

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

17/07/2021

Projekttitle: Heat Pumping system Control (HPC)

Projektnummer: 865095

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/05/2018
Projektende	30/04/2021
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH
AnsprechpartnerIn	Markus Gölles, Viktor Unterberger
Postadresse	Inffeldgasse 21b 8010 Graz
Telefon	+43 5 02378-9201
Fax	
E-mail	office@best-research.eu
Website	https://www.best-research.eu/

Heat Pumping system Control (HPC)

Modellbasierte Regelung von Absorptionswärmepump-Anlagen

AutorInnen:

Sandra Zlabinger (BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH)

Michael Wernhart (Institut für Wärmetechnik der TU Graz)

Viktor Unterberger (BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH)

René Rieberer (Institut für Wärmetechnik der TU Graz)

Markus Gölles (BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH)

Christoph Rohringer (AEE - Institut für Nachhaltige Technologien)

Hannes Poier (SOLID GmbH)

Christian Halmdienst (PINK GmbH)

Christian Kemmerzehl (EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld)

Mike Otto (EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	7
3	Inhaltliche Darstellung.....	11
3.1	AWPA-Teststand	11
3.1.1	Hydraulischer Aufbau des Teststands	11
3.1.2	Sensorik.....	14
3.1.3	Automatisierungskonzept	17
3.1.4	Mögliche Betriebsarten.....	19
3.2	Simulationsmodelle für AWPA	21
3.2.1	PINK-AWPA (NH ₃ /H ₂ O)	21
3.2.2	EAW-AWPA (H ₂ O/LiBr)	24
3.3	Reglerentwurf für AWPA.....	27
3.3.1	Motivation und Vorteile von modellbasierten Mehrgrößen-Reglern für AWPA	28
3.3.2	Modellbildung für Reglerentwurf.....	30
3.3.3	Neu entwickelte modellbasierte Mehrgrößen-Regler für AWPA.....	35
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	38
4.1	Ergebnisse aus experimenteller Analyse	38
4.2	Validierungsergebnisse der Simulationsmodelle.....	39
4.2.1	PINK-AWPA (NH ₃ /H ₂ O)	39
4.2.2	EAW-AWPA (H ₂ O/LiBr)	40
4.3	Verwendung des Simulationsmodells zur Analyse des Anlagenverhaltens	42
4.3.1	Temperaturgleit.....	42
4.3.2	Solarthermische Kühlung	43
4.4	Validierungsergebnisse für Reglerentwurfsmodelle	45
4.5	Validierungsergebnisse der neuen Regelungen.....	47
4.5.1	Reglervalidierung in Teil- und Überlastsituationen.....	48
4.5.2	Fazit und Schlussfolgerungen für neu entwickelte Regelungen.....	54

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

4.6	Untersuchungen und Analysen zur weiteren Umsetzung und Verwertung der Projektergebnisse	55
4.6.1	Anpassung der neu entwickelten Regelungen an andere Anlagen.....	55
4.6.2	Analyse der durch das verbesserte Regelverhalten möglichen zusätzlichen Anwendungen.....	58
4.6.3	Verwendung der Projektergebnisse für Konzeptionierung und Planung von Umsetzungsprojekten	61
5	Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick.....	63
5.1	Experimentelle Analyse	63
5.2	Simulationsmodelle.....	63
5.3	Regelung	64
6	Literaturverzeichnis.....	67
7	Kontaktdaten.....	71

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

2 Einleitung

Aufgrund der Eigenschaft, die Kombination verschiedener Technologien und Systeme sowie Anwendungen (Heizen, Kühlen) zu unterstützen oder überhaupt erst zu ermöglichen, kommt thermisch angetriebenen Absorptionskältemaschinen wie auch Absorptionswärmepumpen – verallgemeinert als Absorptionswärmepump-Anlagen (AWPA) bezeichnet – besondere Bedeutung bei der Steigerung der Effizienz des Energiesystems sowie Erhöhung des Anteiles erneuerbarer Energien zu. AWPA haben darüber hinaus den Vorteil, mit einem Bruchteil der für Kompressionsanlagen benötigten elektrischen Energie Wärme und Kälte generieren zu können und damit die Entlastung des Stromnetzes zu unterstützen. Trotz dieser Vorteile sind AWPA in Europa aktuell deutlich unterrepräsentiert. Nach [1] wurden beispielsweise im europäischen Fernwärmesektor von 1985 bis 2015 112 Wärmepumpen mit einer Leistung über 1 MWth installiert. Davon waren lediglich 6 AWPA (5,3%).

Aufgabenstellung

Einer der Hauptgründe für die bisher geringe Einbindung dieser Technologie ist die komplexe Verschaltung und gegenseitige Beeinflussung maschineninterner und -externer Betriebsparameter. Diese physikalisch bedingten, multiplen Abhängigkeiten führen vor allem beim Betrieb abseits des Auslegungspunkts zu hohen Anforderungen an die Regelung (Halten mehrerer Regelgrößen in breitem Betriebsbereich unter variierenden Störgrößeneinflüssen). Um zukünftig den Einsatz und Betrieb von AWPA also zu erleichtern, müssen sie in der Lage sein, mit variierenden Betriebsbedingungen und Laständerungen umzugehen, die typisch für moderne Heiz- und Kühlanwendungen sind, in denen erneuerbare und volatile Energiequellen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dazu müssen einerseits das Verständnis über dynamische Betriebspunktwechsel verbessert werden und andererseits AWPA-Regelungen eingesetzt werden, die den Einsatz unter variierenden Betriebsbedingungen in einem möglichst breiten Betriebsbereich ermöglichen.

Deshalb hat sich das Projekt HPC die folgenden Ziele gesetzt:

- Entwicklung eines umfassenden Teststands zur experimentellen Untersuchung des dynamischen Verhaltens von AWPA
- Entwicklung von dynamischen Simulationsmodellen, um das Verhalten von AWPA unter variierenden Betriebsbedingungen genau untersuchen zu können und auch detaillierte Aussagen über Vorgänge im „Inneren“ von AWPA treffen zu können,
- Entwicklung einer Methode zur modellbasierten Regelung von AWPA um den Einsatz – insbesondere unter variierenden Betriebsbedingungen – zu erleichtern und damit neue Anwendungen mit AWPA zu ermöglichen.

Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung dieser Ziele wurde im ersten Schritt ein umfassender Teststand geplant und gebaut. Der Teststand besteht aus einer H₂O/LiBr-AWPA (des Projektpartners EAW) und einer NH₃/H₂O-AWPA (des Projektpartners PINK), sowie einem Hydraulikteststand zur Anbindung an eine leistungsstarke Wärmequellen/Wärmesenken-Infrastruktur. Der Teststand wurde zur detaillierten Analyse des dynamischen Verhaltens der AWPA und zur Validierung der entwickelten Modelle und Regelungen eingesetzt und ist in Abschnitt 3.1 detailliert beschrieben. Im nächsten Schritt wurde für beide AWPA (H₂O/LiBr und NH₃/H₂O) jeweils ein detailliertes Simulationsmodell in der Simulationsumgebung Dymola entwickelt, welche eine umfassende Analyse des dynamischen Verhaltens ermöglichen (siehe Abschnitt 3.2). Darauf aufbauend wurden weiters sogenannte Reglerentwurfsmodelle für beide AWPA entwickelt, welche die wesentliche Dynamik der AWPA mithilfe einfacher mathematischer Gleichungen beschreiben und für den Reglerentwurf eingesetzt wurden. Basierend auf der mathematischen Form der Reglerentwurfsmodelle und den ermittelten Anforderungen an die Regelung wurden schlussendlich zwei modellbasierte Mehrgrößen-Regelungen entwickelt, die den möglichen Betriebsbereich und die Teillastfähigkeit von AWPA deutlich verbessern können. Die Reglerentwurfsmodelle sowie der Aufbau der neuen Regelungsmethoden sind in Abschnitt 3.3 erläutert. Zur Validierung der Simulations- und Reglerentwurfsmodelle sowie zur Validierung der modellbasierten Regelungen wurden anspruchsvolle dynamische Versuche am Teststand durchgeführt. Beispielhafte Ergebnisse davon sind in Abschnitt 4 zusammengefasst. In Abschnitt 4.6 werden schlussendlich ein Ausblick und Empfehlungen für weitere interessante Schritte in diesem Forschungsbereich sowie Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung der Projektergebnisse gegeben.

Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projekts sind

- die detaillierte experimentelle Analyse des dynamischen Verhaltens von AWPA,
- die Modellbildung von AWPA (sowohl detaillierte Simulationsmodelle für Simulationsstudien, als auch vereinfachte Reglerentwurfsmodelle für die modellbasierten Mehrgrößen-Regler),
- der Reglerentwurf auf AWPA-Komponentenebene zur Verbesserung der Teillastfähigkeit von AWPA, sowie
- die umfangreiche Validierung aller Modelle und Regelungen in der Simulation und am AWPA-Teststand

Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelt prioritär das Themenfeld 5 – *Umwandlungs-Speichertechnologien* mit dem Subschwerpunkt 5.8 *Wärmepumpen und Kälteanlagen*. Darüber hinaus begünstigen die Ergebnisse aus HPC auch die Einbindung von AWPA in Energienetze allgemein und

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

ermöglichen den Einsatz von AWPA bei neuen Anwendungen, z.B. zur besseren Abwärmenutzung in der Industrie, wodurch auch ein wichtiger Beitrag für das Themenfeld 2 *Energiesysteme und -netze* und das Themenfeld 3 *Industrielle Energiesysteme* geleistet werden konnte.

Verwendete Methoden

Die in diesem Projekt verwendeten Methoden waren unter anderem

- Installations- und Programmierarbeiten zur Entwicklung eines umfangreichen AWPA-Teststands
- Versuchsdurchführung und Messdatenauswertung
- Modellbildung in der Simulationsumgebung Dymola [2]
- Implementierung geeigneter Stoffdatenroutinen und -schnittstellen in der Simulationsumgebung Dymola [2], EES [3] und Matlab/Simulink [4]
- Mathematische Modellbildung für Reglerentwurfsmodell und Implementierung in Matlab/Simulink [4]
- Durchführung von rechnerunterstützten Simulationsstudien unter Einbindung realer Messdaten
- Parameteranpassung durch Skalierung aufgrund von Baugrößen-Verhältnis
- Experimentelle Modell- und Reglervalidierung

Aufbau und Funktionsweise von Absorptionswärmepump-Anlagen

In Abbildung 1 sind eine Kompressionswärmepump-Anlage (links) und eine Absorptionswärmepump-Anlage (rechts) schematisch dargestellt, anhand derer Aufbau und Funktionsweise in der Folge erläutert werden sollen.

In der Kompressionswärmepump-Anlage wird das dampfförmige Kältemittel im Verdichter auf einen höheren Druck gebracht, gelangt dann in den Kondensator, wo es kondensiert und die Kondensationswärme (\dot{Q}_C) an das so genannte Kühlwasser abgibt. Nach dem Kondensator strömt das nunmehr flüssige Kältemittel in die Drossel, wo es auf einen niedrigeren Druck entspannt wird und gelangt weiter in den Verdampfer. Dort wird das Kältemittel durch Aufnahme der Verdampfungswärme (\dot{Q}_E) aus dem Kaltwasser verdampft und strömt weiter zum Verdichter, womit sich der Kreisprozess schließt.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

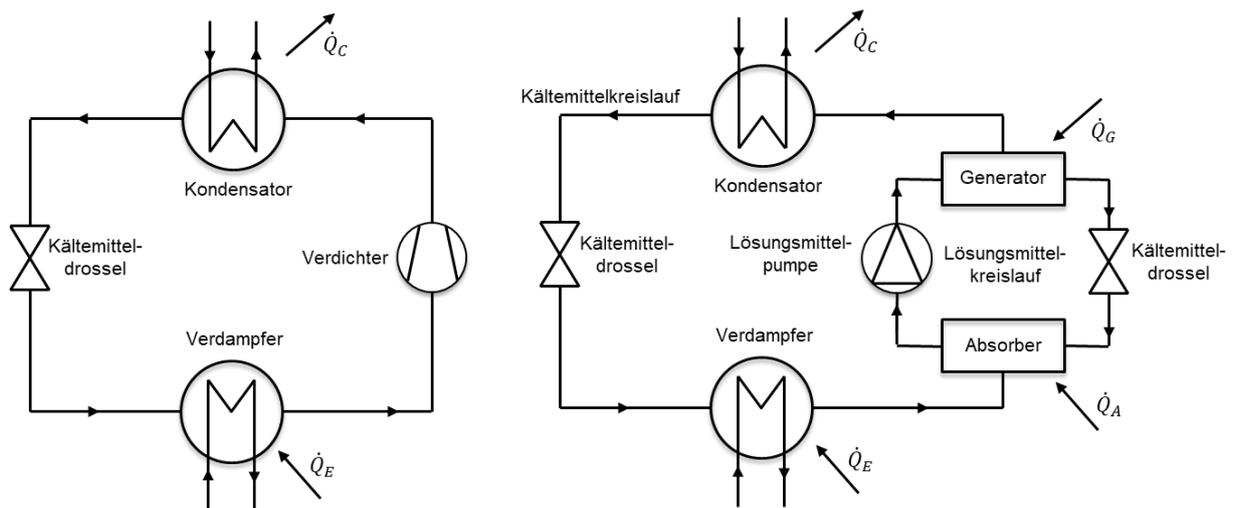


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Kompressionswärmepump-Anlage (links) und einer Absorptionswärmepump-Anlage (rechts) (in Anlehnung an [5])

Bei einer Absorptionswärmepump-Anlage wird der mechanische Verdichter durch einen so genannten thermischen Verdichter ersetzt. Dabei wird der Kältemitteldampf aus dem Verdampfer durch ein Lösungsmittel unter Wärmeabgabe (\dot{Q}_A) an das Kühlwasser auf mittlerem Temperaturniveau (wie im Kondensator) in einem Absorber absorbiert. Die dadurch entstandene (kältemittel)reiche Lösung wird durch eine Lösungsmittelpumpe auf ein höheres Druckniveau gepumpt und strömt in den Generator. Dort wird das Kältemittel durch Wärmezufuhr aus dem Heißwasser (\dot{Q}_G) auf hohem Temperaturniveau wieder aus dem Lösungsmittel ausgetrieben. Nach dem Generator gelangt das Kältemittel wie bei Kompressionswärmepump-Anlagen in den Kondensator und die übrigbleibende (kältemittel)arme Lösung strömt über eine Lösungsmitteldrossel zurück zum Absorber. Der Absorptionswärmepumpprozess wird dabei im Wesentlichen von drei Temperaturniveaus (Heißwasser, Kühlwasser, Kaltwasser) bestimmt. Die Wärmezufuhr im Generator erfolgt über das Heißwasser, die Wärmeabfuhr in Kondensator und Absorber erfolgt über das Kühlwasser und die Wärmezufuhr im Verdampfer erfolgt über das Kaltwasser.

3 Inhaltliche Darstellung

Die inhaltliche Darstellung des Projekts HPC erfolgt entsprechend der zuvor beschriebenen Ziele in den drei Abschnitten

- AWPA-Teststand
- Simulationsmodelle für AWPA und
- Reglerentwurf für AWPA

Die damit erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse werden weiter unten in Abschnitt 4 erläutert.

3.1 AWPA-Teststand

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der beiden AWPA sowie für den iterativen Reglerentwurf und dessen Validierung wurde in HPC ein umfangreicher Teststand entwickelt und aufgebaut. Dieser wurde so konzipiert, dass die AWPA in einem sehr breiten Betriebsbereich mitunter bei stark dynamischen Lastprofilen untersucht werden konnten. Dabei ist sowohl die gezielte, entkoppelte Vorgabe von Eintrittstemperaturen und Volumenströmen in Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreis und von inneren Stellgliedern, wie Lösungsmittelpumpe und Kältemitteldrossel, wie auch die genaue Vermessung der AWPA durch umfassende Sensorik essentiell.

In der Folge werden der hydraulische Aufbau des Teststands, die installierte Sensorik, und das Automatisierungskonzept (Hard- und Software) genauer erläutert. Abschließend werden die verschiedenen möglichen Betriebsarten des Teststands erklärt.

3.1.1 Hydraulischer Aufbau des Teststands

Um anspruchsvolle Versuche mit der NH₃/H₂O- und H₂O/LiBr-AWPA durchführen zu können, wurde ein Hydraulikteststand aufgebaut, der die AWPA mit der umfangreichen Wärmequellen/Wärmesenken-Infrastruktur (WQ/WS Infrastruktur) des Instituts für Wärmetechnik verbindet. Der gesamte hydraulische Aufbau des Teststands ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Er kann zum einen unterteilt werden in die drei Hydraulikkreise

- *Heißwasserkreis*, in dem der Generator der jeweiligen AWPA angeschlossen ist,
- *Kühlwasserkreis*, in dem der Absorber und der Kondensator der jeweiligen AWPA angeschlossen sind, und
- *Kaltwasserkreis*, in dem der Verdampfer der jeweiligen AWPA angeschlossen ist.

Und er kann zum anderen unterteilt werden in die vier Abschnitte

- *AWPA* mit den beiden parallel angeschlossenen NH₃/H₂O- und H₂O/LiBr-AWPA,
- *Hydraulikteststand Periphery* mit den Pumpen und Ventilen, die von den AWPA angesteuert werden können,
- *Hydraulikteststand Supply* mit den Pumpen und Ventilen, die zur Vorgabe von Lastfällen verwendet werden, und

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- *WQ/WS Infrastruktur*, welche die für die Versuchsdurchführung nötige Heiz- und Kühlleistung zur Verfügung stellen.

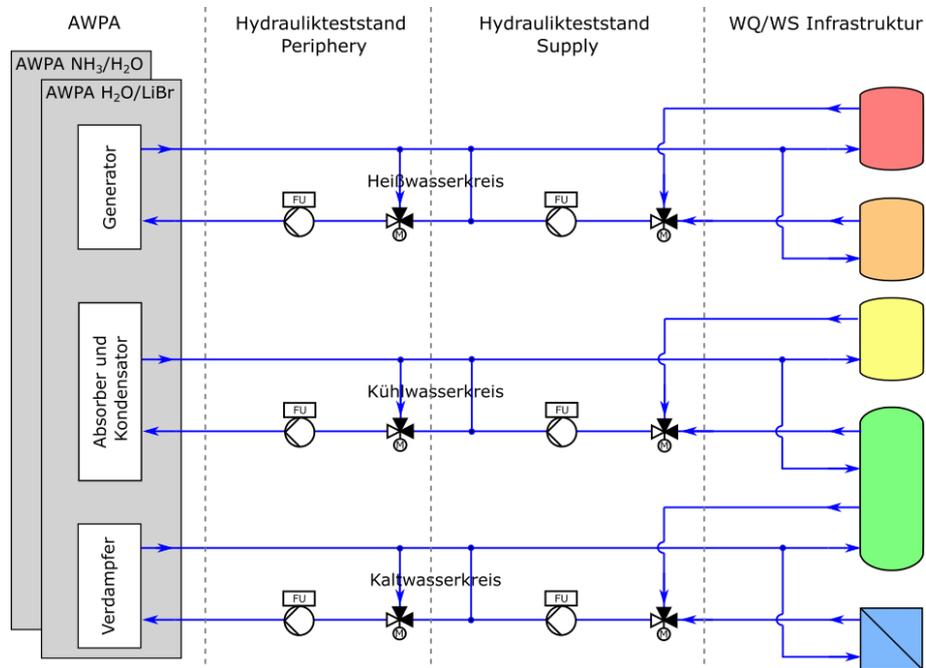


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des AWPA Teststands

Im *AWPA*-Abschnitt sind die beiden *AWPA* so angeschlossen, dass sie mithilfe von Kugelhähnen mit dem Rest des Teststands verbunden werden können, wodurch ein rasches Umschalten zwischen den beiden *AWPA* möglich ist.

Im *Periphery*-Abschnitt werden die Ventile und Pumpen eingesetzt, um Eintrittstemperaturen und Volumenströme, die zu den *AWPA* fließen, einzustellen. Dabei werden die Wassereintrittstemperaturen mit 3-Wege-Mischventilen durch Mischen mit dem Rücklauf auf einen gewünschten Wert geregelt. Über drehzahlgeregelte Pumpen wird das auf die jeweilige Eintrittstemperatur konditionierte Wasser mit den gewünschten Volumenströmen in den jeweiligen Kreisläufen zu den *AWPA* gefördert.

Der *Supply*-Abschnitt verbindet den *Periphery*-Abschnitt mit der *WQ/WS Infrastruktur* und beinhaltet im Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreislauf je ein 3-Wege-Mischventil, eine hydraulische Weiche und eine Pumpe. Jedes dieser Mischventile wird mit Wasser auf zwei unterschiedlichen Temperaturen versorgt. Durch Veränderung der Mischventilstellung, kann eine beliebige Temperatur dazwischen eingestellt werden. Über die drehzahlgeregelte Pumpe der jeweiligen Kreisläufe wird das gemischte Wasser bei den gewünschten Volumenströmen vom *Supply*-Abschnitt zum *Periphery*-Abschnitt gefördert. Damit im *Periphery*- und im *Supply*-Abschnitt unterschiedliche Volumenströme gefördert werden können, sind diese über eine hydraulische Weiche entkoppelt.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In der *WQ/WS-Infrastruktur* wird Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus - entweder durch Speicher oder Wärmeübertrager – bereitgestellt. Durch die Integration von Speichern ist die Durchführung höchst dynamischer Profile mit hohen Lastspitzen möglich.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Temperaturbereiche, in denen der Teststand betrieben wurde, und die maximal möglichen Volumenströme im Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreis zusammengefasst.

Tabelle 1: Temperaturbereiche im Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreis

Messgrößenbezeichnung	T_{min} in °C	T_{max} in °C
Heißwassereintrittstemperatur	65	90
Kühlwassereintrittstemperatur	25	40
Kaltwassereintrittstemperatur	12	20

Tabelle 2: Maximal mögliche Volumenströme am Teststand

Messgrößenbezeichnung	$\dot{V}_{max,EAW}$ in m ³ /h	$\dot{V}_{max,Pink}$ in m ³ /h
Heißwasservolumenstrom	3	2,8
Kühlwasservolumenstrom	12	7,9
Kaltwasservolumenstrom	4,5	2,8

In Abbildung 3 ist der Gesamtaufbau des AWPA-Teststands mit H₂O/LiBr-AWPA, NH₃/H₂O-AWPA, Hydraulikteststand (Periphery und Supply), sowie der Anbindung an die WQWS-Infrastruktur dargestellt.

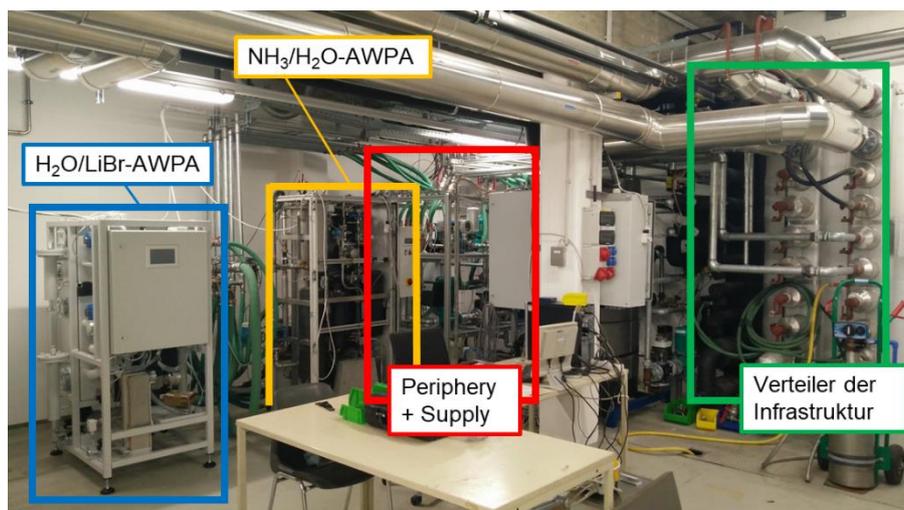


Abbildung 3: Aufbau des AWPA-Teststands

3.1.2 Sensorik

Die AWPA und der Hydraulikteststand (Periphery und Supply) sind mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Beim Versuchsbetrieb dient diese zur Überwachung und zur Regelung der AWPA und des Hydraulikteststands. Die Messdaten werden gespeichert und können in weiterer Folge zur Analyse des jeweiligen Anlagenverhaltens verwendet werden. Die hierfür verwendete Art und Anzahl der Messgeräte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Verwendete Messgeräte

Anzahl	Messgerät
47	Widerstandsthermometer
8	Volumenstrommessgeräte (MID)
3	Massenstrommessgeräte (Coriolis)
4	Drucksensoren
7	Füllstandssensoren
5	El. Energiemengenzähler

Die Messstellen sind dabei so gewählt, dass aus den Messdaten bei stationärem Betrieb der AWPA verschiedene Größen wie Massenanteile, Dichte, Enthalpie oder Dampffizier berechnet werden können. Mit diesen Zustandsgrößen können in weiterer Folge Prozessgrößen, wie Massenströme und Leistungen bestimmt werden. Durch die gemessenen und berechneten Zustands- sowie Prozessgrößen können das gesamte Anlagenverhalten erfasst und Regelungsstrategien entwickelt und bewertet werden.

3.1.2.1 Sensorik in Hydraulikkreisen

Die prinzipielle Anordnung der Messstellen folgt in den Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreisläufen dem gleichen Schema und ist anhand von Abbildung 4 beispielhaft für den Heißwasser-Kreis dargestellt. Die Volumenströme im Periphery-Kreis werden gemessen, während der Volumenstrom im Supply-Kreis basierend auf der Pumpendrehzahl näherungsweise bestimmt wird. Zusätzlich werden alle Temperaturen vor und nach jedem Mischventil im Periphery-Kreis und Supply-Kreis gemessen.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

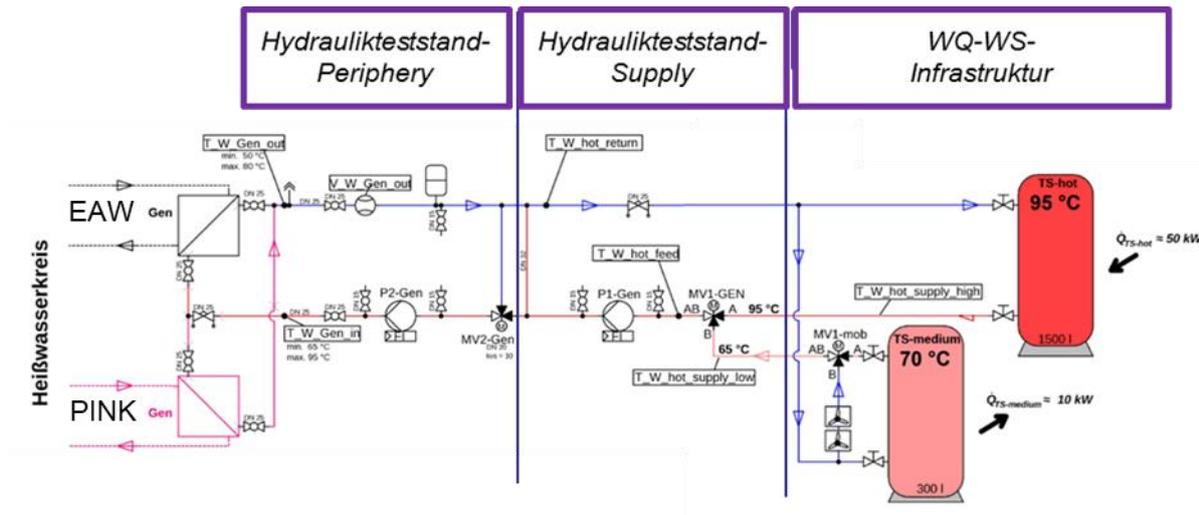


Abbildung 4: Schema des Heißwasser-Kreises mit installierten Messstellen (in Anlehnung an [6])

3.1.2.2 Sensorik in AWPA

Beide AWPA wurden mit umfassender Messtechnik ausgestattet, um einen möglichst umfangreichen Einblick in die Vorgänge innerhalb der AWPA unter verschiedenen Betriebsbedingungen und Lastwechsel zu ermöglichen. Dabei wurden Füllstandssensoren in den Sammelbehältern, jeweils ein Hoch- und ein Niederdrucksensor, Durchflusssensoren für die einzelnen Fluidströme, und Temperatursensoren jeweils zwischen den einzelnen AWPA-Komponenten sowie zum Teil auch in den Sammelbehältern eingesetzt. In Abbildung 5 sind die Messstellen der H₂O/LiBr-AWPA und in Abbildung 6 die Messstellen der NH₃/H₂O-AWPA dargestellt.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

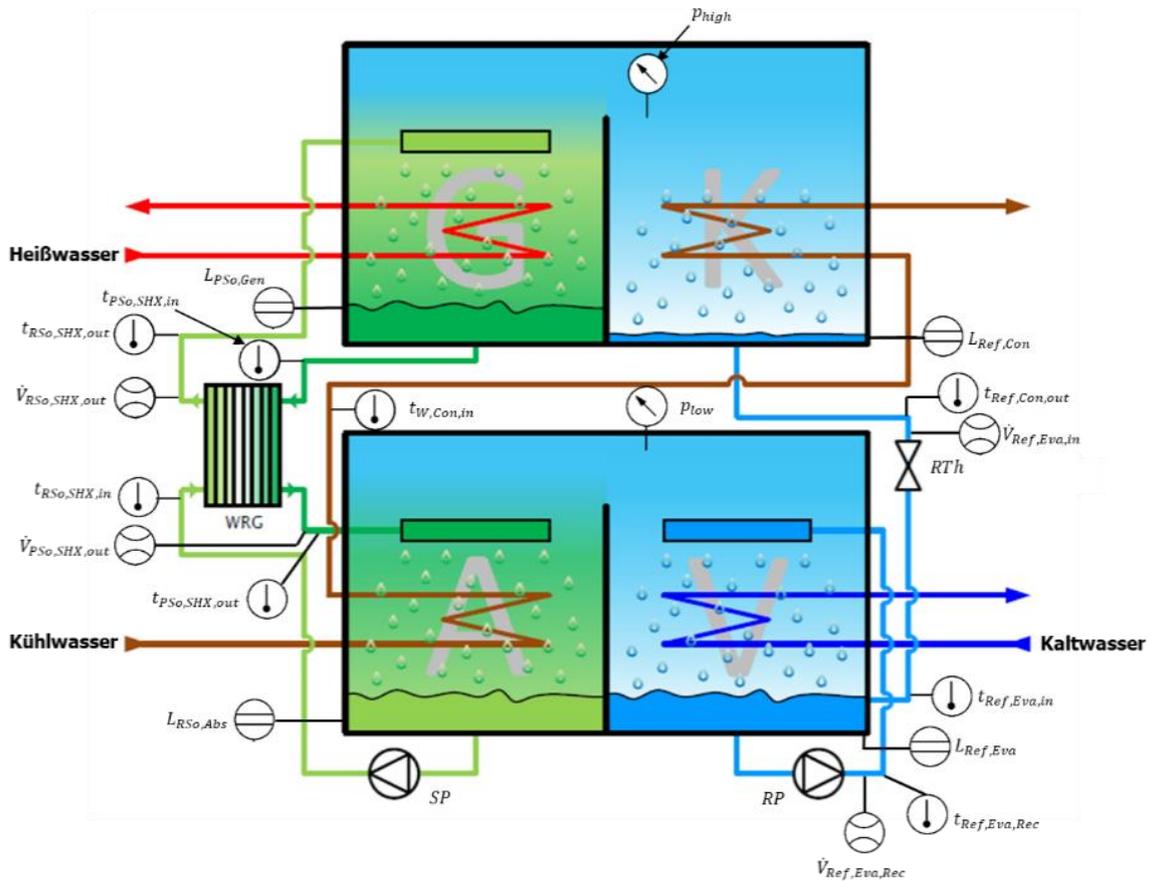


Abbildung 5: Messstellen in der $H_2O/LiBr$ -AWPA, (EAW-AWPA), in Anlehnung an [7]

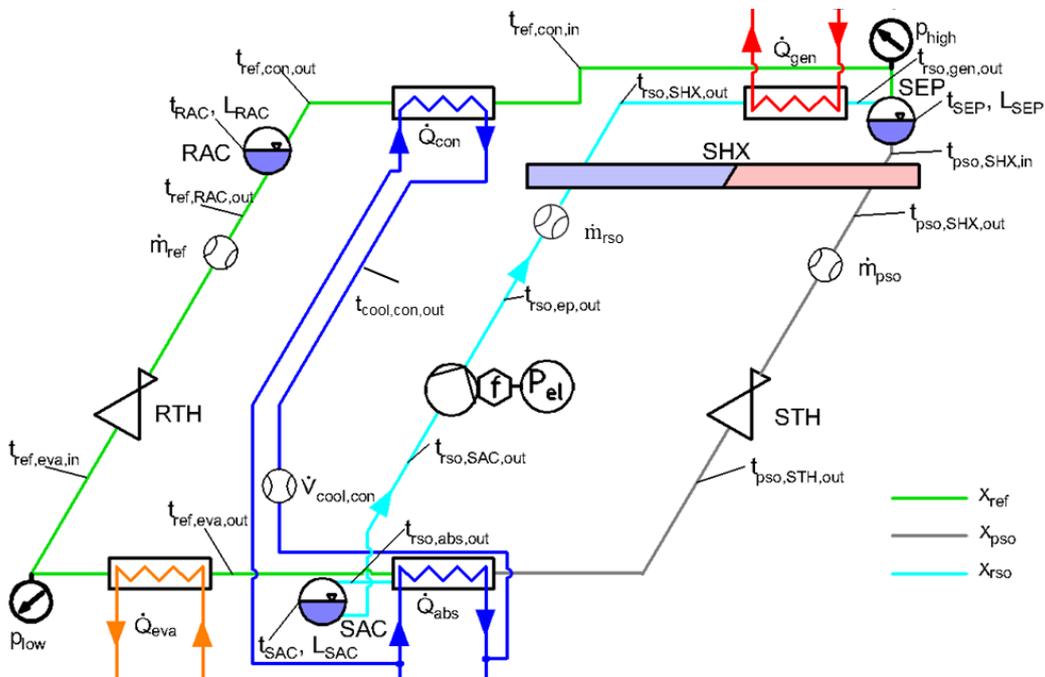


Abbildung 6: Messstellen in der NH_3/H_2O -AWPA (PINK-AWPA), in Anlehnung an [8]

3.1.3 Automatisierungskonzept

Zur gezielten, einfachen und reproduzierbaren Versuchsdurchführung wurde für den Teststand ein leistungsstarkes Automatisierungskonzept erarbeitet. Dies ermöglichte die Durchführung von zahlreichen anspruchsvollen und vielfältigen Versuchen mit vergleichsweise niedrigem Personalaufwand. In der Folge wird zunächst auf das umfangreiche Hardware-Konzept inklusive geeigneter Schnittstellen und daraufhin auf das darauf abgestimmte Software-Konzept eingegangen.

3.1.3.1 Hardwareseitiger Aufbau

Der hardwareseitige Aufbau des Automatisierungskonzeptes ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Herzstück stellt die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) „HPC-SPS“ dar, auf der sämtliche Mess- und Stellsignale verarbeitet und gespeichert werden. Sie ist mittels Signalleitungen mit allen Mess- und Stellgeräten des Hydraulikteststands, sowie den meisten Messgeräten der beiden AWPA verbunden. Weiters ist sie mittels Ethernet-Verbindung mit dem Teststands-PC verbunden, über den die Visualisierung, die Übermittlung von User-Eingaben und die Validierung von Regelungen erfolgen. Schlussendlich ist sie mittels Modbus-Verbindung auch mit den SPSen der beiden AWPA verbunden, über die die internen Stellglieder angesteuert und einige Größen wie etwa die Drücke gemessen werden. Zusätzlich wird durch die Verbindung zu den AWPA-SPSen sichergestellt, dass laufend sicherheitskritische Parameter (z.B. Hochdruck bei NH₃/H₂O-AWPA und Temperatur der armen Lösung bei H₂O/LiBr-AWPA) überprüft werden und die AWPA im Notfall automatisch abgeschaltet werden können. Vom Messrechner aus kann zusätzlich via VPN-Verbindung auf die Regelung und Visualisierung der WQ/WS-Infrastruktur (inkl. Zusätzlicher SPSen „IWT-SPS“ und „Infra-SPS“ zugegriffen werden, um beispielsweise Speichertemperaturen einzustellen.

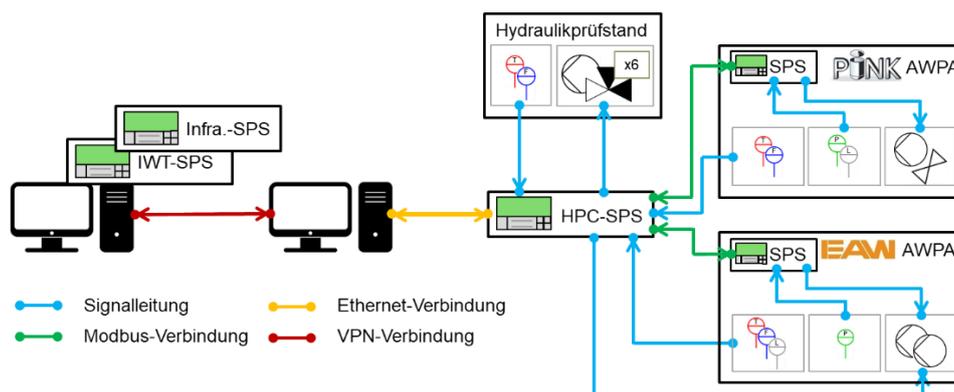


Abbildung 7: Hardwareseitiger Aufbau der Teststands-Automatisierung

3.1.3.2 Softwareseitiger Aufbau

Der für HPC entwickelte softwareseitige Aufbau lässt sich in drei Teile gliedern:

- Mess- und Steuersoftware auf der HPC-SPS,

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Visualisierungssoftware, auf dem Teststand-PC und
- Simulationssoftware für Reglertests und Hardware-in-the-Loop-Konfigurationen, ebenfalls auf dem Teststand-PC.

Die Hauptsoftware auf der HPC-SPS ermöglicht

- Synchroner Messdatenerfassung und Stellsignalausgabe im Sekundentakt
- Regelung und Steuerung aller Stellglieder am Teststand (PI-Regler zur Regelung von Temperaturen und Durchflüssen durch Vorgabe von Ventilstellungen und Pumpendrehzahlen für Hydraulikteststand und AWPA)
- Sicherheitsüberprüfungen um Schäden durch Einfrieren, Kristallisation und/oder Überhitzen zu verhindern
- Datenaufzeichnung von Messwerten, Stellgrößen, Reglerparametern und Warnungen (insgesamt ca. 250 Werte/s, unterbrechungsfrei und ausfallsicher auf HPC-SPS gespeichert)
- Kommunikation mit AWPA-SPSen via Modbus
- Kommunikation mit Teststands-PC via Ethernet-Verbindung

Die Visualisierungssoftware (GUI) auf dem Teststand-PC wurde speziell auf die Anforderungen im Rahmen des Projekts HPC zugeschnitten, um eine möglichst einfache Versuchsdurchführung zu ermöglichen. Mit Hilfe dieses Programms werden die Messdaten visualisiert und die Einstellungen für die Versuchsdurchführung eingegeben und an die HPC-SPS geschickt. Abbildung 8 zeigt einen Screenshot der GUI für das Übersichtsschema des Teststands während einer Versuchsdurchführung.

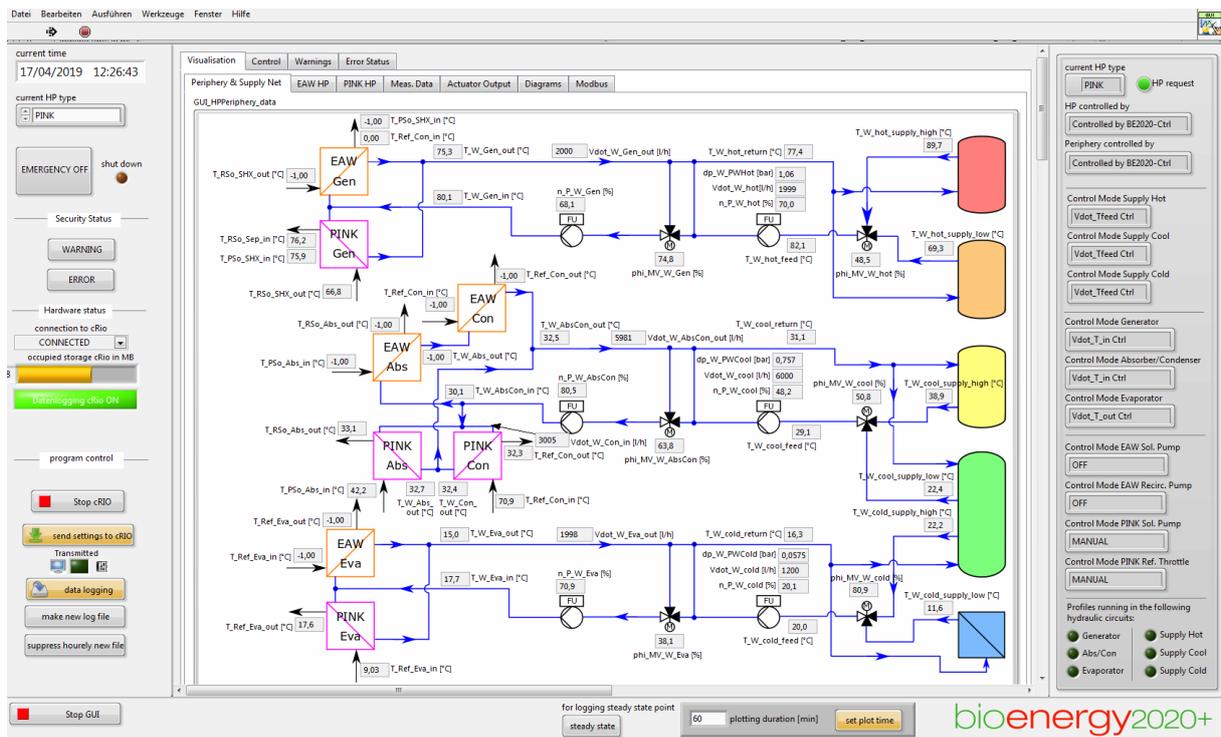


Abbildung 8: Übersichtsschema des Teststands im GUI

Die Simulationssoftware auf dem Teststand-PC kann zusätzlich eingesetzt werden, um einerseits verschiedene AWPA-Regler (PI-Regler, modellbasierte Mehrgrößen-Regler) am Teststand zu testen und zu validieren sowie, um das dynamische Verhalten verschiedener Gesamtsysteme, in die die AWPA virtuell eingebunden werden können, zu emulieren und somit die AWPA in einer Hardware-in-the-Loop-Konfiguration zu untersuchen. Damit werden die Eingangsgrößen vom Simulationsmodell vorgegeben und am Teststand umgesetzt. Details zu dieser Betriebsart folgen in Abschnitt 3.1.4.5.

3.1.4 Mögliche Betriebsarten

Der hydraulische Aufbau, die verwendeten Aktuatoren und das umfangreiche Automatisierungskonzept ermöglichen eine Vielzahl verschiedener Betriebsarten, die in weiterer Folge kurz vorgestellt werden.

3.1.4.1 Vorgabe von Pumpendrehzahl und Ventilstellung in externen Hydraulikkreisen

Im einfachsten Fall können die einzelnen Pumpen und Ventile so angesteuert werden, dass jeweils die Drehzahl bzw. die Ventilstellung eingestellt werden. Dies kann für alle 6 Pumpen und 3-Wege-Mischventile des Hydraulik-Teststandes unabhängig voneinander vorgegeben werden.

3.1.4.2 Vorgabe von Volumenströmen und Ein-/Austrittstemperaturen in externen Hydraulikkreisen

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Volumenströme und/oder Ein- oder Austrittstemperaturen in den drei Hydraulikkreisen vorzugeben, welche dann durch PI-Regler umgesetzt werden. Die Vorgabe dieser Regelgrößen kann beliebig kombiniert werden (auch mit der Vorgabe von Pumpendrehzahl oder Ventilstellung aus Abschnitt 3.1.4.1), solange zwei Regler nicht auf dasselbe Stellglied zugreifen (im Periphery-Abschnitt kann beispielsweise im selben Hydraulikkreis nicht Ein- und Austrittstemperatur gleichzeitig geregelt werden).

3.1.4.3 Vorgabe von Profilen

In diesem Betriebsmodus können zeitliche Verläufe für Volumenströme und Eintrittstemperaturen aus „.csv“-Dateien vorgegeben werden, was zum einen die automatisierte Versuchsdurchführung erleichtert und zum anderen die experimentelle Untersuchung von prinzipiell beliebig komplexen Lastfällen auf reproduzierbare Art und Weise ermöglicht. Die Sollwerte werden dann mit den in Abschnitt 3.1.4.2 beschriebenen PI-Reglern am Teststand umgesetzt.

3.1.4.4 Betrieb der „inneren“ Stellglieder

Die inneren Stellglieder der AWPA (Lösungsmittel bzw. Kältemittelpumpe und Kältemitteldrossel) können wiederum auf verschiedene Arten genutzt werden:

- Lösungsmittelpumpe :
 - Betrieb bei fester Drehzahl oder

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- als Stellglied für PI-Regler zur Regelung des Lösungsdurchflusses
- Kältemitteldrossel (nur bei NH₃/H₂O-AWPA als Stellglied nutzbar):
 - Betrieb bei fester Ventilöffnung oder
 - als Stellglied für PI-Regler zur Regelung des Temperaturgleits im Verdampfer (Temperaturdifferenz des Kältemittels zwischen Ein- und Austritt)

3.1.4.5 Betrieb in Hardware-in-the-Loop-Konfiguration

Als letzte Betriebsart ist der Betrieb der AWPA in einer Hardware-in-the-Loop (HiL)-Konfiguration zu nennen. Hierbei wird der Hydraulikteststand mit einem Simulink-Modell (vgl. Abschnitt 3.1.3.2) gekoppelt, in dem das dynamische Verhalten vorgegebener Systeme (z.B. eine Konfiguration für „Solares Kühlen“ oder „Gasbefeuerte AWPA“) emuliert wird. Durch diese Kopplung kann die Interaktion zwischen AWPA, AWPA-Regelung und dem Rest des Systems untersucht werden. Der schematische Aufbau einer solchen HiL-Konfiguration ist in Abbildung 9 für die Konfiguration „Solares Kühlen“ dargestellt. Dabei ist der AWPA-Teststand einerseits über eine Schnittstelle mit einem AWPA-Regler verbunden, über die gemessene Regel- und Störgrößen vom Teststand an den Regler und Vorgaben für Stellgrößen vom Regler im Sekundentakt an den Teststand geschickt werden. Andererseits ist der Teststand über eine Schnittstelle mit dem Simulationsmodell des restlichen Systems verbunden, über die wiederum gemessene Regel- und Stellgrößen vom Teststand an das Simulationsmodell und Vorgaben für Störgrößen vom Simulationsmodell an den Teststand geschickt werden. Dem Simulationsmodell werden Profile für Umwelteinflüsse wie z.B. Umgebungstemperatur, Solarstrahlung etc. vorgegeben.

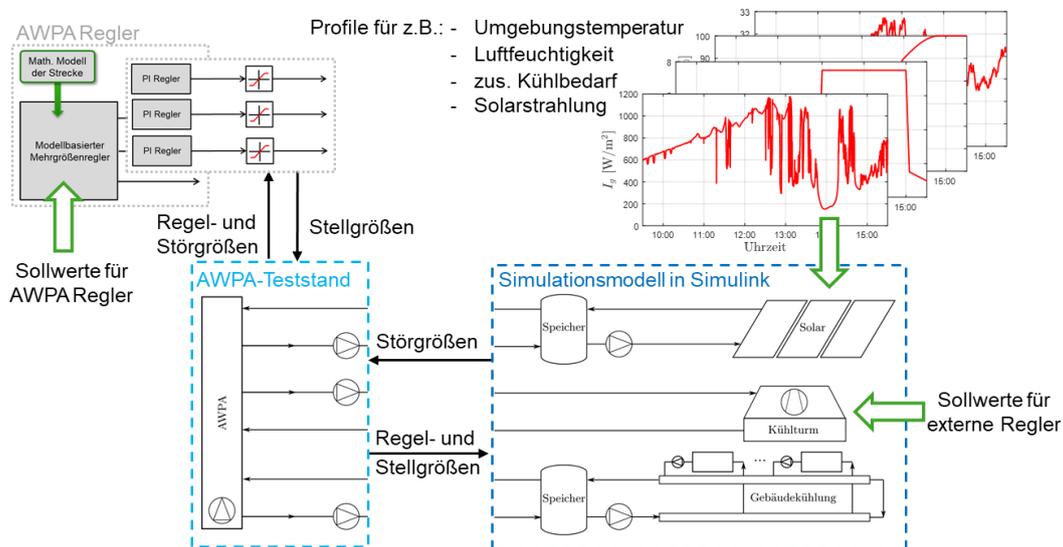


Abbildung 9: Beispielhafter Aufbau der HiL-Konfiguration "Solares Kühlen"

Im Gegensatz zur Vorgabe von Profilen, wie in Abschnitt 3.1.4.3 beschrieben, wirken sich bei der HiL-Konfiguration auch die Ausgangsgrößen (z.B. Austrittstemperaturen) zeitverzögert wieder auf die AWPA aus. Darüber hinaus ist es mit der HiL-Konfiguration sehr einfach möglich, realistische Lastfälle und Variantenstudien (z.B. versch. Speichergößen) zu

generieren, ohne auf reale Messdaten zurückgreifen zu müssen. So kann z.B. bei Untersuchung eines Systems mit Heißwasserspeicher sehr schnell untersucht werden, wie sich unterschiedliche Speichergrößen auf die auf die AWPA wirkenden Störgrößen auswirken, indem einfach der Parameter „Speichergröße“ des Speichermodells variiert wird.

3.2 Simulationsmodelle für AWPA

Die AWPA sind zur Analyse des zeitlich veränderlichen, dynamischen Verhaltens in der Modellierungssprache „Modelica“ [9] unter Verwendung der „TIL-Suite“ [10] in „Dynamic Modeling Laboratory (Dymola)“ [2] modelliert worden. Jede Komponente der realen AWPA wird durch ein Komponentenmodell im Simulationsmodell dargestellt. Um das Verhalten der realen AWPA nachzubilden, wurden die virtuellen Komponentenmodelle entsprechend ihrer physikalischen Gegenstücke modelliert und parametrisiert. Die Verbindungen der Komponentenmodelle sind an die Schaltungsstruktur der realen AWPA angenähert und ermöglichen den Austausch von prozessspezifischen Informationen (z.B. thermodynamische Eigenschaften, Massenströme, etc.). Dadurch können in jedem Komponentenmodell zum Beispiel zeitabhängige Abweichungen von intensiven und extensiven Zustandsgrößen (z.B. Temperatur, Dampfziffer, Enthalpie, etc.), sowie von Transporteigenschaften (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Viskosität, etc.) und von Prozessgrößen (z.B. Wärmeströme, Arbeit) berechnet werden. Auf Basis der instationären Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften und des kontinuierlichen Informationsaustausches zwischen den Komponentenmodellen wird der Kreislauf der AWPA dynamisch simuliert.

Im Folgenden werden die Simulationsmodelle der NH₃/H₂O-AWPA (PINK-AWPA) und der H₂O/LiBr-AWPA (EAW-AWPA) näher beschrieben.

3.2.1 PINK-AWPA (NH₃/H₂O)

Das Simulationsmodell der PINK-AWPA ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ermöglicht die dynamische Simulation durch Vorgabe der Heiß-, Kühl- und Kaltwassereintrittstemperaturen, der Volumen- bzw. Massenströme in den Wasserkreisen sowie des Lösungsmittelvolumen- bzw. -massenstroms und des Soll-Temperaturgleits im Verdampfer. Die Parametrierung der Komponentenmodelle erfolgte auf Basis der geometrischen Eigenschaften der realen Komponenten. Zur detaillierten dynamischen Berechnung der Wärmeübertrager sind Formulierungen zur Berechnung der Transportgrößen des NH₃/H₂O-Gemischs und zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten basierend auf Nußelt-Ansätzen implementiert worden. Im Folgenden sind die Komponentenmodelle, die verwendeten Stoffdaten sowie die Formulierungen zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten näher erläutert.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

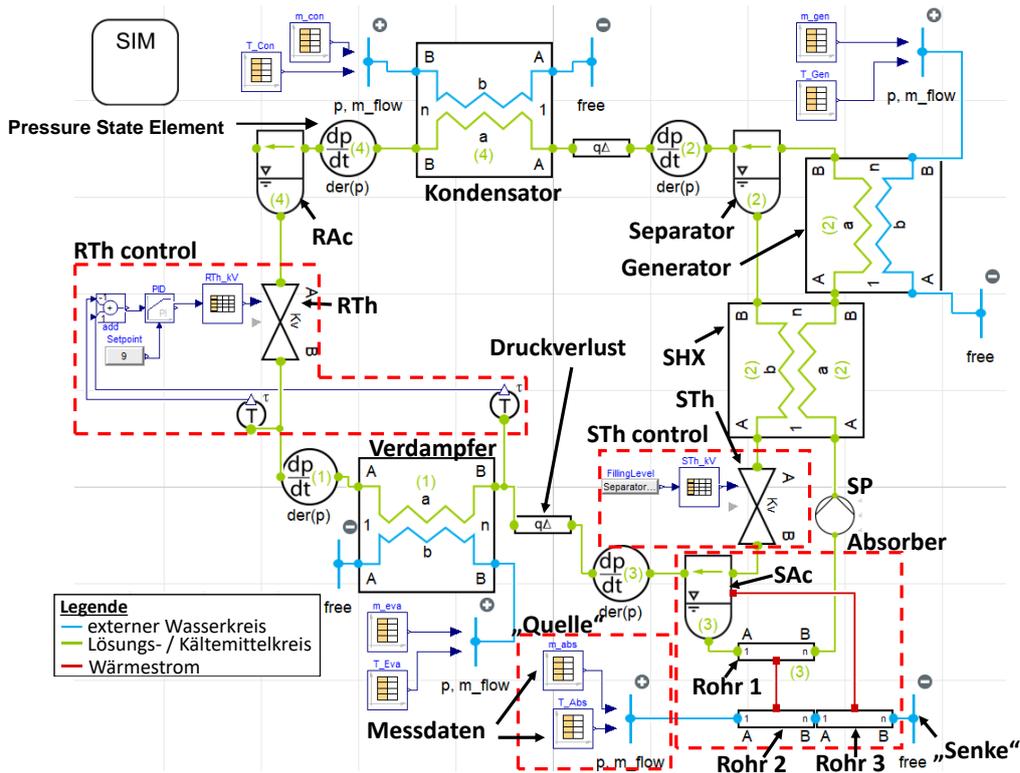


Abbildung 10: Simulationsmodell der NH₃/H₂O-AWPA [23] (Legende: RAc... Kältemittelsammelbehälter, RTh ... Kältemitteldrossel, SAc ... Lösungsmittelsammelbehälter, SHX ... Lösungsmittelwärmeübertrager SP... Lösungsmittelpumpe, STh ... Lösungsmitteldrossel)

3.2.1.1 Komponentenmodelle

Quellen und -senken

Im Simulationsmodell werden die Quellen und Senken als Eintritt und Austritt verwendet, die mit Wasser durchströmt werden. Die Quellen und Senken im Simulationsmodell werden im Folgenden am Beispiel des Eintritts und Austritts der Wärmesenke des Absorbers beschrieben. Dem Eintritt der Wärmesenke („Quelle“ in Abbildung 10) wird eine Temperatur, ein Massenstrom sowie der Druck des Wassers vorgegeben. Danach strömt das „austretende“ Wasser durch einen Wärmeübertrager in die Wärmesenke („Senke“ in Abbildung 10). Dem Eintritt der Wärmesenke können über Tabellen, zeitlich veränderliche Absorbereintrittstemperaturen und -massenströme z.B. aus Messdaten vorgegeben werden.

Wärmeübertrager

Die Wärmeübertrager (z. B. „Generator“ in Abbildung 10) sind als Plattenwärmeübertrager modelliert. In diesen wird die Wärmeübertragung auf Basis von Wärmeübergangs- und Wärmeleitkoeffizienten berechnet. Die Wärmeübertrager sind anhand der geometrischen Daten aus Herstellerinformationen parametrisiert worden.

Sammelbehälter

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Sammelbehälter (z. B. „Separator“ in Abbildung 10) ermöglichen die Berechnung von Füllstandsänderungen und die Berücksichtigung der Trennung von Lösung und Kältemittel. Der Lösungsmittelsammelbehälter („SAC“ in Abbildung 10) fungiert nicht nur als Sammelbehälter, sondern auch als Absorber. Dies ist eine Abstraktion der Realität, da kein geeignetes Dymola-Modell vorhanden ist. Um die Abfuhr der Kondensations- und der Lösungswärme abzubilden, wird der Lösungsmittelsammelbehälter („SAC“) von einem mit Wasser durchströmten Rohr („Rohr 3“ in Abbildung 10) gekühlt. Die Anreicherung des Lösungsmittels mit Kältemittel erfolgt bei realen AWPA nicht ideal und führt zu einer Unterkühlung der reichen Lösung. Um diese im Simulationsmodell nachzubilden, wird dem „Rohr 3“ in Abbildung 10, welches den Lösungsmittelsammelbehälter („SAC“) kühlt, „Rohr 2“ in Abbildung 10 vorgeschaltet. Dem „Rohr 2“ werden über den Eintritt der Wärmesenke die Kühlwassereintrittstemperatur und der Kühlwassermassenstrom vorgegeben. Das Kühlwasser unterkühlt die, aus dem Lösungsmittelsammelbehälter („SAC“) austretende und durch „Rohr 1“ in Abbildung 10 strömende, reiche Lösung und erwärmt sich dabei. Danach fließt das erwärmte Kühlwasser durch „Rohr 3“ in die Senke (siehe Abbildung 10). Das Rohr 3“ bestimmt durch seine Temperatur und den im Lösungsmittelsammelbehälter („SAC“) vorliegenden Druck im Sammelbehälter den Kältemittel-Anteil in der reichen Lösung.

Drosseln

Der Öffnungsgrad der Kältemitteldrossel ("RTh" in Abbildung 10) wird von einem PI-Regler geregelt, um einen vorgegebenen Temperaturgleit des Kältemittels im Verdampfer zu gewährleisten. Die Regelparameter des virtuellen PI-Reglers wurden den Herstellerangaben entnommen. Um das Verhalten der realen Kältemitteldrossel nachzubilden, wurden die kv-Werte für jede Drosselposition auf der Grundlage des kvs-Wertes der Drossel bestimmt, der in deren Datenblatt angegeben ist. Bei der Simulation werden die Kältemittelmassenströme auf Basis des kv-Wertes gemäß der DIN EN 60534-2-1 [11] berechnet.

Der Öffnungsgrad der Lösungsmitteldrossel ("STh" in Abbildung 10) der realen AWPA wird mechanisch über ein Schwimmerventil im Separator geregelt. Um die Regelung nachzubilden, wurde eine Durchflusskennlinie der realen Drossel den Angaben des Anlagenherstellers entnommen und im Modell implementiert.

Pressure State Elements

In den Pressure State Elements wird der Sättigungsdruck des Kältemittels bei gegebener Konzentration und Temperatur berechnet. Die zeitliche Änderung des jeweilig berechneten Drucks, wird den zugewiesenen Komponentenmodellen übergeben und zur Lösung der Energiegleichungen und der Massenbilanzen verwendet. Sie stellen ein numerisches Hilfsmittel dar, welches die Berechnung von Druckänderungen an bestimmten Punkten anstatt in jeder Komponente ermöglicht.

Druckverluste

Zur Berücksichtigung von Druckverlusten, die zwischen den einzelnen Komponenten der realen Anlage auftreten, sind Druckverlustmodelle im Simulationsmodell berücksichtigt worden.

3.2.1.2 Stoffdaten

Die Berechnung der Zustandsgrößen und der Transporteigenschaften der Wasserkreisläufe in TIL-Suite [10] basiert auf den in [12] angegebenen Formeln. Die Berechnung der Zustandsgrößen des NH₃/H₂O-Gemisches basiert auf den in [13] angegebenen Formeln. Damit die Wärmeübertragung in den Plattenwärmeübertragern nicht nur in Abhängigkeit von Temperaturunterschieden, sondern auch in Abhängigkeit der sich ändernden Stoffeigenschaften der Lösung sowie in Abhängigkeit der Lösungsmittelmassenströme über zeitlich veränderliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnet werden kann, sind die Formulierungen zur Berechnung der Transportgrößen nach [14] implementiert worden.

3.2.1.3 Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) basiert auf der Formulierung von [15]. Für die Berechnung der WÜK während der Verdampfung wird die Nusselt-Korrelation von [16] verwendet. Für die Berechnung der WÜK bei der Kondensation wird die Nusselt-Korrelation von [17] verwendet. Für die Berechnung der WÜK des flüssigen NH₃/H₂O-Gemisches wird die Nusselt-Korrelation von [18] verwendet. Für die Verdampfung des NH₃/H₂O-Gemischs mit hohem NH₃-Massenanteil im Generator wird die Korrelation von [19] verwendet, um die Korrelation von [18] zu erweitern. Nach [20] kann die Korrelation von [19] für NH₃-Massenfraktionen von 0,42 bis 0,62 verwendet werden. Die Korrelationen zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten von Wasser sind in TIL-Suite [10] implementiert und basieren auf den im VDI-Wärmeatlas [21] enthaltenen Formulierungen.

3.2.2 **EAW-AWPA (H₂O/LiBr)**

Das Simulationsmodell der EAW-AWPA ist in Abbildung 11 dargestellt. Es ermöglicht die dynamische Simulation durch Vorgabe der Heiß-, Kühl- und Kaltwassereintrittstemperaturen, der Massenströme in den Wasserkreisen sowie des Lösungs- und Kältemittelvolumenstroms. Zur Berechnung der Zustandsgrößen des H₂O/LiBr-Gemischs sind die Stoffdatenroutinen von [22] in Dymola [2] implementiert worden. Durch die Einbindung der Bernoulli-Druckgleichung, können strömungsbedingte Druckänderungen im Kältemittelkreis berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die Komponentenmodelle, die verwendeten Stoffdaten, die Berechnung der Wärmeübertragung sowie die Verwendung der Druckgleichung erläutert.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

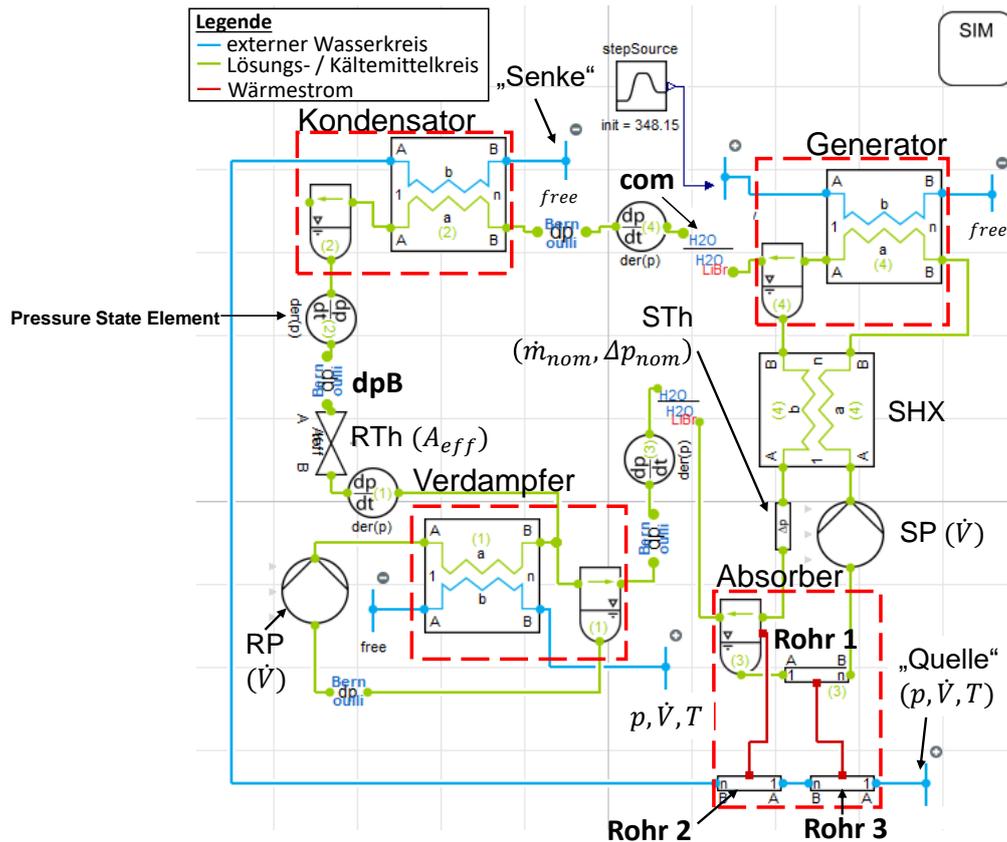


Abbildung 11: Simulationsmodell der H₂O/LiBr-AWPA [23]

(Legende: com... Kommunikationsmodell, dpB... Differenzdruckberechnung, RP... Kältemittelpumpe, RTh ... Kältemitteldrossel, SAc ... Lösungsmittelsammelbehälter, SHX ... Lösungsmittelwärmeübertrager SP... Lösungsmittelpumpe, STh ... Lösungsmitteldrossel)Reglerentwurf für AWPA

3.2.2.1 Komponentenmodelle

Die verwendeten Modelle ähneln den Modellen der PINK-AWPA, weswegen im Folgenden nur die Unterschiede beschrieben werden.

Wärmeübertrager

Um das dynamische Verhalten der Wärmeübertrager der EAW-AWPA abbilden zu können, sind die thermischen Massen in der Anlage anhand von Sprungversuchen ermittelt worden. Die hierfür gewählte Methodik soll am Beispiel eines Sprungversuchs im Generator (siehe Abbildung 12) erklärt werden.

Durch einen Temperatursprung im Generator ist das dynamische Verhalten der Temperaturen in den Wasserkreisen sowie der Temperaturen und der daraus resultierenden Leistungen im Generator ermittelt worden. Anhand der gesamten übertragenen Wärme während des instationären Betriebs sowie der Füllstände im Generator, konnte die Wärme, welche für die Erhitzung des Fluids und letzten Endes für die Erhitzung des Generator-Wärmeübertragers benötigt werden, ermittelt werden. Die Masse des Generators ist in weiterer Folge auf Basis

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

der Temperaturänderung im Generator (in Abbildung 12 als „ ΔT_{HX} “ bezeichnet) ($\Delta T_{HX} = t_{PSO,Gen,out,\tau=3000} - t_{PSO,Gen,out,\tau=1000}$) berechnet worden (siehe Gleichung (1)).

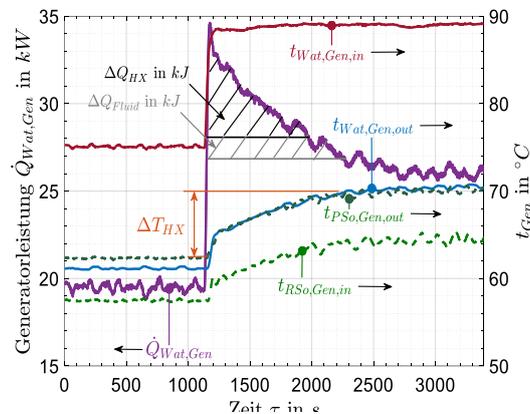


Abbildung 12: Methodik zur Ermittlung der Wärmeübertrager-Massen

$$m_{Gen} = \frac{\Delta Q_{HX}}{c_{p,copper} \cdot \Delta T_{HX}} \quad (1)$$

Drosseln

Die Kältemitteldrossel („RTh“ in Abbildung 11) und die Lösungsmitteldrossel („STh“ in Abbildung 11) sind wie bei der realen Absorptionskälteanlage einfache Querschnittsverengungen. Der Massenstrom durch die Kältemitteldrossel („RTh“ in Abbildung 11) wird gemäß DIN EN 60534-2-1 [11] berechnet. Wie bei der realen Anlage, hat die Kältemitteldrossel einen konstanten Querschnitt. Der Druckverlust über die Lösungsmitteldrossel wird in der Simulation über Druckverlustbeiwerte berechnet.

3.2.2.2 Stoffdaten

Die Berechnung der Zustandsgrößen und der Transporteigenschaften der Wasserkreisläufe in TIL-Suite [10] basiert auf den von [12] entwickelten Formeln. Zur Berechnung des H₂O/LiBr-Kreislaufs in Dymola [2] ist eine Stoffdatenroutine zur Berechnung der zeitlich veränderlichen Zustandsgrößen in den modellierten Komponenten implementiert worden. Hierfür wurden unterschiedliche Stoffdatenroutinen untersucht und verglichen. Die Wahl fiel auf die Stoffdatenroutine von [22]. Der Grund hierfür ist, neben der kurzen Berechnungsdauer, die Berechnung der Zustandsgrößen als Ableitung von der Gibbs-Enthalpie. Durch diese Formulierung ist eine hohe Konsistenz der einzelnen Zustandsgrößen gewährleistet. Während der Simulation wird auf die Stoffdatenmodelle, die eine Berechnung auf Basis von unterschiedlichen Kombinationen aus Druck, Temperatur, Massenanteil, Enthalpie ermöglichen, zugegriffen. Damit das Anlagenverhalten im Simulationsmodell basierend auf zwei unterschiedlichen Stoffdatenroutinen (H₂O im Kältemittelkreis und H₂O/LiBr im Lösungsmittelkreis) simuliert werden kann, sind Modelle entwickelt worden („com“ in Abbildung 11), die eine Kommunikation zwischen den beiden Stoffdatenroutinen ermöglichen.

3.2.2.3 Wärmeübertragung

Zur Ermittlung von Zustandsänderungen in den Komponentenmodellen, muss die Leistung der Wärmeübertrager berechnet werden. Im Simulationsmodell werden konstante UA-Werte zur Berechnung der Wärmeübertrager-Leistungen verwendet. Hierfür sind, unter Vernachlässigung von Wärmekapazitätsänderungen, die UA-Werte der Wärmeübertrager aus Messdaten eines stationären Betriebspunkts berechnet worden und in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: UA-Werte der Wärmeübertrager in $\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}$

Wärmeübertrager	UA-Wert
Generator	3,5
Kondensator	12
Verdampfer	10
Absorber	4,5
SHX	0,75

3.2.2.4 Druckänderungen

Aufgrund der geringen Drucklage haben strömungsbedingte Druckänderungen (z. B. Druckerhöhung durch hydrostatischen Druck oder Druckminderung durch Querschnittsverengungen) einen großen Einfluss auf den Kälteprozess in der EAW-AWPA. Um die Änderungen der Stoffzustände aufgrund des Drucks zu berücksichtigen, ist die bernoullische Druckgleichung implementiert worden. Die Druckgleichung wird in zugehörigen Modellen („dpB“ in Abbildung 11) berücksichtigt.

3.3 Reglerentwurf für AWPA

Wie bereits einleitend erläutert (siehe Abschnitt 2), werden AWPA aktuell meist als Grundlastmaschinen nahe ihres Auslegungspunktes betrieben. Um ihr Potential jedoch voll auszuschöpfen, war eines der Ziele des Projektes HPC, eine Regelung zu entwickeln, die den Betrieb von AWPA auch unter stark variierenden Betriebsbedingungen abseits des Auslegungspunktes ermöglicht. Hierbei ist anzumerken, dass AWPA prinzipiell problemlos auch ohne neue Regelungsstrategien in starker Teillast, also bei stark reduzierter Leistung, betrieben werden können. Möchte man dies aber gezielt regeln und z.B. auch Sollwerte für verschiedene Austrittstemperaturen einhalten, stoßen herkömmliche Regelungen oft an ihre Grenzen. Ein vielversprechender Ansatz, um einen gezielt regelbaren Teillastbetrieb zu ermöglichen, ist die Verwendung von modellbasierten Regelungen, insbesondere von modellbasierten Mehrgrößen-Regelungen, deren Entwicklung eines der Ziele in HPC war.

Modellbasierte Regelungen sind fortschrittliche Regelungskonzepte, bei denen ein Modell des zu regelnden Systems für den Reglerentwurf verwendet wird. Damit steht dem Regler „Wissen“ über das zu regelnde System zu Verfügung, was vielfältige Vorteile gegenüber herkömmlichen Reglern wie PI-Reglern bietet. So beinhalten diese sogenannten Reglerentwurfsmodelle beispielsweise Informationen über Verkopplungen zwischen Stell-,

Stör-, Zustands- und Regelgrößen und können außerdem beschreiben, wie schnell verschiedene Änderungen sich im System auswirken. Je nach Regelungsmethode wird das Reglerentwurfsmodell entweder nur im Reglerentwurf zur Berechnung von Reglerparametern verwendet oder es kommt auch in Form von mathematischen Gleichungen direkt im Regelalgorithmus im Betrieb zum Einsatz. Modellbasierte Mehrgrößen-Regler verfügen darüber hinaus über die Möglichkeit, bei Systemen mit mehreren Regelgrößen (wie es auch meist bei AWPA der Fall ist) alle Regelgrößen gemeinsam zu regeln. Einige Regelungsmethoden ermöglichen dabei auch den Einsatz von mehr Stell- als Regelgrößen, wodurch der Stellbereich erweitert werden kann.

In HPC wurden verschiedene Regelungsmethoden für AWPA untersucht und zwei modellbasierte Mehrgrößen-Regler entwickelt, die in der Folge vorgestellt werden. Zunächst wird in Abschnitt 3.3.1 die Motivation für die Verwendung von modellbasierten Mehrgrößen-Reglern für AWPA genauer diskutiert. In Abschnitt 3.3.2 wird daraufhin der Aufbau der entwickelten Reglerentwurfsmodelle beschrieben und schlussendlich in Abschnitt 3.3.3 die beiden neuen modellbasierten Mehrgrößen-Regelungen vorgestellt.

Bei der Entwicklung der Reglerentwurfsmodelle und der modellbasierten Regler hat sich gezeigt, dass trotz einiger Unterschiede zwischen H₂O/LiBr- und NH₃/H₂O-AWPA (z.B. unterschiedliche Arbeitsstoffpaare, unterschiedliche Druckbereiche, unterschiedliche Wärmeübertrager-Bauformen, starre vs. regelbare Drossel, unterschiedliche Anzahl an Sammelbehältern), beide Anlagen prinzipiell mit einem Modell derselben Struktur beschrieben werden können und auch dieselben Regelungsmethoden zum Einsatz kommen können. In der Folge werden die regelungstechnischen Entwicklungen in HPC deshalb nicht einzeln für die H₂O/LiBr- und NH₃/H₂O-AWPA getrennt, sondern ganzheitlich für beide gemeinsam beschrieben. Wenn Unterschiede bzgl. des AWPA-Typs in den entwickelten Modellen und Reglern bestehen, wird explizit darauf hingewiesen.

3.3.1 Motivation und Vorteile von modellbasierten Mehrgrößen-Reglern für AWPA

Um die Motivation für die Verwendung von modellbasierten Mehrgrößen-Reglern für AWPA und das Grundprinzip dahinter zu erläutern, soll zunächst die Regelung von AWPA mithilfe einfacher Einzel-PI-Regler diskutiert werden. In Abbildung 13 sind zwei Regelkreise dargestellt, in denen jeweils ein PI-Regler eine Regelgröße mithilfe einer Stellgröße regelt (hier beispielhaft die Austrittstemperaturen in Heiß- und Kaltwasserkreis als Regelgrößen mithilfe der Volumenströme als Stellgrößen). Solange die AWPA in der Nähe des Auslegungspunkts betrieben wird und die Auswirkungen der Störgrößen (beispielsweise variierende Eintrittstemperaturen) klein sind, können beide Regelgrößen gut gehalten werden. Wenn die Auswirkungen der Störgrößen jedoch größer werden, wie es auch bei Teillast der Fall ist (z.B. sinkende Kühlwassereintrittstemperatur), können Situationen auftreten, in denen ein Regler (in Abbildung 13 der erste Regler) eine Stellgröße fordert, die außerhalb des möglichen Bereichs liegt und somit nicht von der AWPA umgesetzt werden kann („Stellgrößenbeschränkung“). Die Folge daraus ist, dass die Regelgröße nicht mehr gehalten

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

werden kann und unabhängig von der vom Regler geforderten Stellgröße variiert, was zu einem Verlust der Regelbarkeit führt.

Prinzipiell könnte man die zweite Stellgröße nun so variieren, dass die Abweichung der ersten Regelgröße einerseits kleiner und andererseits wieder beeinflussbar wird. Dieses bewusste Nutzen der Verkopplungen zwischen den beiden Stell- und Regelgrößen kann bei Verwendung von Eingrößen-Reglern jedoch nicht genutzt werden.

Konventionelle Regelung mit Einzel-PI-Reglern

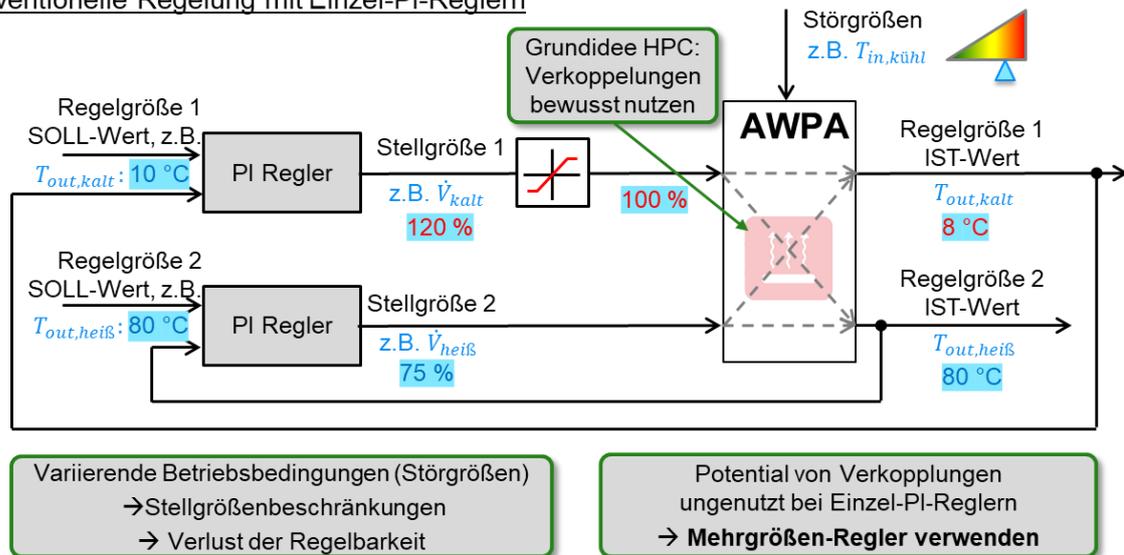


Abbildung 13: Regelung von AWPA unter starker Störgrößeneinwirkung mit Einzel-PI-Reglern

Verwendet man nun statt der beiden Einzel-PI-Regler einen modellbasierten Mehrgrößen-Regler, können diese Verkopplungen bewusst genutzt werden und im gegenständlichen Beispiel die zweite Stellgröße auch dafür eingesetzt werden, den Regelfehler in der ersten Regelgröße zu reduzieren. Dies hätte zwar zur Folge, dass für die zweite Regelgröße ein Regelfehler in Kauf genommen werden müsste, allerdings sind kleine, kontrollierte Abweichungen in mehreren Regelgrößen, einer großen, unkontrollierbaren Abweichung in einer Regelgröße meist vorzuziehen. Durch die Verwendung modellbasierter Mehrgrößen-Regler ergeben sich für AWPA die folgenden neuen Möglichkeiten, welche auch in Abbildung 14 dargestellt sind:

- **Gemeinsames Regeln aller Regelgrößen mit allen Stellgrößen:**
Dadurch ist in Situationen mit Stellgrößenbeschränkungen ein gezielteres Regeln aller Regelgrößen möglich.
- **Priorisierung von Regelgrößen:**
Methoden wie MPC erlauben die Priorisierung von Regelgrößen durch die Wahl von Gewichtungsparemtern einzelner Regelgrößen, wodurch die am höchsten priorisierten Regelgrößen erstens schneller und zweitens selbst bei Betrieb im äußeren Stellbereich nahe am Sollwert gehalten werden können. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn eine Regelgröße möglichst immer am Sollwert gehalten werden soll

während andere nur in der Nähe ihres Sollwertes gehalten werden müssen.

- **Verwendung von mehr (aber auch weniger) Stell- als Regelgrößen:**
Mehr Stell- als Regelgrößen bedeutet einen größeren Stellbereich im Vergleich zu Eingrößen-Reglern, bei denen die Zahl der Stellgrößen denen der Regelgrößen entspricht. Weniger Stell- als Regelgrößen können dann von Vorteil sein, wenn mehrere Regelaufgaben mit einer begrenzten Anzahl an Stellgrößen bedient werden sollen. Dabei ist zwar zu berücksichtigen, dass bei weniger Stell- als Regelgrößen nicht alle Regelgrößen gehalten werden können, allerdings kann der Regler die Stellgrößen so variieren, dass die Regelgrößen zumindest möglichst nah am Sollwert gehalten werden.

Regelung mit modellbasiertem Mehrgrößen-Regler:

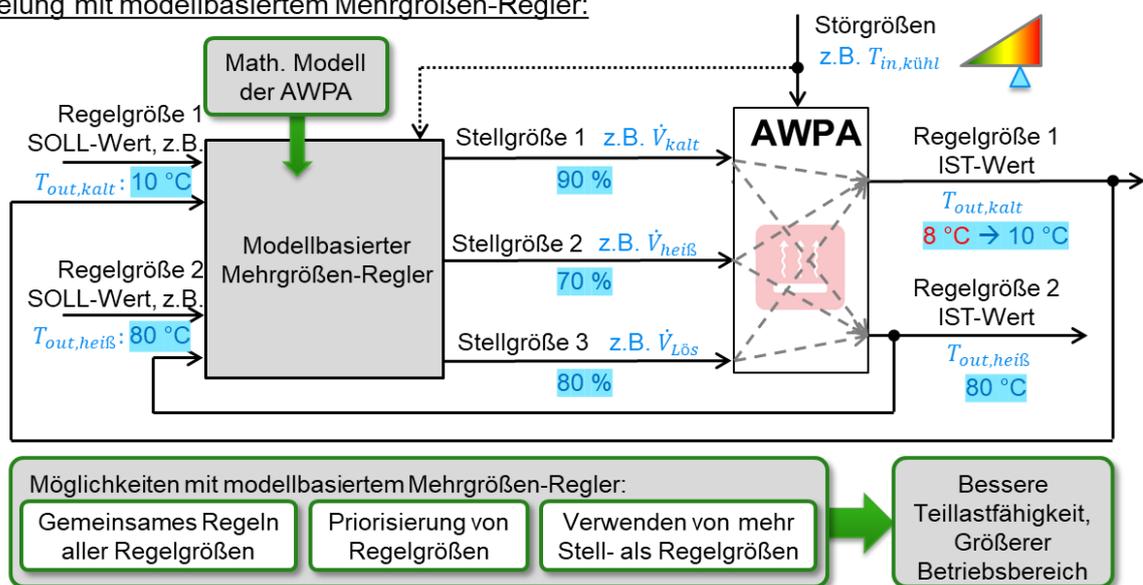


Abbildung 14: Regelung von AWPA unter starker Störgrößeneinwirkung mit modellbasiertem Mehrgrößen-Regler

Modellbasierte Regelungskonzepte bieten darüber hinaus den Vorteil, dass die Anpassung der Regelung für unterschiedliche Konfigurationen (also unterschiedliche Stell- und/oder Regelgrößen) sehr systematisch ist, d.h. die Entwicklung einer Regelung und deren Parametrierung für neue AWPA-Projekte können zeiteffizient erfolgen. AWPA werden unter unterschiedlichsten Bedingungen eingesetzt - als Kälteanlage oder Wärmepumpe, zur Regelung von Leistungen und/oder Austrittstemperaturen und auch die Art und Anzahl an möglichen Stellgrößen ist stark vom Gesamtsystem, in das die AWPA eingebettet wird, abhängig. Wählt man ein modulares, einfach parametrierbares Reglerentwurfmodell für die modellbasierten Regelungskonzepte, können diese systematisch für verschiedene Randbedingungen angepasst werden.

3.3.2 Modellbildung für Reglerentwurf

Grundlage für die Entwicklung modellbasierter Regelungsstrategien ist ein geeignetes Modell des zu regelnden Systems, also ein geeignetes Reglerentwurfmodell der AWPA. Deshalb wurden in HPC neben den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Simulationsmodellen auch

Reglerentwurfsmodelle entwickelt. Die Herausforderung bei der Entwicklung solcher Modelle liegt darin, dass sie das grundlegende dynamische Verhalten des Systems inklusive aller relevanten Verkopplungen zwischen Eingangs-, Zustands- und Ausgangsgrößen beschreiben können sollen und gleichzeitig ihre mathematische Struktur möglichst einfach und die Anzahl der dafür nötigen Gleichungen möglichst gering sein soll. Die dabei angestrebte mathematische Struktur ist üblicherweise ein System von möglichst wenigen gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung, die den Zustand der wesentlichen Energiespeicher und deren Auswirkungen auf die relevanten Ausgangsgrößen (=Regelgrößen) beschreiben.

Bei der Modellbildung in HPC hat sich gezeigt, dass viele Zusammenhänge innerhalb der AWPA zwar zum Teil stark nichtlinear sind, sich die wesentlichen Dynamiken der Ausgangsgrößen (Austrittstemperaturen und Leistungen) allerdings trotzdem ausreichend gut mit einer linearen Modellform beschreiben lassen. Bei der Modellbildung wurde deshalb so vorgegangen, dass zunächst ein auf physikalischen Überlegungen basierendes, einfaches, aber dennoch nichtlineares, Modell entwickelt wurde, das die wichtigsten dynamischen Zusammenhänge zwischen Eingangs-, Zustands- und Ausgangsgrößen beschreibt. Dieses nichtlineare Modell wurde dann in einem weiteren Schritt in einem Arbeitspunkt linearisiert und mit Methoden der linearen Algebra weiter vereinfacht, sodass schlussendlich ein Modell in Form eines linearen Zustandsraummodells entsteht, welches die wesentlichen Dynamiken der AWPA mit lediglich 9 bzw. 8 (für H₂O/LiBr bzw. NH₃/H₂O-AWPA) linearen, gekoppelten, gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung beschreibt und sich ausgezeichnet für verschiedenste Methoden der modellbasierten Regelung eignet.

In der Folge wird zunächst in Abschnitt 3.3.2.1 der Aufbau der entwickelten nichtlinearen Reglerentwurfsmodelle beschrieben und daraufhin in Abschnitt 3.3.2.2 erläutert, wie diese nichtlinearen Modell systematisch in die linearen Modelle überführt werden können.

3.3.2.1 Aufbau der nichtlinearen Reglerentwurfsmodelle

Das Reglerentwurfsmodell der AWPA besteht aus einzelnen Submodellen der relevantesten Subkomponenten wie etwa Wärmeübertrager und Fluidspeicher. Die gewählte Grundstruktur dieser Submodelle zeichnet sich durch die Anwendung des sogenannten „lumped component approach“ aus. Dabei werden die einzelnen Subkomponenten als konzentrierte Rechenknoten ohne örtliche Ausweitung betrachtet. Dieser Ansatz unterscheidet sich stark von dem für die Simulationsmodelle in Abschnitt 3.2 verfolgten Ansatz, bei dem z.B. Wärmeübertrager in Segmente unterteilt werden. Durch die Verwendung des „lumped component approach“ ist es zwar nicht möglich, zu beschreiben, was beispielsweise in einem Wärmeübertrager an einer bestimmten Stelle passiert - da dies für die Beschreibung der relevanten Regelgrößen aber auch nicht notwendig ist, überwiegen in diesem Fall die Vorteile, nämlich eine deutlich reduzierte Anzahl an notwendigen Gleichungen. Die wesentlichen Vorgänge in einer AWPA können damit mit den folgenden „Grundbausteinen“ beschrieben werden, welche in der Folge noch genauer erläutert werden:

- Vereinfachte Stoffdatenmodelle
- Dynamische Massen- und Energiebilanzen für Fluidspeicher

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Submodelle für Wärmeübertrager (bestehend aus statischen Massen- und Energiebilanzen und Wärmeübergangsmodellen)
- Durchflussmodelle für Drosseln
- Annahmen und Vereinfachungen

Vereinfachte Stoffdatenmodelle:

Da der Regler nicht auf externe Stoffdatenbanken angewiesen sein soll, wurden vereinfachte Stoffdatenmodelle für die beiden Arbeitsstoffpaare H₂O/LiBr und NH₃/H₂O entwickelt. Sie beschreiben Zusammenhängen zwischen z.B. spezifischer Enthalpie und Temperatur oder zwischen Temperatur, Druck und Masseanteil im gesättigten Zustand mithilfe einfacher Gleichungen. Diese Gleichungen wurden so parametrisiert, dass sie besonders den Temperatur-, Druck- und Masseanteilsbereich beschreiben, in denen die AWPA typischerweise betrieben werden. Die vereinfachten Stoffdatenmodelle wurden basierend auf [22] für H₂O/LiBr, auf [24] für reines Wasser und auf [25] für NH₃/H₂O entwickelt.

In Abbildung 15 ist beispielhaft der Vergleich zwischen detailliertem [22] und vereinfachtem Stoffdatenmodell für die spezifische Enthalpie von H₂O/LiBr-Lösung dargestellt. Da der Gültigkeitsbereich für das vereinfachte Modell deutlich reduziert werden kann, können einfachere Gleichungsformen verwendet werden und Einflüsse von einzelnen Größen, in diesem Fall dem Druck, vernachlässigt werden.

<p>Detailliertes Modell, gültig für $T = 5 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $x = 0 \dots x_{\text{cris}} (\approx 0 \dots 70 \%)$</p> $h(x, T, p) = g + Ts = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_{p, x}$ $= (A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^{1.1})$ $- T^2 (C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^{1.1})$ $- 2T^3 (D_0 + D_1 x + D_2 x^2 + D_4 x^{1.1})$ $- 3T^4 (E_0 + E_1 x) + (F_0 + F_1 x) \left(\frac{1}{T - T_0} + \frac{T}{(T - T_0)^2} \right)$ $+ p (V_0 + V_1 x + V_2 x^2 - V_6 T^2 - V_7 x T^2)$ $+ (\ln(T) - 1) (L_0 + L_1 x + L_2 x^2 + L_3 x^3 + L_4 x^{1.1})$ $- T (M_0 + M_1 x + M_2 x^2 + M_3 x^3 + M_4 x^{1.1})$	\implies	<p>Vereinfachtes Modell, parametrisiert für $T = 25 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$ $x = 45 \dots 65 \%$</p> $h(x, T) =$ $A_0 + A_1 x +$ $A_2 x^2 + A_3 T + A_5 x T$
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Vergleich:

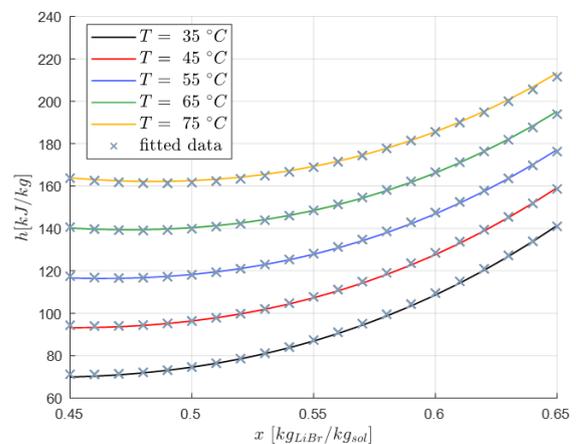


Abbildung 15: Vergleich zwischen detailliertem [22] und vereinfachtem Stoffdatenmodell für spezifische Enthalpie von H₂O/LiBr-Lösung

Dynamische Masse- und Energiebilanzen für Fluidspeicher:

Beide AWPA (EAW und PINK) verfügen über mehrere Sammelbehälter, in denen sich je nach Betriebszustand unterschiedlich viel Kältemittel und/oder Lösungsmittel sammelt. Im Fall der EAW-AWPA (siehe Abbildung 5) sind das die Flüssigsümpfe in Generator, Kondensator, Verdampfer und Absorber, im Fall der PINK-AWPA (siehe Abbildung 6) sind das der Lösungsmittelsammelbehälter nach dem Absorber, der Separator nach dem Generator und der Kältemittelsammelbehälter nach dem Kondensator. Die in diesen Sammelbehältern

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gespeicherte Masse und Energie beeinflussen maßgeblich die Dynamik der AWPA und bestimmen auch die Massenanteile und Temperaturen innerhalb der AWPA. Im Reglerentwurfsmodell wird jeder Sammelbehälter mit Hilfe von differenziellen Massen- und Energiebilanzen beschrieben.

Submodelle für Wärmeübertrager:

Die einzelnen Wärmeübertrager-Submodelle von Generator, Verflüssiger, Verdampfer und Absorber sind strukturell sehr ähnlich und bestehen jeweils aus

- statischen Massen- und Energiebilanzen für die Innenseite (Lösung oder Kältemittel) der Wärmeübertrager,
- einer statischen Energiebilanz für die Außenseite (Heiß-, Kühl- oder Kaltwasserkreislauf) der Wärmeübertrager,
- einer Wärmeübergangskorrelation (Ansätze basierend auf UA-Wert oder Effektivitäten), die den übertragenen Wärmestrom in Abhängigkeit von den aktuellen Betriebsbedingungen beschreibt,
- und Korrelationen (Sättigungsfunktionen), die die Annahme, dass die Fluide, die die Wärmeübertrager verlassen, im chemischen Gleichgewicht mit dem jeweils vorliegenden Hoch- bzw. Niederdruck sind.

Die Speicherwirkung von Metallteilen und Fluid in den Wärmeübertragern konnte für die Reglerentwurfsmodelle vernachlässigt werden.

Durchflussmodelle für Drosseln

AWPA verfügen jeweils über zwei Drosseln, die jeweils Kältemittel oder arme Lösung von Hoch- auf Niederdruckniveau entspannen. Sie werden als adiabate Drosseln modelliert, der Entspannungsvorgang ist somit isenthalp. Aufgrund der stark unterschiedlichen Bauart der Drosseln und den unterschiedlichen Differenzdrücken zwischen H₂O/LiBr- und NH₃/H₂O-AWPA unterscheiden sich die verwendeten Durchflussmodelle zum Teil. Prinzipiell wird der Durchfluss durch den (Ventilstellungs-abhängigen) Kv-Wert, der Differenz zwischen Hoch- und Niederdruck und dem hydrostatischen Druck aufgrund des Füllstandes im Behälter über der Drossel beeinflusst. Für das Reglerentwurfsmodell können einzelne Drosselvorgänge in der AWPA allerdings vereinfacht dargestellt werden:

Bei der EAW-AWPA (H₂O/LiBr) ist keine dezidierte Lösungsmitteldrossel verbaut – der Differenzdruck wird durch den Druckverlust im internen Wärmeübertrager aufrecht erhalten. Außerdem ist die Differenz zwischen Hoch- und Niederdruck sehr gering (unter 10 kPa) und die Auswirkungen des füllstandsabhängigen, hydrostatischen Drucks relevant, sodass bei der Modellbildung ein sehr einfaches Durchfluss-Modell verwendet wurde, in dem der Durchfluss rein in Abhängigkeit des Füllstandes modelliert wird. Für den Kältemittel-Durchflusses zwischen Kondensator und Verdampfer zeigte sich aus Messdatenanalyse, dass der Kondensator-Füllstand im Betrieb beinahe konstant bleibt und für das Reglerentwurfsmodell dieser Durchfluss somit näherungsweise dem des ausgetriebenen Kältemittels gleichgesetzt werden kann.

Bei der PINK-AWPA kann die Ventilstellung beider Ventile geändert werden, wobei nur auf die Kältemitteldrossel zugegriffen werden kann (die Lösungsmitteldrossel wird automatisch über den Füllstand geregelt. Weiters ist die Differenz zwischen Hoch- und Niederdruck deutlich größer als bei der EAW-AWPA, sodass diese im Vergleich zum hydrostatischen Druck relevanter ist. Im Reglerentwurfsmodell wurde die Kältemitteldrossel deshalb, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, in Abhängigkeit eines ventilstellungsabhängigen Kv-Werts und der Druckdifferenz modelliert. Die Lösungsmitteldrossel wurde hingegen genauso wie für die EAW-AWPA mit einem sehr einfachen füllstandsabhängigen Ansatz modelliert werden, da die Öffnung der Drossel durch einen mechanischen Regler starr mit dem Füllstand verbunden ist und deshalb sehr stark davon abhängt.

Annahmen und Vereinfachungen:

Die folgenden Annahmen und Vereinfachungen wurden für die Entwicklung des Reglerentwurfsmodells verwendet:

- Wärmeverluste werden vernachlässigt
- Druckverluste werden vernachlässigt (außer in Drosseln)
- Temperatur und Masseanteil aller Fluide, die Wärmeübertrager verlassen, sind in chemischem Gleichgewicht mit dem jeweiligen Druck (Nieder- bzw. Hochdruck), mit Ausnahme des Absorbers, bei dem Unterkühlung angenommen wird.
- Adiabate Drosseln
- Kältemittel ist reines Wasser für EAW-AWPA bzw. Ammoniak/Wasser Gemisch mit 98 % Ammoniak (Massenanteil) für PINK-AWPA

Schlussendlich entsteht durch den Zusammenschluss der einzelnen Submodelle ein gekoppeltes, nichtlineares System aus 9 bzw. 8 Differentialgleichungen (EAW bzw. PINK-AWPA) und ca. 50 algebraischen Gleichungen. Diese Modellform lieferte sehr zufriedenstellende dynamische Simulationsergebnisse und kann auch für manche modellbasierten Regelungsmethoden verwendet werden, allerdings ist es für viele zu komplex, weshalb im nächsten Abschnitt erläutert wird, wie dieses nichtlineare Modell weiter vereinfacht werden kann.

3.3.2.2 Überführung des nichtlinearen zum linearen Reglerentwurfsmodell

Die Überführung vom nichtlinearen zum linearen Reglerentwurfsmodell erfolgt im Wesentlichen in zwei Teilschritten. Zuerst werden die Differential- und die algebraischen Gleichungen in einem Betriebspunkt mithilfe einer Taylor-Reihenentwicklung erster Ordnung linearisiert und danach alle linearisierten, algebraischen Gleichungen durch Umformen eliminiert. Der dafür gewählte Betriebspunkt sollte sinnvollerweise so gewählt werden, dass er in der Mitte des zu erwartenden Betriebsbereiches liegt.

Details zum Aufbau der Reglerentwurfsmodelle können [26] entnommen werden.

3.3.3 Neu entwickelte modellbasierte Mehrgrößen-Regler für AWPA

Mit dem in Abschnitt 3.3.2 erläuterten Reglerentwurfsmodell wurden in HPC zwei Regelungsansätze für AWPA (Zustandsregler und Modellprädiktive Regelung (MPC)) entwickelt, die in diesem Abschnitt näher erläutert werden.

3.3.3.1 Erster Regelungsansatz basierend auf Zustandsregler-Ansatz

Für den ersten Regelungsansatz wurde

- die Methode des linearen Zustandsreglers (vgl. z.B. [27]) verwendet, erweitert
- um einen Zustandsbeobachter (vgl. z.B. [27]) zur Ermittlung der nicht-gemessenen Zustände,
- um einen „unknown input observer“ (vgl. z.B. [27]), also einen Beobachter zur Ermittlung nicht-messbarer Eingangs- bzw. Störgrößen, und
- um einen „Control Allocation“-Block [28], der den Stellgrößenvektor so verschiebt, dass möglichst wenig Stellgrößen beschränkt sind.

Der Regelungsansatz wird in der Folge genauer erläutert und ist schematisch in Abbildung 16 dargestellt.

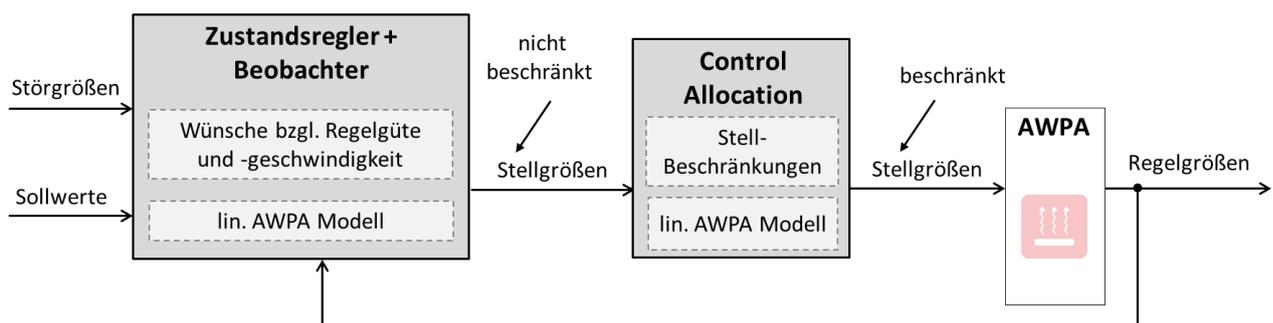


Abbildung 16: Struktur des Regelungsansatzes basierend auf Zustandsregler

Zustandsregler sind modellbasierte Regler, die nicht (nur) die gemessenen Regelgrößen, sondern auch Informationen über Zustandsgrößen (gespeicherte Massen und Energien in der AWPA) zur Regelung verwenden können. Sie eignen sich sehr gut zur Regelung von Mehrgrößensystemen, da für die Parametrierung das Reglerentwurfsmodell verwendet wird, in dem die dynamischen Zusammenhänge zwischen allen Stell- und Regelgrößen abgebildet sind. Zur möglichst einfachen und systematischen Parametrierung wurde die Methode des linear-quadratischen Reglers (LQR, vgl. z.B. [27]) gewählt, bei dem die Reglerparameter beim Reglerentwurf über die Minimierung einer quadratischen Kostenfunktion ermittelt werden (im Gegensatz zur recht abstrakten Methode der Polvorgabe, vgl. z.B. [27]). In dieser Kostenfunktion können sowohl die Regelgüte einzelner Regelgrößen, also auch die Stellgeschwindigkeit einzelner Stellgrößen sehr einfach unterschiedlich gewichtet werden.

Für die Beobachter (Zustandsbeobachter und „unknown input observer“) ist ebenfalls das Reglerentwurfsmodell notwendig. Durch Vergleich zwischen gemessenen und modellierten

Größen werden sowohl Zustände, die für den Zustandsregler benötigt werden, als auch unbekannte Störgrößen abgeschätzt.

Da die Methode des Zustandsreglers keine direkte Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen ermöglicht, wurde dieser Regelungsansatz um einen „Control Allocation“-Block basierend auf [28] erweitert, in dem mithilfe des AWPA Modells Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigt werden können. Das Grundprinzip von „Control Allocation“ basiert darauf, dass bei mehr Stell- als Regelgrößen unterschiedliche Stellgrößenkombinationen zu denselben Ausgangsgrößen führen. Diese Kombinationen können nicht beliebig gewählt werden. Die Richtung(en), in der ein Stellgrößenvektor verschoben werden kann, ohne die daraus resultierenden Regelgrößen (im eingeschwungenen Zustand) zu ändern, werden mathematisch mithilfe des sogenannten „Nullraums“ beschrieben. Dieser Nullraum ist je nach Differenz zwischen Stell- und Regelgrößenanzahl ein Vektor oder eine Matrix, welche aus den Matrizen des Reglerentwurfsmodell berechnet werden können. Mithilfe des Nullraums wird der Stellgrößenvektor, der vom Zustandsregler kommt, nun laufend so verschoben, dass die gewünschten Werte für die Regelgrößen gehalten werden und gleichzeitig alle Stellgrößen möglichst in die Mitte ihres jeweiligen Stellbereichs geschoben werden, um damit Stellgrößenbeschränkungen vorzubeugen.

In Summe entsteht so ein Regelungsansatz, der es ermöglicht, die Verkopplungen zwischen allen Stell- und Regelgrößen bewusst zu nutzen, um damit den Stellbereich zu erweitern und Regelgrößen auch außerhalb des damit möglichen Stellbereichs gezielter beeinflussen zu können. Die Anpassung der Reglerparameter erfolgt systematisch über die Änderung der Gewichtungparameter für Regel- und Stellgrößen. Zur einfacheren Parametrierung wurden Ansätze aus der optimierungsbasierten Regelungstechnik eingesetzt. Diese werden im Betrieb jedoch nicht benötigt, was ein großer Vorteil ist, da dieser Regelungsansatz dadurch problemlos auf branchenüblichen SPSen eingesetzt werden kann.

3.3.3.2 Zweiter Regelungsansatz basierend auf Model Predictive Control (MPC)

Für den zweiten Regelungsansatz wurde

- die Methode der linearen modellprädiktiven Regelung bzw. Model Predictive Control (MPC) verwendet (vgl. z.B. [29]), erweitert
- um einen „Internal Model Control“-Ansatz (IMC) (vgl. z.B. [30]), zur Ermittlung unbekannter Störgrößen.

Der Regelungsansatz wird in der Folge genauer erläutert und ist schematisch in Abbildung 17 dargestellt.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

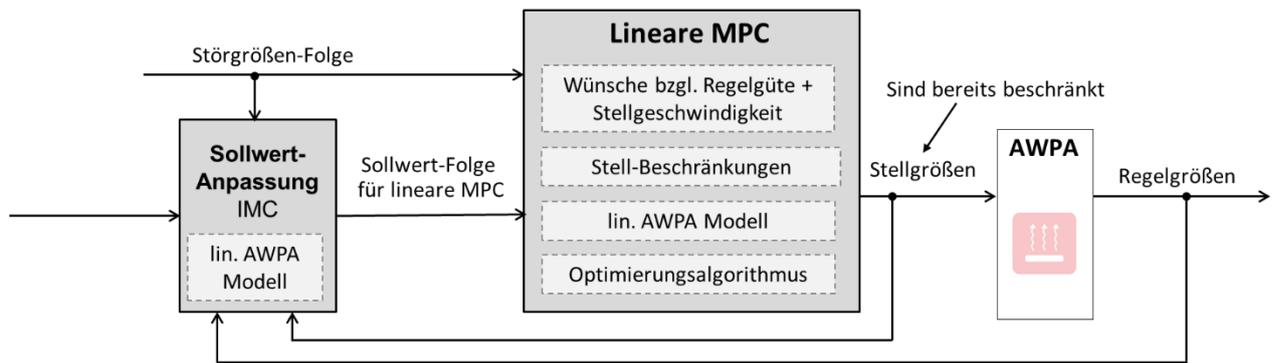


Abbildung 17: Struktur des Regelungsansatzes basierend auf MPC

Ein MPC Regler berechnet mithilfe des Reglerentwurfsmodells sowie der Prädiktion der Sollwerte und Störgrößen für einen gewissen Prädiktionshorizont den optimalen Stellgrößenverlauf, bei dem sowohl die Sollwerte gut eingehalten werden als auch die Stellgrößen möglichst schonend betrieben werden. MPC wird vor allem in übergeordneten Systemregelungen bereits oft eingesetzt, um beispielsweise die Leistung einzelner Erzeuger an den Bedarf der Verbraucher anzupassen. MPC kann allerdings auch für Komponentenregelungen eingesetzt werden. Dabei wird in einer mathematische Kostenfunktion durch Gewichtungsmatrizen beschrieben, welche Stellgrößen wie schnell betrieben werden sollen und welche Regelgrößen die höchste Priorität haben (und deren Regelfehler somit am stärksten bestraft wird). Die Priorisierung der Regelgrößen ermöglicht bei diesem Ansatz, dass der Regler diese nicht nur möglichst schnell ausregelt, sondern zusätzlich in extremen Stellbereichen (mehreren beschränkten Stellgrößen) die verbleibenden Stellgrößen so wählt, dass die am höchsten priorisierte Regelgröße möglichst gut eingehalten werden kann. Zusätzlich können mit dieser Methode auch Stellgrößenbeschränkungen sehr einfach durch Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem eingebunden werden.

Zur Berücksichtigung unbekannter/nicht-modellierter Störgrößen wurde der MPC-Ansatz mit einem „Internal Model Control“-Block kombiniert. Hierbei wird das vereinfachte Modell der Strecke laufend mit der realen Anlage verglichen und basierend darauf die Sollwerte, die an die MPC geschickt werden, angepasst, sodass schlussendlich die gewünschten Sollwerte trotz unbekannter Störgrößen eingehalten werden können.

Dieser zweite Regelungsansatz hat aufgrund der Möglichkeit zur Priorisierung von Regelgrößen und der Berücksichtigung zukünftiger Größen ein noch größeres Potential, den Betrieb von AWPA zu verbessern. Allerdings muss bei Regelung mit MPC im Betrieb laufend ein Optimierungsproblem gelöst werden, was bedeutet, dass auf der SPS ein Optimierungsalgorithmus laufen muss. Dies ist mit ausgewählten, modernen SPSen zwar bereits möglich (besonders für lineare MPC wie hier vorgestellt), allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle branchenüblichen SPSen dazu in der Lage sind. Somit ist dieser Regelungsansatz vorrangig für größere AWPA angedacht, bei der eine etwas teurere SPS einfacher realisierbar ist.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus dem Projekt HPC zusammengefasst. In Abschnitt 4.1 werden zunächst Ergebnisse aus der experimentellen Analyse diskutiert. In Abschnitt 4.2 werden die Validierungsergebnisse der in Abschnitt 3.2 erläuterten Simulationsmodelle präsentiert. In Abschnitt 4.3 wird demonstriert, wie diese Simulationsmodelle zur näheren Analyse des Anlagenverhaltens eingesetzt werden können. In Abschnitt 4.4 werden die Validierungsergebnisse des Reglerentwurfsmodells und die Ergebnisse aus dem Regelungsentwurf diskutiert, wobei hierfür die beiden neu entwickelten Regelungsmethoden mit herkömmlichen Einzel-PI-Reglern verglichen werden - beispielhaft anhand von zwei unterschiedlichen Lastprofilen.

4.1 Ergebnisse aus experimenteller Analyse

Mithilfe des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Teststands mit umfangreicher Sensorik und Automatisierungskonzept konnten zahlreiche systematische Versuche zur experimentellen Analyse der dynamischen Auswirkungen aller Eingangsgrößen durchgeführt werden (beispielhafte Messungen können den Abschnitten 4.2 und 4.4 entnommen werden). Diese Versuche waren eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Simulationsmodelle und der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Reglerentwurfsmodelle und Regelungen, deren Validierungsergebnisse weiter unten in Abschnitt 4.2 bis 4.5 erfolgen. Zusätzlich konnten aus der experimentellen Analyse auch bereits erste Erkenntnisse zur Anlagendynamik und den Verkopplungen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen gezogen werden. Dafür wurden einzelne Eingangsgrößen sprunghaft geändert und beobachtet, ab wann die Austrittstemperaturen im Heiß-, Kühl-, und Kaltwasserkreis wieder konstant sind, d.h. ihren neuen stationären Wert erreicht haben.

Für die untersuchte NH₃/H₂O-AWPA der Firma PINK wurden ihre acht Eingangsgrößen – Eintrittstemperaturen und Durchflüsse in den drei Hydraulikkreisen, Durchfluss der reichen Lösung und Ventilöffnung der Kältemitteldrossel – variiert. Dabei zeigte sich, dass alle Austrittstemperaturen innerhalb weniger Minuten (<5 Minuten) ihren neuen stationären Wert erreichen. Die Ventilöffnung der Kältemitteldrossel wird im normalen Betrieb allerdings nicht konstant gehalten bzw. sprunghaft geändert, sondern von einem AWPA-internen PI-Regler vorgegeben, der die Temperaturdifferenz zwischen Sättigungstemperatur und Austritt des Kältemittels aus dem Verdampfer („Temperaturgleit“) regelt. Der PI-Regler beeinflusst somit die Gesamtdynamik der AWPA, sodass im normalen Betrieb unter Einsatz dieses AWPA-internen PI-Reglers die Austrittstemperaturen erst ca. 10 Minuten nach Eingangsgrößenvariationen wieder konstant sind. Obwohl die Gesamtdynamik mit dem PI-Regler somit etwas verlangsamt wird, ist dies durchaus sinnvoll, um einen robusten Betrieb der AWPA zu garantieren.

Für die untersuchte H₂O/LiBr-AWPA der Firma EAW wurden ihre sieben Eingangsgrößen – Eintrittstemperaturen und Durchflüsse in den drei Hydraulikkreisen und Durchfluss der reichen

Lösung – variiert. Dabei zeigte sich, dass die Austrittstemperaturen nach Variationen der Eingangsgrößen im Heiß- und Kaltwasserkreis länger benötigten um ihren neuen stationären Wert zu erreichen (ca. 30 Minuten), als nach Variationen der Eingangsgrößen im Kühlwasserkreis und des Durchflusses der reichen Lösung (wenige Minuten).

Die experimentelle Untersuchung der beiden AWPA hat darüber hinaus gezeigt, dass beide Anlagen in einem sehr breiten Betriebsbereich betrieben werden können, sofern ausreichend Stellgrößen zur Verfügung stehen. Die H₂O/LiBr-Anlage besticht durch einen hohen COP, und die NH₃/H₂O Anlage durch eine sehr schnelle Anlagendynamik.

4.2 Validierungsergebnisse der Simulationsmodelle

4.2.1 PINK-AWPA (NH₃/H₂O)

Zur Verifizierung des dynamischen Simulationsmodells der PINK-AWPA (siehe Kapitel 3.2.1) wurden Sprungantworten im Heißwasserkreislauf und im Kühlwasserkreislauf durchgeführt, um das dynamische Verhalten zu ermitteln. Anhand der Messdaten wurden dem Simulationsmodell die gleichen Randbedingungen wie der realen AWPA vorgegeben (Temperaturen und Massenströme in den Wasserkreisläufen, Lösungsmassenstrom, Temperaturleit-Sollwert). Der Vergleich der Simulations- und Messergebnisse ist in Abbildung 24a und in Abbildung 24b dargestellt. Abbildung 24a zeigt die Wassereintrittstemperaturen (z. B. $t_{Wat,Gen}$) sowie die Wasseraustrittstemperaturen der realen AWPA (z. B. $t_{Wat,Gen,out,meas}$) und der virtuellen Komponenten (z. B. $t_{Wat,Gen,out,sim}$) auf der Ordinate. Abbildung 24b zeigt die Leistungen der realen (z. B. $\dot{Q}_{Wat,Gen,out,meas} = (t_{Wat,Gen,in,meas} - t_{Wat,Gen,out,meas}) \cdot \dot{m}_{Wat,Gen,out,meas} \cdot c_{p,Wat}$) und virtuellen Komponenten (z. B. $\dot{Q}_{Wat,Gen,out,sim}$) auf der linken Ordinate sowie die entsprechenden relativen Fehler (z.B. $\delta\dot{Q}_{Wat,Gen,out,sim}$), die über einen Zeitraum von $\tau = 60$ s gemittelt wurden, auf der rechten Ordinate. Die zugehörigen Zeitpunkte sind jeweils auf der Abszisse dargestellt. Die Analyse der Mess- und Simulationsergebnisse zeigt, dass die Modelle des Generators und des Kondensators das Verhalten der AWPA bei Betriebspunktänderungen gut wiedergeben (unter Vernachlässigung von kurzzeitigen Schwankungen, die in der hydraulischen Anlage des Teststands der realen AWPA auftraten und im virtuellen Modell nicht originalgetreu wiedergegeben wurden). Das Modell des Verdampfers ist in der Lage, die meisten Betriebspunktänderungen gut abzubilden, teilweise sind jedoch geringfügige Abweichungen erkennbar. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die verwendete Korrelation aus [16] zur Berechnung der Nusselt-Zahl bei Verdampfung für reine Substanzen entwickelt worden ist. Ein Vergleich des Absorbers zeigt über fast alle Betriebsbereiche eine etwas größere Abweichung als bei den anderen Komponenten. Der Grund dafür ist zum einen, dass sich Verdampfer und Absorber gegenseitig beeinflussen. Zum anderen wird im Lösungsmittelsammler, der als Absorber verwendet wird, die Wärmeübertragung auf Basis eines konstanten WÜK berechnet. Weitere Details zur Validierung des Simulationsmodells der NH₃/H₂O-AWPA können der Veröffentlichung [31] entnommen werden.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

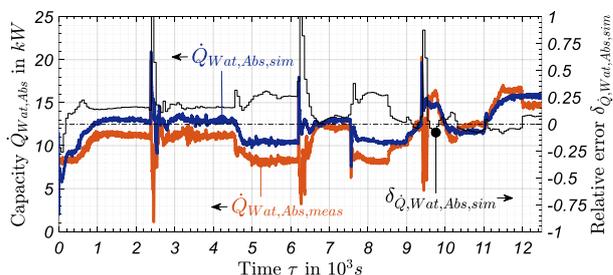
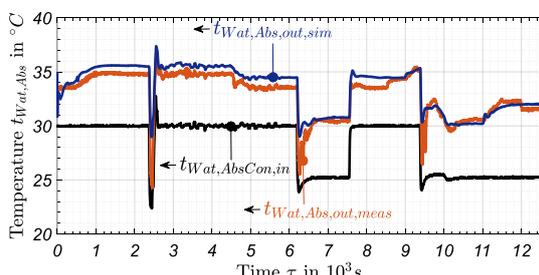
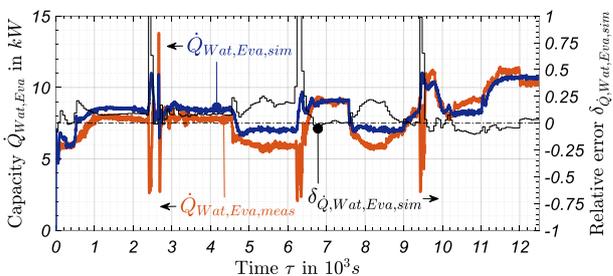
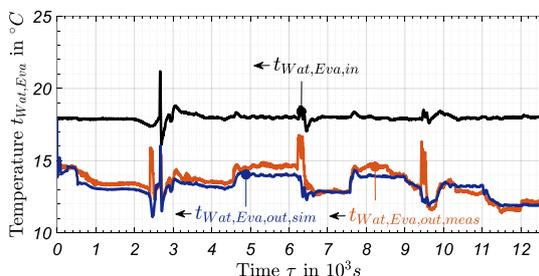
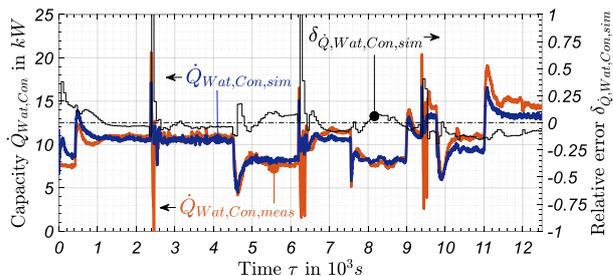
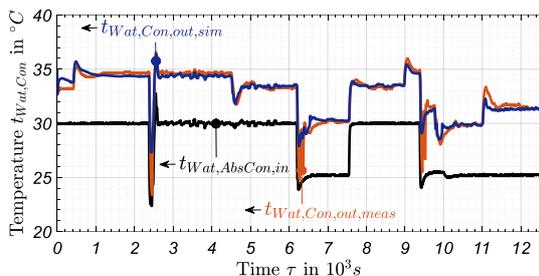
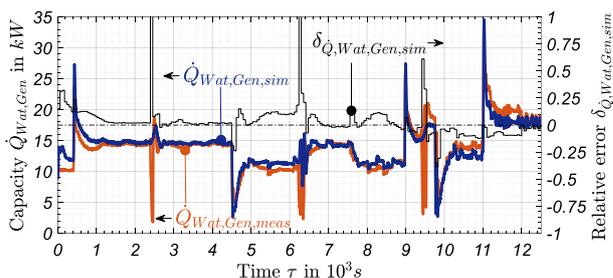
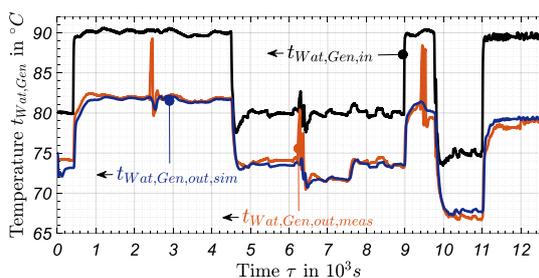


Abbildung 18a: Vergleich der simulierten und gemessenen externen Temperaturen der PINK-AWPA

Abbildung 19b: Vergleich der simulierten und gemessenen Leistungen der PINK-AWPA

4.2.2 EAW-AWPA (H2O/LiBr)

Um das Simulationsmodell (siehe Kapitel 3.2.2) zu überprüfen, wurden Simulations- mit Messergebnissen verglichen, indem diesen dieselben Wassereintrittstemperaturen und -volumenströme sowie Lösungsmittel- und Kältemittelvolumenströme vorgeben wurden. Beispielhaft ist ein Betriebspunktwechsel im Heißwasserkreis durchgeführt worden. Der Vergleich von Simulations- und Messergebnissen ist in Abbildung 19a und in Abbildung 19b dargestellt.

Abbildung 19a zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen auf der Ordinate. Die zugehörigen Zeitpunkte sind auf der Abszisse dargestellt. Abbildung 19b zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Leistungen auf der linken Ordinate sowie den

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

relativen Fehler der Simulation auf Basis der Messergebnisse auf der rechten Ordinate. Die zugehörigen Zeitpunkte sind auf der Abszisse dargestellt.

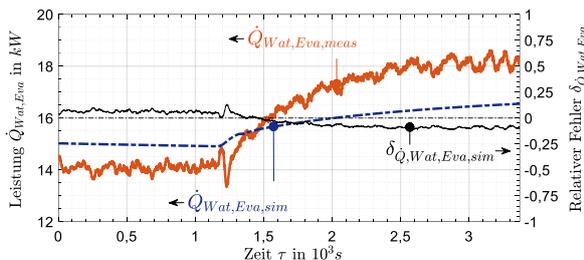
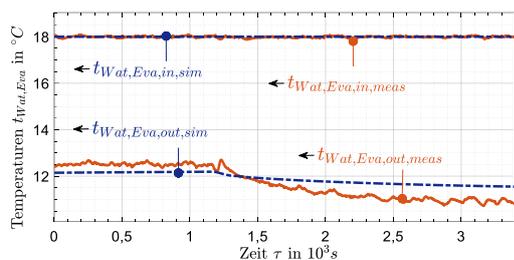
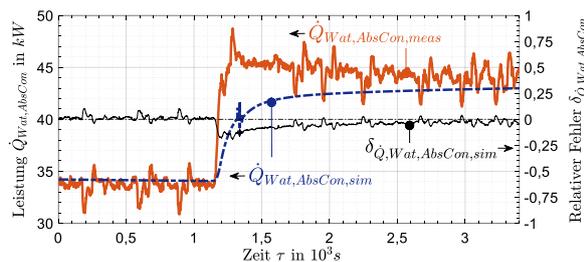
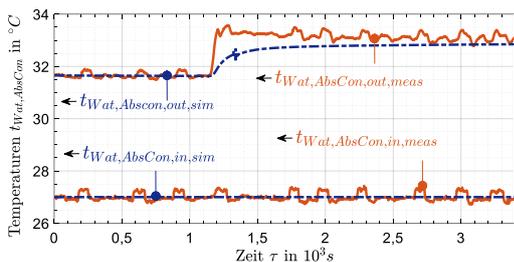
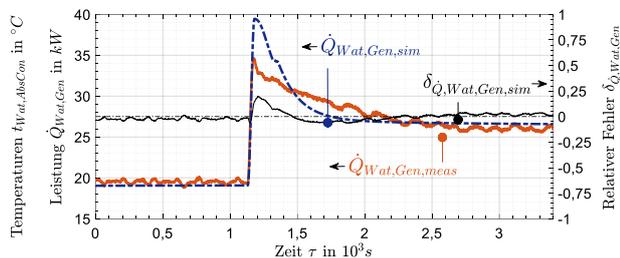
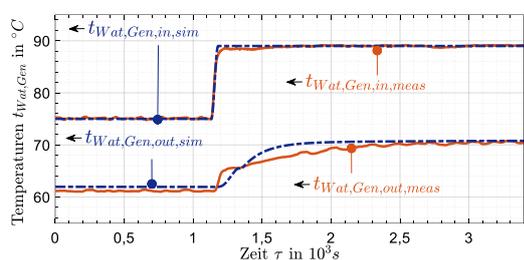


Abbildung 20a: Vergleich der simulierten und gemessenen externen Temperaturen der EAW-AWPA

Abbildung 21b: Vergleich der simulierten und gemessenen Leistungen der EAW-AWPA

Bei der Betrachtung der gemessenen und simulierten Temperaturen und Leistungen in Abbildung 19a und in Abbildung 19b zeigt sich, dass die Ergebnisse bei stationären Betriebe zu Beginn eine gute Übereinstimmung zeigen. Der Grund hierfür ist, dass die UA-Werte bei einem ähnlichen Betriebspunkt ermittelt worden sind. Die Betriebspunktabhängigkeit der UA-Werte führt allerdings dazu, dass die Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten nach dem Betriebspunktwechsel, am Ende des Vergleichs, leicht höher ausfallen. Insbesondere bei der Betrachtung des Verdampfers zeigt sich im Vergleich zum Generator und Absorber- & Kondensator-Kreis eine größere Abweichung bei stationärem Betrieb. Weitere Details zur Validierung des Simulationsmodells der H₂O/LiBr-AWPA können der Veröffentlichung [23] entnommen werden.

4.3 Verwendung des Simulationsmodells zur Analyse des Anlagenverhaltens

Die Nutzung des Simulationsmodells für weiterführende Untersuchungen soll im Folgenden an den Beispielen der Untersuchung des Temperaturschleits der PINK-AWPA sowie der Integration der PINK-AWPA in eine solarthermische Kühlung beschrieben werden.

4.3.1 Temperaturschleit

In diesem Kapitel werden die Vorteile der Verwendung eines detaillierten Simulationsmodells dargestellt, indem exemplarisch der Einfluss unterschiedlicher Temperaturschleite im Verdampfer auf die Leistung der NH₃/H₂O-AWPA untersucht wird (für Details siehe [31]).

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturschleite des Kältemittels im Verdampfer soll anhand von Abbildung 22 und Abbildung 23 untersucht werden. Abbildung 22 zeigt die Sollwerte des Reglers ($\Delta T_{Ref,Eva,glide,Setpoint}$), die Ist-Werte des Temperaturschleits ($\Delta T_{Ref,Eva,glide,Feedback}$) sowie die resultierenden Kältemittel-massenströme im Verdampfer ($\dot{m}_{Ref,Eva}$). In Abbildung 23 sind die Leistungen des Verdampfers ($\dot{Q}_{Wat,Eva}$) und des Generators ($\dot{Q}_{Wat,Gen}$) sowie die Leistungszahl ($EER = \dot{Q}_{Wat,Eva} / \dot{Q}_{Wat,Gen}$) für die entsprechenden Temperaturschleite aus Abbildung 22 dargestellt.

Wie in Abbildung 22 dargestellt, führt eine Erhöhung des Temperaturschleits-Sollwerts zu einem geringeren Kältemittel-massenstrom. Der Grund dafür ist, dass zur Erhöhung des Temperaturschleits die Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittelaustritt und dem Wassereintritt des Verdampfers gesenkt werden muss. Wie in Abbildung 23 dargestellt, werden die positiven Auswirkungen eines höheren Temperaturschleits auf die Enthalpiedifferenz im Verdampfer durch den geringeren Kältemittel-massenstrom leicht überkompensiert. Dies führt zu einer geringeren Verdampferleistung mit höherer Temperaturdifferenz im Verdampfer. Allerdings sinkt auch die Leistung des Generators.

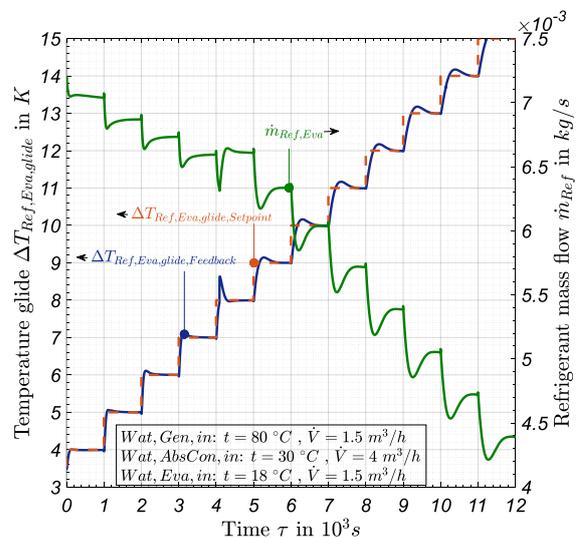


Abbildung 22: Simulationsergebnisse: Temperaturschleite und zugehörige Kältemittel-massenströme (Pink-AWPA)

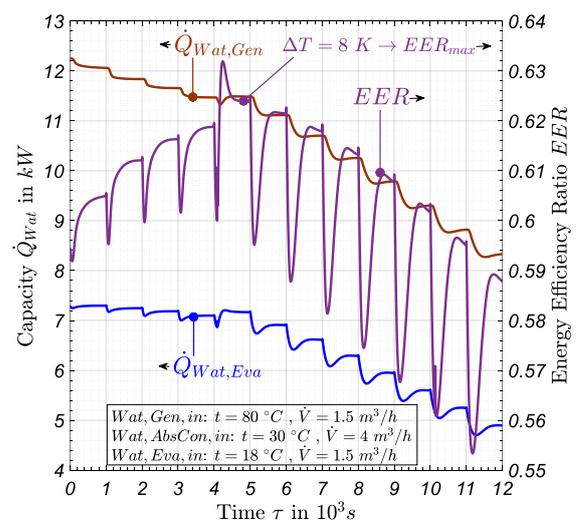


Abbildung 23: Simulationsergebnisse: Generator- und Verdampferleistungen sowie EER in Abhängigkeit des Temperaturschleits (Pink-AWPA)

Der Grund dafür ist, dass ein geringerer Kältemittelmassenstrom zu einer geringeren Menge an Kältemittel führt, die im Absorber absorbiert werden muss. Zudem ergibt sich durch die höhere Temperatur des zu absorbierenden Kältemittels eine höhere Leistung, die vom Absorber abgeführt werden muss. Außerdem sinkt der NH_3 -Massenanteil in der reichen Lösung und damit die Menge an Kältemittel, die absorbiert werden kann. Daher nimmt auch die Generatorleistung ab. Da die Abnahme der Generatorleistung die Abnahme der Verdampferleistung übersteigt, steigt der EER bis ein Temperaturgleit von $\Delta T_{\text{Ref,Eva,glide}} = 8 \text{ K}$ erreicht ist. Ab diesem Punkt ist der Einfluss des geringeren Kältemittelmassenstroms zu groß, als dass er durch eine höhere Verdampfungsenthalpie kompensiert werden könnte, und die Verdampferleistung sinkt ebenfalls. Neben dem Einfluss des Temperaturgleits auf die Leistungen zeigt Abbildung 23, dass die Reaktionszeit des Regelsystems mit einem höheren Temperaturgleit zunimmt. Bei einem Temperaturgleit-Sollwertsprung von $\Delta T_{\text{Ref,Eva,glide}} = 13 \text{ K}$ auf $\Delta T_{\text{Ref,Eva,glide}} = 14 \text{ K}$ dauert es etwa $\tau = 600 \text{ s}$, bis der Temperaturgleit stationären Zustand erreicht. Der Grund dafür ist, dass der PI-Regler eine größere Verringerung des Drosselquerschnitts bewirkt als nötig und bei Betrieb in diesem Betriebspunkt optimiert werden sollte. Außerdem haben kleine Änderungen der Drosselstellung aufgrund des bereits geringen Kältemittelmassenstroms einen großen Einfluss auf die Verdampfungstemperatur. Dies führt zu einem Überschwingen des Sollwertes. Die kurze Zeit bis zum Erreichen stationären Zustands bei niedrigeren Temperaturgleit-Sollwerten lässt vermuten, dass sie nahe des Arbeitspunktes liegen, für den der Regler ausgelegt ist.

4.3.2 Solarthermische Kühlung

Nachdem das Simulationsmodell der PINK-AWPA durch Vergleich von Simulations- und Messergebnissen ausführlich validiert worden ist (siehe Abschnitt 4.2.1), kann es im Zuge weiterer Untersuchungen z. B. auch für Tagessimulationen eingesetzt werden, um z. B. die Anwendung der solarthermischen Kühlung näher zu betrachten. Hierfür ist das Simulationsmodell um eine solarthermische Anlage auf Basis von Komponentenmodellen aus der „AixLib“ [32] erweitert worden (siehe Abbildung 24).

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

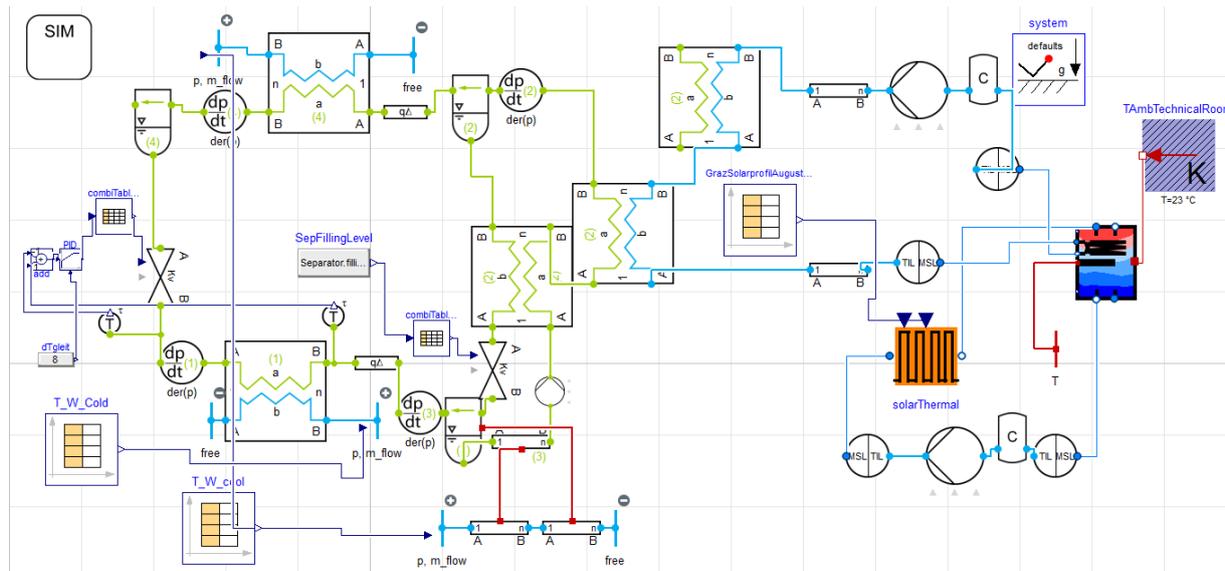


Abbildung 24: Simulationsmodell der PINK-AWPA sowie einer solarthermischen Anlage mit Komponenten aus „AixLib“

Dadurch ist es möglich, das dynamische Verhalten der PINK-AWPA bei Antrieb durch eine solarthermische Anlage für die Bereitstellung z.B. von Gebäudekühlung zu untersuchen. Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für eine Simulation, bei der reale Solarstrahlungsprofile sowie reale Temperaturprofile eines Gebäudes als Eingangsgrößen in die Simulation verwendet worden sind. Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse zeigt sich, dass das Simulationsmodell in der Lage ist, im Zuge von Tagessimulation das detaillierte Komponentenverhalten in der Auswertung näher zu analysieren und außerdem für die Verbesserung z. B. der Temperaturregelung eingesetzt werden kann.

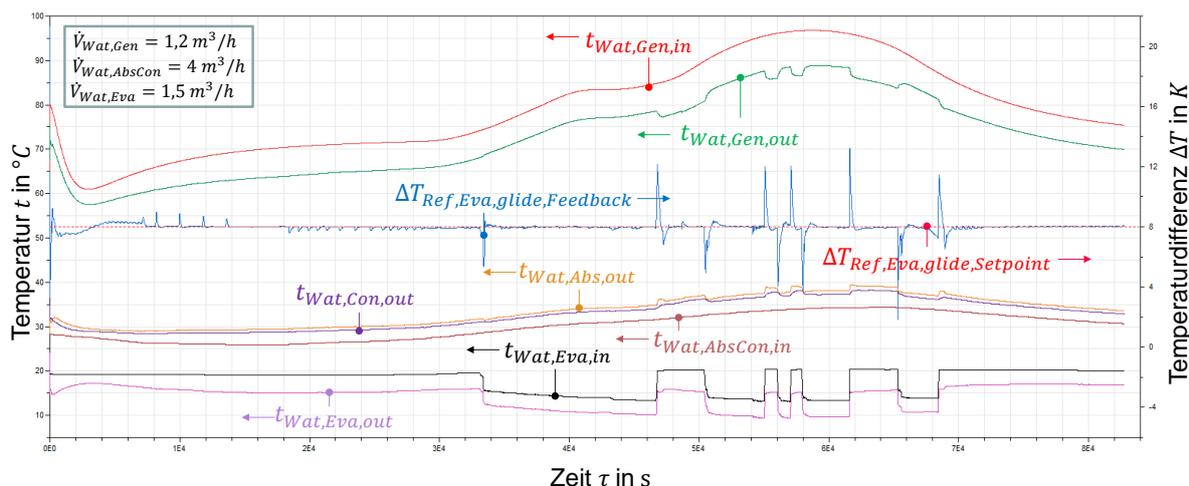


Abbildung 25: Simulationsergebnisse des Simulationsmodells der PINK-AWPA sowie einer solarthermischen Anlage mit Komponenten aus „AixLib“

4.4 Validierungsergebnisse für Reglerentwurfsmodelle

Zur Validierung der Reglerentwurfsmodelle wurden anspruchsvolle Lastwechsel in Form von schnellen Änderungen in den einzelnen Eingangsgrößen durchgeführt, um die Dynamik der realen Anlage mit den simulierten Ergebnissen aus dem nichtlinearen und dem linearisierten Reglerentwurfsmodell vergleichen zu können. Reglerentwurfsmodelle sollen insbesondere das dynamische Verhalten des zu regelnden Systems (der AWPA) gut wiedergeben können, während stationäre Abweichungen üblicherweise durch einen Integralanteil im Regler ausgeglichen werden können und somit weniger relevant sind. Beide Reglerentwurfsmodelle (für H₂O/LiBr und NH₃/H₂O) wurden ausführlich mit verschiedensten Lastwechsel validiert. In der Folge werden beispielhaft jeweils ein Validierungsversuch für die H₂O/LiBr- und einer für die NH₃/H₂O-AWPA gezeigt.

In Abbildung 26 ist ein beispielhafter Validierungsversuch für die EAW-AWPA (H₂O/LiBr) dargestellt. In den linken Diagrammen sind jeweils für den Heiß-, Kühl-, und Kaltwasserkreis die gemessenen bzw. vorgegebenen Eintrittstemperaturen in Grau, die gemessenen Austrittstemperaturen in Grün und die simulierten Austrittstemperaturen in Dunkelblau (nichtlineares Modell) bzw. in Hellblau (lineares Modell) dargestellt. In den rechten Diagrammen sind die Massenströme in Heiß-, Kühl-, und Kaltwasserkreis, sowie der Volumenstrom der reichen Lösung dargestellt. In dem dargestellten Versuch wurde zunächst die Kaltwasser-Eintrittstemperatur, dann der Kaltwasser-Volumenstrom und schlussendlich die Kaltwasser-Eintrittstemperatur und der Volumenstrom gleichzeitig sprungförmig geändert. Man kann erkennen, dass sowohl das nichtlineare als auch das linearisierte Modell die reale Anlage sehr gut abbilden können. Die stationären Abweichungen zwischen linearisiertem Modell und Messungen im Kaltwasserkreis zwischen Minute 160 und 230 können wie gesagt mithilfe eines Reglers mit Integralanteil einfach ausgeglichen werden.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

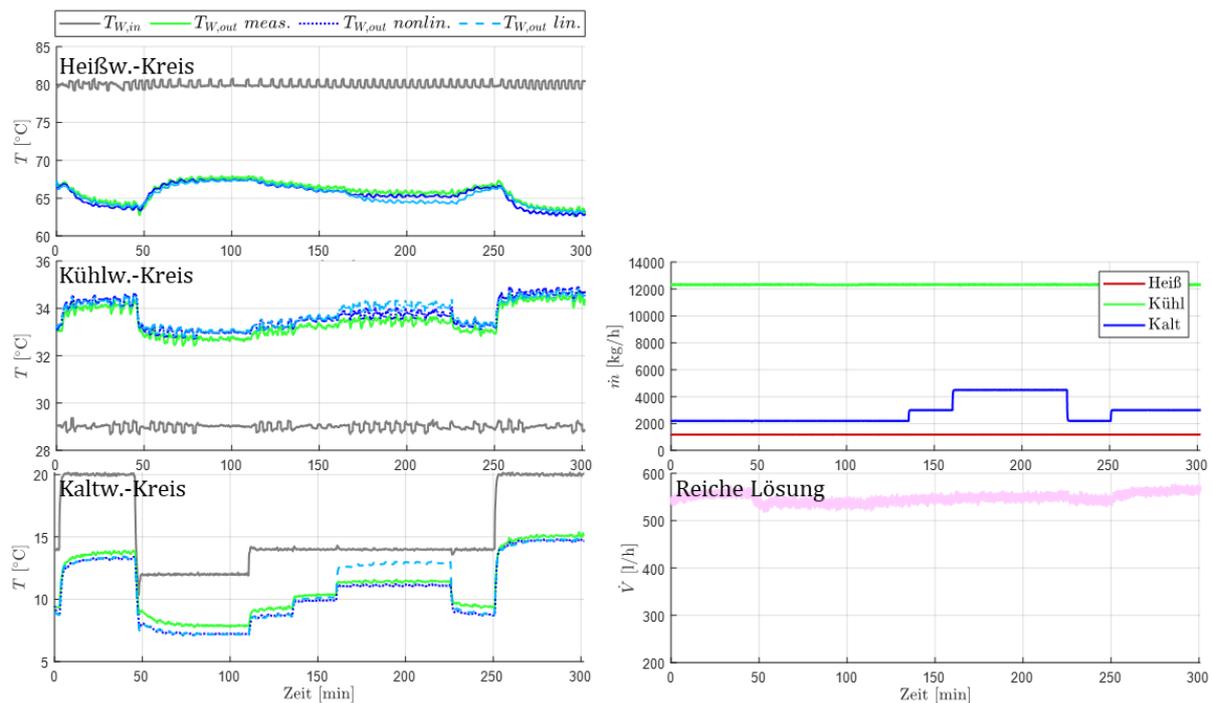


Abbildung 26: Beispielhafter Validierungsversuch für Reglerentwurfsmodell der EAW-AWPA

In Abbildung 27 ist ein beispielhafter Validierungsversuch für die PINK-AWPA (NH₃/H₂O) dargestellt. Ein- und Austrittstemperaturen sind wie in Abbildung 26 in den linken Diagrammen dargestellt, Massenströme im Heiß-, Kühl-, und Kaltwasserkreis sowie der reichen Lösung in den rechten Diagrammen (Dabei ist anzumerken, dass in der PINK-AWPA eine Membrankolbenpumpe als Lösungsmittelpumpe verbaut ist und der Massenstrom der reichen Lösung deshalb systembedingt stärker oszilliert als es beispielsweise bei der EAW-AWPA der Fall ist, in der eine Kreiselpumpe verbaut ist). Zusätzlich ist die Ventilstellung ϕ der Kältemitteldrossel gegeben, welche im Betrieb von einem AWPA-internen PI-Regler vorgegeben wird. In diesem Versuch wurden zunächst die Kühl- und Kaltwasser-Eintrittstemperatur und zum Schluss die Heißwasser-Eintrittstemperatur geändert. Man kann erkennen, dass beide Modelle das dynamische Verhalten der AWPA gut wiedergeben können, die stationäre Genauigkeit speziell für das lineare Modell für die ersten Betriebspunkte jedoch schlechter ist als für die Betriebspunkte am Ende des Versuchs. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass das hier dargestellte linearisierte Modell bei einer Drosselstellung von 50 % linearisiert wurde und deshalb der Betriebspunkt zwischen Minute 120 und 140 besser abgebildet werden kann als die übrigen Betriebspunkte. Wie eingangs erwähnt, ist stationäre Genauigkeit für Reglerentwurfsmodelle weniger wichtig als für Simulationsmodelle, weshalb auch die Reglerentwurfsmodelle für die PINK-AWPA als zufriedenstellend genau eingestuft werden können.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

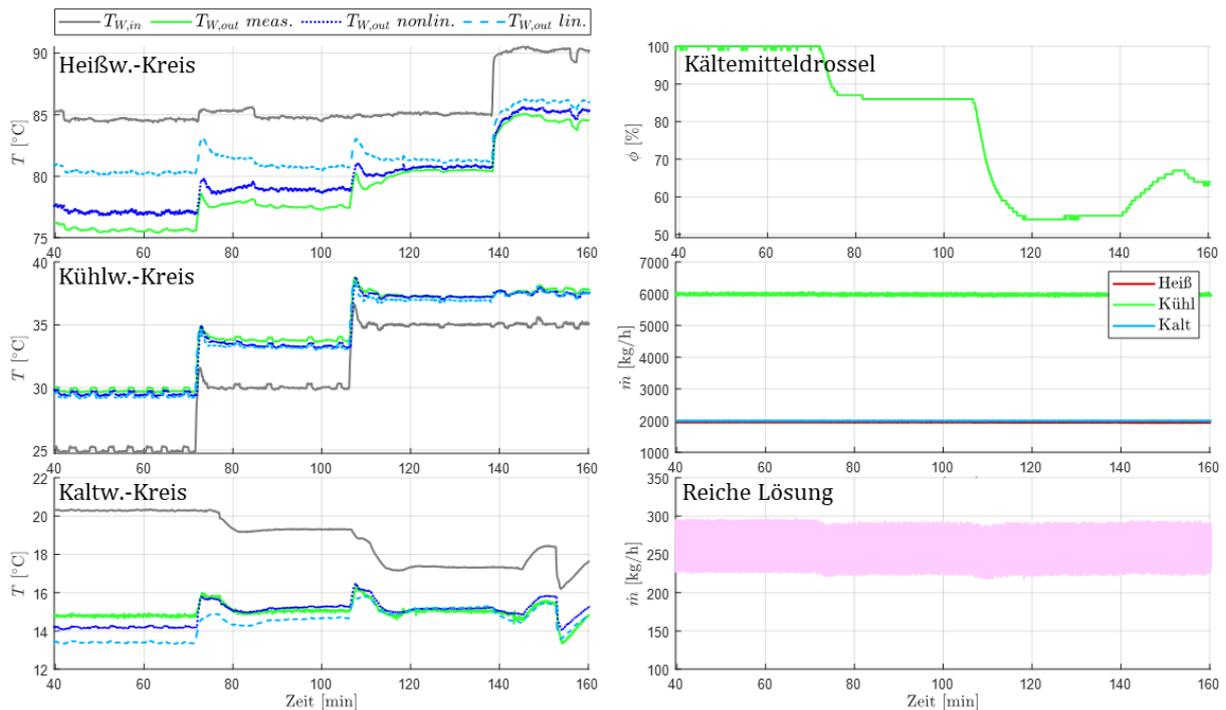


Abbildung 27: Beispielhafter Validierungsversuch für Reglerentwurfsmodell der PINK-AWPA

4.5 Validierungsergebnisse der neuen Regelungen

Für die Optimierung der neu entwickelten, modellbasierten Regelungen wurden zunächst einfache Versuche, wie z.B. Sprungversuche, untersucht und in weiterer Folge für die Validierung möglichst anspruchsvolle und realistische Lastprofile mithilfe der Hardware-in-the-Loop Simulation (HiL-Simulation) am Teststand untersucht. Hierfür sind im Folgenden beispielhaft Validierungsversuche für die Konfiguration „Solares Kühlen“ dargestellt, da AWPA dabei sowohl im Laufe eines Tages, als auch im Laufe des Jahres sehr starken Betriebsbedingungsschwankungen ausgesetzt sind und somit sowohl dynamische Laständerungen als auch der Betrieb in Teil- und Überlastsituationen (Betrieb bei Leistung kleiner bzw. größer als Nennlast) untersucht werden können. Zuerst wird der Aufbau der Konfiguration „Solares Kühlen“ erläutert, danach werden zwei beispielhafte Versuchsserien zur Untersuchung von Teil- und Überlastbetrieb diskutiert, bei denen die Möglichkeiten der neuen modellbasierten Mehrgrößen-Regelungen mit denen eines konventionellen Regelungsansatzes mit Einzel-PI-Reglern verglichen werden.

Konfiguration „Solares Kühlen“

Für die untersuchte Konfiguration „Solares Kühlen“ wurde im Heißwasserkreis eine Solaranlage und ein Schichtspeicher simuliert, im Kühlwasserkreis ein Kühlturm und im Kaltwasserkreis eine Gebäudekühlung und ein Schichtspeicher. Die Kühllast für das Gebäude wird zum einen durch Solareinstrahlung und zum anderen durch innere Kühllasten wie Personen und PCs verursacht. Abbildung 28 zeigt ein Schema dieser Konfiguration. Regelgrößen (Austrittstemperatur in Heiß- Kühl- und Kaltwasserkreis ($T_{out,heiß}$,

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

$T_{out,kühl}, T_{out,kalt}$) sind in Blau dargestellt, mögliche Stellgrößen (Volumenströme $\dot{V}_{heiß}$, $\dot{V}_{kühl}$, \dot{V}_{kalt} und $\dot{V}_{Lös}$) in Grün und Störgrößen (Eintrittstemperaturen $T_{in,heiß}$, $T_{in,kühl}$, $T_{in,kalt}$) in Grau.

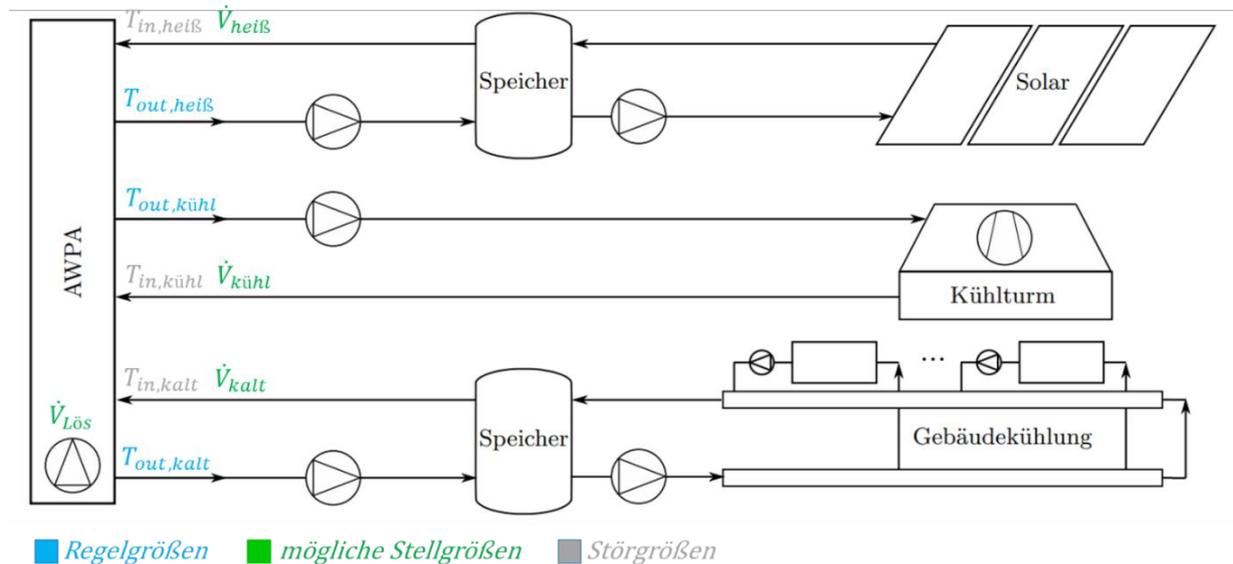


Abbildung 28: Schema der Konfiguration "Solares Kühlen"

4.5.1 Reglervalidierung in Teil- und Überlastsituationen

In der Folge werden beispielhaft zwei Validierungsversuchsserien diskutiert: Zuerst wird der Betrieb von AWPA im Teillast-Fall (*geforderte Leistung kleiner als Nennleistung*, z.B. bei AWPA-Betrieb an einem „Übergangstag“ (Frühling/Herbst)) gezeigt. Danach wird der Betrieb im Überlast-Fall (*geforderte Leistung größer als Nennleistung*, z.B. AWPA-Betrieb an Sommertag mit Gewitter am Nachmittag zur Simulation von schlechter Rückkühlung) gezeigt. In beiden Versuchsserien wurden jeweils der Betrieb mit konventionellen Einzel-PI-Reglern, der Betrieb mit dem neuen Zustandsregler-Ansatz und der Betrieb mit dem neuen MPC-Ansatz verglichen. Dabei wurde so vorgegangen, dass zuerst die Einzel-PI-Regler in der HiL-Konfiguration getestet wurden und dann die dabei entstandenen Störgrößenverläufe als Lastprofil für die Validierung der beiden neuen Regelungsansätze verwendet worden sind.

Für die PI-Regler wurden jeweils die Volumenströme in den drei Hydraulikkreisen als Stellgröße verwendet (d.h. PI-Regler 1 regelt Heißwassertemperatur $T_{out,heiß}$ mit dem Volumenstrom $\dot{V}_{heiß}$, PI-Regler 2 entsprechend den Kühlwasserkreis und PI-Regler 3 den Kaltwasserkreis). Die vierte mögliche Stellgröße (Volumenstrom der reichen Lösung $\dot{V}_{Lös}$) wurde konstant auf den Maximalvolumenstrom gesetzt, da damit höhere Leistungen erzielt werden können. Für die neuen Regelungsansätze wurden zusätzlich zu den Volumenströmen in den drei Hydraulikkreisen auch der Volumenstrom der reichen Lösung $\dot{V}_{Lös}$ als Stellgröße verwendet. Sie wurden mit der folgenden Priorisierung der Regelgrößen (siehe Abschnitt 3.3.3) parametrisiert:

1. Kaltwasseraustrittstemperatur $T_{out,kalt}$, Sollwert: 10 °C
2. Heißwasseraustrittstemperatur $T_{out,heiß}$, Sollwert: Eintrittstemperatur – 9 K
3. Kühlwasseraustrittstemperatur $T_{out,kühl}$, Sollwert: Eintrittstemperatur + 4 K

4.5.1.1 Validierungsversuchsserie für Teillast-Situation

Für diese Versuchsserie wurde ein Lastprofil gewählt, das dem Betrieb an einem Übergangstag mit geringer Kühllast entspricht. In Abbildung 29 sind die Versuchsergebnisse für den Betrieb mit den Einzel-PI-Reglern dargestellt. In den linken Diagrammen sind jeweils die gemessenen Ein- und Austrittstemperaturen sowie die Sollwerte für die Austrittstemperaturen dargestellt. In den rechten Diagrammen sind die Volumenströme in den drei Hydraulikkreisen und der reichen Lösung dargestellt. Bei Betrachtung der Stellgrößen ist erkennbar, dass im Kühlwasserkreis zu Beginn des Versuchs (bis ca. Stunde 2,5) und im Kaltwasserkreis ab Stunde 2 Stellgrößenbeschränkungen vorliegen, welche auch in den entsprechenden Abweichungen der Regelgrößen erkennbar sind. Abseits dieser Stellgrößenbeschränkungen ist die Regelgüte zufriedenstellend. Im Kühlwasserkreis sind die Regelabweichungen größer als in den übrigen Kreisen, da die PI-Parameter hier deutlich langsamer gewählt wurden (dies ist die am niedrigsten priorisierte Regelgröße). Die wichtigste Erkenntnis aus diesem Versuch ist, dass die begrenzte Teillastfähigkeit dieses Regelungsansatzes zu langanhaltenden Stellgrößenbeschränkungen und daraus folgend zu Regelfehlern führt.

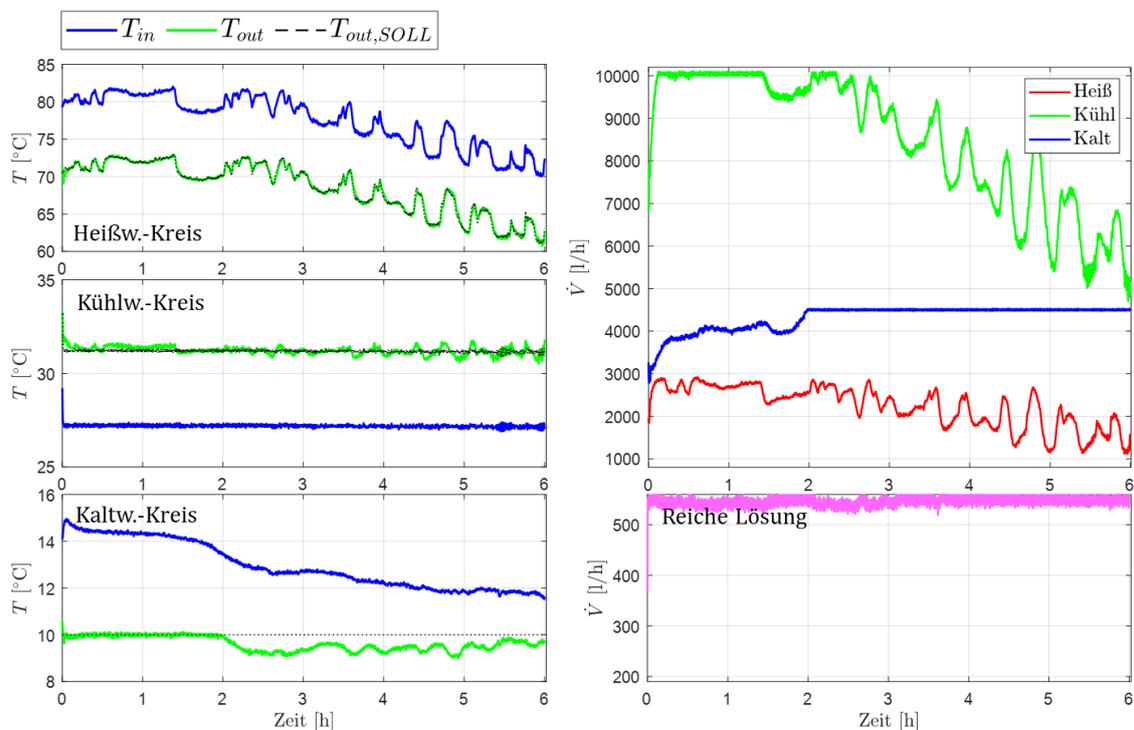


Abbildung 29: Validierungsversuch mit Einzel-PI-Reglern für Teillast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In Abbildung 30 ist derselbe Versuch für den Betrieb mit dem Zustandsregler-Ansatz dargestellt. Man kann erkennen, dass der Regler auch die vierte Stellgröße $\dot{V}_{L\ddot{o}s}$ verwendet, um die Leistung der AWPA zu reduzieren und damit auch in Teillast alle Regelgrößen, insbesondere die als am höchsten priorisierte Kaltwasseraustrittstemperatur, halten kann und keine Stellgrößenbeschränkungen auftreten.

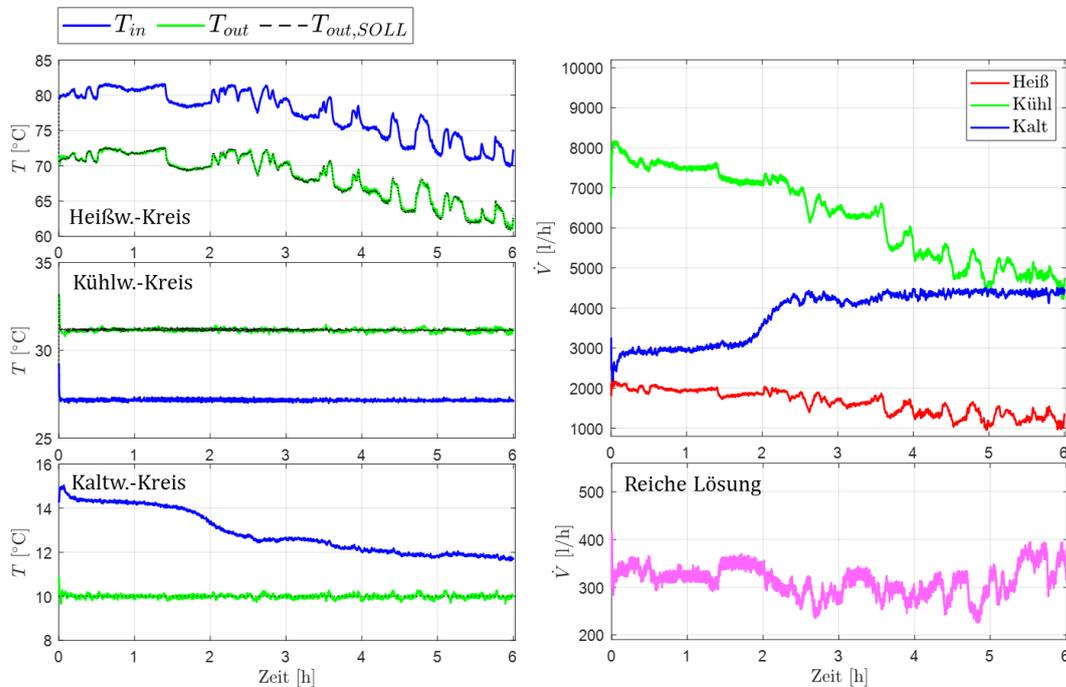


Abbildung 30: Validierungsversuch mit Zustandsregleransatz für Teillast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

In Abbildung 31 ist derselbe Versuch, diesmal jedoch für den Betrieb mit dem MPC-Ansatz, dargestellt. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich zu denen bei Betrieb mit Zustandsregler (vgl. Abbildung 30). Der Regler bewirkt ebenso, dass selbst in starker Teillast alle Regelgrößen, insbesondere die als am höchsten priorisierte Kaltwasseraustrittstemperatur, gehalten werden und keine Stellgrößenbeschränkungen auftreten. Die etwas größeren Regelfehler im Kühlwasserkreis sind durch eine in diesem Versuch noch niedrigere Priorisierung bedingt.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

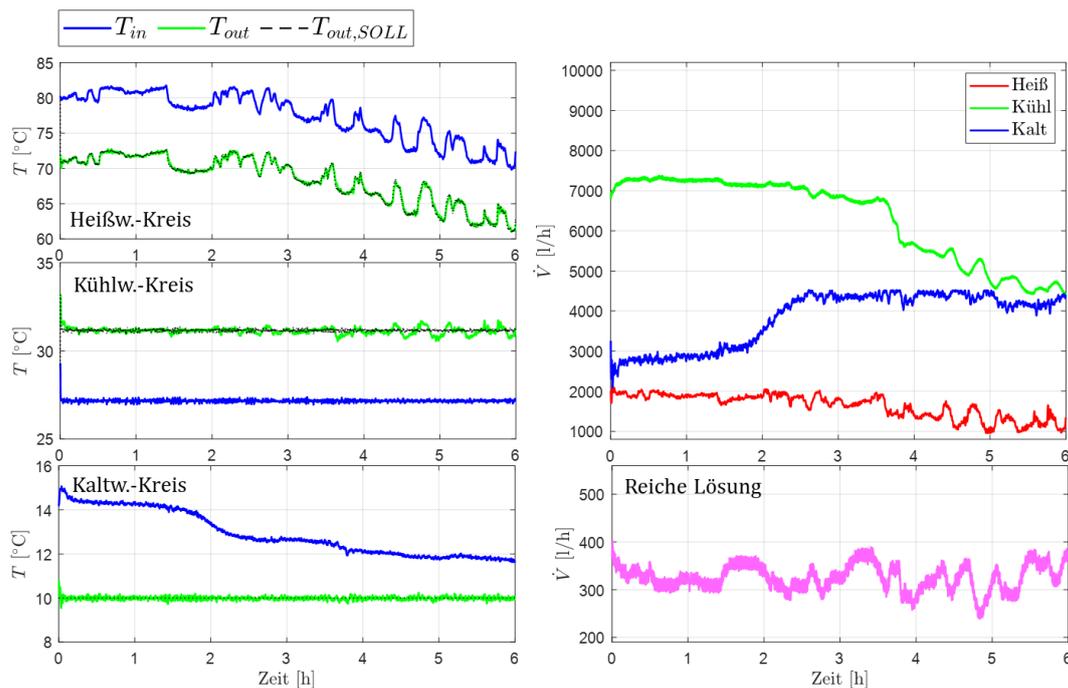


Abbildung 31: Validierungsversuch mit MPC-Regler für Teillast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

4.5.1.2 Validierungsversuchsserie für Überlast-Situation

Für diese Versuchsserie wurde ein Lastprofil gewählt, das dem Betrieb an einem Sommertag mit hoher Kühllast entspricht. Zusätzlich wurden gegen Ende des Versuchs die Auswirkungen eines Gewitters simuliert, welches durch die steigende Luftfeuchtigkeit zu einer Verschlechterung der Rückkühlung und somit zu einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit der AWPA führt, was in der Folge als „Überlast-Situation“ bezeichnet wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Regelung zwar die Steuerbarkeit in Überlast-Situationen verbessern kann, es aber nicht möglich ist, nur durch Regelung beispielsweise höhere Leistungen zu generieren, da dies durch die Bauform bzw. Baugröße der AWPA begrenzt ist und somit aus physikalischen Gründen nicht möglich ist.

In Abbildung 32 sind die Versuchsergebnisse für den Betrieb mit den Einzel-PI-Reglern dargestellt. Ab Stunde 5 ist erkennbar, dass die Rückkühlung deutlich schlechter wird, was in steigenden Kühlwassereintrittstemperaturen resultiert. Dadurch verschlechtert sich die Leistung der AWPA und die Kaltwasseraustrittstemperatur kann nicht mehr gehalten werden.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

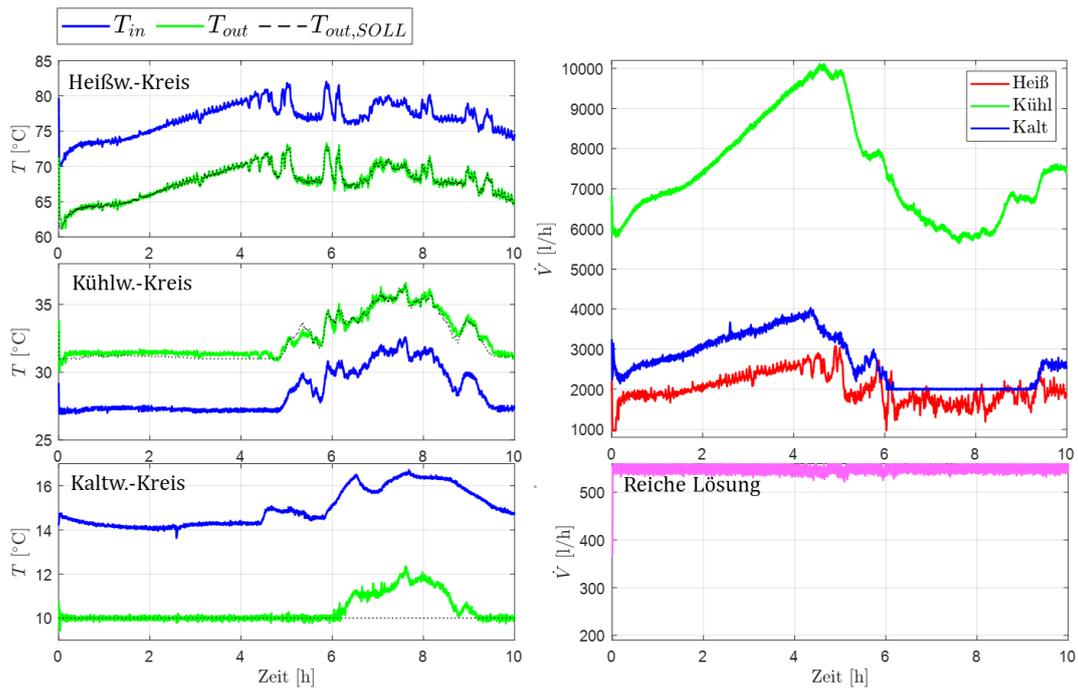


Abbildung 32: Validierungsversuch mit Einzel-PI-Reglern für Überlast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

In Abbildung 33 ist derselbe Versuch für den Betrieb mit dem Zustandsregler-Ansatz dargestellt. Man kann erkennen, dass der Regler hier nur geringfügig besser abschneidet als die PI-Regler. Dies ist dadurch bedingt, dass beim Regelungsansatz mit PI-Reglern die vierte Stellgröße $\dot{V}_{L\ddot{o}s}$ bei Maximalvolumenstrom betrieben wird, und damit dieselbe Situation, wie für den Zustandsregler-Ansatz bei Überlast, besteht. Leichte Verbesserungen können hier jedoch mit dem MPC-Ansatz erzielt werden (siehe nächster Absatz).

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

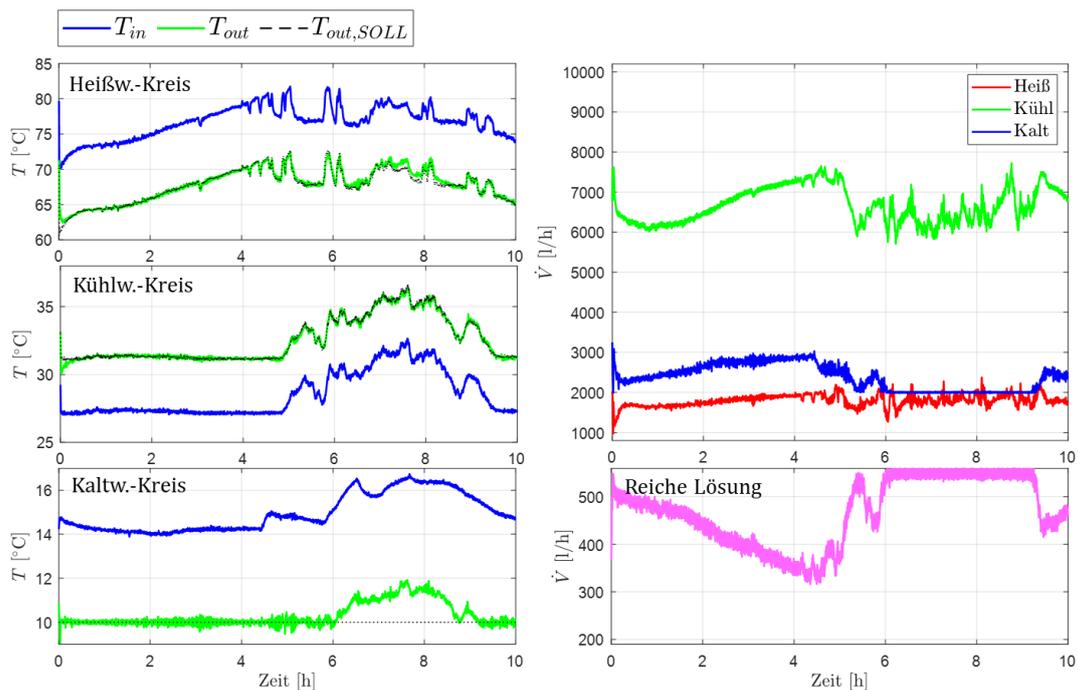


Abbildung 33: Validierungsversuch mit Zustandsregleransatz für Überlast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

In Abbildung 34 ist derselbe Versuch, allerdings für den Betrieb mit dem MPC-Ansatz, dargestellt. Die Ergebnisse sind zu Beginn des Versuchs sehr ähnlich zu denen für den Betrieb mit Zustandsregler, vgl. Abbildung 33 (Anm.: Die Abweichungen bei ca. Stunde 1,5 wurden durch eine kurze Unterbrechung der Netzwerkverbindung bei der Versuchsdurchführung verursacht und nicht durch die Regelung). Im zweiten Teil des Versuches, in dem auch die Überlast-Situation auftritt (insbes. zwischen Stunde 6 und 8,5), ist der Regelfehler im Kaltwasserkreis jedoch etwas geringer als für die beiden Regler zuvor, da die Priorisierung der Regelgrößen (Kaltwasser-Austrittstemperatur soll in diesem Beispiel am wichtigsten sein) mit dem Regelungsansatz mit MPC (vgl. Abschnitt 3.3.3.2) sehr gut umgesetzt werden kann: Vereinfacht ausgedrückt nimmt der MPC Regler bewusst eine größere Regelabweichung im Kühlwasserkreis (am niedrigsten priorisiert) in Kauf und erhöht den Kühlwasservolumenstrom, um die Regelabweichung im Kaltwasserkreis (am höchsten priorisiert) zu verringern.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

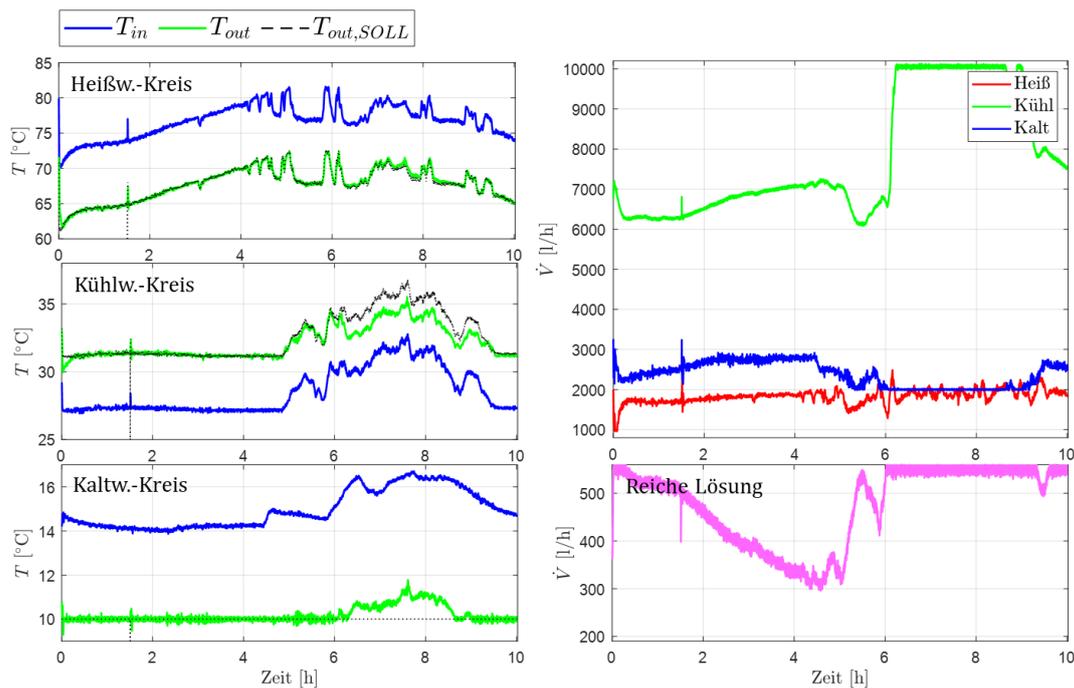


Abbildung 34: Validierungsversuch mit MPC-Regler für Überlast-Situation, Konfiguration „Solares Kühlen“, H₂O/LiBr AWPA

4.5.2 Fazit und Schlussfolgerungen für neu entwickelte Regelungen

Mit den beiden in HPC neu entwickelten Regelungsansätzen wurden zwei Möglichkeiten gefunden, mit denen AWPA in einem breiteren Betriebsbereich betrieben werden können. Je nach Anwendungsbereich kann entweder die erste, einfachere Methode basierend auf Zustandsregler zum Einsatz kommen, die auf allen branchenüblichen SPSen betrieben werden kann, oder die optimierungsbasierte MPC Methode, die zusätzliche Möglichkeiten, wie z.B. Priorisierung von Regelgrößen und die Berücksichtigung zukünftiger Führungs- und Störgrößen, bietet. In Abbildung 35 sind die Eigenschaften der neu entwickelten Regelungsansätze im Vergleich zu einem Regelungsansatz mit herkömmlichen Einzel-PI-Reglern in Form eines Netzdiagramms dargestellt. Je höher die Zahl in einer bestimmten Kategorie, desto besser die Eigenschaft des jeweiligen Reglers. Der MPC-Regler ermöglicht beispielsweise sehr gute Teillastfähigkeit, benötigt aber spezielle SPSen, weshalb die Implementierung vergleichsweise schwieriger ist.

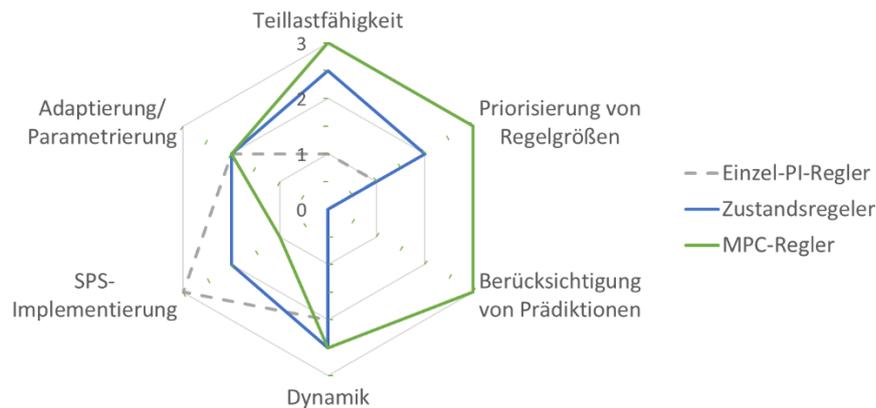


Abbildung 35: Übersicht der Eigenschaften verschiedener Regelungsansätze für AWPA

4.6 Untersuchungen und Analysen zur weiteren Umsetzung und Verwertung der Projektergebnisse

Zusätzlich zur Entwicklung detaillierter Simulationsmodelle (vgl. Abschnitt 3.2) und modellbasierter Mehrgrößen-Regler für AWPA (vgl. Abschnitt 3.3) wurde im Projekt außerdem untersucht, wie diese Projektergebnisse weiter umgesetzt und verwertet werden können. Dazu sind die folgenden Fragestellungen untersucht worden:

- Welche Schritte sind nötig, um die neu entwickelten Regelungen an andere Anlagen anzupassen?
- Welche Anwendungen sind durch die neuen Regelungen nun besser oder sogar zusätzlich möglich?
- Wie können die Ergebnisse auch für die Konzeptionierung und Planung von Umsetzungsprojekten verwendet werden?

4.6.1 Anpassung der neu entwickelten Regelungen an andere Anlagen

Die in HPC neu entwickelten Regelungen (vgl. Abschnitt 3.3.3) wurden mithilfe der in Abschnitt 3.1 erwähnten H₂O/LiBr-AWPA der Firma EAW und der NH₃/H₂O-AWPA der Firma PINK entwickelt und validiert, allerdings sind die Regelungen so aufgebaut, dass sie möglichst einfach auch für andere Anlagen angepasst werden können. Die notwendigen Schritte für diese Anpassungen hängen von den Unterschieden zu den in HPC untersuchten AWPA ab und werden in der Folge diskutiert:

a) Anderer Betriebsbereich (z.B. andere Volumenströme in Hydraulikkreisen aufgrund anderer Pumpen):

Bei einem anderen Betriebsbereich ist es sinnvoll, für die Linearisierung des Reglerentwurfsmodells (Abschnitt 3.3.2.2) den Betriebspunkt so zu wählen, dass er wieder möglichst in der Mitte des neuen Betriebsbereichs liegt. Das Reglerentwurfsmodell und die Regelung selbst bedürfen keiner Änderungen.

b) Andere Regelaufgabe (untersch. Regel-, Stell- und Störgrößen und/oder andere Dynamik/Priorisierung)

Die beiden neu entwickelten Regelungen sind so aufgebaut, dass sie prinzipiell für verschiedenste Regel-, Stell- und Störgrößenkombinationen eingesetzt werden können. Die dafür eingesetzten Reglerentwurfsmodelle für H₂O/LiBr- und NH₃/H₂O-AWPA beschreiben den dynamischen Zusammenhang zwischen allen Eingangsgrößen (Eintrittstemperaturen und Durchfluss in Hydraulikkreisläufen, Durchfluss der reichten Lösung) und den Ausgangsgrößen (Austrittstemperaturen und Leistungen in den Hydraulikkreisläufen). Beim Reglerentwurf kann dann einfach durch Zuweisung angegeben werden, welche Eingangsgrößen als Stellgrößen vom Regler verwendet werden können und welche als Störgrößen zu betrachten sind bzw. welche Ausgangsgrößen Regelgrößen sind.

Zur Anpassung der Dynamik können bei beiden Ansätzen die Gewichtungsmatrizen für Stell- und Regelgrößen entsprechend angepasst werden. Dabei bewirkt eine Erhöhung der Einträge der Stellgrößen-Gewichtungsmatrix eine stärkere „Bestrafung“ der Stellgrößen und somit einen langsameren Regler. Umgekehrt bewirkt eine Erhöhung der Einträge der Regelgrößen-Gewichtungsmatrix eine stärkere „Bestrafung“ von Regelfehlern und somit einen schnelleren Regler. Zusätzlich kann dem Regler durch die Anpassung einzelner Matrizeneinträge vorgegeben werden, dass entsprechend einzelne Stellgrößen langsamer oder schneller eingesetzt werden sollen bzw. einzelne Regelgrößen langsamer oder schneller ausgeregelt werden sollen.

c) AWPA anderer Größe, aber ähnlicher Bauform

Beim Einsatz der in HPC entwickelten Regelungen für neue AWPA anderer Größe muss das in den Reglern eingesetzte Reglerentwurfsmodell (vgl. 3.3.2) entsprechend skaliert werden. Die Modellstruktur der Reglerentwurfsmodelle wurde so gewählt, dass sie möglichst modular ist und auf physikalischen Zusammenhängen beruht, wodurch Anpassungen relativ einfach erfolgen können: Zur Skalierung des Reglerentwurfsmodells werden verschiedene Modellparameter (z.B. Füllmenge oder Parameter von Wärmeübertrager-Submodellen) basierend auf dem Verhältnis $\varphi_{\dot{Q}}$ der Kälteleistung der beiden AWPA (Kälteleistung der neuen AWPA (\dot{Q}_{neu}) im Verhältnis zur Kälteleistung der AWPA aus HPC (\dot{Q}_{HPC})) skaliert. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 36 beispielhaft für die Effektivität des Verdampfers ε_E , welche im Reglerentwurfsmodell zur Modellierung der Verdampferleistung verwendet wird, dargestellt. Jene Parameter, die mit baugrößenabhängigen Größen wie Massenströmen multipliziert werden, werden skaliert, während die übrigen unverändert übernommen werden.

Skalierung des Verdampfer-Effektivität ε_E von Referenz-AWPA aus HPC auf neue AWPA durch Verwendung eines Skalierungsfaktors $\varphi_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_{neu}}{\dot{Q}_{HPC}}$ (Verhältnis der Kälteleistungen):

Referenz-AWPA aus HPC: $\varepsilon_{E,HPC} = K_{E1} - K_{E2} \dot{m}_{W,E}$



Neue/andere AWPA: $\varepsilon_{E,neu} = K_{E1} - \frac{K_{E2}}{\varphi_{\dot{Q}}} \dot{m}_{W,E,neu}$

Abbildung 36: Beispiel für Skalierung von Parametern basierend auf Kälteleistungsverhältnis zwischen AWPA aus HPC und neuer AWPA

Diese Vorgehensweise wurde anhand einer H₂O/LiBr AWPA mit einer Nenn-Kälteleistung von ca. 1.750 kW, die zur Kühlung einer Schule in Arizona, USA, eingesetzt wird, getestet und anhand von Messdaten verifiziert. Als Referenz wurde das Reglerentwurfsmodell der EAW-AWPA verwendet, welches für die Betriebsbedingungen im Datenblatt der 1.750-kW-AWPA eine Kälteleistung von ca. 25 kW aufweist. Der Skalierungsfaktor beträgt somit ca. 70. Die mit dieser einfachen Skalierung erzielbare Modellgenauigkeit ist in Abbildung 37 für einen beispielhaften Betriebstag dargestellt. In den linken Diagrammen sind wie zuvor in Abbildung 26 und Abbildung 27 die gemessenen Eintrittstemperaturen sowie die gemessenen und simulierten Austrittstemperaturen in den drei Hydraulikkreisen dargestellt. In den rechten Diagrammen sind die Massenströme in den drei Hydraulikkreisen und der reichen Lösung dargestellt. Man kann erkennen, dass sowohl das nichtlineare als auch das linearisierte Reglerentwurfsmodell das dynamische Anlagenverhalten trotz variierender Betriebsbedingungen sehr gut wiedergeben können. Dieses Ergebnis stellt eine wichtige Erkenntnis für die Wiederverwendbarkeit der in HPC entwickelten Reglerentwurfsmodelle und somit auch der modellbasierten Regelungen dar, da damit (zumindest für diese AWPA) gezeigt werden konnte, dass die Ansätze sehr einfach allein mit Informationen aus dem Datenblatt auch für AWPA deutlich anderer Größe angepasst werden können.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

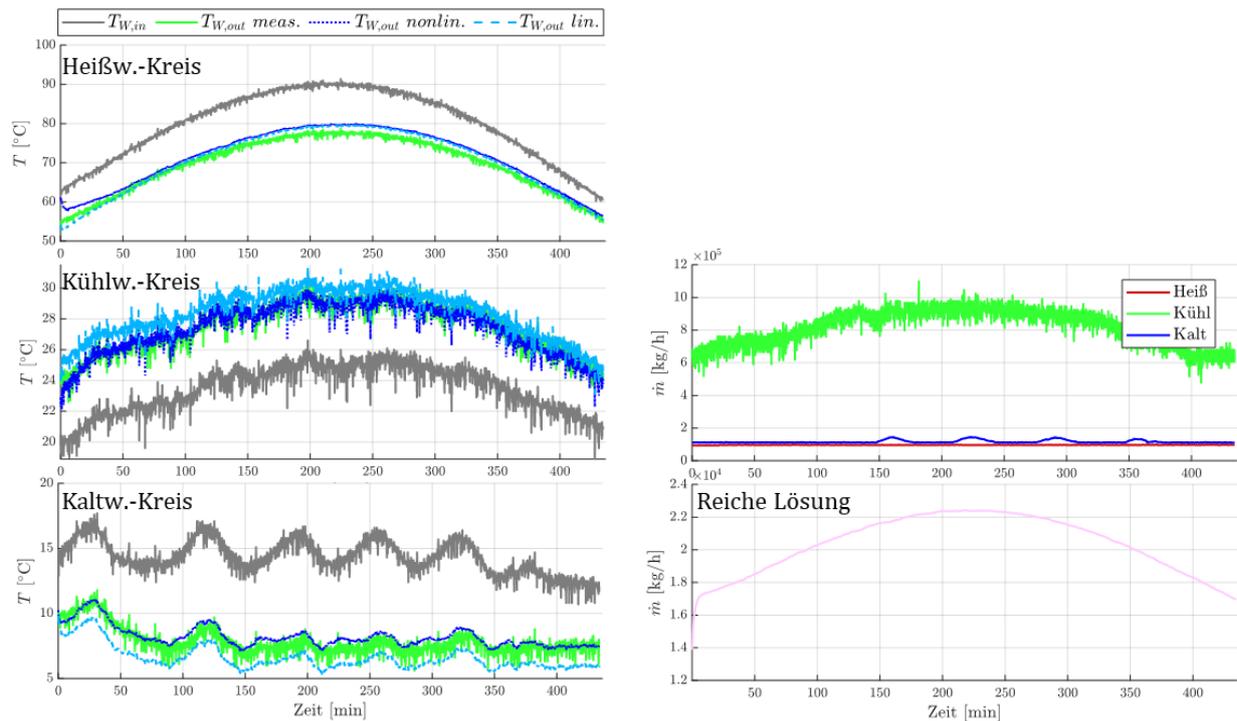


Abbildung 37: Vergleich des nichtlinearen und linearen skalierten Reglerentwurfmodells einer H₂O/LiBr-AWPA mit ca. 1.750 kW Nennkälteleistung mit Messdaten

d) AWPA anderer Bauform (z.B. mehrstufige Anlage, andere Wärmeübertragerbauart)

Sollte sich die Bauart der AWPA, für die die Regelungen angepasst werden sollen, deutlich von den in HPC untersuchten AWPA unterscheiden, muss auch die Struktur des Reglerentwurfmodells angepasst werden. Dafür kann entweder aus den Submodellen für die einzelnen Komponenten (Generator, Kondensator etc.) des Reglerentwurfmodells ein neues Modell zusammengesetzt werden oder – sollte dies nicht zu ausreichender Genauigkeit führen – eine Neuparametrierung des Reglerentwurfmodells mithilfe des geometriebasierten Simulationsmodells durchgeführt werden.

4.6.2 Analyse der durch das verbesserte Regelverhalten möglichen zusätzlichen Anwendungen

Mit den neuen Regelungen können viele Anwendungen mit AWPA einfacher und besser umgesetzt werden, welche in der Folge anhand ihres Potentials diskutiert werden. Eine Analyse des österreichischen Gesamtenergieverbrauchs zeigt zwei maßgebliche Sektoren mit hohem Multiplikationspotential für neue Lösungen zur Integration von AWPA auf - diese sind vor allem **Raumheizung** und **Prozesswärme** (siehe Abbildung 38).

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

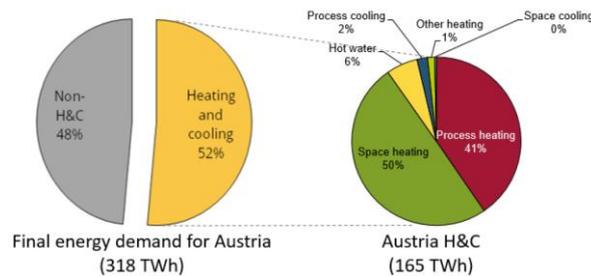


Abbildung 38: Zusammensetzung des österreichischen Endenergiebedarfs sowie Detailansicht des Endenergiebedarfs für Heiz- und Kühlanwendungen [33]. (Rundung auf ganze Prozentpunkte)

Anwendungen für Raumheizung und Kühlung in Fernwärme- und Fernkältenetzen

Im Bereich der **Raumheizung** spielen vor allem **Fernwärme-Anwendungen** eine große Rolle, da hier mit zentralen Anlagen eine hohe Zahl an Abnehmern versorgt werden kann. Bisher ungenutzte Wärmequellen, wie stark volatile Abwärmen bzw. erneuerbare Energien, können dadurch mit AWPAs in Fernwärmesystemen genutzt werden. Gleichzeitig erlauben die neuen Regelungsansätze, gekoppelt mit zusätzlichen Stellgrößen (interner Lösungsmittel Durchfluss), bei H₂O/LiBr AWPAs ein stabiles und sicheres Vordringen in Temperaturbereiche, die auch für eine direkte Einspeisung in den Fernwärmeverlauf von, in Österreich typischen, Hochtemperaturnetzen (80 - 130 °C) notwendig sind. Diese Eigenschaften konnten im gegenständlichen Projekt HPC aufgrund der physikalischen Test-Rahmenbedingungen noch nicht validiert werden, das Projektkonsortium sieht aber großes Potential für die entwickelten Regelungsalgorithmen in diesem Feld. Durch diese beiden Eigenschaften eröffnen sich zusätzliche Potentiale zur Einbindung von AWPAs in Fernwärmenetzen, sowohl auf Quellenseite (reduzierte Empfindlichkeit für schwankende externe Betriebsparameter) als auch auf Senkenseite (erhöhte Vorlauftemperaturen). Im Jahr 2018 wurden 26 % aller Wohnungen in Österreich mit Fernwärme beheizt. Ca. 55 % des gesamten Fernwärme-Absatzes erfolgen in den neun größten österreichischen Versorgungsgebieten (Wien, Graz, Linz, Salzburg, St. Pölten, Klagenfurt, Liez, Wels, Villach) laut [34]. Gleichzeitig könnte durch Nutzung der Abwärme der 53 größten Betriebe 49% des Raumheizungsbedarfs in Österreich gedeckt werden (38 TWh), siehe [33].

Neben dem Einsatz zu Heizzwecken können AWPAs auch zur thermisch angetriebenen **Kälteerzeugung** für die Raumkühlung eingesetzt werden. Die International Energy Agency (IEA) [35] geht von einer Verdreifachung des globalen Energiebedarfs zur Raumkühlung in den nächsten 30 Jahren aus, bzw. prognostiziert einen Anstieg von 2020 TWh/a im Jahr 2016 auf 6200 TWh/a im Jahr 2050. Raumkühlung ist im europäischen Süden bereits jetzt notwendig und verzeichnet einhergehend mit steigenden mittleren Jahrestemperaturen konstantes Wachstum, und zwar auch in Österreich (Stand 2018 ca. 2 TWh/a). Bei der Raumkühlung im Wohnbereich wird dabei von einem sechsmal höheren Bedarf bis 2050 ausgegangen [33]. Um die, durch die zunehmende Elektrifizierung bereits belasteten, Strominfrastrukturen zu entlasten, wird das Potential der thermische getriebenen Kälteerzeugung mit AWPAs in den kommenden Jahren signifikant zunehmen.

Anwendungen in Industrie und Gewerbe

In Österreich werden zwei Drittel der eingesetzten Primärenergie in der Industrie für Wärmeanwendungen benötigt, bis zu 70 % der eingesetzten Wärme gehen dabei über Abluft oder Abwasser verloren [36]. In Abbildung 39 ist der Energiebedarf der Industrie in der EU28 nach Temperaturniveaus gegliedert dargestellt. Die aktuell eingesetzten Energieträger sind farblich kodiert.

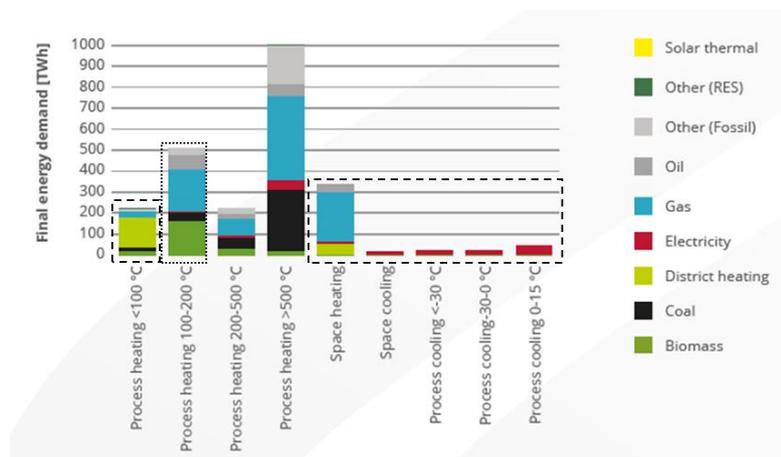


Abbildung 39: Endenergiebedarf der Industrie in der EU28, gegliedert nach Temperaturniveaus und farblich kodiert nach momentan eingesetzten Energieträgern [37]. Strichlierte Bereiche sind für die im Projekt primär behandelten einstufigen Maschinen mit maximalen Antriebstemperaturen von bis zu 95 °C erreichbar. Punktiert Bereiche sind mit Gas befeuerten H₂O/LiBr-Anlagen erreichbar.

In der Grafik sind jene Temperaturbereiche, in denen AWPA (abhängig von der jeweiligen Quelle) im Rahmen ihrer physikalischen Betriebsgrenzen zur internen Versorgung von Industriebetrieben eingesetzt werden können, hervorgehoben. Strichlierte Bereiche sind für die im Projekt primär behandelten einstufigen Anlagen mit maximalen Antriebstemperaturen von bis zu 95 °C erreichbar. Punktiert sind Bereiche dargestellt, welche mit Gas befeuerten H₂O/LiBr-Anlagen erreicht werden können. Vor allem durch das effiziente Einhalten kritischer Prozessparameter, wie z.B. der Rücklaufstemperatur zu Abwärme-Quellen oder Vorlaufstemperaturen für Wärme/Kälteabnehmer, kann eine interne Einbindung in Industriebetriebe erheblich erleichtert werden.

Abgesehen von der internen Nutzung ist auch die Auskopplung und externe Nutzung von industrieller Abwärme in Österreich von Bedeutung. Laut [38] fällt in Industriebetrieben Abwärme großteils auf einem Niveau an, das intern nicht mehr nutzbar ist (< 80°C) aber als Quelle für Wärmepumpen durchaus attraktiv sein kann. Eine Erhebung zum Potential der österreichischen Industrieabwärme aus 2013 ergab, dass bei externer Auskopplung die Wärmemenge ausreicht, um ca. 70.000 Haushalte direkt und weitere 75.000 Haushalte über Fernwärmenetze mit Vorlaufstemperaturen von 50 °C bis 70 °C zu versorgen. Der größte Teil des industriellen Abwärme Potentials (75 % oder 5.300 GWh/a) liegt dabei auf einem Temperaturniveau zwischen 20 °C und 35 °C vor und fällt in näherer Umgebung der österreichischen Ballungsräume an. In [39] wurden anhand von 45 Beispielen Abwärme-Auskopplungen in österreichischen Industriebetrieben untersucht. Dabei zeigte sich, dass

momentan lediglich 2% des nationalen Industrie Endenergiebedarfs ausgekoppelt und weitergenutzt werden, es besteht hier also ein großes Potential für weitere Maßnahmen.

4.6.3 Verwendung der Projektergebnisse für Konzeptionierung und Planung von Umsetzungsprojekten

Die entwickelte Regelung hat als solches bereits ein großes Potential, den Betrieb bestehender Anlagen zu verbessern bzw. für neue Anwendungsfälle zu ermöglichen. Das zugrundeliegende Simulationsmodell kann jedoch ebenso entscheidenden Mehrwert für Absorptionswärmepumpenprojekte leisten - vor allem für Simulationsstudien zur Konzeptionierung sowie als Unterstützung bei Inbetriebnahme und Fehlersuche können die erarbeiteten Ergebnisse sehr gut genutzt werden.

Nutzung und Verwertung für Konzeptionierung und Systemdesign:

Für die Konzeptionierung können vor allem statische Simulationsmodelle (welche aus den dynamischen (vgl. Abschnitt 3.2) abgeleitet werden können) dabei unterstützen, abzuschätzen, welche Leistungen beispielsweise in verschiedenen Betriebspunkten benötigt werden, um damit die Größe und Kosten der notwendigen Komponenten grob abzuschätzen. Für das Systemdesign kann ein statisches Simulationsmodell außerdem für Sensitivitätsanalysen verwendet werden und als Basis für die Entwicklung von (einfachen) dynamischen AWPA-Modellen (z.B. für Langzeitsimulationen) eingesetzt werden.

Nutzung und Verwertung für Auslegung und Inbetriebnahme:

Für die Auslegung können einerseits die modellbasierten Regelungsansätze (vgl. Abschnitt 3.2) und die dynamischen Simulationsmodelle (vgl. Abschnitt 3.3.3) eingesetzt werden. Das zeitlich hoch aufgelöste Simulationsmodell kann hier zur detaillierten Untersuchung dynamischer Betriebspunktwechsel verwendet werden und ist auch für den simulationsgestützten Reglerentwurf notwendig, bei dem bereits vor der Inbetriebnahme geeignete Reglerparameter ermittelt werden. Damit kann erstens bei der Inbetriebnahme selbst wertvolle Zeit vor Ort gespart werden und zweitens der Zeitaufwand insgesamt für die Regler-Parametrierung reduziert werden, da die Simulationsmodelle deutlich schneller als Echtzeit arbeiten.

Die dynamischen Simulationsmodelle können außerdem für die Einbettung in Gesamtsystem-Simulationen verwendet werden, um in der Auslegung auch bereits das dynamische Verhalten des Gesamtsystems und die Interaktion der einzelnen Komponenten zu untersuchen. Damit kann einerseits die Regelung entsprechend ausgelegt werden und andererseits Komponenten wie Speicher mit mehr Planungssicherheit kleiner gestaltet werden.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Die in HPC generierten Projektergebnisse können bereits jetzt in vielen Projektphasen Anwendung finden und haben gezeigt, dass die Verwendung von AWPA-Modellen für Simulations- und Regelungszwecke große Vorteile hat, da damit z.B.

- Größere Planungssicherheit möglich wird,
- Auch dynamische Betriebspunktwechsel untersucht werden können,
- Zeitaufwändige Arbeiten wie Regler-Parametrierung bereits sehr gut in der Engineering-Phase durch simulationsgestützten Reglerentwurf schnell und vor allem auch sicher durchgeführt werden können,
- Detaillierte Simulationsmodelle einen Blick in die AWPA ermöglichen, ohne auf umfassende Messtechnik zurückgreifen zu müssen,
- Ein deutlich größerer Betriebsbereich mit modellbasierten Mehrgrößenreglern möglich ist.

Die Projektergebnisse stellen somit einen wichtigen Schritt zur Optimierung bestehender Planungstools in den zuvor besprochenen Projektphasen dar. Mit zunehmender Einbindung von Modellen in Projektentwicklung, Umsetzung und Betrieb wird die Anzahl an Schnittstellen weniger, was eine geringere Fehleranfälligkeit, geringeren Informationsverlust und bessere Qualität bedeuten kann. Schlussendlich soll die zunehmende Einbindung von Modellen dazu führen, dass einzelne Schritte übersichtlicher werden, methodisch für verschiedene Konfigurationen angepasst werden können und dass das Zusammenspiel zwischen den einzelnen Projektphasen strukturierter genutzt werden kann.

5 Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick

Das Projekt HPC hat wichtige Erkenntnisse über den dynamischen Betrieb von AWPA geliefert, sowohl im Bereich der experimentellen Analyse, als auch der dynamischen Simulation und der Regelung.

5.1 Experimentelle Analyse

Mithilfe der Entwicklung des **AWPA-Teststands mit umfangreicher Sensorik und Automatisierungskonzept** konnten zahlreiche systematische Versuche zur Analyse der dynamischen Auswirkungen aller Eingangsgrößen durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass die Anlagendynamik einerseits von der Technologie bzw. Stoffpaarung (H₂O/LiBr und NH₃/H₂O) abhängt und andererseits auch durch starke **Unterschiede** in der **Geschwindigkeit** der Auswirkungen **verschiedener Eingangsgrößen auf verschiedene Ausgangsgrößen** geprägt ist. Die experimentelle Untersuchung der beiden AWPA hat außerdem gezeigt, dass die **H₂O/LiBr-Anlage** durch einen **höheren COP** und die **NH₃/H₂O Anlage** durch eine **sehr schnelle Anlagendynamik** besticht. Beide Anlagen können in einem sehr **breiten Betriebsbereich** betrieben werden, sofern **ausreichend Stellgrößen** zur Verfügung stehen.

Schlussendlich lässt sich aus den experimentellen Arbeiten außerdem die **Empfehlung** ableiten, AWPA nicht nur mit Sensorik zur Bestimmung der Leistungen in den drei Hydraulikkreisläufen auszustatten, sondern **auch Sensorik im „Inneren“** der AWPA in Betracht zu ziehen. Die in HPC untersuchten AWPA verfügen standardmäßig zumindest über **Hoch- und Niederdrucksensoren**, welche bereits viel Information über den Zustand im Inneren der AWPA geben können und insbesondere bei Fehlerdiagnosen hilfreich sein können. Leider ist dies jedoch aktuell nicht bei allen AWPA der Standard. Zusätzlich können Temperatursensoren jeweils am Austritt der Lösung aus dem Generator und Absorber Aufschluss über die Kältemittelkonzentrationen geben. Sowohl Druck-, als auch Temperatursensoren sind verhältnismäßig günstige Sensoren und **können den Betrieb, Monitoring und Fehlerdiagnose von AWPA deutlich erleichtern**.

5.2 Simulationsmodelle

Mit den Erkenntnissen aus der experimentellen Analyse wurden Simulationsmodelle für beide AWPA erstellt, die für **detaillierte Untersuchungen des Betriebsverhaltens** verwendet werden können. Die Simulationsmodelle wurden in der Modellierungssprache „**Modelica**“ [9] in „Dynamic Modeling Laboratory (Dymola)“ [2] implementiert und sind vorrangig geometriebasiert, sodass beispielsweise auch Auswirkungen von unterschiedlichen Wärmeübertragergeometrien untersucht werden können.

Mithilfe der Simulationsmodelle lassen sich verschiedenste Lastwechsel sehr **schnell und sicher** simulieren und untersuchen. Selbst extreme Betriebspunktänderungen und Punkte am

äußeren Rand des möglichen Betriebsbereichs lassen sich untersuchen, ohne Gefahr zu laufen, die AWPA zu beschädigen. Darüber hinaus ermöglichen die Simulationsmodelle auch eine sehr **detaillierte Untersuchung der AWPA, die rein messtechnisch nicht möglich wäre**, wie beispielsweise die Untersuchung von Konzentrationsänderungen oder von Temperaturen an bestimmten Stellen in Wärmeübertragern. Die Simulationsmodelle können außerdem zukünftig für die simulationsgestützte **Auslegung**, die simulationsgestützte **Regler-Parametrierung** und die simulationsgestützte **Fehlerdiagnose/Monitoring** eingesetzt werden.

Als Ausblick für weitere Forschung konnte ein **großes Potential für den Einsatz von AWPA im Hochtemperatur-Bereich** (>80 °C Nutztemperatur im Mitteltemperatur-Kreis) identifiziert werden. Hierfür existieren bislang noch keine AWPA von europäischen Herstellern, weshalb hier großer Forschungsbedarf gesehen wird. Für die Entwicklung von AWPA, die für so hohe Temperaturen eingesetzt werden können, sind geeignete Simulationsmodelle essentiell, um beispielsweise sinnvolle Bauformen und Wärmeübertragerflächen für den Prototypenbau abschätzen zu können. Die in HPC entwickelten Simulationsmodelle stellen hierfür eine **wichtige Basis** dar. Zudem kann das hoch aufgelöste Simulationsmodell dazu verwendet werden, die größten Einflussparameter auf das Anlagenverhalten zu identifizieren und dabei das Simulationsmodell systematisch so weit zu vereinfachen, dass dieses in einer weniger komplexen Form in Variantenstudien und/oder Langzeitsimulationen unter Gewährleistung kurzer Rechendauer eingesetzt werden kann.

5.3 Regelung

Die Analyse verschiedener typischer Lastszenarien hat gezeigt, dass AWPA **prinzipiell zwar mit Einzel-PI-Reglern** geregelt werden können, diese aufgrund **des Mehrgrößen-Charakters** von AWPA jedoch strukturell bedingt oftmals **nicht den möglichen Stellbereich nutzen können**. Zur Vergrößerung des möglichen Stellbereichs und daraus resultierend zur Verbesserung des Teillastverhaltens von AWPA wurden in HPC deshalb **zwei modellbasierte Mehrgrößen-Regelungen** entwickelt - ein Ansatz basierend auf einem **Zustandsregler** und ein Ansatz basierend auf **MPC**.

In beiden Regelungsansätzen wird das dynamische Verhalten der AWPA mithilfe eines **Reglerentwurfsmodells** berücksichtigt und **alle Regelgrößen gemeinsam mit allen Stellgrößen** geregelt. Beide Ansätze ermöglichen außerdem den Einsatz von **mehr Stell- als Regelgrößen**. Der MPC-Ansatz ermöglicht zusätzlich die **Priorisierung wichtiger Regelgrößen** und die Berücksichtigung von Prognosedaten für z.B. Störgrößenverläufe, benötigt allerdings eine etwas leistungsstärkere SPS als für den Zustandsregler-Ansatz. Beide Regelungen können die **Teillastfähigkeit** von AWPA maßgeblich **verbessern**. Damit kann zum einen ein ineffizienter ON/OFF Betrieb der Anlagen reduziert werden und zum anderen auch die **Integration von AWPA in Gesamtsysteme erleichtert** werden. Je nach Konfiguration (Wahl der Stell- und Regelgrößen) können die modellbasierten Mehrgrößen-

Regler auch die Dynamik leicht verbessern, wobei dies primär für die im Vergleich zur NH₃/H₂O AWPA langsamere H₂O/LiBr AWPA relevant ist.

Bei der Entwicklung der Reglerentwurfsmodelle und der modellbasierten Regler hat sich gezeigt, dass trotz einiger Unterschiede zwischen H₂O/LiBr und NH₃/H₂O-AWPA beide Maschinen prinzipiell mit einem Modell derselben Struktur beschrieben werden können und auch dieselben Regelungsmethoden zum Einsatz kommen können. Das Reglerentwurfsmodell ist **modular** aufgebaut, sodass die Grundstruktur des Modells beibehalten werden kann, selbst wenn sich Parameter, wie z.B. Füllmenge oder Baugröße ändern. Dies **erleichtert** die **Anpassung** des Reglerentwurfsmodells und des Reglers für verschiedene AWPA ungemein und deutet darauf hin, dass die gewählte Struktur der Modelle und Regler dafür geeignet sind, verschiedenste AWPA zu beschreiben und zu regeln. Dies konnte auch für eine H₂O/LiBr AWPA mit deutlich größerer Kälteleistung (ca. 1.750 kW) als die Laboranlage (ca. 25 kW) gezeigt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass die in HPC entwickelten Methoden **einfach und systematisch auch für andere AWPA adaptiert** und übernommen werden können.

Für die Regelung von AWPA wird **für kleinere Anlagen der Einsatz des Zustandsregler-Ansatzes** und **für größere Anlagen der Einsatz des MPC-Ansatzes** empfohlen, da dieser mehr Möglichkeiten bietet, jedoch eine leistungsstärkere SPS benötigt. Sollte keiner der beiden Regelungsmethoden zur Diskussion stehen, da beispielsweise keine modellbasierten Ansätze verwendet werden sollen, lässt sich dennoch die **Empfehlung** aussprechen, **möglichst viele Stellgrößen miteinzubeziehen**, da dies den Stellbereich und somit den Betriebsbereich der AWPA vergrößert. Mit den beiden vorgestellten Regelungsmethoden ist dies einfach und systematisch möglich, kann mit entsprechender Erfahrung jedoch auch durch sogenannte Expertenregeln erfolgen. Dafür können beispielsweise zwei Stellgrößen starr miteinander verbunden werden und durch einen gemeinsamen PI-Regler eingesetzt werden. Dieser Ansatz erfordert zwar viel Expertenwissen und Erfahrung, ist weniger systematisch und bietet weniger Möglichkeiten, kann aber dennoch den Betriebsbereich von AWPA im Vergleich zu Einzel-PI-Reglern vergrößern.

Als **Ausblick für weitere Forschung** ist auf jeden Fall die Erweiterung der Regelungsbetrachtungen auf die **Systemebene** zu nennen. Mit den in HPC entwickelten Regelungsmethoden kann die AWPA sehr gut auf AWPA-Ebene in einem breiten Betriebsbereich geregelt werden. Für weitere Regelungsziele wie etwa ein **Wirkungsgrad-optimaler Betrieb** ist jedoch die Betrachtung des Gesamtsystems und entsprechend eine **übergeordnete Systemregelung** notwendig. Man könnte zwar auch auf AWPA-Ebene eine Wirkungsgrad-optimale Regelung verwenden, allerdings würden dabei wichtige Zusammenhänge unberücksichtigt bleiben. So ist beispielsweise in Systemen mit Kühlturm der Strombedarf für die Kühlturmventilatoren ein relevanter Faktor, sodass der optimale Betriebspunkt für die AWPA nicht zwingend der optimale Betriebspunkt für den Zusammenschluss von AWPA und Kühlturm ist. Ähnliches gilt auch für andere Komponenten wie beispielsweise Solaranlagen. Schlussendlich sollte immer das **Gesamtsystem optimal**

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

betrieben werden, weshalb auch in der entsprechenden Regelung das Gesamtsystem berücksichtigt werden sollte.

6 Literaturverzeichnis

- [1] A. David, "Large heat pumps in European district heating systems," präsentiert auf En+Eff - 22nd Int. Trade Fair and Congress, Frankfurt, 2016.
- [2] Dassault Systèmes SE, *Dymola – Dynamic Modeling Laboratory, Version 2018*, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, 2019.
- [3] F-Chart Software, *EES - Engineering Equation Solver, Version 10.539*, Madison, USA, 2018.
- [4] MathWorks, *Simulink, Version 10.2*, Natick, USA, 2020.
- [5] H. Moser, Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe kleiner Leistung zum Heizen und Kühlen, Dissertation, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Österreich, 2009.
- [6] M. Buchner, Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Betriebsverhaltens von Absorptionskälteanlagen, Masterarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Graz, Österreich, 2018.
- [7] EAW, „Technische Beschreibung für Absorptionskälteanlage WEGRACAL® Maral 1, EAW Energieanlagenbau GmbH,“ 2018. [Online]. Available: http://www.eaw-energieanlagenbau.de/absorber-akm.html?file=files/theme_data/pdf-Dokumente/akm/technische_Beschreibung_WEGRACAL_Maral. [Zugriff am 14. 05. 2019].
- [8] A. Arnitz und R. Rieberer, „Entwicklung und Erprobung einer thermisch angetriebenen Lösungsmittelpumpe für Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen,“ in *Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung*, Kassel, 2016.
- [9] P. Fritzson und V. Engelson, „Modelica - A Unified Object-Oriented Language for System Modeling and Simulation,“ *Lecture Notes in Computer Science*, 1998.
- [10] TLK Thermo GmbH, *TIL Suite Softwarepaket zur Simulation thermischer Systeme*, Braunschweig, Deutschland, 2020.
- [11] *DIN EN 60534-2-1: 1998. Stellventile für die Prozessregelung. Teil 2-1: Durchflusskapazität Bemessungsgleichungen für Fluide unter Einbaubedingungen; Deutsche Fassung IEC 60534-2-1. (Norm)*, Beuth Verlag.
- [12] W. Wagner und A. Pruß, „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use,“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Bd. 31, S. 387–535.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- [13] R. Tillner-Roth und D. Friend, „A Helmholtz Free Energy Formulation of the Thermodynamic Properties of the Mixture {Water + Ammonia},“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Bd. 27, S. 63-96, 1998.
- [14] M. C. Engineering, „Thermophysical Properties of {NH₃ + H₂O} Mixtures for the Industrial Design of Absorption Refrigeration Equipment“.
- [15] W. Nußelt, „Das Grundgesetz des Wärmeüberganges,“ *Gesundh.-Ing.*, Bd. 38, S. 447-490, 1915.
- [16] S. M. G. R. C. Z. G.A. Longo, „A new model for refrigerant boiling inside Brazed Plate Heat Exchangers (BPHEs),“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 91, S. 144–149., 2015.
- [17] S. M. G. R. C. Z. G.A. Longo, „A new computational procedure for refrigerant condensation inside herringbone-type Brazed Plate Heat Exchangers,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 82, S. 530–536, 2015.
- [18] W. Focke, J. Zachariades und I. Olivier, „The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 28, S. 1469-1479, 1985.
- [19] F. Táboas, M. Vallès, M. Bourouis und A. Coronas, „Assessment of boiling heat transfer and pressure drop correlations of ammonia/water mixture in a plate heat exchanger,“ *International Journal of Refrigeration*, Bd. 35, S. 633–644.
- [20] R. Eldeeb, V. Aute und R. Radermacher, „A survey of correlations for heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation in plate heat exchangers,“ *International Journal of Refrigeration*, Bd. 65, S. 12-26, 2016.
- [21] Verein Deutscher Ingenieure , VDI-Wärmeatlas, Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [22] Z. Yuan und K. E. Herold, „Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation,“ *HVAC&R Research*, S. 377-393, 2005.
- [23] M. Wernhart, R. Rieberer, S. Zlabinger, V. Unterberger und M. Göllles, „Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagen: Dymola-Modell einer H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlage,“ *Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung*, 2020.
- [24] W. Wagner und A. Pruß, „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use,“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Bd. 31, S. 387–535.
- [25] O. Ibrahim und S. Klein, „Thermodynamic Properties of Ammonia-Water Mixtures,“ *ASHRAE Transactions*, 1993.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- [26] S. Zlabinger, V. Unterberger, M. Göllles, M. Horn, M. Wernhart und R. Rieberer, „Development and experimental validation of a linear state-space model for absorption heat pumping systems for model-based control strategies,“ in *ISHPC 2021 proceedings – online pre-conference 2020*, online, Berlin, Deutschland.
- [27] J. Lunze, *Regelungstechnik 2 - Mehrgrößensysteme Digitale Regelung*, Berlin: Springer Vieweg, 2020.
- [28] L. Zaccarian, „Dynamic allocation for input redundant control systems,“ *Automatica*, Bd. 45, S. 1431-1438, 2009.
- [29] E. Camacho, C. Bordons und C. Alba, *Model Predictive Control*, Springer London, 2004.
- [30] B. Roffel und B. Betlem, „Internal Model Control,“ in *Advanced Practical Process Control*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2004.
- [31] M. Wernhart, R. Rieberer, S. Zlabinger, V. Unterberger und M. Göllles, „Experimentally verified dynamic simulation model of a NH₃/H₂O-absorption refrigeration system,“ in *14th IIR Gustav-Lorentzen Conference on Natural Fluids*.
- [32] AixLib, *A Modelica model library for building performance simulations*, Aachen, Deutschland, 2020.
- [33] S. Paardekooper, R. S. Lund, B. V. Mathiesen, M. Chang, U. R. Petersen, L. Grundahl, A. David, J. Dahlbæk, I. A. Kapetanakis, H. Lund, N. Bertelsen, K. Hansen, D. W. Drysdale und U. Persson, „Heat Roadmap Austria: Quantifying the Impact,“ 2018.
- [34] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMWFW), „Energie in Österreich Zahlen, Daten, Fakten,“ Wien, 2019.
- [35] F. Birol, „The Future of Cooling,“ International Energy Agency, 2018.
- [36] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „Leitfaden für Energie-Audits für betriebliche Abwärmenutzung,“ 2017.
- [37] Heat Roadmap Europe 4, „Heating & Cooling - facts and figures,“ 2017.
- [38] H. Schnitzer, J. Schmied, M. Titz, P. Jägerhuber, C. Enzi und P. Filzwieser, „Abwärmekataster Steiermark Endbericht,“ Technische Universität Graz, 2012.
- [39] S. Moser und S. Lassacher, „External use of industrial waste heat - An analysis of existing implementations in Austria,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 264, 2020.
- [40] G. Longo, S. Mancin, G. Righetti und C. Zilio, „A new computational procedure for refrigerant condensation inside herringbone-type Brazed Plate Heat Exchangers,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 82, S. 530–536, 2015.

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- [41] G. Longo, S. Mancin, G. Righetti und C. Zilio, „A new model for refrigerant boiling inside Brazed Plate Heat Exchangers (BPHEs),“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 91, S. 144–149, 2015.
- [42] W. Focke, J. Zachariades und I. Olivier, „The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 28, S. 1469-1479, 1985.
- [43] F. Táboas, M. Vallès, M. Bourouis und A. Coronas, „Assessment of boiling heat transfer and pressure drop correlations of ammonia/water mixture in a plate heat exchanger,“ *International Journal of Refrigeration*, Bd. 35, S. 633–644, 2012.
- [44] M. Wernhart, R. Rieberer, S. Zlabinger, V. Unterberger und M. Göllles, „Experimentally verified dynamic simulation model of a NH₃/H₂O-absorption refrigeration system,“ in *14th IIR Gustav-Lorentzen Conference on Natural Fluids*, Kyoto, virtuell, 2020.
- [45] M. Wernhart, R. Rieberer, S. Zlabinger, V. Unterberger und M. Göllles, „Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagen: Dymola-Modell einer H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlage,“ in *Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung*, virtuell, Magdeburg, Deutschland, 2020.
- [46] M. Wernhart, A. Arnitz und R. Rieberer, „Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagenkomponenten,“ in *Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung*, virtuell, Ulm, Deutschland, 2019.

7 Kontaktdaten

Projektkoordinator:

Markus Göllés

BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Inffeldgasse 21b, 8010 Graz

+43 5 02378-9201

office@best-research.eu

www.best-research.eu

Viktor Unterberger

BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Inffeldgasse 21b, 8010 Graz

+43 5 02378-9245

office@best-research.eu

www.best-research.eu

Kooperationspartner:

René Rieberer

Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Inffeldgasse 25b, 8010 Graz

+43 316 873 – 7301

office.iwt@tugraz.at

www.iwt.tugraz.at

Hannes Poier

SOLID Solar Energy Systems GmbH

Am Pfangberg 117, 8045 Graz

+43 316 292840 – 55

office@solid.at

www.solid.at

Energieforschungsprogramm – 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Christian Halmdienst

Pink GmbH

Bahnhofstrasse 22, 8665 Langenwang

+43 3854 3666 – 60

info@pink.co.at

<https://www.pink.co.at/index.htm>

Christian Kemmerzehl

EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld

Oberes Tor 106, 98630 Römhild, Deutschland

+49 36948 84 237

info@eaw-energieanlagenbau.de

<https://www.eaw-energieanlagenbau.de/home.html>

Christoph Rohringer

AEE – Institut für nachhaltige Technologien

Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf

+43 3112 5886 662

office@aee.at

www.aee-intec.at