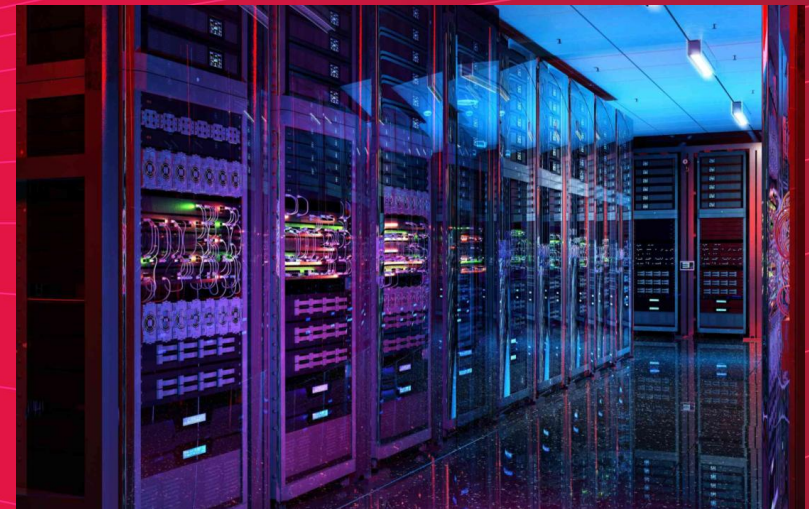




Modellbildung und Simulation der Kühlung eines Rechenzentrums

ThermoSim | September 2026 | Ingo Frohböse





Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

Regleroptimierung

Hybridkühlersimulationen

Zusammenfassung





Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

Regleroptimierung

Hybridkühlersimulation

Zusammenfassung

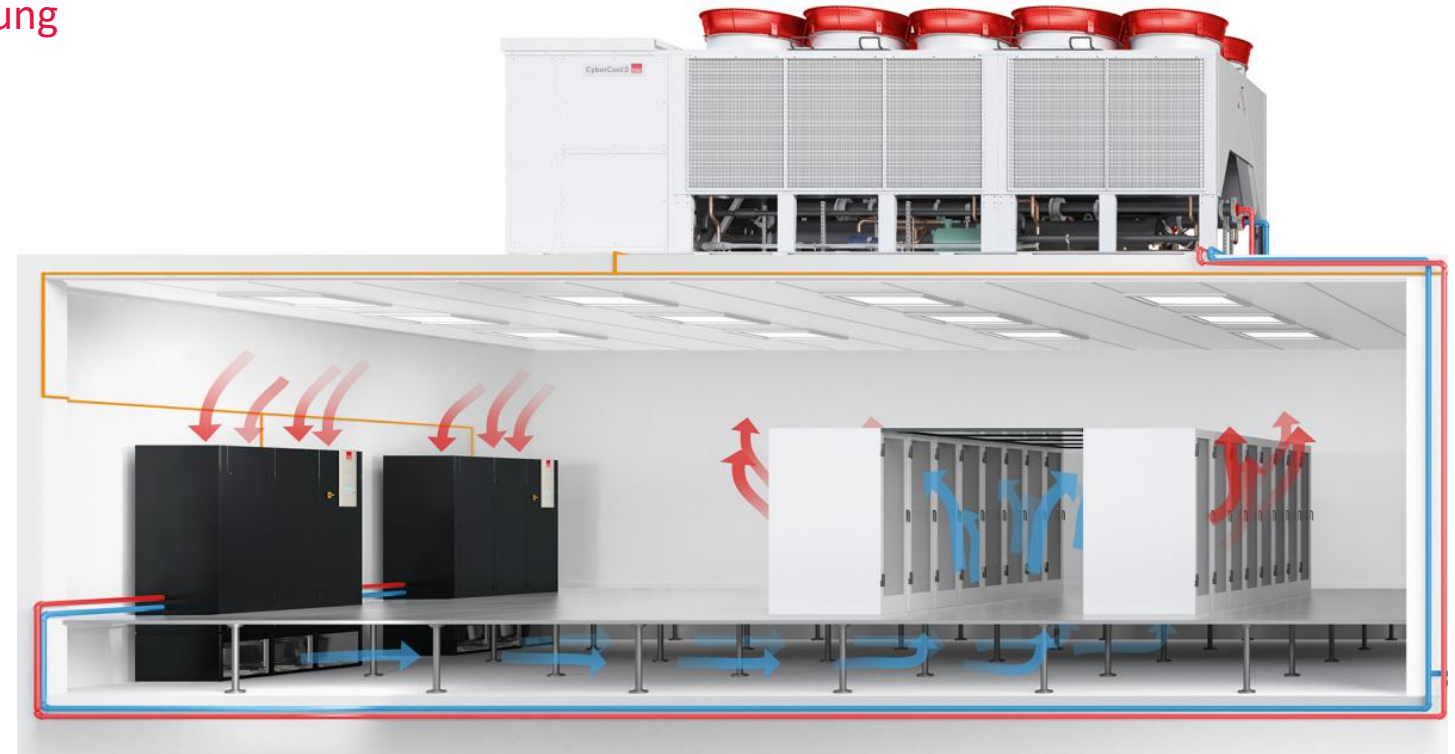


Welche Kühlungsarten gibt es?

- Luftkühlung
 - Computer Room Air Conditioner (CRAC)
Klimaanlage / Kältekreislauf / Direktverdampfung
 - Computer Room Air Handler (CRAH)
Kaltwassersystem mit zentraler Kälteanlage
- Indirekte Flüssigkeitskühlung
Rear Door Heat Exchanger (RDHX)
- Direkte Flüssigkeitskühlung
Coolant Distribution Unit (CDU)
- Direkte zweiphasige Kühlung
- Immersionskühlung

Welche Kühlungsarten gibt es?

- **Luftkühlung**
 - Computer Room Air Conditioner (CRAC)
Klimaanlage / Kältekreislauf / Direktverdampfung
 - Computer Room Air Handler (CRAH)
Kaltwassersystem mit zentraler Kälteanlage
- Indirekte Flüssigkeitskühlung
Rear Door Heat Exchanger (RDHX)
- Direkte Flüssigkeitskühlung
Coolant Distribution Unit (CDU)
- Direkte zweiphasige Kühlung
- Immersionskühlung



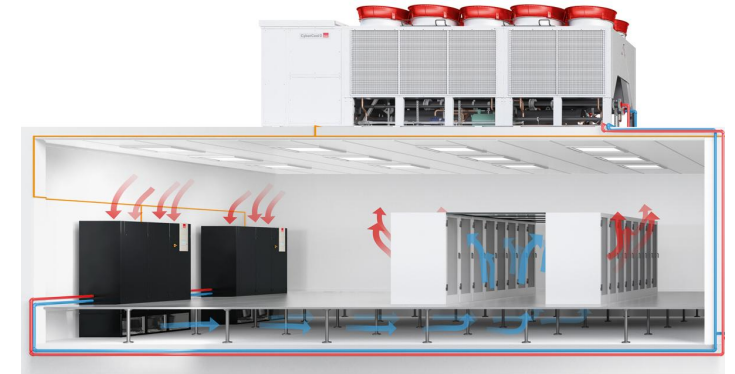
Quelle: KKA-Rek-2024

Welche Kühlungsarten gibt es?

- Luftkühlung
 - Computer Room Air Conditioner (CRAC)
Klimaanlage / Kältekreislauf / Direktverdampfung
 - Computer Room Air Handler (CRAH)
Kaltwassersystem mit zentraler Kälteanlage
- Indirekte Flüssigkeitskühlung
Rear Door Heat Exchanger (RDHX)
- Direkte Flüssigkeitskühlung
Coolant Distribution Unit (CDU)
- Direkte zweiphasige Kühlung
- Immersionskühlung



Quelle: Stulz-2026



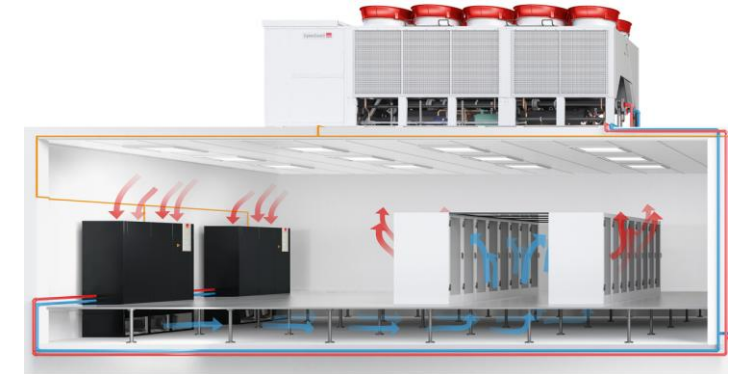
Quelle: KKA-Rek-2024

Welche Kühlungsarten gibt es?

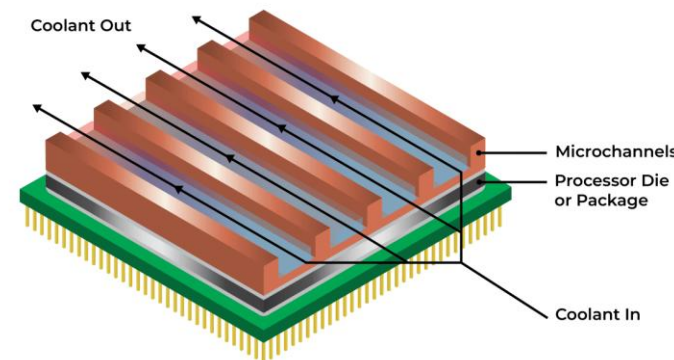
- Luftkühlung
 - Computer Room Air Conditioner (CRAC)
Klimaanlage / Kältekreislauf / Direktverdampfung
 - Computer Room Air Handler (CRAH)
Kaltwassersystem mit zentraler Kälteanlage
- Indirekte Flüssigkeitskühlung
 - Rear Door Heat Exchanger (RDHX)
- Direkte Flüssigkeitskühlung
 - Coolant Distribution Unit (CDU)
- Direkte zweiphasige Kühlung
- Immersionskühlung



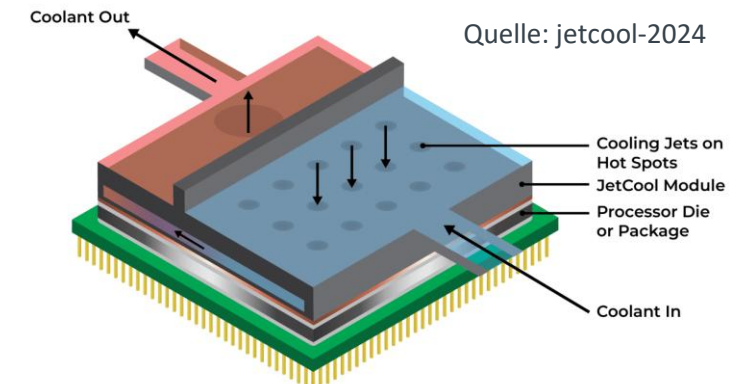
Quelle: Stulz-2026



Quelle: KKA-Rek-2024



Microchannel Cooling Architecture



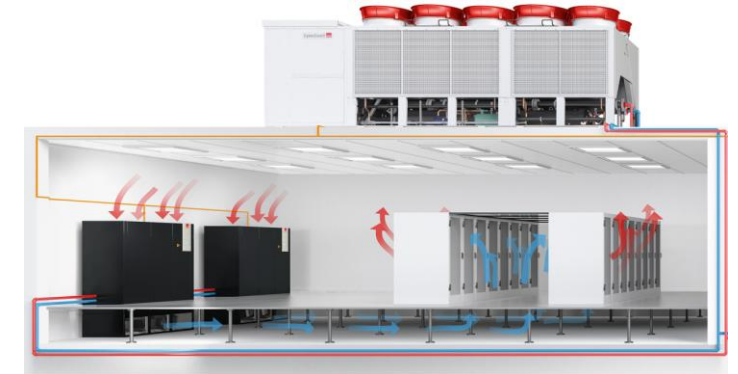
Microconvective Cooling Architecture

Welche Kühlungsarten gibt es?

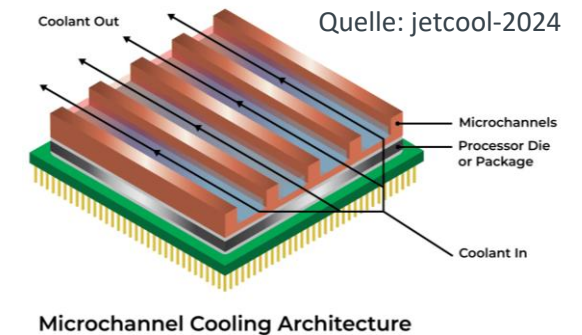
- Luftkühlung
 - Computer Room Air Conditioner (CRAC)
Klimaanlage / Kältekreislauf / Direktverdampfung
 - Computer Room Air Handler (CRAH)
Kaltwassersystem mit zentraler Kälteanlage
- Indirekte Flüssigkeitskühlung
 - Rear Door Heat Exchanger (RDHX)
- Direkte Flüssigkeitskühlung
 - Coolant Distribution Unit (CDU)
- Direkte zweiphasige Kühlung
- Immersionskühlung



Quelle: Stulz-2026



Quelle: KKA-Rek-2024



Quelle: jetcool-2024

Quelle: E-abel-2025



Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

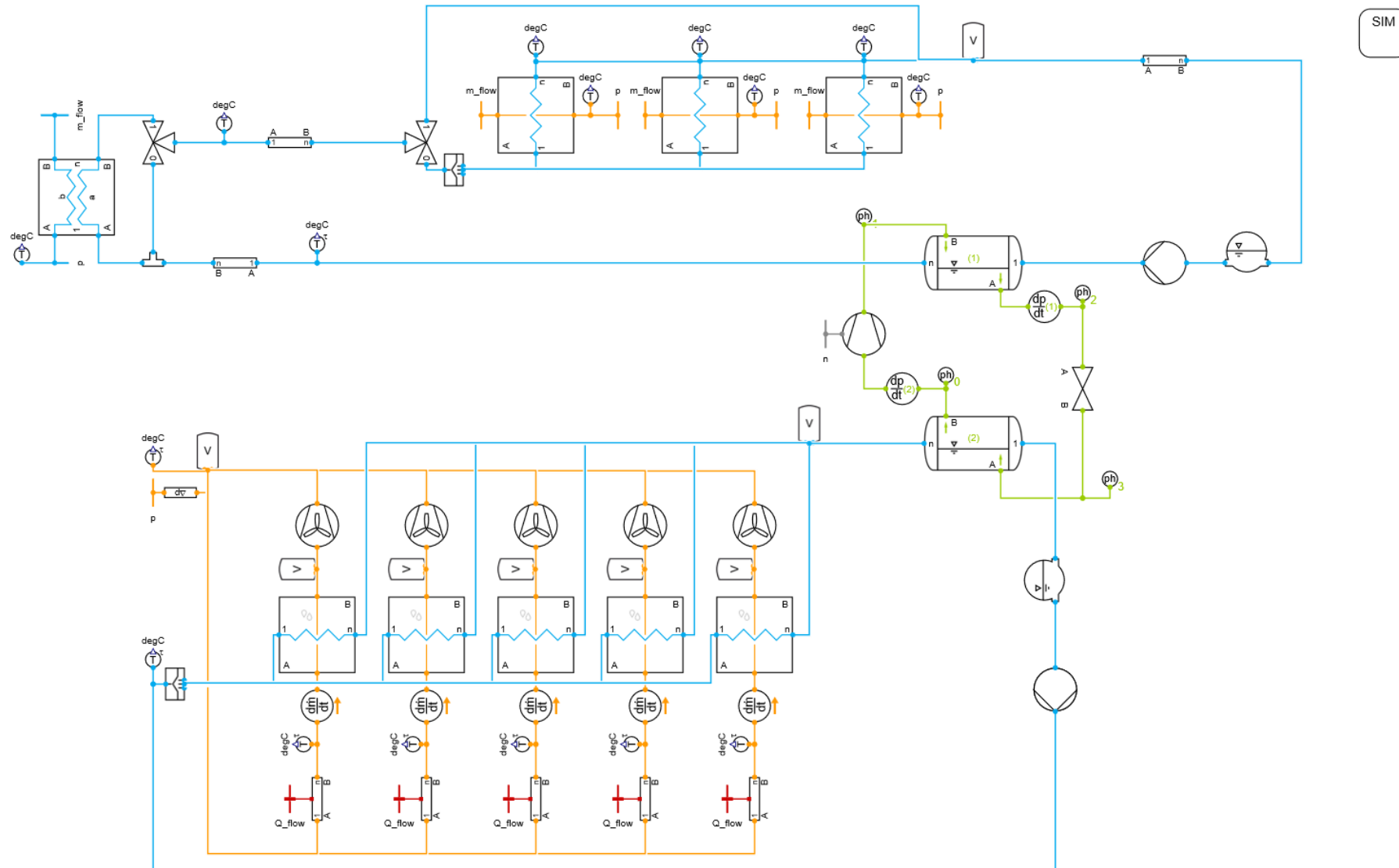
Regleroptimierung

Hybridkühlersimulation

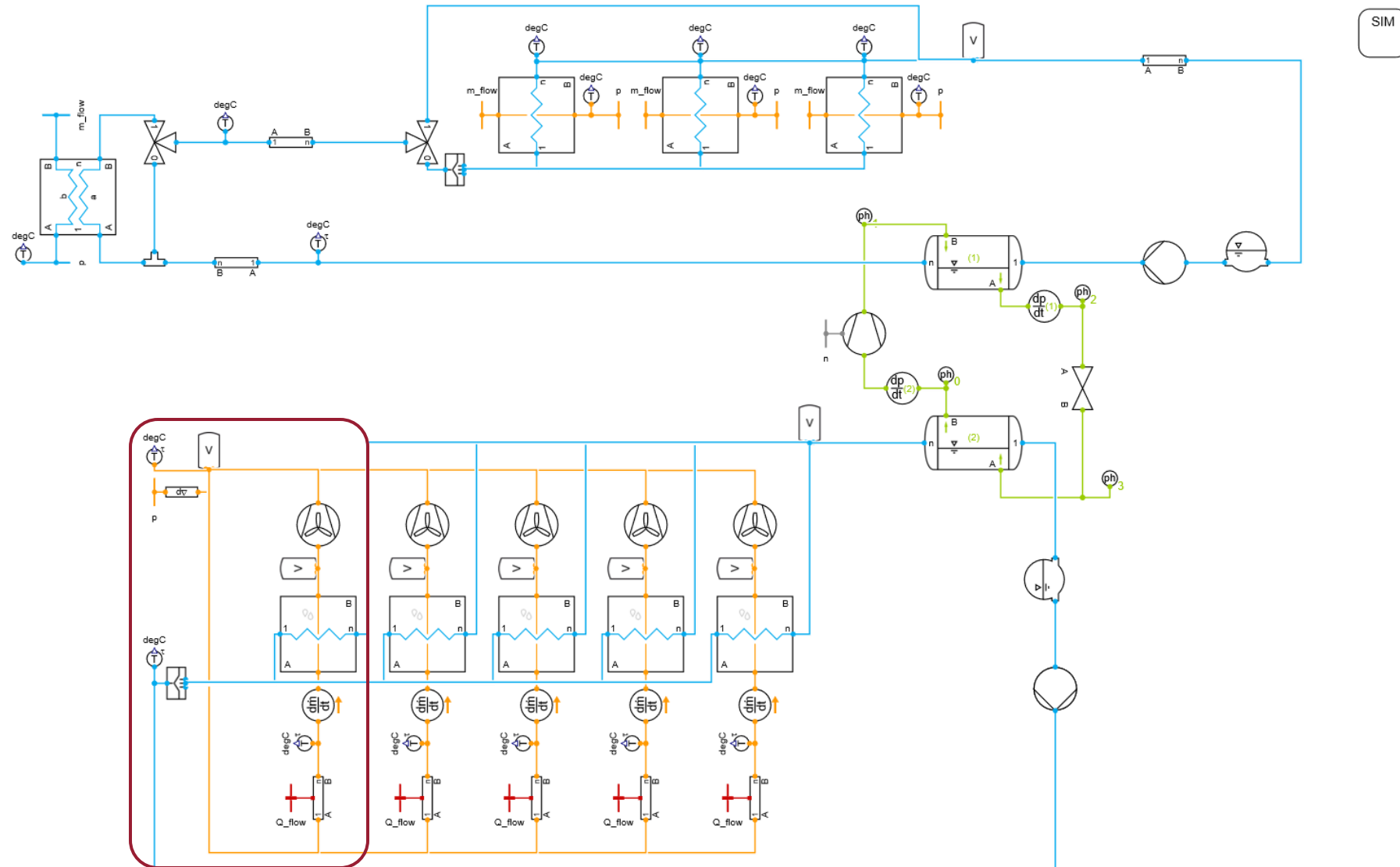
Zusammenfassung



Indirekte Flüssigkeitskühlung (RDHX) der CPU-Racks

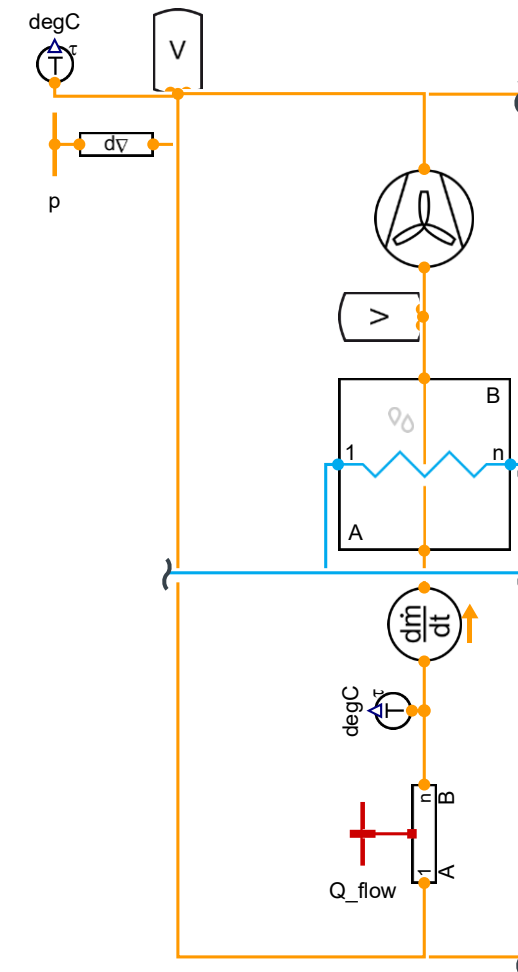


Indirekte Flüssigkeitskühlung (RDHX) der CPU-Racks

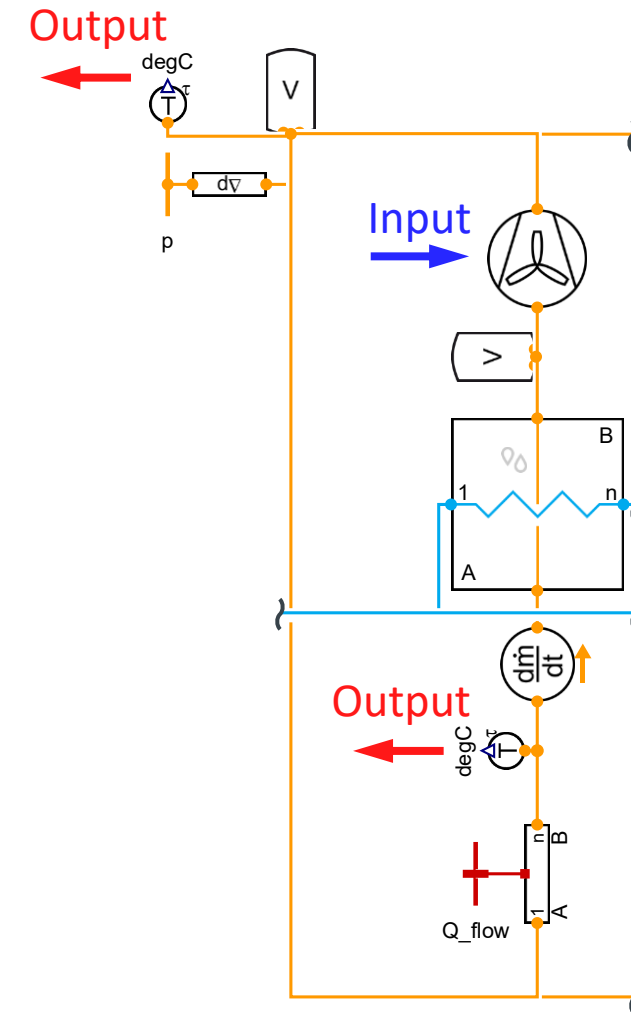


„Sinnvoller numerischer“ Modellaufbau:

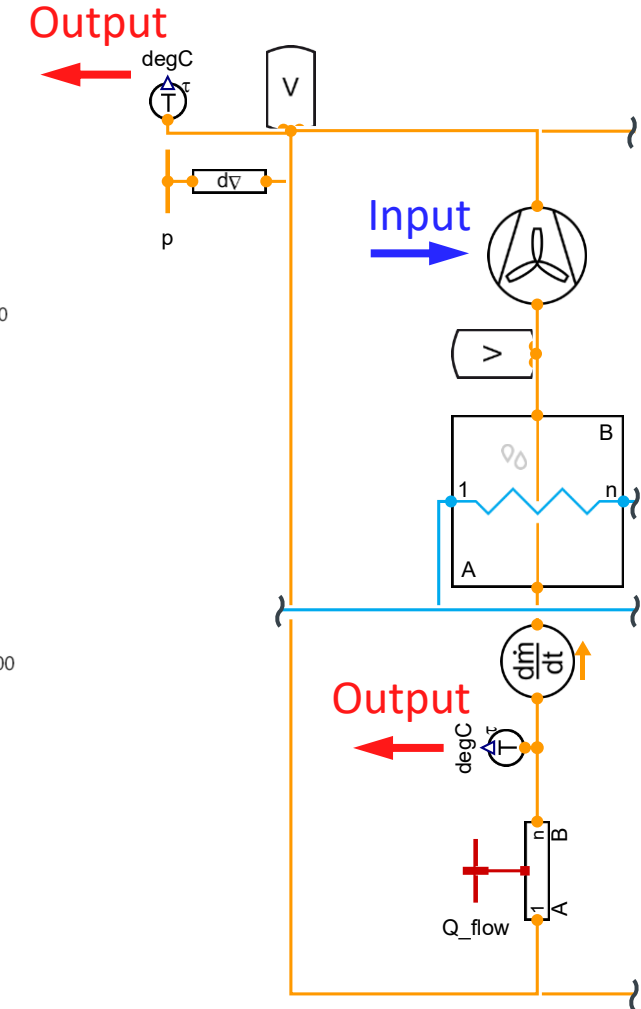
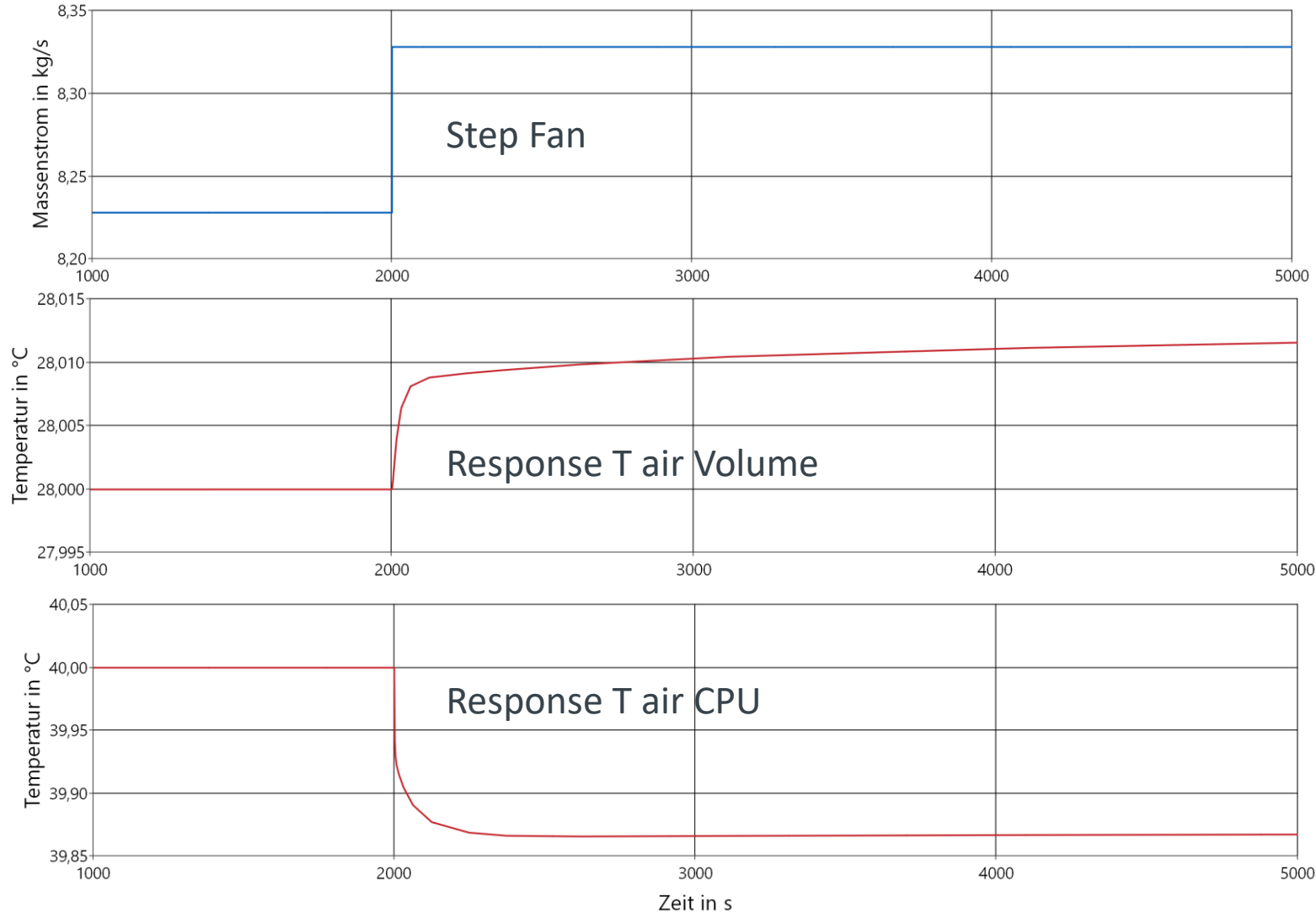
- Abwechselnd Strömungskomponente und Volumen
- Massenstromberechnung und Druckzustände (differenziell)
- Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk
- Massenstrom am Eintritt des Wärmeübertragers
- Vermeidung nichtlinearer algebraischer Gleichungssysteme



Systemausschnitt: Kompressibler Hydraulischer Kreislauf



Analyse: Sprungantworten des Systemmodells





Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

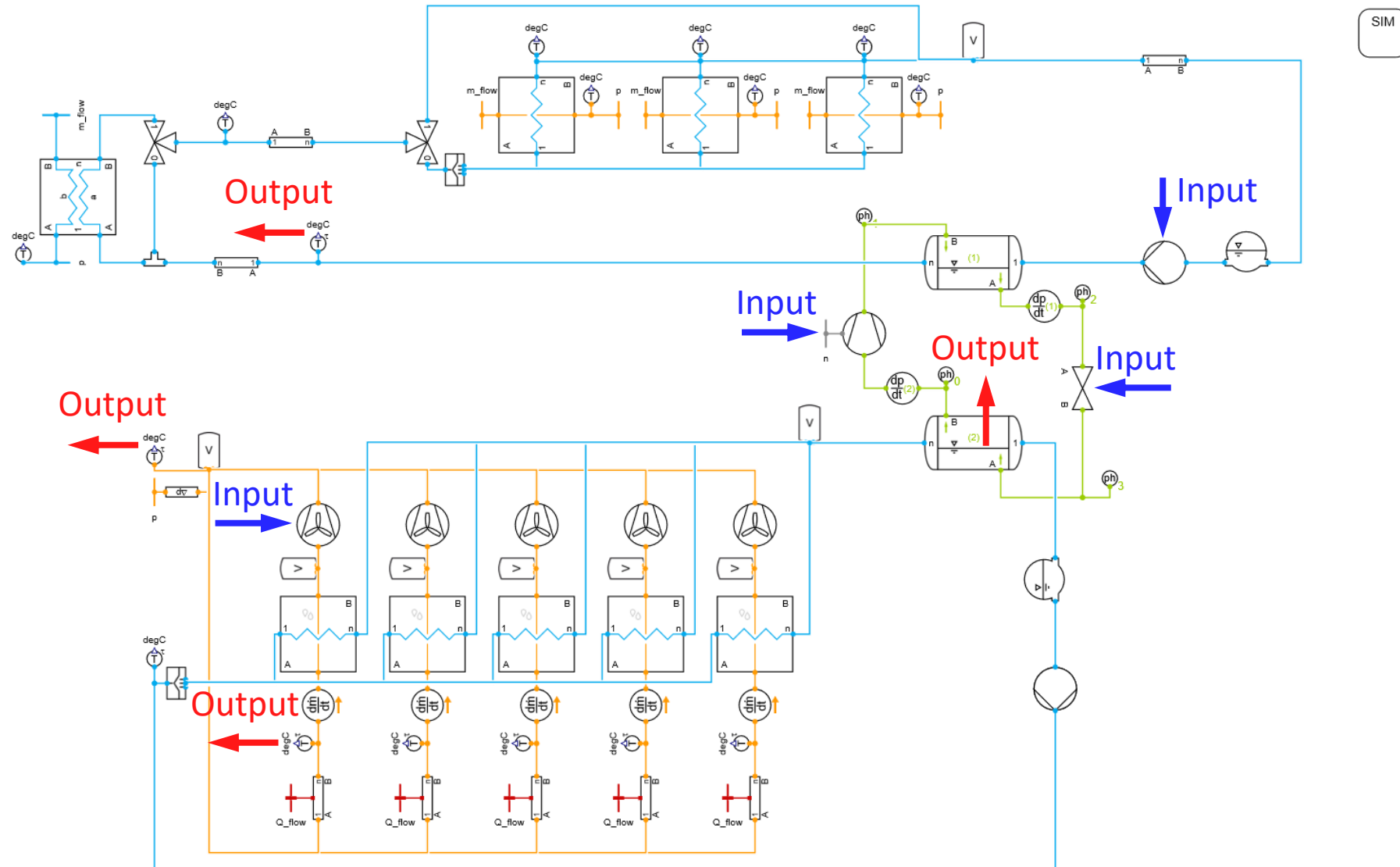
Regleroptimierung

Hybridkühlersimulation

Zusammenfassung



Indirekte Flüssigkeitskühlung (RDHX) der CPU-Racks



RGA

	Lüfter	Verdichter	Pumpe
Lufttemperatur CPU	0,87	0,13	-0,01
Raum-Lufttemperatur	0,13	0,88	-0,01
„Wasser“-Temperatur	0	-0,02	1,02

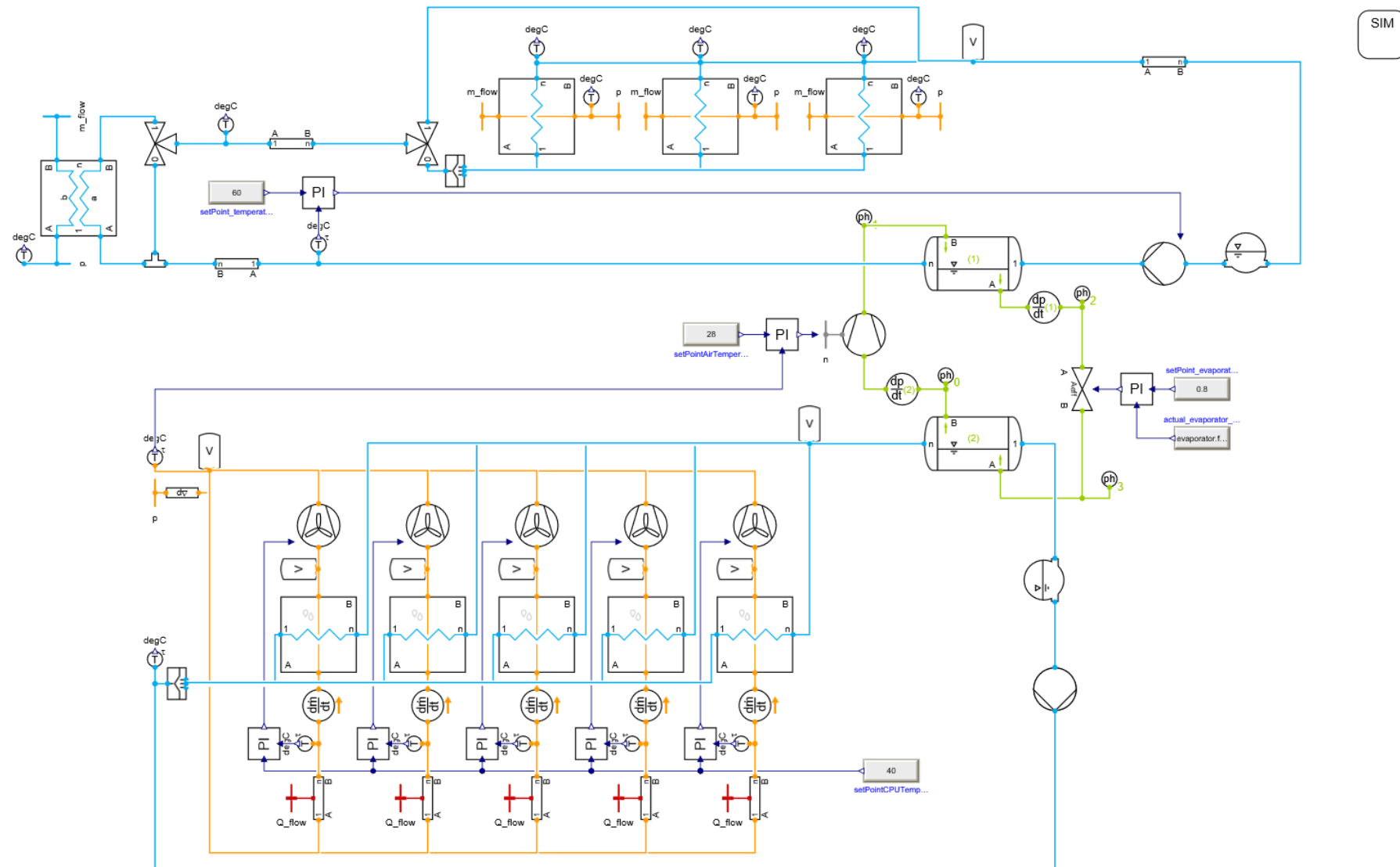
Verfahren der Regelungstechnik
liefern optimale P- und I-Anteile

T-Zeitkonstanten (inkl. Totzeit)

	Lüfter	Verdichter	Pumpe
Lufttemperatur CPU	78 s		
Raum-Lufttemperatur		1193 s	
„Wasser“-Temperatur			68 s

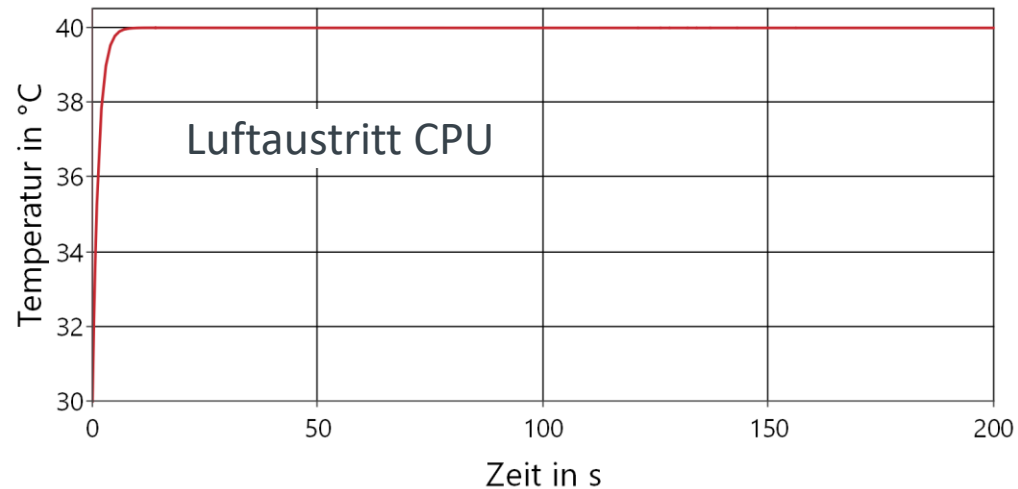
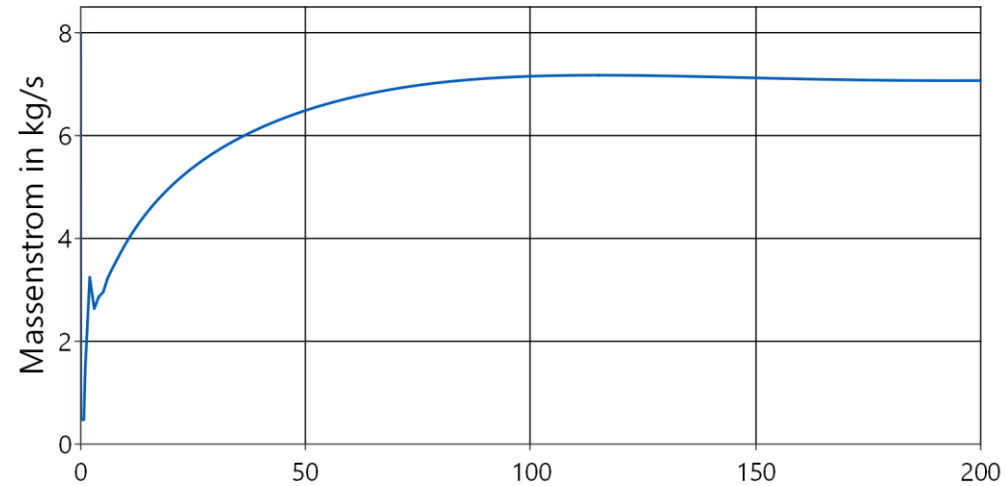
Regler-Optimierung erfolgt
beginnend mit der kleinsten
Zeitkonstante

Regelung des thermischen Gesamtsystems

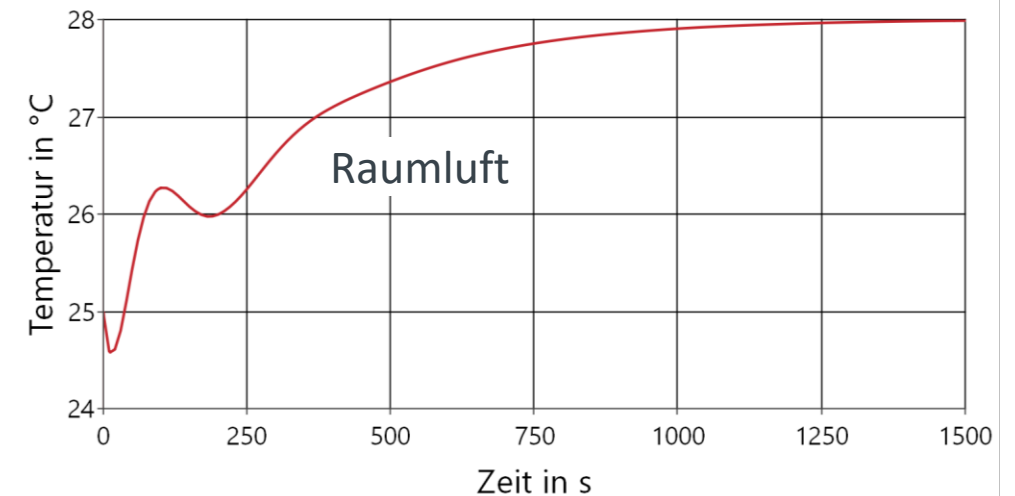
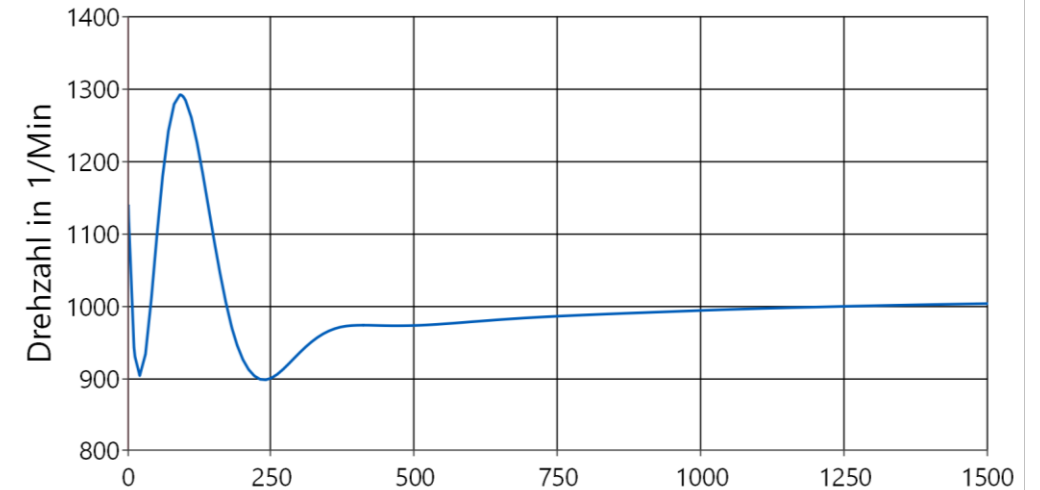


Lufttemperatur-Regelung mit Lüfter und Kompressor

Lüfter



Kompressor





Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

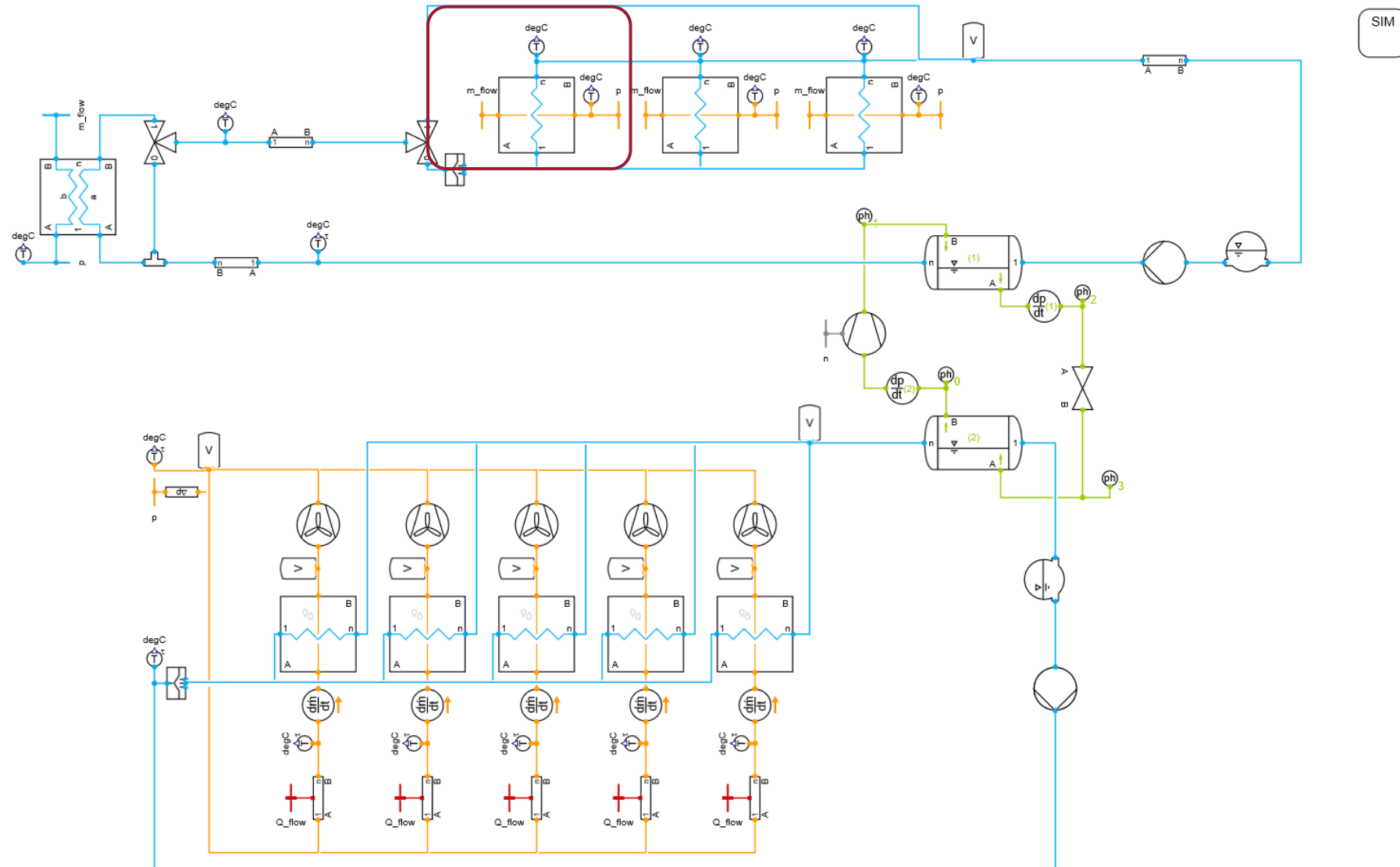
Regleroptimierung

Hybridkühlersimulation

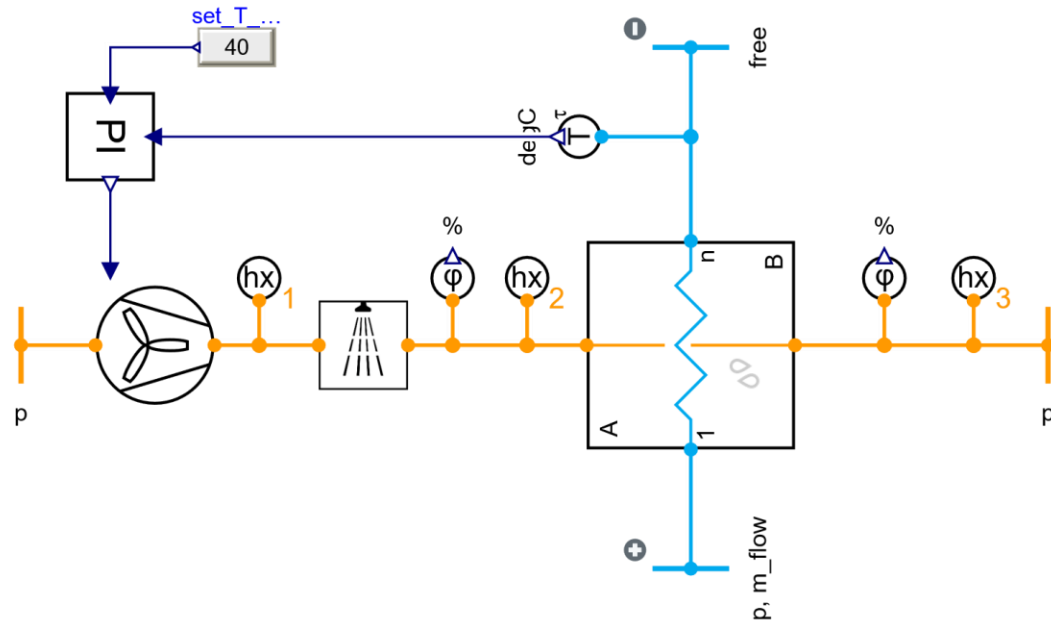
Zusammenfassung



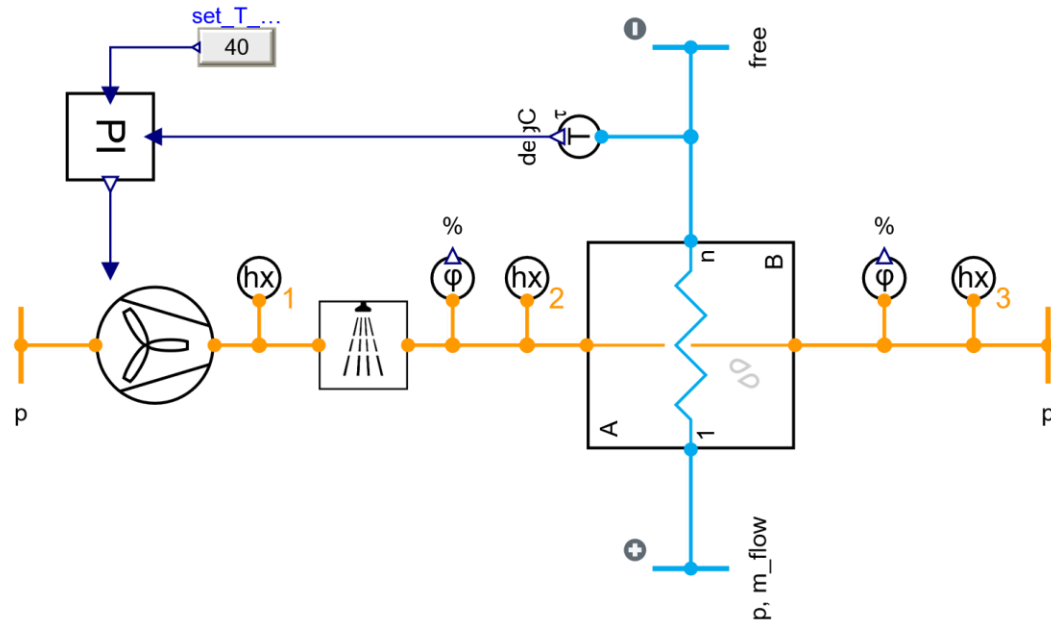
Beispielsystemmodell mit Rückkühlern



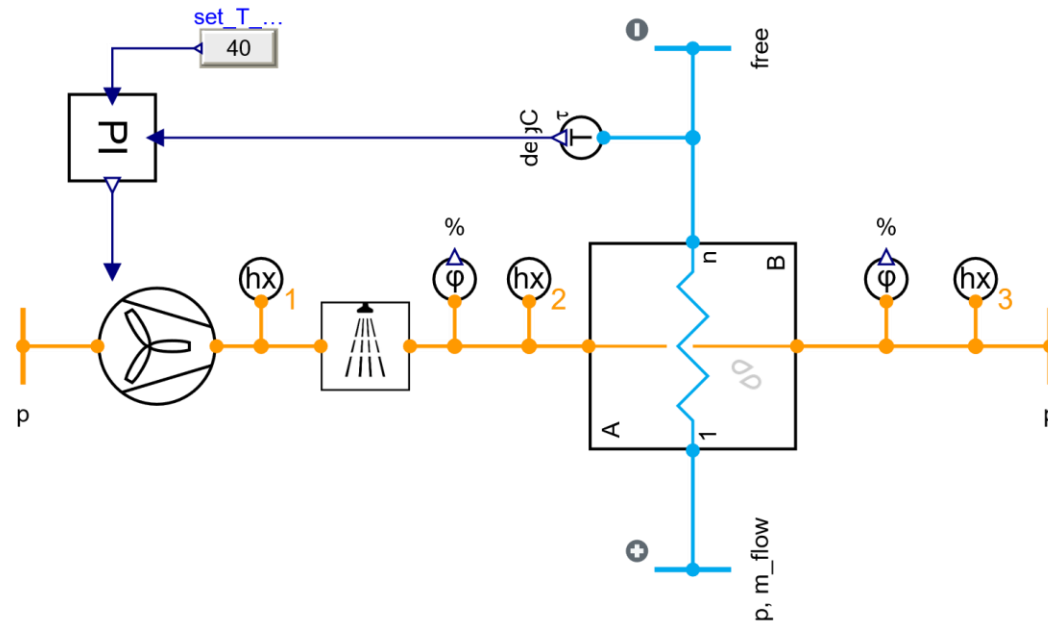
Hybridkühler mit geregelterm Lüftermassenstrom



Hybridkühler mit geregelterm Lüftermassenstrom



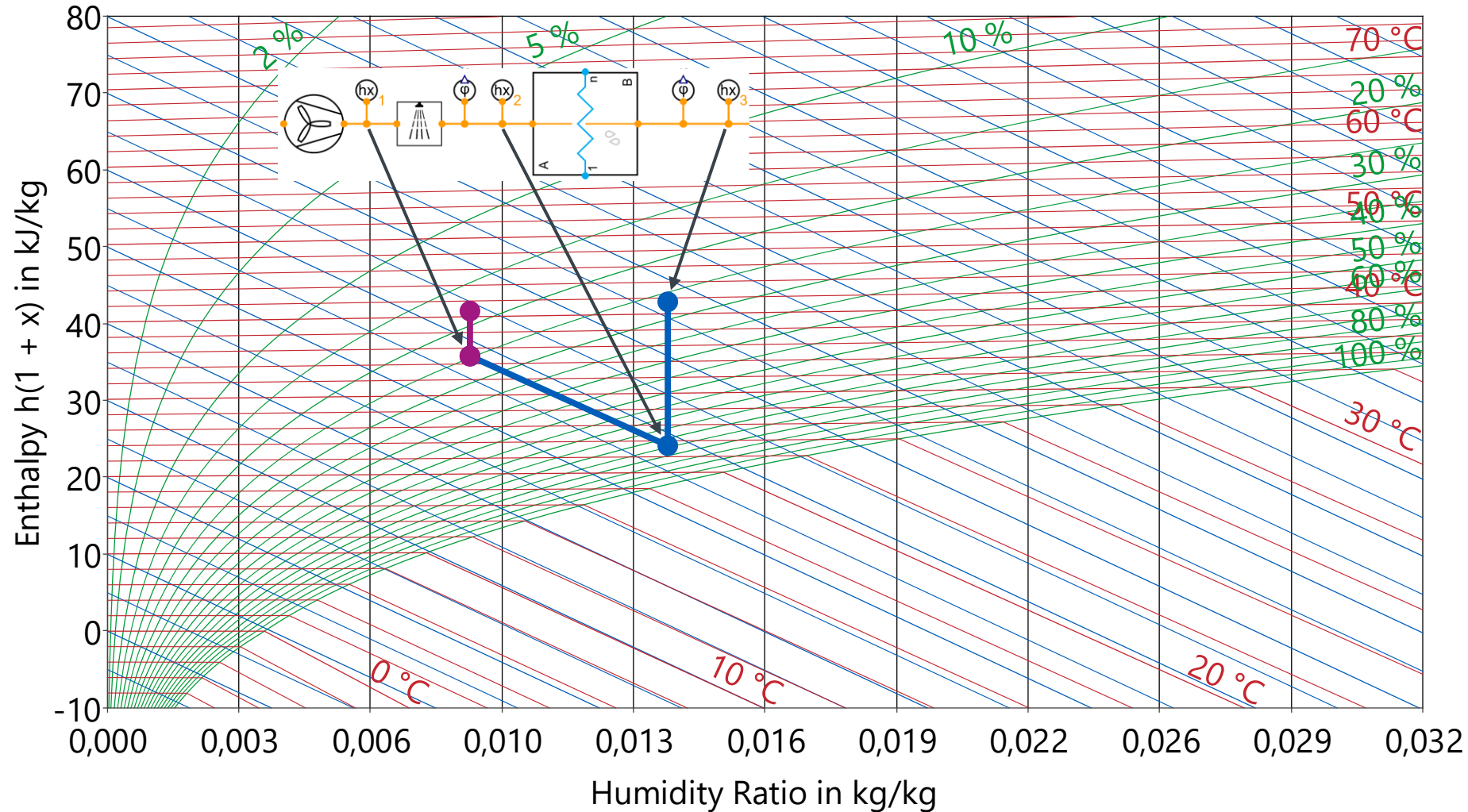
- Lüftereintritt:
 - T_{in} : 35°C
 - ϕ_{in} : 25%
 - Massenstrom regelt T_{liq_out}
- Wärmeübertrager „Wasser-Seite konstant“:
 - Massenstrom: 0,5 kg/s
 - T_{liq_in} : 50°C und T_{liq_out} : 40°C
- Kühleistung: 19,6 kW



- Kühlung trocken
- Kühlung mit Befeuchtung

- Lüftereintritt:
 - T_{in} : 35°C
 - ϕ_{in} : 25%
 - Massenstrom regelt T_{liq_out}
- Wärmeübertrager „Wasser-Seite konstant“:
 - Massenstrom: 0,5 kg/s
 - T_{liq_in} : 50°C und T_{liq_out} : 40°C
- Kühlleistung: 19,6 kW

Simulationsvergleich Rückkühler trocken und befeuchtet

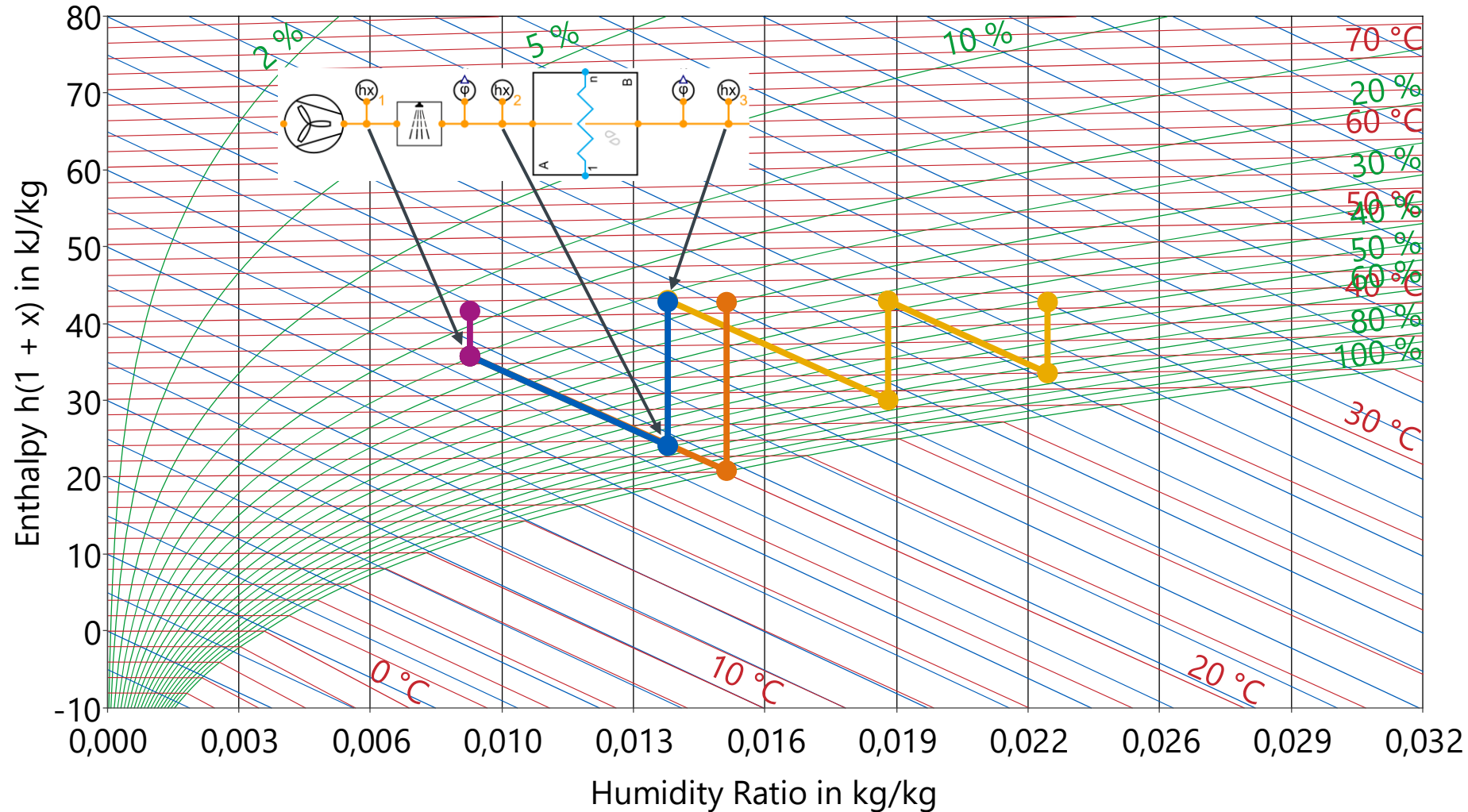


Kühlung trocken

Kühlung mit Befeuchtung:

- Regelung der Eintrittsfeuchte 75%

Simulationsvergleich Rückkühler trocken und befeuchtet



Kühlung trocken

Kühlung mit Befeuchtung:

- Regelung der Eintrittsfeuchte 75%
- Regelung der Austrittsfeuchte 30%
- Gestaffelt in drei Wärmeübertrager + Eintrittsfeuchte 75%

- Kühlung trocken
 - Kühlung mit Befeuchtung:
 - Regelung der Eintrittsfeuchte 75%
 - Regelung der Austrittsfeuchte 30%
 - Gestaffelt in drei Wärmeübertrager + Eintrittsfeuchte 75%
- | Luft- | Wassermassenstrom: |
|------------|--------------------|
| ■ 3,4 kg/s | ■ 0 g/s |
| ■ 1,1 kg/s | ■ 5,1 g/s |
| ■ 0,9 kg/s | ■ 5,5 g/s |
| ■ 0,5 kg/s | ■ 6,7 g/s |



Inhalt

Kühlung von Rechenzentren

Systemmodell und Analyse

Regleroptimierung

Hybridkühlersimulation

Zusammenfassung



- Physikalisches Systemmodell eines Rechenzentrums
 - Analyse mittels Sprungantworten
- Regelung der Rechenzentrumskühlung
 - RGA und PI-Reglerauslegung
- Simulation Rückkühler mit Befeuchtung
 - Reduzierter Lüftermassenstrom

Vielen Dank!

Für Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.



TIL Support

til@tlk-thermo.com



Ingo Frohböse

i.frohboese@tlk-thermo.com

TLK-Thermo GmbH

Rebenring 31

38106 Braunschweig

+49 531 390 76 – 0

info@tlk-thermo.com

[tlk-thermo.com](https://www.tlk-thermo.com)

[LinkedIn](#)

Quellenverzeichnis

Kürzel	URL	Author	Titel	Abrufdatum
KKA-Rek-2024	https://www.kka-online.info/artikel/rechenzentren-effizient-kuehlen-4092372.html	Kälte Klima Aktuell Lars Keller; Bild: Stulz	Rechenzentren effizient kühlen	18.05.2026
Stulz-2026	https://www.stulz.com/products/detail/cyberrack/	Stulz GmbH	CyberRack Active Rear Door	15.09.2026
jetcool-2024	https://jetcool.com/post/what-is-direct-liquid-cooling-for-ai-data-centers/	jetcool, Ally Lynch	What is Direct Liquid Cooling for AI Data Centers?	18.05.2026
E-abel-2025	https://www.eabel.com/de/immersionskuhlung-fur-rechenzentren/	E-abel, Carson He	Immersionskühlung für Rechenzentren: Ein umfassender Leitfaden	18.05.2026