

# Hybrid Cooling im Rechenzentrum

Luft- und Wasserkühlung für hohe Leistungsdichten

Mit Beispiel einer skalierbaren Kühlwasserarchitektur von GB200 auf Vera Rubin

Berlin, 25.06.2026

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Einleitung.....                                                                 | 3  |
| Über Luft abführbare Leistungsdichten gemäß VDI 2054.....                       | 3  |
| Kühlwassersysteme für hohe Leistungsdichten - Liquid Cooling .....              | 4  |
| Direct-to-Chip Cooling .....                                                    | 4  |
| Rear Door Heat Exchanger .....                                                  | 4  |
| Immersion Cooling .....                                                         | 4  |
| Warum Luftkühlung weiterhin gebraucht wird .....                                | 5  |
| Hybrid Cooling als realistischer Zielzustand .....                              | 6  |
| Retrofit im Bestand.....                                                        | 6  |
| Abwärmenutzung .....                                                            | 7  |
| Checkliste.....                                                                 | 8  |
| Fazit: Kühlstrategie statt Technologiewechsel.....                              | 9  |
| Skalierbares Liquid Cooling am Beispiel GB200 zu Vera Rubin .....               | 10 |
| „Grey Area“ .....                                                               | 11 |
| Grunddaten des Beispiels, CD <sub>2</sub> bis Rückkühlung .....                 | 11 |
| „White Area“ .....                                                              | 13 |
| Beispielhaftes Layout einer Datenhalle.....                                     | 13 |
| Anhang.....                                                                     | 16 |
| Verfügbarkeitsklassen nach VDI 2054 vs. TIER- Klassen des 4ptime Institute..... | 16 |
| Glossar .....                                                                   | 17 |

## Einleitung

Steigende Rack-Leistungen, KI-Workloads und Effizienzanforderungen verändern die Kühlung von Rechenzentren grundlegend. Im Bestand führt der Weg jedoch selten zu einer vollständigen Ablösung der Luftkühlung, sondern zu hybriden Kühlstrategien. Kühlung wird zum strategischen Planungsthema.

Die Kühlung von Rechenzentren war lange Zeit vor allem eine Frage der zuverlässigen Klimatisierung: ausreichend Kälteleistung bereitstellen, Luftmengen sicherstellen, Redundanzen einhalten und Hotspots vermeiden.

Dieses Bild verändert sich deutlich. Mit steigenden Leistungsdichten, neuen IT-Architekturen und zunehmenden Anforderungen an Energieeffizienz wird Cooling zu einer strategischen Planungsaufgabe.

Insbesondere KI-, HPC- und GPU-basierte Anwendungen führen zu Rack-Leistungen, die mit klassischen luftgekühlten Konzepten nur noch eingeschränkt oder mit erheblichem Aufwand beherrschbar sind. Gleichzeitig bestehen viele Rechenzentren nicht aus Neubauten auf der grünen Wiese, sondern aus gewachsenen Bestandsstrukturen. Dort sind Platz, elektrische Anschlussleistung, Kälteverteilung, Rückkühlung, Doppelbodenhöhen, Luftführung und Redundanzkonzepte häufig bereits definiert und nur in einem begrenzten Maß erweiterbar.

Für Betreiber, Generalunternehmer und Planer entsteht daraus eine zentrale Frage: Wie lässt sich ein bestehendes Rechenzentrum auf höhere Leistungsdichten vorbereiten, ohne Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Erweiterbarkeit zu gefährden?

Die Antwort liegt in vielen Fällen nicht in einem vollständigen Technologiewechsel, sondern in einer hybriden Kühlstrategie.

Liquid Cooling wird dabei eine immer wichtigere Rolle spielen. Es ersetzt die Luftkühlung jedoch nicht vollständig. Vielmehr wird die Kombination aus Luft- und Flüssigkeitskühlung als Hybrid-Cooling zum realistischen Zielbild vieler Bestandsrechenzentren.

## Über Luft abführbare Leistungsdichten gemäß VDI 2054

Die über Luft abführbaren IT-Lasten sind auf die untenstehenden Leistungsdichten begrenzt. Zu beachten sind zudem die zugehörigen Luftführungskonzepte.

| LUFTFÜHRUNG & TYPISCHE LEISTUNGSDICHTEN                                                                                    |                                                         |                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| KONZEPT                                                                                                                    | BESCHREIBUNG                                            | TYPISCHE LEISTUNGSDICHTE*         |
|  <b>Ungeführte Luftführung</b>            | Vermischung von Zu- und Abluft ohne Führung             | <b>&lt; 500 W/m<sup>2</sup></b>   |
|  <b>Doppelbodenlüftung</b>                | Zuluft unter dem Doppelboden, Austritt durch Lochbleche | <b>&lt; 1.000 W/m<sup>2</sup></b> |
|  <b>Warm-/Kaltgangsystem</b>              | Trennung von Zu- und Abluft durch Anordnung der Racks   | <b>&lt; 1.500 W/m<sup>2</sup></b> |
|  <b>Eingehauste Systeme (Containment)</b> | Umschließung von Kalt- oder Warmgang                    | <b>&lt; 4.000 W/m<sup>2</sup></b> |

\* Richtwerte gemäß VDI 2054 (abhängig von Rahmenbedingungen und Systemauslegung)

## Kühlwassersysteme für hohe Leistungsdichten- Liquid Cooling

Liquid Cooling ist keine neue Idee, gewinnt aber durch aktuelle IT-Lasten stark an praktischer Bedeutung. Wo Prozessoren, Beschleuniger und Serverplattformen hohe Wärmeströme auf engem Raum erzeugen, stößt Luft als Kühlmedium an Grenzen. Wasser beziehungsweise wasserbasierte Kühlmedien können Wärme deutlich effizienter aufnehmen und transportieren. Das macht Liquid Cooling insbesondere bei hohen Rack-Dichten attraktiv.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ansätze beschrieben.

### Direct-to-Chip Cooling

Beim Direct-to-Chip Cooling werden zentrale Wärmequellen wie CPU oder GPU über Cold Plates direkt mit Flüssigkeit gekühlt.

### Rear Door Heat Exchanger

Rear Door Heat Exchanger führen die Wärme über wassergekühlte Rücktüren am Rack ab und lassen die Server selbst weiterhin luftgekühlt arbeiten.

### Immersion Cooling

Immersion Cooling geht noch weiter: IT-Komponenten werden in ein dielektrisches Fluid eingebracht.

Bei allen genannten Verfahren kommen Coolant Distribution Units (CDU) als Systemtrennung zum Einsatz, die als Schnittstelle zwischen IT-seitigem Flüssigkeitskreislauf (white area) und gebäudetechnischer Kälte- beziehungsweise Rückkühlinfrastruktur (grey area) dienen.

Diese Technologien eröffnen neue Möglichkeiten. Sie können hohe Leistungsdichten ermöglichen, Luftmengen reduzieren, Rücklauftemperaturen erhöhen und damit auch Free Cooling oder perspektivisch Abwärmenutzung begünstigen. Dennoch ist Liquid Cooling kein isoliertes Produkt, das lediglich anstelle eines Klimageräts eingebaut wird. Es verändert Schnittstellen, Betriebsprozesse, Wartungskonzepte, Monitoring, Sicherheitsbetrachtungen und teilweise auch die IT-Beschaffung.

Gerade deshalb sollte Liquid Cooling nicht als pauschale Antwort auf jede Kühlungsfrage verstanden werden. Es ist ein leistungsfähiges Werkzeug für bestimmte Lastprofile, insbesondere High-Density-IT, HPC und KI- Anwendungen aber kein Allheilmittel für das gesamte Rechenzentrum.

## Warum Luftkühlung weiterhin gebraucht wird

Die Diskussion um Liquid Cooling wird häufig so geführt, als stünden Luft- und Flüssigkeitskühlung in direktem Wettbewerb. In der Praxis ist diese Gegenüberstellung zu kurz gegriffen. Auch in Rechenzentren mit flüssigkeitsgekühlter Hochleistungs-IT bleibt Luftkühlung in vielen Bereichen notwendig.

Ein wesentlicher Grund liegt in der IT-Hardware selbst. Nicht alle Komponenten eines Servers werden aufgrund der Leistungsdichte flüssigkeitsgekühlt.

Während CPU und GPU über Cold Plates angebunden sein können, bleiben Speicher, Netzteile, Mainboard-Komponenten, Laufwerke oder Netzwerkschnittstellen häufig weiterhin auf Luftströme angewiesen.

Hinzu kommen Netzwerkkomponenten, Storage-Systeme, Peripherie, Sicherheits- und Steuerungstechnik sowie klassische Serverplattformen, die nicht für Liquid Cooling ausgelegt sind.

Zudem bestehen viele Rechenzentren aus gemischten IT-Landschaften. Neben neuen High-Density-Racks stehen klassische Enterprise-Systeme, Virtualisierungsumgebungen, Storage-Infrastrukturen, Netzwerkbereiche und Legacy-Systeme.

In der Realität werden die Flächen eines Rechenzentrums mischbelegt, KI-Cluster werden flüssigkeitsgekühlt geplant, bleibt der übrige IT-Bestand oft luftgekühlt.

Entsprechend der TIER- Klassen ist die Verfügbarkeit auch nach VDI 2054 zu berücksichtigen, siehe Anhang.

Jedoch ist ebenso die Modularität hinsichtlich der tatsächlich arbeitenden Leistungsdichte aufgrund von Effizienzvorgaben (PUE) und insbesondere die Skalierbarkeit bezogen auf höhere Leistungsdichten sind zu berücksichtigen.

Der Einfluss dieser Punkte auf die grey area der Rückkühlebene ist aufgrund der Dimensionen und der statischen Gewichte der Anlagentechnik noch höher als in der white area des Datacenters und muss daher sehr genau betrachtet werden.

Auch aus betrieblicher Sicht bleibt Luftkühlung relevant. Sie übernimmt Raumkonditionierung, Restlastabfuhr, Temperaturstabilisierung in Mischbereichen und kann bei Wartung, Teillast oder Übergangsbetrieb eine wichtige Rolle spielen. Containment, Luftführung, Druckmanagement und die Vermeidung von Bypass- oder Rezirkulationsluft bleiben daher weiterhin zentrale Effizienzhebel.

Die Zukunft liegt deshalb nicht in der einfachen Ablösung der Luftkühlung. Sie liegt in der intelligenten Kombination beider Kühlmedien.

## Hybrid Cooling als realistischer Zielzustand

Hybrid Cooling beschreibt die gezielte Kombination unterschiedlicher Kühltechnologien innerhalb eines Rechenzentrums. Dabei werden nicht alle Bereiche nach demselben Prinzip behandelt. Stattdessen orientiert sich die Kühlstrategie an Lastprofilen, IT-Typen, Gebäudebestand, Betriebsanforderungen und Entwicklungsperspektiven.

Ein typisches Zielbild kann beispielsweise so aussehen: Klassische IT-Bereiche bleiben luftgekühlt, werden aber durch verbesserte Luftführung, optimiertes Containment und angepasste Regelung effizienter betrieben. Neue High-Density-Zonen erhalten Direct-to-Chip Cooling oder Rear Door Heat Exchanger. CDUs werden so platziert, dass sie technisch erreichbar, wartbar und hydraulisch sinnvoll eingebunden sind. Die übergeordnete Kälte- und Rückkühlinfrastruktur wird daraufhin geprüft, ob sie die neuen Temperaturniveaus und Volumenströme abbilden kann.

Der Vorteil hybrider Konzepte liegt vor allem in ihrer Anpassungsfähigkeit. Bestandsrechenzentren müssen selten vollständig umgebaut werden. Stattdessen können einzelne Zonen gezielt ertüchtigt werden. Das reduziert Eingriffe in den laufenden Betrieb, senkt Umsetzungsrisiken und ermöglicht eine stufenweise Transformation.

Für Auftraggeber ist dabei entscheidend, nicht vorschnell eine Technologie auszuwählen. Am Anfang sollte nicht die Frage stehen: „Welche Liquid-Cooling-Lösung kaufen wir?“ Sondern: „Welche IT-Lasten erwarten wir, welche Reserven hat der Bestand, welche Betriebsrisiken bestehen und welcher Zielzustand ist wirtschaftlich sinnvoll?“

Erst aus dieser Analyse ergibt sich, ob klassische Luftkühlung optimiert, Rear Door Heat Exchanger eingesetzt, Direct-to-Chip Cooling integriert oder eine Kombination mehrerer Ansätze gewählt werden sollte. Gerade im Bestand ist nicht die theoretisch leistungsfähigste Kühltechnologie entscheidend, sondern die am besten integrierbare Lösung.

## Retrofit im Bestand

Ein Cooling-Retrofit ist kein einfacher Austausch einzelner Komponenten. Es ist die Transformation eines laufenden technischen Systems. Das macht die Planung anspruchsvoll.

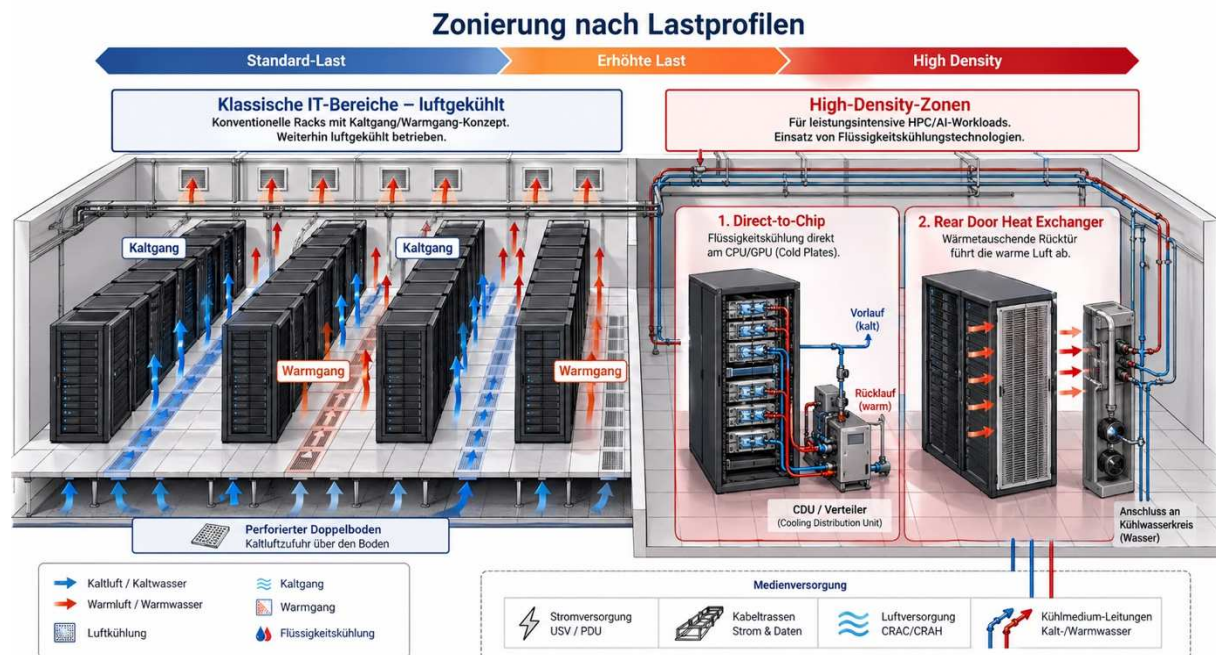
Vor der Auswahl konkreter Produkte muss zunächst der Bestand verstanden werden. Dazu gehören die vorhandene Kälteerzeugung, Rückkühlung, Hydraulik, Luftführung, Stromversorgung, Gebäudeautomation, Redundanzstruktur und bauliche Situation. Ebenso wichtig sind die tatsächlichen und zukünftigen IT-Lastprofile. Durchschnittswerte reichen dafür oft nicht aus. Entscheidend sind Rack-Leistungen, Lastverteilung, Gleichzeitigkeiten, Wachstumsprognosen und die Frage, welche IT-Systeme tatsächlich für Liquid Cooling geeignet sind.

Bei Retrofit-Projekten zeigen sich häufig praktische Grenzen: Es fehlt Platz für CDUs, Rohrtrassen sind schwer nachrüstbar, Doppelböden sind nicht für zusätzliche Infrastruktur ausgelegt, bestehende Kaltwassernetze arbeiten mit ungeeigneten Temperaturniveaus oder Volumenströmen, und Wartungsflächen sind knapp. Hinzu kommen Anforderungen an Leckageerkennung, Wasserqualität, Werkstoffverträglichkeit, Druckhaltung, Brandschutz und Betriebssicherheit.

Gerade diese Schnittstellen machen Datacenter Cooling zu einer interdisziplinären Aufgabe. IT, TGA, Elektroplanung, Brandschutz, Gebäudeautomation, Facility Management und Betrieb müssen frühzeitig zusammengebracht werden. Wird Liquid Cooling nur als IT-Beschaffung oder nur als TGA-Maßnahme betrachtet, entstehen schnell Lücken im Gesamtkonzept.



Eine technologieoffene Machbarkeitsstudie kann hier entscheidend sein. Sie klärt, welche Kühlstrategie technisch möglich, betrieblich beherrschbar und wirtschaftlich sinnvoll ist. Sie verhindert, dass einzelne Komponenten optimiert werden, ohne das Gesamtsystem zu verbessern.



## Abwärmenutzung

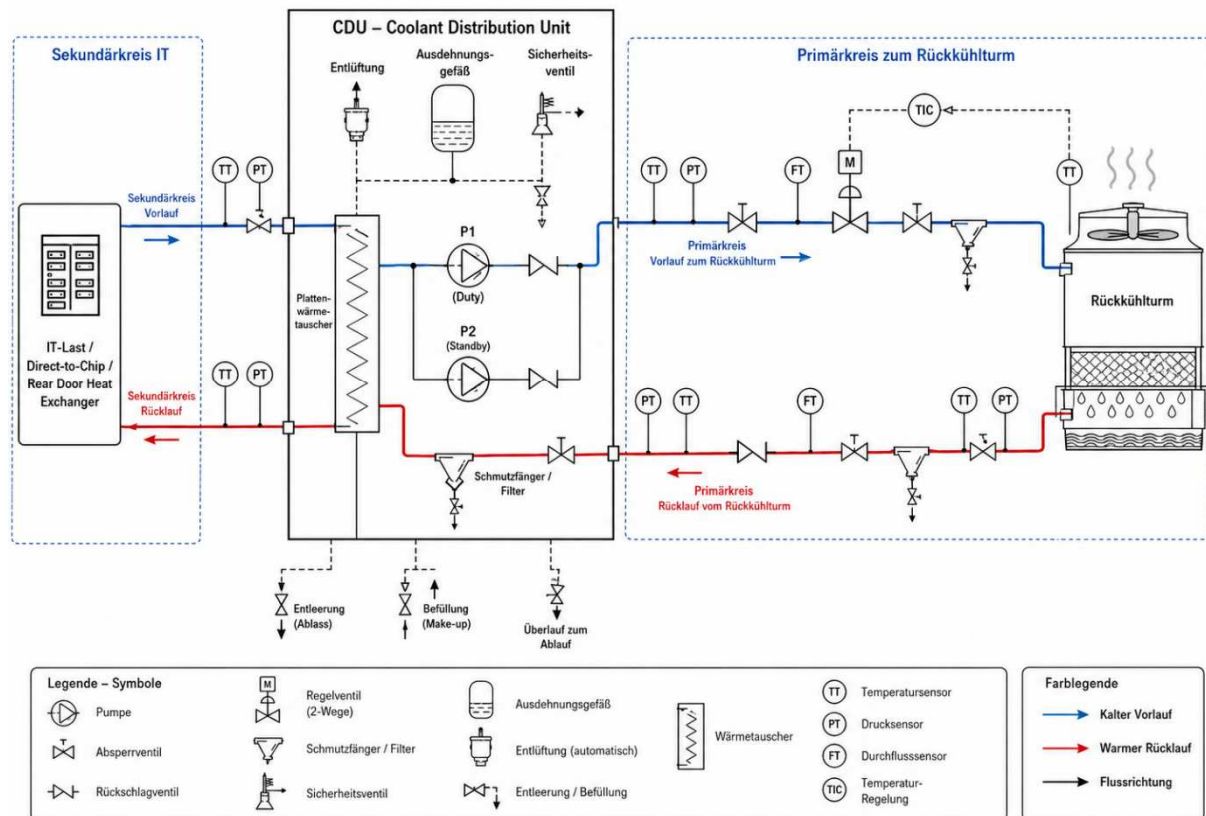
Mit Liquid Cooling rückt auch die Abwärmenutzung stärker in den Fokus. Der Grund ist einfach: Je höher das nutzbare Temperaturniveau der abgeführten Wärme, desto attraktiver wird ihre Weiterverwendung.

Flüssigkeitsgekühlte Systeme können unter geeigneten Bedingungen höhere Rücklauftemperaturen ermöglichen als klassische luftbasierte Raumkühlung. Dadurch verbessern sich grundsätzlich die Voraussetzungen für Wärmerückgewinnung, Wärmepumpenkonzepte oder die Einspeisung in lokale Wärmenetze.

Trotzdem sollte Abwärmenutzung nicht als automatischer Nebeneffekt von Liquid Cooling verstanden werden. Entscheidend ist nicht nur die technische Verfügbarkeit von Wärme, sondern auch die passende Wärmesenke. Gibt es in räumlicher Nähe einen ganzjährigen Wärmebedarf? Passt das Temperaturniveau? Wer betreibt die Übergabestation? Wie werden Verfügbarkeit, Messung, Abrechnung und Verantwortlichkeiten geregelt? Ist die Nutzung wirtschaftlich tragfähig?

Für Auftraggeber bedeutet das: Abwärmenutzung sollte früh in der Kühlstrategie mitgedacht werden, insbesondere bei der Wahl von Temperaturniveaus und Systemarchitekturen. Sie sollte aber als eigenes Energiekonzept bewertet werden. Für viele Projekte ist sie ein wichtiges Zukunftsthema, jedoch nicht der alleinige Treiber der Kühltechnologie.

## CDU im R+I-Schema mit Anbindung an den Rückkühlturm



## Checkliste

Was Auftraggeber vor einem Cooling-Retrofit klären sollten

Vor einem Cooling-Retrofit sollten Auftraggeber insbesondere folgende Fragen beantworten:

- Welche Rack-Leistungen bestehen heute und welche werden mittelfristig erwartet?
  - Alternativ: Welche allgemeinen Anwendungen sind geplant?
- Welche IT-Systeme sind tatsächlich für Liquid Cooling geeignet?
  - Alternativ: Welche HPC-/ KI-/ High- Density- Anwendungen sind geplant?
- Welche thermischen, hydraulischen und elektrischen Reserven bestehen im Bestand?
  - Alternativ: Ermittlung über Quick-Check
- Wo können CDUs, Rohrtrassen, Wärmetauscher und Monitoringtechnik sinnvoll platziert werden?
- Welche Anforderungen gelten an Redundanz, Verfügbarkeit und Wartung?
  - TIER- und Verfügbarkeitsklassen festlegen
- Welche Maßnahmen sind im laufenden Betrieb realistisch umsetzbar?



- Ist der Platzbedarf für Leckageerkennung, Wasserqualität und Druckhaltung vorhanden?
- Soll bzw. muss beim Free Cooling die Abwärmenutzung betrachtet werden?
  - Gesetzliche Vorgaben nach EnEfG und kommunales Wärmekonzept beachten
- Welche Schnittstellen bestehen zu IT, Elektro, Brandschutz, MSR und Gebäudeautomation?
  - Projektübliche Schnittstellen oder darüber hinaus
- Welche Zielarchitektur soll in fünf bis zehn Jahren erreicht werden?

Diese Fragen zeigen: Eine zukunftsfähige Kühlstrategie entsteht nicht aus einer Einzelentscheidung für Luft oder Flüssigkeit. Sie entsteht aus der Bewertung des Gesamtsystems.

## Fazit: Kühlstrategie statt Technologiewechsel

Liquid Cooling wird für Rechenzentren deutlich wichtiger. Besonders bei High-Density-IT, KI-Anwendungen und HPC-Workloads machen eine Flüssigkeitskühlung erforderlich, da die hohen Leistungsdichten mit klassischer Luftkühlung nicht mehr zu handhaben sind.

Dennoch bleibt Luftkühlung weiter erforderlich, wenn auch im geringeren Ausmaß. Sie bleibt für viele Komponenten, Mischlasten, Raumkonditionierung, Redundanz und Bestandsbereiche weiterhin notwendig.

Für Rechenzentren, ob im Neubau oder Bestand ist Hybrid Cooling deshalb der realistische Zielzustand. Es verbindet die Leistungsfähigkeit flüssigkeitsbasierter Kühlung mit den weiterhin notwendigen Eigenschaften luftbasierter Systeme.

Entscheidend ist dabei nicht, möglichst schnell eine neue Technologie einzuführen, sondern die passende Kühlstrategie für den konkreten Standort zu entwickeln.

Wer ein Rechenzentrum zukunftsfähig machen will, sollte daher nicht mit der Produktentscheidung beginnen.

Am Anfang stehen Quick Checks. Lastprofile, Bestandsanalyse, Betriebsanforderungen, Erweiterbarkeit und Schnittstellen sind zu erarbeiten. Erst daraus ergibt sich, welche Kombination aus Luftkühlung, Wasserkühlung, Rückkühlung, Regelung und möglicher Abwärmenutzung sinnvoll ist.

- Luftkühlung -> Kompressorgetriebene Klimakälte -> Energieintensiv, Abwärmenutzung über den Rückkühlkreis der Kältemaschine über zusätzliche Anlagentechnik möglich
  - Umluftkühlung über CRAC über Direktverdampfung: Perspektivische Nutzungsrisiken aufgrund F-Gase Verordnung
  - Umluftkühlung über CRAH über Klimakaltwasserleitungen: VL 6°C/ RL: 12°C
- Wasserkühlung -> pumpengesteuerte Kreisläufe über Rückkühler -> geringer Energieeinsatz, hohes Abwärmenutzungspotential, VL 25°- 35°C/ RL: 35°- 50°C

- Trockene Rückkühlung ist zu bevorzugen, da Verdunstungskühlung mit höheren Investitionen in die Anlagentechnik und höheren Risiken und Auflagen im Betrieb verbunden ist.

Es bleiben immer beide Systeme erforderlich, jedoch ändert sich die Gewichtung je nach Leistungsdichte der IT- Last auf der Rechenzentrumsfläche.

Zukunftsfähiges Datacenter Cooling entsteht nicht durch die Entscheidung für ein einzelnes Kühlmedium, sondern durch eine belastbare Strategie, die IT-Lasten, Gebäudebestand, Betriebssicherheit und Energieeffizienz zusammenführt.

## Skalierbares Liquid Cooling am Beispiel GB200 zu Vera Rubin

Die Kühlwasser- Grundarchitektur, die für Grace-Blackwell bzw. GB200-SuperPODs von NVIDIA verwendet wird, soll perspektivisch auch für Vera Rubin genutzt werden.

Das heißt konkret:

- gleiche grundsätzliche TCS-Struktur
- vergleichbare CDU-Schnittstellen
- vergleichbare Rack-Drop-Schnittstellen
- skalierbar über Anzahl und Dimensionierung der CDUs
- keine vollständige Neuplanung der hydraulischen Grundstruktur erforderlich

Für Betreiber bedeutet das: Wer seine Infrastruktur bereits „liquid-cooling ready“ für GB200 plant, kann sie vorausschauend so auslegen, dass spätere Vera-Rubin-Systeme integriert werden können.

Erläuterung „liquid-cooling ready“ für NVIDIA SuperPOD-Referenzarchitekturen

Gemeint ist eine Infrastruktur, die technisch vorbereitet ist für Hochleistungs-IT mit Direct-to-Chip-Kühlung.

Dazu gehören typischerweise:

- ausreichend Kälteleistung bzw. Rückkühlleistung
- geeignete Vor- und Rücklauftemperaturen
- passende Wasserqualität bzw. Fluid-Spezifikation
- ausreichende Volumenströme
- definierte Druckverhältnisse
- Redundanzkonzept
- geeignete CDU-Anbindung
- Platz für CDUs, Rohrleitungen, Ventile, Sensorik und Wartung
- standardisierte Rack-Drop-Anschlüsse
- Mess-, Regel- und Monitoringkonzept

Liquid-Cooling-Readiness ist weniger eine einzelne Geräteentscheidung als eine infrastrukturelle Vorplanung. Entscheidend ist, dass TCS, CDU-Schnittstellen, Verteilerkonzept und Rack-Drops so modular und standardisiert ausgelegt werden, dass spätere GPU-Generationen mit höheren Wärmelasten integriert werden können.

## „Grey Area“

### Grunddaten des Beispiels, CD<sub>2</sub> bis Rückkühlung

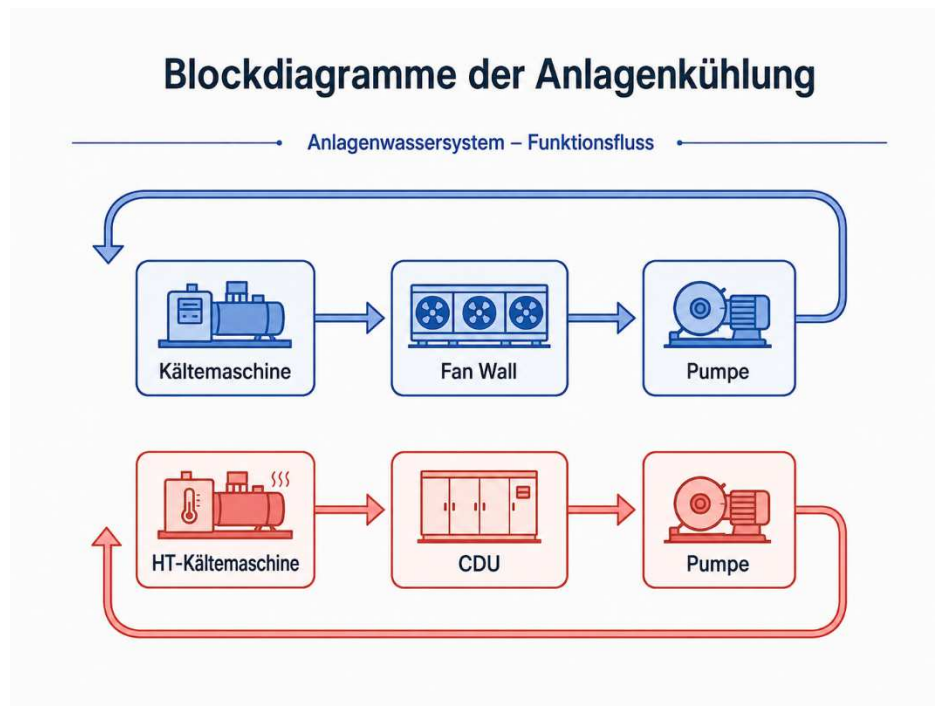
Eine Grundlage der Architektur ist u.a. ein Verteiler- bzw. Sammlersystem für Vor- und Rücklauf. Von dort werden CDUs oder Rack-Drops angebunden (TCS- Manifold). Über diese Verteiler kann man die Leistungen über unterschiedliche NVIDIA-Generationen skalieren, ohne die Grundarchitektur zu ändern.

Des Weiteren werden die Pumpen über Frequenzumrichter gesteuert, um auf unterschiedliche Lastanforderungen, wie z.B. Teillastbetrieb bei geringer Auslastung des Rechenzentrums und perspektivische Laststeigerungen durch performantere Rack-Architekturen reagieren zu können.

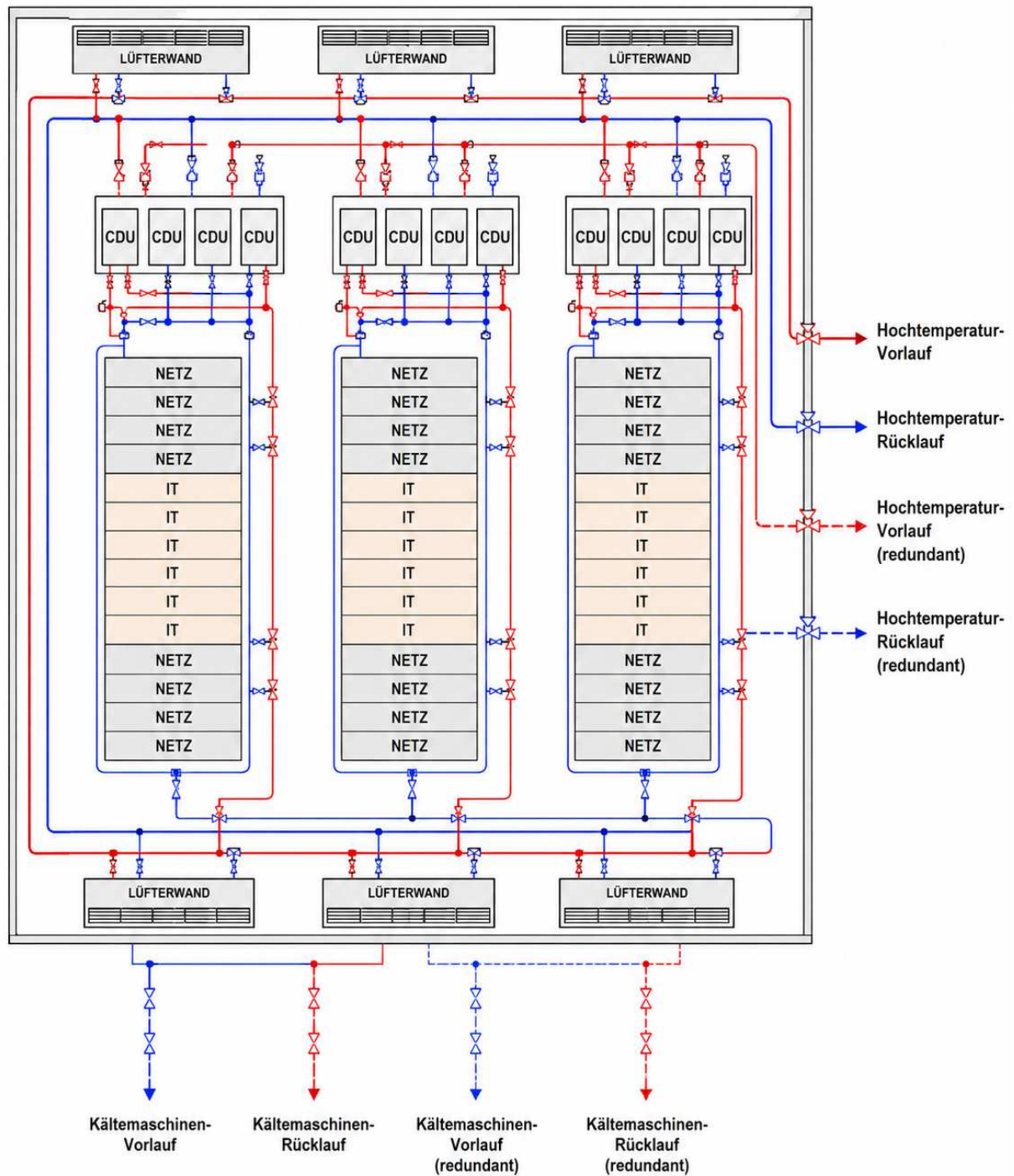


## „White Area“

Beispielhaftes Layout einer Datenhalle

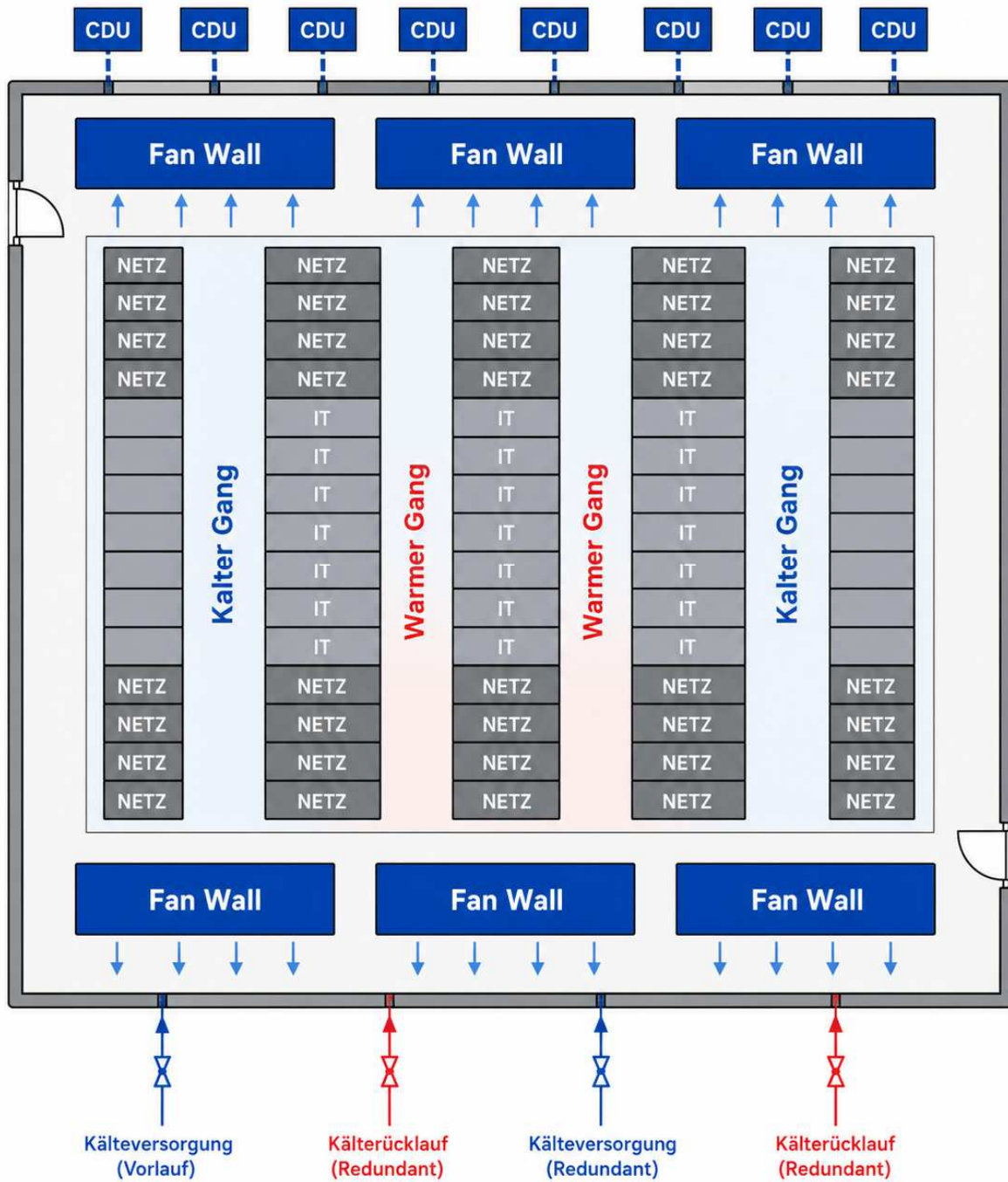


## Rohrleitungsnetz der Datenhalle





## Layout der Datenhalle



## Anhang

### Verfügbarkeitsklassen nach VDI 2054 vs. TIER- Klassen des Uptime Institute

Die Verfügbarkeitsklassen der VDI 2054 und die TIER-Klassen des Uptime Institute verfolgen ein ähnliches Ziel:

Die Beschreibung der Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit eines Rechenzentrums.

Allerdings gibt es einen wichtigen Unterschied:

- VDI 2054 betrachtet speziell die Lüftungs-, Klima- und Kühlsysteme (LÜKK/ HVAC).
- TIER I–IV bewertet die gesamte Infrastruktur eines Rechenzentrums inkl. Stromversorgung, Kühlung, Verteilung, Wartbarkeit etc.

Deshalb sind die Klassen nicht 1:1 identisch, aber gut vergleichbar.

| VDI 2054        | Charakteristik                                  | Typische Redundanz                  | TIER-Klasse                     | Beschreibung/<br>Rechenzentrumstyp                                              |
|-----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Klasse A</b> | Keine Redundanz                                 | N                                   | <b>TIER I</b>                   | Einfachste Infrastruktur ohne Redundanz,<br>z.B. kleines Serverraumkonzept      |
| <b>Klasse B</b> | Einfache Redundanz                              | N+1                                 | <b>TIER II</b>                  | Teilweise redundante Komponenten,<br>z.B. Mittelstand / Enterprise              |
| <b>Klasse C</b> | Erweiterte Redundanz + automatische Umschaltung | N+1 auch für kritische Teilbereiche | <b>zwischen TIER III und II</b> | Wartung teilweise ohne Abschaltung möglich,<br>z.B. Colocation / KRITIS         |
| <b>Klasse D</b> | Vollständige Parallelredundanz                  | 2N / Concurrent Operation           | <b>TIER IV</b>                  | Höchste Verfügbarkeit ohne Betriebsunterbrechung,<br>z.B. Hyperscaler / Banking |

## Glossar

| Englisch                        | Deutsch                        | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adiabatic Cooling</b>        | Adiabate Kühlung               | Kühlverfahren, bei dem Wasser verdunstet und dadurch Luft abgekühlt wird. ASHRAE setzt den Begriff eng mit Evaporative Cooling (adiabate Verdunstungskühlung) gleich.                                                                                                                                            |
| <b>Air-Side Economization</b>   | Luftseitige Freikühlung        | Nutzung kühler Außenluft zur direkten oder indirekten Kühlung des Rechenzentrums. Bei direkter luftseitiger Freikühlung wird Außenluft in den IT-Bereich eingebracht; bei indirekter luftseitiger Freikühlung erfolgt die Wärmeübertragung über Wärmeräder, Heat Pipes oder Plattenwärmeübertrager.              |
| <b>Water-Side Economization</b> | Wasserseitige Freikühlung      | Nutzung kühler Außenluft zur Abkühlung eines Flüssigkeitskreislaufs, der anschließend über Luft-Wasser-Wärmeübertrager, AHUs oder CRAHs die Rechenzentrumsluft kühlt. Vorteil: Außenluft wird nicht direkt in den IT-Bereich eingebracht, wodurch Feuchte- und Luftqualitätsrisiken besser beherrschbar bleiben. |
| <b>Economization</b>            | Freikühlung                    | Übergeordneter ASHRAE-Begriff für die Nutzung von Außenluft beziehungsweise Außenbedingungen zur Kühlung, ohne oder mit reduziertem Betrieb der mechanischen Kälteerzeugung.                                                                                                                                     |
| <b>Free Cooling</b>             | Freie Kühlung / Freikühlung    | Wirtschaftliche Nutzung niedriger Außentemperaturen zur Kältebereitstellung. Free Cooling beschreibt den Vorgang insbesondere im Zusammenhang mit gekühltem Wasser, das zur Luftkühlung im Rechenzentrum genutzt wird.                                                                                           |
| <b>Evaporative Cooling</b>      | Verdunstungskühlung            | Adiabate Kühlung durch Verdunstung von Wasser. Dabei wird fühlbare Wärme der Luft in latente Wärme des Wasserdampfs umgewandelt. Im Rechenzentrum relevant bei adiabaten Systemen, offenen Kühltürmen oder hybriden Rückkühlern.                                                                                 |
| <b>Chiller</b>                  | Kältemaschine / Wasserkühlsatz | Maschine, die einem Flüssigkeitskreislauf Wärme entzieht, meist über einen Kompressions- oder Absorptionskälteprozess. Das gekühlte Wasser kann anschließend über Wärmetauscher Luft oder Komponenten kühlen.                                                                                                    |
| <b>Direct Expansion (DX)</b>    | Direktverdampfung              | Klassische Kälteanlage, bei der das Kältemittel direkt im Verdampfer Wärme aufnimmt. Im Rechenzentrum typisch bei CRAC-Systemen oder DX-Klimageräten.                                                                                                                                                            |

| Englisch                                    | Deutsch                                                     | Bedeutung                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>HVAC</b>                                 | Heizung, Lüftung, Klima /<br>Raumluft- und Klimatechnik     | Sammelbegriff für Heating, Ventilating and Air Conditioning.                                                                                                                                              |
| <b>Computer Room Air Conditioner (CRAC)</b> | 2 mluftklimagerät mit direkter Kälteerzeugung               | Klimagerät für Rechnerräume, typischerweise mit DX-Kältekreis (Direktverdampfer). CRAC-Geräte kühlen die 2 mluft des Rechenzentrums und führen sie dem Kaltgang oder Doppelboden wieder zu.               |
| <b>Computer Room Air Handler (CRAH)</b>     | 2 mluftkühlgerät mit Kaltwasserregister                     | Lufttechnisches Gerät zur Kühlung der Rechenzentrumsluft über ein Kaltwasserregister. CRAH-Systeme sind meist an eine zentrale Kaltwassererzeugung oder Rückkühlung angebunden.                           |
| <b>Air-Handling Unit (AHU)</b>              | RLT-Gerät /<br>Luftbehandlungsgerät                         | Gerät zur Luftförderung, Filterung, Kühlung, Erwärmung oder Feuchteregelung. Im ASHRAE-Kontext wird der Begriff auch für Systeme genutzt, die über Wasser-Luft-Wärmeübertrager Rechenzentrumsluft kühlen. |
| <b>Cooling Coil</b>                         | Kühlregister                                                | Luft-Wasser-Wärmeübertrager, über den Luft abgekühlt wird. In CRAH- oder AHU-Systemen strömt Luft über das Register, während Kaltwasser oder ein anderer Kälte Träger Wärme aufnimmt.                     |
| <b>Cold Aisle</b>                           | Kaltgang                                                    | Bereich vor den Serverracks, aus dem IT-Geräte ihre Kühlluft ansaugen. Cold Aisle beschreibt den Bereich mit den niedrigsten Lufttemperaturen im IT-Raum.                                                 |
| <b>Hot Aisle</b>                            | Warmgang                                                    | Bereich hinter den Serverracks, in den die erwärmte Abluft der IT-Geräte ausgeblasen wird. Nach ASHRAE treten dort typischerweise die höchsten Lufttemperaturen im IT-Raum auf.                           |
| <b>Hot Aisle / Cold Aisle Layout</b>        | Warmgang-/Kaltgang-Anordnung                                | Rack-Anordnung, bei der Serverfronten zueinander und Serverrückseiten zueinander ausgerichtet werden. Ziel ist die Trennung von kalter Zuluft und warmer Abluft.                                          |
| <b>Aisle Containment</b>                    | Gang-Einhausung                                             | Bauliche oder modulare Trennung von Warm- und Kaltluftbereichen. Sie reduziert Luftvermischung und verbessert Effizienz sowie Temperaturkontrolle.                                                        |
| <b>Ballroom Space</b>                       | Freier IT-Raumbereich /<br>ungerichteter<br>Raumluftbereich | Bereich im IT-Raum, der nicht eindeutig Kaltgang oder Warmgang ist. Je nach Einhausungsstrategie können dort Temperaturen zwischen Kalt- und Warmgangniveau auftreten können.                             |

| Englisch                      | Deutsch                                            | Bedeutung                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Grey Area</b>              | Technikbereich /<br>Infrastrukturbereich           | Bereich für IT-nahe Infrastruktur wie z.B. SV, Schaltanlagen, Batterieräume, Pumpenräume oder mechanische Anlagen. Diese Bereiche haben häufig andere thermische Anforderungen als der Serverraum. |
| <b>Raised Floor</b>           | Doppelboden                                        | Erhöhter Boden, der häufig als Luftverteilraum für gekühlte Zuluft genutzt wird. Die kalte Luft wird über perforierte Bodenplatten in den Kaltgang eingebracht.                                    |
| <b>Supply Air Plenum</b>      | Zuluftplenum                                       | Hohlraum, meist unter dem Doppelboden, der zur Verteilung der gekühlten Zuluft dient.                                                                                                              |
| <b>Exhaust Air</b>            | Abluft / Serverabluft                              | Von IT-Geräten erwärmte Luft, die in den Warmgang abgegeben wird. Moderne Server können bei hohen Eintrittslufttemperaturen Ablufttemperaturen von etwa 58 bis 60 °C erreichen.                    |
| <b>Inlet Air Temperature</b>  | Eintrittslufttemperatur                            | Temperatur der Luft am Eintritt in das IT-Gerät, also an der Serverfront. Sie ist zentral für die ASHRAE-Klassen A1 bis A4.                                                                        |
|                               |                                                    |                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Dry-Bulb Temperature</b>   | Trockenkugeltemperatur                             | Lufttemperatur ohne Berücksichtigung der Verdunstungskühlung. Wichtig für trockene Rückkühler und für die Bewertung der IT-Eintrittslufttemperatur.                                                |
| <b>Wet-Bulb Temperature</b>   | Feuchtkugeltemperatur                              | Temperaturmaß unter Berücksichtigung der Verdunstung. Besonders relevant für Kühltürme, Verdunstungskühlung und adiabate Rückkühlung.                                                              |
| <b>Dew Point</b>              | Taupunkttemperatur                                 | Temperatur, bei der Luftfeuchte kondensiert. Taupunktgrenzen zur Beschreibung zulässiger Feuchtebereiche für IT-Equipment.                                                                         |
| <b>Relative Humidity (RH)</b> | Relative Luftfeuchte                               | Verhältnis des aktuellen Wasserdampfgehalts zur maximal möglichen Feuchte bei gleicher Temperatur. Für Rechenzentren wichtig wegen Kondensations-, Korrosions- und elektrostatischer Risiken.      |
| <b>Thermal Transients</b>     | Thermische Übergangsvorgänge                       | Zeitlich begrenzte Temperaturänderungen, beispielsweise durch Lastwechsel, Freikühlbetrieb, HVAC-Ausfall oder Stromausfall.                                                                        |
| <b>Temperature Excursion</b>  | Temperaturabweichung /<br>Temperaturüberschreitung | Kurzzeitiges Verlassen des normalen Temperaturbereichs. Unter anderem bei Freikühlung oder Ausfällen der Kühlung.                                                                                  |

| Englisch                                  | Deutsch                                      | Bedeutung                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ride-Through Time</b>                  | thermische Überbrückungszeit                 | Zeitspanne, die nach Ausfall der Kühlung verbleibt, bevor IT-Geräte thermisch abschalten oder kritische Grenzwerte erreichen.                                                                                         |
| <b>Thermal Compatibility</b>              | thermische Kompatibilität                    | Abstimmung der thermischen Anforderungen unterschiedlicher Komponenten. Besonders wichtig, weil IT-Equipment, Rack-PDUs, PDU, Kabel und Schaltanlagen unterschiedliche Temperaturgrenzen und Auslegungslogiken haben. |
| <b>De-Rating</b>                          | Leistungsreduzierung / Derating              | Reduktion der zulässigen elektrischen Belastung bei höheren Umgebungstemperaturen. Besonders relevant für Stromverteilung, Busways, Kabel und Komponenten im Warmgang.                                                |
| <b>Natural Convection Cooling</b>         | natürliche Konvektionskühlung                | Kühlung ohne Ventilator, allein durch Dichteunterschiede und Luftbewegung infolge Erwärmung. Viele Stromverteilungskomponenten im Rechenzentrum sind auf natürliche Konvektion angewiesen.                            |
| <b>Forced Air Cooling</b>                 | erzwungene Luftkühlung                       | Kühlung durch aktive Luftförderung, etwa durch Serverlüfter oder Lüfter in Klimageräten. IT-Equipment wird typischerweise durch erzwungene Luftströmung gekühlt.                                                      |
| <b>Air Stream</b>                         | Luftstrom                                    | Strömungspfad der Luft. Wichtig, weil IT- und Stromversorgungskomponenten teilweise denselben Luftstrom teilen und dadurch thermisch gekoppelt sind.                                                                  |
| <b>Air-Side Economized Data Center</b>    | Rechenzentrum mit luftseitiger Freikühlung   | Rechenzentrum, bei dem kühle Außenluft direkt oder indirekt zur Kühlung der IT-Luft genutzt wird.                                                                                                                     |
| <b>Water-Side Economized Data Center</b>  | Rechenzentrum mit wasserseitiger Freikühlung | Rechenzentrum, bei dem Außenluft über einen Flüssigkeitskreislauf und Wärmeübertrager genutzt wird, ohne Außenluft direkt in den IT-Raum einzubringen.                                                                |
| <b>Open Cooling Tower Circuit</b>         | offener Kühlturmkreislauf                    | Rückkühlkreislauf, bei dem Wasser mit der Außenluft in Kontakt kommt. Die Leistung offener Kühlturmkreise hängt stark von der Feuchtkugeltemperatur ab.                                                               |
| <b>Closed-Circuit Cooler / Dry Cooler</b> | geschlossener Rückkühler / Trockenkühler     | Rückkühler, bei dem der Kühlkreislauf geschlossen bleibt. Die Leistung ist stärker an die Trockenkugeltemperatur gebunden.                                                                                            |

| Englisch                               | Deutsch                              | Bedeutung                                                                                                                                |
|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thermal Storage</b>                 | thermischer Speicher / Kältespeicher | Speicher, beispielsweise als Kaltwasser- oder Eisspeicher, der bei Ausfällen zusätzliche Überbrückungszeit schaffen kann.                |
| <b>Coolant Distribution Unit (CDU)</b> | Hydraulikstation mit Wärmeübertrager | Übergabestation mit Pumpen, Regelung, Filtration, Druckhaltung und Sensorik/ Monitoring zwischen Rückkühl- und IT-Rack-Flüssigkeitskreis |
| <b>Technology Cooling System (TCS)</b> | Kühlwassernetz                       | Kreislauf zwischen CD <sub>U</sub> und Rückkühler                                                                                        |