

UNIVERSITÄT STUTTGART
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und
Energiespeicherung



Abschlussbericht

für das Projekt

Degree

**Untersuchung einer dynamischen Regelung der
Kühlkreistemperaturen von Rechenzentren zur
Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens
zur Umsetzung entsprechender Konzepte**

Aktenzeichen: 37006/01-24/0

Autoren: Henner Kerskes, Mashhur Gheni

Stuttgart, 18.10.2024

Koordinator:

Universität Stuttgart
Keplerstraße 7
70174 Stuttgart

vertreten durch das

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart



und das

Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart
Nobelstraße 19, 70569 Stuttgart



Ansprechperson:

Dr. Henner Kerskes

Tel.: +49 (0) 711 / 685 - 63534, E-Mail: kerskes@igte.uni-stuttgart.de

Projektpartner:

ICT Facilities GmbH

Motorstraße 62, 70499 Stuttgart

Ansprechperson:

Holger Zultner

Tel.: +49 711 214758 30, E-Mail: holger.zultner@ict-facilities.de

**Projektpartner:**

T.P.I. Trippe und Partner Ingenieurgesellschaft mbH

Fritz-Erler-Straße 1-3, 76133 Karlsruhe

Ansprechperson:

Markus Betz

Tel.: +49 (721) 1810-51, E-Mail: markus.betz@tpi-online.de



Vorhabenbezeichnung: Untersuchung einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperaturen von Rechenzentren zur Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens zur Umsetzung entsprechender Konzepte

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 – 30.04.2024

Gefördert durch:

Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	6
2.1	Konzeptentwicklung einer dynamischen Betriebsweise des HLRS-Kühlsystems	6
2.1.1	HAWK- Supercomputer	6
2.1.2	Kühlsystem des HAWK-Supercomputers	7
2.1.2.1	Flüssigkeitskühlsystem.....	7
2.1.2.2	Luftkühlsystem.....	9
2.1.3	Regelungssystem.....	10
2.1.3.1	Flüssigkeitskühlsystem.....	10
2.1.3.2	Luftkühlsystem.....	11
2.1.4	Verfügbare Daten zum Kühlsystem.....	11
2.1.4.1	Messung und Datenerfassung	11
2.1.4.2	Anlagen- und Systeminformationen.....	12
2.1.5	Identifikation der temperaturabhängigen Komponenten	12
2.1.6	Konzeptionierung des Kühlsystems mit dynamisch geregelten Kühlkreis- temperaturen	13
2.2	Experimentelle Bestimmung der Temperaturabhängigkeiten	15
2.2.1	Untersuchung der temperaturabhängigen Kenngrößen von IT-Komponenten	15
2.2.1.1	Einfluss der CPU-Temperatur auf die Rechenleistung.....	15
2.2.1.2	Einfluss der Temperatur auf die Ausfallrate von IT-Komponenten.....	16
2.2.1.3	Einfluss der Temperatur auf die Wärmeabgabe von den IT-Komponente an die Luft	16
2.2.2	Untersuchung der Temperaturabhängigkeiten von weiteren Komponenten...	17
2.2.2.1	Nasskühltürme	17
2.2.2.2	Ventilatoren	18
2.2.2.3	Pumpen	19
2.3	Modellierung und Validierung des dynamisch geregelten HLRS-Kühlsystems.....	19
2.3.1	Beschreibung des Modells	19
2.3.2	Modellvalidierung	22
2.3.2.1	Thermische Verhalten.....	22
2.3.2.2	Wasserverbrauch	23
2.3.2.3	Stromverbrauch	24
2.4	Numerische Analyse und Optimierung des gesamten Kühlsystems.....	25
2.4.1	Numerische Simulation der Kühlsystems.....	25
2.4.2	Optimierung des Gesamtsystems	27

2.4.3	Umsetzung der entwickelten Betriebsstrategie am HLRS	29
2.5	Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf anderen Rechenzentren	31
2.6	Erstellung eines Leitfadens und Handlungsempfehlungen	33
3	Zusammenfassung des Forschungsprojekts Degree	35
3.1	Modellierung des HLRS-Kühlsystems.....	35
3.2	Numerische Analyse und Optimierung des gesamten Kühlsystems.....	36
3.3	Umsetzung der entwickelten Betriebsstrategie am HLRS.....	36
3.4	Fazit	37
4	Veröffentlichungen	39
5	Literaturangaben.....	40

1 Einleitung

Das Forschungsprojekt Degree widmete sich der Herausforderung, die Energieeffizienz von Rechenzentren durch die Entwicklung einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperatur zu verbessern. Der Entwicklungsprozess sowie die Erprobung und Bewertung der erarbeiteten Regelstrategie wurden am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) durchgeführt.

Digitalisierung lebt von der schnellen Übermittlung und Speicherung enorm großer Datenmengen via Internet. Dabei sind die zentralen Schaltstellen des Internets die Rechenzentren. Der Betrieb der Kühlanlagen ist neben den Servern der zweite große Verbraucher elektrischer Energie in Rechenzentren und derzeit oftmals für ein Drittel des Gesamtenergiebedarfs verantwortlich. Die energieeffizienteste Art der Kühlung ist die „freie Kühlung“. Dabei wird die Abwärme über Nass- oder Trockenkühltürme ohne aktive Kälteerzeugung, wie z.B. Kompressions- oder Adsorptionskältemaschinen, direkt an die Umgebung abgegeben. Dies funktioniert nur, wenn das Temperaturniveau der abzugebenden Wärme über der Außentemperatur liegt. Deshalb geht ein Entwicklungstrend bei der Server-Entwicklung hin zu höheren Betriebstemperaturen, um den Anteil der freien Kühlung zu erhöhen. Zu beachten ist jedoch, dass die Erhöhung der Kühlkreistemperatur auch zu negativen Effekten führt. Durch höhere Betriebstemperaturen resultieren bei zahlreichen Komponenten innerhalb des Rechenzentrums höhere Stromaufnahmen, insbesondere bei Halbleitern wie CPUs und Hauptspeicher. Zusätzlich können auch die Rechenleistung und die Lebensdauer der IT-Komponenten sinken.

Der Abschlussbericht zeigt den erfolgreichen Weg zur Optimierung des Gesamtsystems, bestehend aus IT-Infrastruktur, Kühlsystem und Versorgungsumfeld im Spannungsfeld zwischen möglichst niedrigen Betriebstemperaturen und einem Maximum an freier Kühlung. Das Ergebnis ist eine Methodik zur Implementierung einer Regelstrategie für dynamische Kühlkreis-Vorlauftemperaturen, die auf wassergekühlte Rechenzentren angewendet werden kann.

Durch eine erfolgreiche Implementierung und Optimierung des Kühlsystems wird ein Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs und der Emissionen in Rechenzentren geleistet. Das Projekt zeigt, dass durch innovative Kühllösungen die Gesamtenergiebilanz von Rechenzentren deutlich verbessert werden kann.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die während der Projektlaufzeit durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse beschrieben. Die Gliederung orientiert sich an den im Projektantrag spezifizierten Arbeitspaketen (AP).

In Kapitel 2.1 wird ein Konzept für die dynamische Betriebsweise des HLRS-Kühlsystems ausgearbeitet. In Kapitel 2.2 werden die Temperaturabhängigkeiten der Rechenzentrums-Komponenten experimentell bestimmt. Die Modellierung des dynamisch geregelten HLRS-Kühlsystems sowie die Vorstellung der Ergebnisse der Modell-Validierung sind Gegenstand von Kapitel 2.3. In Kapitel 2.4 werden die Ergebnisse der numerischen Analyse des gesamten Kühlsystems vorgestellt und das Einsparpotenzial der optimierten Regelung demonstriert. Anschließend werden in Kapitel 2.5 die zuvor am HLRS gewonnenen theoretischen Erkenntnisse und praktischen Erfahrungen zur dynamischen Betriebsweise auf ein hypothetisches Rechenzentrum angewandt. Schließlich werden in Kapitel 2.6 die im Rahmen des Projekts entwickelten Optimierungsmaßnahmen bewertet und ein Leitfaden erstellt, der konkrete Handlungsempfehlungen und Betriebsstrategien für Rechenzentren enthält.

2.1 Konzeptentwicklung einer dynamischen Betriebsweise des HLRS-Kühlsystems

Das erste Arbeitspaket gliedert sich in zwei Abschnitte: Zunächst wurden die temperaturabhängigen Rechenzentrums-Komponenten identifiziert (AP1.1). Im zweiten Abschnitt wurde das Kühlsystem am Beispiel des HLRS mit einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperaturen konzipiert (AP1.2).

Zunächst wird in diesem Kapitel der HAWK-Supercomputer vorgestellt, gefolgt wird das Kühlsystem des HAWK-Supercomputers ausführlich beschrieben. Danach wird das Regelungssystem des Kühlsystems dargestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Beschreibung des Messprogramms, der Datenerfassung und anderen verfügbaren Informationen über das Kühlsystem. Danach werden die temperaturabhängigen Rechenzentrums-Komponenten von allgemeinen Rechenzentren und HAWK jeweils identifiziert. Abschließend folgt eine Analyse der Systemdynamik des Kühlsystems von HAWK, auf deren Basis eine Strategie zur dynamischen Temperaturregelung für HAWK entwickelt wird.

2.1.1 HAWK- Supercomputer

Die Universität Stuttgart betreibt an ihrem Höchstleistungsrechenzentrum (HLRS) einen der leistungsstärksten Supercomputer Europas – der HAWK-Supercomputer (Platz 6 in Europa und Platz 16 weltweit im Jahr 2020) [1]. HAWK verfügt über eine Konfiguration mit 5632 Rechenknoten, die jeweils mit zwei 64-Kern AMD EPYC 7742 CPUs und 1,44 Petabyte primärem Speicher ausgestattet sind. Diese Knoten sind in 44 nicht-standardisierten Racks organisiert. Der Stromverbrauch des gesamten Systems beträgt bei LinPack-Betrieb etwa 4,1 MW [2].

Mit einem PUE-Wert von 1,14 im Jahr 2021 [3] wird das Kühlsystem des HAWK-Supercomputers als sehr energieeffizient eingestuft. Es handelt sich um ein flüssigkeitsgekühltes System, dessen Kühlanlage mit einem umfangreichen Messsystem und einer zugehörigen Datenerfassung ausgestattet ist. Die Zusammenarbeit mit dem HLRS erlaubt einen direkten Zugang zu dem System und den Messdaten und stellt eine ideale Ausgangssituation für das geplante Vorhaben dar.

2.1.2 Kühlsystem des HAWK-Supercomputers

2.1.2.1 Flüssigkeitskühlsystem

Abbildung 1 bietet einen anschaulichen Überblick über das Flüssigkeitskühlsystem des HAWK-Supercomputers. Kühlwasser aus dem Rechnerkreis wird durch zwei redundante Pumpen, die jeweils eine Nennleistung von 49,98 W haben, zu den Wärmeüberträger in sechs Cooling-Distribution-Units (CDUs) geleitet, die sich neben den Server-Racks befinden.

Die CDUs erfüllen die wichtige Aufgabe, interne Flssigkeitskreislufe für die direkte Kühlung der CPUs, Dual-Inline-Memory-Modules (DIMM), Voltage-Regulators (VR), Chipsätze, Stromversorgungseinheiten und internen Netzwerkkomponenten zu ermöglichen. In diesem System spielen die Kühlplatte eine entscheidende Rolle im Kühlmechanismus der CPUs, da sie aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit eine effiziente Wärmeübertragung bieten.

Zusätzlich zu den CDUs ist eine weitere Wärmequelle die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) in Form von Schwungradspeichern. Drei identische USV-Systeme mit einer Leistung von jeweils 1,7 MW dienen zur Kompensation von Frequenz- und Spannungsschwankungen sowie kurzen Unterbrechungen im Stromnetz. Es ist wichtig zu beachten, dass die USV Wärme ebenfalls erzeugt und daher gekühlt werden muss. Jedes USV-System ist mit zwei redundanten Pumpen ausgestattet, die jeweils eine Nennleistung von 5,09 kW haben.

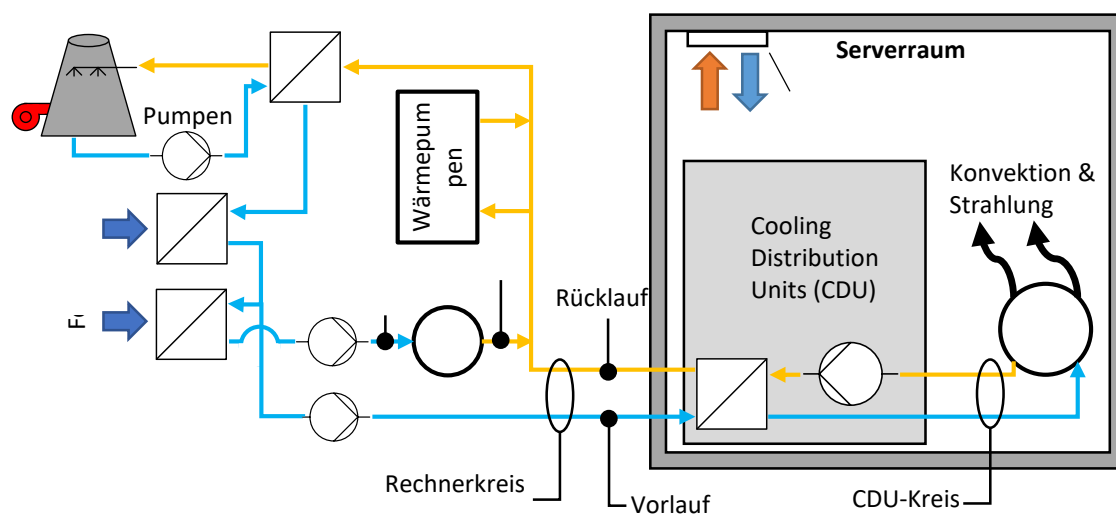


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Flüssigkeitskühlsystems vom HAWK-Supercomputer

Die Kühlung der CDUs und der USV erfolgt hauptsächlich über vier Kühltürme, die in das Flüssigkeitskühlsystem integriert sind. Diese Kühltürme sind offene Nasskühltürme, bei denen das Wasser direkt der Außenluft ausgesetzt wird, wodurch die Wärme direkt an die Umgebungsluft abgegeben wird. Dieser Kühlprozess erfolgt überwiegend durch die Verdunstung. Außenluft wird mithilfe mechanisch angetriebener Ventilatoren in die Kühltürme eingesaugt, und der Kühlvorgang des Wassers erfolgt im Gegenstromverfahren.

Jeder Kühlturm hat eine Kühlleistung von 1,2 MW und ist über einen Wärmeüberträger mit einem Gesamtwrmebertragungskoeffizienten von 2,4 MW/K an den Rechnerkreis angeschlossen. Außerdem ist jeder Kühlturm mit zwei Ventilatoren ausgestattet, die jeweils eine elektrische Nennleistung von 16,8 kW haben. Für alle vier Kühltürme zusammen ergibt sich somit eine elektrische Gesamt-Nennleistung von 134,4 kW. Der Wasserkreislauf im

Nasskühlturmsystem wird durch zwei Pumpen aufrechterhalten, die zusammen eine elektrische Nennleistung von 35,7 kW haben.

Während Zeiten hoher Außentemperaturen oder im Falle von Störungen der Nasskühltürme wird das Flüssigkeitskühlsystem durch ein Fernkältenetz mit Kühlwasser versorgt. Diese Fernkälte wird durch Kompressionskältemaschinen bereitgestellt, die von der Universität Stuttgart betrieben werden. Die Kapazität sowohl des Kühlturmsystems als auch des Fernkältesystems ist ausreichend, um die Kühlleistung jeweils eigenständig zu realisieren.

Ein besonderes Merkmal dieses Kühlsystems ist der zusätzliche Anschluss der USV an das Fernkältenetz. Dieser Anschluss ist notwendig, da das verwendete USV-System eine Flüssigkeitskühlung mit einer Vorlauftemperatur von unter 22 °C erfordert.

Zusätzlich nutzen zwei Wärmepumpen das Flüssigkeitskühlsystem als Wärmequelle. Diese Wärmepumpen werden während der Heizperiode zur Beheizung des Rechenzentrumsgebäudes und eines Bürogebäudes eingesetzt. In Bezug auf den Energieverbrauch haben die Wärmepumpen einen minimalen Einfluss, da sie weniger als 1 % der im Laufe eines Jahres erzeugten Abwärme benötigen.

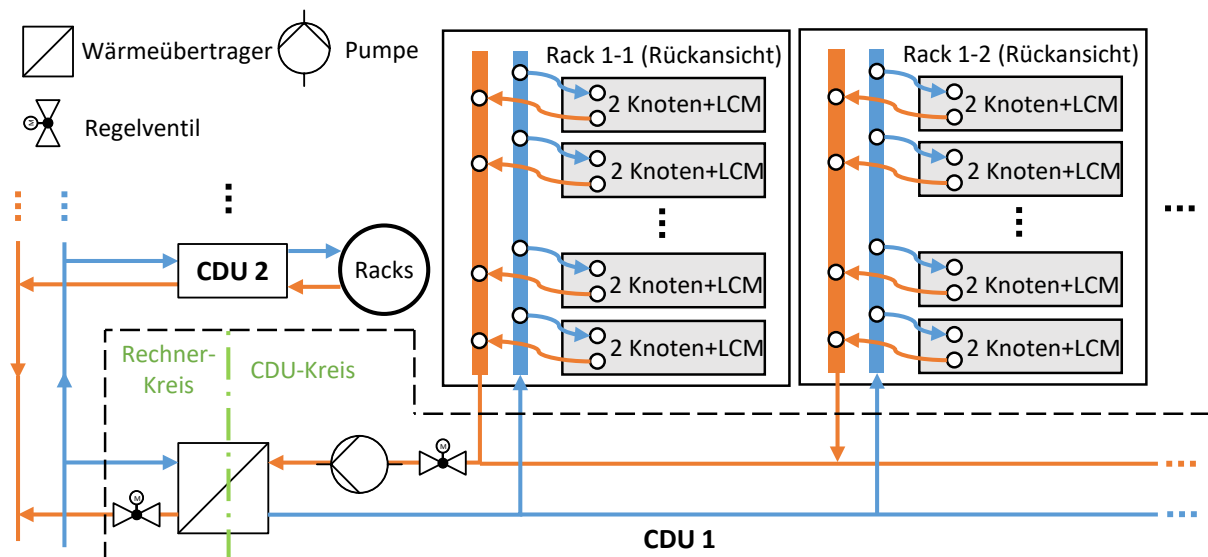


Abbildung 2: Anschlüsse der CDU an die Racks im HAWK-Supercomputer

Abbildung 2 zeigt eine detailliertere Übersicht über die Verbindung zwischen den CDU und den Racks im Flüssigkeitskühlsystem des HAWK-Supercomputers. Jede CDU ist über Rohrleitungen mit den Racks verbunden, die die IT-Komponenten beinhaltet. In dem CDU-Kreis zirkuliert das Kältemittel PG-25, eine Mischung aus Propylenglykol (25 %) und Wasser (75 %), um einen großen Teil der Wärme direkt von der IT-Komponenten abzuführen. Die Kühlung der IT-Komponenten erfolgt über Flüssigkeitskühlmodule (LCM), wobei jedes Flüssigkeitskühlmodule für die Kühlung von zwei Rechen-Knoten verantwortlich ist. Diese Flüssigkeitskühlmodule verwenden Direkt-Komponenten-Flüssigkeitskühlung zur Kühlung der IT-Komponenten. Die CPUs werden über wasserdurchströmten Kupfer-Kühlplatten und die DIMMs mit Wärmerohre gekühlt.

Die Rohrleitungen in einer CDU beinhalten einen Reihensammler, der eine gleichmäßige Verteilung des Kältemittels vom CDU-Kreis zu den einzelnen Racks sicherstellt. Das Kältemittel fließt über den Zufuhrsammler in die Racks, durchläuft dann die Flüssigkeitskühlmodule. Nachdem es die von der IT-Komponenten erzeugte Wärme aufgenommen hat, tritt das

erhitzte Kältemittel über den Rücklauf-Sammler wieder aus. Das erhitzte Kältemittel wird dann in den Wärmeübertrager der CDU zurückgeführt, wo die Wärme an den Rechnerkreis abgeführt wird.

2.1.2.2 Luftkühlsystem

Während die Kühlplatte im HAWK-Supercomputer den Großteil der Wärme effizient abführen, wird ein Teil der Wärme dennoch passiv durch Konvektion und Strahlung in den Serverraum abgegeben. Diese passive Wärmeabgabe wird von der Umgebungstemperatur des Serverraums und den Temperaturen der IT-Komponenten innerhalb der Racks beeinflusst. Um eine kontrollierte Umgebung aufrechtzuerhalten, ist der Serverraum mit einem Luftkühlsystem ausgestattet, das sowohl die Temperatur als auch die Luftfeuchte reguliert.

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über das Luftkühlsystem des HAWK-Supercomputers. Die Umluftkühler blasen kalte Luft in den Serverraum. Diese kalte Luft, die durch die IT-Komponenten erhitzt wird, zirkuliert zurück zu den Umluftkühler, wo die warme Abluft die Wärme im sekundären Kreislauf über einen Luft-Wasser-Wärmeübertrager an den primären Kreislauf abgibt. Bei niedrigen Außentemperaturen verlässt sich das Luftkühlsystem hauptsächlich auf vier Trockenkühler im Primärkreislauf mit einer Gesamtkapazität von 1 MW, um die Wärme an die Umgebung abzuführen. Da die Trockenkühler das Kältemittel PG-25 verwenden und die Umluftkühler mit reinem Wasser gekühlt werden, sind der primäre und der sekundäre Kreislauf durch einen Platten-Wärmeübertrager getrennt, um ein Vermischen zu verhindern.

Jeder Trockenkühler ist mit zwölf Axialventilatoren ausgestattet, die jeweils eine Nennleistung von 0,63 kW haben. Zusammen ergibt dies eine Gesamt-Nennleistung von 30,24 kW für alle vier Trockenkühler. Das Kältemittel zirkuliert zwischen dem Wärmeübertrager und den Trockenkühlern durch zwei redundant konfigurierte Pumpen, die jeweils eine Nennleistung von 22,0 kW haben.

Im Falle hoher Außentemperaturen oder bei Störungen der Trockenkühler wird das System durch das Fernkältenetz unterstützt.

Außerdem hat das Rechenzentrum weitere Server-Racks, die auf Luftkühlung angewiesen sind. Die Wärmeabgabe des HAWK-Systems an die Serverraumluft macht nur etwa 20 % der gesamten Kühllast im Luftkühlsystem aus.

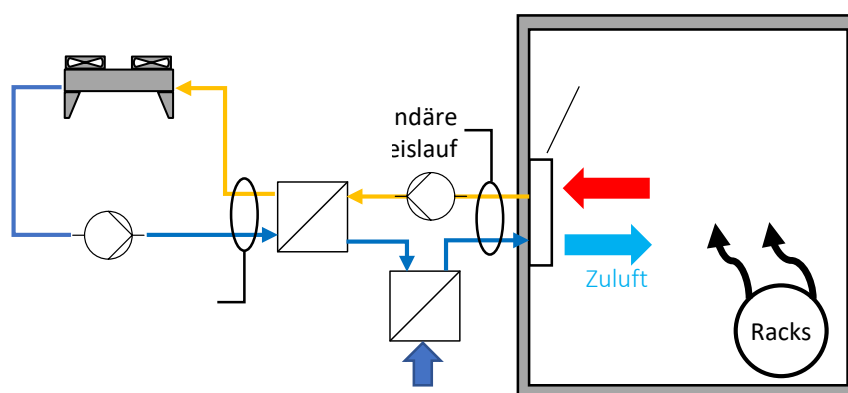


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema des Luftkühlsystems vom HAWK-Supercomputer

2.1.3 Regelungssystem

2.1.3.1 Flüssigkeitskühlsystem

Abbildung 4 zeigt das Flüssigkeitskühlsystem, dessen Messpunkte und die Regelungskomponenten des HAWK-Supercomputers. Wie ersichtlich, umfassen die Messungen des Systems die Durchflussrate in jedem Teilsystem, Temperaturmessungen am Ein- und Ausgang jedes Systems sowie Drucksensoren zur Pumpenregelung.

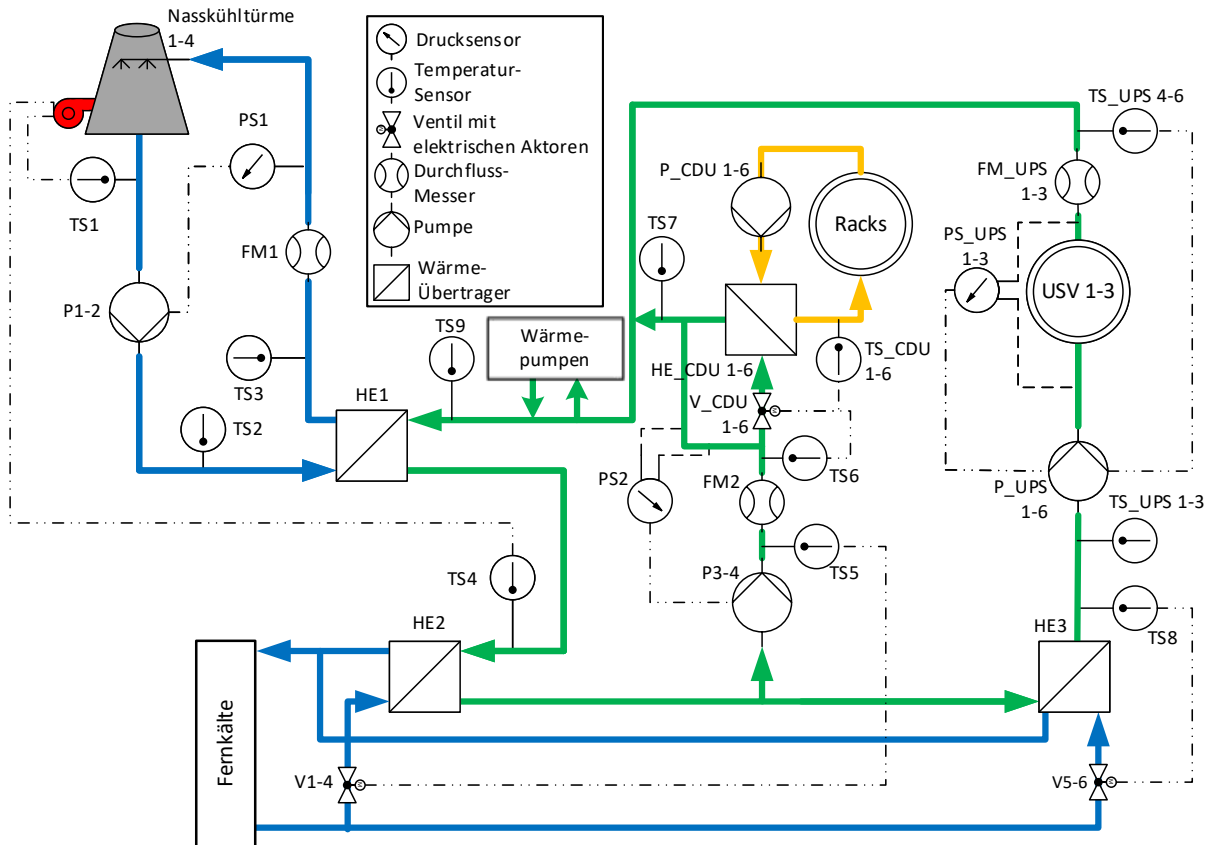


Abbildung 4: Flüssigkeitskühlsystems und Regelungsschema des HAWK-Supercomputers

Wie in der Abbildung dargestellt, werden die beiden Pumpen (P1-2) im Kühlturmsystem durch einen Drucksensor am Wassereinlass des Kühlturms geregelt, um eine konstante Durchflussrate und den optimalen Wasserdruck für die Sprühsysteme aufrechtzuerhalten. Zusätzlich werden die Ventilatoren des Kühlturms so geregelt, dass die Temperatur am Sensor TS4 mit der vordefinierten Rechnerkreis-Vorlauftemperatur übereinstimmt.

Sollte die Temperatur an TS4 die eingestellte Rechnerkreis-Vorlauftemperatur um einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, werden die Ventile des Fernkältesystems (V1-4) aktiviert. Dies schaltet den Wärmeübertrager HE2 ein, der zusätzliche Kühlung bereitstellt, um die Temperatur an TS5 auf der gewünschten Rechnerkreis-Vorlauftemperatur zu halten.

Die Pumpen im Rechnerkreis (P3-4) werden anhand von Druckunterschieden geregelt, um eine konstante Durchflussrate von etwa $330 \text{ m}^3/\text{h}$ zu gewährleisten. Der Durchfluss am Einlass jeder CDU wird über ein Ventil (V_CDU 1-6) geregelt, um eine Temperaturdifferenz von 4 K zwischen der Rechnerkreis-Vorlauftemperatur (gemessen an TS6) und der CDU-Kreis-Vorlauftemperatur (gemessen an TS_CDU 1-6) aufrechtzuerhalten. Auch die Pumpen des CDU-Kreises (P_CDU 1-6) sind auf eine konstante Durchflussrate eingestellt.

Aufgrund der spezifischen Kühlanforderungen des USV-Systems, das eine Vorlauftemperatur von unter 22 °C erfordert, ist das System zusätzlich über den Wärmeübertrager HE3 in das Fernkältenetz integriert. Wenn die Vorlauftemperatur des USV-Kreises (gemessen an TS8) 22 °C überschreitet, werden die Ventile V5 und V6 im Fernkältenetz aktiviert, um die Temperatur an TS8 unter diesem Schwellenwert zu halten. Zudem werden die Pumpen im USV-Kreis so geregelt, dass die Wassertemperatur am Ausgang jeder USV-Einheit (gemessen an TS_UPS 4-6) bei 32 °C bleibt.

2.1.3.2 Luftkühlsystem

Der Betrieb der Ventilatoren der Trockenkühler im Luftkühlsystem wird so geregelt, dass die Vorlauftemperatur im sekundären Kreislauf des Luftkühlsystems bei 14 °C gehalten wird. Wenn die Trockenkühler aufgrund warmer Außentemperaturen nicht in der Lage sind, die Vorlauftemperatur unter 14 °C zu halten, wird Kaltwasser aus dem Fernkältenetz als zusätzliche Kühlung verwendet. Sollte die Außentemperatur einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, werden die Trockenkühler abgeschaltet, und das Luftkühlsystem stützt sich ausschließlich auf die Fernkälte.

Die Pumpen in sowohl dem primären als auch dem sekundären Kreislauf sind so eingestellt, dass ein konstanter Durchfluss aufrechterhalten wird. Die Pumpen im primären Kreislauf ebenfalls werden abgeschaltet, wenn die Außentemperaturen einen festgelegten Schwellenwert überschreiten. Die Umluftkühler werden so geregelt, dass die Lufttemperatur im Serverraum auf einem gegebenen Sollwert (ca. 20°C) gehalten wird.

2.1.4 Verfügbare Daten zum Kühlsystem

2.1.4.1 Messung und Datenerfassung

Messung und Datenerfassung sind grundlegende Aspekte für den effizienten Betrieb der Kühlsysteme von HAWK. Die Daten werden hauptsächlich vom Gebäudeleitsystem (GLT) erfasst, das eine umfassende und automatisierte Überwachung ermöglicht. Dieses System erfasst ein breites Spektrum von Daten, einschließlich aller in Abbildung 4 dargestellten Messpunkte, die das Flüssigkeitskühlsystem betreffen. Die Daten umfassen standardmäßige Betriebsgrößen wie Temperatur und Durchflussraten in verschiedenen Systemkomponenten sowie wichtige elektrische Daten, wie z. B. den Stromeingang des USV-Systems und die Stromversorgung der Server-Racks durch die USV.

Der Stromverbrauch des Anlagerraums, in dem sich die Kühlanlagen befinden, wird ebenfalls von GLT aufgezeichnet. Dies umfasst neben den Hauptverbrauchern wie Ventilatoren, Pumpen und Wärmepumpen, auch Hilfskomponenten wie Regelventile, Lüftungsventilatoren, Beleuchtung und Steckdosen im Anlagenraum. Der Stromverbrauch dieser Hilfskomponenten ist jedoch vergleichsweise gering.

Neben dem Flüssigkeitskühlsystem decken die GLT-Daten auch die Kennzahlen des Luftkühlsystems ab, einschließlich der Kühleistung aus dem Fernkältenetz. Zudem werden meteorologische Daten von der Wetterstation vor Ort am HLRS erfasst.

Die zeitliche Auflösung der GLT-Daten beträgt 5 Minuten, was detaillierte und zeitnahe Einblicke in die Leistung des Systems ermöglicht und eine genaue Modellierung und Optimierung des Kühlsystems erlaubt.

Für bestimmte Kennzahlen, die noch nicht in das GLT integriert sind, werden regelmäßig manuelle Messungen durchgeführt. Diese handschriftlich erfassten Werte umfassen

hauptsächlich den monatlichen Wasserverbrauch und die Abwassermenge des Nasskühlturmsystems sowie die monatlichen Stromverbrauchsdaten für Pumpen und Ventilatoren.

2.1.4.2 Anlagen- und Systeminformationen

Die Produktdaten der Anlagenhersteller sowie die Kühlturmsdaten der Systemplaner umfassen eine Vielzahl wichtiger Informationen für die Modellierung.

Diese Daten enthalten zum Beispiel die thermischen Eigenschaften der einzelnen Wärmeübertrager. Darüber hinaus werden die Dynamiken der Pumpen und Ventilatoren beschrieben, einschließlich der Zusammenhänge zwischen Durchflussrate, Druckabfall und Stromverbrauch. Ebenfalls enthalten sind Angaben zum Druckabfall in den einzelnen Kreisläufen bei der jeweiligen Auslegungsdurchflussrate. Zusätzlich werden Temperaturbeschränkungen, unter anderem für die CDU- und USV-Einheiten, angegeben.

2.1.5 Identifikation der temperaturabhängigen Komponenten

In Zusammenarbeit vom HLRS, ICT Facilities GmbH, T.P.I. Trippe und Partner Ingenieurgesellschaft mbH und dem IGTE wurden die temperaturabhängigen Einflüsse auf die verschiedenen Komponenten des Rechenzentrums identifiziert. Das Rechenzentrum besteht aus einer Vielzahl von Komponenten, die in IT-Systeme, Flüssigkeitskühlsysteme und Luftkühlsysteme unterteilt werden können. Viele dieser Komponenten und Anlagen sind auf spezifische Betriebstemperaturen angewiesen. Eine dynamische Betriebsweise des Kühlturms, bei der die Betriebstemperaturen schwanken, beeinflusst das Gesamtsystem und dessen Effizienz.

Nach einer detaillierten Analyse der verfügbaren Daten und einer umfassenden Literaturrecherche konnten folgende Komponenten in HAWK-System mit signifikanten Temperaturabhängigkeiten identifiziert werden:

- IT-Systeme:
 - Strombedarf von IT-Komponenten (CPUs, DIMMs, VRs, Chipsätze, Stromversorgungseinheiten und internen Netzwerkkomponenten)
 - Wärmeabgabe von IT-Komponenten an das Flüssigkeitskühlsystem und das Luftkühlsystem
- Flüssigkeits- und Luftkühlsysteme:
 - Nasskühltürme/Trockenkühltürme
 - Unterbrechungsfreie Stromversorgung

In den Servern führt eine Erhöhung der Betriebstemperaturen dazu, dass IT-Komponenten weniger Wärme an das Flüssigkeitskühlsystem abgeben und stattdessen mehr Wärme in die Serverraumluft gelangt, die durch die Umluftkühler gekühlt werden muss.

Im Gegensatz dazu sind höhere Vor- und Rücklauftemperaturen im Kühlturmsystem vorteilhaft für die Kühltürme, da sie den Bedarf an elektrischer Energie für die Gebläse reduzieren. Ebenfalls müssen die Temperaturabhängigkeiten des Wasserbedarfs der offenen Nasskühltürme

berücksichtigt werden. Auch der Wirkungsgrad der USV-System ist temperaturabhängig und wurde daher genau untersucht werden.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass CDU- und USV-Systeme auf spezifische Betriebstemperaturen angewiesen sind:

- Das USV-System erfordert eine Vorlauftemperatur im USV-Kreislauf von unter 22 °C.
- Das CDU-System benötigt eine Vorlauftemperatur im Rechnerkreislauf zwischen 5,6 °C und 32,0 °C.

2.1.6 Konzeptionierung des Kühlsystems mit dynamisch geregelten Kühlkreistemperaturen

In diesem Arbeitsschritt wird ein dynamisches Kühlsystem am Beispiel des HLRS konzeptioniert. Folgende Komponenten werden bei der Konzeptionierung berücksichtigt:

- Systemregler (z.B. PID-/PI-Regler, Zweipunktregler)
- hydraulische Verschaltungen inklusive Ventile und Pumpen
- Nass- und Trockenkühltürme
- CPUs und weitere IT-Infrastruktur (z.B. Netzteile, Festplatten)
- Lokales Kälteverteilsystem (CDUs)
- Unterbrechungsfreie Stromversorgung
- Umluftkühler
- Wärmepumpen zur Deckung des Wärmebedarfs des HLRS
- Versorgung durch Fernkälte

Zuerst werden die Anforderungen an die Komponenten des Kühlsystems, die sich bei einer dynamischen Betriebsweise ergeben, identifiziert. Beispielsweise sind für die jeweiligen Komponenten Limitierungen in Form von maximal oder minimal zulässigen Betriebstemperaturen, Volumenströmen etc., oder die spezifischen Anforderungen an die regelungstechnischen Anlagen zu berücksichtigen. Speziell bei den IT-Komponenten sind auch maximal zulässige zeitliche Änderungsraten zu beachten.

Auf dieser Basis wurde eine Regelstrategie erarbeitet, die die spätere Umsetzung einer dynamischen Betriebsweise des HLRS-Kühlsystems unter Berücksichtigung der identifizierten Anforderungen ermöglicht.

Eine potenzielle Strategie zur Steigerung der Effizienz des Kühlsystems besteht darin, die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs zu erhöhen. Dadurch kann die Energieeffizienz der Kühltürme verbessert werden. Die Umsetzung einer solchen Strategie bringt jedoch einige Nachteile mit sich. Erstens erhöht die Anhebung der Wassertemperatur gleichzeitig die Wärmeabgabe an die Raumluft, was ungünstig ist, da die Luftkühlsysteme in der Regel weniger effizient sind als Flüssigkeitskühlsysteme. Darüber hinaus führt eine Erhöhung der Vorlauftemperatur zu höheren Temperaturen der IT-Geräte, was letztlich den Stromverbrauch der Racks erhöht. Dies wiederum steigert die Menge an Wärme, die von den Kühlsystemen abgeführt werden muss. Diese Wechselwirkung führt zu einem Abwägungsszenario, das in Abbildung 5 dargestellt wird. Dieses Abwägungsszenario zeigt

auch, dass es eine optimale Vorlauftemperatur gibt, bei der die Emissionen, der Energieverbrauch und die Betriebskosten minimiert werden können.

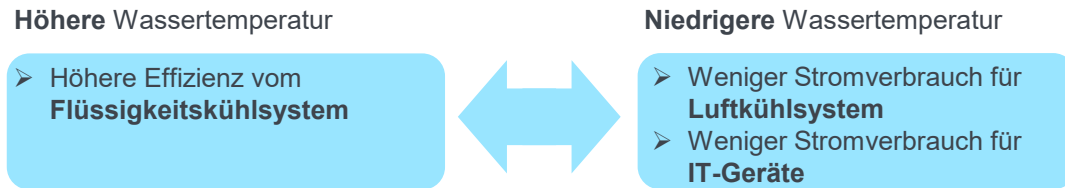


Abbildung 5: Abwägungsszenario für die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislauf vom Flüssigkeitskühlsystem

In der Ausgangssituation (Regelungskonzept vor Degree) wurde die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs im Flüssigkeitskühlsystem ganzjährig auf einem festen Sollwert geregelt. Abbildung 6 veranschaulicht diese Betriebsweise, bei dem das System mit Hilfe von einem PID- oder PI-Regler geregelt wird. Bei dieser Betriebsweise werden die Ventilatoren der Kühltürme so geregelt, dass eine vordefinierte Vorlauftemperatur im Rechnerkreislaufs aufrechtzuerhalten wird. Dieser Status quo stellt jedoch Herausforderungen für die Anpassungsfähigkeit und Effizienz dieser Systeme dar.

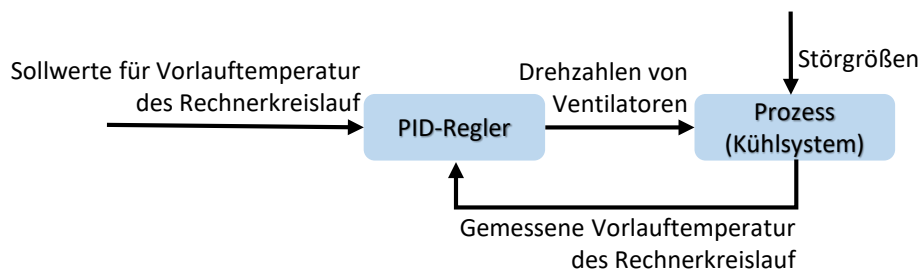


Abbildung 6: Regelungsschema für die Regelung der konstanten Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs (alt)

Der Großteil der Wärme des HAWK-Systems wird über Nasskühltürme abgeführt. Die Übertragung der Enthalpie zwischen Wasser und Luft in den Nasskühltürmen erfolgt hauptsächlich durch Verdunstung, weshalb die Feuchtkugeltemperatur der Luft eine entscheidende Rolle spielt. Das bedeutet, dass die Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und der Feuchtkugeltemperatur der Luft einen großen Einfluss auf die Betriebseffizienz der Nasskühltürme hat. Daher ist es sinnvoll, für den Supercomputer HAWK die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs dynamisch in Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft zu regeln. Diese Regelungsweise ist in Abbildung 7 dargestellt.

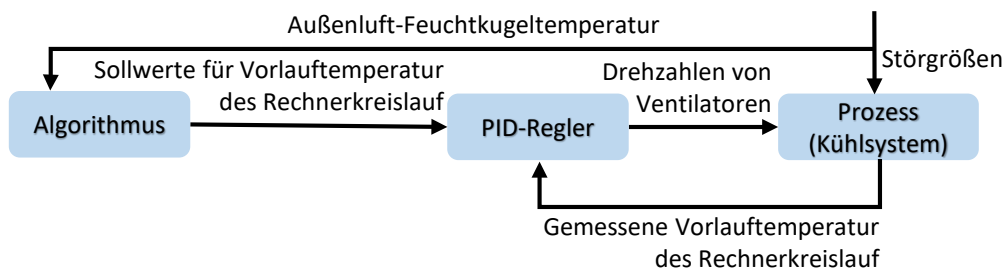


Abbildung 7: Regelungsschema für die dynamische Regelung der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs (neu)

2.2 Experimentelle Bestimmung der Temperaturabhängigkeiten

Auch wenn einige Temperaturabhängigkeiten aus Datenblättern und technischen Informationen vorhanden sind, müssen für eine erfolgreiche Modellierung und Validierung des Rechenzentrums experimentelle Versuchsreihen durchgeführt werden. Neben unbekannten Temperaturabhängigkeiten gilt es auch Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten zu identifizieren.

2.2.1 Untersuchung der temperaturabhängigen Kenngrößen von IT-Komponenten

2.2.1.1 Einfluss der CPU-Temperatur auf die Rechenleistung

In Zusammenarbeit zwischen dem HLRS, Hewlett Packard Enterprise (HPE) und Advanced Micro Devices (AMD) wurden am neuen HAWK-Supercomputer umfangreiche Performance-Tests durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeiten der Rechenleistung zu ermitteln. Die Performance-Tests bestehen aus verschiedenen Benchmark-Codes, die repräsentativ für die Nutzung des Systems sind und bereits bei der Auswahl des Rechners herangezogen wurden. Die Benchmarks werden bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (16, 20, 25 °C) durchgeführt, während die Rechenleistung gemessen wird.

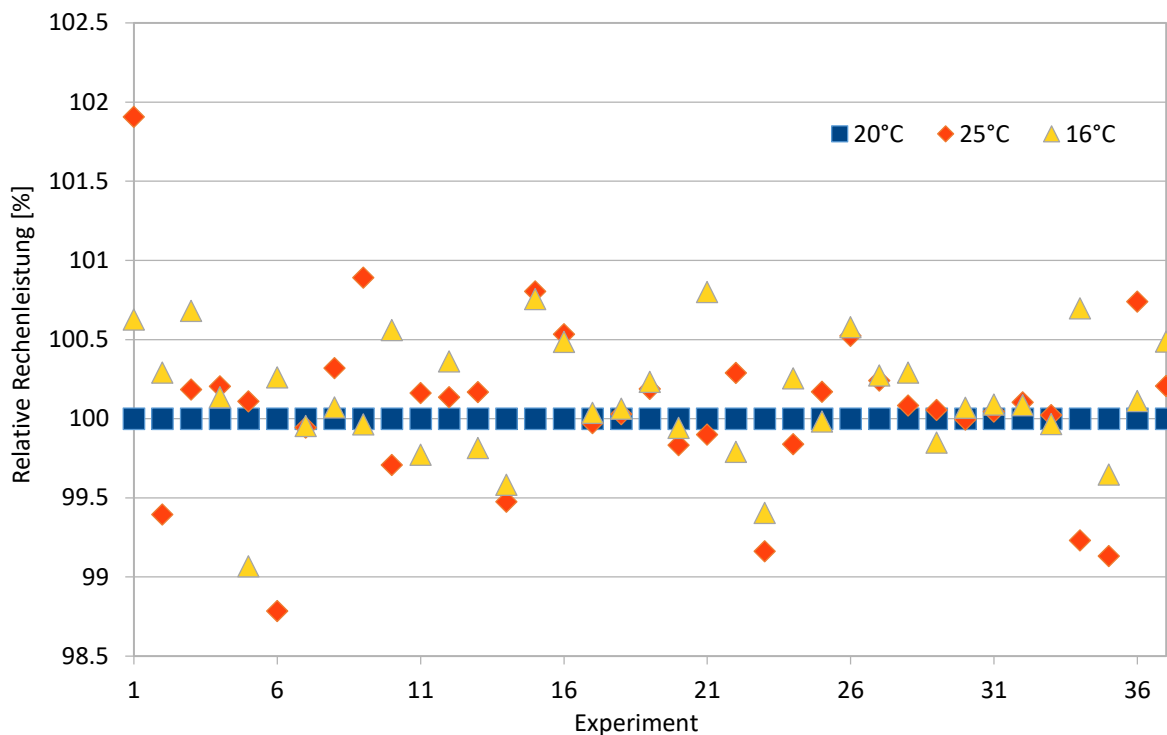


Abbildung 8: Performance-Tests: relative Rechenleistung der CPU bei drei verschiedenen Vorlauftemperaturen des Rechnerkreislaufs (16, 20, 25 °C) für 37 unterschiedliche Benchmark-Codes (37 Experimentsätze)

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse von den durchgeführten Performance-Tests: relative Rechenleistung der CPU bei drei verschiedenen Vorlauftemperaturen des Rechnerkreislaufs (16, 20, 25 °C) für 37 unterschiedliche Benchmark-Codes (37 Experimentsätze). Die Rechenleistung bei 20 °C wurde als Referenzwert verwendet (relative Rechenleistung von 100 %). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vorlauftemperatur von 16-25 °C keinen spürbaren Einfluss auf die Rechenleistung hat. Der Hauptgrund dafür ist, dass bei 25 °C die

Grenztemperatur der CPU noch nicht erreicht wird, wodurch es zu keiner Drosselung der Rechenleistung kommt.

2.2.1.2 Einfluss der Temperatur auf die Ausfallrate von IT-Komponenten

Die Ausfallrate von IT-Hardware ist stark temperaturabhängig. Diese Abhängigkeit kann qualitativ mit dem Arrhenius-Modell beschrieben werden:

$$\lambda_1 = \lambda_0 e^{-\beta \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_1} - \frac{1}{\vartheta_0} \right)} \quad (1)$$

wobei λ_0 die Ausfallrate bei Ausgangstemperatur ϑ_0 ist, β eine Hardware-spezifische Konstante und ϑ absolute Temperatur in K ist.

Dieses Modell besagt, dass die Ausfallrate ansteigt, wenn die Betriebstemperatur der Komponenten erhöht wird. Insbesondere bei elektronischen Bauteilen führt eine höhere Temperatur zu einer beschleunigten Alterung der Materialien und zu einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von Defekten.

Im Kontext von Rechenzentren bedeutet dies, dass ein Anstieg der CPU- und Komponenten-Temperaturen nicht nur die Energieeffizienz des Kühlsystems beeinflusst, sondern auch die Lebensdauer der Hardware erheblich verkürzen kann. Eine genaue Überwachung der Temperaturen und eine effiziente Kühlstrategie sind daher entscheidend, um die Ausfallraten zu minimieren und die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen.

2.2.1.3 Einfluss der Temperatur auf die Wärmeabgabe von den IT-Komponente an die Luft

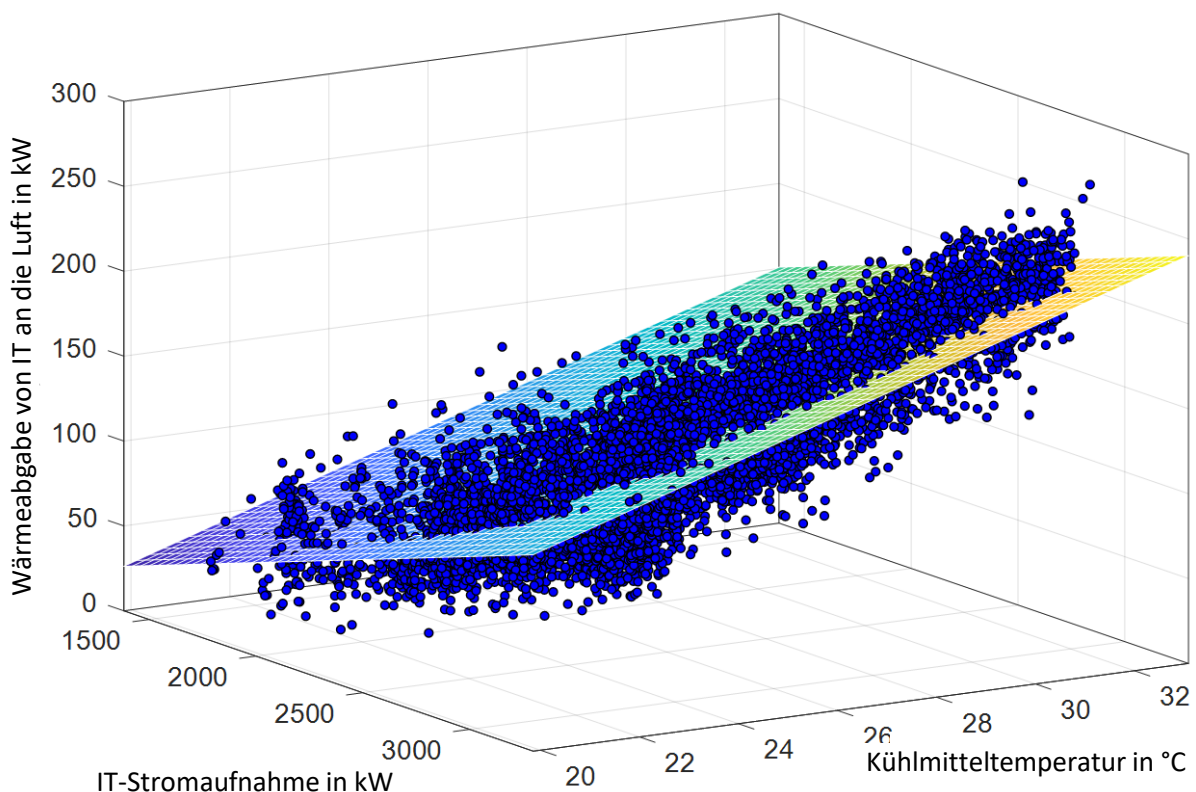


Abbildung 9: Wärmeabgabe von IT-Komponenten an die Luft in Abhängigkeit von der IT-Stromaufnahme und der Kühlmitteltemperatur in den Flüssigkeitskühlmodulen (Punkte: Messwerte, Fläche: Berechnungen)

Während die Kühlplatte im HAWK-Supercomputer den Großteil der Wärme effizient abführen, wird ein Teil der Wärme dennoch passiv durch Konvektion und Strahlung in den Serverraum abgegeben. Diese passive Wärmeabgabe wird von der Umgebungstemperatur des Serverraums und den Temperaturen der IT-Komponenten innerhalb der Racks beeinflusst.

Der Wärmeübertragung von den IT-Komponenten zur Umgebungsluft im Serverraum erfolgt in mehreren Schritten: Zunächst erhitzen die IT-Komponenten die direkt mit ihnen verbundenen Elemente, wie Substrate und Flüssigkeitskühlmodule. Diese erwärmten Elemente übertragen die Wärme durch Konvektion an die Luft im Serverrack und durch Strahlung an die Außenhülle des Serverracks. Schließlich gibt das Serverrack die Wärme sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung an den Serverraum ab.

Im Rahmen dieses Projekts wurde festgestellt, dass diese Wärmeabgabe von der Stromaufnahme der IT-Komponenten und der Kühlmitteltemperatur in den Flüssigkeitskühlmodulen beeinflusst wird, wie in Abbildung 9 dargestellt.

2.2.2 Untersuchung der Temperaturabhängigkeiten von weiteren Komponenten

2.2.2.1 Nasskühltürme

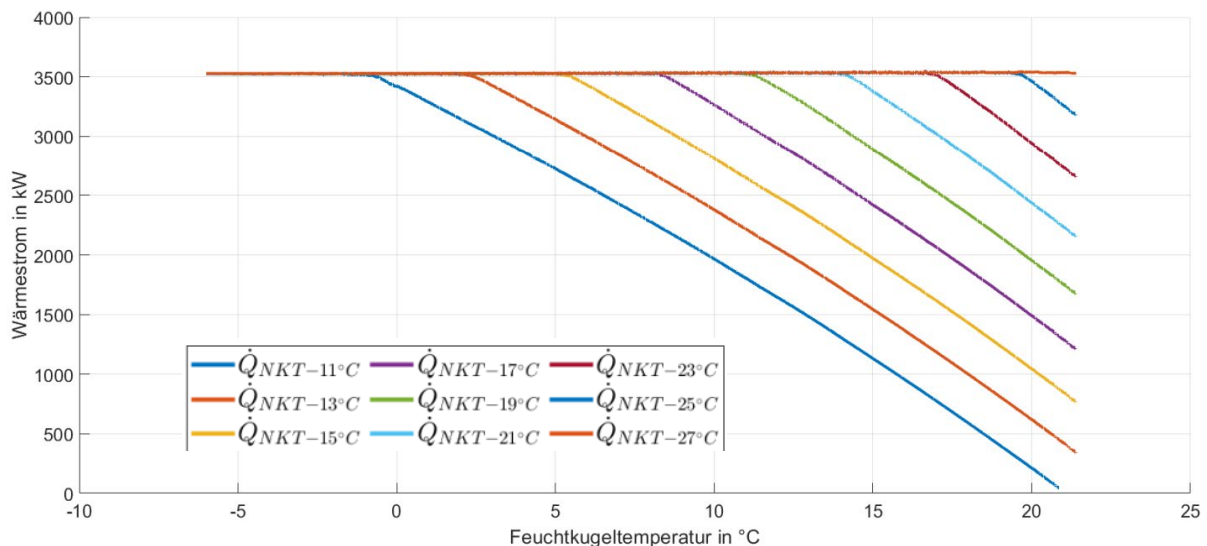


Abbildung 10: Kühlleistung in Abhängigkeit der Feuchtkugel- und Rechnerkreis-Vorlauftemperatur

Neben den CPUs weisen auch weitere Komponenten Temperaturabhängigkeiten auf. Aus der Analyse umfangreicher Messdaten lässt sich zeigen, dass die Kühlleistung und Effizienz der Nasskühltürme (NKT) stark von den Feuchtkugeltemperatur der Außenluft sowie den Vor- und Rücklauftemperaturen des Kühlkreises abhängen. Größere Temperaturdifferenzen zwischen dem Kühlmedium und der Umgebung führen zu einem höheren Wärmestrom, wodurch die notwendige elektrische Leistung der Ventilatoren sowie der Wasserverbrauch der Kühltürme sinken. Geringe Temperaturdifferenzen hingegen erfordern höhere Ventilatorumdrehzahlen und damit eine höhere Stromaufnahme. Ebenfalls erhöht sich der Wasserverbrauch, um den Kühlbedarf zu decken.

Die Leistungskennfelder der Kühltürme wurden mithilfe von Messdaten ermittelt. Die Abhängigkeit zwischen der Kälteleistung und dem Stromverbrauch der Kühltürme sowie der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen des Rechnerkreislaufs ist in den Abbildung 10 und Abbildung 11 veranschaulicht.

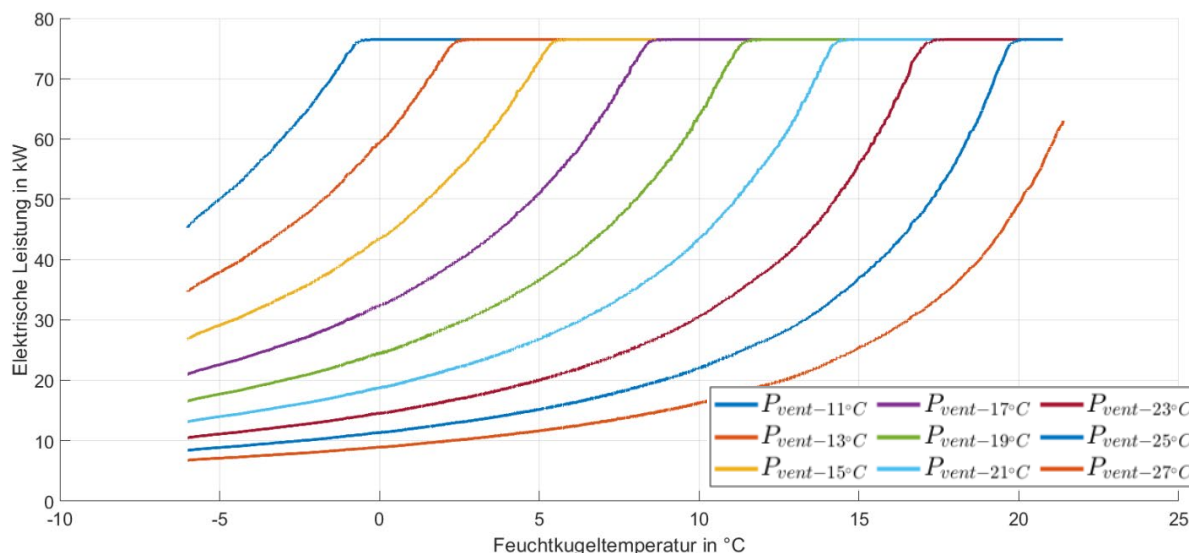


Abbildung 11: Strombedarf in Abhängigkeit der Feuchtkugel- und Rechnerkreislauf-Vorlauftemperatur

2.2.2.2 Ventilatoren

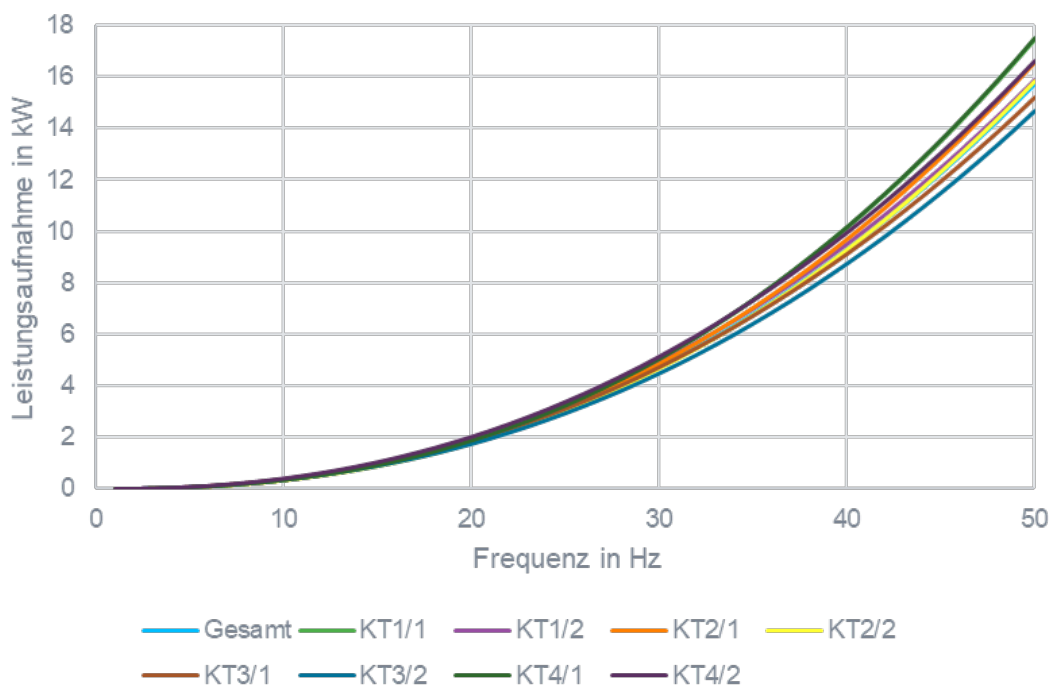


Abbildung 12: Stromverbrauch der Ventilatoren in den Nasskühltürmen von HAWK in Abhängigkeit von deren Drehzahl

Der Stromverbrauch der Ventilatoren in den Kühltürmen hängt von deren Drehzahl ab. Mithilfe von Messdaten konnte diese Abhängigkeit durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$P = a_1 \cdot n^{a_2} \quad (2)$$

Hierbei steht P für den Stromverbrauch und n für die Drehzahl der Ventilatoren. Die Parameter a_1 und a_2 wurden durch eine Kurvenanpassung auf Basis der gemessenen Daten bestimmt. Abbildung 12 zeigt die angepasste Kurve für alle acht Ventilatoren.

2.2.2.3 Pumpen

Die Pumpen im Nasskühlturmsystem, Rechnerkreislauf, USV-Kreislauf und CDU-Kreislauf sind wichtige Stromverbraucher. Die Abhängigkeit zwischen dem Volumenstrom sowie der Förderhöhe in jedem dieser Kreisläufe und dem Strombedarf der Pumpen wurde anhand der Produktdaten der Pumpenhersteller ermittelt. Diese Daten liefern die benötigten Informationen über die Effizienz der Pumpen bei verschiedenen Betriebsbedingungen und ist essenziell bei der Optimierung des Energieverbrauchs.

2.2.2.4 USV-System

Die USV ist verlustbehaftet, wobei die Verluste hauptsächlich durch Dissipation während der Rotation entstehen. Die entstehende Wärme wird an den Rechnerkreislauf des Flüssigkeitskühlsystems abgeführt. Die Abhängigkeit zwischen der Wärmeabgabe der USV an das Kühlsystem und der von der USV gelieferten elektrischen Leistung wurde anhand einer polynomialen Regression aus Messdaten ermittelt.

2.3 Modellierung und Validierung des dynamisch geregelten HLRS-Kühlsystems

Eine besondere Herausforderung bei der energetischen Bewertung der dynamischen Regelung der Kühltemperatur auf Basis von Simulationsrechnungen ist die korrekte mathematische Beschreibung der temperaturabhängigen Strombedarfe der Komponenten des Rechenzentrums und die Implementierung der dynamischen Regelstrategie selbst.

Die Entwicklung des HAWK-Kühlsystemmodells basiert auf dem detaillierten Rohrleitungs- und Instrumentendiagramm des Systems. Angesichts der Komplexität der Kühlinfrastruktur von HAWK wurde das Modell in vereinfachter, aber dennoch detaillierter Form erstellt, um sowohl Einfachheit als auch Genauigkeit zu gewährleisten. Der Entwicklungsprozess des Modells umfasste eine gründliche Definition der Eigenschaften und Konfigurationen der einzelnen Komponenten des Kühlsystems. Dies wurde durch die Verwendung von Herstellerangaben, Planungsdokumenten, Messdaten und Vor-Ort-Inspektionen erreicht, um sicherzustellen, dass das Modell mit dem realen System übereinstimmt.

2.3.1 Beschreibung des Modells

Der Modellierungsprozess wurde in der TRNSYS-Umgebung (TRaNsient SYstem Simulation [4]) durchgeführt, die umfassenden Bibliotheken zur Modellierung verschiedener Systemkomponenten bereitstellt.

Abbildung 13 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Kühlsystemmodells, das aus drei Hauptkomponenten besteht: dem Modell für die IT-Komponenten, dem Modell für Flüssigkeitskühlsystem und dem Modell für Luftkühlsystem.

Das IT-Modell bestimmt die Wärmeübertragung von den IT-Komponenten sowohl an das Flüssigkeitskühlsystem als auch an die Luft im Serverraum ($\dot{Q}_{IT,L}$ und $\dot{Q}_{IT,A}$) und berechnet die CPU-Temperaturen. Dieses Modell stützt sich auf Eingaben wie den Stromverbrauch der Server, die Vor- und Rücklauftemperaturen im CDU-Kreislauf (T_{TCS}) sowie die Raumtemperatur (T_{room}).

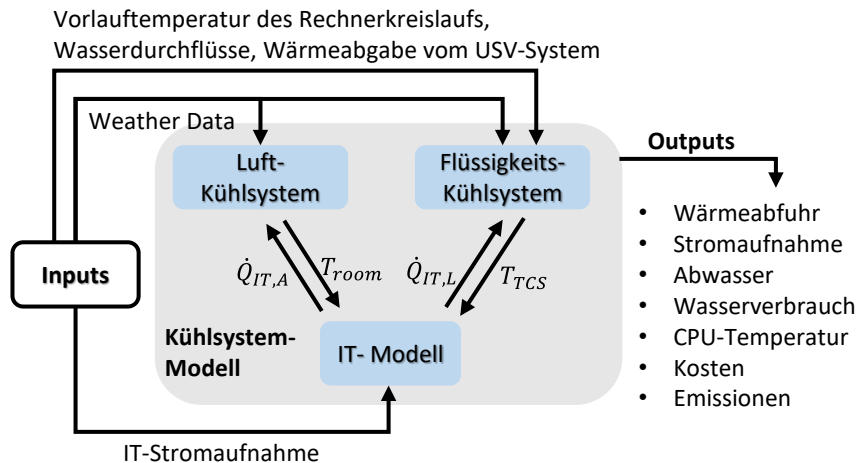


Abbildung 13: Übersicht des Kühlsystemmodells

Das Modell des Flüssigkeitskühlsystems umfasst Komponenten von den Nasskühltürmen bis hin zu den Verbindungen mit der Fernkälte und den CDU-Kreislauf. Es berechnet verschiedene Ausgaben, darunter Temperaturen im Kühlsystem, die thermische Leistung und den Energieverbrauch des Flüssigkeitskühlsystems sowie den Wasserverbrauch und die Abwasserproduktion der Nasskühltürme. Diese Berechnungen basieren auf Eingangsdaten wie Wetterdaten, Wärmeabgabe von IT-Komponenten und USV-Systemen, einer vordefinierten Vorlauftemperatur des Rechner-Kreislaufs und einem festgelegten Volumenstrom in den verschiedenen Kreisläufen.

Das Modell des Luftkühlsystems verwendet die Wärmeabgabe der Server an die Raumluft, wie sie vom IT-Modell bestimmt wurde, zusammen mit Wetterdaten, um den Energieverbrauch des Luftkühlsystems zu berechnen.

Abschließend berechnet das Modell die Emissionen und Betriebskosten des gesamten Kühlsystems. Diese Daten basieren auf dem berechneten Energieverbrauch, dem Wasserverbrauch und der Abwasserproduktion.

Das entwickelte Modell des gesamten Kühlsystems bietet eine detaillierte Darstellung aller kritischen Komponenten und das Rohrleitungsnetz. Abbildung 14 zeigt eine anschauliche Übersicht des in der TRNSYS-Simulationsumgebung entwickelten Flüssigkeitskühlsystemmodells. Das Modell umfasst USV-Systeme, Kühltürme mit ihren Ventilatoren, das Fernkältesystem, Pumpen, Wärmeübertrager, Ventile und die dazugehörigen Regelungssysteme.

Das thermische Verhalten der Kühltürme wird mithilfe von Kennfeldern modelliert, die aus den Messdaten abgeleitet wurden. Abbildung 15 zeigt die berechnete und gemessene Kühlleistung der Nasskühltürme in Abhängigkeit von der Feuchtkugelttemperatur der Außenluft im Jahr 2021 (5-minutige Intervall).

Für die Berechnung der Wasserverluste während des Verdunstungsprozesses wird angenommen, dass die Luft den Kühlturm mit einer relativen Luftfeuchte von 100 % verlässt. Sollte die Enthalpieänderung des Wassers nicht ausreichen, um die relative Luftfeuchte bei gleichbleibender Lufttemperatur (Trockentemperatur) auf 100 % zu erhöhen, wird angenommen, dass die Trockentemperatur der Luft konstant bleibt. In diesem Fall wird die relative Luftfeuchte solange erhöht, bis die Enthalpieänderung von Luft und Wasser übereinstimmen.

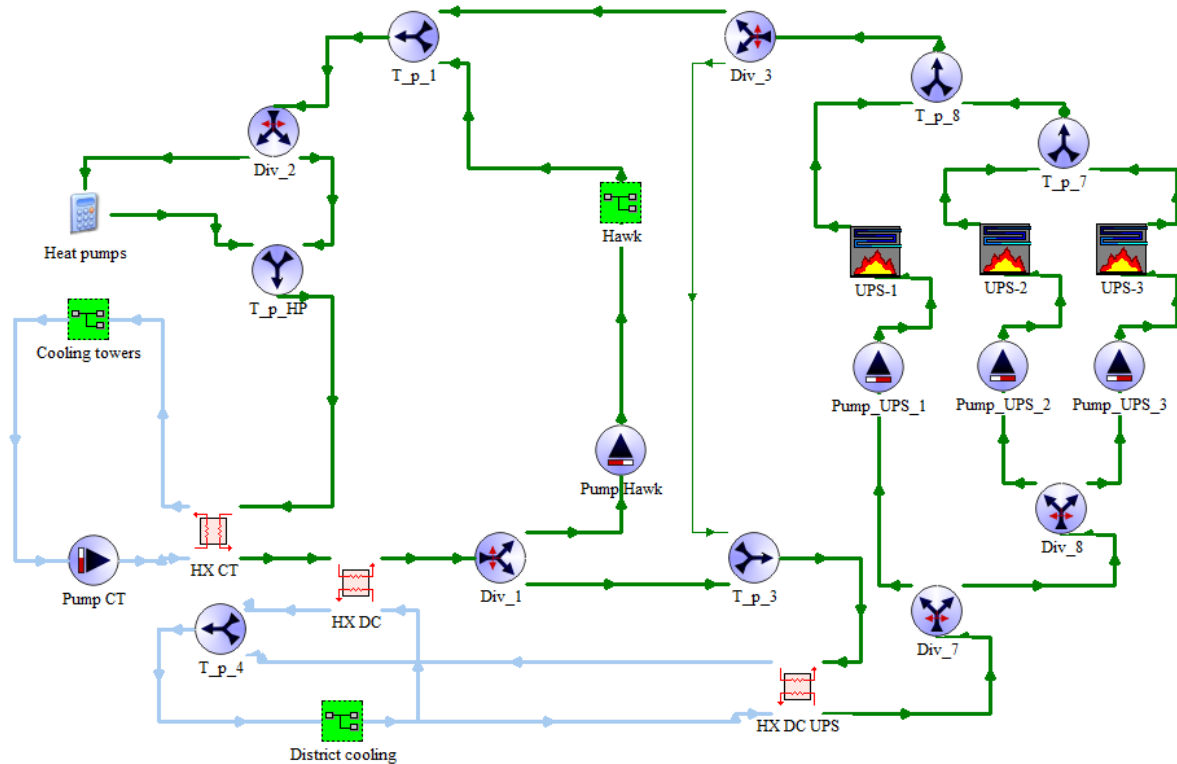


Abbildung 14: Übersicht des im TRNSYS-Simulationsumfeld entwickelten Modells vom Flüssigkeitskühlsystem

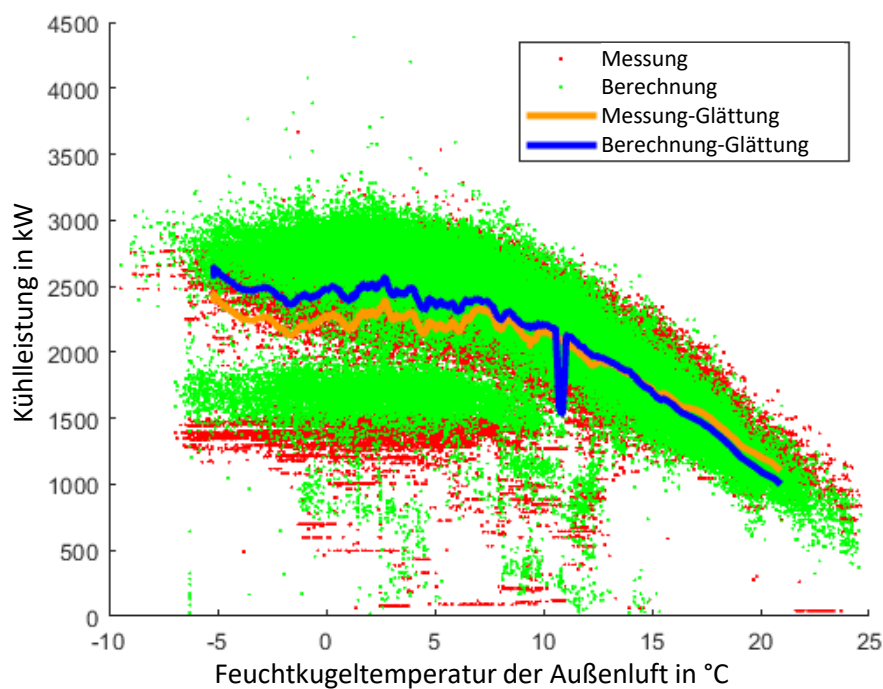


Abbildung 15: Gemessene und berechnete Kühlleistung von Nasskühltürme im Jahr 2021 (5-minütige Intervall)

Darüber hinaus umfasst der gesamte Wasserverbrauch des Nasskühlturms nicht nur das durch Verdunstung verlorene Wasser, sondern auch das Wasser, das im Entsalzungsprozess

verbraucht wird. Dieser Prozess wird vereinfacht als konstanter Anteil dem verdunsteten Wassers zugeschlagen.

Der Stromverbrauch jedes Ventilators im Kühlturm wird auf Basis des Luftvolumenstroms berechnet, unter Verwendung der vorherigen Untersuchung abgeleitete Gleichungen.

Zusätzlich zu den Kühltürmen dient die Fernkälte als sekundäre Kühlquelle. Die Fernkälte ist über zwei Wärmeübertrager in den Rechner-Kreislauf integriert. Der Stromverbrauch der Kältemaschinen wird unter Berücksichtigung des Energy Efficiency Ratio (EER) bestimmt, das laut den Daten des Fernkälteanbieters im Jahresdurchschnitt etwa 4,5 beträgt. Die Pumpen im Fernkältekreislauf befinden sich außerhalb der Systemgrenze. Innerhalb des Systems wird der erforderliche Massenstrom durch Regelventile angepasst. Diese Ventile werden von PI-Reglern gesteuert, um die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs sowie die Vorlauftemperatur des USV-Kreislaufs auf den gewünschten Sollwert zu halten.

Darüber hinaus berücksichtigt das Modell Wärmepumpen, obwohl ihr Beitrag zum jährlichen Energieprofil relativ gering ist. Diese Wärmepumpen nutzen den Rechnerkreislauf als Wärmequelle. Die gemessenen Steuersignale der Wärmepumpen werden als Eingaben in die Simulation integriert.

Alle Pumpen und Wärmeübertrager im Flüssigkeitskühlsystem sind im Modell abgebildet. Bei den Pumpen handelt es sich um drehzahlgeregelte Pumpen, und die Wärmeabgabe an das Kühlsystem ist minimal. Die Modellparameter der Pumpen werden aus den jeweiligen Datenblättern abgeleitet, wobei die Pumpenleistung als polynomiale Funktion des Volumenstroms modelliert wird. Die Steuerung der Pumpen erfolgt entsprechend den vorgegebenen Volumenströmen im Kühlsystem.

Die Wärmeübertrager im System sind nach dem Gegenstromprinzip ausgelegt. Zusätzlich sind sie gut wärmegeklämt, sodass der Wärmeaustausch mit der Umgebung vernachlässigbar ist. Daher wurden sie in der Modellierung als adiabatish angenommen. Im Modell werden die Wärmeübertrager ohne Wärmekapazität betrachtet, und der Gesamtwärmeübergangskoeffizient wird als konstant angenommen, selbst bei variierenden Volumenströmen. Der Gesamtwärmeübergangskoeffizienten wurden aus den technischen Datenblättern entnommen. Während der Simulation wird die Effektivität jedes Wärmeübertragers dynamisch berechnet.

Zudem sind alle notwendigen Rohrleitungen im Kühlsystem im Modell enthalten, jedoch als adiabatish implementiert, da die Rohre gut wärmegeklämt sind. Der energetische Einfluss der Rohrleitungen auf das Flüssigkeitskühlsystem wird als vernachlässigbar betrachtet, was durch Messdaten bestätigt wird.

2.3.2 Modellvalidierung

2.3.2.1 Thermische Verhalten

Im analysierten System wird die von der IT-Geräte erzeugte Wärme hauptsächlich über Nasskühltürme an die Außenumgebung abgegeben. Daher liegt der Schwerpunkt dieses Abschnitts auf der Validierung des simulierten thermischen Verhaltens der Nasskühltürme.

Abbildung 16 zeigt einen Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmemengen, die im Jahr 2022 über die Nasskühltürme an die Außenumgebung abgeführt wurden. Die zeitliche Auflösung sowohl der gemessenen als auch der simulierten Daten

beträgt fünf Minuten. Für den Zweck dieses Vergleichs wurden die Daten auf stündliche Zeitintervalle umgerechnet.

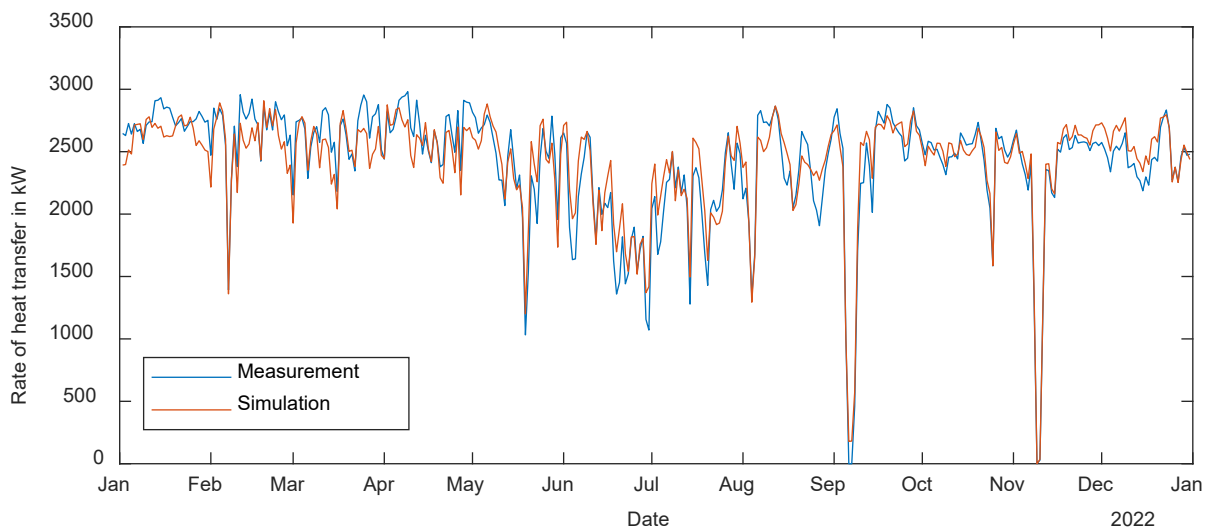


Abbildung 16: Vergleich der gemessenen und simulierten stündlichen durchschnittlichen Kühlleistung der Nasskühltürme für das Jahr 2022 (RMSE: 181,13 kW, CVRMSE: 7,50 %, MBE: 5,70 kW, NMBE: 0,24 %)

Die Abbildung verdeutlicht den Schwankungen von der Kühlleistung des Nasskühltürme-Systems, die durch Veränderungen der Außenbedingungen hervorgerufen werden. Insbesondere in den Sommermonaten, die durch hohe Feuchtkugelttemperaturen gekennzeichnet sind, sinkt die Kühlleistung der Nasskühltürme. Diese Reduzierung der Kühlleistung erfordert eine zusätzliche Kühlung, die in diesem Fall durch das Fernkältenetz bereitgestellt wird. Die signifikanten Leistungseinbrüche im September und November sind auf die vorübergehende Abschaltung des Kühlturmsystems zurückzuführen. Alle diese Schwankungen der Kühlleistung werden in der Simulation abgebildet.

Die Analyse ergibt einen CVRMSE-Wert von 7,50 % und einen NMBE-Wert von 0,24 % für die stündlich aggregierten Daten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das entwickelte Modell des Flüssigkeitskühlsystems die Validierungskriterien erfüllt und eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten in Bezug auf das thermische Verhalten aufweist.

2.3.2.2 Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch der Nasskühltürme spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Betriebskosten und Emissionen, die mit dem Flüssigkeitskühlsystem verbunden sind.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich des gemessenen und simulierten monatlichen Wasserverbrauchs. Die Messdaten wurden monatlich manuell erfasst. Die Simulationsdaten, die ursprünglich in 5-Minuten-Intervallen vorlagen, wurden auf monatliche Intervalle umgerechnet, um dem Intervall der Messdaten zu entsprechen.

Die Messdaten verdeutlichen den Einfluss saisonaler Schwankungen auf den Wasserverbrauch, wobei der Verbrauch in den Sommermonaten deutlich zunimmt. Dieser saisonale Trend wird in den Simulationsdaten genau wiedergegeben.

Die vergleichende Analyse ergibt einen CVRMSE-Wert von 8,73 % und einen NMBE-Wert von -4,07 %. Diese Indizes zeigen, dass das entwickelte Modell des Flüssigkeitskühlsystems die Validierungskriterien für die Vorhersage des Wasserverbrauchs erfüllt.

Monatliche Wasserverbrauch in m ³		
Monat	Messung	Simulation
Jan.	2521	2431
Feb.	2410	2334
Mär.	2747	2713
Apr.	3021	2727
Mai	3052	2999
Jun.	2814	2652
Jul.	3300	3074
Aug.	3435	3258
Sep.	2733	2494
Okt.	2269	2783
Nov.	2584	2185
Dez.	2499	2376

Tabelle 1: Gemessener und simulierter monatlicher Wasserverbrauch im Jahr 2022 (CVRMSE: 8,73%, NMBE: -4,07%)

2.3.2.3 Stromverbrauch

Die größten Stromverbraucher im Flüssigkeitskühlsystem umfassen die Ventilatoren der Nasskühltürme, die Pumpen im Wassersystem der Anlage sowie im Nasskühlturmsystem, die Kältemaschinen für die Fernkühlung und die Wärmepumpen.

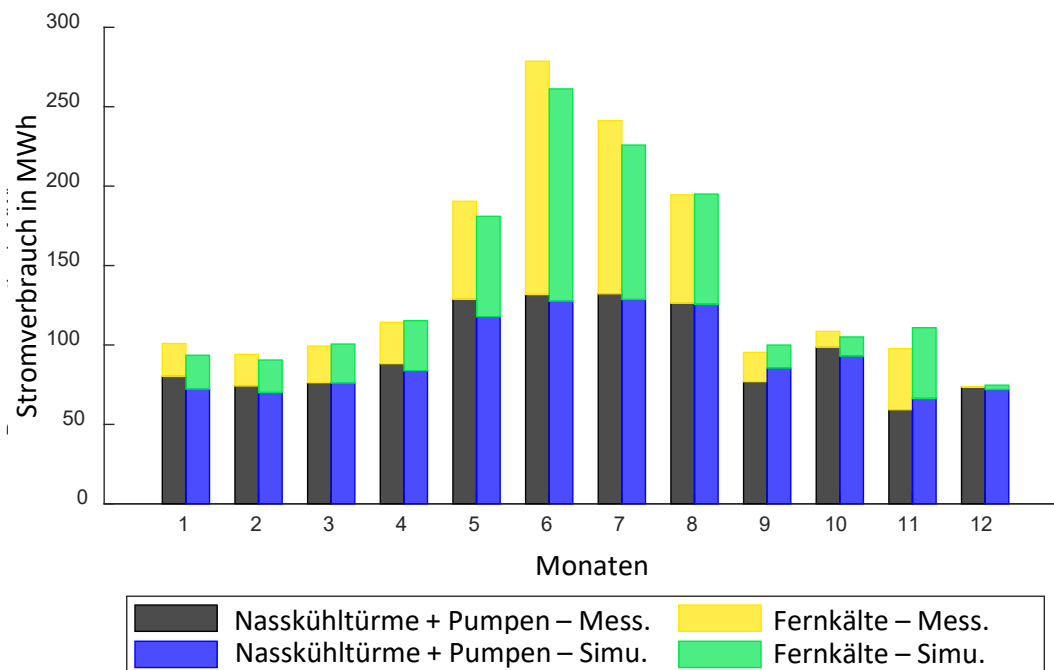


Abbildung 17: Vergleich des gemessenen und simulierten monatlichen Stromverbrauchs des Flüssigkeitskühlsystems im Jahr 2022 (für den stündlichen Gesamtstrombedarf, RMSE: 36,37 kW, CVRMSE: 18,81 %, MBE: -4,01 kW, NMBE: -2,07 %)

Abbildung 17 zeigt einen Vergleich des gemessenen und simulierten monatlichen Stromverbrauchs im Flüssigkeitskühlsystem. Im Jahr 2022 waren in den Wintermonaten die Nasskühltürme und Pumpen die Hauptstromverbraucher. Von Mai bis August steigt der Stromverbrauch sowohl der Nasskühltürme und Pumpen als auch der Fernkühlung deutlich an, wobei insbesondere die Fernkälte einen merklichen Anstieg verzeichnet und zu einem der

größten Stromverbraucher wird. Insgesamt weisen die Simulations- und Messdaten eine hohe Übereinstimmung auf.

Die vergleichende Analyse zwischen den simulierten und gemessenen Daten ergibt einen CVRMSE-Wert von 18,81 % und einen NMBE-Wert von -2,07 % für stündliche Daten. Diese Werte deuten darauf hin, dass das entwickelte Modell des Kühlsystems die Validierungskriterien für die Vorhersage des Stromverbrauchs erfüllt.

2.4 Numerische Analyse und Optimierung des gesamten Kühlsystems

Das zuvor validierte Modell des HLRS-Kühlsystems steht nun für umfangreiche Simulationsstudien zur Verfügung. Das Optimierungspotential kann hierdurch aufgezeigt werden.

2.4.1 Numerische Simulation der Kühlsystems

Aufbauend auf dem im Kapitel 2.3 beschriebenen Modell des Kühlsystems wird in diesem Abschnitt eine umfassende simulative Untersuchung durchgeführt, die darauf abzielt, eine Regelstrategie zur Optimierung der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs in Abhängigkeit von den Außenbedingungen zu entwickeln. Es ist wichtig zu beachten, dass im Rahmen dieser Untersuchung angenommen wird, dass das Rechenzentrum unter einer festen IT-Leistungsaufnahme arbeitet. Unter diesen Annahmen wird die Leistung des Kühlsystems, einschließlich Kennzahlen wie Betriebskosten, Stromverbrauch, Emissionen und CPU-Temperaturen, ausschließlich durch die Außenbedingungen und die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs beeinflusst. Mit anderen Worten: Für eine gegebene Außenbedingung gibt es eine optimale Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs, die die gewünschte Kennzahl des Kühlsystems optimiert.

Das Kühlsystem vom HAWK-Supercomputer nutzt hauptsächlich die Nasskühltürme, um die Wärme an die Umgebung abzuführen. Daher wurde die Feuchtkugeltemperatur der Außenluft als wichtiger Eingangswert für den Regelalgorithmus gewählt.

Zunächst wird in der Untersuchung der Stromverbrauch des HAWK-Systems für die Simulation festgelegt, vereinfacht auf einen konstanten Wert von 3000 kW über das gesamte Jahr. Dies basiert darauf, dass der tatsächliche Stromverbrauch größtenteils zwischen 2800 kW und 3200 kW schwankt.

Anschließend werden die möglichen Bereiche für die Feuchtkugeltemperatur und die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs auf Grundlage historischer Klimadaten für Stuttgart sowie der betrieblichen Grenzen und der Auslegung des Kühlsystems definiert. Die Feuchtkugeltemperatur liegt im Bereich von -10°C bis 25°C, während die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs von 10°C bis 30°C reicht.

Um die Systemleistung, inklusiv Betriebskosten, Stromverbrauch, Emissionen und CPU-Temperaturen, unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu bewerten, wurden in der Simulation alle Vorlauftemperaturen innerhalb des festgelegten Bereichs mit einer Auflösung von 1 K getestet. Diese Tests wurden unter verschiedenen Feuchtkugeltemperaturen, ebenfalls mit einer Auflösung von 1 K, durchgeführt. Dieses Vorgehen führte zu 756 Simulationssätzen (21 Vorlauftemperaturen multipliziert mit 36 Feuchtkugeltemperaturen).

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Simulationsergebnisse für die Energieeffizienz und die Betriebskosten bei Feuchtkugelttemperaturen von 3°C, 12°C und 19°C.

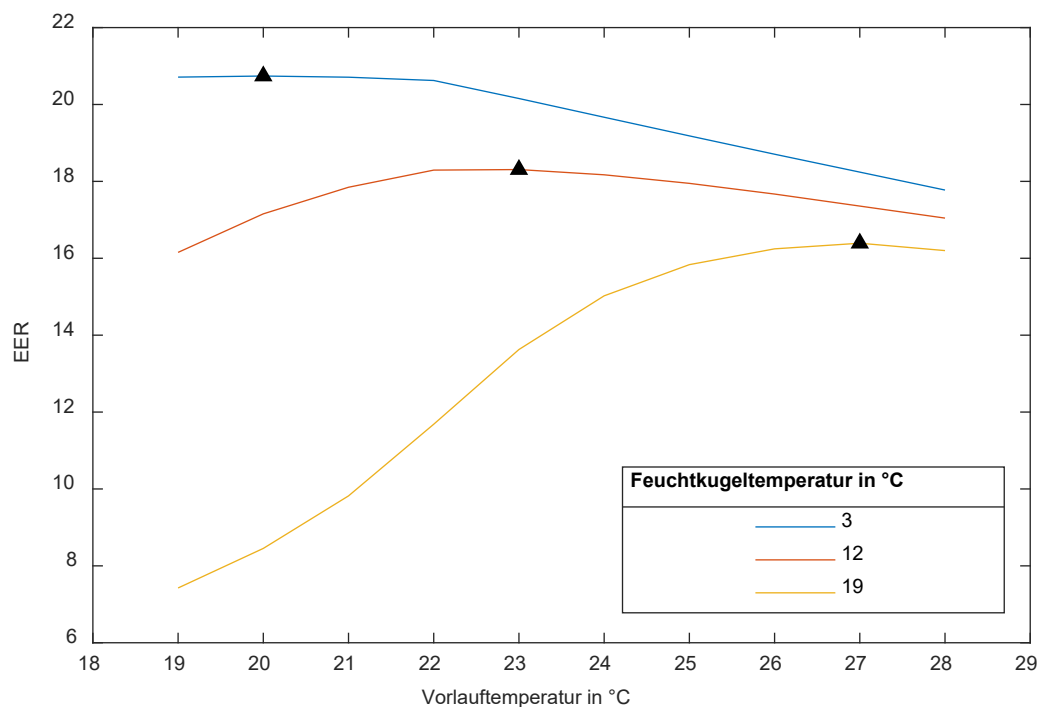


Abbildung 18: Energieeffizienz (EER) des Kühlsystems bei verschiedenen Feuchtkugelttemperaturen (3 °C, 12 °C und 19 °C) und Vorlauftemperaturen

Abbildung 18 stellt das Verhältnis der Energieeffizienz (EER) des Kühlsystems dar, definiert als das Verhältnis der Kühlleistung (entsprechend dem Strombedarf der IT) zur Leistungsaufnahme des Kühlsystems, bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen für die angegebenen Feuchtkugelttemperaturen. Die Dreiecksmarkierungen zeigen die Vorlauftemperaturen des Rechnerkreislafs, bei denen das Kühlsystem für jede gegebene Feuchtkugeltemperatur die höchste Energieeffizienz erreicht. Wie zu erkennen ist, muss bei steigender Feuchtkugeltemperatur auch die Vorlauftemperatur erhöht werden, um das Kühlsystem im energieeffizientesten Zustand zu betreiben.

Auch für die Betriebskosten (siehe Abbildung 19) ist es vorteilhafter, die Vorlauftemperatur mit steigender Feuchtkugeltemperatur zu erhöhen. Allerdings ist deutlich zu sehen, dass die Vorlauftemperatur für den kostengünstigsten Betrieb niedriger ist, als die für den energieeffizientesten Betrieb. Zum Beispiel führt bei einer Feuchtkugeltemperatur von 19°C eine Vorlauftemperatur von 27°C zum energieeffizientesten Betrieb, während eine Vorlauftemperatur von 25°C zu den niedrigsten Betriebskosten führt. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Nasskühltürme bei höheren Wassertemperaturen größere Wasserverluste aufweisen.

Bei der Entwicklung des Regelungsalgorithmus müssen alle für den Rechenzentrumsbetrieb wichtigen Kennzahlen, wie Betriebskosten, Stromverbrauch, Emissionen und CPU-Temperaturen, ganzheitlich berücksichtigt werden. Eine optimierte Regelung sollte die Balance zwischen Betriebskosten, Stromverbrauch, und Emissionen finden und gleichzeitig die

technischen Anforderungen an das Rechenzentrum, wie die Einhaltung der zulässigen CPU-Temperaturen, sicherstellen.

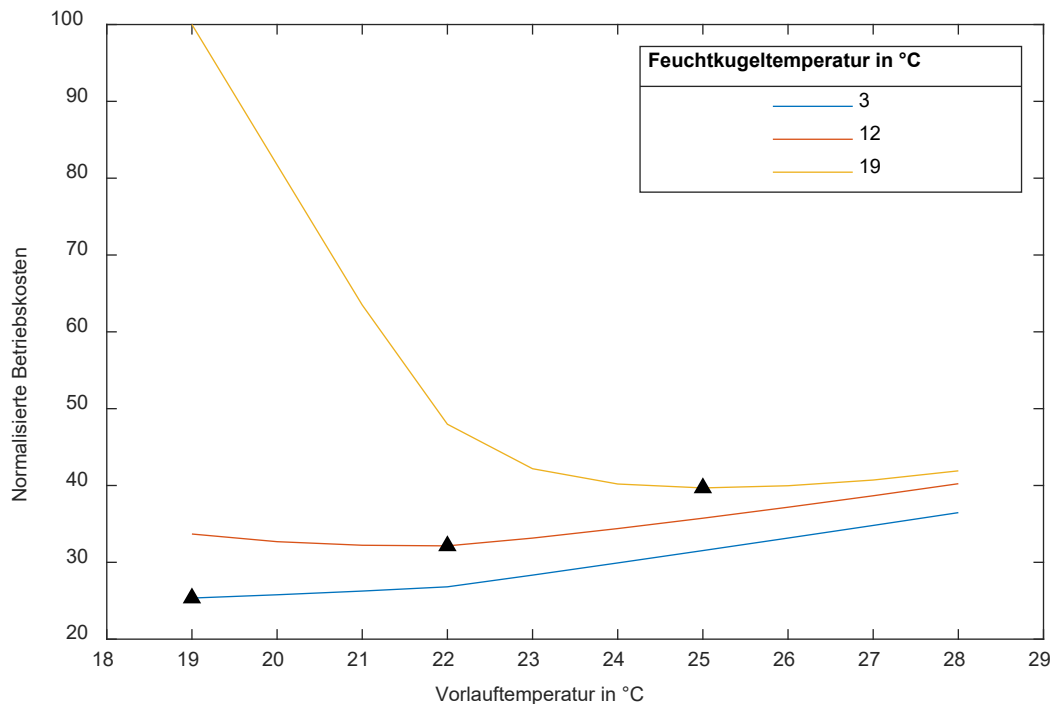


Abbildung 19: Normalisierte Betriebskosten des Kühlsystems bei verschiedenen Feuchtkugelttemperaturen (3 °C, 12 °C und 19 °C) und Vorlauftemperaturen

2.4.2 Optimierung des Gesamtsystems

Basierend auf den oben genannten Untersuchungen können verschiedene dynamische Temperaturregelungsstrategien entwickelt werden, die die Systemleistung optimieren. Hier wird die theoretische Leistungssteigerung bei der Implementierung zweier Algorithmen dargestellt: Der eine Algorithmus zielt auf das Energieoptimum, der andere auf das Kostenoptimum ab.

Abbildung 20 vergleicht den simulierten jährlichen Stromverbrauch des Kühlsystems von HAWK bei verschiedenen Einstellungen der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs. Für die Simulation wurden Wetterdaten aus dem Jahr 2022 in Stuttgart verwendet, wobei der IT-Strombedarf konstant auf 3 MW über das gesamte Jahr festgelegt wurde.

Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, bleibt der Stromverbrauch der Pumpen bei allen Einstellungen konstant, da die Durchflussraten in jedem Kreislauf festgelegt sind. Mit steigender Vorlauftemperatur sinkt jedoch der Stromverbrauch der Ventilatoren der Kühltürme. Gleichzeitig steigt der Stromverbrauch des Luftkühlsystems aufgrund der erhöhten Wärmemenge, die an die Raumluft des Serverraums abgegeben wird.

Wie vorher erwähnt, benötigt das USV-System eine Flüssigkeitskühlung mit einer Eintrittstemperatur unter 22 °C. Diese Anforderung beeinflusst den Stromverbrauch der Kältemaschinen, der zunächst mit steigender Vorlauftemperatur abnimmt. Sobald die Vorlauftemperatur jedoch 22 °C überschreitet, steigt der Stromverbrauch der Kältemaschinen wieder an.

Bei einer Vorlauftemperatur von 17 °C (Ausgangssituation) würde das Kühlsystem von HAWK jährlich 2036 MWh Strom verbrauchen. Durch die Verwendung des entwickelten Algorithmus zur dynamischen Temperaturregelung (auf Energieoptimum) sinkt der jährliche Stromverbrauch des Kühlsystems auf 1420 MWh, was eine Reduktion von 30,25 % darstellt und das System energieeffizienter macht als jede feste Einstellung der Vorlauftemperatur. Zudem bleibt die maximale CPU-Temperatur mit der dynamischen Regelung unter 68 °C, was die Betriebssicherheit gewährleistet. Die jährliche durchschnittliche CPU-Temperatur beträgt mit der dynamischen Regelung 52,9 °C. Dies ist lediglich 5 K höher als bei der anfänglichen Einstellung (47,9 °C).

Eine konstante Vorlauftemperatur von 23 °C führt zu einer jährlichen durchschnittlichen CPU-Temperatur von 53 °C, die vergleichbar mit der Temperatur bei der dynamischen Temperaturregelung ist. Bemerkenswert ist, dass das Kühlsystem mit dynamischer Temperaturregelung 3,06 % weniger Strom verbraucht als das System mit der günstigsten festen Temperatureinstellung.

Abbildung 21 vergleicht die simulierten jährlichen normalisierten Betriebskosten des Kühlsystems von HAWK bei verschiedenen Einstellungen der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs. Wie zu erkennen ist, sinken mit steigender Vorlauftemperatur die Kosten für die Wasserkühlung, während die Kosten für die Luftkühlung steigen. Die Kosten für die Kältemaschinen sinken zunächst, steigen jedoch wieder an, sobald die Vorlauftemperatur 22 °C überschreitet.

Durch die Verwendung des entwickelten Algorithmus zur dynamischen Temperaturregelung (auf Kostenoptimum) sinken die jährlichen Betriebskosten des Kühlsystems um etwa 29 %, wodurch das System kosteneffizienter wird als bei jeder festen Einstellung der Vorlauftemperatur.

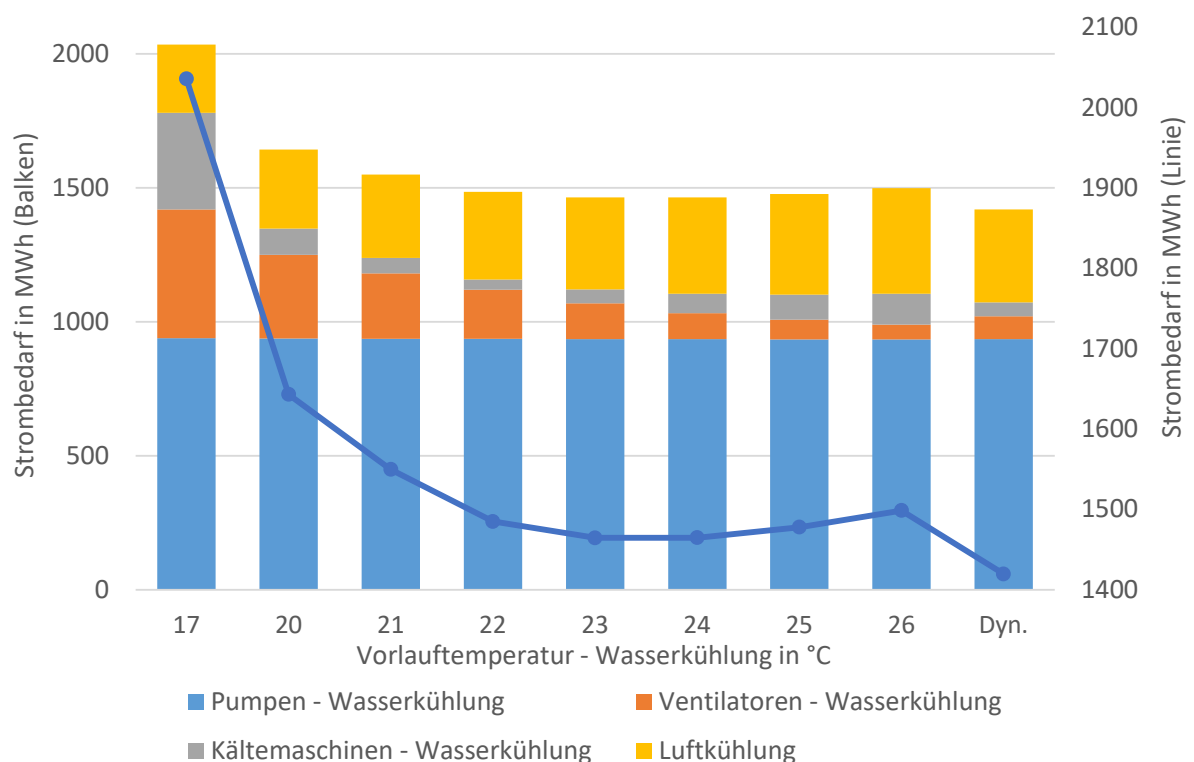


Abbildung 20: Simulierter jährlicher Stromverbrauch des Kühlsystems von HAWK bei unterschiedlichen Einstellungen der Vorlauftemperatur

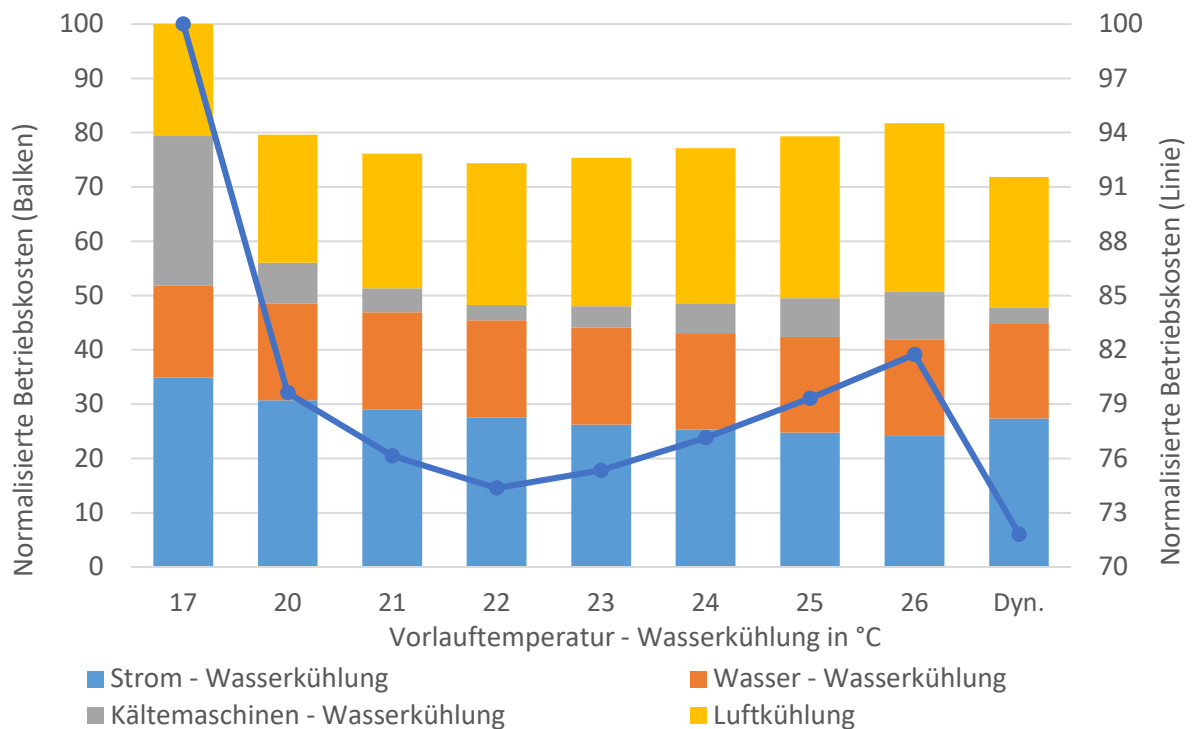


Abbildung 21: Simulierte jährlichen normalisierten Betriebskosten des Kühlsystems von HAWK bei unterschiedlichen Einstellungen der Vorlauftemperatur

2.4.3 Umsetzung der entwickelten Betriebsstrategie am HLRS

In diesem Kapitel wird die praktische Umsetzung der dynamischen Temperaturregelungsstrategie erläutert. Im Jahr 2023 wurde die dynamische Temperaturregelung im Flüssigkeitskühlsystem des Supercomputers HAWK implementiert. Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und Ausfälle oder Überhitzungen zu verhindern, wurde zunächst ein relativ einfacher Algorithmus implementiert. Dieser Schritt ist notwendig, um die Machbarkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen dynamischen Regelungsstrategie zu testen, bevor eines komplexeren Regelalgorithmus eingeführt wird.

Der implementierte Algorithmus hat die Form einer linearen Funktion, wie in folgender Gleichung dargestellt:

$$\text{Vorlauftemperatur} = \text{Feuchtkugeltemperatur} + 6.5K, \quad (3)$$

mit den Einschränkungen einer maximalen Vorlauftemperatur von 25°C und einer minimalen von 14°C.

Bis zum Ende des Projekts ist keinen Ausfall, keine Überhitzung oder sonstige Anomalien in den Systemen von HAWK bekannt, die durch die Implementierung der entwickelten Methodik zur dynamischen Temperaturregelung im Flüssigkühlsystem verursacht wurden.

Die Leistung des Flüssigkeitskühlsystems bei einer konstanten Temperaturregelung (von Juni 2021 bis Juni 2022, gehalten auf 17°C) wurde mit der Leistung bei der dynamischen Temperaturregelung (während des gesamten Jahres 2023, basierend auf der linearen Funktion gemäß Gleichung (3)) verglichen. Um ausschließlich die Leistung des

Flüssigkeitskühlsystems zu analysieren, wurden Energieverluste im Stromverteilungssystem und der Energieverbrauch der Beleuchtung aus der Analyse ausgeschlossen. Der Vergleich erfolgte anhand des Indexes PUE_{LC} . PUE_{LC} wird als das Verhältnis der Energie, die vom Flüssigkeitskühlsystem und den IT-Geräten (IT) verbraucht wird, zur Energie, die allein von den IT-Geräten verwendet wird, berechnet:

$$PUE_{LC} = \frac{\text{Flüssigkeitskühlsystem} + IT}{IT} \quad (4)$$

Um einen fairen Vergleich zu gewährleisten, wurden Daten aus Zeiträumen, in denen HAWK im Leerlauf betrieben wurde, die Kühltürme abgeschaltet waren oder das USV-System nicht in Betrieb war, aus der Analyse ausgeschlossen.

Abbildung 22 zeigt die stündlichen Durchschnittswerte des PUE_{LC} von HAWK mit beiden Regelstrategien in Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft.

Bei niedrigen Außentemperaturen ist die Leistung des Flüssigkeitskühlsystems bei beiden Strategien ähnlich. Sobald die Feuchtkugeltemperatur jedoch 10°C überschreitet, wird die Vorteil der dynamischen Regelstrategie deutlich. Während der PUE_{LC} des Systems mit konstanter Temperaturregelung schnell ansteigt, bleibt der PUE_{LC} des Systems mit dynamischer Temperaturregelung bis zu einer Feuchtkugeltemperatur von etwa 20°C unter 1,065. Bei einer Feuchtkugeltemperatur von 17,6°C liegt der PUE_{LC} des Systems mit konstanter Temperaturregelung bei etwa 1,18, während der PUE_{LC} des Systems mit dynamischer Regelung bei etwa 1,06 liegt. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 66,67 % für den Energieaufwand der Kühlung bei Verwendung der dynamischen Regelstrategie.

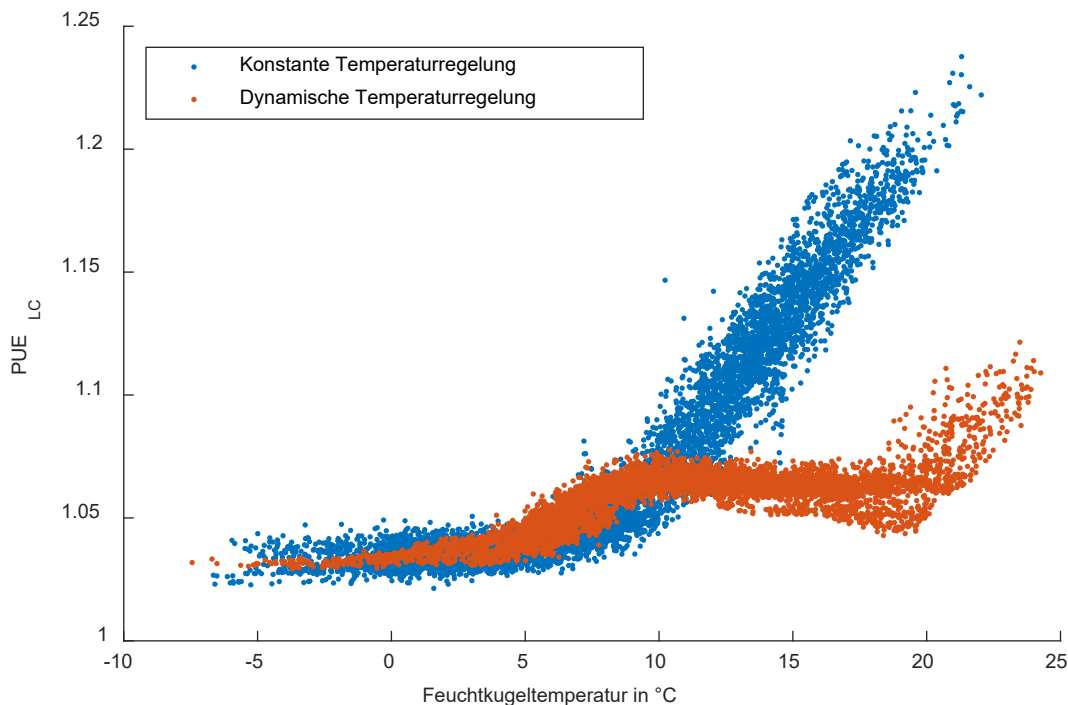


Abbildung 22: Stündliche Durchschnittswerte des PUE_{LC} des Flüssigkeitskühlsystems von HAWK unter konstanter und dynamischer Temperaturregelung in Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft

2.5 Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf anderen Rechenzentren

In diesem Arbeitsschritt werden die zuvor am HLRS gewonnenen theoretischen Erkenntnisse und praktischen Erfahrungen zur dynamischen Betriebsweise auf andere Rechenzentren übertragen. Dabei wird ein hypothetisches Rechenzentrum untersucht und die sich daraus ergebenden Potenziale ermittelt. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf dem Energieeinsparpotenzial durch die Implementierung einer dynamischen Temperaturregelung in Rechenzentren, die ausschließlich Kühltürme für die Flüssigkeitskühlung nutzen.

Wie in Abbildung 23 veranschaulicht, unterscheidet sich das in diesem Kapitel betrachtete hypothetische Rechenzentrum vom Supercomputer HAWK darin, dass es keine USV-Systeme besitzt. Außerdem verfügt das hypothetische Rechenzentrum über keine Kältemaschinen und setzt ausschließlich auf Nasskühltürme für die Kühlung des Rechners. Abgesehen von diesen Unterschieden sind die Betriebsparameter des hypothetischen Rechenzentrums identisch mit denen des Supercomputers HAWK.

Ähnlich wie das Kühlsystem von HAWK verwendet das hypothetische Rechenzentrum hauptsächlich Nasskühltürme, um die Wärme in die Umgebung abzuführen. Daher wird die Feuchtkugeltemperatur der Außenluft als wichtiger Eingangswert für den Regelalgorithmus gewählt.

Wie in den Simulationsparametern für HAWK im Kapitel 2.4 beschrieben, wird der Stromverbrauch der IT-Ausrüstung im gesamten Jahr konstant auf 3000 kW festgelegt, und es werden Wetterdaten aus Stuttgart, Jahr 2022, für die Simulation verwendet.

Die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislafs ist so definiert, dass sie von einem Minimum von 10°C bis zu einem Maximum reicht, das sicherstellt, dass die CPU-Temperatur beim Betrieb mit maximaler Frequenz nicht ihren Grenzwert von 85°C überschreitet. Dieser obere Grenzwert für die Vorlauftemperatur des Rechnerkreislafs wird auf 45°C berechnet.

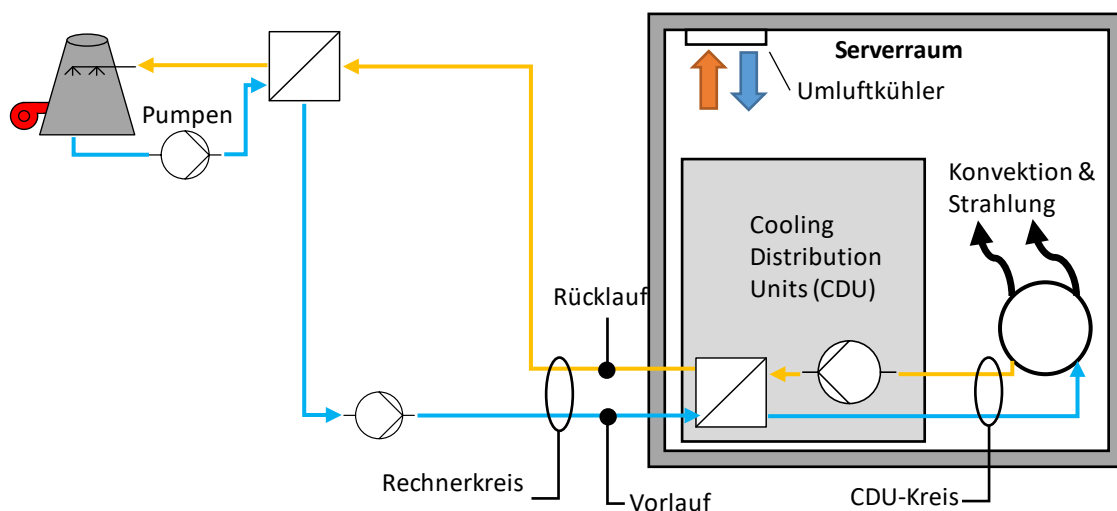


Abbildung 23: Vereinfachtes Schema des Flüssigkeitskühlsystems von dem in diesem Kapitel betrachteten hypothetischen Rechenzentrum

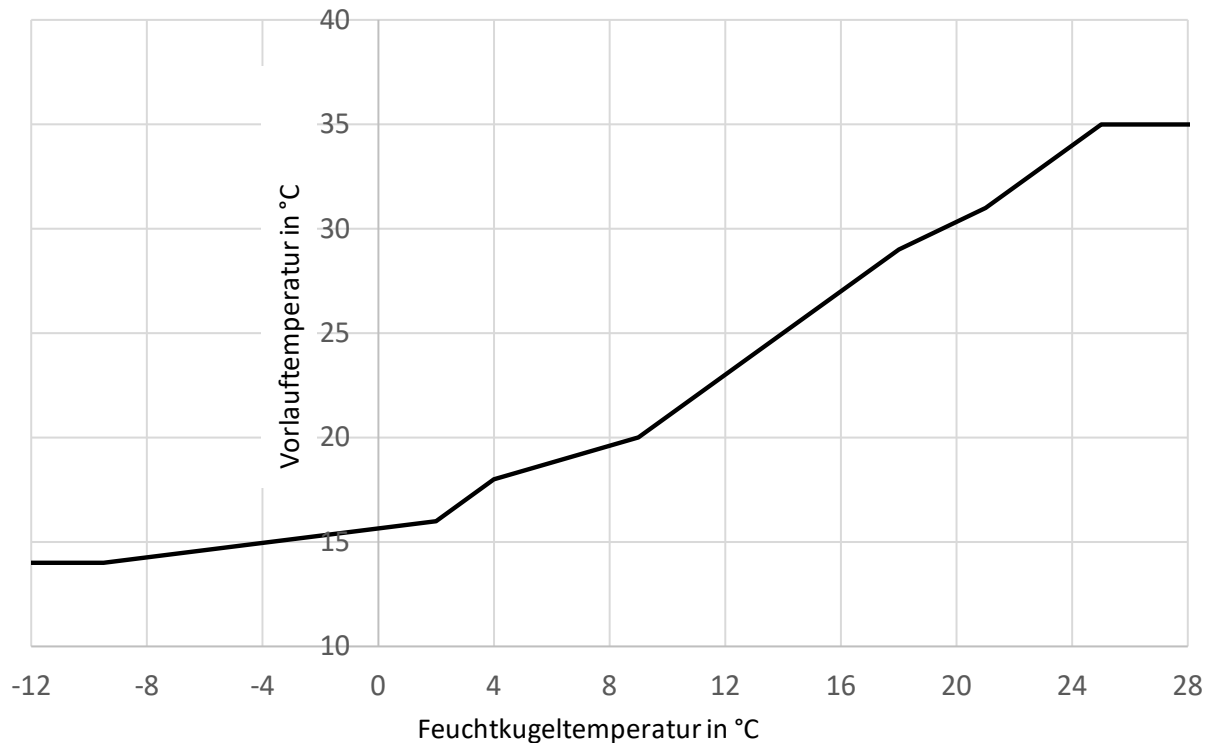


Abbildung 24: Optimale Vorlauftemperatur-Sollwerte des Rechnerkreislaufs in Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft für das in diesem Kapitel betrachtete hypothetische Rechenzentrum

Um die Leistung des Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu bewerten, wurden in der Simulation alle Vorlauftemperaturen innerhalb des angegebenen Bereichs mit einer Auflösung von 1 K getestet. Diese Tests wurden unter verschiedenen Feuchtkugeltemperaturen durchgeführt, ebenfalls mit einer Auflösung von 1 K. Dieser umfassende Ansatz führte zu insgesamt 1296 Simulationssätzen (36 Vorlauftemperaturen multipliziert mit 36 Feuchtkugeltemperaturen).

Basierend auf diesen Simulationsergebnissen wird der energieeffizienteste Vorlauftemperatur-Sollwert für jede getestete Feuchtkugeltemperatur ermittelt, wie in Abbildung 24 gezeigt. Anschließend wird ein Lookup-Table-Modell aus dieser Beziehung abgeleitet und in die Simulation implementiert, um seine Effektivität zu bewerten.

Abbildung 25 vergleicht den simulierten jährlichen Stromverbrauch des Kühlsystems des hypothetischen Rechenzentrums bei verschiedenen Einstellungen der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs. Für die Simulation wurden Wetterdaten aus dem Jahr 2022 in Stuttgart verwendet, wobei der IT-Stromverbrauch über das gesamte Jahr konstant auf 3 MW festgelegt wurde.

Die Simulation ergab, dass zur Aufrechterhaltung der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs unterhalb des Sollwerts während der heißesten Zeit des Jahres, bei ausschließlicher Nutzung von Nasskühltürmen, eine konstante Vorlauftemperatur von mindestens 30°C erforderlich ist. Aus diesem Grund zeigt die Abbildung die Ergebnisse für konstante Vorlauftemperaturen im Bereich von 30°C bis 37°C.

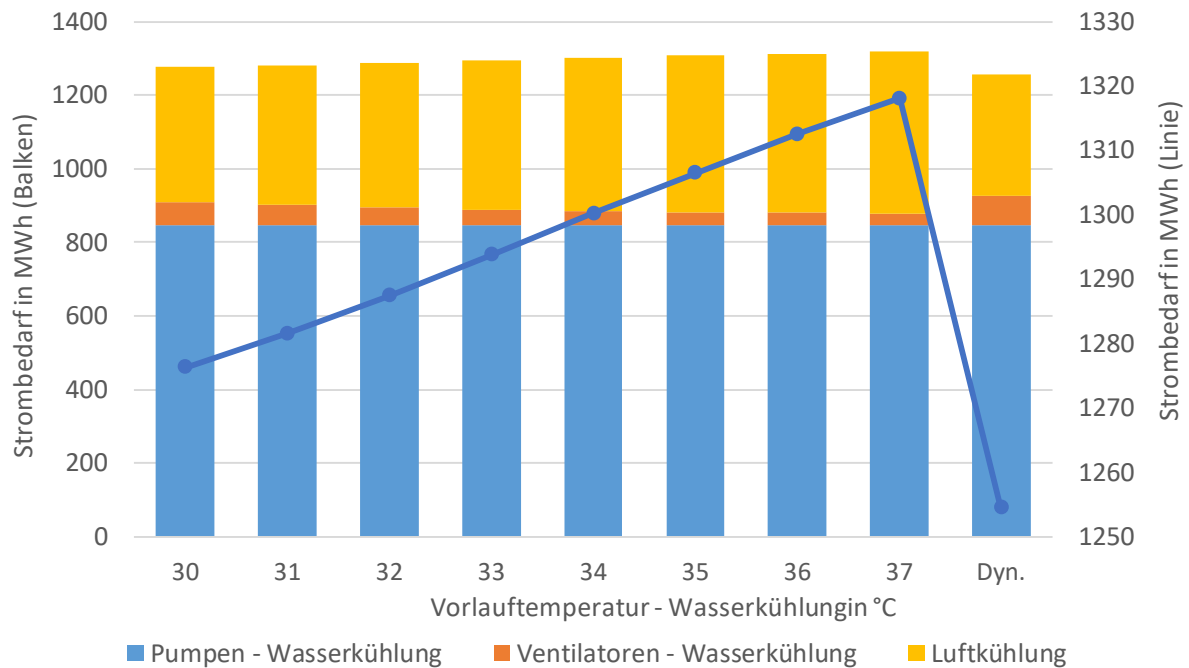


Abbildung 25: Simulierter jährlicher Stromverbrauch des Kühlsystems von dem in diesem Kapitel betrachteten hypothetischen Rechenzentrum bei unterschiedlichen Einstellungen der Vorlauftemperatur

Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, bleibt der Stromverbrauch der Pumpen bei allen Einstellungen konstant, da die Durchflussraten in jedem Kreislauf festgelegt sind. Mit steigender Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs sinkt jedoch der Stromverbrauch der Ventilatoren der Nasskühltürme. Gleichzeitig steigt der Stromverbrauch des Luftkühlsystems, da mehr Wärme in die Umgebungsluft des Serverraums abgegeben wird. Im Gegensatz zum Kühlsystem von HAWK verbraucht das Kühlsystem des hypothetischen Rechenzentrums mehr Strom für die Luftkühlung aufgrund der höheren Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs, jedoch weniger Strom für die Pumpen in der Flüssigkeitskühlung, da es kein USV-System besitzt.

Bei einer Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs von 30°C würde das Kühlsystem jährlich 1276 MWh Strom verbrauchen. Durch die Verwendung des entwickelten Algorithmus zur dynamischen Temperaturregelung sinkt der jährliche Stromverbrauch des Kühlsystems auf 1254 MWh, was einer Reduktion von 1,7 % entspricht und das System energieeffizienter macht als jede feste Einstellung der Vorlauftemperatur. Zudem bleibt die maximale CPU-Temperatur mit der dynamischen Regelung unter 73°C, was die Betriebssicherheit gewährleistet. Die jährliche durchschnittliche CPU-Temperatur mit dynamischer Regelung beträgt 56,0°C, was 3,1 K niedriger ist als bei einer festen Vorlauftemperatur von 30°C (59,1°C).

2.6 Erstellung eines Leitfadens und Handlungsempfehlungen

Die letzten Arbeitsschritte umfassen die Analyse und anschließende Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen mit dynamisch geregelten Temperaturen und die Erstellung eines Leitfadens, der konkrete Handlungsempfehlungen und Betriebsstrategien für Rechenzentren enthält. Die erzielten quantitativen Ergebnisse und die hierfür notwendigen Anforderungen

an die Technik, Hydraulik und Regelung wurden hinsichtlich der Umsetzung und Potentiale bewertet.

Zu Beginn wurden alle im Projekt durchgeführten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Einsparpotenziale bei Energie, Kosten und Emissionen systematisch untersucht. Besondere Berücksichtigung fand dabei die CPU-Temperatur, um sicherzustellen, dass die vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen die Leistung und Sicherheit der Rechenzentren nicht beeinträchtigen. Die Sensitivitätsanalysen und Optimierungen des HLRS-Kühlsystems sowie der Einsatz dynamischer Regelstrategien in einem hypothetischen Rechenzentrum wurden beschrieben.

Basierend auf den analysierten Maßnahmen wurden die vielversprechendsten Lösungsvarianten identifiziert und hinsichtlich ihrer Einsparungen und Umsetzbarkeit bewertet. Dabei zeigte sich, dass durch den Einsatz dynamischer Regelstrategien signifikante Energieeinsparungen und eine Reduzierung der Betriebskosten möglich sind, ohne die Betriebssicherheit zu beeinträchtigen. Insbesondere der Einsatz dynamischer Vorlauftemperaturen erwies sich als effektiv.

Darüber hinaus, wurden konkrete Handlungsempfehlungen für Rechenzentren erarbeitet. Diese Empfehlungen zielen darauf ab, eine breite Anwenderbasis – darunter Rechenzentrumsbetreiber, Planer, Installateure und Regelungstechniker – zu erreichen und ihnen praktikable Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ihrer Kühlsysteme zur Verfügung zu stellen.

Anschließend wurden die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse in einen detaillierten Leitfaden übertragen. Dieser Leitfaden richtet sich sowohl an bestehende als auch an neuinstallierte Rechenzentren und enthält spezifische Empfehlungen für die Planung und Installation der Kühlsysteme sowie für die Implementierung und das Monitoring dynamischer Regelstrategien. Um die gewonnenen Erkenntnisse effektiv nutzbar zu machen, enthält der Leitfaden umfangreiche technische Beschreibungen und konkrete Anweisungen für die Umsetzung.

3 Zusammenfassung des Forschungsprojekts Degree

Der stark steigende Strombedarf von Rechenzentren spielt eine zunehmende Rolle bei der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung. Um die Energiewende weiter voranzutreiben, ist die Reduzierung der CO₂-Emissionen von Rechenzentren von Bedeutung.

Ziel des Forschungsvorhabens Degree war es, die Energieeffizienz der Kühlung von Rechenzentren zu verbessern. Dies sollte durch die Entwicklung einer Methodik zur Implementierung einer dynamisch geregelten Vorlauftemperaturen im Kühlkreislauf erreicht werden. Diese Methodik wurde am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) entwickelt, beispielhaft umgesetzt und getestet.

Dabei wurden die Auswirkungen der dynamischen Regelung der Kühlkreistemperatur auf alle relevanten Dynamiken und Komponenten untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde das Kühlsystem des HLRS präzise modelliert und mithilfe von Messdaten validiert. Anschließend wurde die Regelstrategie des Kühlsystems durch numerische Simulationsstudien weiter optimiert. Die erzielbaren Verbesserungen wurden energetisch, ökologisch, ökonomisch und in Bezug auf die CPU-Temperatur quantifiziert und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden schließlich am HLRS exemplarisch umgesetzt. Die für die praktische Umsetzung erforderliche Methodik wurde in Form von konkreten Handlungsempfehlungen in einem Leitfaden dokumentiert und stehen zur Veröffentlichung. Im Folgenden werden die Ergebnisse der genannten Untersuchungspunkte zusammengefasst.

3.1 Modellierung des HLRS-Kühlsystems

Eine besondere Herausforderung bei der energetischen Bewertung der dynamischen Regelung der Kühltemperatur auf Basis von Simulationsrechnungen ist die korrekte mathematische Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Komponenten des Rechenzentrums.

Im Rahmen des Projekts, wurde als erster Schritt eine detaillierte Analyse der verfügbaren Daten sowie eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um die Komponenten des HAWK-Systems mit signifikanten Temperaturabhängigkeiten zu identifizieren. Darauf basierend wurden experimentelle Versuchsreihen durchgeführt, um diese Temperaturabhängigkeiten sowie Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten zu erfassen.

Anschließend wurde das Modell des HAWK-Kühlsystems auf Grundlage des detaillierten Rohrleitungs- und Instrumentendiagramms in der Simulationssoftware TRNSYS entwickelt. Angesichts der Komplexität der Kühlinfrastruktur von HAWK wurde das Modell in einer vereinfachten, aber dennoch detaillierten Form erstellt, um die notwendige Genauigkeit zu gewährleisten. Der Entwicklungsprozess des Modells umfasste eine gründliche Definition der Eigenschaften und Konfigurationen der einzelnen Komponenten des Kühlsystems. Dies wurde durch die Nutzung von Herstellerangaben, Planungsdokumenten, Messdaten und Vor-Ort-Inspektionen sichergestellt, um eine Übereinstimmung des Modells mit dem realen System zu gewährleisten.

Das entwickelte Kühlsystemmodell beinhaltet alle identifizierte wesentliche Temperaturabhängigkeiten und besteht aus drei Hauptkomponenten: dem IT-Modell, dem Modell für das Flüssigkeitskühlsystem und dem Modell für das Luftkühlsystem.

Abschließend wurde das entwickelte Modell hinsichtlich des thermischen Verhaltens, des Wasserverbrauchs und des Strombedarfs validiert. Es wurde gezeigt, dass das entwickelte Modell des Flüssigkeitskühlsystems die Validierungskriterien erfüllt und eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten aufweist.

3.2 Numerische Analyse und Optimierung des gesamten Kühlsystems

Aufbauend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen wurde das Optimierungspotenzial durch die dynamische Regelung der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs exemplarisch am Beispiel des Höchstleistungs-Rechenzentrum HLRS untersucht.

Als erster Schritt wurde eine umfassende simulative Untersuchung durchgeführt, die darauf abzielte, eine Regelstrategie zur Optimierung der Vorlauftemperatur des Rechnerkreislaufs in Abhängigkeit von den Außenbedingungen zu entwickeln. Basierend auf diesen Untersuchungen konnten verschiedene dynamische Temperaturregelungsstrategien formuliert werden, die die Systemleistung hinsichtlich Strombedarf, Betriebskosten, Emissionen und CPU-Temperatur optimieren.

Durch die Anwendung des entwickelten Algorithmus zur dynamischen Temperaturregelung mit dem Fokus auf das Energieoptimum konnte der jährliche Stromverbrauch um 30,25 % im Vergleich zum Ausgangspunkt gesenkt werden, was das System energieeffizienter macht als jede feste Einstellung der Vorlauftemperatur. Zudem bleibt die maximale CPU-Temperatur mit der dynamischen Regelung unter 68 °C, was die Betriebssicherheit gewährleistet. Durch die Anwendung des entwickelten Algorithmus zur dynamischen Temperaturregelung mit dem Fokus auf das Kostenoptimum konnten die jährlichen Betriebskosten des Kühlsystems um etwa 29 % gesenkt werden, was das System kosteneffizienter macht als bei jeder festen Vorlauftemperatur.

Darüber hinaus, zeigen die Ergebnisse, dass die Optima für Strombedarf, Betriebskosten und Emissionen nicht gleichzeitig erreicht werden können. Daher müssen bei einer ganzheitlichen Optimierung Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden, um die verschiedenen Zielsetzungen auszubalancieren.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass durch die dynamische Anpassung der Vorlauftemperatur signifikante Einsparungen sowohl in Bezug auf Energieverbrauch, Betriebskosten, und Emissionen erzielt werden können, während gleichzeitig die Betriebssicherheit gewährleistet bleibt. Die Wahl der Optimierungsstrategie hängt von den spezifischen Prioritäten der Rechenzentrumsbetreiber ab, da die Gewichtung zwischen Energieeffizienz, Kosteneffizienz, und Emissionen individuell angepasst werden muss.

3.3 Umsetzung der entwickelten Betriebsstrategie am HLRS

Im Jahr 2023 wurde die im Rahmen des Projekts entwickelte Methodik zur dynamischen Temperaturregelung im Flüssigkühlsystem des Supercomputers HAWK implementiert. Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und Ausfälle oder Überhitzungen zu vermeiden, wurde zunächst ein relativ einfacher Algorithmus eingesetzt. Bis zum Ende des Projekts traten keine Ausfälle, Überhitzungen oder sonstigen Anomalien in den Systemen von HAWK auf, die durch die Implementierung der dynamischen Temperaturregelung verursacht wurden.

Die Leistung des Flüssigkühlsystems bei einer konstanten Temperaturregelung (von Juni 2021 bis Juni 2022 bei 17°C) wurde mit der Leistung bei der dynamischen Temperaturregelung (über das gesamte Jahr 2023) verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Flüssigkühlsystem bei

niedrigen Außentemperaturen in beiden Regelstrategien ähnliche partielle PUE-Wert hat. Sobald die Feuchtkugeltemperatur jedoch 10°C überschreitet, wird der Vorteil der dynamischen Regelstrategie deutlich. Bei einer Feuchtkugeltemperatur von 17,6°C liegt der partielle PUE-Wert des Systems mit konstanter Temperaturregelung bei etwa 1,18, während der partielle PUE-Wert des Systems mit dynamischer Regelung bei etwa 1,06 liegt. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 66,67 % für das Flüssigkühlsystem bei Verwendung der dynamischen Regelstrategie.

Zusammenfassend zeigt die Implementierung der dynamischen Temperaturregelung im Flüssigkühlsystem von HAWK signifikante Energieeinsparungen, insbesondere bei höheren Außentemperaturen, ohne die Betriebssicherheit zu beeinträchtigen. Diese Ergebnisse bestätigen den Erfolg der entwickelten Methodik und deren Potenzial, die Energieeffizienz in Rechenzentren nachhaltig zu verbessern.

3.4 Fazit

Die Durchführung und Ergebnisse des Projekts sind insgesamt als sehr erfolgreich und positiv zu bewerten. Die durchgeführten numerischen Analysen und Simulationsstudien haben gezeigt, dass durch eine optimierte Regelung der Vorlauftemperatur im HAWK-Supercomputer Einsparungen von bis zu 30 % beim Stromverbrauch und bis zu 29 % bei den Betriebskosten des Kühlsystems bezüglich der Ausgangssituation möglich sind, ohne die Betriebssicherheit zu gefährden. Die dynamische Regelstrategie erwies sich insbesondere bei höheren Feuchtkugeltemperaturen als besonders vorteilhaft, da sie eine signifikante Reduzierung des Strombedarfs ermöglichte und die Effizienz des Kühlsystems erheblich steigerte.

Die Implementierung der Methodik im realen Betrieb am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) hat die Praxistauglichkeit der entwickelten Regelstrategie eindrucksvoll bestätigt. Über den gesamten Projektzeitraum wurden keine Ausfälle oder Anomalien im Betrieb des Kühlsystems festgestellt, was die Zuverlässigkeit der dynamischen Regelung unterstreicht. Zudem ist die Umsetzung der dynamischen Regelung vergleichsweise einfach und erfordert keine zusätzlichen Hardware-Komponenten. Es handelt sich um eine rein softwaretechnische Anpassung, die ohne großen Aufwand in bestehende Systeme integriert werden kann.

Darüber hinaus konnten im Rahmen des Projekts durch die umfangreichen verfügbaren Daten die Temperaturabhängigkeiten der beteiligten Komponenten, wie z.B. des IT-Systems und des Kühlsystems, erfasst und numerisch untersucht werden. Auf dieser Grundlage wurde ein präzises Modell des Kühlsystems entwickelt, das alle wesentlichen Temperaturabhängigkeiten eines flüssigkeitsgekühlten Rechenzentrums abbildet.

Zusammenfassend hat das Projekt gezeigt, dass die dynamische Temperaturregelung im Flüssigkühlsystem von Rechenzentren ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz bietet. Durch die Implementierung einer Methodik zur dynamischen Anpassung der Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit von den Außenbedingungen konnte sowohl im HAWK-Supercomputer als auch in einem hypothetischen Rechenzentrum, die beide bereits über sehr effiziente Kühlsysteme verfügen, eine Reduzierung des Stromverbrauchs, der Betriebskosten und der Emissionen erreicht werden. Bei den meisten Rechenzentren, deren Kühlsysteme weniger effizient sind, kann eine noch größere Effizienzsteigerung erwartet werden. Die Ergebnisse des Projekts belegen eindeutig, dass die dynamische

Temperaturregelung einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks von Rechenzentren leisten kann.

Die Projektergebnisse wurden in Fachveröffentlichungen und auf Konferenzen vorgestellt. Zudem wurde die für die Umsetzung erforderliche Methodik in Form konkreter Handlungsempfehlungen in einem Leitfadens dokumentiert und veröffentlicht.

4 Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen sind im Rahmen des Projekts Degree entstanden:

- **ENVIROINFO, Sep. 2022, Hamburg**
Transient numerical simulation for optimization of a watercooled high-performance computing center with dynamic cooling circuit temperatures – Work-in-progress (Tagungsband)
- **HLK-Brief, Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung, Lüftung, Klimatechnik, Stuttgart e.V., 2023**
Untersuchung einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperaturen von Rechenzentren zur Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens zur Umsetzung entsprechender Konzepte (Beitrag)
- **IGTE-Forum, 30.03.2023, Stuttgart**
Kühlung von Rechenzentren - Mehr Effizienz durch dynamische Kühlung (Vortrag)
- **20. Hermann-Rietschel-Colloquium, 01. - 08. Mär. 2024, Kleinwalsertal, Österreich**
Dynamisch geregelte Kühlkreistemperaturen für mehr Effizienz bei der Rechenzentrumskühlung (Vortrag)
- **PowerBuilding & DataCenter Convention, 12. und 15. Mär. 2024, Stuttgart und Essen**
Dynamisch geregelte Kühlkreistemperaturen für mehr Effizienz bei der Rechenzentrumskühlung (Vortrag)
- **Leitfaden im Rahmen des Projekts, 2024**
Guidelines to Dynamic Control of Facility Supply Water Temperature for Optimizing Efficiency in Liquid-Cooled Data Centers

Danksagung

Das Projekt „Degree – Untersuchung einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperaturen von Rechenzentren zur Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens zur Umsetzung entsprechender Konzepte“ wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert unter dem Aktenzeichen: 37006/01-24/0. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

5 Literaturangaben

- [1] TOP500. top500.org
- [2] High-Performance Computing Center Stuttgart: HPE Apollo (Hawk).
<https://www.hlrs.de/solutions/systems/hpe-apollo-hawk>
- [3] Höchstleistungsrechenzentrum und Institut für Höchstleistungsrechnen der Universität Stuttgart: Umwelterklärung 2021, 2021.
https://www.hlrs.de/fileadmin/about/social_responsibility/Sustainability/HLRS_Umwelt_erklaerung-2021.pdf
- [4] University of Wisconsin-Madison: TRNSYS. A Transient System Simulation Programm. Madison, WI 2018