

Abschlussbericht des Forschungsprojektes der Technischen Universität Berlin

HotFlAd

Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren mit
Hot-Fluid-Adsorptionskälte-System

Im Rahmen der Förderinitiative EnEff: Gebäude 2050 - Innovationsprojekt



Förderkennzeichen:

03EGB0018A

Datum:

26. Juni 2023

Autoren:

Nasir Asadov, M.Sc.
Dr.-Ing. Stefan Brandt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel

Anschrift:

TU Berlin
Hermann-Rietschel-Institut
Sekr. HL 45
Marchstr.4
10587 Berlin

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Das Forschungsprojekt „HotFlAd: Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren mit Hot-Fluid-Adsorptionskälte-System“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EGB0018A gefördert und administrativ und fachlich vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut. Für die Unterstützung möchten wir uns herzlich bedanken. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I Kurzdarstellung	8
I.1 Aufgabenstellung	8
I.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	8
I.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand	11
I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
II Eingehende Darstellung	14
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	14
II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	66
II.3 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung der Ergebnisse	66
II.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	68
II.5 Veröffentlichungen des Ergebnisses	68

Abbildungsverzeichnis

1 Vereinfachte Rechenzentrumskomponenten und Kontrollvolumen (CV)	15
2 Zuordnung von Verantwortlichkeiten auf Basis des Anforderungsworkshops	18
3 Befragungsergebnisse Marktentwicklung Kompakt-Rechenzentrum	19
4 Einschätzung relevanter Anwendungsfelder	20
5 Einstufung der Vorteile des HotFlAd-Konzepts	20
6 Sustainable Business Canvas	22
7 Mögliche Kooperationsformen für HotFlAd	23
8 Grundlegende Methode des Rahmenwerks zur Ermittlung des Treibhausgas- minderungspotenzials nach [1]	31
9 IT-Anschlussleistung in Deutschland nach [2]	32
10 Extrapolation von Edge RZ Prognose und +/-30% Szenarien	33
11 Skalierte technische Potenziale von HotFlAd	34
12 Skalierte THG-Reduktionspotenziale von HotFlAd	34
13 Darstellung der zu kühlenden Komponenten. Thomas-Krenn-Server mit C&H- Kühllösung (links) und logische Verschaltung der Kühlung (rechts).	36
14 Temperaturverteilung im Ethernetkühlkörper. Schnitt durch die Finnengeometrie und Oberfläche des IHS.	37
15 Geschwindigkeitsfeld im Ethernetkühlkörper. Schnitt durch die Finnengeometrie.	37
16 Alternative Verschaltung der Kühlkörper.	38
17 Voruntersuchungen zu Kühlkörperdesigns: 1) Parallel Struktur 2) Parallel Struktur mit lateraler Durchgängigkeit 3) Serpentinenstruktur 4) Serpentinenstruktur mit lateraler Durchgängigkeit 5) Parallelstruktur mit Vorverteilung 6) Parallelstruktur mit Vorverteilung und lateraler Durchgängigkeit.	39
18 Darstellung der Kühlkörpergeometrien. Vergleich des Referenzmodells mit neuem Ansatz.	40
19 CFD-Ergebnisse: Temperaturverteilung am der Oberfläche des Integrated Heat Spreaders für drei untersuchte Modelle.	41
20 CFD-Ergebnisse: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeitskomponente u_x des Kühlmediums im Kanalschnitt für drei untersuchte Kühlkörpermodelle. Eine Messstelle pro Kanal. 22 Messstellen Insgesamt.	41
21 Betriebsarten des Referenz- (oben) und HotFlAd-Systems (unten) in Abhängigkeit von T_{AUL}	43
22 Jährliche Temperaturverteilung nach Stunden am Standort Frankfurt am Main.	44

23	Vergleich der Bewertungskriterien: <i>PUE</i> - (links) und <i>ERE</i> -Werte (rechts) in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekuhltten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.	44
24	Vergleich der Bewertungskriterien: Q_{Kalte} und $Q_{\text{Heizwärme}}$ in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekuhltten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.	45
25	Kosteneinsparungen pro Jahr am Standort Frankfurt am Main.	45
26	Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Frankfurt am Main und die durchschnittliche IT-Leistung $\overline{P}_{\text{IT}} = 100 \text{ kW}$	47
27	Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Madrid und die durchschnittliche IT-Leistung $\overline{P}_{\text{IT}} = 100 \text{ kW}$	48
28	Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Stockholm und die durchschnittliche IT-Leistung $\overline{P}_{\text{IT}} = 100 \text{ kW}$	49
29	Vergleich der Bewertungskriterien: $pPUE_K$ - (links) und <i>ERE</i> -Werte (rechts) in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekuhltten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.	49
30	Prinzipdarstellung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.	50
31	Vereinfachte Systemskizze HotFlAd-System am FTRZ mit allen Wärmeströmen.	51
32	Temperaturverläufe des Kältekreises (KK), des Ruckkuhlkreises (RK) sowie des Antriebskreises (AK) einer zweistündigen Messung. Dargestellt sind die zu regelnden Eingangstemperaturen der AdKM als blaue Linie.	53
33	Wärmeströme des Kälte-, Rückkühl- und Antriebskreises und <i>COP</i> der Adsorptionskältemaschine einer zweistündigen Messung bei einer konstanten Antriebskreistemperatur von $\vartheta_{\text{AK,sup}} = 55^\circ\text{C}$. Verläufe geglattet.	53
34	Darstellung des kumulierten <i>COP</i> . Ausschnitt der ersten Zyklen bis Erreichung des Mittelwertes.	54
35	Verläufe der Wärmeleistungen mit der Kälteleistung \dot{Q}_{KK} , der Rückkühlleistung \dot{Q}_{RK} , der Antriebsleistung \dot{Q}_{AK} und der mittleren Warmeleistungsbilanz \dot{Q}_{sum} . Ausschnitt von 2h.	55
36	Kumulierte COPs für unterschiedliche Solltemperaturen am Rückkühlkreiseintritt bei zwei unterschiedlichen Solltemperaturen am Kältekreiseintritt.	56
37	Temperaturverläufe im Antriebskreis für eine 72h-Messung. Ausschnitt 20 Zyklen.	56
38	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Frankfurt am Main.	58
39	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Frankfurt am Main.	59
40	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Madrid.	59
41	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Madrid.	60
42	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Stockholm.	60
43	Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Stockholm.	61
44	Ergebnisse der Umsetzung der ersten Optimierungsmaßnahmen am Prüfstand bei Noris: Das Takten der AdKM wurde beseitigt.	62
45	Auswirkungen von Takten des KLS (unten) auf die Kältekreistemperaturen der AdKM (oben).	62
46	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Frankfurt am Main.	63

47	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Frankfurt am Main.	64
48	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Madrid.	64
49	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Madrid.	65
50	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Stockholm.	65
51	Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Stockholm.	66

Tabellenverzeichnis

1	Kompaktdarstellung Projektverlaufsplan.	11
2	Bewertung der Anwendungsszenarien	21
3	Ergebnisse im Anwendungsfeld Rechenzentren in Kombination mit 5G Netz- ausbau"	21
4	Ergebnisse im Anwendungsfeld "Dezentrales Rechenzentrum für Cloud- Betreiber"	22
5	Thermische Randbedingungen für die IC's.	36
6	Untersuchungsergebnisse für die ersten Kühlkörperrevisionen.	38
7	Ergebnis der Vergleichsstudie	40
8	Messungen vom Ethernet-Chip-Kühlkörper mit dem Einsatz eines Peltier- Elements	42

Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
P	Leistung	W
\dot{Q}	Wärmeleistung	W
T, θ	Temperatur	°C
W	pysikalische Arbeit	W s
\dot{V}	Volumenstrom	$m^3 h^{-1}$
\dot{m}	Massenstrom	$kg s^{-1}$
p	Druck	Pa
q	Wärmestromdichte	$W m^{-2}$
v	Geschwindigkeit	$m s^{-1}$

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W^2 m^{-1} K^{-1}$
Δ	Differenzzeichen	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W m^{-1} K^{-1}$
ρ	Luftdichte	$kg m^{-3}$
φ	relative Luftfeuchtigkeit	%

Kennzahlen

Symbol	Bedeutung
COP (ε)	Leistungszahl (engl.: Coefficient of Performance)
PUE	Power Usage Effectivness
pPUE	partial Power Usage Effectivness
ERE	Energy Reuse Effectiveness

Unvollständig ausgeschriebene Indizes

Symbol	Bedeutung
lpc	low power case
hpc	high power case
ABL	Abluft
FL	Fortluft
AUL	Außenluft
ZUL	Zuluft
el	elektrisch
max	Maximal
min	Minimal
crit	Critical
in	Eingang
out	Ausgang
KM	Kältemittel
Geh	Gehäuse
PE	Peltier-Element
HT	Hohe Temperatur
MT	Mittlere Temperatur
LT	Niedrige Temperatur

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AdKM	Adsorptionskältemaschine
AK	Antriebsklkreis
RK	Rückkühlkreis
KK	Kältekreis
LCA	Life Cycle Assessment
THG	Treibhausgas
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
IAAS	Infrastructure-as-a-Service
IoT	Internet-of-Things
GWP	Global Warming Potential
IBN	Inbetriebnahme
ISP	Informationsschwerpunkt
CPU	Central Processing Unit
FTRZ	Forschungs- und Testrechenzentrum
GPU	Graphics Processing Unit
GUI	Graphical User Interface
HPC	High Performance Cluster
IC	Integrated Circuit
IHS	Integrated Heat Spreader
IT	Informationstechnik
LK	Luftkühlung
WK	Wasserkühlung
FK	Freie Kühlung
KKM	Kompressionskältemaschine
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
PDU	Power Delivery Unit
KAE	Kälteabnahmeeulator
FW	Fernwärme
KLS	Klimaschrank
SW	Sollwert
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

I. Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

I.2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde im Q1 2019 begonnen und im Q4 2022 beendet. Die laut Vorhabenbeschreibung dargestellten Arbeitspakete sind unten aufgelistet:

AP 1: *Definition und Anforderungen, Vorbereitung der Markteinführung, Bestimmung der Einsparpotenziale* (AP Leitung: BoI)

- Definition der Anforderungen an das Modellprojekt:

Zu Beginn des Projektes werden die Anforderungen an die technische Parameter des Testsystems im Forschungsrechenzentrum und des Feldtest definiert. Sämtliche Partner erarbeiten für die jeweiligen Rand- und Rahmenbedingungen ihre Anforderungen bzgl. Schnittstellen, technische Leistungsdaten, MSR-Technik und Monitoringsysteme als Grundlage für die Detailplanung. Es wird ein gemeinsamer Anforderungsworkshop in Berlin vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet.

- Ermittlung der Marktpotenziale:

Zur Ermittlung der Marktpotenziale werden umfassende Recherchen durchgeführt. Neben einer Recherche in Fachpublikationen werden Befragungen von potenziellen Anwendern in Form von Interviews durchgeführt. Zusätzlich wird ein Innovationsworkshop mit potenziellen Kunden veranstaltet. Die so ermittelten Kundenanforderungen und Marktpotenziale bilden die Basis für die Ermittlung der Absatzchancen der Lösungen.

- Gemeinsame Entwicklung eines Geschäftsmodells zur Vermarktung der Kombination der drei Innovationen:

Mit Hilfe der Systematik „Business Model Canvas“ wird ein gemeinsames Geschäftsmodell für die Innovation entwickelt. Dazu werden unter anderem die geeigneten Kundensegmente, Wertangebote, Vertriebskanäle, Erlösmodelle sowie potenzielle Schlüsselpartner, notwendigen Schlüsselressourcen sowie sich daraus ergebene Kostenstrukturen ermittelt.

- Hochrechnung der Einsparpotenziale bei erfolgreicher Marktdurchdringung der Technologie:

Für unterschiedliche Anwendungsfälle in Art und Größe werden die Potenziale ermittelt. Dies erfolgt zum einen für ausgewählte Fallbeispiele von Rechenzentren und zum anderen für die Summe aller Rechenzentren in Deutschland. Zur Berechnung der Einsparpotenziale kann auf ein am Borderstep-Institut seit 2009 existierendes und laufend weiter entwickeltes Modell der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland zurückgegriffen werden.

AP 2: *Aufbau Gesamtsystem im Forschungs-RZ des HRI* (AP Leitung: dc-ce)

- Entwurf eines RZ-Testsystems, Hydraulikkonzept, Auslegung der Komponenten, bestehend aus Adsorptionskältemaschine, Kühlkörper, Kaltwasser-Luft-Wärmetauscher, Trennungs-WT zum HotFluid, Pumpen, Rückkühler, Rohrnenweiten.

- Beschaffung und Einbau in bestehendes Forschungs-RZ:

Am HRI existiert ein Forschungsrechenzentrum, allerdings mit Luftkühlung. Die Grundstruktur wird weiter verwendet, jedoch bedarf es einen Umbau bezgl. der Server und der Kühlkörper. Weiterhin sind eine Adsorptionskälteanlage inkl. sämtlicher Verrohrung und die für den Betrieb notwendige MSR-Technik zu installieren.

- Funktionstest und Einregulierung:

Bevor eine Betriebsoptimierung und ein energetisches Monitoring starten kann, muss die Gesamtanlage umfangreich einreguliert und getestet werden.

AP 3: Optimierung Einzelkomponenten und Gesamtsystem (AP Leitung: HRI)

- Optimierung Kühlkörper:

Mittels numerischen Strömungssimulationen (CFD) wird das Kühlkörperdesign derart verändert, dass der Zusammenhang zwischen Kühlleistung, Massenstrom, Ein- und Austrittstemperatur optimal zu dem Gesamtsystem, insbesondere der Adsorptionskältemaschine passt.

- Hot-Fluid-System:

Auf Basis von experimentellen Messergebnissen im Forschungs-RZ wird das Hot-Fluid-System, bestehend aus Wärmeübertrager, Pumpen und Rohren derart optimiert, dass eine möglichst hohe Effizienz auf kleinstmöglichem Bauraum erreicht wird.

- Adsorptionskältemaschine:

Auf Basis von experimentellen Messergebnissen im Forschungs-RZ wird das Verhalten der Adsorptionskältemaschine derart optimiert, dass unter verschiedenen Randbedingungen (Abwärmtemperatur, - massenstrom, Kühlwassertemperatur, - massenstrom, Umgebungstemperaturen zur Rückkühlung) ein zuverlässiger und effizienter Betrieb des Gesamtsystems gewährleistet wird.

- Mess-, Steuer- und Regelungskonzept:

Optimierung der MSR Softwarelösung, damit sämtliche Einzelkomponenten zu einem effizientem Gesamtsystem zusammenwachsen.

AP 4: Übertragbarkeit (AP Leitung: dc-ce)

- Dimensionierung Kühlkörper:

Aus den CFD Ergebnisse des AP 3 wird ein universelles Kühlkörperdesign ermittelt und in ein empirisch ermitteltes mathematisches Modell überführt, so dass Thomas Krenn in Zukunft ohne aufwändige Simulationen auf die sich schnell verändernde IT-Technik mit angepassten Kühlkörpern reagieren kann.

- Dimensionierung Gesamtsystem:

Auf Basis der Ergebnisse des AP 3 werden Dimensionierungsregeln für die Einzelkomponenten und somit für das Gesamtsystem erstellt, um die individuelle RZ Ausstattung, den Standort und den Platzbedarf in Zukunft berücksichtigen zu können.

- Energetische Bewertung Gesamtsystem:

Mittels einer dynamischen Anlagensimulation wird das Gesamtsystem abgebildet. Damit ist es möglich, in Abhängigkeit individueller Randbedingungen den Energiebedarf und die Energieeffizienz zu ermitteln. Validiert werden die Simulationsdaten mit den Ergebnissen aus dem energetischen Monitoring (AP 6) innerhalb der beiden Anwendungsfälle (Nicht-Wohngebäude und Edge-Rechenzentrum).

- Mess-, Steuer- und Regelungskonzept:

Aus den Ergebnissen des Forschungs-RZ wird eine universal einsetzbare MSR Lösung entwickelt, so dass bei individuellen Anforderungen und Randbedingungen nicht jedes Mal eine Individualprogrammierung erfolgen muss.

- Publikation und Diskussion der Ergebnisse mit der Fachöffentlichkeit:

Neben den Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und wissenschaftlichen Journalen wird jeweils ein Symposium am HRI und bei Noris durchgeführt, an dem interessierte Kreise die Möglichkeit bekommen, sich über das System zu informieren und mit der Fachwelt zu diskutieren. Darauf hinaus ist geplant, die Ergebnisse auch auf Fachmessen der Öffentlichkeit zu präsentieren.

AP 5: Feldtest bei Noris (AP Leitung: Noris)

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems im Rahmen von AP 2 erfolgt der Bau eines HotFlAd Systems bei Noris.

- Entwurf des Kompakt-RZ mit HotFlAd System, Hydraulikkonzept, Auslegung der Komponenten (Adsorptionskältemaschine, Kühlkörper, Kaltwasser-Luft-Wärmetauscher, Trennungs-WT zum HotFluid, Pumpen, Rückkühler, Rohrnenweiten).
- Beschaffung und Einbau der Komponenten.
- Funktionstest und Einregulierung:
Bevor eine Betrieboptimierung und ein energetisches Monitoring starten kann, muss die Gesamtanlage umfangreich einreguliert und getestet werden.
- Validierung der Konzepte und Modell aus AP 3 und 4:
Die Realtests zur Optimierung der Einzelkomponenten findet ausschließlich im Forschungs-RZ an der TU Berlin statt, da hier kein kritischer Rechenprozess läuft. Nach erfolgreichem Optimierungsschritt werden die Komponenten bei Noris eingesetzt und somit die Konzepte aus AP 3 und 4 validiert.

AP 6: Energetisches Monitoring (AP Leitung: HRI)

Für das Durchführen eines energetischen Monitorings ist zunächst eine Detailplanung für sämtliche benötigte Messgeräte und die Auswertung der Daten notwendig. In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten und der Art des Rechenzentrums (Edge-RZ bei Noris, IT-Raum am HRI) unterscheiden sich die Konzepte. Dies findet Berücksichtigung in den nachfolgenden Arbeitspaketen.

- Erstellung energetisches Monitoring-Konzept für HotFlAd System im HRI.
- Erstellung energetisches Monitoring-Konzept für HotFlAd System bei Noris.
- Durchführung energetisches Monitoring für HotFlAd System im HRI.
- Durchführung energetisches Monitoring für HotFlAd System bei Noris.

AP 7: Betrieboptimierung (AP Leitung: HRI)

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme an der TU Berlin und bei Noris erfolgt unmittelbar die Betrieboptimierung mit dem Ziel einer Effizienzmaximierung. Die Betrieboptimierung erfolgt dabei z.T. im iterativen Prozess mit AP 3.

- Durchführung der Betrieboptimierung für HotFlAd System im HRI.
- Durchführung der Betrieboptimierung für HotFlAd System bei Noris.

I.2.1. Verlaufsplan der Arbeitspakete

Der zeitliche Verlauf aller Arbeitspakete ist in Tabelle 1 dargestellt. Der Verlaufsplan zeigt dabei den tatsächlichen Verlauf während der gesamten Projektzeit unter Berücksichtigung projektspezifischer Änderungen.

Tabelle 1: Kompaktdarstellung Projektverlaufsplan.

AP/Quartal	2019				2020				2021				2022			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																

I.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im folgenden wird auf den wissenschaftlichen und den technischen Stand zur Rechenzentrumskühlung eingegangen.

I.3.1. Stand der Technik

Die Kühlung von Rechenzentren stellt einen bedeutenden Anteil am Gesamtenergiebedarf der Rechenzentren dar. Die Wärme der Server in den Rechenzentren wird in der Regel mit Hilfe einer Umluftkühlung abgeführt [3]. Der Stand der Technik im Bereich der Rechenzentrumsklimatisierung mit Luft unterteilt sich in drei Verfahren:

1. Maschinelle Kühlung und indirekte freie Kühlung über ein Kaltwassersystem,
2. Maschinelle Kühlung und indirekte freie Kühlung über einen Luft-Luft-Wärmeübertrager und
3. Maschinelle Kühlung und direkte freie Kühlung

Im Verfahren 1 wird die durch das IT-Equipment erwärmte Luft mithilfe eines Umluftklimagerätes gekühlt. Dazu wird die Luft über einen Wasser-Luft-Wärmeübertrager transportiert. In dem Wärmeübertrager erwärmt die Luft das Kühlmedium Wasser und wird dadurch gekühlt.

Die nachfolgenden Anlagen- und Auslegungstemperaturen beziehen sich auf eine Zulufttemperatur im Rechenzentrum von 25°C. Das nun erwärmte Kühlmedium wird bei Außentemperaturen unterhalb von ca. 14°C durch die Außenluft vorgekühlt und durch eine maschinelle Kälteerzeugung weiter auf die Sollvorlauftemperatur runtergekühlt. Oberhalb von ca. 14°C arbeitet alleine die maschinelle Kälteerzeugung. Unterhalb von ca. 10°C Außenlufttemperatur erfolgt die Rückkühlung des Kühlmediums alleine durch die Außenluft. Zusätzlich kann dieses System mit einer Grundwasserkühlung kombiniert werden, um die maschinelle Kälteerzeugung zu unterstützen.

Bei dem Verfahren 2 wird auf das Kühlmedium Wasser verzichtet und die erwärmte Luft über einen Luft-Luft-Wärmeüberträger direkt mit der Außenluft heruntergekühlt. Dabei vermischen sich die beiden Luftströme nicht. Mit dieser Lösung ist es möglich, fast das ganze Jahr auf eine maschinelle Kälteerzeugung zu verzichten. Im Sommer ist aber auch mit diesem

Verfahren eine maschinelle Kälteerzeugung notwendig, um die gewünschte Zulufttemperatur einzuhalten. In der Regel muss diese ab 22°C Außenlufttemperatur beginnen nachzukühlen. Im letzten Verfahren (3) wird die Außenluft direkt ins Rechenzentrum eingebracht und erwärmt wieder an die Umgebung abgegeben. Ab 24°C Außenlufttemperatur ist aber auch hier eine maschinelle Kälteerzeugung notwendig, um die gewünschte Zulufttemperatur einzuhalten. Zusätzlich kann die Luftfeuchte im Rechenzentrum nicht kontrolliert werden.

Des Weiteren existieren weitere Kombinationen der oben genannten drei Verfahren. Je nach den klimatischen Bedingungen am Standort sind Kombinationen mit der adiabatischen Kühlung möglich. Diese Kombinationen fallen eher in den Bereich Stand der Wissenschaft und bedürfen noch weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen.

I.3.2. Stand der Wissenschaft

Im Bereich des High Performance Computings wird aufgrund der hohen abzuführenden Wärmelasten neben der Umluftkühlung seit einigen Jahren vermehrt eine flüssigkeitsbasierte Kühlung eingesetzt [4]. Beispiel ist das Leibnitz-Rechenzentrum in München [5]. Die Thomas Krenn AG hat mit dem Hot Fluid Computing eine Wasserkühlungslösung entwickelt, die auch in normalen Rechenzentren eingesetzt werden kann. Hot Fluid Computing ist ein innovatives Gesamtkonzept zur Flüssigkühlung von Standard RZ-Komponenten wie Server-Mainboards, Netzteilen und Switches. Die Entwärmung aller Komponenten ohne jede Luftbrücke ermöglicht hohe Energieeinsparungen sowie Volumen- und Gewichtserspartisse. Hot Fluid Computing führt zu lüfterlosen, kompakten Systemen und eignet sich sowohl für Racks als auch für Stand-Alone-Lösungen. Aufgrund der hohen Temperaturen wird Wärmerückgewinnung möglich, also die vielseitige Nachnutzung der beim Rechnen verbrauchten Energie. Den Kern des Systems bilden Kühlkörper für Server-Mainboards, Netzwerkkomponenten und Netzteile. Mainboard-Kühlkörper von Hot Fluid Systemen bedecken das gesamte Board, sind aus Aluminium gefräst und hermetisch verschlossen. Kanäle im Inneren des Kühlkörpers transportieren die Flüssigkeit zu den Wärmequellen auf der Platine.

I.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Beim Forschungsprojekt handelt es sich um ein Verbundprojekt mit der Klingenburg GmbH.

I.4.1. Borderstep Institut

Das Borderstep Institut ist im Bereich der anwendungsorientierten Innovations- und Entrepreneurshipforschung tätig und ist dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Als unabhängige Forschungseinrichtung untersucht Borderstep Innovations-, Technologie- und Marktentwicklungsprozesse, erstellt Studien für öffentliche und private Auftraggeber und erarbeitet praxistaugliche Konzepte z.B. für die Innovationsplanung und die Nutzerintegration in den Innovationsprozess. Borderstep beschäftigt sich seit mehr als einem Jahrzehnt mit der ressourceneffizienten IT-Nutzung und hat eine Vielzahl von Erhebungen und Studien zum Energie- und Materialverbrauch von Computerendgeräten, Netzwerken und in Rechenzentren durchgeführt.

I.4.2. dc-ce RZ Beratung

dc-ce RZ Beratung ist ein unabhängiges Planungsbüro für Rechenzentren mit Sitz in Frankfurt und Berlin. Neben der fundierten, zukunftsorientierten und an Effizienz orientierten Beratung und Planung von Rechenzentren zeichnet sich dc-ce auch durch folgenden Aktivitäten aus:

- Aufbau eines Prüfstands für die Klimatisierung von Rechenzentren in Zusammenarbeit mit der TU Berlin im Hermann-Rietschel-Institut
- Veranstalter der Fachausstellung future thinking und des Deutschen Rechenzentrumspreises
- Mitwirkung in zahlreichen Normungs- und Standardisierungsgremien und in Verbänden, z.B. DIN, VDE, VDI, BITKOM, eco
- Durchführung von Schulungs- und Coaching-Maßnahmen

I.4.3. Invensor GmbH

Invensor GmbH ist branchenführend in der Entwicklung von Adsorptionskältemaschinen, die es ermöglichen, mit Hilfe von Abwärme zu kühlen. Invensor Kältemaschinen verknüpfen dieses Know-How mit modernster Sorptionstechnologie und setzen damit neue Maßstäbe bei Leistung, Effizienz und Anwendungsmöglichkeiten von thermisch angetriebenen Kältesystemen. Invensor wurde mehrfach mit dem deutschen Kältepreis des Bundesumweltministeriums ausgezeichnet, zuletzt im Jahr 2016.

I.4.4. Thomas-Krenn.AG

Die Thomas-Krenn.AG aus Freyung im Bayerischen Wald ist ein führender Hersteller individueller Server- und Storage-Systeme sowie Anbieter von Lösungen rund um das Rechenzentrum. Zu den mehr als 15.000 Kunden aus ganz Europa gehören Großkonzerne, öffentliche Verwaltung, IT-Dienstleister, Bildungseinrichtungen sowie eine Vielzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen. Darüber hinaus bietet der Hersteller Technik-Beratung, entwickelt Server-Appliances für Drittanbieter und Sonderlösungen für spezielle Anforderungen im Rechenzentrum. Die Thomas Krenn AG hat einen Prototyp eines flüssig gekühlten Server-Systems mit Wärmerückgewinnung entwickelt. Mit der verwendeten Technologie sind wesentlich energieeffizientere, leisere und kompaktere Rechenzentren möglich. Das System entstand als Ergebnis des Projekts „Hot Fluid Computing – Hochtemperatur-Flüssigkeitsentwärmung für RZ-Serverkomponenten“, das vom DLR ausgeschrieben und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wurde. Die Thomas-Krenn.AG gewann die Ausschreibung im Februar 2015.

I.4.5. Tobol GmbH

Die Tobol GmbH bietet Lösungen der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für Anlagen der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik und die Automatisierung an. Tobol verfügt über fast 20jährige Erfahrung und fertigt seine Schaltanlagen auf 1.300 m² Produktionsfläche am Standort Leinefelde. Die Automatisierungslösungen von Tobol sind vollkommen webbasiert und nahtlos in die webbasierte Leit- und Managementsoftware integriert. Im Rechenzentrumsmarkt hat Tobol in den letzten zwölf Jahren für 20 Firmen bundesweit mehr als 100 Anlagen mit Tobol MSR-Technik ausgerüstet.

I.4.6. Noris Network AG

Die Noris Network AG ist ein Betreiber von Rechenzentren. Sie bietet für Kunden verschiedene IT Dienstleistungen auf den von ihr betriebenen IT Komponenten an.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

II.1.1. Grundlagen Rechenzentrum

Im folgenden Unterkapitel werden die nötigen Grundlagen zu Rechenzentren im Allgemeinen und zur Kühlung dargestellt. Zusätzlich wird zum besseren Verständnis auf die Kühlung der Server, Kennzahlen für Energieeffizienz im Rechenzentrum und die physikalischen Zusammenhänge eingegangen.

Rechenzentrumsmarkt

Der Rechenzentrumsmarkt wandelt sich sehr dynamisch. Die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft führt zu einem stark anwachsenden Bedarf an Rechenzentrumskapazitäten. Die Investitionen in Rechenzentrumsinfrastrukturen stiegen in den vergangenen Jahren im zweistelligen Prozentbereich und erreichen in Deutschland im Jahr 2017 erstmals die „Eine-Milliarde-Euro-Grenze“ [6]. Das ständig steigende Wachstum im Rechenzentrumsmarkt hat zur Folge, dass trotz stetiger Energieeffizienzsteigerungen der Rechenzentren durch neue Technologielösungen der Gesamtenergiebedarf steigt. Die 2015 für das Jahr 2025 prognostizierten 16 TWh Energieverbrauch für Rechenzentren in Deutschland [7] wurden bereits im Jahr 2020 erreicht [8], nämlich doppelt so schnell. Gemäß der aktuellen Prognose des Bruttostromverbrauchs [9] war das ein Anteil von 3%.

Energieeffizienz der Rechenzentren

Es existieren diverse Kennzahlen, die zur Effizienzbewertung von Rechenzentren herangezogen werden. Die bekannteste Kennzahl ist die Power Usage Effectiveness (*PUE*). Die *PUE* gibt das Verhältnis des Gesamtenergieverbrauchs eines Rechenzentrums zum Energieverbrauch der IT im Rechenzentrum an. Der theoretisch optimale *PUE*-Wert ist 1, weil dann die gesamte Leistung in die eigentliche IT fließt. Je nach Art, Standort und Baujahr von Rechenzentren variiert der *PUE*-Wert. So gibt Google für seine Rechenzentren einen durchschnittlichen *PUE*-Wert von 1,10 an [10], die deutsche Telekom geht bei den Rechenzentren von T-Systems im Jahr 2019 von durchschnittlich 1,64 aus [11], Vodafone gibt für seine Rechenzentren einen Durchschnittswert von 1,60 [12] an. In einer Untersuchung von IDC, in der kleine Rechenzentren befragt wurden, ist eine durchschnittliche *PUE* von 2,4 ermittelt worden [13]. In einer der aktuellsten Studien wurde ein durchschnittlicher *PUE* von 1,63 für alle Rechenzentren in Deutschland ermittelt [8]. Der Blaue Engel fordert für neu in Betrieb genommene Rechenzentren einen *PUE*-Wert von weniger als 1,4. Dies stellt schon sehr hohe Anforderungen an die Energieeffizienz der technischen Gebäudeausrüstung. In einer Untersuchung für das BMWi aus dem Jahre 2015 wurden durchschnittliche *PUE*-Werte für unterschiedliche Rechenzentrumsgrößen im Jahr 2015 ermittelt. Während für große Rechenzentren über 5000 m² IT-Fläche durchschnittliche *PUE*-Werte von 1,6 ermittelt wurden, lagen die *PUE*-Werte für kleine Rechenzentren unter 100 m² durchschnittlich bei 2,1 [7]. Eine weiter branchentypische Kennzahl ist die Partial Power Usage Effectiveness (*pPUE*), die setzt die IT-Leistung P_{IT} und die zur Kühlung aufgebrachte elektrische Leistung $P_{Kühlung}$ ins Verhältnis:

$$pPUE = \frac{P_{IT} + P_{Kühlung}}{P_{IT}}. \quad (1)$$

Die weit verbreitete Verwendung von *PUE* und die verstärkte Aufmerksamkeit für diese Kennzahl haben dazu geführt, dass sie auch in Situationen außerhalb der derzeit definierten

Methodik verwendet wird. Ein solcher spezieller Bereich ist die Wiederverwendung von Abfallenergie in einem Rechenzentrum mit einem daraus resultierenden *PUE*-Wert von weniger als 1,0. Obwohl die Absicht, diese Wiederverwendung zu berücksichtigen, im Allgemeinen auf lobenswerten Motiven beruht, stehen die Mathematik und die Anwendung in Konflikt mit der spezifischen Definition und Berechnungsmethode von *PUE*. Der Begriff der Wiederverwendung von Energie ist in der Berechnung nicht zulässig, und der niedrigste mögliche *PUE*-Wert ist definitionsgemäß 1,0 [14].

Bei *ERE* muss das Konzept des Kontrollvolumens (CV) in den Vordergrund gerückt werden. Vereinfacht ausgedrückt ist das CV die imaginäre Grenze um das Rechenzentrum und seine Infrastrukturunterstützungsbereiche, so dass die Energie, die diese Grenze überschreitet, berücksichtigt werden muss. In Bezug auf die *PUE* wird das Kontrollvolumen um das Rechenzentrum am Punkt der Übergabe vom Energieversorger "gezogen". In der Abbildung 1 ist die *PUE* einfach die Gesamtenergie bei (A) plus (B) geteilt durch die IT-Energie bei (D). Das Kontrollvolumen ist die gestrichelte Linie. Für *PUE* und *ERE* ist dies eine wichtige Unterscheidung, wenn alternative Energiearten und gemischt genutzte Gebäude analysiert werden. Ebenso wichtig ist es, sicherzustellen, dass alle Energiearten in *PUE* und *ERE* einbezogen werden. Alle Primärennergiearten (z. B. Heizöl, Erdgas usw.) und Sekundärennergiearten (z. B. Strom, Kühlwasser usw.), die das Rechenzentrum versorgen, sollten in die Berechnung einbezogen werden [14].

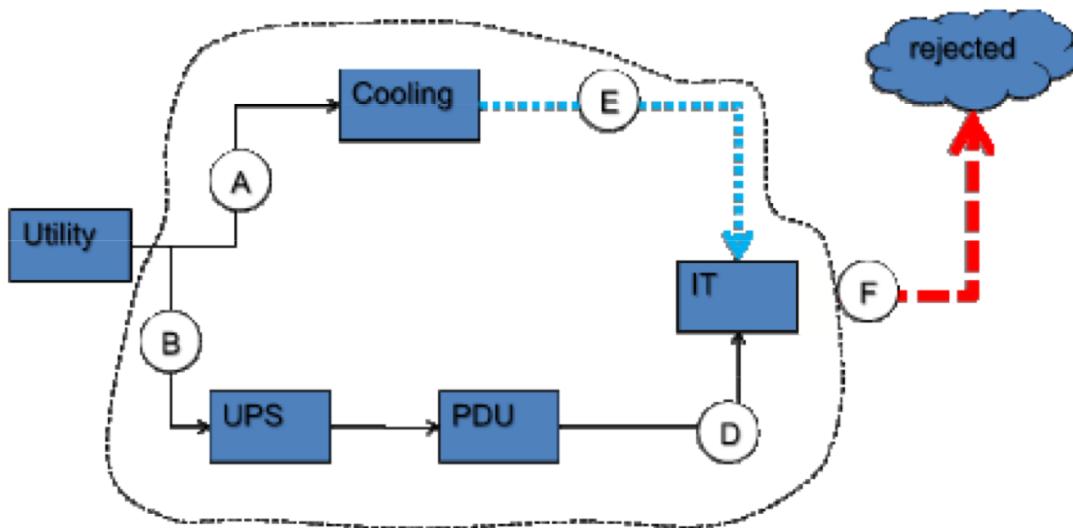


Abbildung 1: Vereinfachte Rechenzentrumskomponenten und Kontrollvolumen (CV)

Unter der Annahme, dass es keine Energiespeicherung gibt und das Rechenzentrum sich im eingeschwungenen Zustand befindet, erfordert die Energieerhaltung, dass die in das Regelvolumen einfließende Energie der ausfließenden Energie entsprechen muss. In dem einfachen Schema von Abbildung 1 bedeutet dies $A+B = F$. Dies ist stark vereinfacht, da auch an den Punkten Kühlung (A minus E), USV und PDU (B minus D) Verluste und Wärme erzeugt werden, aber auch diese Abwärme muss das CV verlassen. Sobald ein CV für ein Rechenzentrum definiert ist, kann er verwendet werden, um das *ERE*-Konzept richtig zu verstehen. Ein Beispiel für eine einfache Energiewiederverwendung ist die Nutzung von Wärme aus dem Rechenzentrum zur Beheizung angrenzender Räume, die nicht zum Rechenzentrum gehören. Die Energie im Heizungswasser oder in der Heizungsluft, die das Rechenzentrum verlässt, wäre

die Wiederverwendungsenergie, und ihre Messung würde die Berechnung der *ERE* beinhalten [14].

$$\text{ERE} = \frac{P_{\text{IT}} + P_{\text{Kühlung}} + P_{\text{sonst}} - P_{\text{Wiederverwendung}}}{P_{\text{IT}}}. \quad (2)$$

Edge-Rechenzentren

Eine besondere Chance bildet in diesem Zusammenhang die sich wandelnde Struktur der Rechenzentren. In der Vergangenheit stand vor allem die Konsolidierung der Rechenzentren im Fokus, d.h. die oft verteilten Serverlandschaften wurden in größeren Rechenzentren konsolidiert. Dies war meist auch mit einer Verbesserung der Energieeffizienz in den neuen, großen konsolidierten Rechenzentren verbunden. Mit der Umsetzung von Industrie 4.0 Konzepten und dem Internet der Dinge sind weitere tiefgreifende Veränderungen des Rechenzentrumsmarktes zu erwarten. Mit Dezentralität und Nähe zur Endanwendung bieten Edge-Rechenzentren eine mögliche Lösung zur effizienten Datenverarbeitung von 5G Mobilfunknetzen und Miliarden von am Internet angeschlossenen Endgeräte. Solche Edge-Rechenzentren können für Industrieanwendungen in Produktionshallen, in Smart City Umgebungen, für Videostreaming oder bei Systemen des autonomen Fahrens benötigt werden. Analysten gehen von einem sehr stark wachsenden Markt für Edge-Rechenzentren aus ([15], [16]). Auch das Gaia-X Projekt zur Gestaltung der nächsten Generation einer europäischen Dateninfrastruktur legt großen Wert auf Edge-Rechenzentren als Vor-Ort-Stromverbraucher aus erneuerbaren Energiequellen [17]. Schon heute ist festzustellen, dass die Zahl der kleineren Rechenzentren zunimmt, im Jahr 2017 gab es über 40.000 Rechenzentren mit einer Fläche von unter 100 m² [18].

Warmwasserkühlung und Abwärmennutzungspotenzial

Das Abwärmennutzungspotenzial in Rechenzentren ist aufgrund der Umwandlung der IT-Leistung in Abwärme hoch, bleibt jedoch in Deutschland großflächig ungenutzt. Im Bereich des High Performance Computings (HPC) wird aufgrund der hohen, abzuführenden Wärmelabüsten neben der Umluftkühlung seit einigen Jahren vermehrt eine flüssigkeitsbasierte Kühlung eingesetzt [4]. Als Beispiel ist das Leibnitz-Rechenzentrum in München zu nennen, dessen 4MW Abwärme mit einem *PUE* von 1,08 abgekühlt werden [19]. Die Cloud&Heat Technologies GmbH hat eine Wasserkühlungslösung entwickelt, die auch in nicht-HPC-Rechenzentren eingesetzt werden kann [20], da hier die Serverhardware für gewöhnlich auf Luftkühlung ausgelegt ist. Das ist ein innovatives Gesamtkonzept zur Flüssigkühlung von Standard RZ-Komponenten wie Server-Mainboards, Netzteilen und Switches. Die Kühlung aller Komponenten ohne Luftstrom ermöglicht Energieeinsparungen sowie Volumen- und Gewichtsersparisse, was wiederum zu kompakten Systemen führt und eignet sich sowohl für Racks als auch für Stand-Alone-Lösungen. Aufgrund der hohen Temperaturen wird eine effiziente Wärmerückgewinnung möglich, also die vielseitige Nachnutzung der beim Rechnen benötigten Energie. In Edge-Rechenzentren erzeugen die Server typischerweise eine Abwärmeleistung zwischen 5 und 100 kW. Das ist bei einem *COP* (engl. Coefficient of Performance) AdKM von 0,5 schon ausreichend, um andere Elemente des Rechenzentrums zu kühlen. Für die allgemeine Gebäudekühlung stünden 2,5 bis 50 kW Kälteleistung zur Verfügung.

II.1.2. AP 1 - Definition und Anforderungen, Vorbereitung der Markteinführung, Bestimmung der Einsparpotenziale

(AP Leitung: BoI)

Anforderungsworkshop

Als Projektbasis wurden im Rahmen eines Anforderungsworkshops, welcher am 5.3.2019 im Herman-Rietschel-Institut (HRI, TU Berlin) stattfand, die Anforderungen der jeweiligen Projektpartner unter der Leitung des Borderstep Instituts definiert. Auf dem Workshop1 wurden diverse technische Parameter, wie Temperaturen, elektrischer Leistungsbedarf der Versuchsanlagen sowie die thermische Leistung der Adsorptionskältemaschine, für den Labor- und Feldtest diskutiert. Zusätzlich entstand eine Übersicht der Verantwortlichkeiten der technischen Bereiche in den Versuchsanlagen sowie der verschiedenen Aufgabenbereiche innerhalb des Projektes. Unter anderem wurden die folgenden Themen und Fragestellungen auf dem Workshop bearbeitet bzw. Zuständigkeiten darin definiert:

- Parameter: Leistung, Temperatur, Durchfluss, Wärmeströme
- Demonstrationscharakter der Versuchsanlagen
- Externe Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit
- Zusammenspiel des Test-RZ / Demonstrations-RZ
- MSR-Technik / Schnittstellen
- Verwendung der Wärme/Kälte im Feldtest
- Betriebssicherheit und Ausfallschutz für das Konzept
- Projektmanagement / Verantwortlichkeiten
- Technische Koordination der Versuchsaufbauten
- Interne Kommunikation, Tools, Plattformen

Kategorie & ToDo	Verantwortlich	Beteiligte
Wer bringt was an Technik (Labor+Feldversuch)	HRI (Labor), Noris (Feldversuch)	
Klärung der Anzahl von Racks für den Feldversuch bei Noris - vermutlich ein komplettes Rack (bilateral TK <-> Noris)	Noris	TK, Noris
Optimierung Kühlkörper - Vorgehen klären	HRI	TK, HRI
Interne Kommunikation	HRI	alle
Einrichtung einer Cloud Lösung zum Datenaustausch	TK	TK
Terminabstimmung monatliche TK (-> Anpassung bei Bedarf)	HRI	HRI
Bereitstellung von Video-Conference Plattform (zoom)	Noris	Noris
2 Treffen jährlich - wenn möglich in Kombination mit Workshops	HRI	HRI, Borderstep
MSR Technik	Tobol	HRI, Invensor
Monitoring Konzept	HRI	HRI
MSR-Schema (wenn Hydraulik Schema vorliegt)	Tobol	Tobol
Klärung der Schnittstellen (Standards aus der IT)	HRI	HRI, Noris
Welche Roh-/Messdaten werden in die Cloud geladen?	HRI	HRI, Invensor, TK, Tobol
Weitere bilaterale Absatimmung zwischen Tobol und HRI zur Definition der notwendigen MSR-Technik	Tobol	Tobol, HRI
Verwendung von Wärme/Kälte im Feldversuch	Noris	
Nur die Kälte aus der Adsorptionskältemaschine wird in das Kältenetz eingespeist	Noris	Noris
Zusammenspiel/Vergleichbarkeit Test-RZ und Demonstrations RZ	HRI, Noris	
Definition der technischen Anforderungen im Rechenzentrum von Noris	Noris	Noris
Festlegung/Optimierung der Parameter: Temperatur, Durchfluss, Wärmemenge	Tobol	
Erstellung eines Gesamtschemas der Hydraulik	dc-ce	dc-ce, TK
Berechnung, Festlegung Volumenstrom (wenn Daten zu neuer Technik von TK vorliegen)	TK	TK, Invensor
Optimierung der Parameter	Tobol	alle
Planung der Elektroversorgung für Labor- und Feldtest	dc-ce	dc-ce
Bereits feststehende Parameter: Wassertemperatur von TK <70°C; bei Noris ~17kW Wärmeleistung; 10 kW Kälteleistung; el. Anschluss min 20 kW,		
Demonstration der Anlagen	HRI, Noris	Invensor, TK, Tobol, dc_ce
Planung eines repräsentativen Demonstrationsaufbaus (incl. Dummy etc.)	HRI	HRI, dc_ce, Invensor, Tobol
Erstellung von gut verständlichen Schaubildern für Demonstration vor Ort und ÖA	HRI	HRI
Bereitstellung von Internetzugang im Testrechenzentrum	HRI	HRI
Lasttests bei Noris (noch Abstimmung TK-Noris notwendig)	TK, Noris	TK, Noris
Abstimmung der Parameter bei Noris	Invensor	Invensor, Tobol, HRI, Noris
Auslegung Rückkühler bei Noris (noch Abstimmung Invensor-Noris notwendig)	Invensor, Noris	Invensor, Noris
HINWEIS: Zugang zum HRI bitte frühzeitig anmelden		
Externe Kommunikation/Öffentlichkeitsarbeit	HRI, BS	
kontinuierliche Beiträge über HotFlAd (DC-Insider, Social Media)	BS	BS
Abstimmung eines Freigabeprozesses - kurz Konzept an alle mitteilen	BS	BS
HINWEIS: Für Meldungen nach außen, von denen die Partner "betroffen" sind; bitte alle Partner informieren. Falls es Ansprechpartner für ÖA gibt, bitte an HRI/BS melden (z.B. marketing@Noris.de)		
Betriebssicherheit und Ausfallschutz	dc_ce	
Erarbeitung eines Konzepts	dc_ce	dc_ce
Nächste Schritte	alle	
Abstimmungsworkshop zur technischen Detailplanung / zeitlichen koordinierung	HRI	HRI, Tobol, Invensor, dc_ce,
HINWEIS: Zugang zum HRI / Tätigkeiten am Prüfstand -> bitte frühzeitig bei Ken Lindenberg anmelden		

Abbildung 2: Zuordnung von Verantwortlichkeiten auf Basis des Anforderungsworkshops

Ermittlung der Marktpotenziale

Neben der Literaturrecherche wurde eine Befragung zum Thema Kompakt-Rechenzentren mit 10 zuvor identifizierten Experten aus den Bereichen Rechenzentrumsbetrieb & -ausstattung, Telekommunikation und Edge-Computing bzw. Edge-Rechenzentrum durchgeführt. Der Fokus der Befragung lag auf Marktentwicklungen, Anwendungsfeldern sowie Vorteilen des HotFlAd-Konzepts. Die Ergebnisse der Befragung sind im Folgenden dargestellt:

Themenfeld 1: Marktentwicklung von Kompakt-Rechenzentren

Frage: Wie wird sich der Markt für Kompaktrechenzentren bis zum Jahr 2025 und zum Jahr 2030 gegenüber 2019 entwickeln?

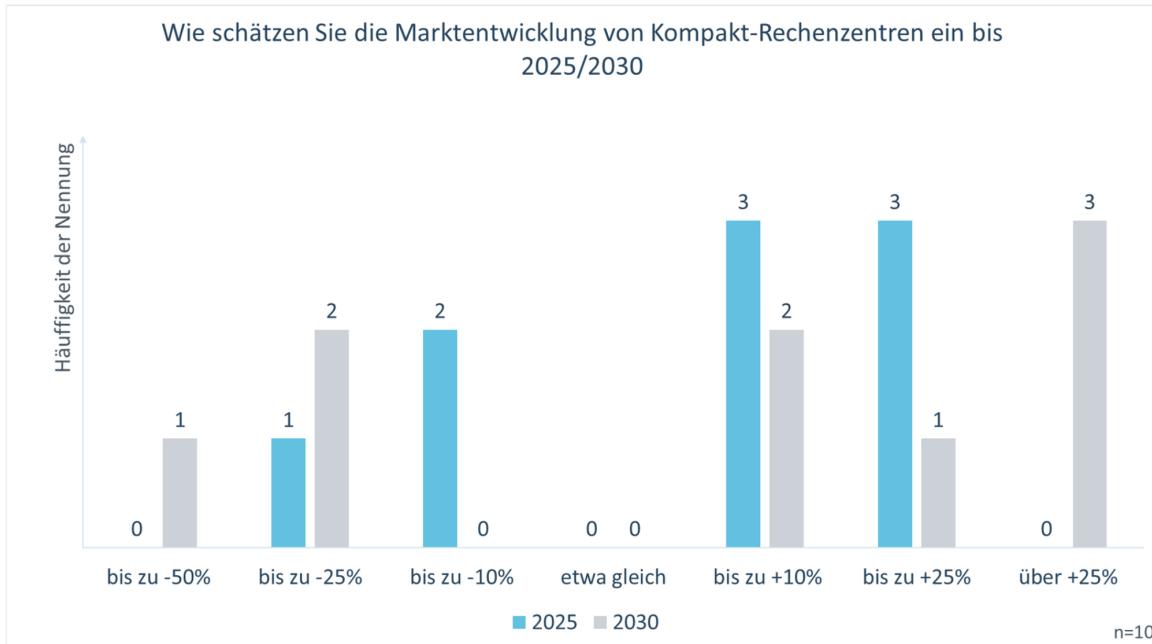
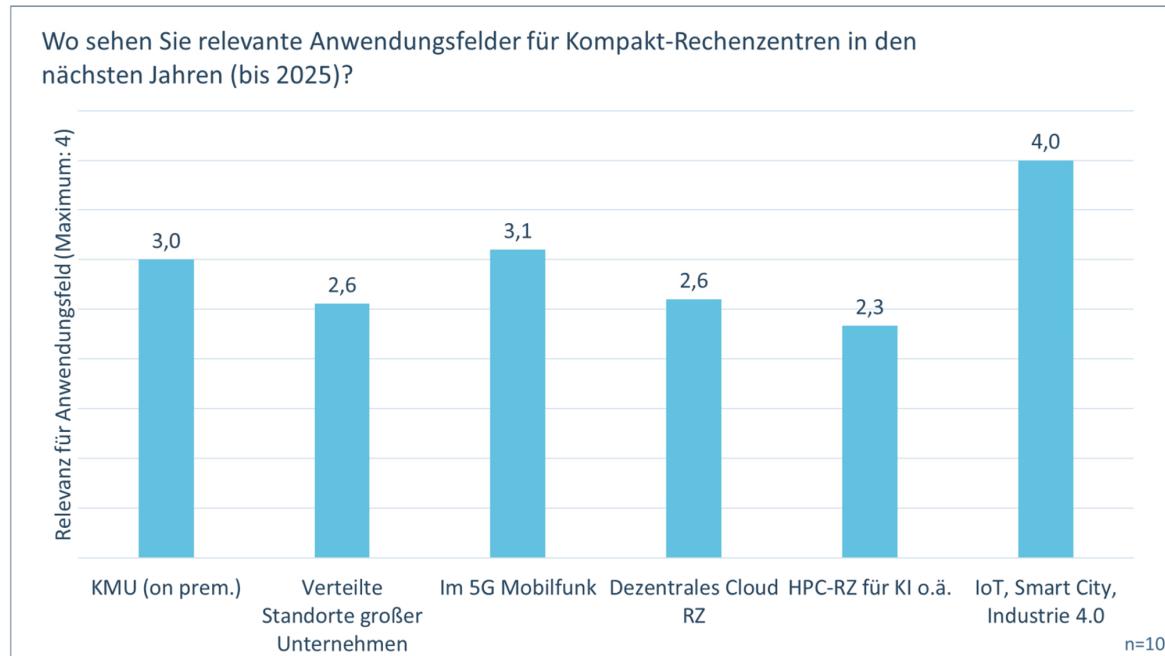


Abbildung 3: Befragungsergebnisse Marktentwicklung Kompakt-Rechenzentrum

Bis zum Jahr 2025 rechnen zwei Befragte mit einem Rückgang des Marktwachstum um 10 %, mit einem Rückgang von 25 % rechnet eine Person. Bis zum Jahr 2030 rechnen zwei Befragte mit einem Rückgang von 25 %, und eine Person rechnet mit einem Rückgang von 50 %. Dagegen erwarten bis zum Jahr 2025 drei Experten ein Wachstum von 10 %, und weitere drei Befragte ein Wachstum von 25 % ein. Bis zum Jahr 2030 rechnen zwei Befragte mit einem Wachstum von 10 %, eine Person erwartet ein Wachstum von 25 % und drei Experten rechnen mit einem Wachstum von 50 %.

Themenfeld 2: Anwendungsfelder für Kompakt-Rechenzentren

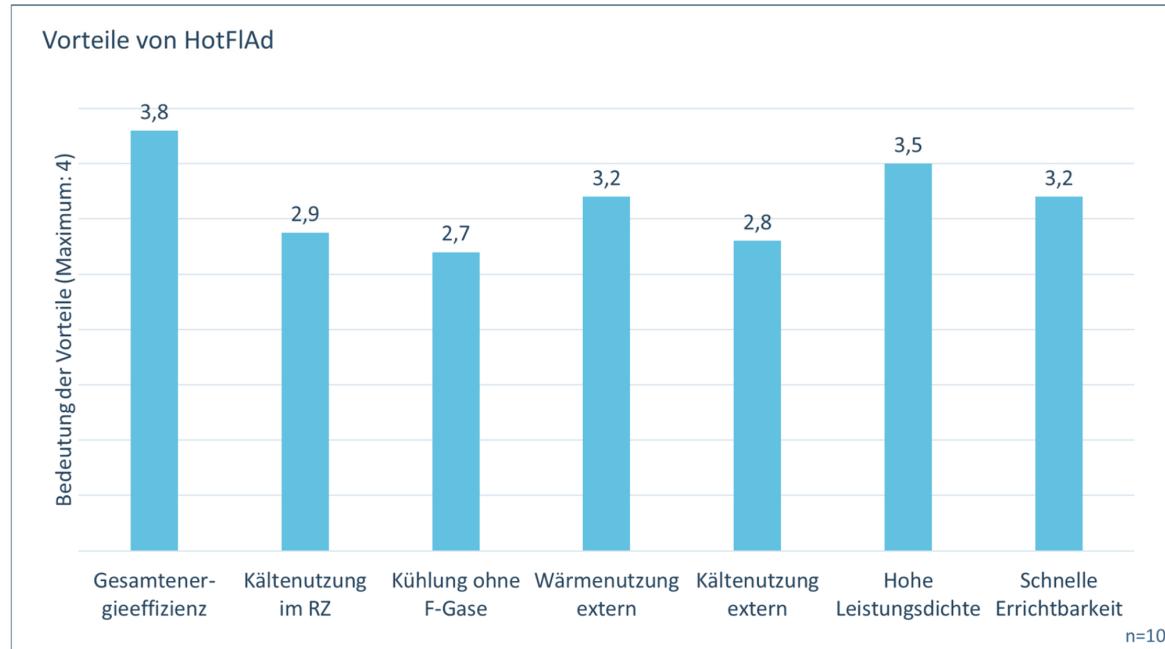
Frage: Wo sehen Sie relevante Anwendungsfelder für Kompakt-Rechenzentren in den nächsten Jahren (bis 2025)? (Mehrfachauswahl)

**Abbildung 4:** Einschätzung relevanter Anwendungsfelder

Folgende Antwortoptionen standen zur Auswahl: Rechenzentrum für KMU (on-premises), Dezentrales Rechenzentrum für verteilte Standorte größerer Unternehmen, Rechenzentrum in Kombination mit 5G-Netzausbau, Dezentrales Rechenzentrum für Cloud-Betreiber, Rechenzentrum für High Performance Computing/Anwendungen im Bereich Künstlicher Intelligenz, o.ä. Als relevantestes Anwendungsfeld wurde von den Experten das Rechenzentrum in Kombination mit 5G-Netzausbau, gefolgt vom Rechenzentrum für KMU (on-premises) gewählt.

Themenfeld 3: Vorteile des HotFlAd-Konzepts

Frage: Wie bedeutend stufen Sie die Vorteile dieses Konzeptes ein?

**Abbildung 5:** Einstufung der Vorteile des HotFlAd-Konzepts

Folgende Antwortoptionen standen zur Auswahl: hohe Effizienz des Gesamtkonzepts, lokale

Kältenutzung im Rechenzentrum, Kühlung ohne flourhaltige Kältemittel (F-Gase), externe Wärmennutzung, externe Kältenutzung, hohe Leistungsdichte durch Flüssigkeitskühlung, schnelle Errichtung durch schlüsselfertiges Rechenzentrums-Konzept. Die höchste Bewertung haben bei dieser Beurteilung die Vorteile hohe Effizienz des Gesamtkonzepts, gefolgt von hoher Leistungsdichte durch Flüssigkeitskühlung, schnelle Errichtung durch schlüsselfertiges Rechenzentrumskonzept und externe Wärmennutzung erhalten.

Innovationsworkshop

Am 05.11.2019 wurde in der Technischen Universität Berlin ein Innovationsworkshop als erster Input zur Geschäftsmodellentwicklung durchgeführt und dokumentiert. Ziel dieses Workshops war es, unter Verwendung der Methode des Value Proposition Canvas sowohl Gain Creators als auch Pain Relievers zu ermitteln, welche zentralen Elemente des Nutzenversprechens eines Geschäftsmodells darstellen. Auf Basis einer Vorstellung aktueller Marktentwicklung im Bereich Kompakt-Rechenzentren, des HotFlAd-Konzepts und einer Präsentation der Ergebnisse zur Expertenbefragung erfolgte zunächst eine Priorisierung der im Workshop zu betrachtenden Anwendungsszenarien durch die Teilnehmer. Dafür erhielt jeder drei Punkte, die je nach Relevanz vergeben werden konnten; eine Akkumulation der Punkte war erlaubt.

Tabelle 2: Bewertung der Anwendungsszenarien

Anwendungsszenario	Punkte
Rechenzentrum für KMU (on premise)	3
Dezentrales Rechenzentrum für verteilte Standorte größerer Unternehmen	3
Rechenzentrum in Kombination mit 5G-Netzausbau	8
Dezentrales Rechenzentrum für Cloud-Betreiber	8
Rechenzentrum für High Performance Computing/Anwendungen im Bereich Künstlicher Intelligenz o.ä.	4

Für die weitere Bearbeitung in der zweiten Workshop Session wurden die Anwendungsszenarien „Rechenzentren in Kombination mit 5G-Netzausbau“ sowie „Dezentrales Rechenzentrum für Cloud-Betreiber“ ausgewählt. Im Anwendungsfeld „Rechenzentren in Kombination mit 5G-Netzausbau“ wurden folgende Gain Creators und Pain Relievers ermittelt:

Tabelle 3: Ergebnisse im Anwendungsfeld Rechenzentren in Kombination mit 5G Netzausbau"

Gain Creators	Pain Reliever
Plug & Play	Mindeststandards für Sicherheit
Kontrolle	"Self-destroy"-Fähigkeit
Investitionsschutz	Chip-basierte Verschlüsselung
Entlastung von limitierten Ressourcen	

Im Anwendungsfeld „Dezentrales Rechenzentrum für Cloud-Betreiber“ wurden folgende Gain Creators und Pain Relievers ermittelt:

Tabelle 4: Ergebnisse im Anwendungsfeld "Dezentrales Rechenzentrum für Cloud-Betreiber"

Gain Creators	Pain Reliever
Abwärmenutzung	Zertifikate (z.B. Bauartzulassung) BSI/ISO etc.
Dezentralität	Full-Service-Betrieb
Anwendungsneutrales RZ-Konzept	Modularität
Geringes Schadenpotenzial	Hohe Leistungsdichte
	Fehlertolerante Infrastruktur
	Vollautomatischer Betrieb
	Automatisiertes "Data center health monitoring"
	Fehlerminimierung durch Serienfertigung
	Energieeffizienz
	Standortunabhängiges Konzept

Methodische Vorarbeiten - Geschäftsmodellentwicklung

Im Rahmen von Geschäftsmodellentwicklung wurden zunächst die methodischen Grundlagen für das weitere Vorgehen erarbeitet. Es wurden insgesamt 15 verschiedene Konzepte zur Darstellung und Entwicklung von Geschäftsmodellen betrachtet. Insbesondere das Business Model Canvas von [21], das Lean Canvas von [22] und das Sustainable Business Canvas von [23] wurden in die engere Wahl genommen. Aufgrund des klaren Nachhaltigkeitsbezugs von HotFlAd und der Passgenauigkeit der in dem Modell betrachteten Elemente und Fragestellungen wurde für das weitere Vorgehen das Sustainable Business Canvas 6 als methodische Grundlage ausgewählt.



Quelle: (Fichter & Tiemann, 2015)

Abbildung 6: Sustainable Business Canvas

Es wurden Recherchen zu den Inhalten der einzelnen Elemente möglicher Geschäftsmodelle (Kundensegmente, Wertangebote, Vertriebskanäle, Erlösmodelle, potenzielle Schlüsselpartner, Schlüsselressourcen) durchgeführt.

Als Vorbereitung zur Entwicklung der Geschäftsmodelle erfolgte basierend auf vorheriger Literaturrecherche eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Kooperationsformen. Ein gemeinsames Verständnis der Zusammenarbeit nach dem Fördervorhaben stellt eine Grundlage für eine Weiterführung der Idee von HotFlAd dar. Ein besonderes Augenmerk bei der Analyse lag dabei auf der Bedeutung von Kooperationen, Motive für Kooperationen und Ziele von Kooperationen.

Im Kontext des HotFlAd-Konzepts ergaben sich schließlich folgende grundlegende Fragestellungen:

- Welche Ziele hat diese Kooperation für die einzelnen Partner?
- Wie lange soll die Kooperation dauern?
- Wie viele Kooperationspartner sollen/ wollen sich an der Kooperation beteiligen?
- Mit welchem Image soll die Kooperations-Gemeinschaft gegenüber Auftraggebern, Kunden, Banken usw. auftreten?
- Welchen Einfluss sollen die Kooperationspartner auf Entscheidungen nehmen können? Welchen finanziellen Aufwand wollen die
- Partner auf sich nehmen (z.B. Kapitaleinlage)? Wie soll die Haftung geregelt sein?

Im Rahmen eines Online-Workshops wurden im September 2020 mögliche Kooperationsformen den Partner vorgestellt (siehe Abbildung 7):

	Merkmale	Vor- & Nachteile
(1) Unternehmensgründung:		
Equity Joint Venture	<ul style="list-style-type: none"> • juristisch & wirtschaftlich selbständiges Unternehmen • langfristige Ausrichtung • Haftungsbegrenzung auf Eigenkapital (i. d. R. GmbH) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemeinsames Entscheiden • Geteilte Haftung & Verantwortung • Ressourcenbündelung • Technologietransfer
(2) Vertragskooperation:		
Lizenzvertrag	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzungsrecht (einfach/exklusiv) • Lizenzkooperation • Mittelfristige Bindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung finanzieller Risiken (Lizenzgeber) • Erschließung neuer Märkte • Aufholung technologischen Rückstands (Lizenznehmer)
Liefervertrag	<ul style="list-style-type: none"> • Vertragliche Vereinbarung • Zeitliche Ausrichtung (kurz-, mittel-, langfristig) • Keine Kapitalbeteiligungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmerische Risiken werden nicht übertragen • Kein Autonomieverlust • Flexibilität (anpassungsfähig)

Abbildung 7: Mögliche Kooperationsformen für HotFlAd

Zum besseren Verständnis des Nutzenversprechens, der potenziellen Kunden und generell der Marktbeobachtungen seitens der Projektpartner im Hinblick auf die Geschäftsmodellentwicklung wurden zudem Einzelgespräche in Form von teilstrukturierten Interviews mit den

einzelnen Projektpartnern geplant, die im Januar 2021 stattfanden. Hierzu wurden folgende Fragen konzipiert:

1. Welche Erwartungen werden von den Projektbeteiligten an das Gesamtprojekt im Hinblick auf das Endprodukt und die Ergebnisse im Projekt gestellt?
2. In welcher Position/ in welchem Bereich sehen sich die Projektbeteiligten selbst mit Ausblick auf eine gemeinsame Kooperation und wie können/wollen die Projektpartner mitwirken (realistische Einschätzung forcieren)?
3. Wie sind die eigenen Kriterien für die Bereitschaft der gemeinsamen Zusammenarbeit. Welche Form der Kooperation soll angestrebt werden? Gibt es mögliche Bedenken, die ein Ausschlusskriterium darstellen können?
4. Welche konkreten Anwendungsfälle bieten sich jeweils aufgrund eigener Marktbeobachtungen/-einschätzungen an oder sind vorstellbar?
5. Welche Vorstellungen und Erwartungen werden explizit an das Endprodukt gesetzt? (Untersuchungsgegenstände ableiten, Sicherheit, Effizienz, Einsatzort, Dimensionierung, Flexibilität, etc.)

Die Knergebnisse der Einzelgespräche sind im Folgenden aufgeführt:

1. Generelle Markeinschätzung

- In der Wasserkühlung für Server wird ein großes Marktpotenzial gesehen
- Aktuell sind wassergekühlte Lösungen noch unattraktiv, da die Wirtschaftlichkeit unklar ist
- Hohe Absatzpotenziale (z.B. im arabischen Raum)

2. Potenzielle Kunden/ Zielgruppen

- Energetisch nachhaltige Rechenzentren
- Kunden in wärmeren Klimazonen (höherer Kühlungsbedarf)
- Kunden mit hoher Rechenlast (möglichst max. Auslastung)
- KI-Anwender, Universitäten, Forschungseinrichtungen, machine learning
- Aber auch Systeme im Bereich < 100KW

3. Vorstellungen/ Ideen zum Produkt

- Entwicklung einer skalierbaren Standardlösung
- Produkt soll möglichst flexibel und universell konzipiert sein
- Anwendung in heterogenen Marktumgebungen mit unterschiedlichen Bedürfnissen
- eine Art Baukasten / Werkzeugkasten (selbständiges Zusammenstellen durch den Kunden je nach Bedürfnis)
- Sowohl Gebäude- als auch Containerlösung
- Produkt soll sowohl stationär als auch mobil anwendbar sein
- Ev. können auch Mietmodelle angeboten werden

4. Anforderungen an das Endprodukt

- mögliche Integration in bestehende Systeme (wichtig für die Systemplanung)

- Variations- und Ergänzungsmöglichkeiten aufbauend auf einer Standardlösung je nach Kundenbedürfnis
- Berücksichtigung klimatischer Herausforderungen z. B. in wärmeren Klimazonen
- Differenzierung der Produktperformance unter verschiedenen klimatischen Bedingungen
- Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen

5. Wichtige offene Schritte

- Ableitung konkreter Anwendungsfälle zur Bestimmung der technischen Grenzen des Systems
- Durchführung von Sensitivitätsanalyse zur Optimierung des Temperaturniveaus
- Technisch machbare Grenzen eruieren (Temperaturbereiche, Gesamtleistung, etc.)
- Durchführung von Vergleichsszenarien zur Erörterung der wirtschaftlichen u. energetischen Sinnhaftigkeit im Vergleich zu alternativen Lösungen
- Ermittlung der Rentabilität des Produktes in Abhängigkeit der Systemgröße (konkreter Anwendungsfall/Kundenbetrachtung notwendig)
- Vorteile der Adsorptionskühltechnik explizit hervorheben
- Juristische Klärung der weiteren Zusammenarbeit

6. Zukünftige Rolle

- DC-CE → Planer
- Thomas Krenn → Vertrieb und Marketing; Fertigung ist auch möglich
- Tobol → Vertrieb
- Cloud & Heat → Entwicklung, Implementation & Beratung, gleichzeitig auch Kunden
- Invensor → keine zukünftige Rolle

Produktworkshop

Mitte Februar 2021 wurde mit allen Projektpartnern ein Produktworkshop durchgeführt, in dem die Ergebnisse der Einzelgespräche aufgriffen wurden und darauf basierend wurden verschiedene mögliche Anwendungsfälle hinsichtlich der Rahmenbedingungen Leistung, Auslastung & Dynamik, Standort & Umgebung, wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie Sicherheit/ Zuverlässigkeit & Flexibilität in einem Brainstorming diskutiert. Untersucht wurden die Anwendungsfälle Streaming, IAAS (Infrastructure-as-a-service – Cloud Dienste), HPC (High-Performance-Computing) und IOT (Internet-of-Things Anwendungen) sowie Autonomes Fahren. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt:

Leistung

	Streaming	IAAS	HPC	IOT/ Autonomes Fahren
Anzahl Racks (Max.)	10	10	10	10
Leistungsdichte pro Rack (Max.)	40	20	120	20
Virtualisierung [%]		90%	0%	
Server Charakteristik (Multi Purpose / Datenverarbeitung / RAM / GPU / Speicherplatz)		Viel RAM, viel Speicher	Viel RAM, weniger Speicher	

Auslastung + Dynamik

	Streaming	IAAS	HPC	IOT/ Autonomes Fahren
Nutzungsdynamik Kurzzeitig, Tageszeit, Wochentag, Jahreszeit?	Abends Wochenende Dunkle Jahreszeit	Wochentags, Kernarbeitszeit (7-19 Uhr)	Dauerhafte Auslastung	
Langfristige Auslastung: a) Ist das RZ von Anfang an voll ausgelastet oder erst nach und nach? b) Skalierbarkeit ohne Nachteile im Teillastbetrieb?	30% zum Start, Kurzfristiger Anstieg in den ersten (1-2) Jahren	30% zum Start, Kurzfristiger Anstieg in den ersten (1-2) Jahren	80% zum Start	

Umgebung

	Streaming	IAAS	HPC	IOT/ Autonomes Fahren
Klimaregion Temperaturen, Niederschlag, Einstrahlung	Deutschland Skandinavien Arabischer Raum	Deutschland Skandinavien Arabischer Raum	Deutschland Skandinavien Arabischer Raum	Deutschland Skandinavien Arabischer Raum
Abgabe von Kälte/ Wärme an externe Abnehmer?	Kälte auch extern/verkaufen; Wärme für Gebäude			
Sonstige Besonderheiten des Standorts	Als Vergleich ganzjährig freie Kühlung			

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

	Streaming	IAAS	HPC	IOT/ Autonomes Fahren
Energiepreis Strom [Ct/kWh]	Deutschland: 20-25 Skandinavien: Arabischer Raum:	Deutschland: 20-25 Skandinavien: Arabischer Raum:	Deutschland: 20-25 Skandinavien: Arabischer Raum:	Deutschland: 20-25 Skandinavien: Arabischer Raum:
Erlösmöglichkeit Wärme/ Kälte [Ct/kWh]	... Einsparungen von Investitionskosten	... Einsparungen von Investitionskosten	... Einsparungen von Investitionskosten	... Einsparungen von Investitionskosten
Planungszeitraum für Investition / Nutzungsdauer	10 Jahre 5-8 Jahre Nutzungsdauer 20-30			
Kühltechnologie Vergleichsfall	Ganzjährig freie Kühlung Kompressionskälte	Ganzjährig freie Kühlung Kompressionskälte	Ganzjährig freie Kühlung Kompressionskälte	Ganzjährig freie Kühlung Kompressionskälte

Sicherheit/Zuverlässigkeit + Flexibilität

	Streaming	IAAS	HPC	IOT/ Autonomes Fahren
Zweiter unabhängiger Kälteerzeuger?	Für Luftgekühlte Systeme	Für Luftgekühlte Systeme	Für Luftgekühlte Systeme	Für Luftgekühlte Systeme
Alternative Wärmequelle für Adsorptionskälte?	- Eher zusätzliche Rückkühlmöglichkeit	- Eher zusätzliche Rückkühlmöglichkeit	- Eher zusätzliche Rückkühlmöglichkeit	- Eher zusätzliche Rückkühlmöglichkeit
Planbarkeit/ Verschiebbarkeit der RZ-Workload	Planbar Wenig verschiebbar	planbar verschiebbar	planbar Verschiebbar	

Geschäftsmodellworkshop

Basierend auf dem zuvor beschriebenen Konzept des Sustainable Business Canvas wurde am 19.10.21 mit den Projektpartnern ein Geschäftsmodellworkshop durchgeführt und dessen Ergebnisse protokolliert. Im Folgenden werden die daraus resultierten Ideen und Überlegungen anhand ausgewählter Leitfragen dargestellt.

Vision & Mission

Von den Teilnehmenden wurde folgende Vision definiert:

"Wir schaffen Standards für die energetische Nachnutzung von IT-Abwärme. "

Diese Vision nimmt Bezug zu der Tatsache, dass in Rechenzentren die durch Kühlung erzeugte Abwärme bisher an die Umgebung abgegeben wird und somit eine bestehende Wärmeresource nicht genutzt wird. Das soll im Rahmen des HotFlAd-Konzepts durch ein weitgehend klimaneutrales Kühlungskonzepts, basierend auf flüssig gekühlten Servern und dem Einsatz einer Adsorptionskältemaschine, geändert werden. Die Vision besteht darin, dass dieses Konzept zur Abwärmenutzung zukünftig als Standard für alle Rechenzentren gilt.

Weiter wurde von den Teilnehmenden folgende Mission definiert:

"Durch Anwendung des HotFlAd-Konzepts sowie energetischer und wirtschaftlicher Beratung

schaffen wir immerwährende grüne Mehrwerte für den Kunden. "

Das HotFlAd-Projektkonsortium verfügt über sehr heterogene technische und beratende Kompetenzen sowie tiefer Einblicke in die Rechenzentrumsbranche. In dieser gebündelten Form stellt das Konsortium ein bisher einmaliges Projektteam dar, welches dem Kunden hinsichtlich energetischer und wirtschaftlicher Verbesserungen optimal beraten kann.

Nutzenversprechen

Als Werteangebot gegenüber dem Kunden wurden mehrere Nutzenversprechen festgelegt:

1. Effizienzsteigerung

Das HotFlAd-Konzept ermöglicht einen leistungsfähigen sowie energiesparenden Betrieb eines Rechenzentrums. Unterstützt wird diese Effizienzsteigerung durch ein integriertes ganzheitliches Energiemonitoring.

2. Skalierbarkeit

Je nach individuellen Kundenwünschen und Nutzungsintensitäten der Sever können die Rechenzentren flexibel angepasst und skaliert werden.

3. Umfassende Servicebetreuung

Dem Kunden soll eine 360-Grad-Betreuung ermöglicht werden. Das heißt ihm wird von der Bauplanung bis zur Instandhaltung und Wartung des Rechenzentrums ein umfassender Service angeboten. Um dies zu ermöglichen, soll ein Serviceteam ausgebildet werden.

4. Imageförderung

Das HotFlAd-Konzept stellt im Vergleich zu konventionellen Kühlkonzepten in Rechenzentren eine nachhaltigere Produktlösung dar, was insbesondere Kunden anspricht, die Wert auf klimaneutrale Lösungen legen und sich dementsprechend am Markt positionieren wollen.

5. Zukunftsfähigkeit

Sowohl im politischen Kontext als auch bei anderen Stakeholdern wird es zunehmend deutlicher, dass Rechenzentren aufgrund ihres kontinuierlich zunehmenden Energiebedarfs energieeffizienter werden müssen. Das HotFlAd-Konzept ermöglicht dies und bietet somit einen Wettbewerbsvorteil.

Kunden

Als Kunden wurden im Rahmen des Workshops Unternehmen im städtischen Raum, Energieversorger und Rechenzentrumsplaner sowie -berater definiert.

Um die Kundenbeziehung zu gestalten, wurde die Integration eines customer relationship managements vorgeschlagen.

Als Distributions- und Kommunikationskanäle wurden folgende Möglichkeiten genannt:

- Fachverbände (Lobby)
- Netzwerke (z. B. NERZ)
- Ausbau und Nutzung bisheriger Vertriebskanäle
- RZ-Planer und RZ-Berater
- Durchführung von Marketingkampagnen
- Nutzung eines Webshops
- Nutzung der sozialen Medien
- Publikationen und Berichte in Fachzeitschriften
- Besuch von Fachmessen, Konferenzen und weiteren Events in der Branche

Wettbewerber

Folgende relevante Wettbewerber wurden genannt:

- A-Brands im Bereich Hardware (HPC, SMC, Intel, etc.)
- RZ-Betreiber: Facebook & Microsoft
- IBM, HP Huawei
- Rittal
- Planer & Generalunternehmer
- Cloud & Heat

Als Wettbewerbsvorteil werden aktuell folgende Punkte angesehen:

- Erprobtes Abwärmenutzungskonzept mit zwei Anwendungsmöglichkeiten:
 - 1. Wärmenutzung (> 58 Grad)
 - 2. Kälteleferung mittels Adsorptionskältemaschine Standortvorteil Deutschland
- Skalierbares Gesamtkonzept mit flexiblen und modularen Lösungen
- Bisher einzigartiges Konsortium verschafft einen Zeitvorteil

Stakeholder

Als weitere relevante Stakeholder, welche den Erfolg des HotFlAd-Konzepts maßgeblich positiv oder negativ beeinflussen wurden aufgezählt:

- Vergabebehörden- und institutionen
- Politische Entscheider auf EU-, Bundes- und Kommunalebene
- Ministerien wie das Umweltbundesamt (z. B. durch Siegel wie dem Blauen Engel)
- Lobby und Netzwerke (z. B. Verbände oder Arbeitskreise)
- IT-Fachleute (bspw. die Admins oder Fachinformatiker in den Rechenzentren)

Ertragsmodell

Um mit dem Konzept einen Ertrag erzielen zu können, wurden zwei Verkaufsmodelle vorschlagen. Das erste Modell beruht auf einem klassischen Verkauf einer dem Kunden entsprechenden Endlösung. Das zweite Modell beruht auf einem Mietmodell, d.h. dem Kunden wird eine entsprechende Infrastruktur für einen definierten Zeitraum und den jeweiligen Nutzungsbedürfnissen zur Verfügung gestellt. Für diesen Zeitraum zahlt der Kunde dann einen entsprechenden Mietpreis.

In Ergänzung zum ersten Modell kann weiterhin ein Servicemodell mit definierten Leistungspunkten hinsichtlich Wartung, Instandhaltung und Optimierung angeboten werden.

Zusätzlich lassen sich Erträge über Beratungs- und Planungsangebote generieren.

Schlüsselaktivitäten

Als zentrale Aktivitäten zur Umsetzung des Nutzenversprechens wurden die Bereiche Kundenbetreuung, Lieferantenmanagement und Forschung & Entwicklung genannt.

Unter Kundenbetreuung fallen Aktivitäten wie Öffentlichkeitsarbeit, transparente Informationsdarstellung, Durchführung umfassender Dialogveranstaltungen und generelles Netzwerken.

Unter den Bereich Lieferantenmanagement zählt eine ganzheitliche Betrachtung und Planung der eingesetzten Ressourcen und dementsprechender Auswahl der Lieferanten.

Zu Forschung & Entwicklung zählt der kontinuierliche Antrieb, das Konzept nachhaltiger zu

gestalten und Entwicklungskooperationen mit anderen Unternehmen (z. B. A-Brands) einzugehen. Auch der Aufbau von Pilotanlagen als Referenz wurde angedacht.

Schlüsselressourcen

Die genannten Schlüsselressourcen lassen sich wie folgt aufteilen:

- Finanzen
- Kommunikation (Marketing, Vertrieb, etc.)
- fachliche Kompetenzen (qualifiziertes Fachpersonal, Know-how, Fachexpertise und Fachkräfte)
- Produktdesign (Gestaltung von flächenoptimalen Anlagen mit einer flexiblen Anpassung an individuelle Anforderungen)
- Lieferfähige Partner/ Netzwerke
- Betrachtung von nachhaltigkeitsrelevanten Key Performance Indikatoren, wie CO₂, kWh oder GWP

Schlüsselpartnerschaften

Um das Nutzenversprechen erfüllen zu können, wurden folgende Schlüsselpartner genannt:

- Investoren zur Finanzierung konkreter Projekte
- Lieferanten für HotFlAd-spezifische Bauteile und Komponenten
- Lokale Baufirmen
- Regionale Vertriebspartner
- Energieversorger (Angebot von regenerativem Strom)
- Kunden zur Abnahme des Wärme- oder Kälteangebots
- Anbieter von Infrastrukturen zur Nachnutzung der Abwärme auf einem hohem Temperaturniveau
- IT-Experten (z. B. für Software, Programmierungen, 3D-Artificials)
- Experten mit Expertise an der Schnittstelle Ökologie/ Technik z. B. für LCA oder thermische Simulationen
- Namenhafte Konzerne für Referenzprojekte

Kostenstruktur

Im Workshop sollte überlegt werden, welche Kosten über den operativen Betrieb hinaus entstehen. Von den Teilnehmern wurden folgende Aspekte genannt:

- Kosten durch Gebühren für Lizizenzen und Zertifizierungen
- Baugenehmigungskosten
- Finanzierungskosten, z. B. durch Kredite
- Planungs- und Umsetzungskosten
- Kosten für Werbemittel

- Schulungs- und Ausbildungskosten

Fazit zum Geschäftsmodell

Bei dem hier entwickelten Geschäftsmodell handelt es sich um eine erste Annäherung einer möglichen Ausgestaltung der im Kapitel 1 beschriebenen Themenfelder zur Entwicklung eines Geschäftsmodells für das HotFlAd-Konzept. Der Geschäftsmodellworkshop hatte nicht den zeitlichen Umfang, um die einzelnen Themenfelder hinsichtlich ihrer klassischen und nachhaltigkeitsorientierten Leitfragen in einer umfangreichen Tiefe zu ergründen. Dennoch lassen sich aus den einzelnen Ergebnissen erste Ansätze für eine erfolgreiche Positionierung des Konzepts in der Rechenzentrumsbranche ableiten.

So hat das HotFlAd Konzept durch seine Kombination aus wassergekühlten Servern und einer Adsorptionskältemaschine derzeit ein Alleinstellungsmerkmal, wodurch der Wettbewerb bisher keine große Konkurrenz darstellt. Bei einem Trend in Richtung Abwärmenutzung kann das HotFlAd- Konzept durch ein breites Projektkonsortium und der damit einhergehenden Expertise und Kompetenzen eine Lösung anbieten, die energieeffiziente und klimaneutrale Rechenzentren möglich machen.

Hochrechnung der Einsparpotenziale bei erfolgreicher Marktdurchdringung der Technologie

Hierzu wurde ein Arbeitspapier erarbeitet, das im Nachgang veröffentlicht werden soll. Die Inhalte des Arbeitspapiers werden im Folgenden hier dargestellt.

Die Aufgabe ist es, die im Laborversuch ermittelten Einsparpotenziale bei erfolgreicher Marktdurchdringung hochzurechnen. Als methodische Grundlage wird hierzu das Rahmenwerk der Förderlinie Eneff.Gebäude.2050 [1] herangezogen (s. Abbildung 8). Es werden, wo möglich, die in der darin dargestellten Beispielbilanzierung verwendeten Formelzeichen und Indices übernommen.

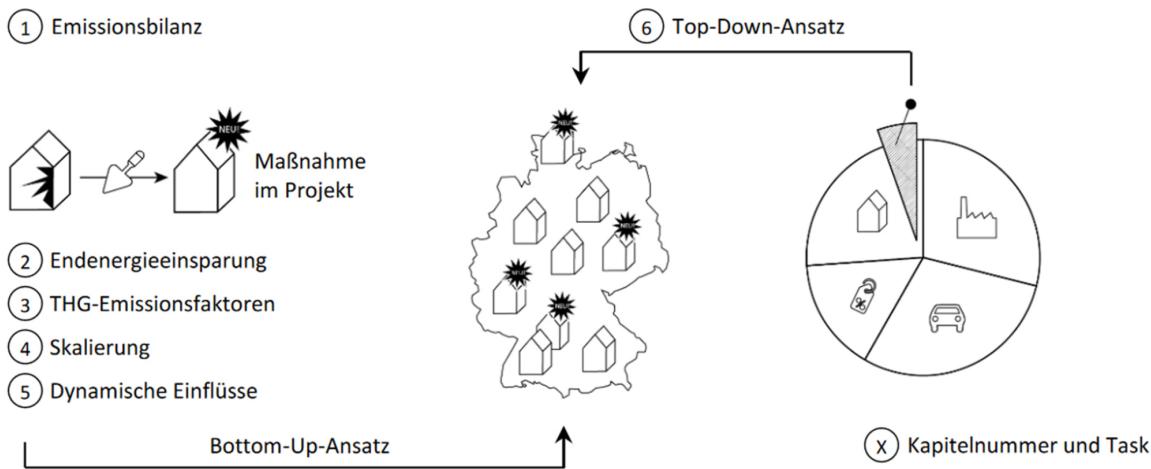


Abbildung 8: Grundlegende Methode des Rahmenwerks zur Ermittlung des Treibhausgasminde rungspotenzials nach [1]

Zur Bilanz der Emissionen bzw. der Energieeinsparungen (links im Bild) können die Ergebnisse aus Laborversuch und Simulation im Rahmen des HotFlAd-Projekts an der TU Berlin herangezogen werden II.1.5. Die Skalierung kann im Rahmen der in diesem Arbeitspaket ermittelten Marktpotenziale in Deutschland erfolgen. Mit dem am Borderstep Institut

seit 2009 existierenden Modell zur Rechenzentrumslandschaft in Deutschland, welches zuletzt im Rahmen einer aktuellen Marktstudie aktualisiert wurde [2], können Potenziale für die Zukunft abgeleitet werden. HotFlAd ermöglicht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen durch verschiedene Ansätze. Zum einen wird der Energieverbrauch der Infrastruktur im Rechenzentrum durch hocheffiziente Kühltechnik mittels Warmwasserkühlung reduziert. Zum anderen kann die im Rechenzentrum entstehende Wärme genutzt werden, um für andere Wärmenutzer die mit fossilen Energieträgern erzeugte Wärme zu substituieren. Ebenso kann die Wärme im HotFlAd-System genutzt werden, um mittels der integrierten Adsorptionskältemaschine Kälte zu erzeugen. Diese Kälte kann sowohl im Rechenzentrum direkt verwendet werden, als auch entsprechend der Wärme für dritte Anwendung.

Rechenzentren sind technisch sehr individuell aufgebaut und je nach Betreiber, Bereitstellungsmodell, Anwendung und Nachfrage unterscheidet sich ihre Kapazität von wenigen Kilowatt bis zu dreistelligen Megawatt bezogen auf die elektrische Anschlussleistung. Die von HotFlAd betrachteten Kompaktrechenzentren können IT-Anschlussleistungen im Bereich von ca. 5 Kilowatt bis einige hunderte Kilowatt erreichen. Im Projekt wurde festgestellt, dass sich das HotFlAd-System in diesem Bereich skalieren lässt, ohne dass sich die relevanten Parameter (Temperaturen, COP, etc.) signifikant verändern. Dementsprechend werden im Folgenden die energetischen Prozesse auf Rechenzentren in dieser Größenklasse übertragen und daraus Potenziale abgeleitet. Die konkrete technische Umsetzung einer HotFlAd-Lösung kann im Einzelfall abhängig von der Wirtschaftlichkeit sowie den Wärme- und Kälteabnehmern sehr unterschiedlich ausfallen; das wird bei der Potenzialanalyse jedoch später in den Abschnitten Wirtschaftliches Potenzial und Erwartungspotenzial diskutiert.

Von [2] wurden umfangreiche Untersuchungen zur Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes in Deutschland vorgenommen. Im Bereich der Edge Data Center wird für das Jahr 2025 eine Anschlussleistung von ca. 320 MW prognostiziert, mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 47% in den Jahren 2020 bis 2025.

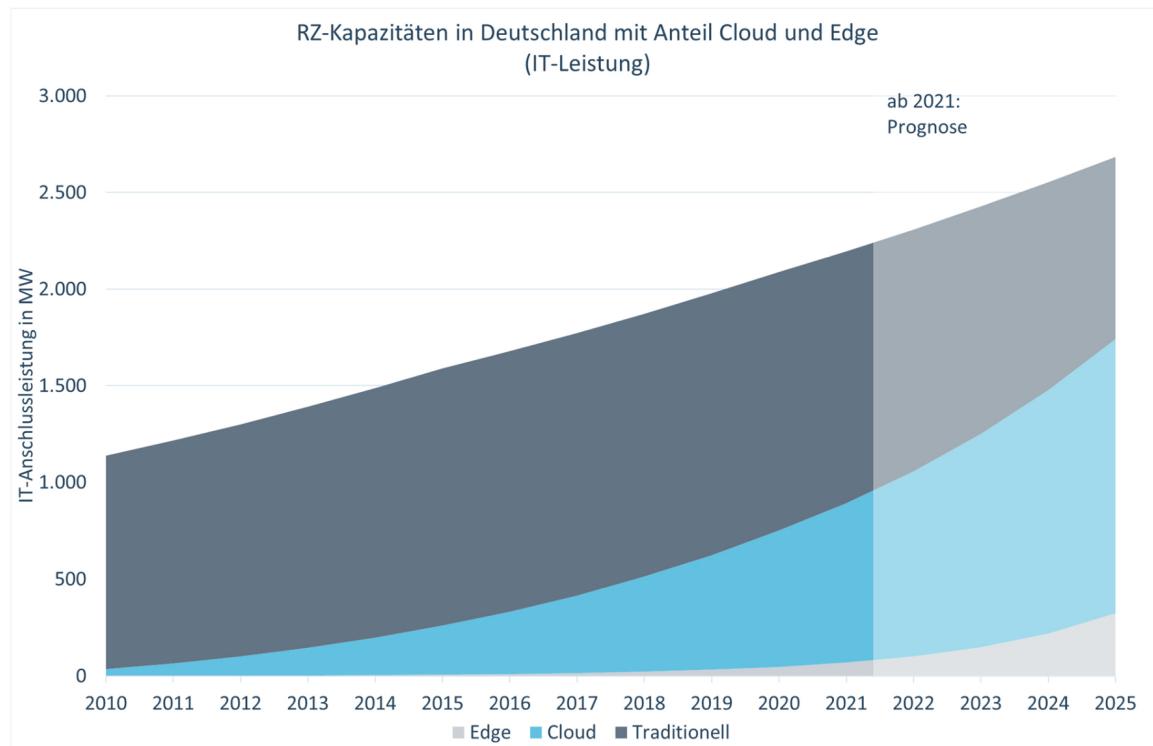


Abbildung 9: IT-Anschlussleistung in Deutschland nach [2]

Extrapoliert man das hier dargestellte Wachstum 2024 zu 2025, so kann im Jahr 2030 grob mit einer Anschlussleistung von 830 MW gerechnet werden. Da solche Zukunftsprognosen im IT-Markt mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, werden alternativ Werte für +30% (1090 MW) und -30% (585 MW) betrachtet.

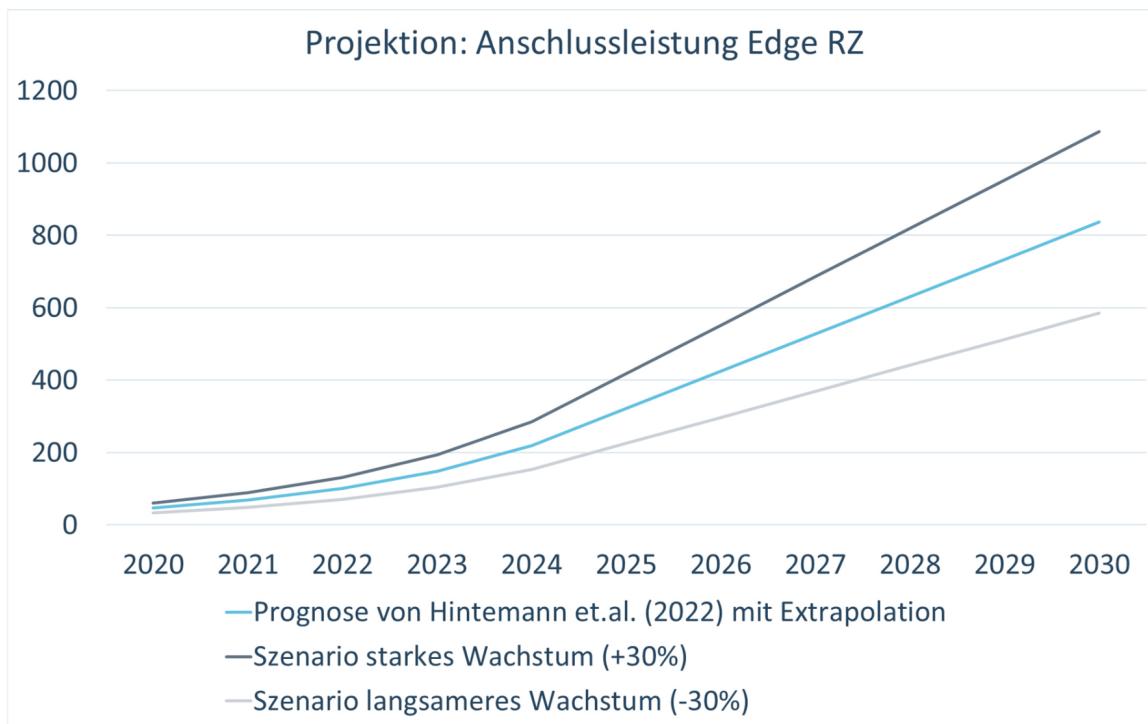


Abbildung 10: Extrapolation von Edge RZ Prognose und +/-30% Szenarien

Um die im II.1.5 ermittelten Energieströme auf die hier dargestellten Kapazitäten der Edge Rechenzentren in Deutschland zu übertragen, wird als Annäherung angenommen, dass sich die Energieverbräuche der IT proportional zur IT-Anschlussleistung verhält. Dies ist eine für die Skalierung notwendige Annäherung. Den Autoren ist bewusst, dass in einzelnen Rechenzentren durchaus verschiedene Anwendungstypen oder Bereitstellungsmodelle zu verschiedenen Verhältnissen IT-Anschlussleistung/ IT Energieverbrauch führen können. Aufgrund der breiten Anwendungsvielfalt und Heterogenität von Edge Rechenzentren, wird diese Annäherung jedoch als hinreichend genau im Rahmen dieser Prognose betrachtet. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass im II.1.5 beschriebene Referenz-System für Kompaktrechenzentren ein modernes und sehr energieeffizientes Rechenzentrum darstellt, wodurch die relativen Einsparungen gegenüber durchschnittlichen herkömmlichen Kompaktrechenzentren und IT-Installationen wesentlich höher ausfallen dürfte. Nutzt man den Energieverbrauch der IT (Server, Storage, Netzwerk) der Rechenzentren in Deutschland von [2] und dividiert diesen mit der IT-Anschlussleistung der Rechenzentren in Deutschland so erhält man einen Faktor $k_{IT-Power}$. Dadurch lässt sich aus der Anschlussleistung auf eine durchschnittliche Leistungsaufnahme der IT (gemittelt über ein Jahr) schließen. Da sich die elektrische Leistungsaufnahme der IT bei einem herkömmlichen System und einem HotFlAd-System nicht unterscheiden (vorausgesetzt gleicher Server-, Storage- und Netzwerktechnik), wird diese genutzt, um die Energieflüsse aus dem II.1.5 zu skalieren.

Für die zuvor dargestellten Werte für die IT-Anschlussleistung im Jahr 2030 (830 MW +/- 30%) würde eine solche Skalierung der Ergebnisse aus dem II.1.5 zu folgenden technischen Potentialen führen:

	Prognose	+30%	-30%
Energiebedarf der Edge Rechenzentren	4,02 TWh	5,23 TWh	2,81 TWh
Einsparung an elektrischer Energie durch Substitution der Kälte aus Kompressionskältemaschinen	0,55 TWh	0,71 TWh	0,38 TWh
Eine potenziell nutzbare Abwärme	2,02 TWh	2,62 TWh	1,41 TWh
Eine potenziell nutzbare Kälteenergie	0,34 TWh	0,44 TWh	0,24 TWh

Abbildung 11: Skalierte technische Potenziale von HotFlAd

Das Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ergibt sich aus den drei betrachteten energetischen Effekten:

1. der Energieeinsparung
2. der Bereitstellung von Wärme für externe Anwendungen
3. der Bereitstellung von Kälte für externe Anwendungen

Für die Faktoren für die THG-Einsparungen müssen Prognosen getroffen werden, da sich der Mix aus Energieträgern bis zum Jahr 2030 voraussichtlich stark verändern wird. Hierzu wird auf Basis von einer Studie, die anhand eines Szenarios mögliche Klimaneutralität in Deutschland beschreibt [24], ein mittlerer Faktor für die Emissionen im Strom und Wärmebereich bestimmt. Die hierin angenommenen Energieeinsparungen sowie Änderungen im Energiemix sind sehr ambitioniert, wodurch die THG-Faktoren im Jahr 2030 bereits relativ niedrig sind. Im Bereich Elektrizität lässt sich aus dem dort beschriebenen Kraftwerkspark ein THG-Faktor von ca. 139 g/kWh ableiten. Im Bereich der Wärmeversorgung lässt sich für das Jahr 2030 ein durchschnittlicher THG- Faktor von 166 g/kWh ableiten. Für die erzeugte Kühlenergie wird als Endenergie ausschließlich Elektrizität unterstellt.

Indem die Energiemengen mit den Faktoren multipliziert werden, ergeben sich folgende THG-Reduktionspotenziale:

	Prognose	+30%	-30%
THG-Reduktion durch Einsparung an elektrischer Energie (in 1000 t CO ₂)	559	727	391
THG-Reduktion durch Abwärmenutzung (in 1000 t CO ₂)	335	435	234
THG-Reduktion durch Nutzung der Kälteenergie (in 1000 t CO ₂)	47	61	33
Summe (in 1000 t CO₂)	941	1 223	659

Abbildung 12: Skalierte THG-Reduktionspotenziale von HotFlAd

Somit ergeben sich sehr hohe prognostizierte THG-Reduktionspotenziale von 941 000 tCO₂. Bei stärkerer Marktentwicklung (+30%) können diese Potenziale auf bis zu 1 223 000 tCO₂ ansteigen. Das größte Teilpotenzial liegt dabei darin, dass der Stromverbrauch der Rechenzentren reduziert werden konnte. Etwas niedriger liegt das Reduktionspotenzial durch die Nutzung der Abwärme. Die vor allem im Sommer bereitgestellte Kälte aus HotFlAd hat

das Potenzial, Emissionen aus konventioneller Kühlung um 47 000 tCO₂ zu reduzieren. Die Ergebnisse sind allerdings stark davon abhängig, ob die von [24] prognostizierten Pfade erreicht werden. Sollten die Emissionen im Strom und Wärmebereich höher sein, steigt in dem gleichen Verhältnis auch das Potenzial der Einsparungen. Außerdem wird mit den mittleren THG-Faktoren im Wärmebereich gerechnet. Wahrscheinlich ist jedoch, dass besonders Wärmeanwendungen mit fossilen Energieträgern substituiert werden, da diese üblicherweise wesentlich höhere Energie-/Brennstoffkosten verursachen, während die dann installierenden erneuerbaren Wärmequellen tendenziell höhere Investitionskosten bei niedrigen Brennstoffkosten aufweisen werden und daher nicht durch Abwärme ersetzt werden.

II.1.3. AP 2 - Aufbau Gesamtsystem im Forschungs-RZ des HRI, (AP Leitung: dc-ce)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurde die Umsetzung des neu entstehenden HotFlAd-Systems am FTRZ des HRI mit den systemteilhabenden Partnern Invensor, Tobol, dc-ce und der Thomas-Krenn.AG gemeinsam abgestimmt und entwickelt. Das Gesamtsystem besteht aus mehreren Teilsystemen, die von den einzelnen Projektpartnern größtenteils vormontiert geliefert wurden. So wurde das Adsorptionskältesystem durch Invensor vormontiert geliefert und vor Ort mit dem von der Thomas-Krenn.AG installierten HotFluid-System verbunden. Weitere Informationen zum Gesamtsystem und zur Umsetzungsplanung sind den Berichten der Projektpartner zu entnehmen. Das HRI stellte die Montage und die Schnittstellen mit dem HRI-internen Kälte- und Fernwärmennetz sowie die für spätere praxisrelevante Untersuchungen vorhandene Schnittstelle zum Kühlregister des FTRZ zur Außenluftkonditionierung sicher.

Der Adsorptionskältekreislauf wurde im September 2019 fertig gestellt. Ein erster Funktionstest hat erfolgreich stattgefunden. Der ISP wurde seitens TOBOL im Oktober 2019 angeliefert und bis einschließlich Dezember auf den bestehenden Adsorptionskältekreis von Invensor programmiert. Zusätzlich wurden Anpassungen am bestehenden Forschungs- und Testrechenzentrum sowie Reparaturen übernommen. Diese waren für geplante Untersuchungen mit Bezug auf die Nutzung der Adsorptionskälte zur Kühlung der luftgekühlten Server von Bedeutung und haben einen direkten Anwendungsfall für einen kompressionskältefreien Betrieb des Rechenzentrums ermöglicht. Während der zweiten Jahreshälfte 2019 fand seitens der Thomas-Krenn.AG eine Unterauftragsvergabe an Cloud&Heat (C&H) statt, die fortan die Entwicklung der Serversysteme übernahm. Diese Umstellung war nicht ohne eine Vermeidung einer zusätzlichen zeitlichen Verzögerung der Prüfstandsentwicklung möglich, jedoch konnte dank eines guten Kontaktes zu C&H, sowie der Vor-Ort-Termine bei C&H und am HRI die Planung des neuen Serversystems schnell Fortgesetzt werden.

In der ersten Jahreshälfte 2020 wurde seitens C&H die ersten Teile für das Serverack geliefert und verbaut. In Folgeterminen, die bis einschließlich Juli stattfanden, wurde eine Inbetriebnahme (IBN) vorgenommen. Die Anschlussstrecke mit Pendelspeicher zwischen der Adsorptionskälte maschine (AdKM) und dem Antriebskreis wurde vom HRI und der dc-ce umgesetzt. Dieser ist aufgrund der dynamischen Wärmequelle notwendig, um die AdKM bei Teillast effizient betreiben zu können. Nach der Schließung der restlichen Teilstrecke wurde die gesamte Prüfstandssensorik durch TOBOL verkabelt, konfiguriert und mit Informations-schwerpunkt (ISP) implementiert. Eine erste Inbetriebnahme ist erfolgt. Das Arbeitspaket 2 wird damit als abgeschlossen betrachtet.

II.1.4. AP 3 - Optimierung Einzelkomponenten und Gesamtsystem, (HRI)

Im nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse der Untersuchungen zur Optimierung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems dargestellt.

- Optimierung Kühlkörper
- Hot-Fluid-System
- Adsorptionskältemaschine
- Mess-, Steuer- und Regelungskonzept

CFD Untersuchungen der optimierten Kühlkörper

Ein 2U-Server der Thomas-Krenn.AG, der im Rahmen von HotFlAd von Seiten C&H und der TU Berlin untersucht wird, sieht vor, dass eine ganzheitliche Wasserkühlung der thermisch stark belasteten IC's (engl.: Integrated Circuits) erfolgt, welche ohne aktive Kühlung Schaden während eines Volllastbetriebes nehmen können. Die Kühlkörper der systemkritischen IC's sollen im Laufe des Projektes mit Hinblick auf die Wärmeübertragungseffizienz und den Druckverlust optimiert werden und eine Überschreitung der kritischen Temperaturen verhindern, siehe Abbildung 13. Für die hier abgebildeten IC's, werden thermische

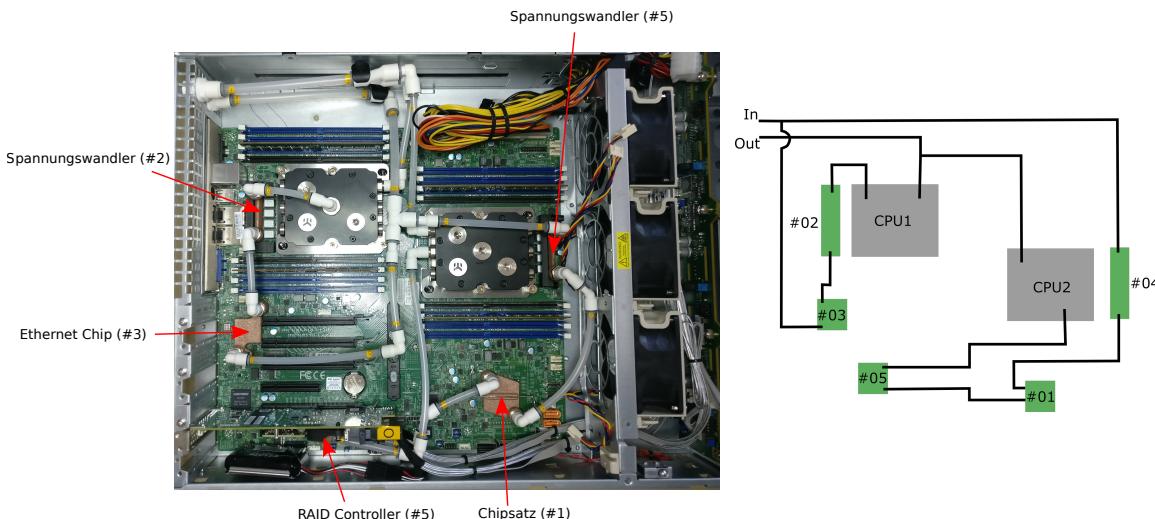


Abbildung 13: Darstellung der zu kühlenden Komponenten. Thomas-Krenn-Server mit C&H-Kühllösung (links) und logische Verschaltung der Kühlung (rechts).

Randbedingungen für die Leistungsaufnahme P_{el} und für die kritische Temperatur $T_{case,crit}$ des IHS (engl.: Integrated Heat Spreader) vorgegeben, welche im Rahmen der Optimierungen einzuhalten sind, siehe Tabelle 7. Es wurden zunächst zwei stationäre Betriebsbedingungen untersucht, den „low power case“ (lpc) und den „high power case“ (hpc). Für die insgesamt

Tabelle 5: Thermische Randbedingungen für die IC's.

Bezeichnung	Nr.	$T_{case,crit}$ (°C)	Leistungsaufnahme P_{el} lpc/hpc (W)
Chipsatz	#1	85	17/17
Spannungswandler	#2/4	120	17/40
Ethernet	#3	55	6.8/6.8
RAID Controller	#5	70	20/20

fünf zu kühlenden Komponenten wurden vier Referenzkühlkörpergeometrien bereitgestellt und mit der Strömungssimulationssoftware STAR-CCM+ untersucht. Das Wärmeübertragungsproblem wurde zunächst für den adiabaten Fall untersucht. Hierdurch wirkt sich ein systematischer Fehler nicht negativ auf das Kriterium zur Einhaltung der kritischen Tempe-

ratur aus, da die Kühlleistung durch fehlenden Wärmetransport an die Umgebungsluft sowie Strahlungsverluste unterschätzt wird.

Im folgenden Verlauf wird das Kühlmittel-Wassergemisch (Havoline 10%) der Einfachheit halber als Wasser bezeichnet. Die vier Kühlkörper wurden mit jeweils zwei Wassermassenströme $\dot{m}_{\text{water}} = [1.833 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1} (\text{lpc}), 4.138 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1} (\text{hpc})]$ simuliert. Es werden folgende Ergebnisgrößen betrachtet: Der Druckverlust Δp zwischen dem Inlet und dem Outlet, die Wassertemperatur $T_{\text{water,out}}$ am Outlet, die Wassertemperaturdifferenz ΔT_{water} zwischen Inlet und Outlet, die mittlere, maximale und minimale Temperaturdifferenz $T_{\text{case,mean}}$, $T_{\text{case,max}}$ und $T_{\text{case,min}}$ am IHS des Chips sowie dessen Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{case,crit-max}}$ der maximalen zur kritischen Temperatur.

Erste Untersuchungen zeigten, dass die Kühlkörpermodelle die thermischen Anforderungen erfüllen. Zur besseren Veranschaulichung sind die Temperaturverteilung und das Strömungsgeschwindigkeitsfeld eines Schnittes durch die Kühlkörperrippengeometrie des Ethernetkühlkörpers in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt. Da der Ethernetkühlkörper das Tem-

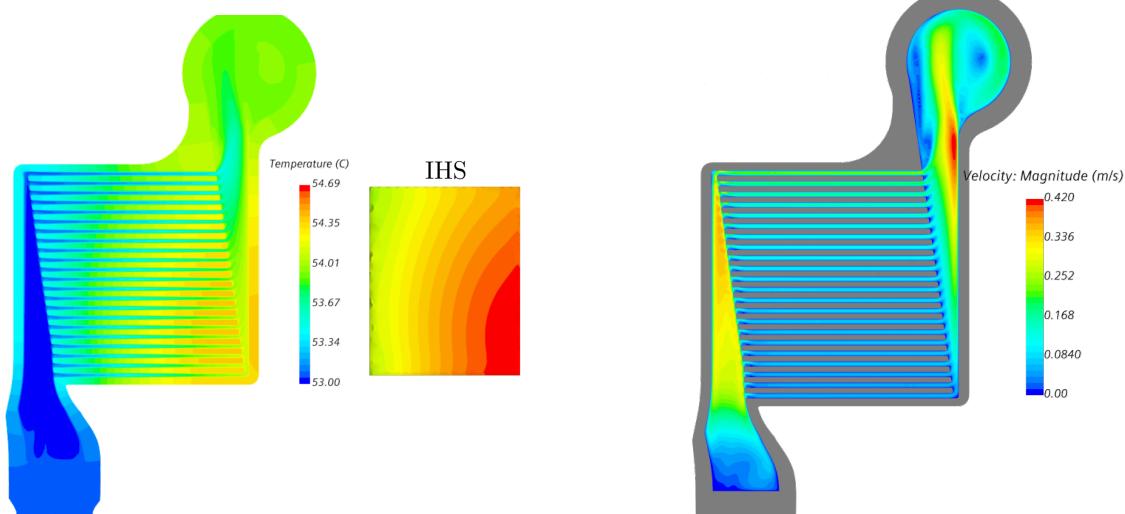


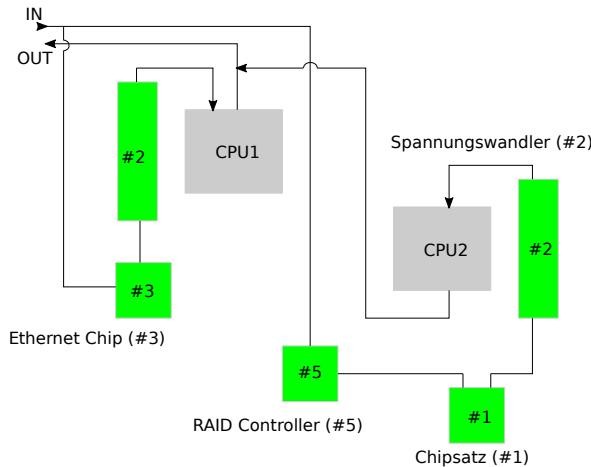
Abbildung 14: Temperaturverteilung im Ethernetkühlkörper. Schnitt durch die Finnengeometrie und Oberfläche des IHS.

Abbildung 15: Geschwindigkeitsfeld im Ethernetkühlkörper. Schnitt durch die Finnengeometrie.

returniveau im Gesamtsystem und damit das Gesamtpotential der Anlage deutlich limitiert, vgl. Tabelle 7, wurde erwogen diesen alternativ zu kühlen, um das Temperaturniveau des Gesamtsystems anzuheben. In weiteren Abschnitt wurde der Einsatz eines Peltier-Elements zur Anhebung des Temperaturniveaus am IHS des Ethernetchips untersucht. Der geringfügige Aufwand der Hilfsenergie für das Peltierelement lässt sich durch die resultierende, signifikante Erhöhung des energetischen Potentials des Gesamtsystems begründen. Eine theoretische Anhebung um 10°C auf $T_{\text{water,in}} = 63^\circ\text{C}$ als Startbedingung der Kühlösung wurde in zusätzlichen CFD-Studien mit Hinblick auf Unterschreitung der kritischen Temperaturwerte der IC's untersucht, siehe Tabelle 6. Hierbei wurde berücksichtigt, dass der RAID-Controller der nächste thermisch limitierende IC im System ist. Eine neue logische Verschaltung sieht diesen als Anfangspunkt der Kühlreihe vor, siehe Abbildung 16 und vergleiche Abbildung 13. Das Kühlkörpermaterial wird von Aluminium auf eine Kupferlegierung (CuNi_2SiCr) abgeändert, die später als Fertigungsmaterial des 3D-Druckes dient. Dieses Material weist einen geringeren Wärmeleitwert als Aluminium auf ($\lambda_{\text{CuNi}_2\text{SiCr}} = 160 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} < \lambda_{\text{Al}} = 237 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse für die ersten Kühlkörperrevisionen.

Beschreibung	Einheit	Chipsatz 02_30-1	Spannungswandler 02_20-1	RAID Controller 02_50
Randbedingungen 1				
\dot{m}_{water}	kg s^{-1}	1.833e-3	1.833e-3	1.833e-3
$T_{\text{water,in}}$	$^{\circ}\text{C}$	65.63	67.86	63
P_{el}	W	17	17	20
$T_{\text{case,crit}}$	$^{\circ}\text{C}$	85	120	70
Δp	Pa	190	88	354
$T_{\text{water,out}}$	$^{\circ}\text{C}$	67.86	55.24	65.63
ΔT_{water}	$^{\circ}\text{C}$	2.23	2.24	2.63
$T_{\text{case,mean}}$	$^{\circ}\text{C}$	69.27	79.42	70.15
$T_{\text{case,max}}$	$^{\circ}\text{C}$	70.04	82.25	71.29
$T_{\text{case,min}}$	$^{\circ}\text{C}$	67.82	75.00	68.10
$\Delta T_{\text{case,crit-max}}$	$^{\circ}\text{C}$	14.96	37.75	-1.29
Randbedingungen 2				
\dot{m}_{water}	kg s^{-1}	4.138e-3	4.138e-3	4.138e-3
$T_{\text{water,in}}$	$^{\circ}\text{C}$	64.16	65.15	63
P_{el}	W	17	40	20
Δp	Pa	776	319	1505
$T_{\text{water,out}}$	$^{\circ}\text{C}$	65.15	55.26	64.16
ΔT_{water}	$^{\circ}\text{C}$	0.99	2.26	1.16
$T_{\text{case,mean}}$	$^{\circ}\text{C}$	66.56	75.78	68.45
$T_{\text{case,max}}$	$^{\circ}\text{C}$	67.24	77.32	69.39
$T_{\text{case,min}}$	$^{\circ}\text{C}$	65.56	73.66	66.65
$\Delta T_{\text{case,crit-max}}$	$^{\circ}\text{C}$	17.76	42.68	0.61

**Abbildung 16:** Alternative Verschaltung der Kühlkörper.

Es wurde gezeigt, dass die maximale Temperatur des IHS des RAID-Controllers leicht oberhalb der vorgegebenen kritischen Temperatur von $T_{\text{case,crit}} = 70^{\circ}\text{C}$ bei einem niedrigen Massenstrom (\dot{m}_{pc}) liegt. Eine Anhebung des minimalen Massenstromes ist notwendig. Für die anderen Kühlkörper liegen die Temperaturwerte weiterhin in einem sicheren Bereich und bieten daher Spielraum zur Druckverlustoptimierung, wenn es die baulichen Gegebenheiten zulassen. Mit steigendem Temperaturniveau sinkt die Viskosität des Wassers und hat einen

positiven Effekt auf den Druckverlust. Für weitere Kühlkörperoptimierungen wurden mehrere Untersuchungen zu Kühlkörperstrukturen unternommen, welche mit Hinblick auf die Wärmeübertragereffizienz und den Druckverlust verglichen wurden. Es wurden im Rahmen einer Voruntersuchung simplifizierte Kühlkörperstrukturen mit den vergleichbaren, äußereren Geometrien erstellt und hinsichtlich ihrer Wärmeübertragungseffizienz und dem resultierenden Druckverlust untersucht, siehe Abbildung 17.

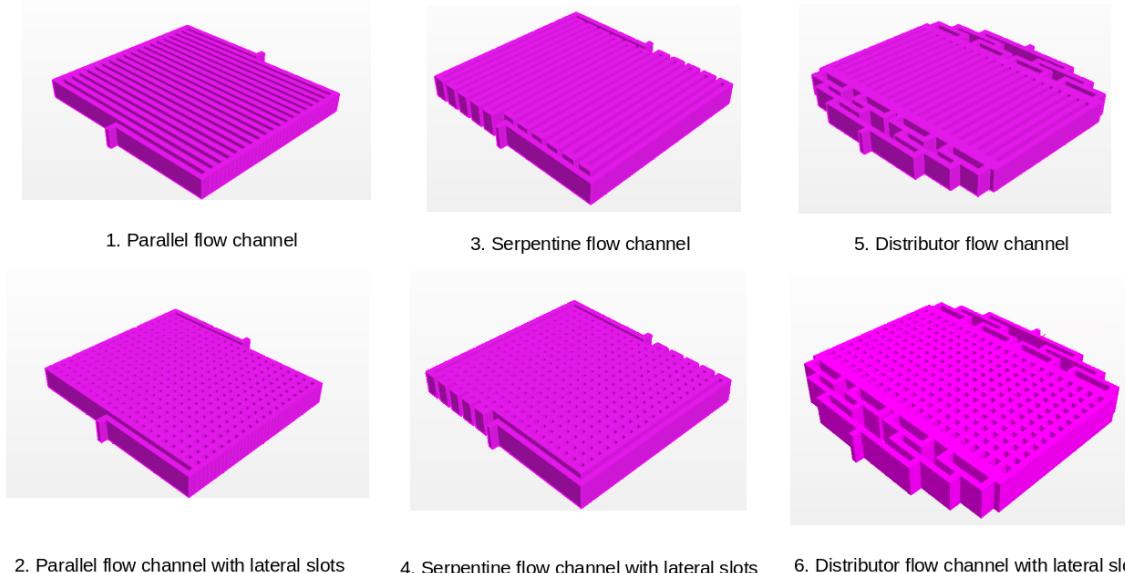


Abbildung 17: Voruntersuchungen zu Kühlkörperdesigns: 1) Parallelle Struktur 2) Parallelle Struktur mit lateraler Durchgängigkeit 3) Serpentinenstruktur 4) Serpentinenstruktur mit lateraler Durchgängigkeit 5) Parallelstruktur mit Vorverteilung 6) Parallelstruktur mit Vorverteilung und lateraler Durchgängigkeit.

Vielversprechend waren die Modelle mit lateraler Durchgängigkeit, da diese aufgrund erhöhter Wärmeübertragungsfläche bei vergleichbarem Druckverlust eine verbesserte Wärmeübertragereffizienz aufweisen. Zudem wurde bei den Untersuchungen die ökonomische Effizienz mit betrachtet, was sich in diesem Fall in der Herstellbarkeit im 3D-Druckverfahren, sowie der zeiteffizienten Anpassung der Geometrie/Struktur auf eine variable Kühlkörperaußengeometrie widerspiegelt. Lösungen, die beispielsweise komplizierte Designs mit bionischen Ansätzen verfolgen, wurden aufgrund der Notwendigkeit einer Entwicklung von aufwendigen Tools zur Berechnung und Übertragbarkeit der Strukturen bei vergleichsweise geringerer, potenzieller Effizienzverbesserung verworfen.

Für eine neue Studie wurde der Ansatz mit lateralen Design auf das Referenzdesign in zwei Formen angepasst und verglichen, siehe Abbildung 18. Durch diese Anpassung entsteht eine Nadelstruktur (engl.: Pins). Es wurden ein Modell mit rechtwinkligen Pins und ein Modell mit kreisförmigen Pins untersucht. Alle charakteristischen Geometrien, wie beispielsweise die Kanalbreite bzw. Pinbreite, wurden gleich groß gewählt.

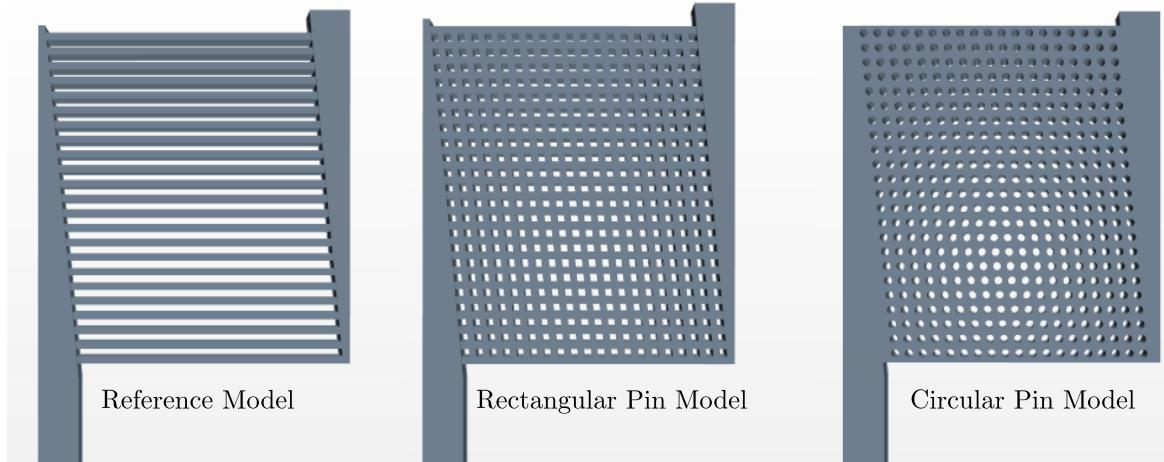


Abbildung 18: Darstellung der Kühlkörpergeometrien. Vergleich des Referenzmodells mit neuem Ansatz.

Die Einlasstemperatur $T_{\text{water,in}} = 53^\circ\text{C}$ für diese Studie ist derart gewählt, dass der Ethernetchip die kritische Temperatur $T_{\text{case,crit}} = 55^\circ\text{C}$, die am Wärmeverteiler (IHS) ermittelt wird, bei einem Wassermassenstrom des Kühlmediums von $\dot{m}_{\text{water}} = 4.138 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ und einer Leistungsaufnahme von $P_{\text{el}} = 6.8 \text{ W}$ nicht übersteigt. Für das Kühlkörpermaterial wurde weiterhin eine Kupferlegierung (CuNi2SiCr) mit einem Wärmeleitwert von $\lambda_{\text{CuNi2SiCr}} = 160 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgeführt. Hierbei ist Δp der Druckverlust zwischen Ein- und Auslass, $T_{\text{water,out}}$ ist die Temperatur des Wassers am Austritt und der Mittelwert (mean), das Minimum (min) und das Maximum (max) der Temperaturverteilung T_{case} am IHS.

Tabelle 7: Ergebnis der Vergleichsstudie

Beschreibung	Einheit	Referenzmodell	Rechteckige Pins	Runde Pins
Δp	Pa	660	653	377
$T_{\text{water,out}}$	°C	53.37	53.38	53.40
$T_{\text{case,mean}}$	°C	54.09	54.07	54.19
$T_{\text{case,max}}$	°C	54.31	54.29	54.39
$T_{\text{case,min}}$	°C	53.67	53.67	53.74
$T_{\text{case,crit}} - T_{\text{case,max}}$	°C	0.69	0.71	0.60

Es ist zu erkennen, dass aufgrund der geringen Spreizung der Ein- und Auslasstemperatur keine signifikante Verbesserung der Wärmeübertragereffizienz möglich ist. Jedoch wird sichtbar, dass strömungstechnisch optimierte Geometrien viel Potential zur Druckverlustsenkung bieten, wodurch sich ein um 57% gesenkter Druckverlust zwischen Referenzmodell ($\Delta p = 660 \text{ Pa}$) und Modell mit runden Pins ($\Delta p = 377 \text{ Pa}$) ergibt. Dadurch entsteht eine signifikante Einsparung in der Pumpenleistung, wenn das Design auf mehrere Kühlkörpermodelle angewandt wird. Die Temperaturverteilungen an der Oberfläche des IHS für die Untersuchungsmodelle sind in der Abbildung 19 dargestellt. Insgesamt ist nur eine geringfügige Verkleinerung bzw. Homogenisierung des Hotspots zu erkennen.

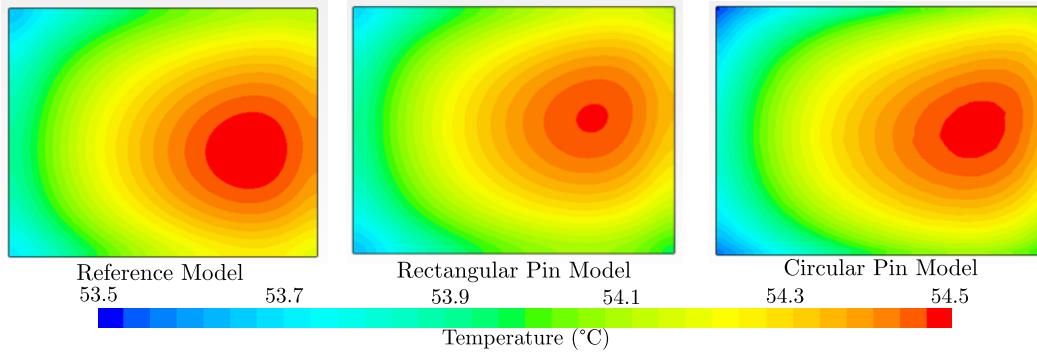


Abbildung 19: CFD-Ergebnisse: Temperaturverteilung am der Oberfläche des Integrated Heat Spreaders für drei untersuchte Modelle.

In Abbildung 20 ist die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeitskomponente u_x des Kühlmediums in einem Schnitt durch die Kanalgeometrie mit jeweils einer Messstelle pro Kanal (22 Kanäle insgesamt) dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass die Pin-Struktur ein homogenes Geschwindigkeitsfeld schafft, was zu einer geringfügigen Verkleinerung des Hotspots führt. Dabei ist auch ersichtlich, dass durch die laterale Verteilung hohe Geschwindigkeiten in den einzelnen Kanälen abgebaut werden. Die deutliche Druckverlustsenkung lässt sich mit der in den Druckverlust eingehenden quadratischen Strömungsgeschwindigkeit erklären. Insgesamt wird durch die abgerundete Geometrie der Pins eine bessere Umströmung durch eine weniger druckverlustbehaftete Umlenkung des Fluids erreicht.

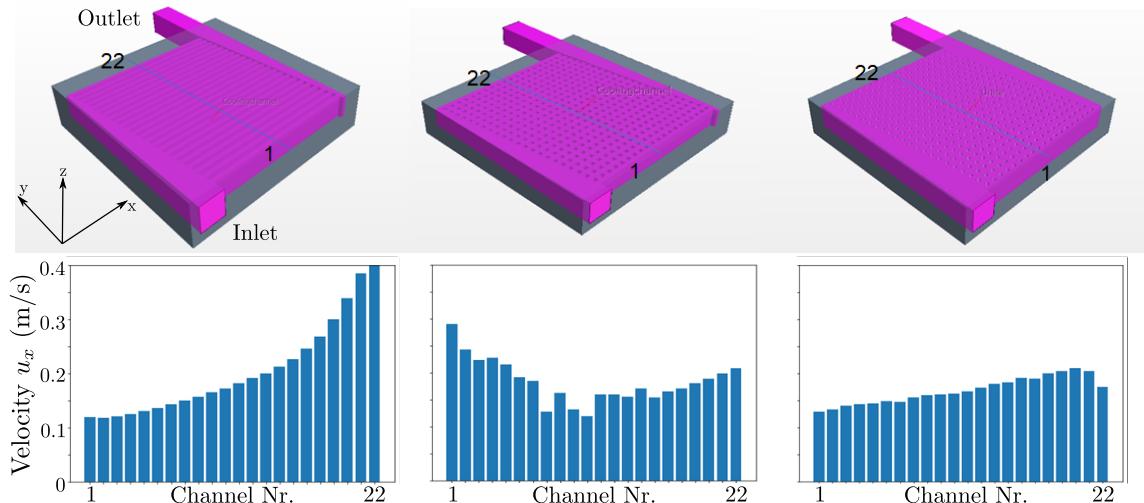


Abbildung 20: CFD-Ergebnisse: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeitskomponente u_x des Kühlmediums im Kanalschnitt für drei untersuchte Kühlkörpermodelle. Eine Messstelle pro Kanal. 22 Messstellen Insgesamt.

Experimentelle Untersuchungen eines Kühlkörpers mit dem Einsatz eines Peltier-Elements

Eine Servereinheit mit dem Einsatz eines Peltier-Elements, das die Wärmeabgabe des Ethernet-Chips optimieren soll, wurde von C&H gebaut. Aufgrund von Materialengpässen erfolgte die Inbetriebnahme im Q3 2021. Erste Messungen wurden im Q4 2021 durchgeführt. Messungen der Gehäusetemperatur des Ethernet-Chip-Kühlkörpers (T_{Geh}) wurden bei zwei verschiedenen Kühlmitteleintrittstemperaturen ($T_{KM,in}$) für vier verschiedene an das Peltier-Element angelegte Spannungswerte (U_{PE}) durchgeführt (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Messungen vom Ethernet-Chip-Kühlkörper mit dem Einsatz eines Peltier-Elements

Experiment 1:		Experiment 2:
	$\bar{T}_{KM,in} = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_{KM,in} = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$
U_{PE}/V	$\bar{T}_{Geh}/^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_{Geh}/^{\circ}\text{C}$
2,7	33	38
2	38	42
1	45	48
0,5	50	53

Aus den Messergebnissen bei $T_{KM,in}$ von $63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lässt sich erkennen, dass der Einsatz von Peltierelementen in Kühlkörpern vielversprechend ist. Bereits bei $0,5 \text{ V}$ (und entsprechendem Strom von $0,18 \text{ A}$) wird die Temperatur des Chips unter dem kritischen Wert von $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten, und das bei einem zusätzlichen energetischen Aufwand von nur weniger als $0,1 \text{ W}$. Da jedoch generische eingebaute Tools zur Belastung des Chips und zur Messung seiner Temperatur verwendet wurden, kann keine genaue Aussage hinsichtlich der tatsächlichen Belastung des Chips, sowie über die genaue Position des Temperatursensors im Ethernet-Chip gemacht werden, was zu möglichen Ungenauigkeiten bei den Temperaturmessungen aufgrund von Wärmeverlusten über die Lötanbringung führt. Darstellungen des inneren Aufbaus der vermessenen Serverprototypen sind den Berichten von Thomas-Krenn zu entnehmen.

II.1.5. AP 4 - Übertragbarkeit, (dc-ce)

Im nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse der Übertragbarkeitsstudien dargestellt.

- Dimensionierung Kühlkörper
- Dimensionierung Gesamtsystem
- Energetische Bewertung Gesamtsystem
- Mess-, Steuer- und Regelungskonzept
- Publikation und Diskussion der Ergebnisse mit der Fachöffentlichkeit

Energetische Bewertung Gesamtsystem 1

Nachdem auf dem von Borderstep organisierten Produkt-Workshop mögliche Anwendungsfälle für das HotFlAd-System beschlossen wurden, sind die ersten Randbedingungen für die Modellierung identifiziert worden. Zunächst wurde eine einfache Energiebilanz erstellt, um die Größenordnung und die wichtigsten Energieflüsse im System zu ermitteln. Eine erste Iteration des in der Programmiersprache Modelica implementierten Modells lieferte vielversprechende Ergebnisse, die auf dem anschließenden, vom HRI organisierten Modell-Workshop diskutiert wurden. In der ersten Feedback-Runde wurden von den Teilnehmern mögliche Entwicklungsrichtungen für das Modell ermittelt. Als geeignete Visualisierungstechnik für die Modellergebnisse wurde ein Sankey-Diagramm gewählt. Obwohl ein voll funktionsfähiges Modell der Testanlage am HRI in Modelica entstand, wurde beschlossen, die Implementierung des kompletten HotFlAd-Systems aufgrund noch unbekannter spezifischer Anforderungen

der potenziellen Betreiber nicht weiter zu verfolgen. Daher soll das Modelica-Modell nur bei besonderem Bedarf an einer hochauflösenden Simulation der Steuerungsstrategien (Beladung des Pufferspeichers, variable Serverlasten) weiterentwickelt werden. Die Werte für die elektrischen Energieverluste wurden für beide Modelle durchaus hoch gewählt, um die in bereits bestehenden Edge-Rechenzentren möglichen Effizienzsteigerungen zu demonstrieren. Die Wahl der angemessenen Verlustannahme stellt eine weitere Herausforderung dar.

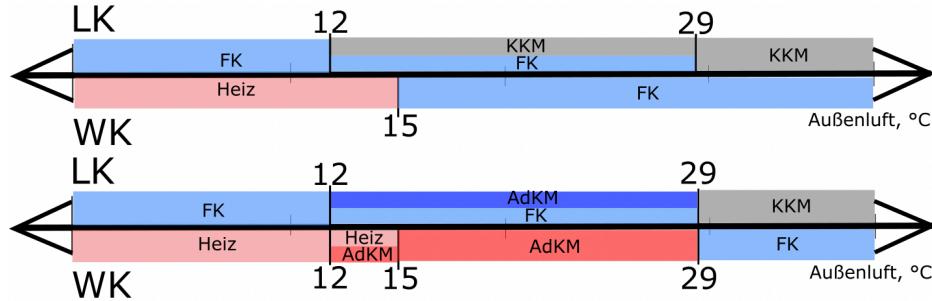


Abbildung 21: Betriebsarten des Referenz- (oben) und HotFlAd-Systems (unten) in Abhängigkeit von T_{AUL} .

In Abbildung 21 steht der obere Teil der Achse in blau (LK steht für Lüftkühlung) für die luftgekühlten Teile und der untere (WK steht für Wasserkühlung) für den wassergekühlten Teil des Systems. Im luftgekühlten Teil wird die Freie Kühlung (FK) von der niedrigsten am jeweiligen Standort auftretenden Temperatur bis einschließlich 12°C angenommen. Ab 12°C bis 30°C setzt dann die Kühlung über die AdKM ein und ab 29°C übernimmt stattdessen die Kompressionskältemaschine (KKM) sowohl für den luftgekühlten (LK-) als auch für den wassergekühlten (WK-) Anteil (beide grau eingefärbt) die Last. Im wassergekühlten Teil der Anlage wird die Wärme bis 12°C ausschließlich zur Raumheizung genutzt. Zwischen 12°C und 15°C wird das heiße Wasser teilweise weiter zu Heizzwecken genutzt, jedoch wird die Kühlung des luftgekühlten Teils des Rechenzentrums und damit die Menge an Warmwasser, die die AdKM zur Erzeugung dieser Kälte benötigt, priorisiert und es findet ein sogenannter Mischbetrieb statt. Ab 15°C AdKM fließt das Warmwasser zur AdKM und zwar so lange, bis die Außenlufttemperatur höher als 29°C ist, dann wird das Warmwasser frei gekühlt.

Zusammengefasst ersetzt der AdKM-Modus im HotFlAd-System den KKM-Modus im Referenzsystem immer dann, wenn die Klimabedingungen dies bei einer vorgegebenen Auslegung des Freikühlsystems ermöglichen.

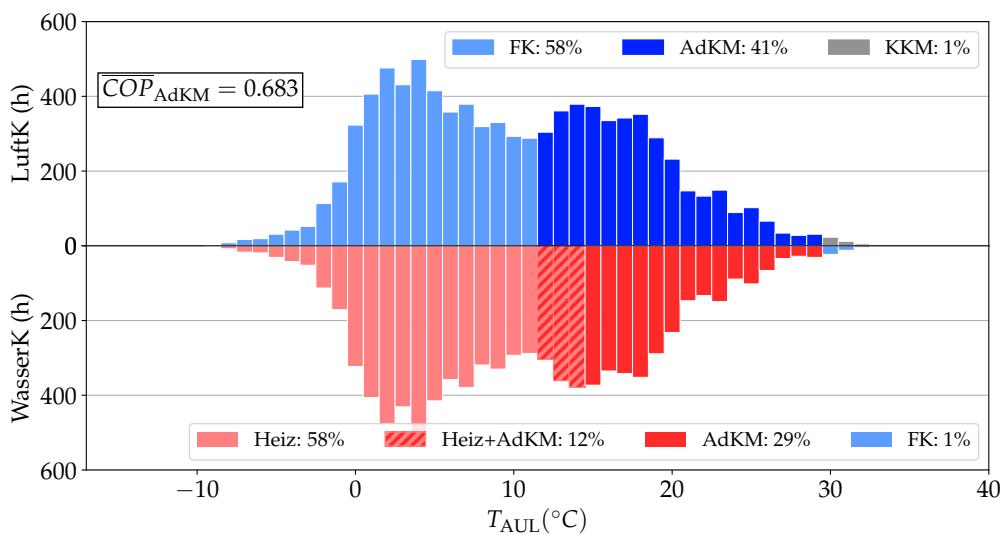


Abbildung 22: Jährliche Temperaturverteilung nach Stunden am Standort Frankfurt am Main.

In Abbildung 22 wurde der COP über eine Polynomfunktion (Koeffizienten sind aus dem AdKM-Datenblatt abgeleitet) berechnet. Die Koeffizienten wurden dann auf die AdKM-Rücklauftemperaturen angewendet. Es ist auffallend, dass es der AdKM im betrachteten Fall gelingt, die KKM fast vollständig zu ersetzen, da letztere nur in 1% der Jahresstunden in Betrieb ist.

Für die Bewertung der entwickelten Modelle wurden drei Kriterien ausgewählt. Dabei handelt es sich um zwei Standard-RZ-Kennzahlen wie *PUE* und *ERE* sowie um eine neu vorgeschlagene Kennzahl für die tatsächliche Menge an Kälte und Wärme, die das System aus der Abwärme erzeugt.

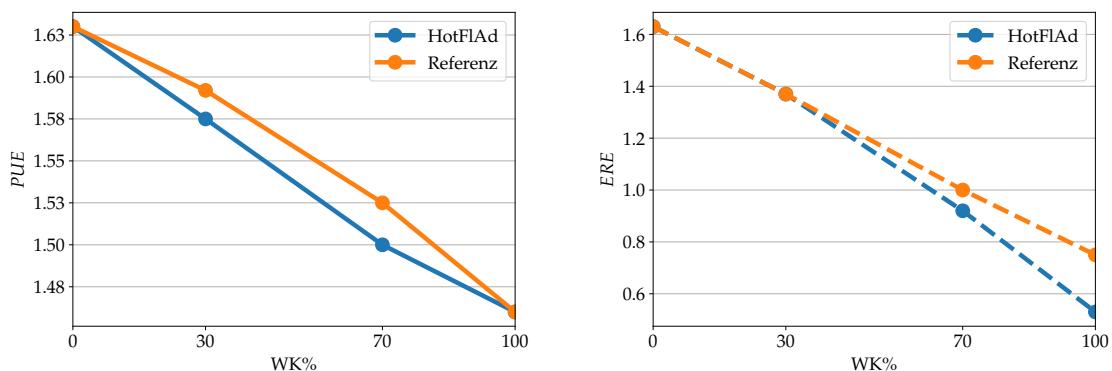


Abbildung 23: Vergleich der Bewertungskriterien: *PUE*- (links) und *ERE*-Werte (rechts) in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekühlten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.

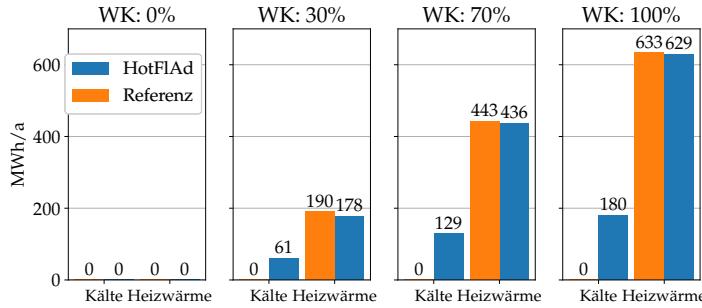


Abbildung 24: Vergleich der Bewertungskriterien: $Q_{\text{Kälte}}$ und $Q_{\text{Heizwärme}}$ in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekühlten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.

Abbildung 24 zeigt die Menge an Kälte und Wärme vom Referenz- bzw. HotFlAd-Modell, die bei der Integration der Warmwasserkühlung in vier verschiedenen Stufen benötigt wird. Hier bezieht sich das Referenz- und HotFlAd-Modell, wie in Abbildung 23, auf die in Abbildung 21 dargestellte Betriebslogik. Da die ERE die Erzeugnisse der Energiewiederverwendung nicht spezifiziert, wurde beschlossen, eine zusätzliche Kennzahl für die tatsächlich erzeugte Kälte und Wärme einzuführen, um die Vorteile des HotFlAd-Systems gegenüber dem Referenzsystem zu demonstrieren, weil Kälte und Wärme in den meisten Fällen nicht den gleichen wirtschaftlichen Wert haben. Damit kann der RZ-Betreiber eine weitere Dimension für den Vergleich zwischen den beiden vorgenannten Systemen erhalten.

Abschließend wurden von den 24 untersuchten Fällen 3 als besonders interessant für eine grobe Wirtschaftlichkeitsanalyse ausgewählt, um die Betriebskostenunterschiede zwischen drei verschiedenen Fällen zu ermitteln. Die durchschnittliche IT-Leistung von 100kW und der Standort Frankfurt am Main ist für alle unten aufgeführten Fälle gleich.

- F1: rein luftgekühltes RZ
- F2: 100% wassergekühltes RZ mit Warmwasser-Kühlung-System
- F3: 100% wassergekühltes RZ mit HotFlAd-System

Als Berechnungsgrundlagen dienten Werte von 21,5 €/kWh für Strom und 6 €/kWh für Wärme. Die Kältereize wiederum wurden vereinfacht als Faktor 1, 1,5 bzw. 2 des Wärmepreises festgelegt (vgl. Abbildung 25).

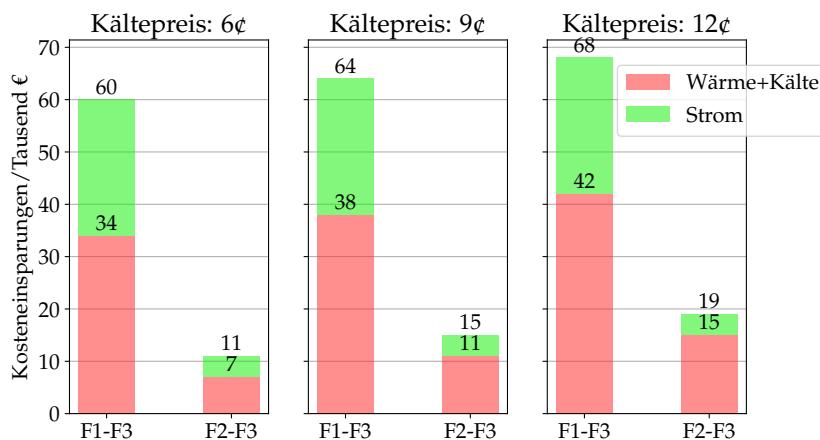
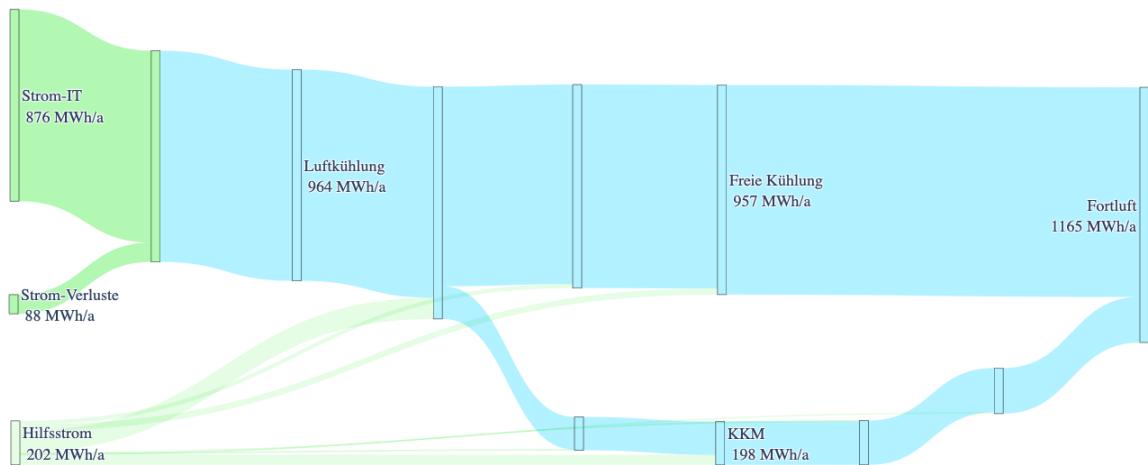


Abbildung 25: Kosteneinsparungen pro Jahr am Standort Frankfurt am Main.

Aus den Grafiken in Abbildung 25 ist ersichtlich, dass ein Rechenzentrum mit 100% Wasserkühlung und installiertem HotFlAd-System im Vergleich zu einem rein luftgekühlten Rechenzentrum erhebliche Kosteneinsparungen von rund 60 Tausend Euro pro Jahr ermöglicht. Auch wenn die Kosteneinsparungen im Vergleich zu einem reinen Warmwasser-Kühlungs-System nicht so signifikant sind wie im Falle eines Übergangs von einem rein luftgekühlten Rechenzentrum, hat ersteres den Vorteil, dass es weniger Kapitalinvestitionen für ein Nachrüsten benötigt. In allen Fällen spielt der Kältepreis eine wichtige Rolle bei der Berechnung der Kosteneinsparungen, daher werden die realistischen Werte dafür und für die Investitionskosten später, nach der Abstimmung mit den Projektpartnern, ermittelt.

Nach mehreren Rücksprachen mit dc-ce und C&H wurden die Parameter der energetischen Jahressimulation feinabgestimmt. Die Ergebnisse der Simulation wurden sowohl für das Referenz-System als auch für das HotFlAd-System mit Sankey-Diagrammen (vgl. Abbildung 26) zur Identifizierung der prominentesten Energieflüsse visualisiert. Hier sind die Abwärmeströme des luftgekühlten Systems in Hellblau und die des wassergekühlten Systems in Rot dargestellt. Elektrische Energieströme und die von der AdKM erzeugte Kälte sind Grün bzw. Lila eingefärbt.

Referenz | Frankfurt am Main | P_{IT} 100kW | Wasserkühlung 0%
 $pPUE_K$ 1,23



HotFlAd | Frankfurt am Main | P_{IT} 100kW | Wasserkühlung 70%
 $pPUE_K$ 1,1 | ERE 0,57

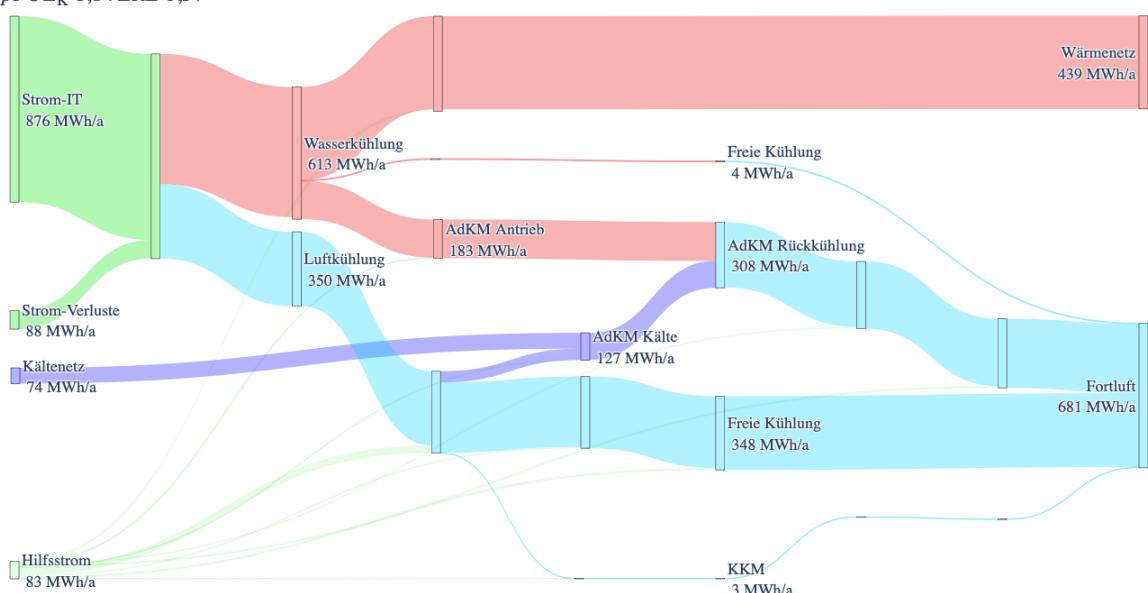


Abbildung 26: Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Frankfurt am Main und die durchschnittliche IT-Leistung $\overline{P_{IT}} = 100$ kW.

Die hervorstehende Erkenntnis ist, dass nur durch die Einführung der Wasserkühlung in den Servern der Bedarf an Kompressionskälte deutlich gesenkt wird, weil die hohe Ausgangstemperaturen des Warmwasser-Kühlsystems über 55°C liegen und selbst im Hochsommer ganzheitlich frei gekühlt werden können. Im Fall von Frankfurt am Main wird die im Jahr benötigte Menge an Kompressionskälte für ein HotFlAd-System im Vergleich zum Referenzsystem um 98,5 % reduziert. Darüber hinaus können über ein Jahr hinweg bis zu 74 MWh Kälte aus dem Rechenzentrum exportiert werden.

Abbildung 29 zeigt den Parameter-Sweep für PUE bzw. ERE in Bezug auf unterschiedliche Anteile von Wasserkühlung (WK) im Rechenzentrum und Referenz- bzw. HotFlAd-Modell.

Das Referenz- und HotFlAd-Modell bezieht sich hier auf die in Abbildung 21 dargestellte Betriebslogik. In der linken Grafik der Abbildung 29 entsprechen die $pPUE_K$ -Werte bei 0% WK dem Referenz-System und die $pPUE_K$ -Werte bei 70% WK dem HotFlAd-System. Das bedeutet, dass wenn die luftgekühlten Server gegen wassergekühlte ausgetauscht und an eine AdKM angeschlossen werden, eine Effizienzsteigerung der Kühlung gegenüber konventionell erzeugter Kälte, um mindestens 122% zu erwarten ist. Potenziell kann dieser Wert auf bis zu 300% steigen, wie im Fall des Standorts Stockholm und der 100%igen Wasserkühlung der IT-Infrastruktur, die nach dem derzeitigen Stand der Technik wirtschaftlich noch nicht realisierbar ist.

Noch deutlicher werden die Vorteile des HotFlAd-Systems in der rechten Grafik der Abbildung 29, wo die ERE -Werte verglichen werden. Im Fall von Frankfurt am Main kann beispielsweise mehr als die Hälfte der im Rechenzentrum eingesetzten elektrischen Leistung wieder verwendet werden. Oder, anders ausgedrückt, ohne Berücksichtigung der Exnergievernichtung werden aus 0,57 kW Strom 1 kW IT-Leistung erzeugt.

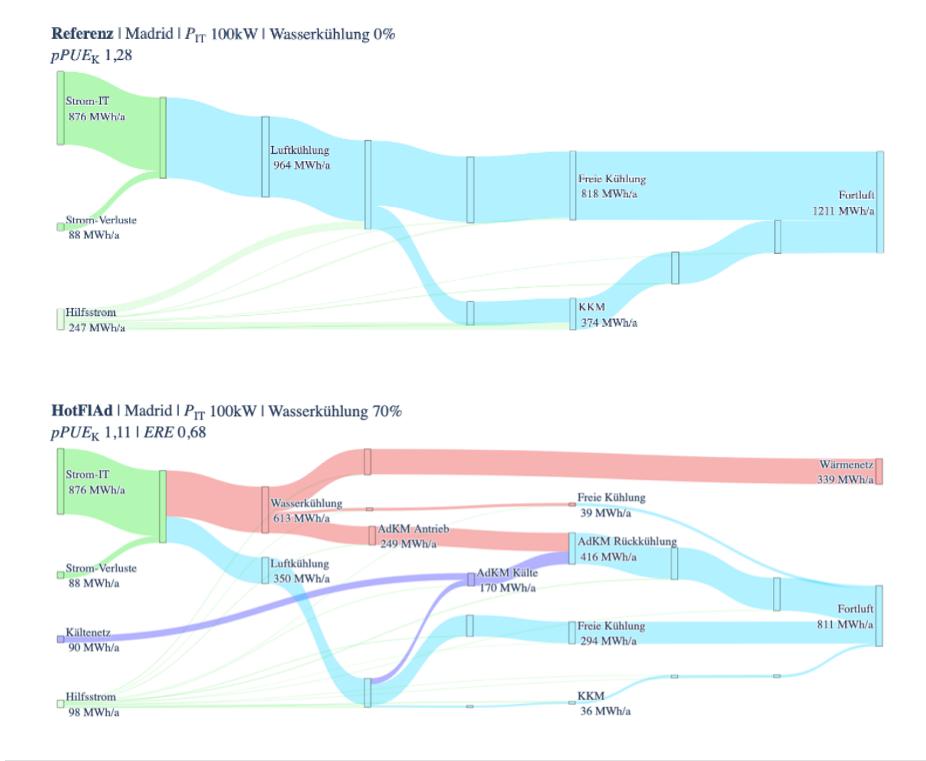


Abbildung 27: Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Madrid und die durchschnittliche IT-Leistung $P_{IT} = 100 \text{ kW}$.

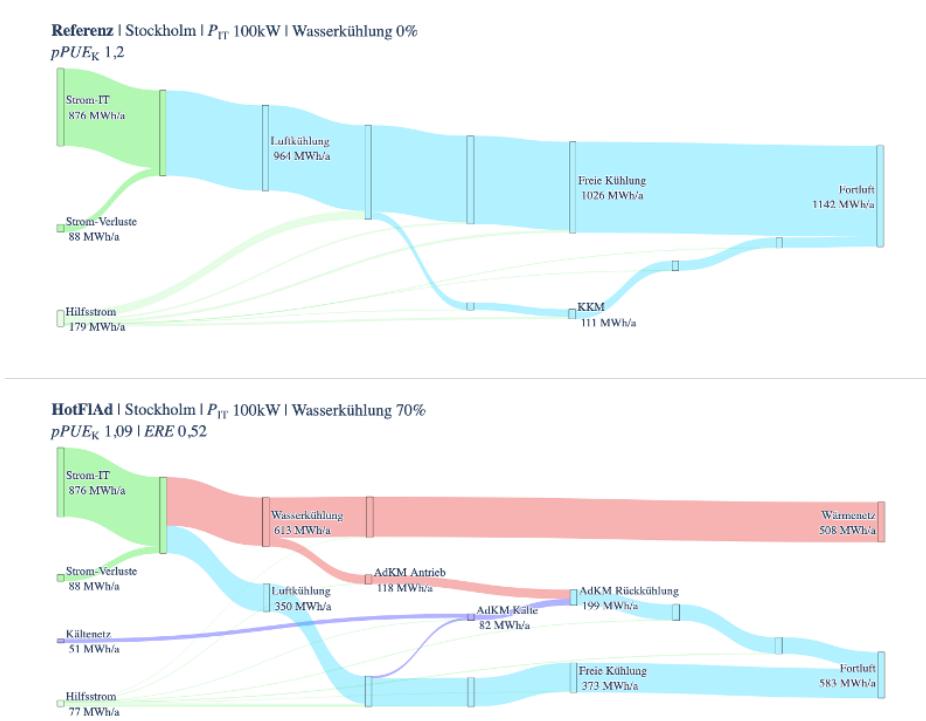


Abbildung 28: Vergleich der Energieflüsse in einem Referenz- und HotFlAd-Modell für den Standort Stockholm und die durchschnittliche IT-Leistung $\overline{P_{IT}} = 100 \text{ kW}$.

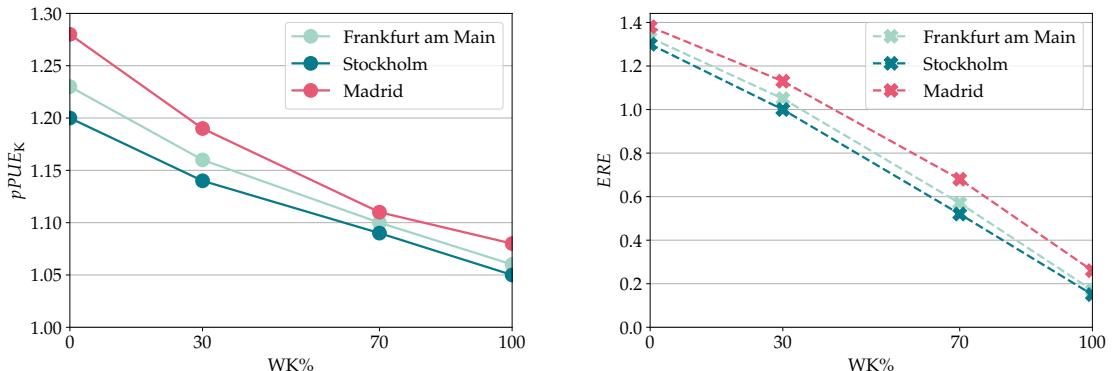


Abbildung 29: Vergleich der Bewertungskriterien: $pPUE_K$ - (links) und ERE-Werte (rechts) in Abhängigkeit vom Anteil der wassergekühlten Server (WK%) am Standort Frankfurt am Main.

Die Simulationsergebnisse bieten eine quantitative Orientierung für das Potenzial der Kombination von Warmwasserkühlung mit einer AdKM. Auch wenn es in wärmeren Klimazonen nicht möglich war, den Kompressionskältebedarf vollständig zu eliminieren, stand durch eine generell höhere Frequenz von Kühlstunden im Jahr mehr Abwärme im Vergleich zu kälteren Klimazonen für die Produktion von Kälte zur Verfügung und bewirkte somit eine bessere Auslastung der AdKM bei ähnlichen Anforderungen des Rechenzentrumsbetreibers. Dies wiederum bietet mehr Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Nutzung der Gesamtanlage.

II.1.6. AP 5 - Feldtest bei Noris, (Noris)

Nach dem Entwerfen des Kompakt-RZ mit HotFlAd-System, Hydraulikkonzept und Auslegung der Komponenten fand Beschaffung und Einbau dieser Komponenten im Feldtest bei

Noris statt. Ferner wurden software- und hardwareseitige Fehler behoben und das System weitestgehend für den stationären, sicheren Betrieb erprobt.

Aufgrund des direkten Zusammenhangs mit den Monitoring- und Betrieboptimierungsaufgaben wird Validierung der Konzepte aus AP 3 und 4 fortan im Abschnitt AP 6 & 7 beschrieben.

II.1.7. AP 6&7 - Energetisches Monitoring und Betrieboptimierung (HRI)

Aufgrund der sich überschneidenden Arbeitsbelastung der AP 6 und 7 werden ihre Inhalte in diesem Kapitel gemeinsam dargestellt.

Das Monitoring-Konzept des HRI zur Betrieboptimierung und energetischen Bewertung des Gesamtsystems sieht vor, basierend auf einem Referenzdesign, fortlaufende Vergleichsmessungen des Gesamtsystems und/oder der Teilsysteme durchzuführen. Dies soll durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) geschehen, siehe Abbildung 30.

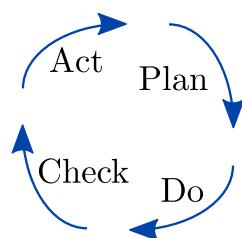


Abbildung 30: Prinzipdarstellung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.

Im Folgenden wird das KVP-Prinzip als mögliche Methodik anhand eines Beispiels vorgestellt:

- (Plan) Maßnahme ausarbeiten, z. B. Einfluss einer neuen Regelstrategie zur Beeinflussung des Temperaturniveaus der Rücklauftemperaturen des Serverkühlkreises.
- (Do) Maßnahme „Regelstrategie Temperaturniveau“ wird implementiert.
- (Check) Standardisiertes Messzenario: Monitoring der Wärmeströme und Leistungsaufnahmen im stationären Betrieb für unterschiedliche Randbedingungen. Auswertung der Gesamtsystemeffizienz und Vergleich mit dem Referenzzustand sowie Bewertung der Teilsysteme (z. B. *COP* der Adsorptionskältemaschine, Risikobewertung für den Betrieb der Server).
- (Act) Design beibehalten, wenn signifikante Verbesserung erkennbar sind, ansonsten rückgängig machen oder Maßnahme variieren.

Nach erfolgreichem Funktionstest wird ein Referenzzustand des Gesamtsystems bestimmt. Dieser wird als Grundlage für alle folgenden Maßnahmen herangezogen. Der Referenzzustand soll anhand diverser Benchmarks evaluiert werden.

Für das energetische Monitoring ist in Abbildung 31 eine vereinfachte Systemskizze des HotFlAd-Systems mit den Wärmeströmen \dot{Q} und elektrischen Leistungen P dargestellt.

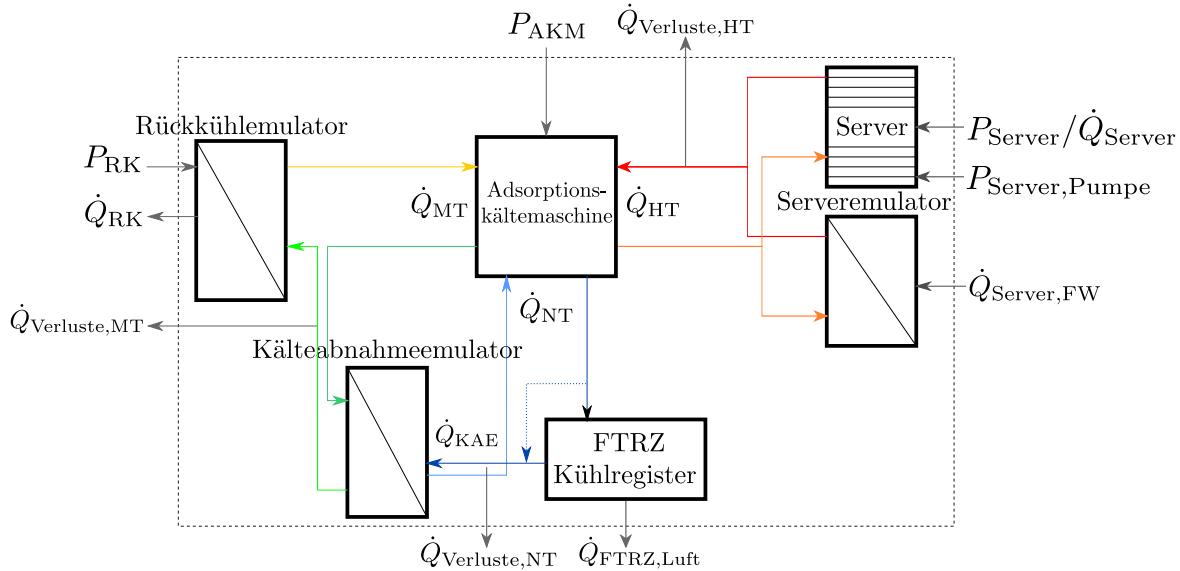


Abbildung 31: Vereinfachte Systemskizze HotFlAd-System am FTRZ mit allen Wärmeströmen.

Das System umfasst die Adsorptionskältemaschine, den HotFluid-Server mit Serveremulator (Wärmeübertrager zum Fernwärmennetz), den Rückkühlemulator (Wärmeübertrager zum Kältenetz), das Kühlregister der FTRZ und einen Kälteabnahmemulator. Die energetische Bewertung verlangt eine grundlegende Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden Leistungen/Wärmeströme über die Systemgrenze. Die thermischen Teilbilanzen der Adsorptionskältemaschine sind wie folgt darstellbar:

$$\dot{Q}_{HT} = \dot{Q}_{Server} + \dot{Q}_{Server,FW} + \dot{Q}_{Verluste,HT}, \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{MT} = \dot{Q}_{RK} + \dot{Q}_{KAE} + \dot{Q}_{Verluste,MT}, \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{NT} = \dot{Q}_{KAE} + \dot{Q}_{FTRZ,Luft} + \dot{Q}_{Verluste,NT}. \quad (5)$$

Hierbei sind \dot{Q}_{HT} der Wärmestrom des Hochtemperaturkreises (HT), \dot{Q}_{MT} der Wärmestrom des Mitteltemperaturkreises (MT), \dot{Q}_{NT} der Wärmestrom des Niedertemperaturkreises (NT), \dot{Q}_{KAE} der Wärmestrom, der über den Wärmeübertrager der Kälteabnahmemulation (KAE) von MT → NT übertragen wird und \dot{Q}_{RK} der Wärmestrom, der über die Rückkühlemulation von MT an die Umgebung (Kältenetz des HRI) abgegeben wird. \dot{Q}_{Server} und $\dot{Q}_{Server,FW}$ sind die Wärmeströme der IT-Seite im FTRZ, wobei die Serveremulation über das Fernwärmennetz (FW) am HRI realisiert wird. Ferner sind $\dot{Q}_{FTRZ,Luft}$ der Wärmestrom an den Außenluftkreis über das Kühlregister im FTRZ und $\dot{Q}_{Verluste}$ die kumulierten Verlustwärmeströme von HT, MT und NT. In den Gleichungen (3), (4) und (5) sind die Vorzeichen der Wärmeströme von den Temperaturunterschieden der einzelnen Kreise und der Umgebungstemperatur ϑ_{amb} abhängig. Die elektrische Gesamtleistungsaufnahme des Systems P_{ges} wird durch

$$P_{ges} = P_{RK} + P_{AKM} + P_{Server,Pumpe} \quad (6)$$

beschrieben, wobei P_{RK} für eine emulierte Rückkühlleistung für die EC-Ventilatoren, P_{AKM} für die elektrische Leistungsaufnahme der Adsorptionskältemaschine und $P_{Server,Pumpe}$ für die Leistungsaufnahme der Pumpe im HotFluid-System stehen. Letztere stellt aufgrund der Serveremulation eine real gemessene und skalierte Leistungsaufnahme der Pumpe dar. Im neu entstehenden HotFlAd-System ist eine Vielzahl an Untersuchungen und Parameterstudien mit Bezug auf die Energieeffizienz des Gesamtsystems geplant. Nach aktuellem Kenntnisstand sind folgende Teilaufgaben zur Erreichung eines realitätsnahen Referenzzustandes zu untersuchen:

- Emulation der HotFluid-Server mit Hilfe des Fernwärmennetzes des HRI. Realistische Abbildung der Serverdynamik über Auslegung einer Regelstrecke und Skalierung der Einflussgrößen.
- Emulierte Größe des Rückkühlers und Einfluss auf gesamte Systemenergieeffizienz. Festlegung auf Referenzrückkühlung bei wirtschaftlicher Betrachtung des Systems.
- Regelung der Massenströme zur Erreichung höherer Rücklauftemperaturen im HotFluid-System. Einhaltung der kritischen Temperaturen der gesamten Hardware.

Eine sinnvolle Bewertung der Teilsysteme und des Gesamtsystems ist notwendig. Hierfür sind übergeordnet folgende Betrachtungen möglich:

- Stationäre Betrachtungen: Energetische Betrachtung des Gesamtsystems und der einzelnen Teilsysteme, z.B. Leistungen und Wärmemengen zur Bewertung eines möglichen Nutzerprofils.
- Instationäre Betrachtungen: Dynamische Betrachtung des Gesamtsystems und der einzelnen Teilsysteme, z.B. Regelwertauslegung, Systemträgheit und Aufdeckung von möglichen Problemen.

Die erste Phase des Monitoring-Konzeptes sieht es vor, diesen in einen stabilen Dauerbetrieb zu bringen und auf mögliche Fehler zu untersuchen. Hierbei wurde in Zusammenarbeit mit TOBOL und Invensor einige Fehlerquellen beseitigt, sodass die AdKM - vom Server-Emulator angetrieben - problemfrei arbeitet. Die PID-Regler der Ventile wurde seitens des HRI durch mehrtägige Tests parametriert, sodass die Referenzmessungen des energetischen Monitorings bei möglichst konstanten und vergleichbaren Randbedingungen stattfinden können, siehe Abbildung 32. Hier sind für den Kältekreis (KK), den Rückkühlkreis (RK) sowie den Antriebskreis (AK) die zu regelnden Eintrittstemperaturen der AdKM nach der Regleroptimierung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen stabil eingeregelt werden, jedoch der Umschaltprozess der AdKM zu kurzfristigen Temperaturspitzen führt, da hierbei die Mischventile der AdKM kurzfristig geschlossen werden. Ein Event-Handling soll nachträglich implementiert werden, um die Reglergüte weiter zu erhöhen. In Abbildung 33 sind die Wärmeströme aller Kreise, der *COP* der AdKM und der mittlere *COP* über eine einstündige Messung dargestellt. Der mittlere *COP* über die gesamte Messung liegt bei $COP = 0.87$ für eine konstante Zulauftemperatur des Antriebskreises von $\vartheta_{AK,sup} = 55^\circ\text{C}$. Dies entspricht dem maximalen Temperaturniveau, welches mit dem aktuellen Serversystem unter Idealbedingungen erreicht werden kann. Durch Reglereinflüsse, Wärmeverluste und Schwankungseinflüsse der Serverauslastung wird der mittlere *COP* im Betrieb über das Serverrack voraussichtlich geringer sein.

Fortlaufende Messungen und Fehlerbehebungen in der Konfiguration des Informationsschwerpunkts, der Sensorik und im allgemeinen Aufbau wurden sukzessiv umgesetzt. Dies wurde durch wiederholtes Langzeitmonitoring der Messdaten und regelmäßiges Validieren aller Messgrößen erreicht. Dabei konnten sowohl im Betrieblichen als auch auf Sensorebene (Sensoren ergänzt) einige Mängel behoben werden.

Es wurden Untersuchungen zur Messgenauigkeit und Bestimmung des Kälteverhältnisses der Anlage unternommen. Für die Bewertung wurden immer volle Anlagenzyklen der Adsorptionskältemaschine (jeweils eine Be- und Entladung beider Kammern) verwendet. In Abbildung 34 ist der kumulierte *COP* für eine Referenzmessung dargestellt.

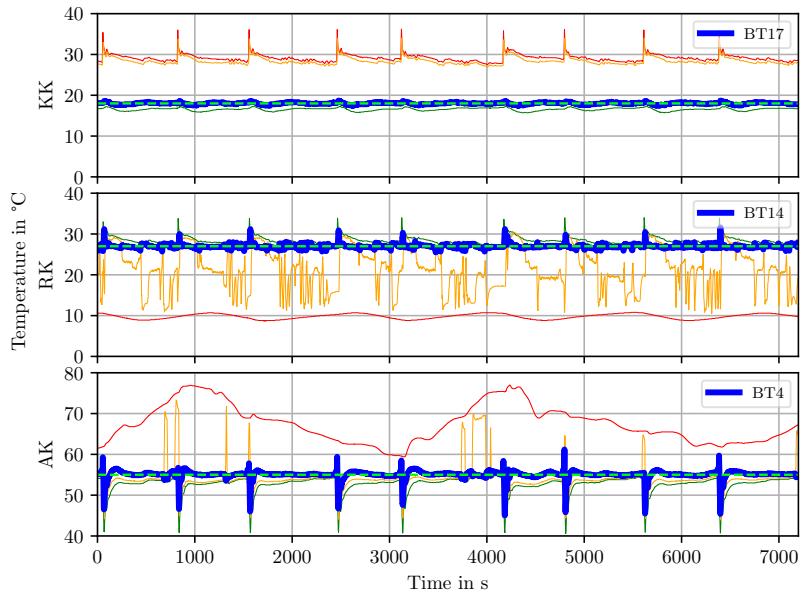


Abbildung 32: Temperaturverläufe des Kältekreises (KK), des Rückkühlkreises (RK) sowie des Antriebskreises (AK) einer zweistündigen Messung. Dargestellt sind die zu regelnden Eingangstemperaturen der AdKM als blaue Linie.

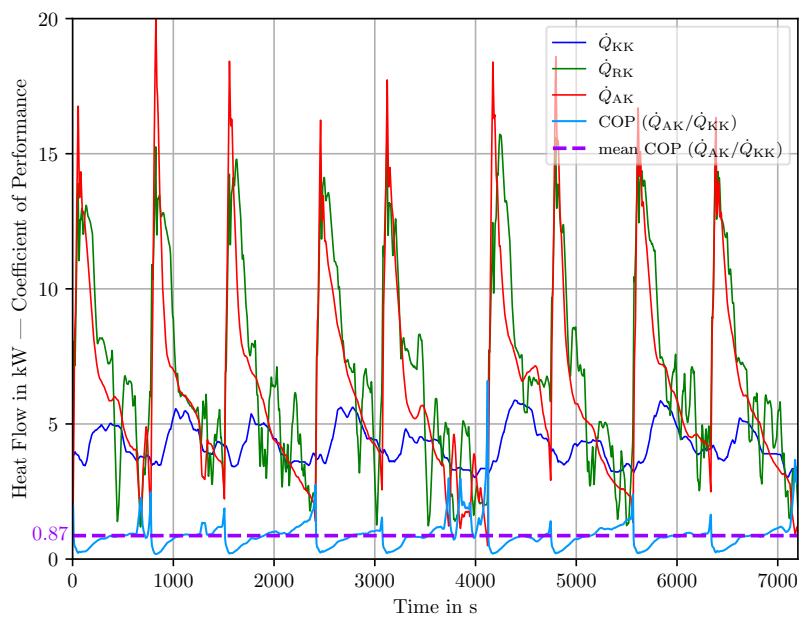


Abbildung 33: Wärmeströme des Kälte-, Rückkühl- und Antriebskreises und *COP* der Adsorptionskältemaschine einer zweistündigen Messung bei einer konstanten Antriebskreistemperatur von $\vartheta_{AK,sup} = 55^\circ C$. Verläufe geglättet.

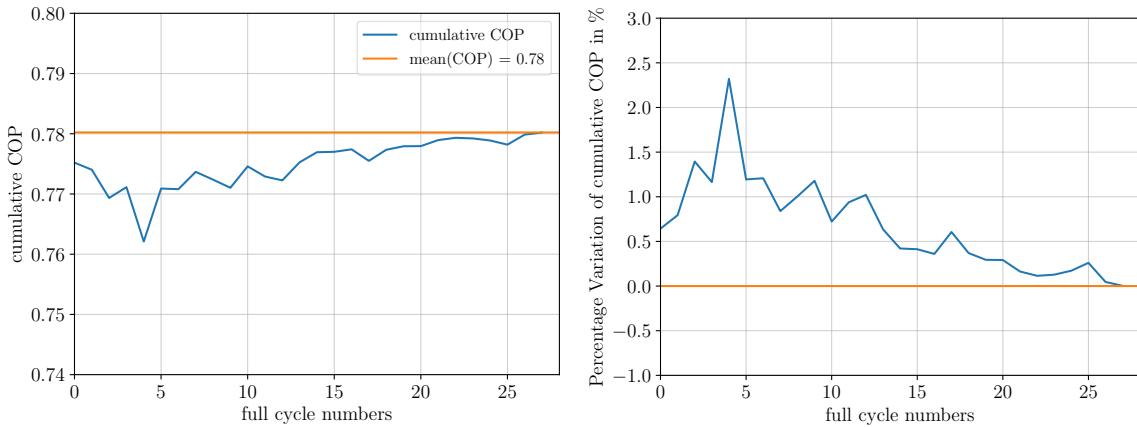


Abbildung 34: Darstellung des kumulierten COP . Ausschnitt der ersten Zyklen bis Erreichung des Mittelwertes.

Dabei liegt die Temperatur am Kältekreiseintritt $\vartheta_{KK,sup} = 18^\circ\text{C}$ und die Temperatur am Rückkühlkreiseintritt $\vartheta_{RK,sup} = 27^\circ\text{C}$ vor. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der Anlagendynamik eine ausreichend große Anzahl an Messzyklen vorgenommen werden muss, um eine hinreichende Genauigkeit des COP 's zu erhalten. Die Anzahl an benötigten Adsorptionszyklen schwankt dabei erfahrungsgemäß mit der Stabilität des quasistationären Systemprozesses, der abhängig von den Eingangstemperaturen zu stärkeren Schwankungen neigt. Die Dauer eines vollen Zykluses liegt dabei zwischen $t_{cycle} = [1200 \text{ s}, 3600 \text{ s}]$. Die Genauigkeit von weniger als 1% Messgenauigkeit bei einer ausreichend hohen Anzahl n_{cycle} an Adsorptionszyklen (im Fall von Abbildung 32 sind es $n_{cycle} > 12$) wird als hinreichend genau betrachtet.

In Abbildung 35 sind die Wärmeleistungen des HotFlAd-Systems für einen zweistündigen Verlauf dargestellt. Die Bilanzsumme aller Wärmeleistungen sollte $\dot{Q}_{sum} = 0 \text{ W}$ sein, beträgt aber 270 W. Sie ist in gleicher Größenordnung bei allen Messungen und weist auf eine systematische, aber kleinen, vertretbaren Fehler hin. Die Adsorptionskältemaschine liefert eine mittlere Kälteleistung von $\bar{\dot{Q}}_{KK} = 4.1 \text{ kW}$ bei einer mittleren Antriebsleistung $\bar{\dot{Q}}_{AK} = 6.5 \text{ kW}$ und einer mittleren Rückkühlleistung von $\bar{\dot{Q}}_{RK} = 10.8 \text{ kW}$.

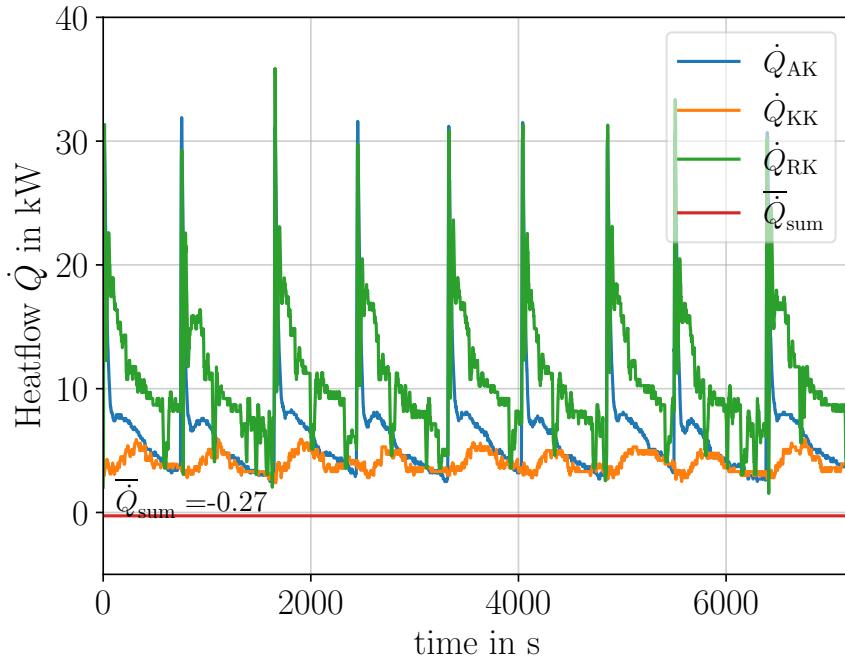


Abbildung 35: Verläufe der Wärmeleistungen mit der Kälteleistung \dot{Q}_{KK} , der Rückkühlleistung \dot{Q}_{RK} , der Antriebsleistung \dot{Q}_{AK} und der mittleren Wärmeleistungsbilanz $\bar{\dot{Q}}_{sum}$. Ausschnitt von 2h.

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurden die Sollwerte an den Positionen der Rückkühl-(SW14) und Kälteeintrittsseite (SW17) der Adsorptionskältemaschine variiert, siehe Abbildung 36. Hierbei wurde untersucht, in welchen Temperaturbereichen die Adsorptionskältemaschine unter einer konstanten Antriebsleistung stabil betreibbar ist. Aus den Untersuchungen wurde ersichtlich, dass Solltemperaturen unter $\vartheta_{KK,SW17} < 18^\circ\text{C}$ (hier nicht dargestellt) zu einem instabilen Betrieb der Adsorptionskältemaschine führen, da die maximale, vorhandene Antriebsleistung nicht ausreicht, um den Betrieb kontinuierlich zu ermöglichen. Für Solltemperaturen $\vartheta_{KK,SW17} \geq 18^\circ\text{C}$, die nach oben hin nur durch die Bedingung $\vartheta_{KK,SW17} \leq \vartheta_{RK,SW14}$ begrenzt sind, wird ein stabiler Betrieb erreicht, wobei der *COP* mit steigendem Temperaturniveau am Rückkühlkreiseintritt kleiner wird. Bei Rückkühlkreisstemperaturen $\vartheta_{RK,SW14} \geq 30^\circ\text{C}$ ist die Rückkühlleistung nicht mehr ausreichend, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten, da der Desorptionsprozess nicht vollständig ablaufen kann. Dadurch wird auch der Adsorptionsprozess eingeschränkt und weniger Wärme wird aufgenommen.

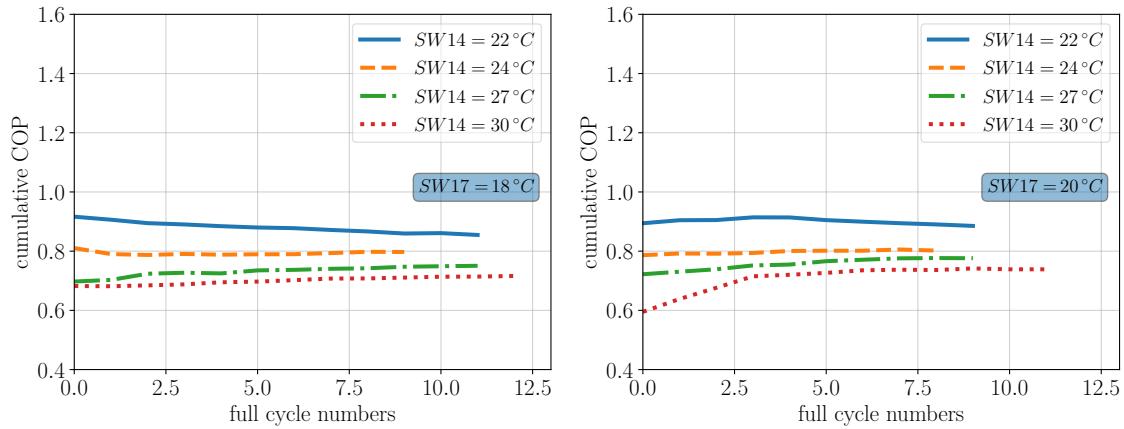


Abbildung 36: Kumulierte COPs für unterschiedliche Solltemperaturen am Rückkühlkreiseintritt bei zwei unterschiedlichen Solltemperaturen am Kältekreiseintritt.

Durch die Parameterstudien wurden Betriebszustände an kritischen Grenzen gefahren. Dies hat aufgezeigt, dass für zukünftige Messungen eine Nachkühlung im Antriebskreis über den Rückkühlkreis realisiert werden muss. Weiterhin wurde in gemeinsamen Rücksprachen mit allen projektbeteiligten Partnern eine Erhöhung der Wärmeleistung im Antriebskreis diskutiert, die auch regelbar sein soll, da die bisherige Regelung der Wärmeleistung im Antriebskreis nur in drei Stufen über eine komplizierte Ansteuerung der Loadbank erfolgt. Zudem wird eine Notfallkühlung für das Serverrack in Betracht gezogen, da während der Parameterstudien Überhitzungsprobleme aufgetreten sind. Nach mehreren Rücksprachen wurde entschieden den Pendelspeicher zu einem Pufferspeicher umzubauen, da die Adsorptionskältemaschine nicht, wie ursprünglich vermutet, auf konstante Volumenströme angewiesen ist. Die damit erzeugte Glättung der dynamischen Rücklauftemperatur im Antriebskreis der AdKM dient zur Stabilität des Prozesses und ermöglicht aufgrund der vorhandenen Wärmekapazität des Volumens im Antriebskreis längere Reaktionszeiten.

Zunächst wurde der Pendelspeicher zu einem Pufferspeicher umgebaut. Die damit erzeugte Glättung der dynamischen Rücklauftemperatur im Antriebskreis der AdKM (vgl. Abbildung 37) diente erwartungsgemäß zur Stabilität des Prozesses.

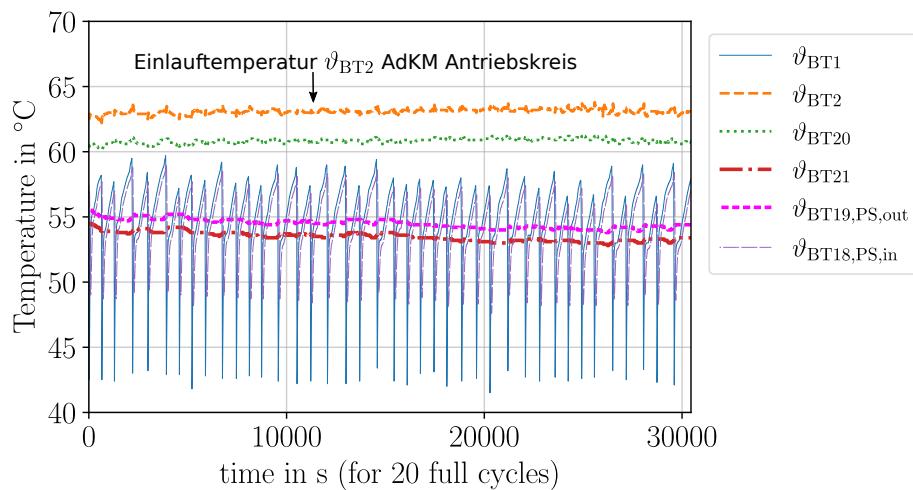


Abbildung 37: Temperaturverläufe im Antriebskreis für eine 72h-Messung. Ausschnitt 20 Zyklen.

Weiterhin wurde der Prüfstand mit einem Notkühlkreis ergänzt, in dem der Rückkühlkreis mit

dem Antriebskreis mit entsprechender Aktorik verbunden wurde. Aufgrund eines instabilen Systemverhaltens wurde jedoch nach mehreren Rücksprachen beschlossen, die Regelstrategie im Notkühlkreis neu zu justieren und das 3-Wege-Ventil durch zwei 2-Wege-Ventile zum Zwecke einer besseren Abdichtung und präzisieren Regelung zu ersetzen. Der zweite Umbau im Notkühlkreis wurde durch die Folgen eines Angriffs auf die IT-Systeme der TU Ende April 2021 erschwert. Der Angriff führte dazu, dass notwendige Materialien nicht beschafft werden konnten und die externen Verbindungen zur Hardware für die Projektpartner gestört war. Der Zeitplan für die Messungen am Prüfstand verzögerte sich erheblich, da nach dem mehrmonatigen Stillstand der AdKM diese nachevakuiert werden musste. Dank des aktiven Engagements von Enicon bei der Nachevakuiierung und der Kollegen vom Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik der TU, die die passende Vakuumpumpe zur Verfügung stellten, konnten die Verzögerungen teilweise aufgeholt werden. Nach mehreren Umbauten an der Versuchsanlage am HRI ist der Druckverlust im Antriebskreis deutlich über die verfügbare externe Förderhöhe der Pumpe in der Adsorptionskältemaschine (AdKM) angestiegen, was wiederum zu geringen Volumenströmen geführt hat. Niedrige Volumenströme (ca. 10 l/min) im Antriebskreis haben aus den folgenden drei Gründen einen negativen Einfluss auf die Effizienz des Systems. Erstens wird der COP der AdKM bei Volumenströmen unter ca. 20 l/min negativ beeinflusst, zweitens wird das volle Potential der Lastbänke nicht ausgeschöpft, da die Wärmeauskopplung aus den Servern durch eine kritische Betriebstemperatur begrenzt ist und drittens beeinflussen höhere Wärmeverluste aus den Leitungen an die Umgebung bei niedrigen Volumenströmen auch die gesamte Energiebilanz. Daher wurde nach einer Rücksprache mit den zuständigen Projektpartnern beschlossen, die Pumpleistung im Antriebskreis durch zwei zusätzliche Pumpen zu erhöhen, da die Bauweise der AdKM einen Austausch der vorhandenen Pumpe nicht zuließ.

Dank der Aufstockung konnte Firma ENICON die AdKM in den Prüfständen am HRI und bei Noris untersuchen und damit zur erfolgreichen Erforschung des Systemverhaltens bei dynamischen Außentemperaturprofilen beitragen. Weiterhin wurden als Maßnahme zur Behebung von geringen Volumenströmen im System zwei zusätzliche drehzahlgeregelte Pumpen im Antriebskreis der AdKM installiert. Der erhöhte Volumenstrom im Antriebskreis ermöglichte eine bessere Wärmeauskopplung aus der Pumpenbox im Serverrack. Auch der von den Volumenströmen abhängiger COP der AdKM hat sich im Vergleich zum Zustand des Prüfstandes vor dem Umbau verbessert.

Die Wetterdaten für die dynamischen Außentemperaturmessungen wurden aus der gleichen Datenbank ausgewählt wie für die energetische Jahressimulation, die im Rahmen von AP 4 beschrieben wurde. Diesmal wurde jedoch ein bestimmter Tag des Jahres ausgewählt, nämlich der Tag 181. Dieser Tag entspricht typischerweise dem letzten Tag im Juni und ist ein guter Repräsentant für die durchschnittlichen hohen Außenlufttemperaturen in den meisten europäischen Klimazonen. Die AdKM wird in diesem Zeitraum hauptsächlich zur Kühlung eingesetzt, wodurch ihr wirtschaftliches Potenzial deutlich wird, und es gibt an diesem Tag keine Hitzewellen in der Datenbank, die die Berechnungen der AdKM-Effizienz verfälschen könnten. Für den Rückkühler wurde ein Temperaturunterschied von 2 Grad angenommen, so dass die tatsächliche Wassertemperatur im Rückkühlkreislauf der AdKM um 2 Grad höher als die Außenlufttemperatur korrigiert wurde. Die Messungen wurden unter einer konstanten Last von Servern und Lastbänken im Rack für dieselben drei Standorte durchgeführt, die zuvor für die Simulation verwendet wurden, nämlich Frankfurt am Main, Stockholm und Madrid.

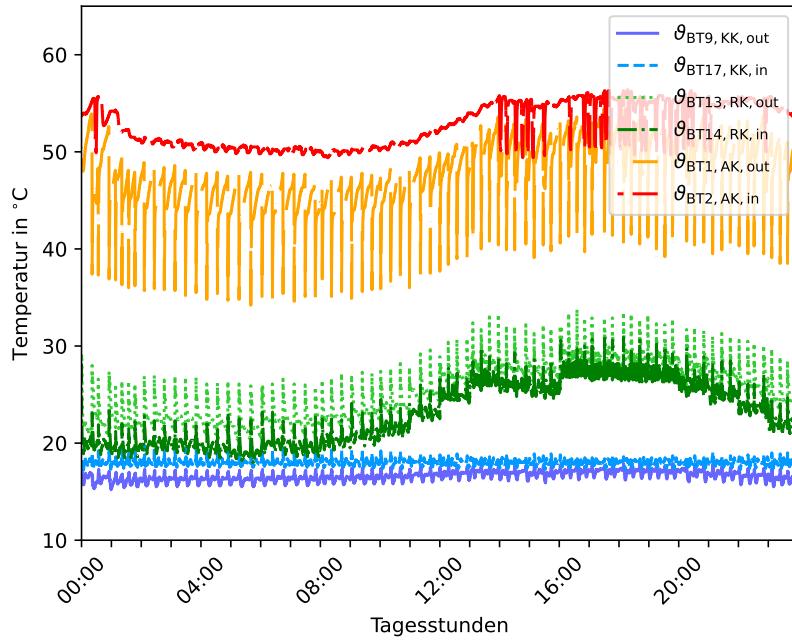


Abbildung 38: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Frankfurt am Main.

In Abbildung 38 sind die Cluster der drei hydraulischen Kreisläufe der AdKM, nämlich Antriebskreis, Rückkühlkreis und Kaltwasserkreis, deutlich sichtbar. Im Antriebskreis stellen die rote Linie und die orangefarbene Linie die Temperatur des Warmwasserein- und -ausgangs der AdKM dar. Im mittleren Cluster, dem Rückkühlkreis, wird die hellgrüne Farbe zur Darstellung des Kühlwassereingangs und die dunkelgrüne zur Darstellung des Ausgangs verwendet. Die niedrigsten und auch stabilsten Temperaturlinien entsprechen den Temperaturen im Kaltwasserkreis. Die blau gefärbte Linie steht nämlich für den Eingang und die lila gefärbte für den Ausgang der AdKM. Die gleiche Farbkodierung gilt für alle weiteren Darstellungen von AdKM-Temperaturprofilen sowohl für Ergebnisse aus dem FTRZ als auch aus dem Feldtest.

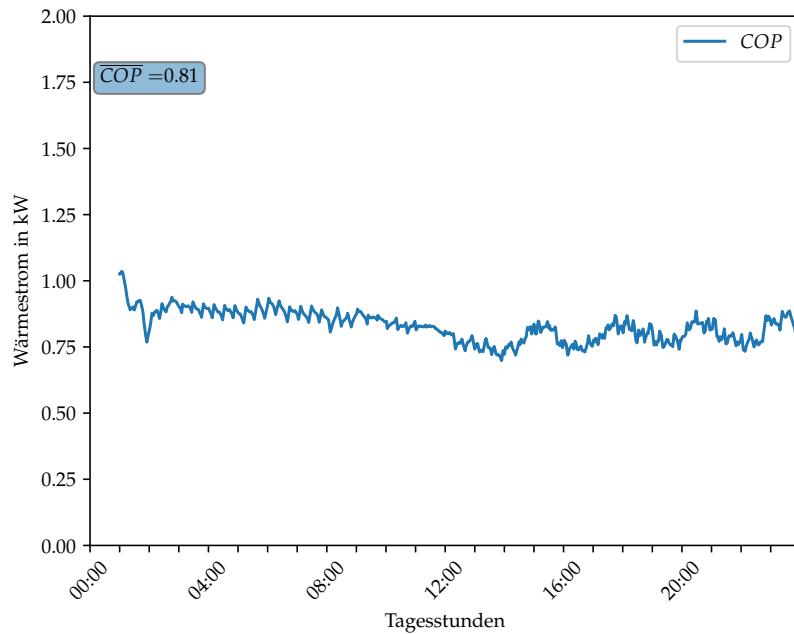


Abbildung 39: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Frankfurt am Main.

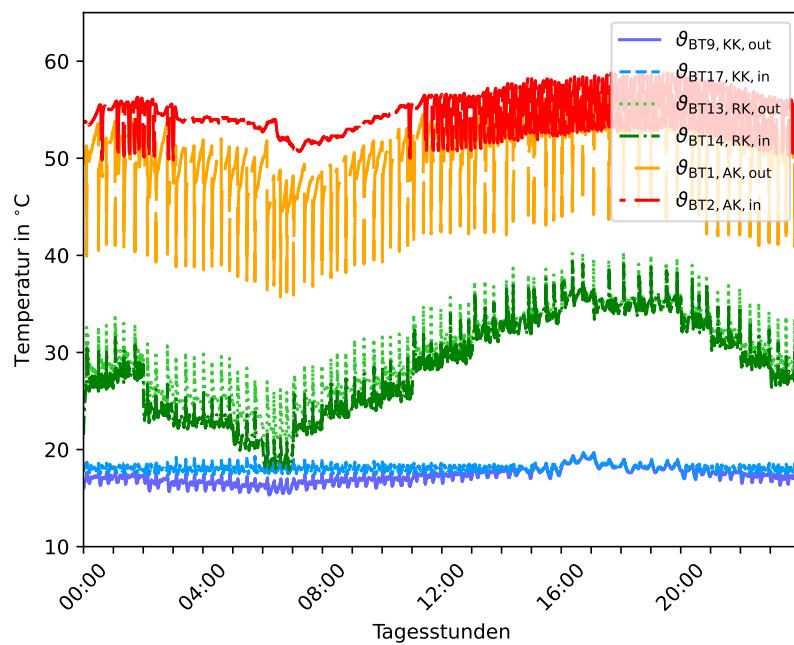


Abbildung 40: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Madrid.

Die sich überschneidenden Profile der Kaltwassertemperaturen in Abbildung 40 sind der Grund für hohe Außenlufttemperaturen und damit Rückkühlungstemperaturen zu dieser Tageszeit in Madrid.

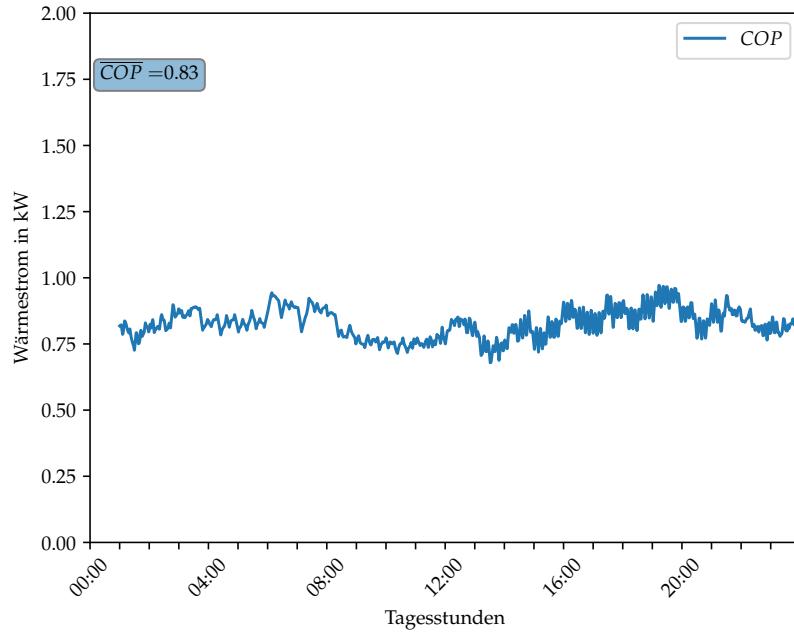


Abbildung 41: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Madrid.

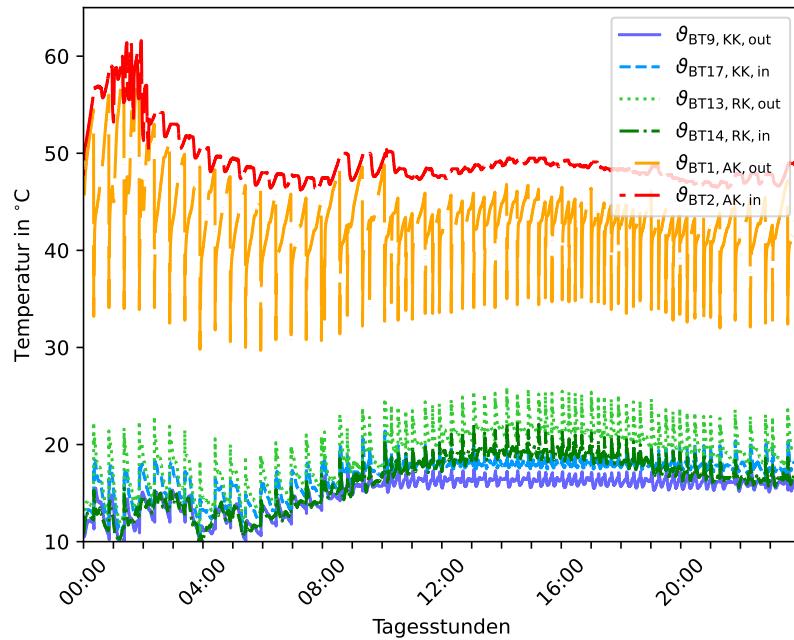


Abbildung 42: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Stockholm.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für Madrid kommt die Kälteproduktion in Stockholm während der Nachtstunden zum Erliegen, da die Außenlufttemperaturen in Stockholm selbst Ende Juni niedriger sind als die Solltemperaturen im Kaltwasserkreis (vgl. Abbildung 42).

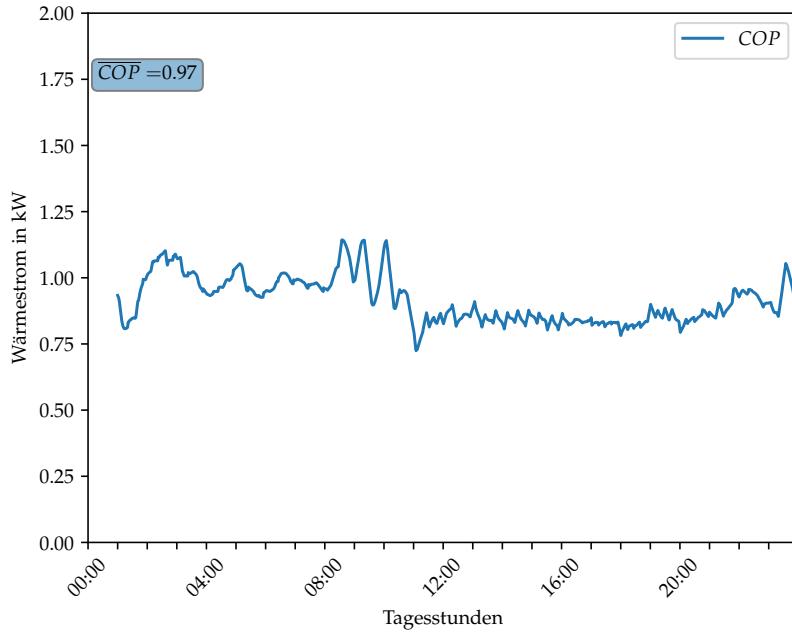


Abbildung 43: Ergebnisse FTRZ: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Stockholm.

Feldtest

Nach der erfolgreichen Entwicklung und dem sukzessiven Einsatz des Monitoringsskripts durch HRI am Prüfstand von Noris wurden dank regelmäßiger Rücksprachen mit Noris und kontinuierlicher Unterstützung durch C&H in den Fragen der Infrastruktur die ersten Betriebsoptimierungsmaßnahmen umgesetzt. Zunächst wurde das Takten des AdKM beseitigt. Da der Volumenstrom durch die AdKM anfangs deutlich höher war als durch die Server, führte eine zu starke Durchmischung im Pendelspeicher zu einem regelmäßigen Absinken der Rücklauftemperatur im Antriebskreis der AdKM. Und da die AdKM einen Schwellenwert für eine minimale Rücklauftemperatur in ihrem Antriebskreis hat, schaltete sie regelmäßig ab, was zu einer unregelmäßigen Kälteerzeugung führte, die sich negativ auf die Temperatur des Teils des Rechenzentrums auswirkte, der auf die Adsorptionskühlung angewiesen war. Ein Teil der Lösung war, die Pumpenleistung im Antriebskreis der AdKM um 40% zu reduzieren, was zu einem Leistungsverlust der AdKM von maximal 10% geführt hat. Gleichzeitig wurde beschlossen, eine Rückkühltemperatur von mindestens 24°C statt der ursprünglich festgelegten 22°C zu verwenden, um den Temperaturabfall im Antriebskreis des AdKM weiter zu reduzieren. Als Ergebnis dieser beiden Maßnahmen wurde ein stabiler Betrieb der AdKM mit minimalen Leistungsverlusten erreicht (vgl. Abbildung 44). In dieser Abbildung wird der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom mit \dot{Q}_{RK} und die vom Antriebskreis und Kältekreis aufgenommene Wärme mit \dot{Q}_{AK} bzw. \dot{Q}_{KK} bezeichnet. Der durchschnittliche COP-Wert für diese Messung, die bei $\theta_{AK,in} = 53^\circ\text{C}$ und $\theta_{RK,in} = 27^\circ\text{C}$ durchgeführt wurde, beträgt 0,65 und liegt in dem im Datenblatt des Herstellers angegebenen Bereich. Die $\dot{Q}_{balance}$ weist einen akzeptablen Fehler von 330 W in den Energiebilanzberechnungen auf.

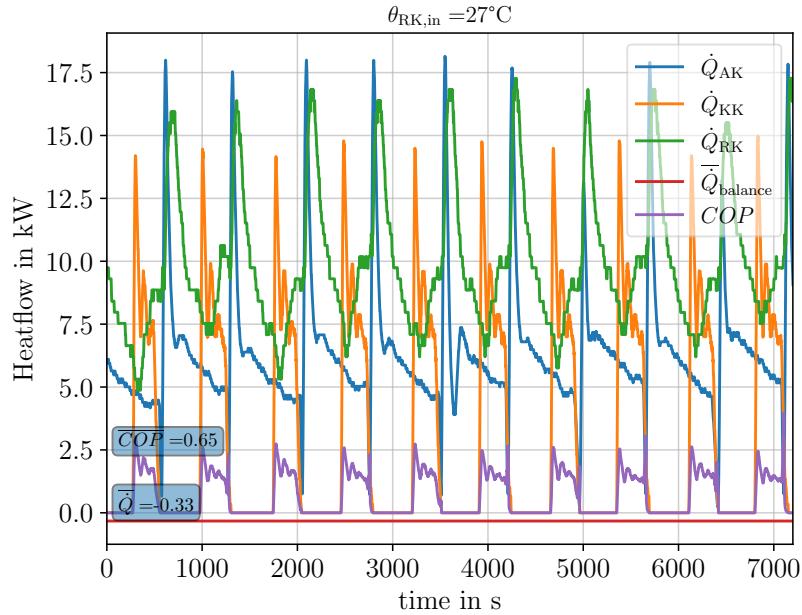


Abbildung 44: Ergebnisse der Umsetzung der ersten Optimierungsmaßnahmen am Prüfstand bei Noris: Das Takten der AdKM wurde beseitigt.

Ein weiterer Aspekt, der während des Monitorings aufgefallen ist, ist die Tatsache, dass der Klimaschrank (KLS) weiterhin getaktet hat, auch nachdem das Takten der AdKM aufgehoben wurde. Der Grund dafür war die im KLS implementierte Regelstrategie, die die Zulufttemperatur zum Rechenzentrum durch zu aggressives Öffnen und Schließen des Kaltwasserventils regelte. Das wiederum führte dazu, dass das Kühlpotenzial des AdKM schnell erschöpft war und das KLS-Ventil irgendwann geschlossen wurde. Dieses Takten des KLS führte zu merklichen Instabilitäten in den Kältekreistemperaturen (vgl. Abbildung 45), was sich erwartungsgemäß negativ auf den COP der AdKM auswirken sollte. In der unteren Grafik von Abbildung 45 sind die Regelsignale für den Lüfter und das Ventil des KLS in Prozenten dargestellt. In der oberen Grafik derselben Abbildung sind $\theta_{KK,out}$ und $\theta_{KK,in}$ in °C angegeben und mit BT9 bzw. BT17 in Bezug auf die Regelgrößen abgebildet.

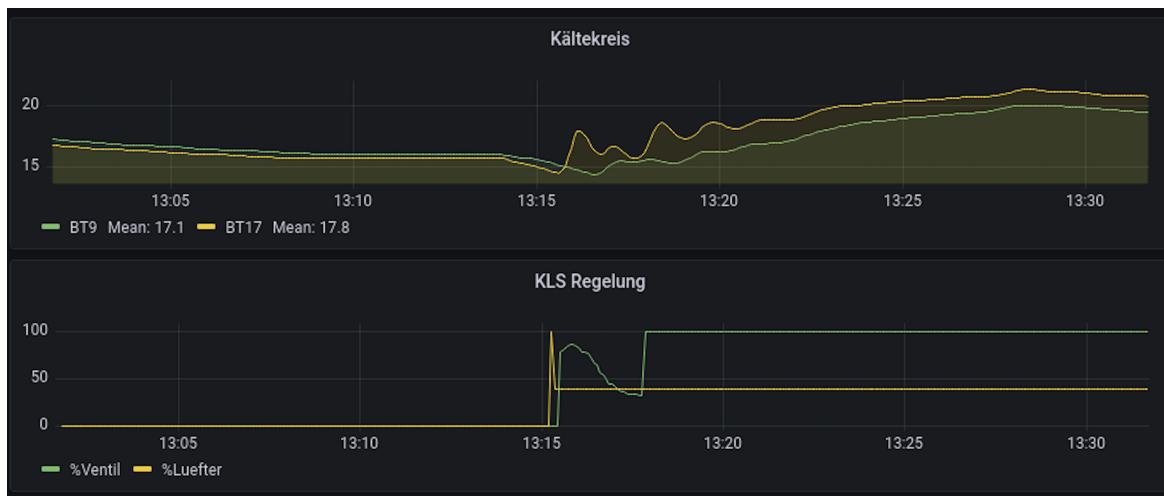


Abbildung 45: Auswirkungen von Takten des KLS (unten) auf die Kältekreistemperaturen der AdKM (oben).

Nach der Beseitigung des Takts des KLS durch Anpassung seiner Regelparameter stellte

sich jedoch heraus, dass entgegen den Erwartungen eine glattere Regelstrategie des KLS den COP der AdKM nicht verbessert. Der Grund dafür liegt darin, dass bei einem stabilen Betrieb der KLS das in die AdKM zurückfließende Kaltwasser im Durchschnitt kälter ist, als bei einem instabilen Betrieb. Und da der COP der AdKM umgekehrt von dieser Temperatur abhängt, heben sich die Vorteile der stabilen Regelstrategie und Nachteile einer niedrigeren Rücklauftemperatur im Kältekreis der AdKM auf.

Am Prüfstand des Feldtests wurde eine Untersuchung mit ähnlichen Randbedingungen durchgeführt, wie sie am Prüfstand des FTRZ vorgenommen wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Bauweise der beiden Prüfstände sind die Ergebnisse ebenfalls unterschiedlich, die allgemeinen Trends scheinen jedoch die gleichen zu sein.

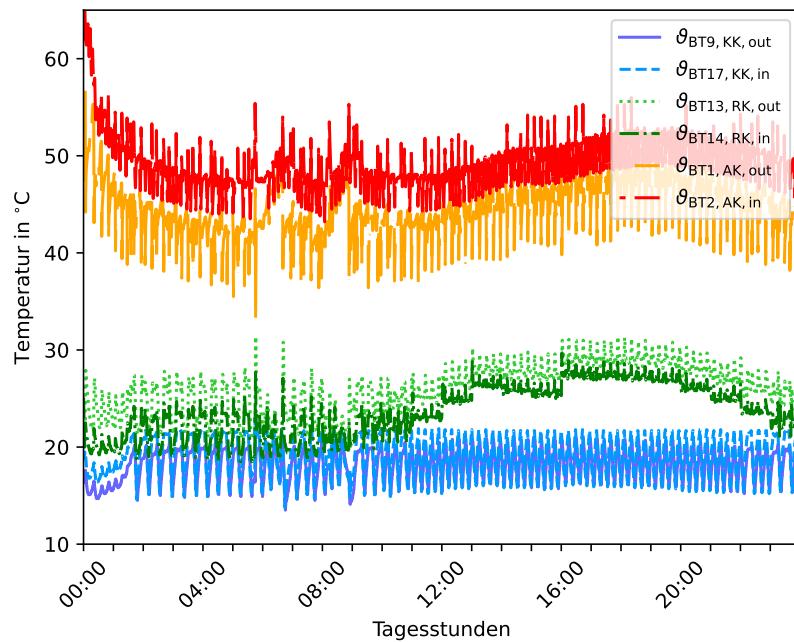


Abbildung 46: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Frankfurt am Main.

Deutlich höhere Amplituden der Temperaturänderung im Kältekreis in den Messergebnissen aus dem Feldtest ergeben sich daraus, dass im Vergleich zu FTRZ dort der Kältekreis an einen Klimaschrank angeschlossen ist. Der Klimaschrank selbst hat eine Hysterese und schließt sein Kaltwasserventil, wenn die Temperatur außerhalb der Arbeitstemperatur liegt, was wiederum zu Diskontinuitäten im Kaltwasserbedarf führt.

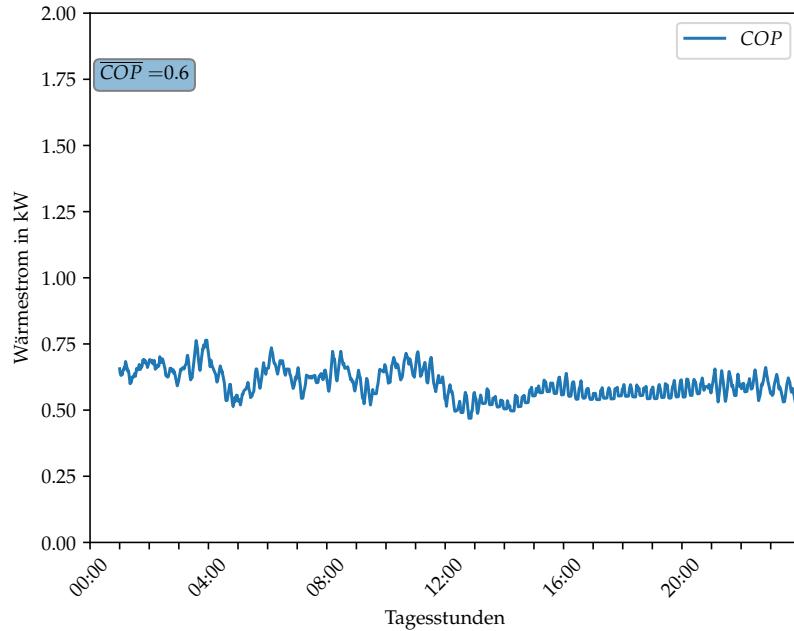


Abbildung 47: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Frankfurt am Main.

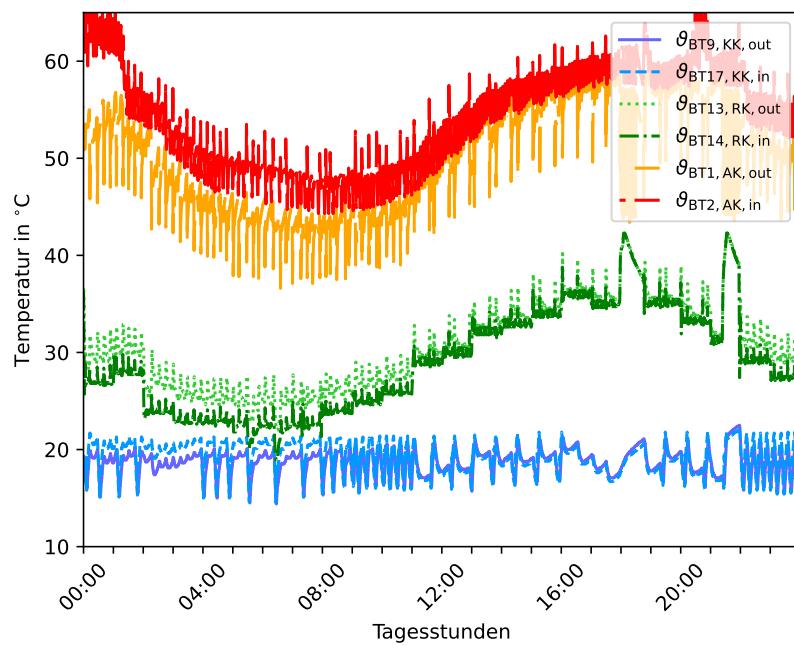


Abbildung 48: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Madrid.

Bei höheren Außentemperaturen wie in Madrid (vgl. Abbildung 48) wurde die Funktion der AdKM wesentlich stärker beeinflusst als in FTRZ. Höhere Außentemperaturen führten zu einem Mangel an Rückkühlung und damit an Kaltwasserproduktion, was einen vollständigen Stopp der Kälteabnahme auslöste, was wiederum die Temperaturen im Rückkühlkreis weiter aus dem Gleichgewicht brachte. All dies führte zu einer anhaltenden Störung des AdKM von 11:00 bis 22:00 Uhr.

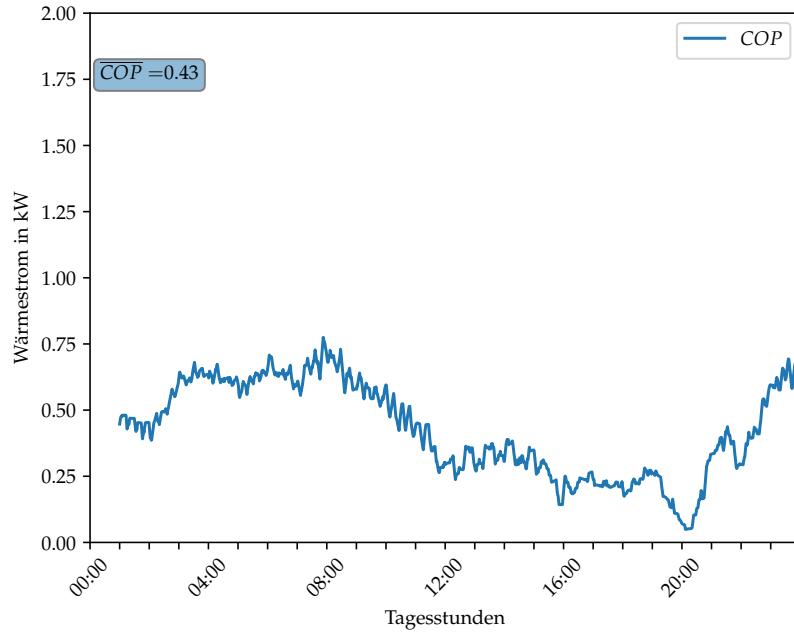


Abbildung 49: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Madrid.

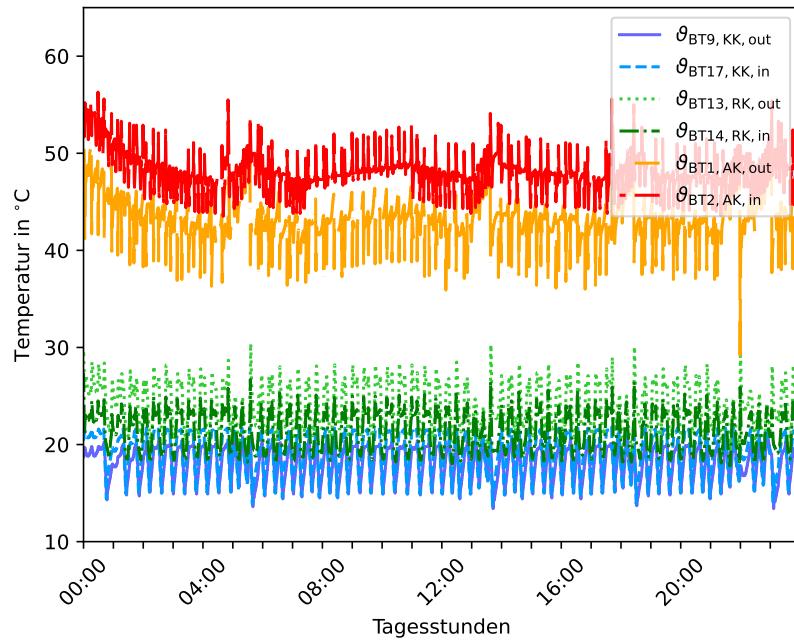


Abbildung 50: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der Wassertemperaturen in der AdKM unter variablen Außenlufttemperaturen am Standort Stockholm.

Die simulierten Rückkühltemperaturen beim Feldtest für den Standort Stockholm konnten aufgrund baulicher Eigenschaften der hydraulischen Kreise nicht so realistisch aus dem Wetterdatenbankprofil nachgebildet werden wie bei den Messungen am FTRZ. Die niedrigsten Rückkühltemperaturen liegen bei dieser Messung knapp unter 20°C (vgl. Abbildung 50), während das Solltemperaturprofil bis auf 10,6°C abfällt.

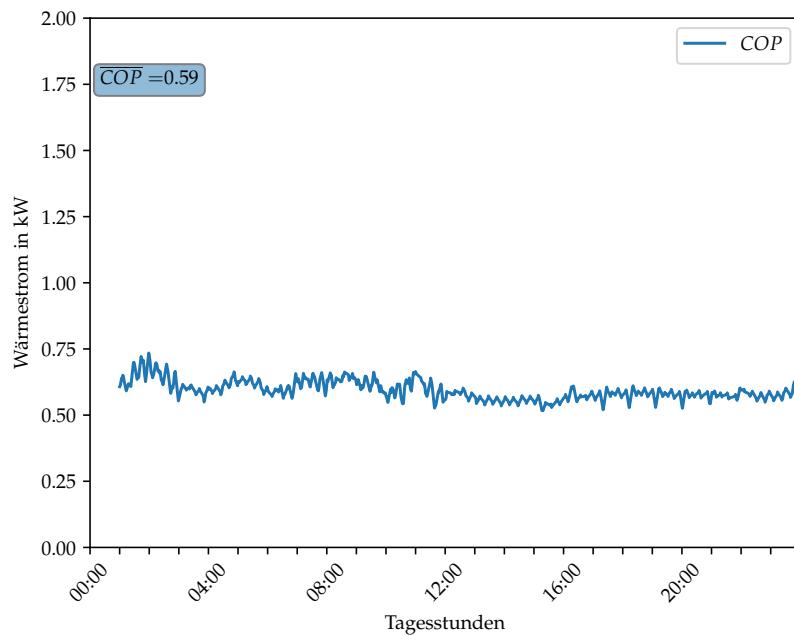


Abbildung 51: Ergebnisse Feldtest: Tagesverlauf der COP-Werte am Standort Stockholm.

II.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine Förderung des Projektes „Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren mit Hot-Fluid-Adsorptionskälte-System (HotFlAd)“ war notwendig und alle Arbeiten waren angemessen, da die Nutzung von Abwärme in Rechenzentren bislang noch enorme ungenutzte Potenziale bietet. Durch dieses gemeinsame Projekt mit mehreren Partnern, die Lösungen für Rechenzentren anbieten sowie dem wissenschaftlichen Partner TU-Berlin und dem RZ- Betreiber Noris Network erzielten wir einen hohen Erkenntnisgewinn, der auf die Industrie der Rechenzentren übertragbar ist. Ein solch detaillierter Labor- und Feldtest der hoch innovativen Anlage sowie die umfangreichen Forschungsarbeiten und Analysen wäre ohne Förderung nicht möglich gewesen. Das Risiko zu den richtigen energieeffizienten Maßnahmen zu gelangen ist dabei immer noch sehr hoch und würde nie in diesem Maßstab ohne Förderung durchgeführt werden können.

II.3. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung der Ergebnisse

Als wissenschaftlicher Projektpartner nutzen Borderstep und die TU Berlin die Projektergebnisse insbesondere in Form von Beiträgen als Publikationen in referierten Journals und auf nationalen und internationalen Konferenzen und Fachveranstaltungen. Im Folgenden werden die für HotFlAd relevanten Fachbeiträge und Veranstaltungsteilnahmen chronologisch dargestellt:

- Simon Hinterholzer, Ralph Hintemann, Stefanie Schramm: Poster zur Idee von HotFlAd auf der ICT for Sustainability (ICT4s 2019) (10.-14.06.2019), Lappeenranta, Finland.
- Ralph Hintemann, Simon Hinterholzer: Konferenz- und Journalbeitrag: Energy Consumption of Data Centers Worldwide – How will the Internet become Green? Vorgestellt auf der ICT4S 2019, Lappeenranta, Finland.
- Simon Hinterholzer als Speaker beim H-CLOUD Summit: Parallel session: Sustainable Cloud for greener Europe am 26.11.2020

- Teilnahme an Podiumsveranstaltung: Wieviele Bits braucht die Energiewende? Gestaltungsoptionen für ein intelligentes, zukunftsfähiges und nachhaltiges Energiesystem am 02.11.2020
- Simon Hinterholzer als Speaker bei dem Panel: "Digital for Planet Webinar - Green Cloud-Edge- IoT Computing Horizon Europe", organisiert von Digital4Planet, am 11. März 2021
- Simon Hinterholzer als Speaker beim CloudFest 2021 –Panel: "What do we need for a sustainable cloud infrastructure?", organisiert vom ECO Internetverband am 24.03.2021
- Simon Hinterholzer als Speaker bei dem "Net Zero & Sustainability European Data Centre Summit", online am 22. April 2021
- Ralph Hintemann und Simon Hinterholzer als Teilnehmer bei dem „Expert methodologicalworkshop on digitalisation, energy and climate change“, organisiert von der ETH-Zürich, Universität von Kalifornien - Santa Barbara, Ericsson, Internationale Energieagentur, 26+27. Mai 2021
- Simon Hinterholzer als Speaker beim Datacenter Expert Summit, Teilnahme am Panel „Keep Cool“ zu innovativen Kühlungstechnologien im Rechenzentrum, organisiert vom ECO- Internetverband, am 8.06.2021
- Simon Hinterholzer als Teilnehmer beim „Carbon-Aware-Computing Workshop“, organisiert von Google, am 16+17. Juni 2021
- Simon Hinterholzer: Teilnahme am Workshop: Workshop - The future of sustainable digital infrastructure: matching data to green electrons, am 18.06.2021
- Simon Hinterholzer als Speaker bei der „Connect University der EU-Kommission“, virtuell am 23. Juni 2021
- Ralph Hintemann und Simon Hinterholzer: Teilnahme am Workshop „Future of DC Energy Analysis“, eingeladen von der Universität von Kalifornien, Santa Barbara (UCSB), Forschungsteam um Prof. Eric Masanet
- Nasir Asadov als Speaker bei der "DKV-Jahrestagung "in Dresden, am 19. November 2021
- Ralph Hintemann, Simon Hinterholzer und Nasir Asadov am Laboraufbau von HotFlAd in der TU-Berlin dem Deutschlandfunk am 24.06.2022 ein Interview zum Thema Abwärmenutzung und zum Ansatz von HotFlAd gegeben. Dieses wurde im Rahmen der Sendung "Wissenschaft im Brennpunkt"(www.deutschlandfunk.de/wissenschaft-im-brennpunkt) veröffentlicht.
- Simon Hinterholzer, Tim Grothey und Nasir Asadov als Speaker bei der "Bits&Bäume"Konferenz in Berlin, am 1. Oktober 2022
- Nasir Asadov als Speaker beim 12. Projektleitungstreffen des Energiewendebauen in Petershagen, am 10. November 2022
- Nasir Asadov als Speaker bei innoXpertise „Abwärmepotential der Rechenzentren nutzen!“ organisiert von BWI GmbH, virtuell am 22. November 2022

II.4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Kombination der Hot-Fluid Technologie mit Adsorptionskältemaschinen in Kompaktrechenzentren stellt ein sehr spezifisches Feld dar. Es sind den Autoren keine Fortschritte bei anderen Stellen in diesem Fachgebiet bekannt.

II.5. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Siehe II.3.

Literatur

- [1] Meyer R. Schmid M. Walther, K. Ermittlung des treibhausgasminderungspotentials—rahmenwerk in der förderlinie eneff.gebäude.2050. Technical report, Energiewende Bauen, 2019.
- [2] Graß M. Hinterholzer S. Grothey T. Hintemann, R. Rechenzentren in deutschland—aktuelle marktentwicklungen. Technical report, Bitcom, 2022. Besucht Juni 2022.
- [3] Leitfaden energieeffizienz im rechenzentrum - 2. auflage. Technical report, Bitkom, 2015.
- [4] Proske M. Schlösser A. Scheiber S. Rohde C. Leimbach T. Stobbe, L. Green it dossier - it2 green. Technical report, 2014. Besucht September 2020.
- [5] N. Ernst. Supermuc am lrz: Europas schnellster computer von innen - golem.de. Technical report, 2012. Besucht Dezember 2020.
- [6] Hintemann R. Energieeffizienz und rechenzentren in deutschland – weltweit führend oder längst abgehängt? - kurzfassung der studie. Technical report, Borderstep Institut, 2017. Besucht November 2019.
- [7] Hintemann R. Proske M. Clausen J. Zedel H. Beucker S. Stobbe, L. Entwicklung des ikt-bedingten strombedarfs in deutschland - studie im auftrag des bundesministeriums für wirtschaft und energie. Technical report, Fraunhofer IZM und Borderstep Institut, 2015. Besucht November 2019.
- [8] Hintemann R. Rechenzentren 2020. cloud computing profitiert von der krise. energiebedarf der rechenzentren steigt trotz corona weiter an. Technical report, Borderstep Institut, 2021. Besucht September 2021.
- [9] Umweltbundesamt. Technical report, 2021. Besucht August 2021.
- [10] Google LLC. Technical report, 2021. Besucht Oktober 2021.
- [11] Deutsche Telekom. Cr-bericht der deutschen telekom 2019. Technical report, 2019. Besucht Januar 2021.
- [12] Vodafone Group Plc. Technical report, 2019. Besucht Januar 2021.
- [13] Olah A. Nebuloni, G. Wachstumsmotor it: So fördern effiziente rechenzentren das unternehmenswachstum. Technical report, Frankfurt: IDC/Rittal, 2014. Besucht März 2020.
- [14] M. Patterson. Ere: A metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center. Technical report, 2010. Besucht Oktober 2020.
- [15] T. Bittmann. Gartner blog network. Technical report, 2017. Besucht April 2019.
- [16] Villars R. Edge it: The engine powering digital transformation. Technical report, IDC, 2017.
- [17] BMWK. Edge-rechenzentren. Technical report, 2021. Besucht Oktober 2021.
- [18] R. Hintemann. Rechenzentren in deutschland: Eine studie zur darstellung der wirtschaftlichen bedeutung und der wettbewerbssituation. Technical report, 2017. Besucht Januar 2018.

- [19] Kälte Klima Aktuell. Technical report, 2021. Besucht Juni 2021.
- [20] Cloud&Heat Technologies GmbH. Technical report, 2019. Besucht Oktober 2021.
- [21] Pigneur Y. Osterwalder, A. Business model canvas. Technical report, 2011.
- [22] Maurya A. The lean canvas. Technical report, 2012.
- [23] Tiemann I. Fichter, K. Das konzept „sustainable business canvas“ zur unterstützung nachhaltigkeitsorientierter geschäftsmodellentwicklung. Technical report, Oldenburg, Berlin: Universität Oldenburg, Borderstep Institut., 2015.
- [24] Ess F. Falkenberg H. Kemmler A. Kirchner A. Kreidelmeyer S. ... Lechtenböhmer S. Dambeck, H. Klimaneutrales deutschland 2045 wie deutschland seine klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Technical report, Berlin: Prognos AG, Öko-Instiut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie, 2021. Besucht April 2022.

Impressum

Herausgeber: Technische Universität Berlin,
Fakultät für Prozesswissenschaften,
Institut für Energietechnik,
Fachgebiet Energie, Komfort & Gesundheit in Gebäuden
Hermann-Rietschel-Institut,
Marchstr. 4, 10587 Berlin,
Verantwortlich: Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel,
Autoren: N. Asadov, S. Brandt, M. Kriegel
Auflage: 1., (2023)