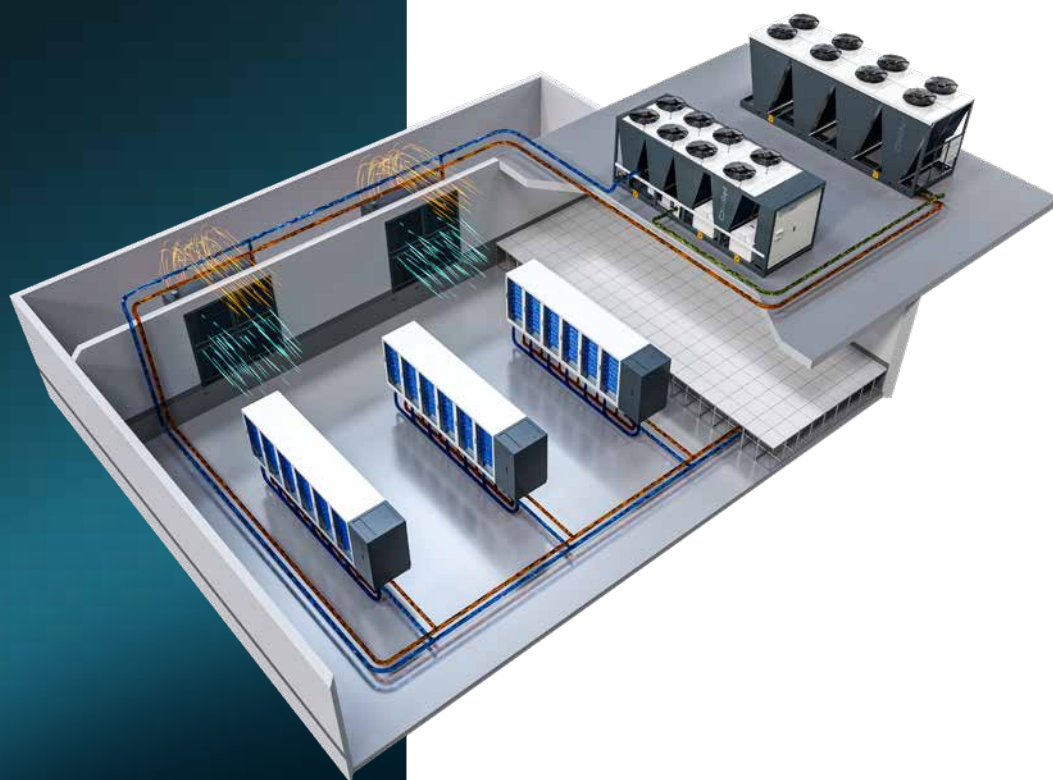


# Liquid cooling

DAS GEBOT FÜR 2026







## 1 EINFÜHRUNG

Die Welt der Rechenzentren durchläuft derzeit den tiefgreifendsten Wandel der letzten dreißig Jahre. Seit Jahrzehnten werden Serverräume nach dem „Air-First“-Ansatz konzipiert und gebaut: Schwimmende Böden, abgehängte Decken und die Unterteilung der Gänge haben es ermöglicht, die Luftkühlung zu optimieren und ihr Potenzial voll auszuschöpfen. Das Aufkommen der generativen künstlichen Intelligenz und des Hochleistungsrechnens (HPC) hat jedoch zu einer thermischen Belastung geführt, die die physikalischen Grenzen der erzwungenen Luftkonvektion überschreitet und die Welt der Rechenzentren an einen echten Wendepunkt gebracht hat.

Im Jahr 2026, wenn Prozessoren die TDP-Grenze (Thermal Design Power) von 100 W deutlich überschritten haben, lautet die Frage nicht mehr „ob“ man Flüssigkeitskühlung einsetzen soll, sondern „wie“ man sie auf einfache, skalierbare Weise implementieren und in die bestehende Infrastruktur integrieren kann.

Dieses Whitepaper soll Fachleute der Branche beim Übergang von der Luftkühlung zur Flüssigkeitskühlung begleiten – ein Wandel, der sich nicht nur auf das physikalische Mittel der Wärmeabfuhr auswirkt, sondern auch auf das gesamte Ökosystem des Serverraums: von Verteilern und Rohrleitungen über Schnellkupplungen bis hin zur Druck- und Temperaturregelung in den Kreisläufen.

### KEY POINTS

- **Überwindung der „Thermischen Wand“:** Analyse der Gründe, warum herkömmliche Infrastrukturen auf Basis von CRAC-/CRAH-Systemen bei Leistungsdichten über 40 kW pro Rack technisch nicht mehr tragbar sind;
- **Flüssigkeitskühltechnologien:** Technischer Überblick über Direct-to-Chip-Lösungen und Immersionskühlsysteme, einschließlich einer Bewertung der Architekturen, Funktionsprinzipien und Anwendungsszenarien;
- **Coolant Distribution Unit (CDU):** Untersuchung der Schlüsselkomponenten, des Funktionsprinzips sowie der Regelungs- und Steuerungslogik, die die Verteilung des Kältemittels steuern;
- **Messbare Nachhaltigkeit:** Bewertung der Auswirkungen der Flüssigkeitskühlung auf die Senkung der PUE (mit Werten nahe 1,1) sowie auf die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung für Fernwärmeanwendungen.

## 2 DIE ENTWICKLUNG DER AUSLASTUNG IN RECHENZENTREN

### 2.1 Von der „Density-Ära“ zur „Power-Ära“

Historisch gesehen stand bei der Planung von Rechenzentren die Optimierung der Luftströme im Vordergrund: Im letzten Jahrzehnt wurden die 5-kW-Racks schrittweise durch immer leistungsfähigere Lösungen ersetzt, bis hin zu 15 kW pro Rack. Dieser Übergang wurde durch die optimale Nutzung des Potenzials der Luftkühlung ermöglicht, und zwar durch die Einführung von Trennwänden für die Warm- und Kaltgänge sowie durch die Anhebung der schwimmenden Fußböden, um Druckverluste zu verringern und einen „Druckausgleichsraum“ mit gleichmäßigem statischem Druck für den Raum zu schaffen. Zwischen 2019 und 2020 hat der Einzug des High Performance Computing (HPC) jedoch zu einer allmählichen, aber unumkehrbaren Veränderung der Spielregeln geführt: Die Leistungsdichte von HPC-Servern ist so stark gestiegen, dass sie die Schwelle von 40 kW/Rack erreicht hat. Bei solchen Lasten ist Luft keine effiziente Lösung mehr für die Kühlung, da die zur Wärmeabfuhr von den Servern erforderlichen Geschwindigkeiten Turbulenzen verursachen würden, die den Prozess ineffizient machen würden. Mittlerweile haben wir die 100-kW-Marke pro Rack überschritten und bereiten uns darauf vor, die 200-kW-Marke pro Rack zu erreichen: Die Luftkühlung im herkömmlichen Sinne ist keine brauchbare Option mehr.

### 2.2 Die Entwicklung der TDP bei NVIDIA-Prozessoren

Der Hauptgrund für diese Beschleunigung ist die Entwicklung der Thermal Design Power (TDP). Noch vor nicht einmal zehn Jahren lag die Leistungsaufnahme einer High-End-CPU im Bereich von 150 bis 200 Watt. Heute hat sich die Lage grundlegend geändert:

- **NVIDIA V100/A100:** 300/400W pro Modul. Damit wurde erstmals eine Leistung von 40 kW pro Rack im gewerblichen Bereich erreicht;
- **NVIDIA H100 (Hopper):** TDP bis zu 700 W pro Modul;
- **NVIDIA B200 (Blackwell):** TDP, die 1000 W – 1200 W pro GPU erreicht.

Wenn acht dieser GPUs in einen einzelnen Serverknoten (HGX) integriert werden, ist die in wenigen Rack-Einheiten erzeugte Wärme mit der einer ganzen Reihe von Rechenzentren vor zehn Jahren vergleichbar. Um 10 kW von einem einzelnen 4U-Server mittels Lüftern abzuführen, wären Luftströme und Drehzahlen erforderlich, die zu für die Komponenten schädlichen Vibrationen und Schalleistungspegeln von über 100 dB(A) führen würden.

Generation	Jahr	Max. TDP	Empfohlenes Kühlsystem
P100 (Pascal)	2016	300W	Luftkühlung (herkömmlich)
V100 (Volta)	2017	300W	Luftkühlung (herkömmlich)
A100 (Ampere)	2020	400W - 500W	Luftkühlung (Rear Door)
H100 (Hopper)	2023	700W	Direct-to-Chip Liquid Cooling
B200 (Blackwell)	2025	1000W - 1200W	Direct-to-Chip Liquid Cooling

### 2.3 Die physikalische Grenze der Luft: Die „Thermische Wand“

Das Konzept der „Thermischen Wand“ kommt zum Tragen, wenn der Energieaufwand und der Platzbedarf für die Luftbewegung den Nutzen der Kühlung selbst übersteigen. Es gibt drei Faktoren, die die Luftkühlung für KI-Lasten überholt machen:

- **Wärmekapazität:** Wasser hat eine etwa 3400-mal höhere volumetrische Wärmekapazität als Luft; daher reicht bereits der Durchfluss in einem Rohr mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern aus, um selbst eine große Wärmemenge in einem Server abzuführen;
- **Ansatz:** Um 1000-W-Chips mit Luft zu kühlen, wären sehr niedrige Vorlauftemperaturen (18–20 °C) erforderlich, wodurch die Möglichkeit der Nutzung von Freikühlung auf ein Minimum reduziert würde. Die Flüssigkeit ermöglicht hingegen den Einsatz einer geringeren Menge und damit höhere Vorlauftemperaturen;
- **Leistungsaufnahme der Lüfter:** Die Leistungsaufnahme der Lüfter steigt kubisch mit dem Luftdurchsatz: In luftgekühlten Racks mit hoher Dichte (40 kW/Rack) können die Lüfter bis zu 20 % der Gesamtleistung des Servers verbrauchen.

### 2.4 Schlussfolgerung

Aus konstruktiver Sicht wird Luftkühlung bei einer Leistung von über 40 kW pro Rack zu einem überholten Kühlmedium: Der Übergang zur Flüssigkeitskühlung wird unumgänglich.

### 3 THERMODYNAMIK DER FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG

#### 3.1 Luft vs. Flüssigkeit

Die Überlegenheit der Flüssigkeitskühlung gegenüber der Luftkühlung ist nicht quantitativer, sondern qualitativer Art.

Aus thermodynamischer Sicht ist der wichtigste Parameter für die Wärmeübertragungseffizienz die **volumetrische Wärmekapazität [kJ/m³K]**. Die von Wasser ist über **3600 Mal höher** als die von Luft: Daher ist für die gleiche transportierte Wärmemenge der erforderliche Flüssigkeitsdurchfluss deutlich geringer als der von Luft.

Um die räumlichen Auswirkungen dieses Konzepts zu verstehen, betrachten wir den Bedarf für die Abführung von **100 kW** bei einer Temperaturdifferenz von 10 °C aus einem einzelnen Rack:

- **Luftkühlung:** Es wäre ein Luftdurchsatz von etwa 30.000 m³/h erforderlich, was in der Praxis natürlich nicht umsetzbar ist;
- **Flüssigkeitskühlung (PG25):** Es werden etwa 9 m³/h benötigt, d. h. 2,5 l/s. Dieser Durchfluss lässt sich mit Rohrleitungen von nur wenigen Zentimetern Durchmesser bewältigen, wodurch der Platzbedarf für die Infrastruktur drastisch reduziert wird.

#### 3.2 Wärmeleitung und Konvektion

Die herkömmliche Luftkühlung basiert auf der erzwungenen Konvektion, einem Prozess, der durch die äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft eingeschränkt wird, die de facto als natürlicher Isolator wirkt. Bei der Flüssigkeitskühlung, insbesondere bei Direct-to-Chip-Systemen (DTC), wird die Wärme über Kühlplatten aus Kupfer abgeführt. Dieser Ansatz ermöglicht Folgendes:

- **Minimierung des Wärmewiderstands:** Die Wärme wird über einen hochleitfähigen Metallpfad vom Prozessorchip an die Flüssigkeit weitergeleitet, wodurch Temperaturgradienten auf ein Minimum reduziert werden;
- **Aktivierung des „Warm Water Cooling“:** Dank der Effizienz der Flüssigkeit ist es möglich, mit hohen Vorlauftemperaturen (35 °C – 45 °C) zu arbeiten und die Prozessoren dennoch innerhalb der Betriebsgrenzen zu halten. Dies ermöglicht den Einsatz von Freikühlung in Bereichen, in denen dies bisher nicht möglich war, wodurch die Abhängigkeit von Chillern entfällt und die PUE (Power Usage Effectiveness) drastisch gesenkt wird.

#### 3.3 Die Rolle des PG25 in der Direct-to-Chip-Kühlung

Obwohl reines Wasser ein hervorragendes Kühlmittel ist, wird von seiner Verwendung in einem Rechenzentrum aufgrund der Gefahr von Korrosion, biologischem Wachstum und Einfrieren abgeraten. Der Industriestandard für DTC hat sich auf PG25 etabliert (eine Mischung aus 25 % Propylenglykol und 75 % entmineralisiertem Wasser mit Inhibitoren). Der PG25 stellt den idealen technischen Kompromiss dar:

1. **Korrosionsschutz:** Chemische Inhibitoren schützen Sekundärkreisläufe, die aus unterschiedlichen Metallen (Kupfer, Edelstahl) bestehen, und verhindern so galvanische Korrosion;

2. **Biologische Kontrolle:** Propylenglykol wirkt als natürlicher Inhibitor und verhindert die Bildung von Algen und Biofilmen, die die Mikrokanäle der Kühlplatten verstopfen könnten, deren Lamellen oft weniger als 200 Mikron breit sind;
3. **Sicherheit:** Im Gegensatz zu Ethylenglykol wird Propylenglykol als wenig toxisch eingestuft und ist daher unbedenklich für die Verwendung in Innenräumen, in denen sich Personal aufhält;
4. **Leistung:** Obwohl die Zugabe von Glykol die Viskosität leicht erhöht, weicht die thermische Leistung nicht wesentlich von der von reinem Wasser ab.

Eigenschaft	Luft	Wasser (Technisch)	PG25 (Wasser/Glykol)	Verhältnis (PG25/Luft)
Dichte [kg/m³]	1.149	994,4	1017,5	~885x
Spezifische Wärme [kJ/kg·K]	1.006	4.179	3.960	~3.93x
Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	0.026	0.621	0.493	~18,96x
Volumenwärmekapazität [kJ/m³·K]	1.1156	4155,6	4029,3	~3611x

Hinweis: Eigenschaften bei 34 °C berechnet

#### 3.4 Flüssigkeiten für zweiphasige Direct-to-Chip-Kühlung und Immersionskühlung

Im Gegensatz zur einphasigen DTC erfordern die Immersionskühlung und die zweiphasige DTC-Kühlung den ausschließlichen Einsatz dielektrischer Flüssigkeiten (synthetische Öle oder fluorierte Kohlenwasserstoffe), um die elektrische Isolierung der Komponenten zu gewährleisten.

Zwar muss man beim einphasigen Immersionskühlungssystem einen thermodynamischen Kompromiss eingehen, da die dielektrischen Flüssigkeiten eine um 50 % geringere spezifische Wärme und Wärmeleitfähigkeit als PG25 aufweisen, doch überwinden DTC und die zweiphasige Immersionskühlung diese Grenze, indem sie die Verdampfungswärme nutzen: In diesen Systemen werden Flüssigkeiten wie Hydrofluorolefine (HFO) oder fluorierte Ketone verwendet, die bei kontrollierten Temperaturen (im Bereich von 30–60 °C) verdampfen.

Die Wahl der Flüssigkeit ist jedoch heute stark an Nachhaltigkeitsaspekte gebunden: Die Industrie verzichtet aufgrund prohibitiv hoher Treibhauspotenziale (THP), die oft 1000 übersteigen, auf Perfluorkohlenwasserstoffe (PFC) und Hydrofluorkohlenwasserstoffe (HFC) und verschärft die Beschränkungen für PFAS („Ewigkeitschemikalien“). Die Umstellung auf Flüssigkeiten der nächsten Generation mit einem GWP < 1 ist daher zu einer wesentlichen Voraussetzung für die Einhaltung der ESG-Kriterien geworden, da so sichergestellt wird, dass die hohe Rechenleistung nicht zu einem regulatorischen Risiko oder zu nicht nachhaltigen Auswirkungen auf die Atmosphäre führt.

## 4 KÜHLTECHNOLOGIEN

### 4.1 Einphasige Direct-to-Chip-Kühlung (DTC)

Die einphasige Direct-to-Chip-Kühlung (DTC) ist der aktuelle Industriestandard für KI und HPC.

Die Wärme wird über eine Kupferplatte (Kühlplatte) mit integrierten Mikrokanälen abgeleitet, die mit einem Wärmeleitmaterial direkt auf dem Prozessor (CPU/GPU) montiert ist. Bei dieser Technologie kommt PG25 zum Einsatz, das stets in flüssigem Zustand bleibt.

#### **PLUS:**

- **Gezielte Effizienz:** leitet durch direkte Einwirkung auf die energieintensivsten Komponenten etwa 85 % der Wärme des Knotens ab;
- **Vielseitigkeit:** ermöglicht „hybride“ Konfigurationen, bei denen die Flüssigkeit die Prozessoren kühlt und ein reduzierter Luftstrom die sekundären Komponenten (RAM, VRM, Speicher) versorgt;
- **Nachrüstung:** ist die einfachste Lösung für die Integration in bestehende Rechenzentren mit einem Standard-19-Zoll-Rack-Layout.

#### **MINUS:**

- **Leckageüberwachung:** erfordert den Einsatz hochwertiger tropfsicherer Schnellkupplungen (Quick Disconnects – QD) und Leckagesensoren im Gehäuseinneren;
- **Komplexität der Verkabelung:** Durch den Einbau von Verteilern und Schläuchen im Serverinneren verringert sich der Platz für die Wartung der physischen Komponenten.

## 4.2 Zweiphasige Direct-to-Chip-Kühlung (DTC)

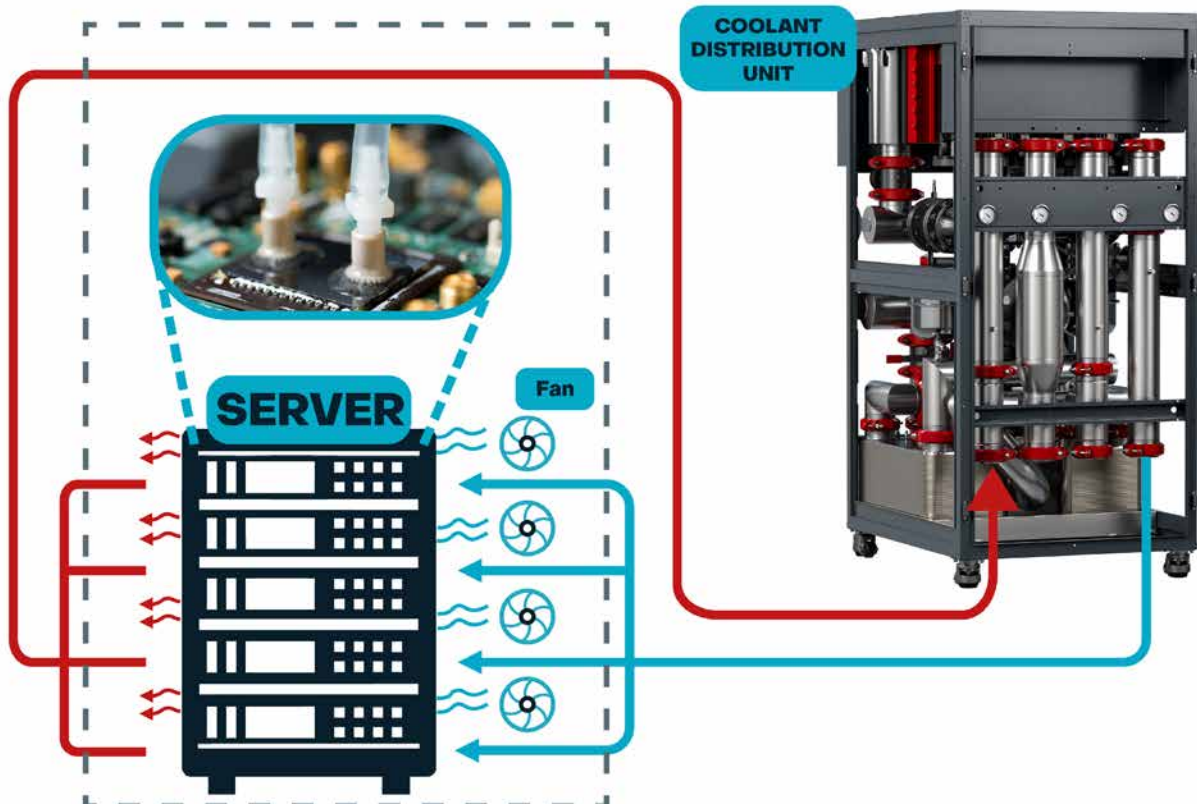
Bei der zweiphasigen DTC-Kühlung wechselt die Flüssigkeit in der Kühlplatte ihren Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig. Dabei wird die Verdampfungswärme genutzt, um Energie aufzunehmen, ohne die Temperatur der Flüssigkeit zu erhöhen.

### PLUS:

- **Hohe Wärmeleistung:** ideal für Chips der nächsten Generation, die eine Leistung von 1000–1500 W überschreiten werden, wobei ein einphasiger Kühlstrom einen zu hohen Durchfluss erfordern würde;
- **Thermische Gleichmäßigkeit:** Stellt sicher, dass der gesamte Chip die gleiche Temperatur aufweist (die Sättigungstemperatur der Flüssigkeit), wodurch gefährliche Temperaturgradienten vermieden werden.

### MINUS:

- **Druckregelung:** erfordert absolut leakagefreie Systeme und extrem präzise Druckregelventile zur Dampfsteuerung;
- **Kosten:** Der Einsatz spezieller Kühlflüssigkeiten und die Auslegung der Rohrleitungen für den Dampfrücklauf führen zu einem drastischen Anstieg der Investitionsausgaben;
- **Flüssigkeit:** Viele der auf dem Markt erhältlichen Optionen weisen ein hohes GWP auf.



### 4.3 Einphasige Immersionskühlung (IC)

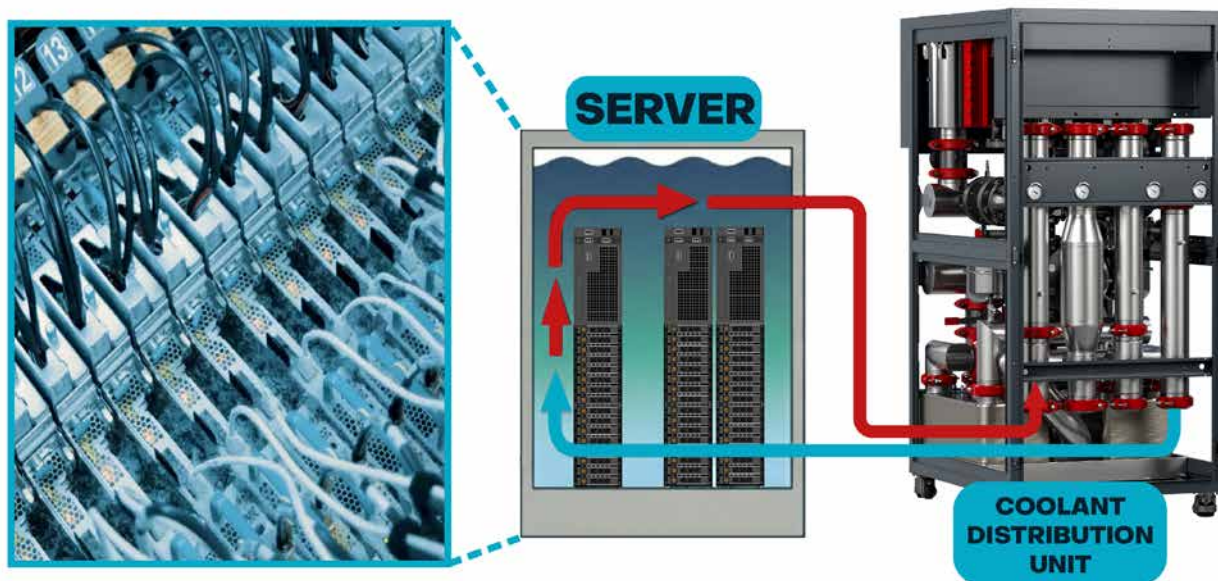
Der gesamte Server wird in einen Behälter getaucht, der eine dielektrische Flüssigkeit enthält, die zwangsweise zu einem externen Wärmetauscher umgewälzt wird. In dieser Konfiguration der Immersionskühlung bleibt die Flüssigkeit stets im flüssigen Zustand.

**PLUS:**

- **100 % Flüssigkeitskühlung:** Die zweiphasige Immersionskühlung leitet 100 % der vom Server erzeugten Wärme ab, einschließlich der Wärme von Netzteilen und Netzwerkkomponenten, wodurch keine Luftkühlung mehr erforderlich ist und somit Lüfter und Geräusche entfallen;
- **Hardware-Schutz:** Die dielektrische Flüssigkeit schützt die Elektronik vor Oxidation, Feuchtigkeit und Staub und senkt so die Ausfallrate der Leiterplatten.

**MINUS:**

- **Wartung:** Die Entnahme eines Servers erfordert aufwendige Entleerungs- und Reinigungsvorgänge;
- **Gewicht/Layout:** Erfordert Böden mit sehr hoher Tragfähigkeit und eine vollständige Umgestaltung der Raumaufteilung, wobei horizontale Behälter anstelle von vertikalen Racks zum Einsatz kommen.



## 4.4 Zweiphasige Immersionskühlung (IC)

In dieser Konfiguration kocht die dielektrische Flüssigkeit bei Kontakt mit den Komponenten. Der Dampf steigt zur Oberseite des Behälters auf, wo er an einer wassergekühlten Rohrschlinge kondensiert und durch die Schwerkraft wieder nach unten fällt.

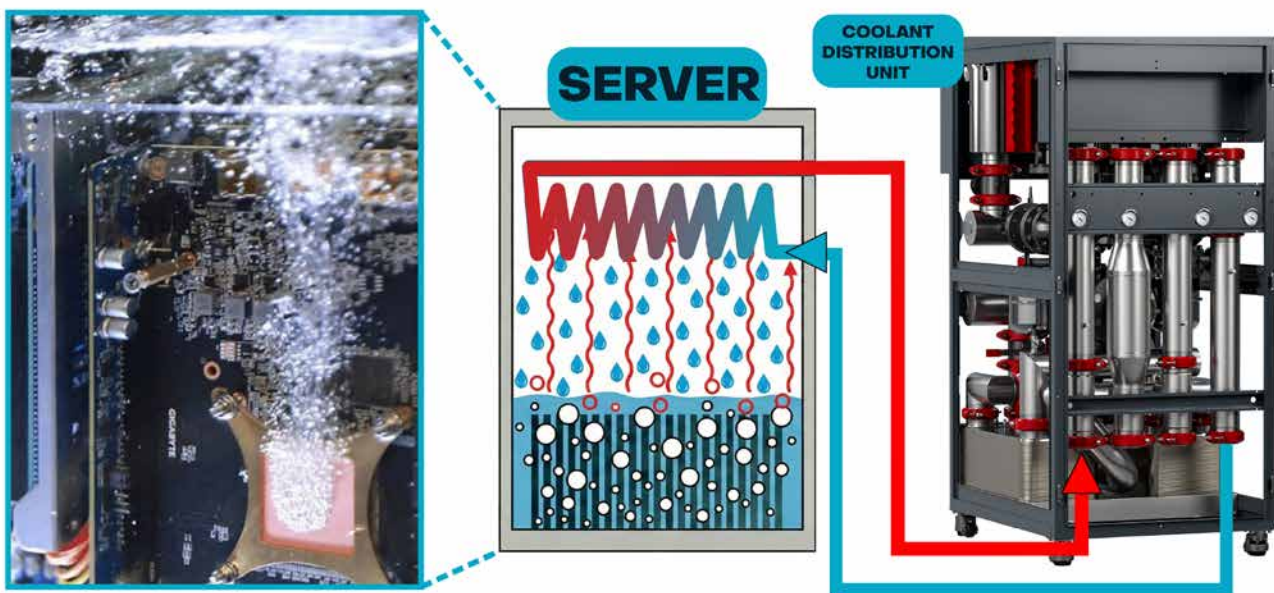
**PLUS:**

- **Effizienz:** Ermöglicht sehr niedrige PUE-Werte (bis zu 1,02), da im Primärkreislauf Kühlwasser mit sehr hohen Temperaturen verwendet wird;
- **Keine Pumpen im Sekundärkreislauf:** Die Bewegung der Flüssigkeit wird durch thermodynamische Kräfte gesteuert.

**MINUS:**

- **Kosten der Flüssigkeit:** Dielektrische Flüssigkeiten für Phasenwechsel sind extrem teuer und unterliegen strengen Umweltvorschriften;
- **Wartung:** Die Entnahme eines Servers erfordert aufwendige Entleerungs- und Reinigungsvorgänge;
- **Gewicht/Layout:** Erfordert Böden mit sehr hoher Tragfähigkeit und eine vollständige Umgestaltung der Raumaufteilung, wobei horizontale Behälter anstelle von vertikalen Racks zum Einsatz kommen;
- **Flüssigkeit:** Viele der auf dem Markt erhältlichen Optionen weisen ein hohes GWP auf.

Technologie	Unterstützte Dichte	Komplexität der Wartung	Integration	Anwendungsbereich
Einphasige DTC-Kühlung	40 - 120 kW	Mittlere Geschwindigkeit	Gut (hybrid)	KI-Training / HPC-Standard
Zweiphasige DTC-Kühlung	100 - 200 kW	Hoch	Begrenzt	Chip > 1500 W
Einphasige / zweiphasige Immersion	100 - 300+ kW	Hoch	Komplex	Supercomputing



## 5 ÖKOSYSTEM DER FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG

### 5.1 Hybride Raumarchitekturen

Trotz der Effizienz der Kühlplatten wirkt die Direct-to-Chip-Kühlung (DTC) gezielt nur auf Komponenten mit hoher Wärmelast (CPU, GPU, VRM, RAM). Innerhalb eines Servers befinden sich jedoch eine Vielzahl weiterer Komponenten – Induktivitäten, Kondensatoren, Chipsätze der Hauptplatine, Speichergeräte und Netzteile (PSU) –, die weiterhin Wärme an die Luft im Inneren des Gehäuses abgeben. In der Regel kann die Flüssigkeitskühlung in einem DTC-System zwischen 80 % und 85 % der gesamten Wärmebelastung des Racks abführen. Der verbleibende Anteil verflüchtigt sich in der Luft: Daher ist das Rechenzentrum des Jahres 2026 nicht „nur flüssig“, sondern hybrid.

Es ist wichtig zu betonen, dass in Räumen mit Immersionskühlsystemen, in denen die Server zu 100 % flüssigkeitsgekühlt sind, eine angemessene Luftregulierung und Klimatisierung im Raum nach wie vor unerlässlich ist. Dies ist notwendig, um die durch das Personal, die Beleuchtung usw. verursachte Wärmebelastung abzuleiten und um die thermohygrometrischen Bedingungen in einem für das Personal angenehmen Bereich zu halten.

### 5.1.1 CDU + Rear Door Heat Exchangers (RDHx)

Der RDHx ist im Wesentlichen ein Flüssigkeitskühler, der an der Rückwand des Racks montiert ist. Es handelt sich nicht um eine DTC-Technologie im eigentlichen Sinne, sondern um einen „Wärmefilter“, der die von den Servern erzeugte Wärme neutralisiert, bevor sie das Rack verlässt.

Dies gilt als „reine“ Hybridarchitektur. Die CDU regelt den Sekundärkreislauf und die Wärmeableitung über die Kühlplatten, während die Rückwände die von den Servern abgegebene Restwärme auffangen.

- **Vorteil:** Die Wärme gelangt nie in den Raum. Das Rack ist thermisch neutral;
- **Ideal für:** Räume ohne unterteilte Gänge oder mit niedrigen Decken, in denen die Steuerung der Luftströme schwierig ist.

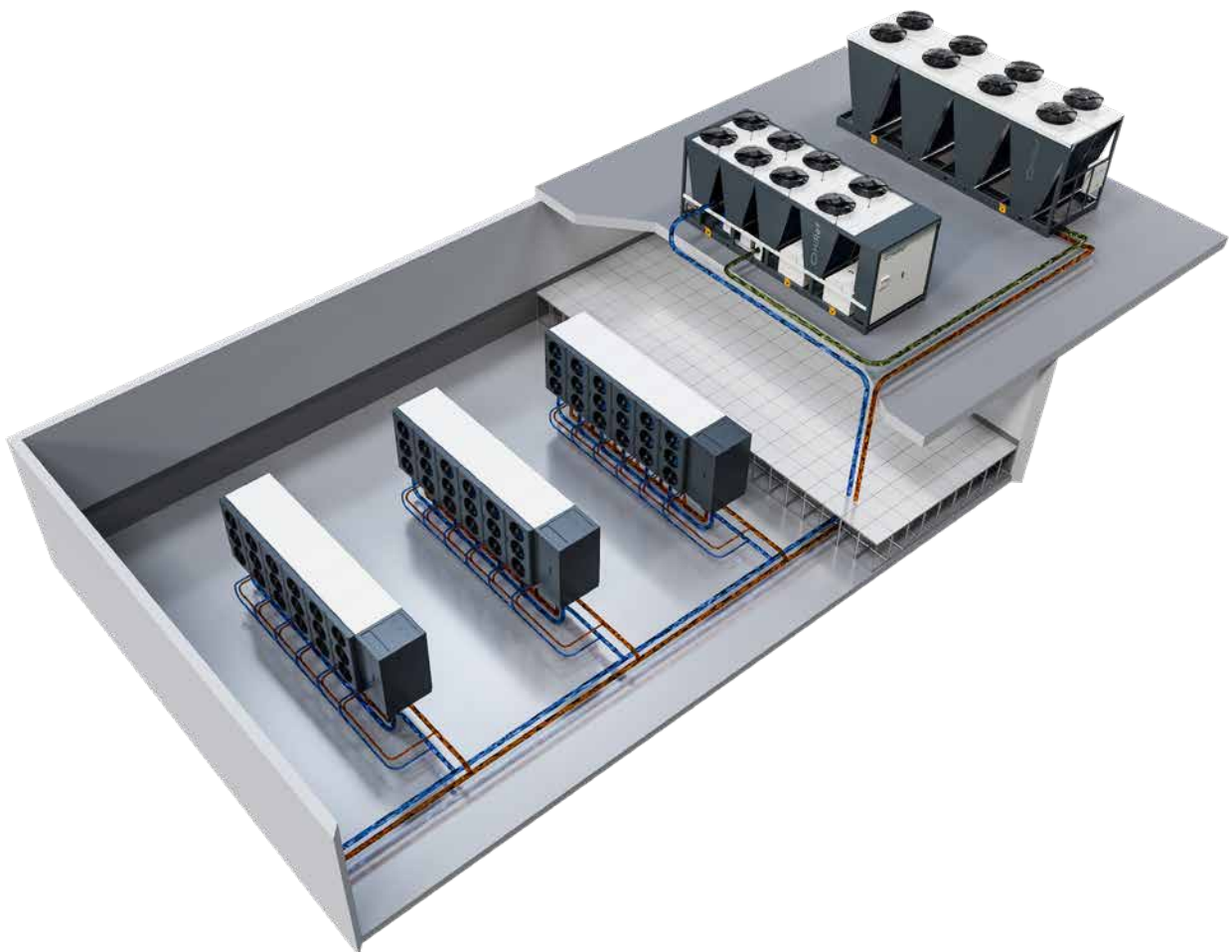
Die Rear-Door-Technologie ist vielseitig einsetzbar und kann auch als eigenständige Lösung für Räume mit einer Leistung von 30–40 kW pro Rack genutzt werden.

#### **PLUS:**

- **Nachrüstung:** Es sind keine Änderungen an den Knoten oder die Installation von Rohren an den Prozessoren erforderlich;
- **Room Neutral:** macht das Rechenzentrum unabhängig von der Raumklimatisierung (CRAC), da das Rack keine warme Luft in den Raum abgibt.

#### **MINUS:**

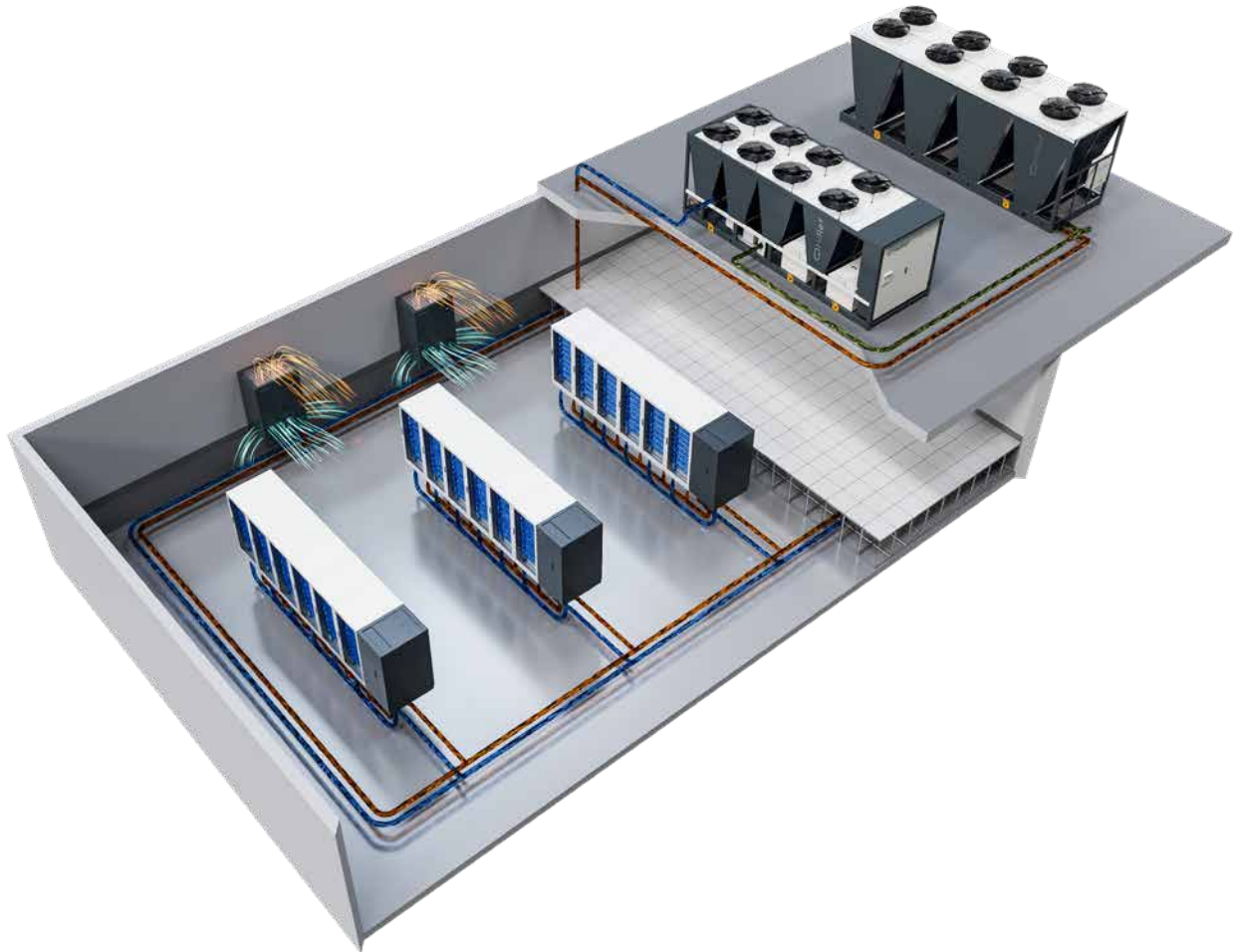
- **Abhängigkeit von Lüftern:** Die Server benötigen weiterhin leistungsstarke interne Lüfter, um die Luft durch das Gehäuse zu befördern, was zu einem hohen Stromverbrauch und Lärmpegel führt;
- **Physikalische Grenze der Luftkühlung:** Ab 40 kW ist die Luftkühlung allein nicht mehr ausreichend und muss durch eine Flüssigkeitskühlung ergänzt werden.



### 5.1.2 CDU + Präzisionsklimageräte (CRAC/CRAH)

In diesem Szenario steuert die CDU den Sekundärkreislauf und die Kühlung der Kühlplatten, während die Perimetergeräte (CRAH) die Restlast und die Regelung der Raumluftfeuchtigkeit übernehmen.

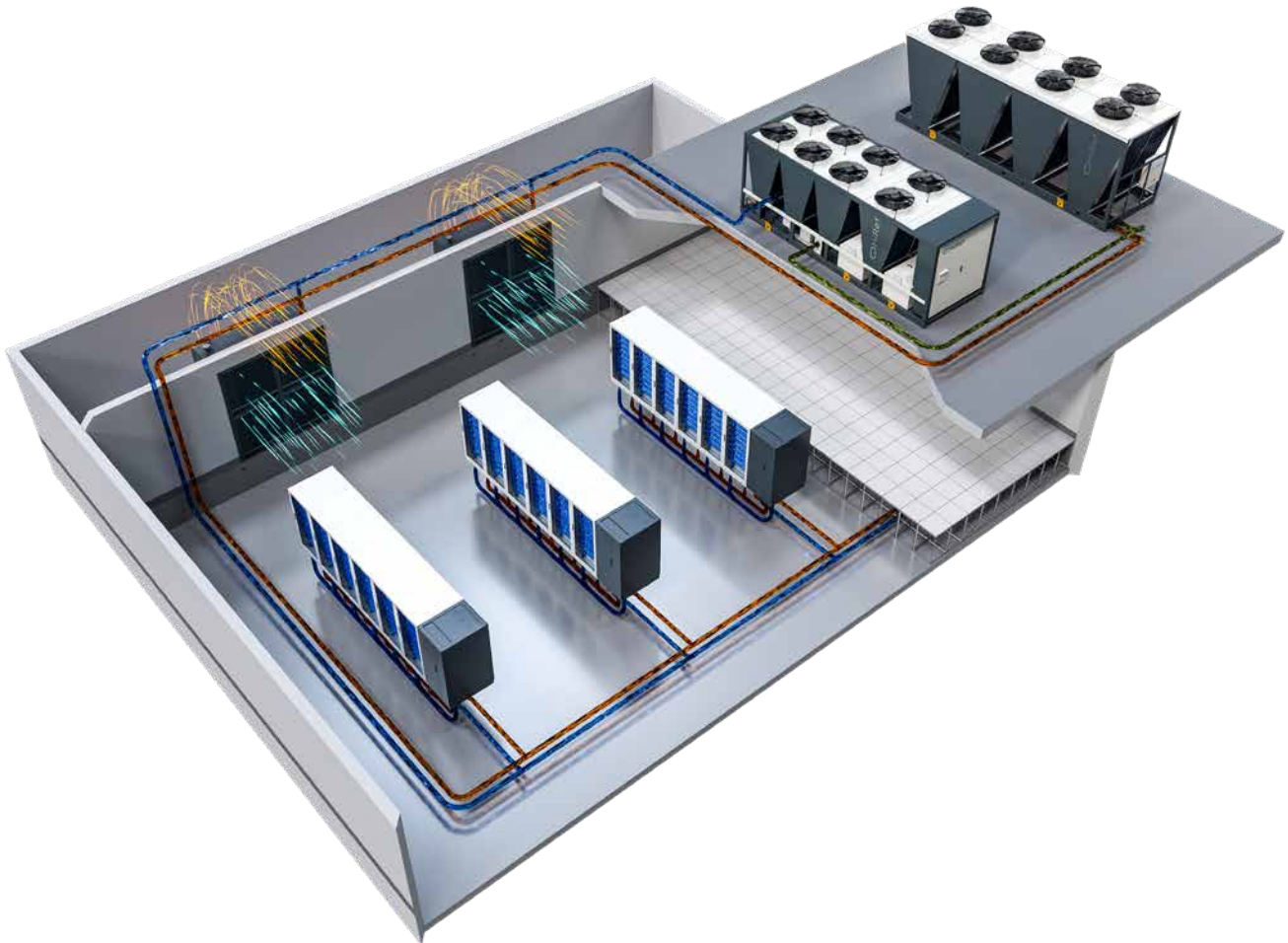
- **Vorteil:** ermöglicht die Weiterverwendung der bestehenden Infrastruktur bei einer Nachrüstung;
- **Ideal für:** bestehende Rechenzentren, die KI-Cluster in speziellen Bereichen des Reinraums einrichten.



### 5.1.3 CDU + Fanwall

In diesem Szenario steuert die CDU den Sekundärkreislauf und die Kühlung der Kühlplatten, während der in die Luft abgeführte Lastanteil von den Fanwalls geregelt wird.

- **Vorteil:** hohe Energieeffizienz, geringer Platzbedarf im White Space;
- **Ideal für:** von Grund auf neu konzipierte große DTC-Hyperscale-Rechenzentren.



## 5.2 Das komplette Ökosystem der Flüssigkeitskühlung

Das komplette Ökosystem der Flüssigkeitskühlung lässt sich als Pyramide aus Wärmeaustausch und Wärmeflüssen auf drei Ebenen betrachten:

1. **Server-Ebene:** Die Kühlplatte nimmt die vom Chip erzeugte Wärme auf und leitet sie an den PG25 weiter;
2. **CDU-Ebene:** Der Plattenwärmetauscher innerhalb der CDU überträgt die Wärme vom Sekundärkreislauf (PG25) auf den Primärkreislauf (in der Regel Wasser/Glykolwasser);
3. **Externe Ebene:** Der Chiller und/oder der Trockenkühler leiten die Wärme an die Außenumgebung ab.

Die nahtlose Integration von CDU, Luftkühlungsanlagen und externen Wärmeabfuhrsystemen verändert das Energieprofil des Rechenzentrums grundlegend und ermöglicht es, die pPUE für die Kühlung auf unter 1,1 zu senken. Der Wettbewerbsvorteil dieser Architektur liegt in der saisonalen Analyse: Durch den Betrieb mit hohen Primärkreislauftemperaturen ist es in sehr vielen Klimazonen möglich, an den allermeisten Tagen des Jahres die freie Kühlung zu nutzen, sodass der

Einsatz von Kältemaschinen auf seltene sommerliche Temperaturspitzen beschränkt bleibt.

Dieser Ansatz ermöglicht es, die Energieeinsparungen in der kalten Jahreszeit und in der Übergangszeit zu maximieren, wodurch die saisonale Effizienz zu einem entscheidenden Faktor für die Senkung der Betriebskosten (OpEx) und die Erreichung der Umweltziele wird.

## 5.3 Die Verteilung der Flüssigkeit im Raum

Während in luftgekühlten Rechenzentren die Verteilung über die Druckbelüftung des Unterbodens erfolgt, besteht die Verteilung bei der Flüssigkeitskühlung aus einem physischen Rohrleitungsnetz, das so ausgelegt sein muss, dass es die Betriebskontinuität und das Gleichgewicht des Systems gewährleistet und zudem das Risiko von Leckagen minimiert. Die wichtigsten Komponenten des Verteilersystems sind folgende:

- **Verteilerblock:** Verteiler, die die Flüssigkeit des Sekundärkreislaufs auf die verschiedenen Server eines Racks verteilen. Hergestellt aus Edelstahl AISI 304/316L mit Orbital- und WIG-Schweißnähten, um innere Grate zu vermeiden, die sich lösen und die Kühlplatten verstopfen könnten;

- **Schnellkupplungen (Quick Disconnects - QD):** Steckverbinder, die als Verbindung zwischen den verschiedenen kritischen Komponenten des Kreislaufs dienen. Sie sind die am stärksten beanspruchten Komponenten während der gesamten Lebensdauer des Rechenzentrums. Es ist unerlässlich, tropffreie Steckverbinder mit flacher Anschlussfläche zu verwenden, um zu verhindern, dass Flüssigkeitstropfen auf die Server gelangen.

## 6 COOLANT DISTRIBUTION UNIT



Die Coolant Distribution Unit (CDU) ist der Schlüssel zur Skalierbarkeit moderner Rechenzentren. Die aktuelle technische Herausforderung besteht darin, die Wärmeübertragungsdichte zu maximieren und gleichzeitig den Platzbedarf auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Geräte der neuesten Generation sind in der Lage, enorme Wärmebelastungen zu bewältigen und erreichen eine Leistung von bis zu 1400 kW bei einer Stellfläche von nur 900 mm x 1200 mm. Diese Leistungsdichte wird durch fortschrittliche Technik ermöglicht, die einen thermischen Ansatz von 4 K gewährleistet. Dadurch kann das Gerät während des größten Teils des Betriebsjahres im reinen Freikühlungsmodus arbeiten, was die Gesamt-PUE drastisch optimiert.

Die CDU fungiert als Trennwand und Managementsystem zwischen den beiden Hydraulikkreisläufen, aus denen sich das Rechenzentrum zusammensetzt:

1. **Primärkreislauf (Facility Water System – FWS):** Der gebäudeseitige Kreislauf, der an externe Wärmeabfuhrsysteme angeschlossen ist und in der Regel mit einer Temperaturdifferenz von 10 °C arbeitet;
2. **Sekundärkreislauf (Technology Cooling System - TCS):** der IT-seitige Kreislauf, in dem die „edelste“ Flüssigkeit, das PG25, zirkuliert. Hier gewährleistet die CDU einen konstanten Druck, reine Flüssigkeit und eine präzise Temperaturregelung, um Kondensatbildung zu verhindern.

### 6.1 Komponenten der CDU



#### WÄRMETAUSCHER

Die Wärmeübertragung zwischen den primären und sekundären Flüssigkeiten erfolgt über gelötete Plattenwärmetauscher aus Edelstahl AISI 316L, die sich durch einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten und eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit auszeichnen. Die Wärmetauscher sind so dimensioniert, dass sie eine nominale Annäherung von 4K aufweisen.

#### PUMPENAGGREGAT

Die Förderung der Flüssigkeit im Sekundärkreislauf erfolgt über hocheffiziente Kreiselpumpen in einer redundanten N+1-Konfiguration. Die Pumpen werden über Frequenzumrichter gesteuert und können daher die Fördermenge entsprechend der momentanen Wärmebelastung der Racks anpassen

#### FILTER

Die Mikrokanäle der Kühlplatten haben Abmessungen in der Größenordnung von 200 Mikron: Daher ist eine geeignete Filterung unerlässlich, um jegliche Verschmutzung oder Verstopfung dieser Kanäle zu vermeiden. Die CDU integriert daher ein System aus redundanten N+1-Duplexfiltern:

- Die Filterpatronen sind mit einer Filterfeinheit von bis zu 25 Mikron erhältlich und gewährleisten so, dass auch kleinste Partikel aufgefangen werden, die zu Erosion oder Verstopfungen in den Servern führen könnten;
- Die Duplex-Konfiguration ermöglicht es, die Kartusche bei laufendem Betrieb zu isolieren und auszutauschen, ohne den Betrieb des Sekundärkreises unterbrechen zu müssen, und gewährleistet

so die Betriebsbereitschaft auch während der planmäßigen Wartungsarbeiten.

### DRUCKUNABHÄNGIGES REGELVENTIL

Innerhalb der CDU übernimmt das druckunabhängige Regelventil (Pressure Independent Control Valve, PICV) eine doppelte Funktion als Durchflussregler und Druckstabilisator und fungiert dabei als „Feinregler“ des Primärkreislaufs:

- **Druckunabhängigkeit:** Im Gegensatz zu herkömmlichen Regelventilen sorgt das druckunabhängige Regelventil für einen konstanten Durchfluss zum Wärmetauscher, unabhängig von Druckschwankungen im Wassernetz des Rechenzentrums;
- **DeltaT-Optimierung:** Durch die dynamische Anpassung des Wasserdurchflusses an die tatsächliche Wärmebelastung der Server sorgt das druckunabhängige Regelventil dafür, dass das aus dem Primärkreislauf austretende Wasser die höchstmögliche Temperatur aufweist. Dies ist für die Effizienz von Fernwärmesystemen oder Kältemaschinen im Free-Cooling-Betrieb von entscheidender Bedeutung.

### KONFIGURIERBARE ANSCHLÜSSE

Um sowohl für Neubauten (Greenfield) als auch für die Sanierung bestehender Räume (Retrofitting) geeignet zu sein, ist die CDU so konzipiert, dass ihre Ausgänge sowohl nach oben als auch nach unten ausgerichtet werden können. Diese Vorrichtung ermöglicht die Aufnahme von Rohrleitungen, die von der Decke oder vom schwimmenden Fußboden kommen, ohne dass bauliche Änderungen an der Maschine oder das Hinzufügen von Verbindungsstücken oder Armaturen während der Montage erforderlich sind.

### BEFÜLLUNGSANSCHLUSS

Um das Befüllen des Sekundärkreislaufs mit PG25 zu erleichtern, verfügt die CDU im Sekundärkreislauf über einen Befüllungsanschluss, der für den Anschluss an die Füllpumpe vorgesehen ist. In einigen Fällen kann die Pumpe direkt in den Rahmen der CDU integriert werden.

## 6.2 Regelungslogiken

Die Komplexität der Flüssigkeitskühlung liegt in der extremen Dynamik der Lasten. Im Vergleich zu herkömmlichen Unternehmens-Arbeitslasten, die vorhersehbare und allmähliche Schwankungen aufweisen, führt das KI-Ökosystem zu einer beispiellosen thermischen Volatilität.

### LASTDYNAMIK WÄHREND DES TRAININGS

Während der Trainingsphasen eines großen Sprachmodells (LLM) arbeiten die Server nicht mit konstanter Geschwindigkeit. Die Wärmebelastung folgt dem Verlauf der Rechen-„Batches“:

- **Momentane Spitzen:** Wenn der Cluster mit der Verarbeitung eines Datensatzes beginnt, kann der Energieverbrauch eines Racks innerhalb weniger Sekunden von 10 kW (Leerlauf/Wartezustand) auf 80–100 kW ansteigen;
- **Zyklische Schwankungen:** Während des Trainings sind kontinuierliche Zyklen von „Compute“ (100 % Auslastung) zu beobachten, auf die sehr kurze Pausen von „Sync/Communication“ (Auslastungsabfall) folgen, wodurch ein sägezahnförmiges Temperaturprofil entsteht.

Im Gegensatz zu Luftkühlungssystemen, bei denen die Luftmasse im Raum als eine Art „thermisches Schwungrad“ fungiert, wird bei der Flüssigkeitskühlung die Wärme unmittelbar auf das Fluid übertragen.

Ohne eine CDU, die in der Lage ist, die Leistung anzupassen, würden diese Schwankungen thermische Belastungen auf den Prozessorchips verursachen, wodurch deren Lebensdauer verkürzt oder eine thermische Drosselung ausgelöst würde, was wiederum den gesamten Trainingsprozess verlangsamt.

### PID-REGELUNG UND MODULATION DES DURCHSATZES

Um diese Schwankungen auszugleichen, basiert das Herzstück der Regelung auf PID-Algorithmen, die auf die Frequenzumrichter der Pumpen (VFD) einwirken.

- **Differenzdruckregelung:** Die CDU überwacht kontinuierlich den Druckunterschied zwischen Vor- und Rücklauf des Sekundärkreislaufs, um einen konstanten Differenzdruck an den Server-Racks aufrechtzuerhalten, sodass das System bei Rechenlastspitzen sofort auf das Öffnen oder Schließen der lokalen Ventile an den Serverknoten reagieren kann;
- **Temperaturregelung:** Durch die Anpassung der Pumpendrehzahl und des PICV-Ventils im Primärkreis stabilisiert die CDU die Vorlauftemperatur auf den Sollwert und gleicht dabei die durch die Trainingszyklen der KI verursachten schnellen Schwankungen im Rücklauf aus.

### ÜBERWACHUNG UND STEUERUNG DES TAUPUNKTS

Eines der größten Risiken in einem hybriden Rechenzentrumsraum ist die Bildung von Kondenswasser: Die CDU verfügt daher über Sensoren zur Messung der Luftfeuchtigkeit und der Raumtemperatur, berechnet den Taupunkt des Raums in Echtzeit und stellt sicher, dass die Temperatur der Vorlauftemperatur stets mindestens 3–5 °C über dem Taupunkt liegt.

## 6.3 NVIDIA-Server Compliance

Für einen Entwickler ist die Einhaltung der Standards der Chiphersteller eine Voraussetzung für die Gewährleistung der Zuverlässigkeit der IT-Investition. Die NVIDIA-Blackwell-Architekturen (GB200) stellen strenge Anforderungen an die CDU:

- **Filterung:** NVIDIA verlangt eine strenge Filterung, um die Mikrokanäle der GPUs zu schützen. Die Ausstattung unserer Maschinen mit 25-Mikron-Patronenfiltern übertrifft die Standards und verhindert so die Abnutzung der internen Komponenten;
- **Durchsatzstabilität:** Die CDU muss plötzliche Änderungen ohne Druckschwankungen von mehr als 5 % bewältigen können, eine kritische Spezifikation für HGX/GB200-Systeme;
- **Kommunikationsprotokolle:** native Unterstützung für Modbus TCP/IP, BACnet oder SNMP, wodurch eine umfassende, in das Cluster-Managementsystem integrierte Fernmessung ermöglicht wird;
- **Redundanz:** redundantes N+1-Pumpensystem und redundante Steuerungen zur Erfüllung der Anforderungen an hohe Verfügbarkeit.

## 7 EFFIZIENZ, NACHHALTIGKEIT UND WÄRMERÜCKGEWINNUNG

### 7.1 Über die PUE hinaus: die Definition des ERF

Die Energieeffizienz (Power Usage Effectiveness, PUE) war jahrelang der alleinige Maßstab für die Effizienz von Rechenzentren. Mit dem Aufkommen flüssigkeitsgekühlter Rechenzentren sehen wir uns jedoch mit einer Situation konfrontiert, die durch einen doppelten Trend gekennzeichnet ist: Der PUE-Wert nähert sich zunehmend der Eins, während sowohl die Temperaturen als auch die Leistungsaufnahmen in den Rechenzentren tendenziell steigen, was die Rückgewinnung der erzeugten Wärme ebenso einfach wie notwendig macht.

An dieser Stelle reicht die PUE allein nicht mehr aus, um die „tatsächlichen“ Auswirkungen eines Rechenzentrums zu beschreiben, sondern muss durch einen KPI ergänzt werden, der dessen „Kreislaufwert“ quantifizieren kann, d. h. wie viel der erzeugten Wärme zurückgewonnen und wiederverwendet wird: Dies führt zur Definition des Energy Reusage Factor (ERF).

**ERF = Wiederverwendete Energie / Gesamtenergie des Rechenzentrums**

Während die PUE lediglich misst, wie viel Energie „verschwendet“ wird, misst der ERF, wie viel Energie wieder in das System zurückgeführt wird: Der Paradigmenwechsel ist deutlich – weg vom Modell „Wärme als Abfall“, hin zu „Wärme als Ressource“.

Je höher also der Anteil der zurückgewonnenen und wiederverwendeten Energie ist, desto niedriger ist der ERF-Wert.

### 7.2 Strategien zur Wärmerückgewinnung

Bei der Flüssigkeitskühlung ist die Rückgewinnung der von der IT-Last erzeugten Wärme einfacher als bei der Luftkühlung. Tatsächlich erreicht die Rücklauftemperatur der Sekundärflüssigkeit Werte nahe oder sogar über 40 °C, was sowohl die direkte Wiederverwendung als auch die Einspeisung in eine Hochtemperatur-Wärmepumpe ermöglicht.

#### DISTRICT HEATING

Der Primärkreislauf der CDU wird an eine Hochtemperatur-Wärmepumpe angeschlossen, die das Fernwärmenetz versorgt.

Ein 10-MW-KI-Cluster kann etwa 2000 bis 3000 moderne Haushalte mit Wärme versorgen: In vielen europäischen Ländern ermöglicht dies dem Rechenzentrum, staatliche Fördermittel zu erhalten oder die Steuern auf CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch zu senken.

#### INDUSTRIEPROZESSE / LANDWIRTSCHAFT 4.0

Neben der Fernwärme eignet sich die rund um die Uhr konstante Mitteltemperaturwärme für eine Vielzahl weiterer Anwendungen:

- **Hydroponik-Gewächshäuser:** Aufrechterhaltung der idealen Temperatur für den intensiven Anbau bei gleichzeitiger Senkung der Heizkosten;
- **Trocknungs- oder Vorwärmanlagen in industriellen Prozessen,** die Warmwasser für Wasch- oder chemische Vorbereitungsphasen benötigen;

- **Beheizung von Schwimmbädern.**

#### OPTIMIERUNG DER LOKALEN INFRASTRUKTUR

Wenn keine externen Netze vorhanden sind, kann die Wärme genutzt werden:

- um die Effizienz des Rechenzentrums selbst zu verbessern;
- um Verwaltungsbüros und Lagerräume zu beheizen;
- um das Brauchwasser für angrenzende Gebäude vorzuwärmen.

### 7.3 Rechtlicher Rahmen

Der Einsatz von Flüssigkeitskühlung und die Umsetzung von Strategien zur Maximierung des **ERF (Energy Reuse Factor)** sind heute wesentliche Voraussetzungen für die Einhaltung neuer internationaler Richtlinien und für den Zugang zu den Kapitalmärkten.

#### DIE EU-ENERGIEEFFIZIENZRICHTLINIE (EED)

Mit der Überarbeitung der Energieeffizienzrichtlinie 2023/1791 (EED) wurden beispiellose Berichtspflichten und Transparenzanforderungen für die Branche eingeführt:

- **Verpflichtung zur Wärmerückgewinnung:** Die Delegierte Verordnung (EU) 2024/1364 verpflichtet Rechenzentren mit einer Nennleistung von mehr als 1 MW, Kosten-Nutzen-Analysen für die Nutzung von Abwärme über Fernwärmenetze oder andere industrielle Anwendungen durchzuführen, wobei der Mindest-ERF bei 0,20 liegt;
- **Europäische Datenbank:** Ab 2024 müssen Betreiber von Rechenzentren mit einer Leistung von über 500 kW ihre KPIs, darunter PUE, WUE und ERF, jährlich auf der europäischen Plattform zur Überwachung der Effizienz von Rechenzentren veröffentlichen;
- **Grüne Taxonomie der EU:** Die Flüssigkeitskühlung stellt eine der „Schlüsseltechnologien“ dar, die die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte erleichtern, die erforderlich sind, um eine Investition gemäß den technischen Kriterien der EU-Taxonomie (Verordnung 2020/852) als „nachhaltig“ einzustufen.

#### DEKARBONISIERUNG VON SCOPE 2 UND SCOPE 3

Die Integration von Direct-to-Chip-Systemen wirkt sich unmittelbar auf die im **GHG Protocol (Green House Gas Protocol)** festgelegte Strategie zur Dekarbonisierung von Unternehmen aus:

- **Reduzierung von Scope 2-Emissionen (indirekte Emissionen aus eingekaufter Energie):** Die hohe Eigeneffizienz der Flüssigkeit senkt den Energiebedarf für die Kühlung drastisch (PUE unter 1,1) und reduziert damit die durch den Strombezug verursachten Emissionen;
- **Reduzierung von Scope 3-Emissionen (Wertschöpfungskette und Kreislaufwirtschaft):** Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ermöglicht die Integration von Wärmerückgewinnungssystemen dem Rechenzentrum, sich von einem energieintensiven Verbraucher zu einem aktiven Lieferanten von Wärmeenergie für die Gemeinschaft zu entwickeln und so sogenannte „Avoided Emissions“ (vermiedene Emissionen) zu generieren. Auch wenn diese Maßnahmen laut

GHG Protocol mathematisch gesehen keine Tonnen von CO<sub>2</sub> aus dem Scope 3 des Unternehmens abziehen, zeugt ihre Berichterstattung im Rahmen der CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) von einem regenerativen Geschäftsmodell und einer industriellen Symbiose.

Dieser zirkuläre Ansatz verringert die Risiken des regulatorischen Wandels, verbessert das ESG-Rating erheblich und erleichtert den Zugang zu Förderinstrumenten wie Green Bonds, wodurch die Infrastruktur zu einem vorrangigen Anlageobjekt für institutionelle Investoren wird, die auf langfristige Nachhaltigkeit ausgerichtet sind.

## 8 OPERATIVE HERAUSFORDERUNGEN, WARTUNG UND SICHERHEIT

### 8.1 Chemische Überwachung und Kontrolle des PG25

Die chemische Stabilität des PG25 ist entscheidend für die Verhinderung von galvanischer Korrosion und „Biofouling“: Daher ist mindestens halbjährlich eine Probenahme der Flüssigkeit im Sekundärkreislauf erforderlich, um Folgendes zu überwachen:

- **Glykolgehalt:** um sicherzustellen, dass Frostschutz und thermische Eigenschaften konstant bleiben;
- **Alkalitätsreserve (pH-Wert):** Ein Absinken des pH-Werts deutet auf eine Oxidation des Glykols hin, das sauer werden und Metalle angreifen kann. Der ideale pH-Wert sollte zwischen 8,0 und 9,5 liegen;
- **Konzentration der Inhibitoren:** Die Passivierungsmittel für Kupfer und Stahl müssen aktiv sein.

Es ist wichtig, das Nachfüllen des Sekundärkreislaufs korrekt durchzuführen: Jede Flüssigkeitsnachfüllung muss mit einer vorverdünnten Mischung in Industriequalität erfolgen, während die Zugabe von unbehandeltem Leitungswasser die elektrische Leitfähigkeit und die Reinheit des Kreislaufs beeinträchtigen würde.

### 8.2 Normalwartung der CDU

Das Vorhandensein von Mikrokanälen in den Kühlplatten (mit Spalten von weniger als 200 Mikron) macht die Filterung zum wichtigsten Wartungsschritt.

- **Duplex-Korbfilter in der CDU:** Die Wartung der 25-Mikron-Filter erfolgt über die Überwachung des Differenzdrucks. Ein Anstieg des Differenzdrucks deutet auf eine Verstopfung der Kartusche hin. Dank der Duplex-Konfiguration ist es möglich, Wartungsarbeiten am System im laufenden Betrieb durchzuführen, indem die Filter nacheinander über die Absperrventile isoliert werden, ohne den Maschinenbetrieb zu unterbrechen;
- **Entgasung:** In der Leitung eingeschlossene Luft kann zu lokaler Erosion führen; daher ist es unerlässlich, die ordnungsgemäße Funktion der automatischen Entlüftungsventile regelmäßig zu überprüfen.

### 8.3 Wartung der Server

Die Wartung eines modernen Direct-to-Chip-Systems (DTC) ist auf Schnelligkeit und Einfachheit ausgelegt und gewährleistet gleichzeitig die Betriebskontinuität.

#### **HOT-SWAP-VORGÄNGE**

Das Herzstück der Wartungsfreundlichkeit sind die UQD-Schnellkupplungen (Universal Quick Disconnects). Diese Steckverbinder wurden speziell so konzipiert, dass sie von Natur aus „tropffrei“ sind, wodurch das Risiko minimiert wird, dass PG25 auf die Server oder allgemein in den White Space tropft, und gleichzeitig verhindert wird, dass sich

Luftblasen im Kreislauf ansammeln. Darüber hinaus ist es dank der Modularität der Racks und der Verteiler, die mit Absperrventilen für jeden Steckplatz ausgestattet sind, möglich, gezielt einzugreifen und nur den von der Wartung betroffenen Server zu isolieren, ohne Durchfluss und Druck an den anderen Knoten zu beeinträchtigen.

#### **VERMEIDUNG VON FLÜSSIGKEITSVERLUSTEN**

Die vorbeugende Wartung umfasst die Überprüfung der internen Hydraulikleitungen im Gehäuse sowie der Dichtungen, um möglichen Flüssigkeitsverlusten vorzubeugen:

- **Leckerkennung:** Die flüssigkeitsgekühlten Racks sind mit flächigen oder punktförmigen Sensoren ausgestattet, die am Boden des Gehäuses angebracht sind und bei abnormalen Feuchtigkeitswerten ein Alarmsignal senden sowie den Server abschalten können;
- **Verbiegung der Schläuche:** Bei Wartungsarbeiten ist unbedingt darauf zu achten, dass die internen flexiblen Leitungen (FEP/EPDM) nicht verdreht oder geknickt sind, da dies den lokalen hydraulischen Widerstand erhöhen könnte;
- **Dichtungen (O-Ringe) der Schnellkupplungen:** Die O-Ringe müssen regelmäßig überprüft werden. Die Verwendung hochwertiger Dichtungen verringert den Wartungsaufwand, doch häufiges Ein- und Ausschalten kann eine leichte Schmierung mit PG25-kompatiblen Produkten erforderlich machen, um Risse im Gummi zu vermeiden, die zu Mikroleckagen führen würden.

## 9 ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN – RECHENZENTREN MIT 800 V

### 9.1 Der aktuelle Stand: 400-V-Wechselstromversorgung

Derzeit erfolgt die Stromverteilung in Rechenzentren mit 400 V Wechselstrom im Raum und mit 48 V Gleichstrom auf Rack-Ebene. Das Aufkommen von KI-Clustern mit einer Leistungsdichte von über 150 kW/Rack führt jedoch dazu, dass die derzeitige Architektur auf Basis von 48-V-Sammelschienen (Kupferstromschienen) aus elektromechanischer Sicht stark beansprucht wird.

Bei einem 100-kW-Rack erfordern die 48-V-Sammelschienen eine Stromstärke von mehr als 2000 A. Um solche Stromstärken zu bewältigen, müssen entweder mehrere parallele Sammelschienen oder eine einzige Sammelschiene mit größerem Querschnitt verwendet werden: Dies führt in beiden Fällen zu hohen Kosten, beträchtlichen Abmessungen und einer komplexeren Verkabelung.

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die Joule-Verluste entlang der Verteilungsleitungen innerhalb des Racks, die eine zusätzliche „parasitäre“ Wärmebelastung verursachen, quadratisch mit steigendem Strom zunehmen: Durch eine Erhöhung der Spannung lassen sich diese Verluste daher minimieren.

### 9.2 Die 800-V-Gleichstromversorgung

Die aus dem Bereich der Hochleistungs-Elektrofahrzeuge (EV) stammende 800-V-Gleichstromversorgung entwickelt sich zur ultimativen Lösung für Rechenzentren der nächsten Generation. Die Vorteile sind vielfältig:

- **Reduzierung der Querschnitte bei den Sammelschienen:** Bei einer Spannung von 800 V statt 48 V sinkt der zur Versorgung eines 100-kW-Racks erforderliche Strom auf etwa 120 A. Dies ermöglicht den Einsatz leichter und flexibler Leiter, wodurch der Platz im Gehäuseinneren optimiert und Wartungsarbeiten erleichtert werden;
- **Übertragungseffizienz:** Da die Leitungsverluste mit dem Quadrat der Spannung abnehmen, steigert die Umstellung von 400 V auf 800 V die Effizienz der Stromverteilung auf über 99 %, wodurch die von den Kabeln erzeugte Wärme drastisch reduziert wird;
- **Vereinfachung der Umwandlungskette:** Die HGÜ-Architektur (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) macht Zwischenstufen wie Gleichrichtung und Wechselstrom-Gleichstrom-Umwandlung überflüssig. Weniger Umwandlungsstufen bedeuten weniger ausfallanfällige Komponenten und eine geringere Gesamtwärme, die abgeführt werden muss.

### 9.3 Flüssigkeitsgekühlte PSU

Die extrem hohe Leistungsdichte der neuen 800-V-Netzteile (Power Supply Units – PSU) macht eine Zwangsbelüftung überflüssig. Daher sind die PSU der neuen Generation mit Kühlplatten ausgestattet, die direkt an den von der CDU gesteuerten Sekundärkreislauf angeschlossen

sind: Die Flüssigkeitskühlung ist nicht mehr nur CPUs und GPUs vorbehalten, sondern erstreckt sich auf fast alle Komponenten im Rack. Durch diese Änderung steigt der Anteil der aus der Flüssigkeit abgeführten Wärme auf etwa 95–98 %, wodurch der Bedarf an Luftkühlung drastisch sinkt.

### 9.4 Herausforderungen der 800-V-Technologie: Sicherheit und Umweltmanagement

Der Betrieb mit 800 V Gleichstrom bringt strenge Sicherheitsanforderungen mit sich:

- **Lichtbogenschutz:** Bei solchen Spannungen können Fehler anhaltende Lichtbögen auslösen. Es ist daher unerlässlich, Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelungen und ultraschnellen Schutzsystemen zu verwenden, die den Fehler innerhalb von Millisekunden isolieren können;
- **Kondensationsvermeidung:** Die Nähe von 800-V-Leitern zu Flüssigkeitskreisläufen erfordert eine einwandfreie Kontrolle des Taupunktes. Die CDU fungiert als Sicherheitsgarant: Durch die Regulierung der Vorlauftemperatur zur Vermeidung von Kondensat beugt sie dem Risiko katastrophaler Kurzschlüsse in HGÜ-Umgebungen vor.

## 10 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Jahr 2026 können wir mit Sicherheit sagen, dass die Flüssigkeitskühlung endgültig aus ihrer HPC-Nische herausgetreten ist und sich zum einzigen technischen und infrastrukturellen Paradigma entwickelt hat, das die KI-Revolution tragen kann.

Da Prozessoren die „kritische“ Schwelle von 1000 W längst überschritten haben, ist die Luftkühlung für Rechenzentren kein gangbarer Weg mehr: Der Übergang zur Flüssigkeitskühlung ist nicht mehr nur eine Option, sondern eine Notwendigkeit.

Diese Revolution markiert auch den Einzug der Nachhaltigkeit in die KPIs von Rechenzentren: Die Wärmerückgewinnung wird sowohl zu einer gesetzlichen Verpflichtung als auch zu einem finanziellen Hebel und verändert das Paradigma von „Wärme als Abfall“ zu „Wärme als Ressource“.

Auf diese Weise wandelt sich das Rechenzentrum von einem „isolierten Bunker“ zu einem echten „urbanen Energieökosystem“ – leise und integriert, das ganze Stadtteile mit Wärme versorgen kann.

11 ANHANG A

# 11.1 Chemische Aufbereitung der Flüssigkeit und Materialverträglichkeit

## ANFORDERUNGEN AN DAS FÜLLWASSER

Vor der Vermischung mit Propylenglykol muss das verwendete Wasser extrem hohe Reinheitsstandards erfüllen. Die Verwendung von Leitungswasser, auch enthärtetem, ist aufgrund des Gehalts an Chloriden und Sulfaten strengstens untersagt.

Typische Eigenschaften der Wärmetransferflüssigkeiten PG 25 und PG 55:

Eigenschaft	Leistung
Aussehen	Klar und frei von Partikeln
pH-Wert der Flüssigkeit	8,0 – 10,5 Der pH-Wert der Flüssigkeit hängt von der Zusammensetzung der Korrosionsinhibitoren ab und kann bei Verwendung der Organosäure-Technologie (OAT) niedriger sein
Nicht korrigierte Restalkalität	>4 ml, bezogen auf die verdünnte Flüssigkeit Messung der Pufferkapazität der Flüssigkeit
Kupfer	<2 ppm
Eisen	<2 ppm
Gesamthärte	<20 ppm Hohe Härtewerte deuten auf die Verwendung von Wasser minderer Qualität hin
Chloride	<5 ppm Hohe Chloridwerte deuten auf die Verwendung von Wasser minderer Qualität hin
Sulfate	<10 ppm Hohe Sulfatwerte deuten auf die Verwendung von Wasser minderer Qualität hin

## EIGENSCHAFTEN DES PG25

Die Betriebsflüssigkeit muss eine Mischung aus Propylenglykol in Industriequalität und einem vorformulierten Korrosionsinhibitorpaket für verschiedene Metalle sein.

### Funktionen der Inhibitoren:

- Kupferpassivatoren (Azole):** Bilden einen monomolekularen Film auf den Kupferoberflächen der Kühlplatten, um Oxidation und Ionenauslösung zu verhindern;
- pH-Puffer:** Halten die Flüssigkeit in einem alkalischen Milieu (pH-Wert zwischen 8,5 und 10,5), um die Säuren zu neutralisieren, die durch den natürlichen Abbau des Glykols im Laufe der Zeit entstehen;
- Inhibitoren für Stahl/Edelstahl:** Schützen die Kollektoren und Komponenten der CDU vor Lochfraßkorrosion.

### Risiken des Abbaus (Glykolyse)

Bei Einwirkung hoher Temperaturen und Sauerstoff kann Propylenglykol zu organischen Säuren (Glykolsäure, Ameisensäure) abgebaut werden. Dadurch sinkt der pH-Wert, und die Flüssigkeit wird zu einem korrosiven Mittel. Die Überwachung der Alkalitätsreserve ist die einzige Möglichkeit, dieses Phänomen vorherzusagen.

## MATERIALVERTRÄGLICHKEIT

Um eine Lebensdauer von 20 Jahren zu gewährleisten, muss der Sekundärkreis strenge Anforderungen hinsichtlich der galvanischen Verträglichkeit erfüllen: Die Wechselwirkung zwischen Metallen mit unterschiedlichen elektrochemischen Potenzialen ist die Hauptursache für Ausfälle in Liquid-to-Chip-Systemen.

### Zugelassene Materialien:

- Metalle und Metalllegierungen:** Kupfer, Messing mit <15 % Zink, Edelstahl, Nickel, Legierungen mit hohem Nickelgehalt, Chrom, Titan, B-Ni-6, BCuP-2, BCuP-3, BCuP-4, BCuP-5, TF-H60F;
- Elastomere, Kunststoffe und andere Materialien:** EPDM, Viton A, Viton GF, Viton ETP, FEP, PTFE, PP, HDPE, PEEK, Loctite 567.

### Verbotene Materialien:

- Aluminium (auch eloxiert):**äußerst anfällig für galvanische Korrosion in Gegenwart von Kupfer;
- Verzinkter Stahl (galvanisiert):**Zink reagiert mit den Glykol-Inhibitoren, wodurch Schlamm und feste Ablagerungen entstehen;
- Zinn/Blei-Lote:**können durch Glykol-Inhibitoren chemisch angegriffen werden;
- Schwefelhaltiges EPDM:**kann Verbindungen freisetzen, die Kupfer angreifen.

## 12 ANHANG B

### 12.1 Betriebsprotokoll für Inbetriebnahme und Abnahme

Das vorliegende Protokoll legt die Standardverfahren für die Prüfung und Inbetriebnahme der Coolant Distribution Units und der dazugehörigen hydraulischen Infrastruktur fest. Ziel ist es, die mechanische Integrität und das dynamische Verhalten der Steuerungssysteme vor der Integration der IT-Last zu überprüfen sowie den Kreislauf allgemein zu reinigen.

#### PHASE 1: DRUCKPRÜFUNG DES KREISLAUFS

Bevor der Sekundärkreislauf mit PG25 befüllt wird, muss das System einer Druckprüfung unterzogen werden, um eventuelle Undichtigkeiten festzustellen.

- **Vorgehensweise:** die CDU über die Absperrventile von den Racks trennen; - den Sekundärkreislauf mit wasserfreiem Stickstoff auf einen Druck von 1,5-mal dem Auslegungsbetriebsdruck (in der Regel 6–8 bar) beaufschlagen;
- **Dauer: 24 Stunden;**
- **Akzeptanzkriterium:** Druckabfall <1 % nach Kompensation der Umgebungstemperatur.

**Hinweis:**Die Verwendung von Stickstoff anstelle von Druckluft ist zwingend erforderlich, um das Eindringen von Feuchtigkeit und ölhaltigen Verunreinigungen in den Kreislauf zu verhindern.

#### PHASE 2: SPÜLEN UND PASSIVIEREN

Das Spülen (Flushing) des Kreislaufs ist ein entscheidender Vorgang: Werden Schweißrückstände, Metallspäne und Bearbeitungsöle nicht ordnungsgemäß aus dem Kreislauf entfernt, können sie die Kühlplatten innerhalb kürzester Zeit zerstören.

Protokoll für die Spülung im geschlossenen Kreislauf:

1. **Server-Bypass:** Stellen Sie sicher, dass alle Racks/Server umgangen werden. Die Waschflüssigkeit darf während dieser Phase niemals durch die Kühlplatten fließen;
2. **Reinigungslösung:** Verwenden Sie entmineralisiertes Wasser, dem ein spezielles Dispergiermittel für Multimetall-Kreisläufe zugesetzt wurde;
3. **Spülgeschwindigkeit:** Die Pumpen der CDU müssen mit maximaler Frequenz betrieben werden, um eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 1,5 m/s zu gewährleisten, die erforderlich ist, um schwere Ablagerungen zu den Filtern der CDU zu befördern;
4. **Filterinspektion:** Überwachung des Differenzdrucks an den Korbfiltern. Reinigen Sie die Kartuschen etwa alle zwei Stunden, bis keine Ablagerungen mehr zu sehen sind;
5. **Passivierung:** Nach dem Waschen muss ein Passivierungsmittel aufgetragen werden, das einen Schutzfilm auf den Innenflächen aus Kupfer und Edelstahl bildet und so eine sofortige Oxidation verhindert, bevor die Behälter endgültig mit PG25 befüllt werden.

#### PHASE 3: ENDGÜLTIGE BEFÜLLUNG UND ENTLÜFTUNG

Beim Befüllen mit der Betriebsflüssigkeit (PG25) ist darauf zu achten, dass es nicht zur Kavitation der Pumpen kommt.

- **Befüllvorgang:** Verwenden Sie die Hilfspumpeneinheit (Nachfüllpumpe), um das System vom tiefsten Punkt aus zu befüllen. Die CDU muss mit einem Ladeanschluss für die Nachfüllpumpe ausgestattet sein; die Pumpe muss direkt in die CDU eingesetzt werden.
- **Entgasungszyklus:** Aktivieren Sie die Pumpen der CDU mit variabler Drehzahl (Zyklen 20 %–80 %–20 %), um die Luftblasen von den Rohrwänden zu lösen.
- **Überwachung der Entlüftungen:** Überprüfen Sie jedes Entlüftungsventil an den höchsten Stellen des Rack-Verteilers manuell. Ein ordnungsgemäß entlüftetes System muss akustisch „geräuschlos“ sein.

#### PHASE 4: VALIDIERUNG DER STEUERUNGSLOGIKEN

##### Prüfung des PID-Regelkreises

- **Vorgehensweise:** Simulieren Sie die Änderung der IT-Last, indem Sie die Absperrventile verschiedener Racks öffnen und schließen.
- **Überprüfung:** Die CDU muss die Drehzahl der Pumpen so regeln, dass der Differenzdruck auf dem eingestellten Sollwert gehalten wird, wobei die Abweichung maximal 5 % betragen darf.

##### Prüfung der Taupunktsteuerung

- **Vorgehensweise:** Verwenden Sie einen tragbaren Dampferzeuger in der Nähe der Feuchtigkeitssensoren der CDU, um die gemessene Luftfeuchtigkeit künstlich zu erhöhen.
- **Erwartete Reaktion:** Die CDU sollte das Mischventil im Primärkreislauf zwangsweise öffnen, um die Vorlauftemperatur über den berechneten Taupunkt anzuheben, und gleichzeitig den optischen/Fernalarm auslösen.

##### Failover der Pumpen

- **Vorgehensweise:** Simulieren Sie einen elektrischen Fehler an Pumpe 1 (Auslösung des Schutzschalters).
- **Überprüfung:** Pumpe 2 (im Standby-Modus) muss innerhalb von 5 Sekunden anlaufen, um einen kontinuierlichen Durchfluss zu gewährleisten, ohne dass die Vorlauftemperatur den kritischen Alarmschwellenwert überschreitet.

#### PHASE 5: ABNAHMEPRÜFUNG UND ÜBERGABE

Die letzte Phase umfasst die Unterzeichnung der Abnahmedokumente und die Übermittlung der Telemetriedaten.

- **BMS-Integration:** Stellen Sie sicher, dass alle Modbus-/BACnet-Punkte vom zentralen Managementsystem des Rechenzentrums ausgelesen werden können.
- **Überprüfung der Nenndurchflussmengen:** Messung mit einem externen Ultraschall-Durchflussmesser an jedem Rack-Anschluss,

um sicherzustellen, dass die hydraulische Verteilung ausgeglichen ist.

- **Abschlussunterlagen:** Übergabe der hydraulischen Bestandszeichnung, der Protokolle zur chemischen Erstanalyse der Flüssigkeit und des Kalibrierungszertifikats für die Sensoren.



Viale Spagna, 31/33 - 35020 Tribano (Padova) - Italien

Tel. +39 049 9588511 - Fax +39 049 9588522

IT02191431200

info@hiref.it - www.hiref.it

