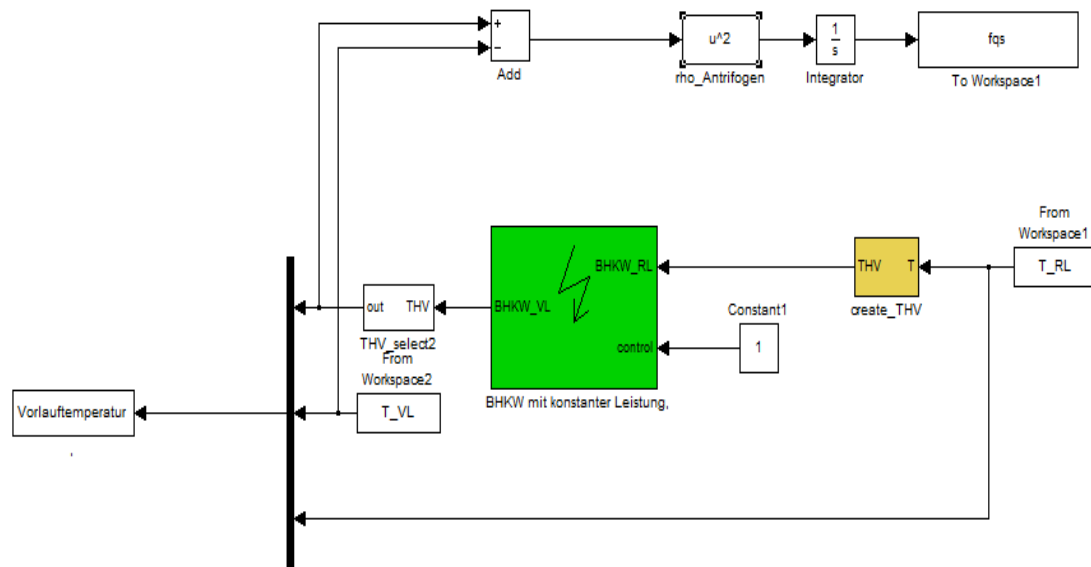


Abbildung 34: Modellsimulation mit Fehlerquadratsumme

Die anschließende Tabelle enthält die Simulationsergebnisse der Fehlerquadratsumme bei verschiedenen Volumen. Bei minimaler FQS stellte sich das optimale Speichervolumen von 0,028 m³ ein.

Tabelle 5: Fehlerquadrarsumme in Abhängigkeit des Volumens

Volumen [m ³]	Fehlerquadratsumme
0,01	235803,821
0,02	44238,582
0,025	8933,509
0,026	5746,905
0,027	3696,196
0,028	2718,640
0,029	2754,097
0,03	3745,190
0,032	8379,002

Nach der Anpassung der thermischen Trägheit (s. Abbildung 33) sind in der Abbildung 35 die Simulationsergebnisse und die Messdaten zum Anfahrvorgang des BHKW dargestellt.

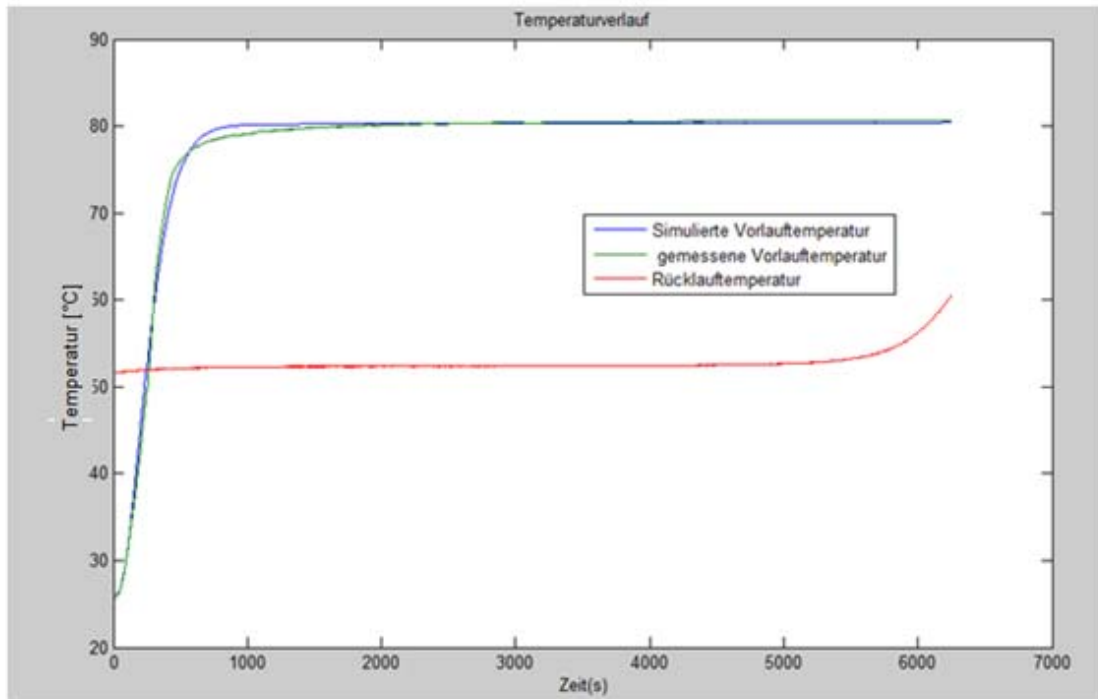


Abbildung 35: Temperaturverlauf des Anfahrverhaltens

Die Abbildung 35 zeigt eine gute Übereinstimmung der Vorlaufftemperatur der Simulation mit denen der Labormessung.

Im Anschluß an die Validierung wird eine Simulation, in der die Rücklaufftemperatur sich ändert, durchgeführt.

In der unteren Abbildung sind die Vor- und Rücklaufftemperaturen und die Vorlaufsolltemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Sollvorlaufftemperatur von 80°C nahezu konstant gehalten wird, obwohl die Rücklaufftemperatur sich ändert.

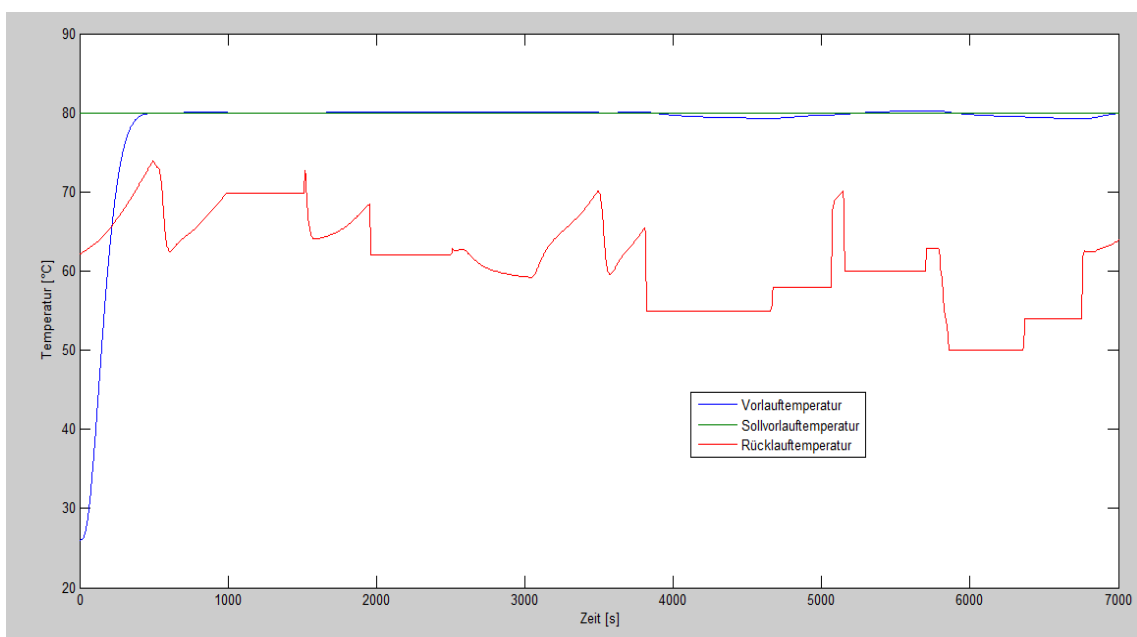


Abbildung 36: Temperaturverlauf bei unkonstanter Rücklaufftemperatur

Da die thermische Masse abhängig von den Abmaßen und Gewicht des BHKW ist, wurde ein Zusammenhang zwischen der eingestellten thermischen Leistung und dem Parameter „Volume“ im Block „thermische Trägheit“ ermittelt. Hierbei werden die Herstellerangaben von verschiedenen Mini-BHKWs herangezogen. Die anschließende Tabelle enthält technische Daten der verschiedene Mini-BHKWs:

Tabelle 6: Kenndaten verschiedener Mini-BHKWs

Mini-BHKW	P _{el} [kW]	P _{th} [kW]	Abmasse [cm]	Gewicht [kg]
AddiPower ⁵	2,5	5	L 89 x B 60 x H 105	160
Dachs SEplus ²	5,5	12,5	L 72 x B 100 x H 107	530
KWE 12P-4 AP ⁶	12	24	L 168 x B 77 x H 117	800
KWE 20P-4 AP ⁶	20	35	L 187 x B 82 x H 132	1200

Zum Wasserinhalt der Mini-BHKWs sind in den Datenblättern keine Angaben enthalten. Daher wird die Bestimmung des Speichervolumens auf die Angabe des Gewichts bezogen.

Die Tabelle 7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gewicht und Wasservolumen bei verschiedenen Mini BHKWs. Beim BHKW Dachs entspricht das Gewicht hierbei einem Volumen von 0,028 m³. Die anderen Wasservolumen für die übrigen Gewichte werden über eine Verhältnisrechnung berechnet.

Tabelle 7: Speichervolumen in Abhängigkeit des Gewichts

Mini-BHKW	P _{th} [kW]	Gewicht [kg]	Volumen [m ³]
AddiPower	5	160	0,008
Dachs SEplus	12,5	530	0,028
KWE 12P-4 AP	24	800	0,042
KWE 20P-4 AP	35	1200	0,063

Die Berechnung des Volumens der thermischen Trägheit bei verschiedenen Mini-BHKWs mit unterschiedlichen thermischen Leistungen setzt die Notwendigkeit voraus einen Zusammenhang zwischen der thermischen Leistung und dem Volumen herzustellen. Mithilfe der Trendfunktion in Excel ist dieser Zusammenhang erstellt worden (s. Abbildung 37).

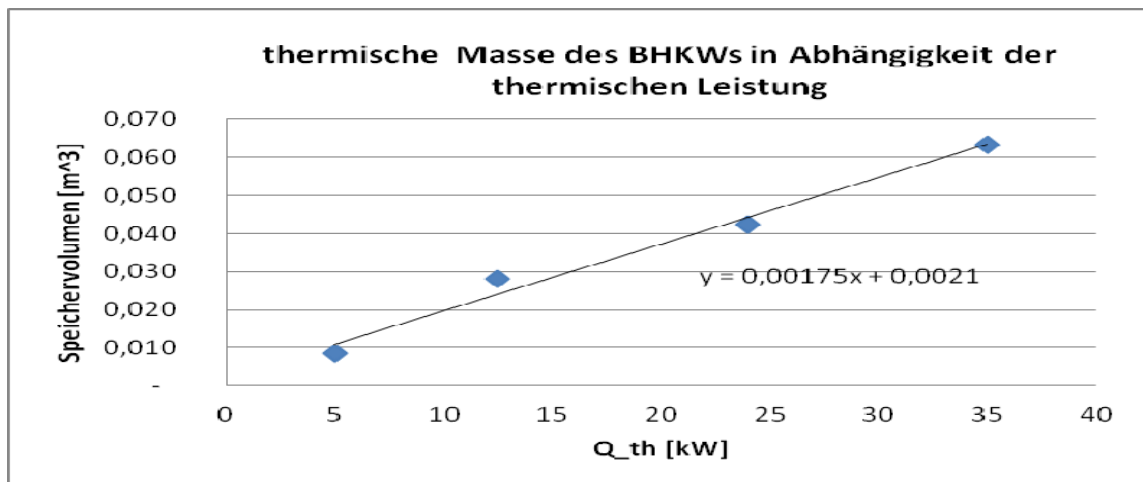


Abbildung 37: Speichervolumen als Funktion der thermischen Leistung.

Die Funktion lautet:

$$V = 0,00175 \times P_{th} + 0,0021$$

V: Wasserinhalt des kleinen Speichers [m³]

P_{th}: eingestellte thermische Leistung [kW]

Anschließend wird die Formel im Block „thermische Trägheit“ eingegeben.

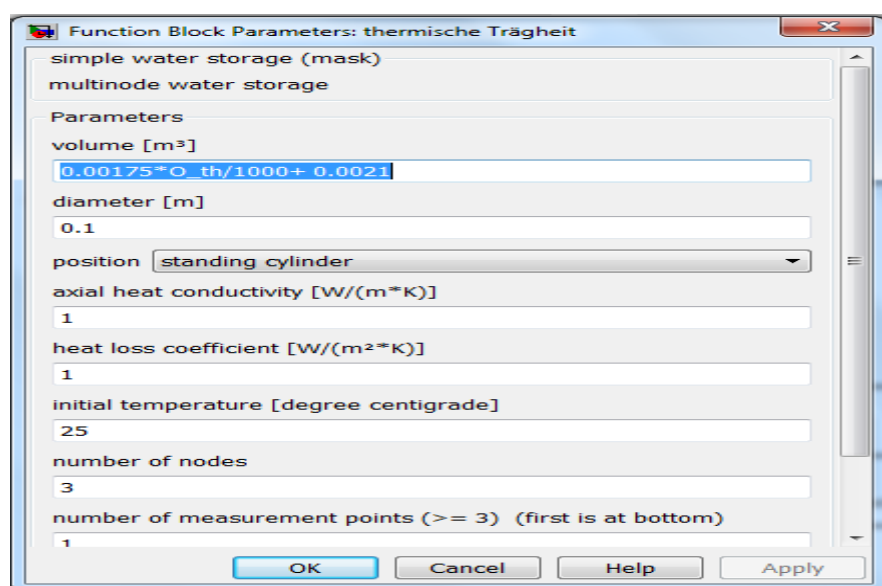


Abbildung 38: thermische Masse des BHKW

4 Modellierung eines BHKWs mit modulierbarer Leistung

In diesem Kapitel wird das Modell eines BHKWs mit modulierbarer Leistung auf Basis des Mini-BHKW Ecopower der Firma Vaillant GmbH unter MATLAB/Simulink mit der Anwendung der Toolboxes Carnot und Stateflow erstellt.

Das Mini-BHKW Ecopower ist im Unterschied zum Dachs modulierbar, d.h. das Gerät wird mit variabler Leistung betrieben. Dabei variiert die elektrische Leistung zwischen 1,3 und 4,7 kW. Die thermische Leistung bewegt sich von 3,5 bis 12,5 kW. Die Leistungsmodulation erfolgt über eine Veränderung der Drehzahl am Motor. In der Abbildung 39 sind die technischen Daten des Mini-BHKW Ecopower angegeben.

	Erdgas	Flüssiggas
Elektrische Leistung (je nach Luftdichte und Gasqualität)	1,3 bis 4,7 kW ¹⁾ , modulierend	1,4 bis 4,7 kW ¹⁾ , modulierend
Thermische Leistung	3,5 bis 12,5 kW ²⁾ , modulierend	4,5 bis 13,8 kW ²⁾ , modulierend
Gesamtwirkungsgrad	circa 90% ³⁾	circa 90% ³⁾
Stromkennzahl	0,38	0,34
Einzyylinder 4-Takt-Hubkolbenmotor	272 cm ³	272 cm ³
Variable Motordrehzahl	1,200 - 3,600 U/Min	1,200 - 3,600 U/Min
Emissionswerte	Nox < 50 mg pro Nm ³ bei 5% O ₂ } TA-Luft _{1/2} CO < 115 mg pro Nm ³ bei 5% O ₂	
Abgastemperatur	< 90° C	< 90° C
Anschlussfertiger Netzparallelbetrieb	3 x 400V, 50 Hz, cos 1	3 x 400V, 50 Hz, cos 1
Abmessungen	108 x 76 x 137 (Höhe x Breite x Tiefe in cm)	108 x 76 x 137 (Höhe x Breite x Tiefe in cm)
Schalldruckpegel	< 56 dB(A) in 2m Abstand	< 56 dB(A) in 2m Abstand
Gewicht	395 kg	395 kg

Abbildung 39: technische Daten des Mini-BHKW Ecopower³

4.1 Altes Modell des BHKW Ecopower

Das bereits vorhandene Modell des Mini-BHKW Ecopower ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

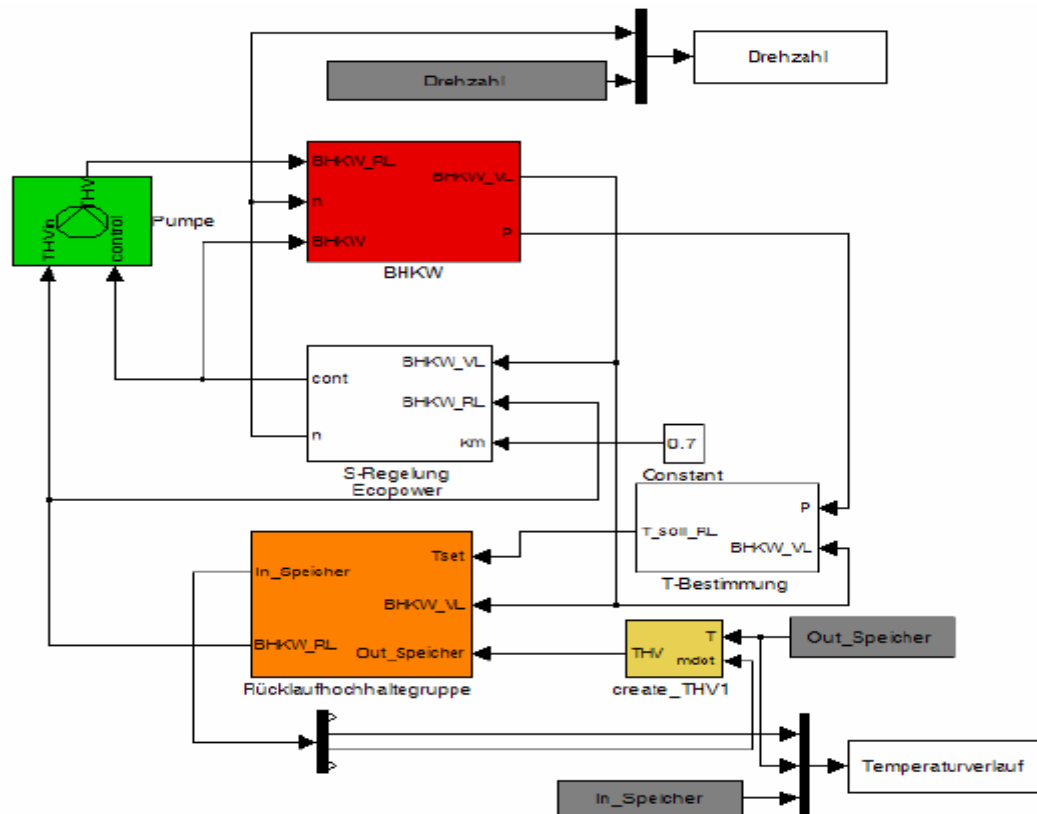


Abbildung 40: altes Modell des Mini-BHKW Ecopower

Im Modul S_Regelung Ecopower befindet sich die Drehzahlregelung des BHKWs.

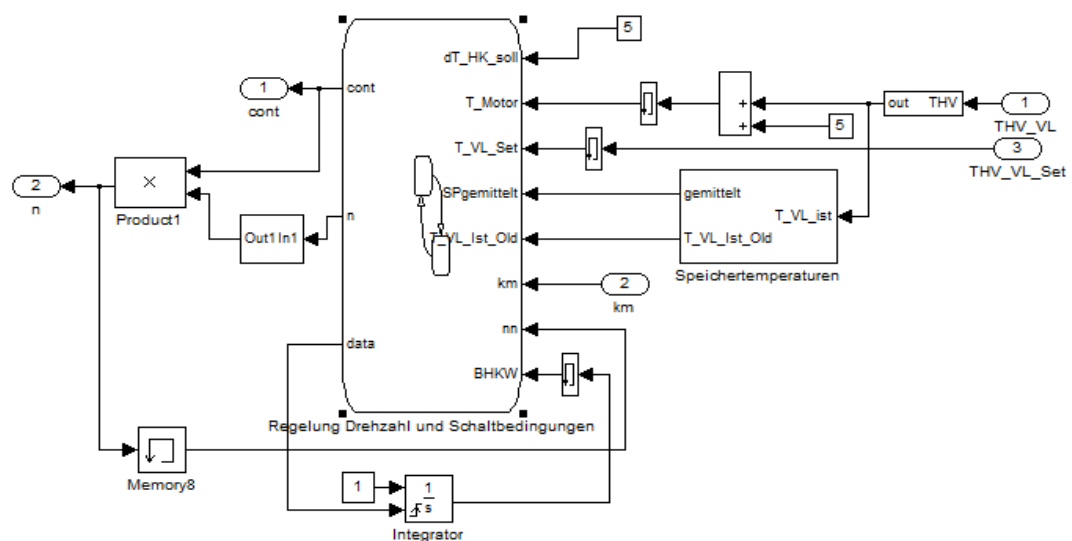


Abbildung 41: altes Stateflow-Chart des Mini-BHKW Ecopower

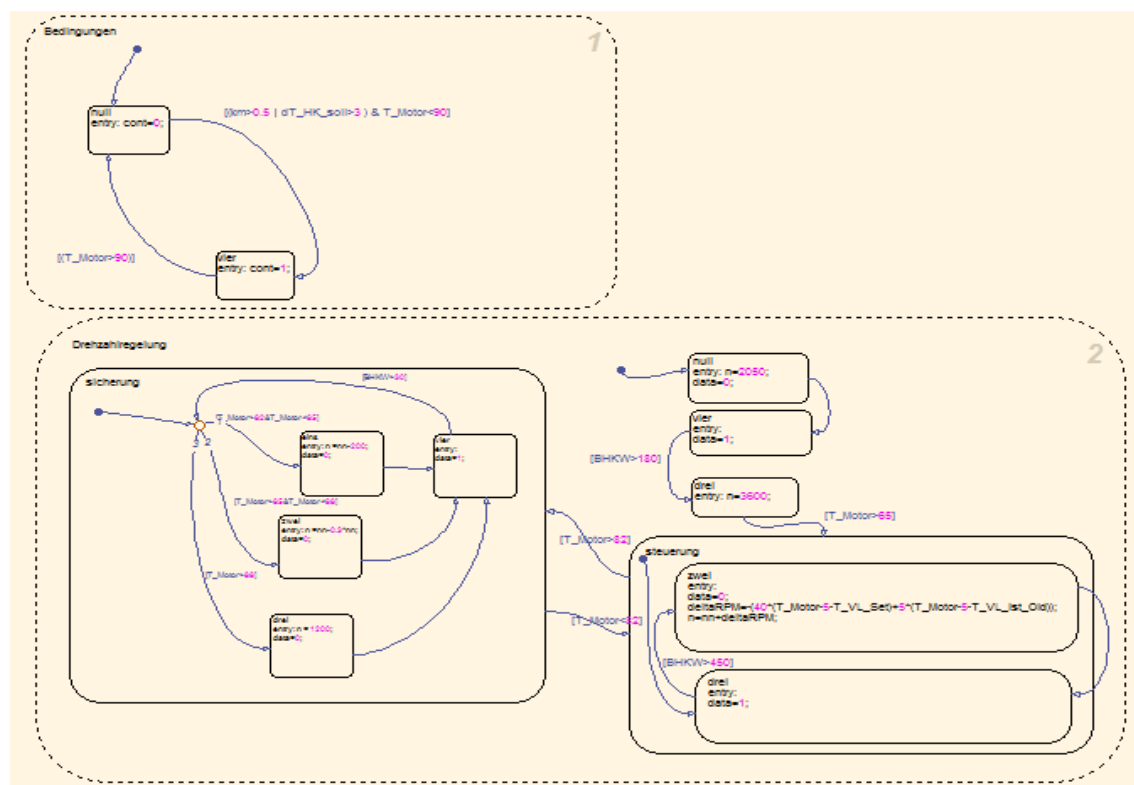


Abbildung 42: alte Drehzahlregelung des Mini-BHKW Ecopower

Das Stateflow Chart besteht aus 2 Hauptblöcken: Bedingungen und Drehzahlregelung. Im Block Bedingung befinden sich die Ein -bzw. Abschaltungsbedingungen des BHKW. Im Block Drehzahlregelung wird in der Abhängigkeit der Motortemperatur eine neue Drehzahl bestimmt. Am Anfang soll das Mini-BHKW mit einer Anfangsdrehzahl von 2080 U/min betrieben werden. Nach einer Anlaufzeit von 180 s wird das BHKW auf die maximale Drehzahl geregelt. Wenn die Motortemperatur über 65 °C liegt, wird nach einer Berechnungsformel für Drehzahldifferenz (DeltaRPM) eine neue Drehzahl berechnet. Dabei wird alle 450 s eine neue Drehzahl bestimmt. Sobald die Motortemperatur über 82°C liegt, geht die Regelung in die Sicherungsregelung. Wenn die Motortemperatur im Bereich von > 82 °C - < 85 °C liegt, wird die Drehzahl um 200 U/min verringert. Liegt die Motortemperatur im Bereich von > 85 °C - < 88 °C, wird die aktuelle Drehzahl um 30% verringert. Sobald die Motortemperatur über 88 °C liegt, wird die Drehzahl auf das Minimum von 1200 U/min geregelt.

4.2 Weiterentwicklung des Modells

Da die alte Regelung unter Geheimhaltung steht, sollte eine neue Regelung entwickelt werden. Dazu mussten Änderungen im Modul Regelung vorgenommen werden. Weil zwischen Drehzahl und thermischer Leistung ein linearer Zusammenhang besteht, wird direkt die thermische Leistung geregelt. Zur Vereinfachung der Regelung wird der Block Sicherung abgeschafft. Außerdem musste im Block Steuerung die Berechnungsformel geändert werden. Darüber hinaus sollen die spezifischen Einstellparameter der Regelung in eine Eingabemaske eingegeben werden können.

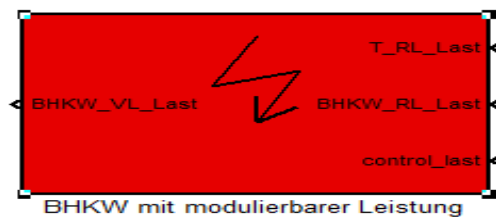


Abbildung 43: Baustein des BHKWs mit modulierbarer Leistung

In der Maske des modulierenden BHKW Bausteins werden die für das Mini-BHKW spezifischen Einstellungen durchgeführt. Hier können die maximale thermische Leistung, die minimale thermische Leistung, die Anfangsleistung, die Vorlaufsolltemperatur, die maximale Vorlauftemperatur, die Anlaufphase und das Nachregelintervall eingegeben werden.

Das Bild zeigt ein Dialogfenster mit dem Titel 'Function Block Parameters: BHKW mit modulierbarer Leistung'. Es enthält eine Liste von Parametern, die in Eingabefeldern mit vorgegebenen Werten dargestellt sind:

Parameter	Wert
Maximale thermische Leistung [W]	12500
Minimale thermische Leistung [W]	3500
Anfangsleistung während der Anlaufphase [W]	8000
Sollvorlauftemperatur [°C]	80
Maximale Vorlauftemperatur [°C]	88
Anlaufphase [s]	180
Nachregelintervall [s]	450

Am unteren Rand des Fensters befinden sich die Schaltflächen 'OK', 'Cancel', 'Help' und 'Apply'.

Abbildung 44: Maske des Bausteins BHKW mit modulierbarer Leistung

Die einzelnen Parameter werden später im Kapitel 4.2.2 „Regelung des BHKW“ erläutert.

Das Innenleben des modulierenden BHKW Blocks wird in der folgenden Abbildung 45 gezeigt. Der Block besteht aus folgenden Bauteilen:

Rücklaufhochhaltung, Pumpe, Regelung, Berechnung der Energien und Wirkungsgrade sowie die Bestimmung der Vorlauftemperatur.

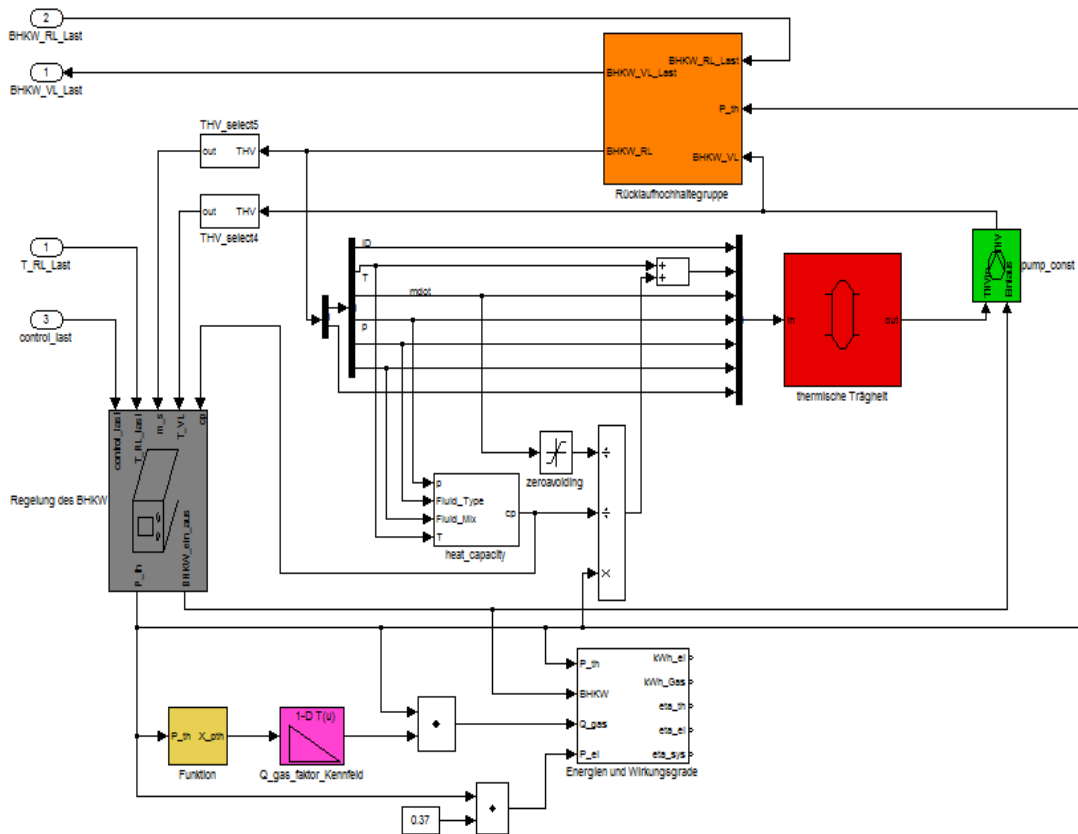


Abbildung 45: Modell des BHKW mit modulierbarer Leistung

4.2.1 Bestimmung der Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur wird nach der folgenden Formel ermittelt:

$$T_{VL} = T_{RL} + \frac{P_{th}}{\dot{m} \times c_p}$$

T_{VL} : Vorlauftemperatur [°C]

T_{RL} : Rücklauftemperatur [°C]

P_{th} : aktuelle thermische Leistung [W]

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]

c_p : Wärmekapazität[J/(kg*K)]

4.2.2 Regelung des BHKWs

Der wichtigste Bestandteil der Modelländerungen stellt die Regelung des BHKW dar, insbesondere die Modulation der thermischen Leistung. Bei einem modulierbaren Mini-BHKW wird die thermische Leistungsregelung durch Drehzahlvariation realisiert.

Laut Herstellerangaben liegt folgender Zusammenhang zwischen thermischer Leistung und der Drehzahl vor:

Tabelle 8: Kennzahlen des modulierbaren Mini-BHKW

Kennzahl	Minimale Last	Maximale Last
Drehzahl [U/min]	1200	3600
Thermische Leistung [W]	3500	12500

Tabelle 8 zeigt, dass die thermische Leistung linear von der Drehzahl abhängt. Da die Drehzahlbestimmung in diesem Fall nicht von Bedeutung ist, wird statt einer Drehzahlregelung im Modell direkt die thermische Leistung geregelt. Für die Regelung wurden sowohl für die Ein- und Ausschaltbedingungen des Mini-BHKW als auch für die thermische Leistungsanpassung möglichst einfache Regelungskonzepte zugrundegelegt. Die Regelung findet im Baustein „Regelung des BHKW“ statt.

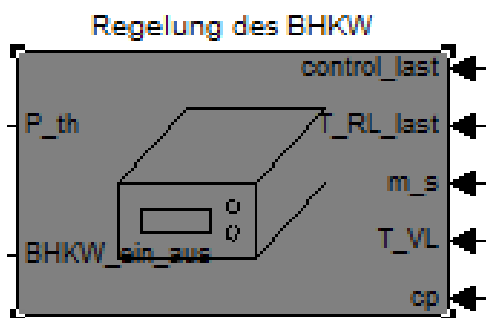


Abbildung:46 Regelungsblock des BHKW mit modulierbarer Leistung

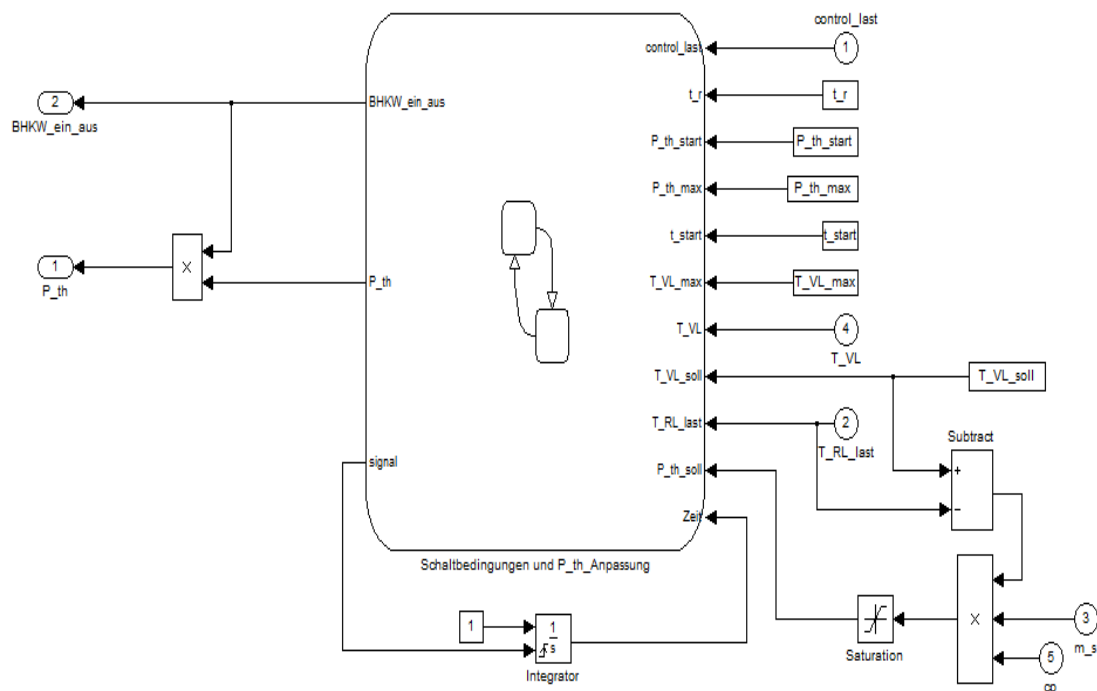


Abbildung 47: Stateflow-Chart der Regelung des BHKW mit modulierbarer Leistung

Die Abbildung 47 zeigt, dass in Abhängigkeit der Parameter control_last, t_r , P_{th_start} , P_{th_max} , P_{th_min} , T_{VL} , T_{VL_soll} , T_{RL_last} , m_s und cp das Ein/Aus-Signal bzw. die einzustellende thermische Leistung des BHKW ermittelt wird. Die Abkürzungen bedeuten:

Control_last: externe Steuersignal, das vom Pufferspeicher oder Verbraucher gegeben wird.

P_{th_max} : maximale thermische Leistung, die vom Mini-BHKW erreicht werden kann, wenn das Mini-BHKW bei maximaler Drehzahl betrieben wird.

P_{th_min} : minimale thermische Leistung, die vom Mini-BHKW erreicht werden kann, wenn das Mini-BHKW bei minimaler Drehzahl betrieben wird.

P_{th_start} : thermische Anfangsleistung, die bei jedem Startvorgang vorliegt.

P_{th_soll} : thermische Sollleistung

T_{VL_soll} : Sollvorlauftemperatur

T_{VL} : Vorlauftemperatur des Mini-BHKWs

T_{VL_max} : Vorlauftemperatur, die nicht überschritten werden darf.

T_{RL_last} : Temperatur im Entladekreis im Pufferspeicher oder Rücklauf des Verbrauchers

t_r : Nachregelintervall, bei dem eine neue thermische Leistung geregelt wird.

t_start: Anfahrphase mit P_th_start und anschließend Hochregelung auf die maximale thermische Leistung

signal: Steuersignal

Zeit: Aktivierung des Zählers „Zeit“, wenn das Steuersignal von „signal“, „1“ ist

m_s: Massenstrom des Mini-BHKW

cp: Wärmekapazität

Wie in der vorherigen Abbildung zu sehen ist, wird über den Eingang P_th_soll eine Änderung der thermischen Leistung bewirkt. Ziel ist es, die thermische Leistung so zu regeln dass die Sollvorlauftemperatur (T_VL_soll) auf der gewünschten Temperatur konstant gehalten werden kann.

Die neue thermische Leistung errechnet sich folgendermaßen:

$$P_{th_soll} = m_s \cdot cp \cdot (T_{VL_soll} - T_{RL_last})$$

Die thermische Leistung ist nach oben (P_th_max) und nach unten (P_th_min) begrenzt. P_th_soll wird im Block Saturation auf diese Werte begrenzt.

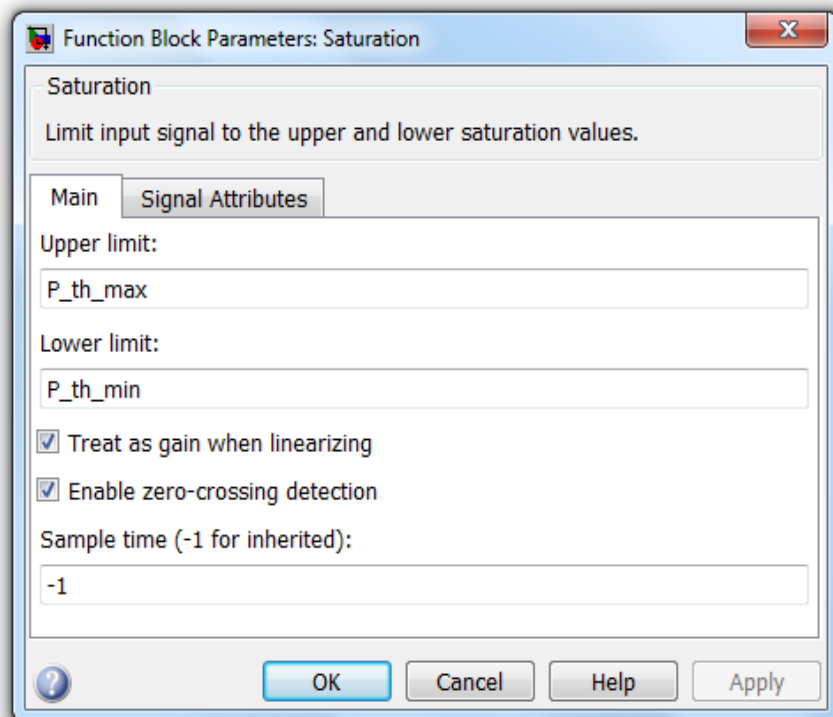
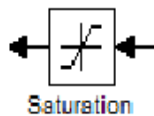


Abbildung 48: Block Saturation

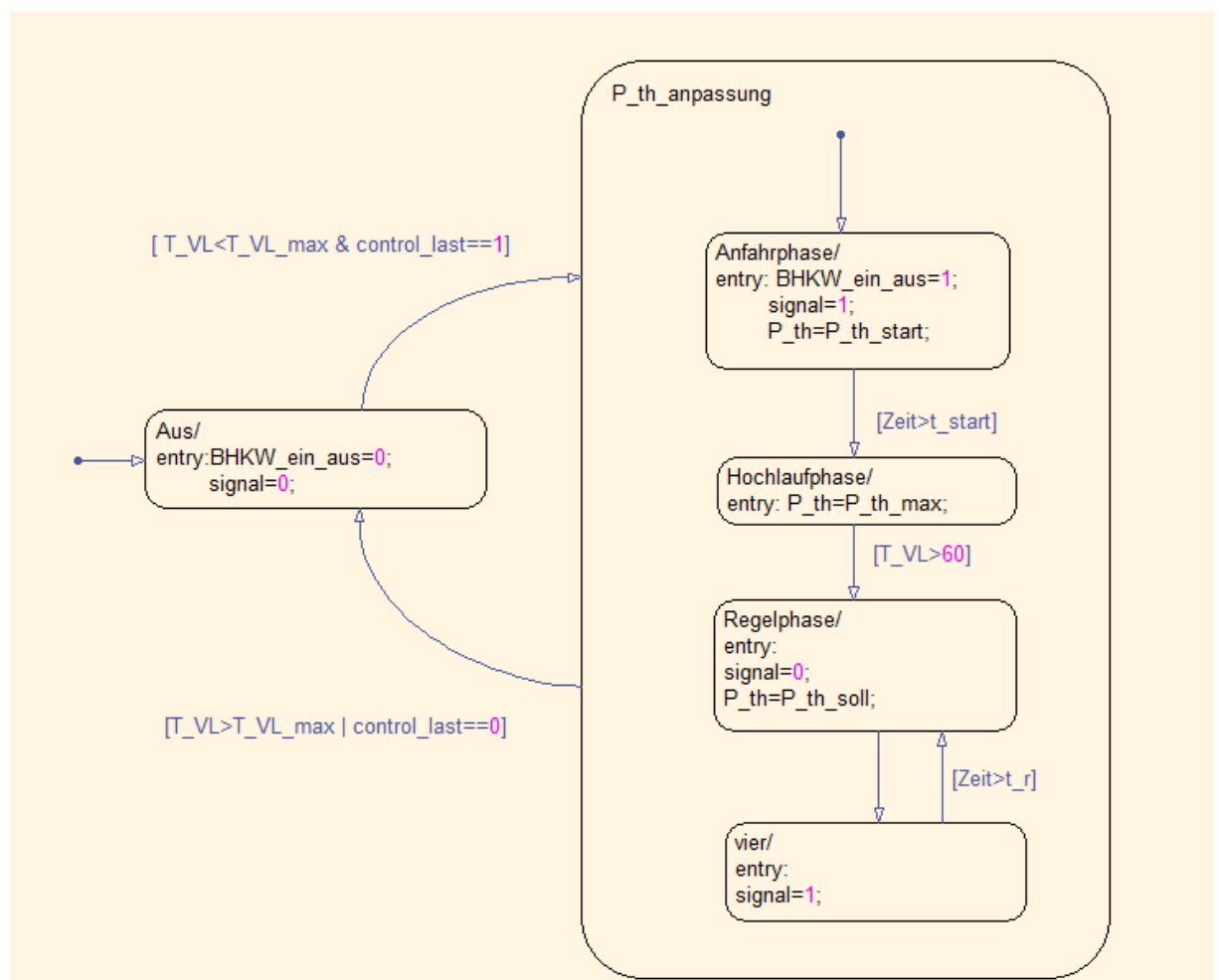


Abbildung 49: Schaltbedingungen und Anpassung der thermischen Leistung

Die Abbildung 49 zeigt die Einschalt- und Ausschaltbedingungen, sowie die Anpassung der thermischen Leistung. Das Mini-BHKW wird eingeschaltet, wenn die Vorlauftemperatur kleiner als die maximale Vorlauftemperatur und wenn das Steuersignal von `control_last` „1“ ist. Die automatische Ausschaltung des Mini-BHKW setzt ein, wenn die Vorlauftemperatur die maximale Vorlauftemperatur überschreitet oder wenn das Signal von `control_last` „0“ ist. Nur wenn das Mini-BHKW eingeschaltet ist, kann die Regelung der thermischen Leistung erfolgen. Das Mini-BHKW wird am Anfang mit einer Startleistung (P_{th_start}) betrieben. Nach der Anfahrphase (t_{start}) wird das Mini-BHKW auf die maximale thermische Leistung (P_{th_max}) hochgeregelt. Wenn die Vorlauftemperatur über 60°C steigt, wird nach jedem Nachregelintervall (t_r) eine thermische Leistung neu eingestellt.

4.2.3 Bestimmung des Massenstroms

In dem Bauteil „Rücklaufhochhaltung“ findet die Bestimmung des Massenstroms im Entladekreis des BHKW statt.

Im unteren Bild ist die hydraulische Verschaltung der Rücklaufhochhaltgruppe schematisiert.

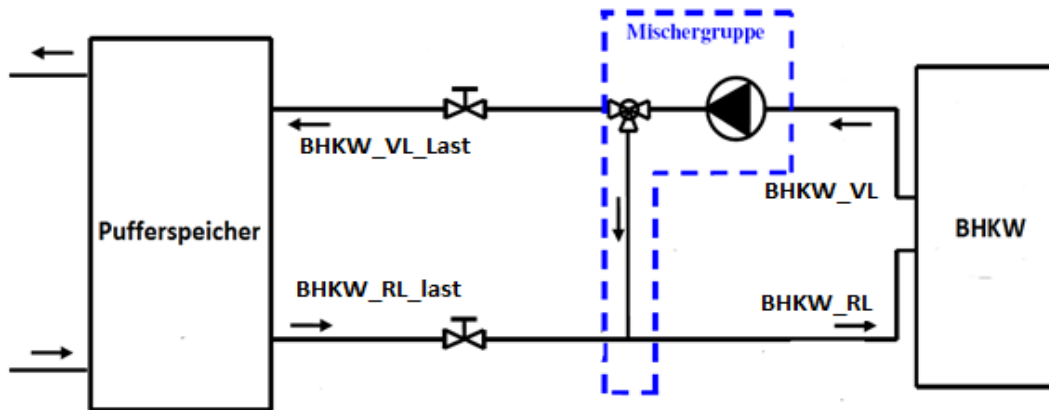


Abbildung 50: Hydraulikschema der Rücklaufhochhaltgruppe

Zur Rücklauftemperaturanhebung wird in der Mischergruppe über ein 3-Wege-Ventil und Bypass ein Teil des Vorlaufstroms dem Rücklaufstrom beigemischt. Im Gegensatz zum Modell mit konstanter Leistung wird die Mischergruppe abgebildet, wie in Abbildung 51 zu sehen ist.

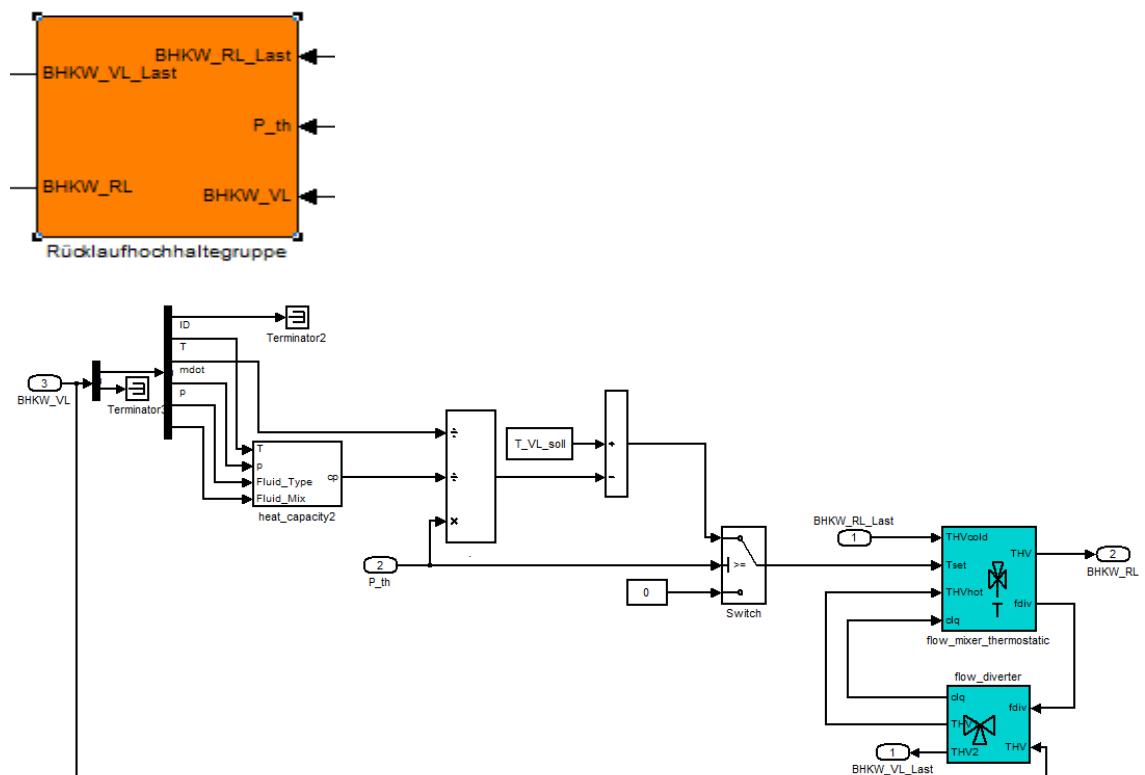


Abbildung.51: Modul der Rücklaufhochhaltgruppe

In Abhängigkeit der gewählten Sollvorlauftemperatur (T_{VL_soll}) und der aktuellen thermischen Leistung (P_{th}) wird eine Sollrücklauftemperatur (T_{RL_ist}) berechnet, die sich entsprechend in der Mischergruppe einstellt.

Die Sollrücklauftemperatur wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$T_{RLsoll} = T_{VLsoll} - \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m} \times c_p} \quad \text{wobei:}$$

T_{RLsoll} : berechnete Sollrücklauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_{VL_soll} : gewünschte Vorlauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

\dot{Q}_{th} : thermische Leistung [W]

c_p : Wärmekapazität [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]

Dabei wird darauf geachtet, dass der Massenstrom von der maximalen thermischen Leistung des Mini BHKW abhängt. Das Basis-Mini-BHKW, welches mit einer maximalen thermischen Leistung von 12500 W betrieben werden kann, weist einen maximalen Massenstrom von 0,3 kg/s auf.

Da das Modell so aufgebaut ist, dass die thermische Leistung frei skalierbar ist, wird im Block „pump_const“ der Wert „0.3“ für den Massenstrom eingegeben.

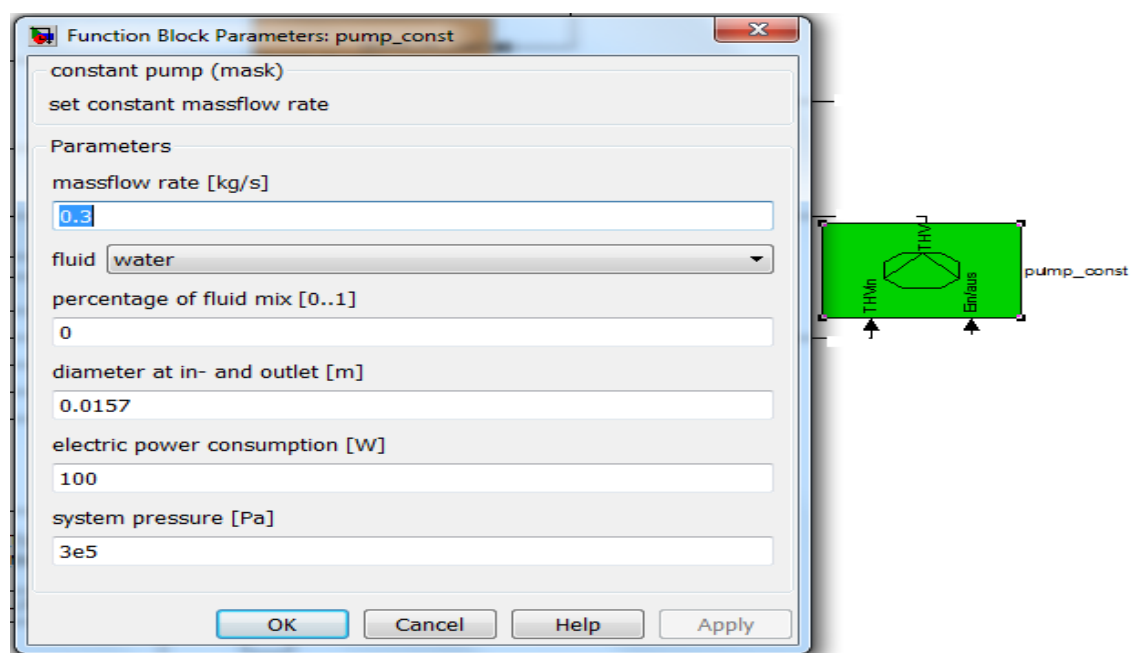


Abbildung 52: Maske der Pumpe

Dabei wird im Baustein der Pumpe (s. Abbildung 53) der Massenstrom wie folgt berechnet

$$\dot{m} = 0.3 * \frac{P_{th_max}}{12500} \quad \text{mit:}$$

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]

P_{th_max} : eingestellte maximale thermische Leistung [W]

12500: Wert der Nennleistung des Basisgeräts [W]

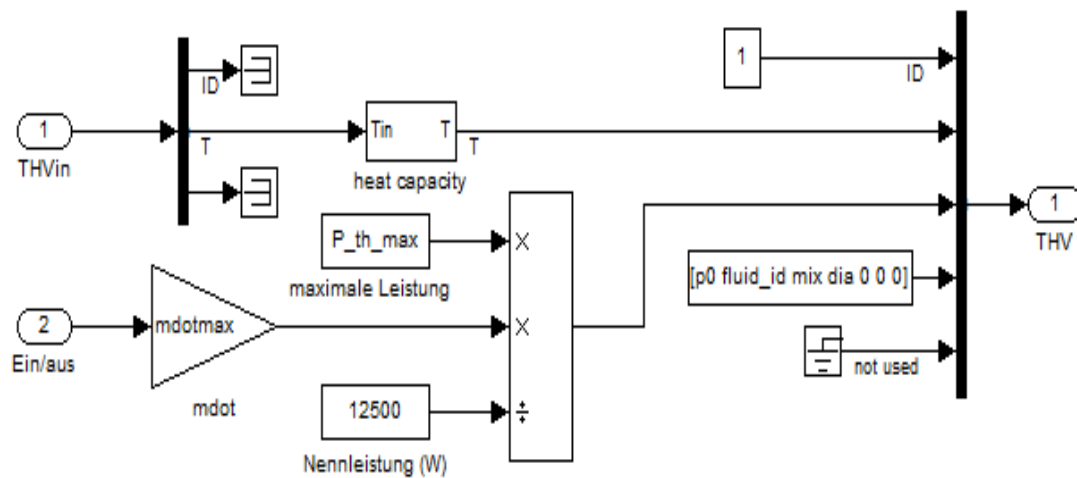


Abbildung 53: Baustein der Pumpe

4.2.4 Bestimmung der elektrischen Leistung und der Brennstoffleistung

Die generierte elektrische Leistung und der Brennstoffverbrauch basieren auf Messdaten, die an einem modulierbaren Mini-BHKW mit einem thermischen Leistungsbereich von 3,5 bis 12,5 kW vermessen wurden.

Tabelle 9: elektrische Leistung und Gasverbrauch in Abhängigkeit der thermischen Leistung

Thermische Leistung [W]	Elektrische Leistung [W]	Brennstoffleistung [W]	Elektrischer Leistungsfaktor $= (P_{el}/P_{th})$	Brennstoff-Leistungsfaktor $= (P_{gas}/P_{th})$
3500	1300	6250	0,37	1,79
12500	4600	18750	0,37	1,5

Da das Modell die freie Skalierbarkeit der thermischen Leistung ermöglicht, wird die elektrische Leistung entsprechend angepasst. Da das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung unabhängig vom Lastzustand ist, wird zur Berechnung der elektrischen Leistung dieser elektrische Leistungsfaktor von 0,37 mit der aktuellen thermischen Leistung multipliziert.

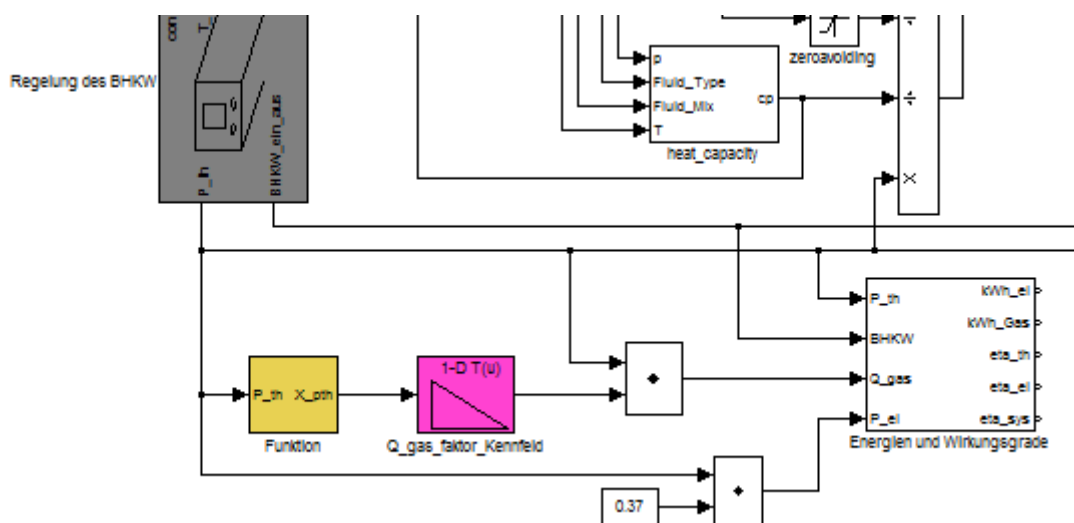


Abbildung 54: Darstellung der Leistungen des BHKWs mit modulierbarer Leistung

Im Gegensatz dazu weist der Brennstoffleistungsfaktor bei minimaler- und maximaler Last zwei verschiedene Werte auf (s. Tabelle 9). Eine Extrapolation der Brennstoffleistung in Abhängigkeit der thermischen Leistung ist demnach nicht möglich, da die thermischen Wirkungsgrade sonst außerhalb dieser Grenzen unrealistische Werte annehmen. Deswegen wurde die Annahme getroffen, dass der Brennstoffleistungsfaktor unabhängig von der Einstellung von P_{th_min} und P_{th_max} stets zwischen 1,79 und 1,5 liegt. Diesen Zusammenhang spiegelt der Faktor „ X_{pth} “ wieder. Im Modul „Funktion“ wird der Faktor „ X_{pth} “ nach folgender Formel berechnet:

$$X_{pth} = 1 + \frac{P_{th} - P_{th_min}}{P_{th_max} - P_{th_min}}$$

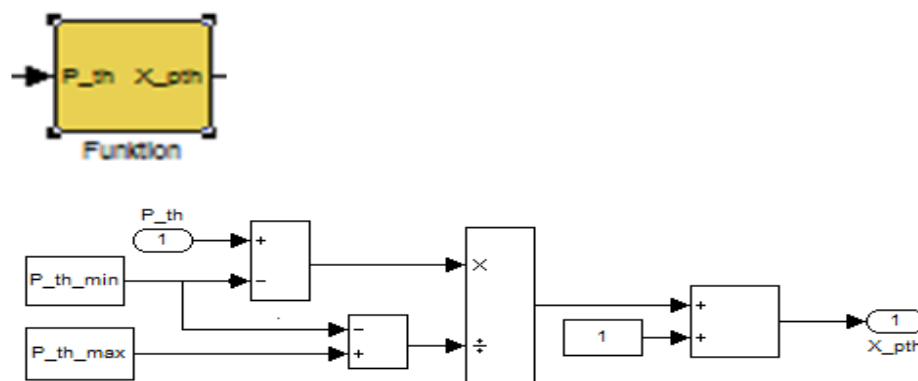


Abbildung 55: Abbildung der Funktion X_{pth}

Anhand der Werte des X_{pth} -faktors berechnet das Modell die Brennstoffleistung (Q_{gas}) über die Kennlinie eines Brennstoffleistungsfaktors. Der Wert X_{pth} von 1 entspricht dem Brennstoffleistungsfaktor von 1,79 bei P_{th_min} . X_{pth} von 2 entspricht dem Brennstoffleistungsfaktor von 1,5 bei P_{th_max} . Der Faktor wird anschließend mit der eingestellten thermischen Leistung (P_{th}) multipliziert (s. Abbildung 54).

$$Q_{gas} = f_{Q_gas} \times P_{th}$$

Die Kennlinie des $Q_{gas_faktor_kennfelds}$ ist im m-File hinterlegt (s. Abbildung 56).

```
%Q_gas_faktor_Kennfeld des BHKW mit modulierbarer Leistung

%Q_gas_faktor-Werte für X_pth = 1, 2;
Q_gas_faktor=[1.79 1.5];
```

Abbildung 56: m-File des BHKW mit modulierbarer Leistung

4.2.5 Berechnung der Energien und Wirkungsgrade

In dem Block „Energien und Wirkungsgrade“ werden der thermische Wirkungsgrad, der elektrische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad berechnet (s. Abbildung 57).

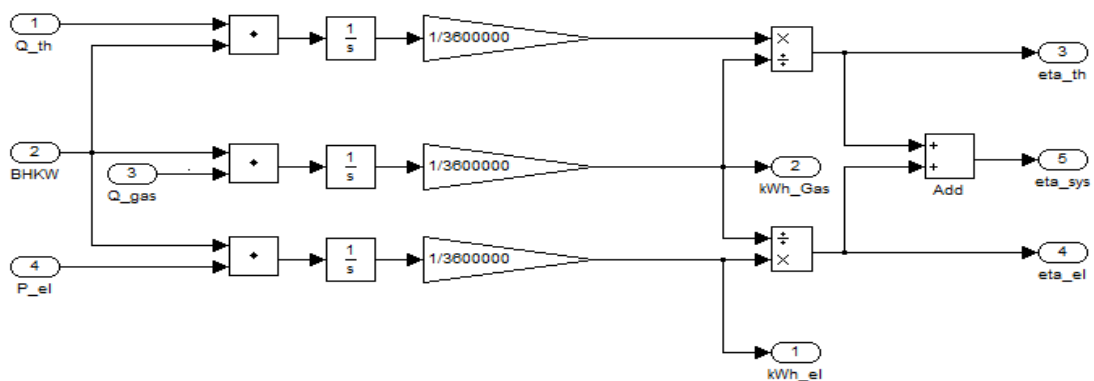


Abbildung 57: Darstellung der Wirkungsgrade

Als thermischer Wirkungsgrad (eta_{th}) bezeichnet man das Verhältnis der abgegebenen thermischen Leistung zur Brennstoffleistung. Der elektrische Wirkungsgrad (eta_{el}) beschreibt das Verhältnis der elektrischen Leistung zur Brennstoffleistung. Der Gesamtwirkungsgrad (eta_{sys}) ergibt sich aus der Addition von (eta_{el}) und (eta_{th}).

4.3 Überprüfung der Regelung

Zur Überprüfung der Funktionalität der Regelung wurden die nachfolgenden Anpassungsparameter gewählt.

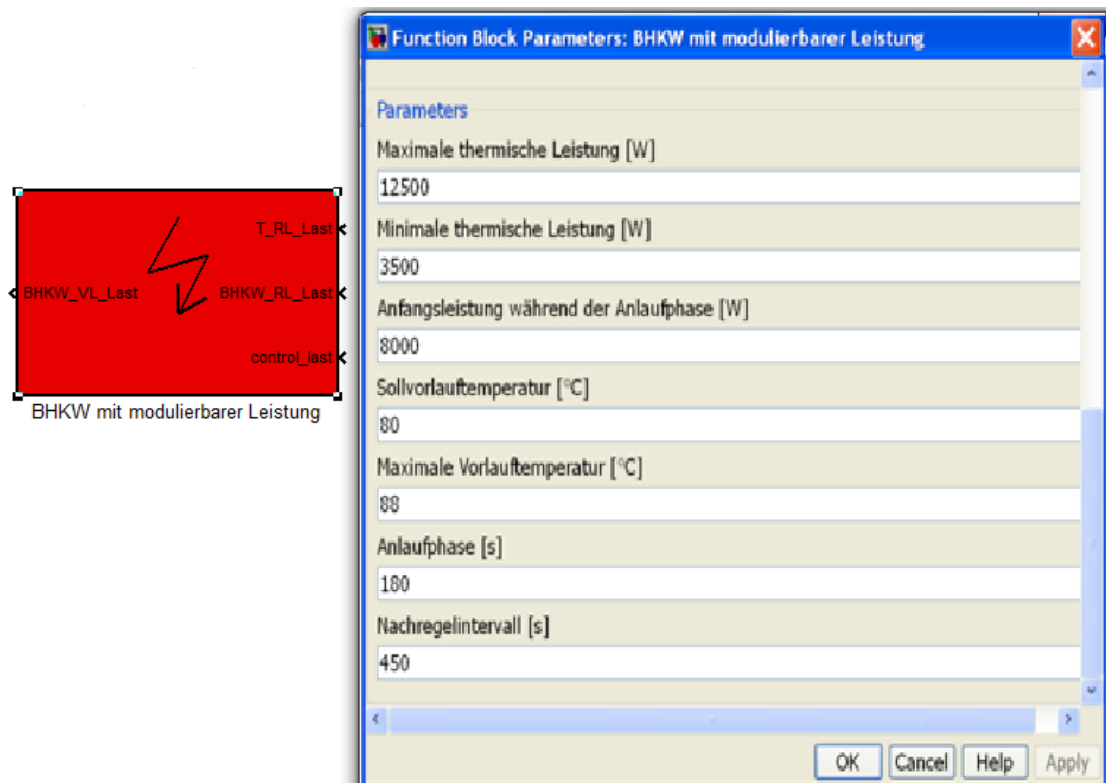


Abbildung 58: Parameterblock des BHKWs mit modulierbarer Leistung

Das Simulationsmodell wurde erweitert, um Input-Daten einzulesen und die Ergebnisse auszuwerten.

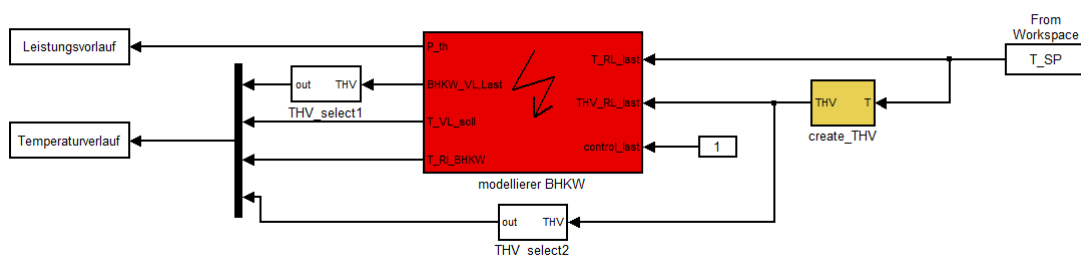


Abbildung 59: Simulationsmodell zur Prüfung der Regelung

Vom Workspace Block „T_SP“ werden Messdaten für „T_RL_Last“ aus der Excel-Datei mithilfe des m-File eingelesen (s. Abbildung 60) und als Eingangssignal für das BHKW verwendet.

```

%Q_gas_faktor_Kennfeld des BHKW mit modulierbarer Leistung

%Q_gas_faktor-Werte für X_pth = 1, 2;
Q_gas_faktor=[1.79 1.5];

%lassen sich die Daten von Tabellen der Exceldatei einlesen
T_SP=xlsread('T_SP');

```

Abbildung 60: m-File der Simulation

In der unteren Abbildung sind die thermische Leistung, die Vor- und Rücklauftemperaturen und die Vorlaufsolltemperatur zu sehen.

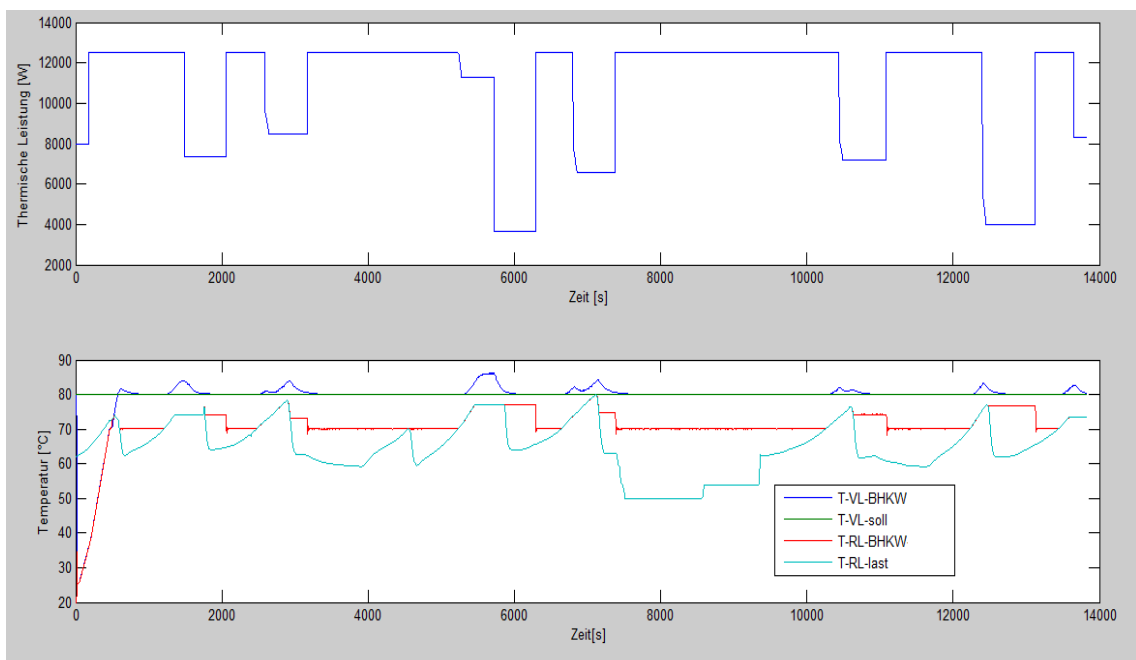


Abbildung 61: Leistungs- und Temperaturverlauf bei Nachregelintervall= 450 s

Die Diagramme zeigen, wie die Regelung arbeitet. Beim Startvorgang wird das BHKW mit einer Anfangsleistung von 8000 W betrieben. Nach einer Anlaufphase von 180 s wird das BHKW mit der maximalen thermischen Leistung von 12500 W betrieben. Sobald die Vorlauftemperatur über 60°C steigt, fängt die Regelphase an. Dabei wird in Abhängigkeit der T_{RL_Last} und T_{VL_soll} eine neue thermische Leistung nach jedem Ablauf von 450 s nachgeregelt. Es zeigt sich, dass aufgrund des hohen Nachregelintervalls teilweise die Sollvorlauftemperatur überschritten wird.

Deswegen wurde eine weitere Simulation und das Nachregelintervall auf 120 s modifiziert. Die anderen Parameter bleiben dagegen unverändert.

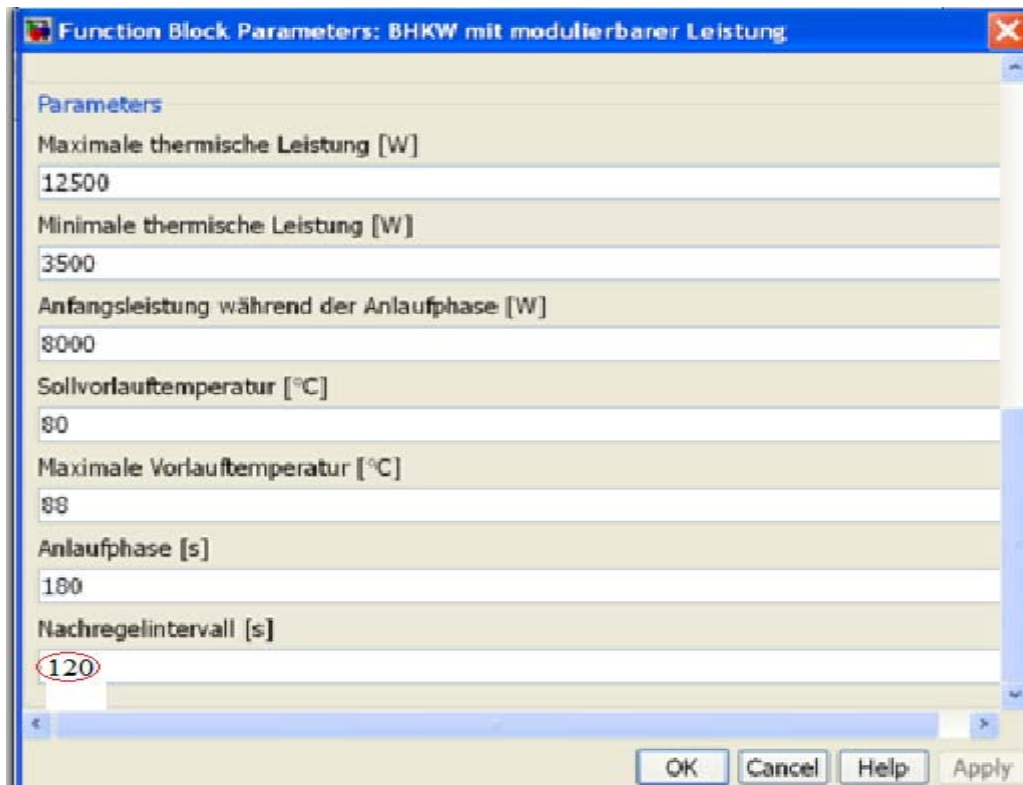


Abbildung 62: Parameterblock des BHKWs

Die Reaktion der Regelung auf die Änderung des Nachregelintervalls zeigt die Abbildung 63. Es ist zu sehen, dass die Sollvorlauftemperatur weitaus besser eingehalten werden kann.

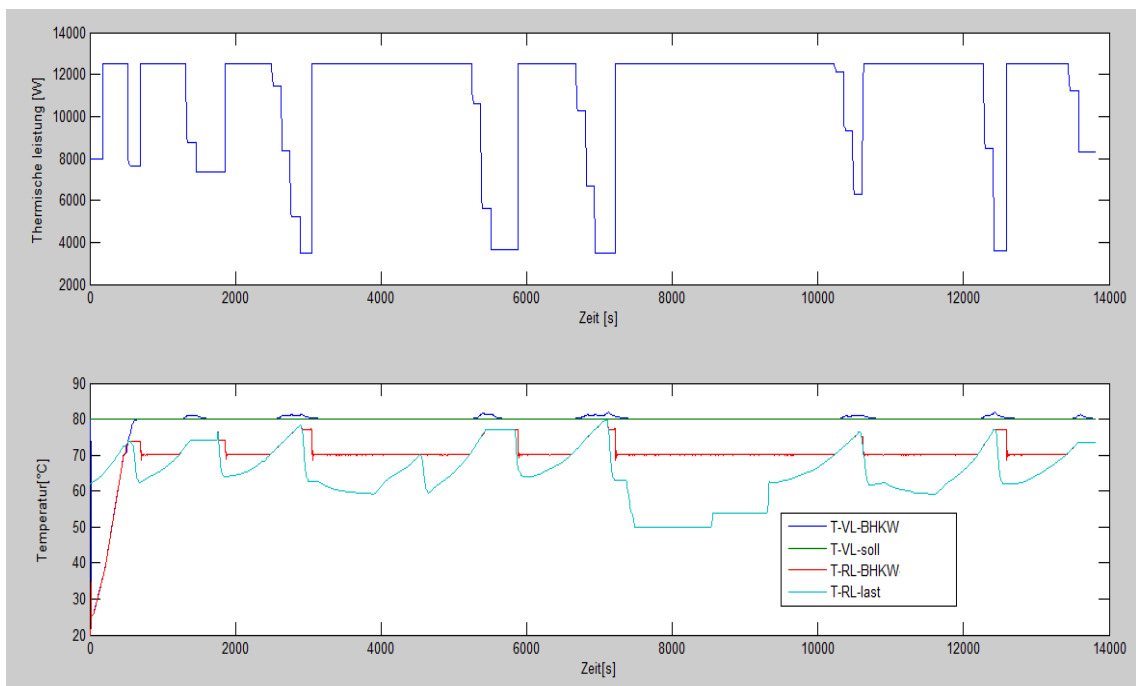


Abbildung 63: Leistungs- und Temperaturverlauf bei Nachregelintervall= 120 s

5 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Modelle zweier Mini-BHKWs mittels der Softwareumgebung Matlab/Simulink in Verbindung mit den Toolboxen CARNOT und STATEFLOW weiterentwickelt. Das erste Modell bildet das Verhalten eines BHKWs mit konstanter Leistung ab. Und im zweiten Modell wird das Verhalten eines BHKWs mit modulierbarer Leistung abgebildet. Oberstes Prinzip bei der Modellierung war, die Bedienung der Modelle möglichst anwenderfreundlich zu gestalten.

Das Modell eines BHKWs mit konstanter Leistung auf Basis des Mini-BHKW Dachs basiert auf drei Kennfeldern, die in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur die thermische Leistung, die Vorlauftemperatur und den Massenstrom des BHKW berechnen. Zur Ermittlung der Kennfelder wurden Prüfstanduntersuchungen an der FH Düsseldorf durchgeführt. Das Modell des BHKW ist so aufgebaut, dass die thermische Leistung frei skalierbar ist. Hierfür sollte die gewünschte thermische Nennleistung in der Maske des BHKW Moduls eingetragen werden. Eine Thermostatregelung ist im Modell mithilfe von Kennfeldern abgebildet. Entsprechend ändern sich der Massenstrom im Entladekreis des BHKW je nach eingestellter thermischer Nennleistung und Sollvorlauftemperatur. Analog zu der freien Skalierbarkeit der thermischen Leistung ändern sich die thermische Masse, die elektrische Leistung und die zugeführte Brennstoffleistung. Zudem werden der thermische Wirkungsgrad, der elektrische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad berechnet.

Bei dem Modell eines BHKWs mit modulierbarer Leistung auf Basis des Mini-BHKW Ecopower werden spezifischen Einstellungen durchgeführt. Dabei können in der Maske des BHKW Moduls die maximale thermische Leistung, die minimale thermische Leistung, die Anfangsleistung, die Vorlaufsolltemperatur, die maximale Vorlauftemperatur, die Anlaufphase und das Nachregelintervall eingegeben werden. Der wichtigste Bestandteil der Modelländerungen stellt die Regelung des BHKW dar. Da zwischen Drehzahl und thermischer Leistung ein linearer Zusammenhang besteht, wird im Modell zur Vereinfachung direkt die thermische Leistung geregelt. Bei jedem Start des BHKWs wird dieser mit einer thermischen Anfangsleistung betrieben. Nach einer eingestellten Anlaufphase wird das BHKW auf die maximale thermische Leistung geregelt. Sobald eine Vorlauftemperatur von 60°C erreicht ist, wird eine neue thermische Leistung nach jedem Ablauf des eingestellten Nachregelintervalls nachgeregelt. Eine Rücklaufhochhaltegruppe ist im Modell abgebildet. In Abhängigkeit der gewählten Sollvorlauftemperatur und der aktuellen thermischen Leistung wird eine Sollrücklauftemperatur berechnet, die sich entsprechend in der Mischerguppe einstellt. Der Massenstrom im Entladekreis des BHKW ändert sich linear in Abhängigkeit der eingestellten maximalen ther-

mischen Leistung. Die elektrische Leistung und der Brennstoffverbrauch basieren auf Messdaten, die an einem modulierbaren Mini-BHKW mit einem thermischen Leistungsbereich von 3,5 bis 12,5 kW vermessen wurden. Je nach dem eingetragenen gewünschten thermischen Leistungsbereich ändern sich die elektrische Leistung und die zugeführte Brennstoffleistung. Auch in diesem Modell werden der thermische Wirkungsgrad, der elektrische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad ausgegeben.

Zur Aufnahme in die CARNOT-Modellbibliothek ist es noch notwendig den Text und die Sprache innerhalb des Modells ins Englische zu übersetzen. Zudem sind Help-Dateien im geforderten Format der CARNOT-Bibliothek zu erstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] **H.E.Scherf**: Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003.
- [2] **SenerTec GmbH**. [Online] 6. Oktober 2012
<http://www.senertec.de>.
- [3] **Vaillant GmbH** [Online] 6. Oktober 2012
<http://www.vailant.de/ecopower/>.
- [4] **Stadtwerke Düsseldorf Netz GmbH**. [Online] 15. Oktober 2012
<http://www.swd-netze.de>
- [5] **Power Additive Solutions GmbH**. [Online] 06. Oktober 2012
<http://www.addilution.ch>.
- [6] **Ihr BHKW Berater**. [Online] 6. Oktober 2012
<http://www.minibhkw.de/bhkw-uebersicht>.
- [7] **Anne Angermann, Michael Beuschel, Martin Rau, Ulrich Wohlfarth**: MATLAB- Simulink-Stateflow. 7. Auflage, München, Oldenbourg Verlag, 2011.
- [8] **Bernd Thomas**: Mini-Blockheizkraftwerke. 2. Auflage, Würzburg, Vogel Buchverlag, 2011.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Ort, Datum

Unterschrift