

Leitfaden für die Anwendung von indirekter Freier Kühlung

September 2026

HydroCool^{free}



Abbildung: KI-generiert mit ChatGPT (OpenAI); inhaltlich und redaktionell geprüft.

Leitfaden für die Anwendung von indirekter Freier Kühlung

Dieser Leitfaden bietet Hinweise und einen Überblick über die Konzeption, Planung und den Betrieb von indirekten Freien Kühlungssystemen (mit trockener Rückkühlung). Neben technischen Grundlagen und Systemkomponenten zeigt dieser auf, wie sich eine indirekte Freie Kühlung effektiv in bestehende oder neue Kältesysteme integrieren lässt, mit dem Ziel die betriebliche Energieeffizienz des Systems zu steigern, die betriebliche Versorgungssicherheit zu gewährleisten sowie die Betriebskosten zu senken.

Projektleitung und -bearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Martin Becker (*Projektleitung*)
Simon R. Wagner
Stephan Volkmer
Sebastian Haußer
Weicheng Chen

Institut für Gebäude- und Energiesysteme
Hochschule Biberach
Karlstraße 6-11
88400 Biberach

Projektbearbeitung:

Gerhard Frei
Mihaela Frei
Roland Handschuh (Refplan)

Ingenieurbüro für Kältetechnik
COOLPLAN
Trimbургstr. 2
81249 München



Zitierhinweis:

Wagner, S. R., Volkmer, S., Becker, M., Frei, G. und Handschuh, R. (2026). *Leitfaden für die Anwendung indirekter Freier Kühlung*. Whitepaper. Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, COOLPLAN. Forschungsprojekt Untersuchung optimierter Konzepte zur Nutzung der Freien Kühlung und Entwicklung von Planungstools und eines -leitfadens (Hydro-Coolfree), Förderkennzeichen 37819/01.

Online verfügbar unter: <https://www.hochschule-biberach.de/hydrocoolfree>

Danksagung:

Der vorliegende Leitfaden wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Untersuchung optimierter Konzepte zur Nutzung der Freien Kühlung und Entwicklung von Planungstools und eines -leitfadens (Hydro-Cool_{free})“ erstellt. Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Wir danken der DBU für die finanzielle Unterstützung und die Begleitung während der gesamten Projektlaufzeit.

gefördert durch



www.dbu.de

Förderkennzeichen: 37819/01

Projektlaufzeit: 04/2023 – 03/2026

Veröffentlichung Leitfaden: 09/2026

INHALT

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Freien Kühlung	1
2.1	Funktionsprinzip	1
2.2	Anwendungsfelder und Betriebszeitpotenziale	2
3	Konzeptionierung einer Freien Kühlung	3
3.1	Prozessanforderung	3
3.1.1	Kältelastprofil	3
3.1.2	Prozessstabilität	3
3.1.3	Temperaturspreizung.....	4
3.1.4	Systemtrennung & hydr. Weichen	4
3.1.5	Redundanz	4
3.2	Standort	5
3.2.1	Referenzstandort	5
3.2.2	Aufstellhinweise	5
3.3	Wirtschaftlichkeit und ROI	5
4	Planung	9
4.1	Wärmeträgerflüssigkeiten.....	9
4.2	Hydraulische Schaltungen	9
4.2.1	Benennungssystem von Einbindevarianten	10
4.2.2	Einbindevarianten mit 1-facher Wärmeübertragung.....	10
4.2.3	Serielle Einbindevarianten	11
4.2.4	Parallele Einbindungsvarianten	12
4.2.5	Variantenwahl bei reiner serieller und paralleler hyd. Einbindung	12
4.2.6	Kombinierte Einbindevarianten	13
4.3	Informationen zur Auslegung und Dimensionierung von Komponenten	13
4.3.1	Wärmeübertrager	13
4.3.2	Freikühler/Rückkühler	15
4.3.3	Pumpen.....	16
4.3.4	Hydraulische Weichen	17
4.3.5	Rohrleitungen, Dämmung.....	18
4.4	Hinweise zur energieeffizienten Betriebsführung.....	18
4.4.1	a) Einfluss der Verbraucher-Rücklauf Temperaturabsenkung auf Betrieb und Effizienz	19
4.4.2	b) Einfluss der Verbraucherrücklauf Temperaturregelung auf die Effizienz	20
4.4.3	c) Einfluss der unteren Systemtemperaturbegrenzung auf die Effizienz	20
4.4.4	d) Optimierung von Volumenströmen zur Steigerung der Effizienz.....	20
4.4.5	e) Einfluss der gewählten Umschaltbedingungen auf die Effizienz.....	21
4.4.6	f) Aufrechterhaltung des Simultanbetriebs von Freier Kühlung und Kältemaschine.....	22
5	Monitoring, Management & Kennzahlen	23
5.1	Energiemanagementprozess	23
5.2	Monitoring von Kälteanlagen systemen	25
5.3	Effizienzberechnung und messtechnischer Ausstattungsgrad	25

5.3.1	Bilanzraumdefinition nach VDMA 24247-7	26
5.3.2	Messtechnischer Ausstattungsgrad nach VDMA 24247-7	26
5.3.3	Effizienzkennzahlen nach VDMA 24247-7	26
5.4	Ergänzende Indikatoren zur Systemanalyse der Freien Kühlung	27
Glossar		III
A	Anhang: Kältetechnische Anwendungsfelder	V
B	Anhang: Grundlegende Einbindungsvarianten von Freier Kühlung	VI
C	Anhang: Optimierte Einbindungsvarianten von Freier Kühlung	X
D	Anhang: Wetterdaten des Referenzstandortes Würzburg	XI

1 EINLEITUNG

Steigende Energiepreise, verschärfte regulatorische Vorgaben und die Folgen des globalen Klimawandels erhöhen den Druck auf Betreiber technischer Anlagen, ihre Energieeffizienz kontinuierlich zu verbessern. Auch für Kälteanlagen besteht dabei hoher Handlungsbedarf. Denn der kältetechnische Sektor verursacht in Deutschland rund 14 % des jährlichen Strombedarfs [1] und verzeichnete zwischen 2008 und 2021 mit einem Zuwachs von 30 % in der Prozesskälte und 40 % in der Klimakälte die höchsten relativen Wachstumsraten unter allen Energieverbrauchssektoren [2]. Damit sind Unternehmen zunehmend gefordert, den Energieverbrauch ihrer Kälteanlagenssysteme messbar zu senken und Effizienzpotenziale systematisch zu erschließen. Die nachhaltige Ausrichtung der Prozesse ist dabei sowohl aus ökonomischen Gründen erforderlich als auch im Hinblick auf gesetzliche Anforderungen wie z.B. das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) [3] oder das Gebäudemodernisierungsgesetz (GModG) [4].

Die Integration einer indirekten Freien Kühlung kann insbesondere dann, wenn die Abwärme der Kälteerzeugung nicht genutzt werden kann, eine ökologisch und zugleich ökonomisch sinnvolle Möglichkeit bieten, den Energieverbrauch von Kälteanlagenssystemen deutlich zu reduzieren. Durch eine bedarfsgerechte Systemauslegung und die Ausnutzung klimatischer Rahmenbedingungen lassen sich gerade bei indirekten Systemen mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand erhebliche Effizienzpotenziale erschließen und eine deutliche Reduktion des Stromverbrauchs im Anlagenbetrieb erzielen.

Systembetrachtung im Leitfaden

Im Fokus dieses Leitfadens stehen Kälteanlagenssysteme mit indirekter Freier Kühlung, welche die Außenluft als Wärmesenke im trockenen Rückkühlbetrieb nutzen.

2 GRUNDLAGEN DER FREIEN KÜHLUNG

2.1 Funktionsprinzip

Das Grundprinzip der Freien Kühlung besteht darin, das kühlere Temperaturniveau der Umgebung, ohne mechanische Kälteerzeugung, zur Abfuhr von Wärme aus den Verbraucherstellen zu nutzen. Die Wärmeübertragung kann dabei entweder direkt oder indirekt an das Umgebungsmedium erfolgen.

Direkte Freie Kühlung

Bei der direkten Freien Kühlung erfolgt die Wärmeübertragung ohne hydraulische Trennung. Das Kühlmedium der Wärmesenke (hier: Außenluft) nimmt die Wärme der Verbraucher unmittelbar auf und gibt sie an die Umgebung ab.

Durch die direkte Nutzung des Wärmesenkenmediums kann das höchste energetische Effizienzpotenzial realisiert werden. Eine Aufbereitung des Mediums (bspw. Filterung, Trocknung) ist jedoch in der Regel erforderlich und kann die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Typische Anwendungsfelder sind z.B. die Gebäudetechnik (z. B. nachtszyklische Kühlung) sowie Hyper-Scale-Rechenzentren.

Indirekte Freie Kühlung

Bei indirekten Systemen erfolgt die Wärmeübertragung über Wärmeübertrager mit hydraulischer Trennung zwischen dem Wärmesenkenmedium und dem Kühl- bzw. Kaltwasserkreislauf.

Die Wärme der Verbraucher wird zunächst auf mindestens einen internen Medienkreislauf übertragen und anschließend über einen Freikühler bzw. Rückkühler an das Wärmesenkenmedium (i.d.R. die Umgebung) abgegeben. Ein beispielhafter schematischer Systemaufbau mit Benennungen, die im Leitfaden Verwendung finden, ist in **Abbildung 2-1** dargestellt.

Indirekte Kälteanlagensysteme zeichnen sich durch eine Vielzahl möglicher hydraulischer Einbindungsvarianten sowie spezifischer Merkmale der Freien Kühlung im Gesamtsystem aus. (s. **Kapitel 4.2**)

Aufgrund der hydraulischen Medienentkopplung sind indirekte Systeme mit Freier Kühlung im Vergleich zu direkten Systemen im Anwendungszweck vielseitiger und flexibler einsetzbar. Sie eignen sich insbesondere für sensible Anwendungen, wie beispielsweise in der Lebensmittel- und Pharmaproduktion oder im Reinraumbereich, sowie generell für

weitere prozesstechnische Kälteanwendungsfelder, bei denen die Kühlung zentral erzeugt und über Leitungstrecken an verschiedenen Wärmequellen bereitgestellt werden muss, etwa in Industrie oder Gewerbe.

2.2 Anwendungsfelder und Betriebszeitpotenziale

Die Freie Kühlung kann in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern wirtschaftlich eingesetzt werden, insbesondere wenn lange Jahresbetriebszeiten mit niedrigen Wärmesenkenktemperaturen oder entsprechend hohen Wärmequellentemperaturen vorliegen. Eine Übersicht möglicher kältetechnischer Anwendungsfelder mit den theoretisch nutzbaren Betriebsstunden für den Einsatz der Freien Kühlung ist in **Anhang A** tabellarisch dargestellt.

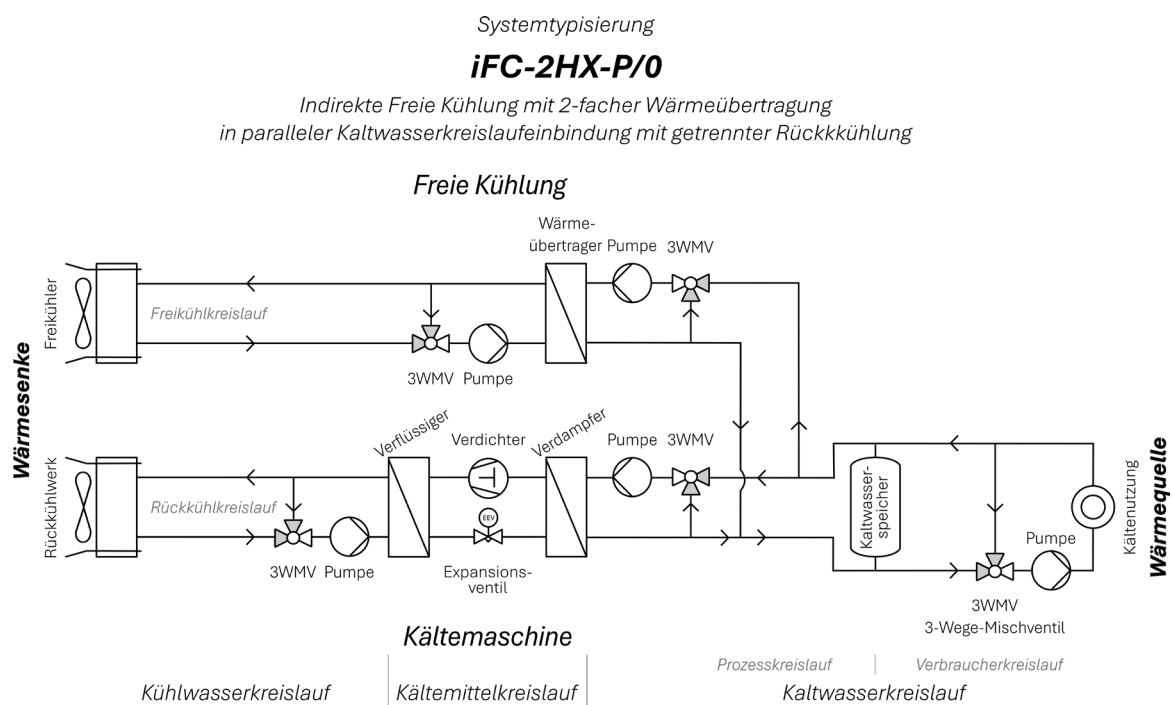


Abbildung 2-1: Bezeichnungen im Hydraulikschema am Beispiel des Systemtyps iFC-2HX-P/0

3 KONZEPTIONIERUNG EINER FREIEN KÜHLUNG

Bei der Konzeptionierung von Anlagen mit Freier Kühlung müssen prozessrelevante Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, die im Folgenden beschrieben werden.

3.1 Prozessanforderung

Die technischen Anforderungen an den Prozess (Kältenutzung) bestimmen die Parameter für die Bereitstellung des benötigten Kältebedarfs. Das Kältelastprofil, die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die maximal zulässigen zeitlichen Schwankungen der Betriebsparameter (insbesondere der Kaltwassertemperatur) haben in Verbindung mit den standortspezifischen Gegebenheiten, insbesondere dem jahreszeitlich bedingten Verlauf der Wärmesenkentemperatur, einen entscheidenden Einfluss auf die theoretische Nutzungsdauer des Freikühlbetriebs. Diese Faktoren bestimmen im Wesentlichen auch die maximal mögliche Energieeffizienz sowie die möglichen Betriebsweisen der Anlage.

3.1.1 Kältelastprofil

Das prozessbedingte Kältelastprofil ergibt sich direkt aus den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Kälteanwendung. Eine möglichst genaue Kenntnis des Kältelastprofils ist für eine hohe Energieeffizienz, die optimierte Betriebsführung und die wirtschaftliche Betrachtung von Systemen mit Freier Kühlung von großer Bedeutung. Das Kältelastprofil muss dabei immer in Bezug zur Wärmesenke gesehen werden. Treten Kältelasten zu Zeiten auf, in denen hohe Wärmesenkentemperaturen vorherrschen, so sind Speicher oder redundante Systeme notwendig. Fallen Kältelast und geringe Wärmesenkentemperaturen zeitlich zusammen, sind hohe Betriebsstunden der Freien Kühlung möglich.

3.1.2 Prozessstabilität

Die erforderliche Prozessstabilität, insbesondere die von Seiten der Wärmequelle maximal zulässigen Temperaturschwankungen im Kaltwasserkreislauf in Verbindung mit der Kältebereitstellung, sind eine Anforderung an die Art der Einbindung von Systemen mit Freier Kühlung. Auch dieser Aspekt steht in Verbindung zu Kältelastprofil und Wärmesenke. Kleine maximal zulässige Schwankungen der Temperaturanforderung in Verbindung mit häufigen Lastwechseln und schnell schwankenden Wärmesenkentemperaturen stellen höchste Anforderungen an die Erzeugerumschaltung und Nachregelgeschwindigkeit sowie an Komponenten der Kreisläufe.

Die Kaltwasserkreiseintrittstemperatur zum Verbraucher sollte unter Wahrung der Prozessstabilität auf das höchstmögliche Niveau eingestellt werden. Dies maximiert die Nutzungsdauer der Freien Kühlung und kann die Gesamteffizienz des Systems deutlich erhöhen.

Bei Anwendungen mit unterschiedlichen Prozessanforderungen (Kaltwasserkreiseintrittstemperaturen und Kältelasten) wird empfohlen, eine Trennung der Kaltwasserkreise und die daraus folgende Nutzungsdauer der Freien Kühlung zu überprüfen. Eine gängige Empfehlung ist hierbei eine Trennung der Kaltwasserkreise ab einem Temperaturunterschied von 4 K [5].

3.1.3 Temperaturspreizung

Temperaturspreizung beschreibt die Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur eines Prozesses und ist ein entscheidender Parameter für die Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit der Fluidkreisläufe. Eine größere Spreizung kann den Pumpen-Energiebedarf reduzieren (geringerer Volumenstrom) und die Nutzungsdauer der Freien Kühlung optimieren (siehe Gl. (1), Gl. (2)), während eine zu geringe Spreizung zu erhöhtem Volumenstrom und ineffizientem Betrieb führen kann.

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad (1)$$

$$P_{el,pu} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{\eta_{pu}} \quad (2)$$

Der erforderliche Volumenstrom $\dot{V}$ ergibt sich aus der zu übertragenden thermischen Leistung $\dot{Q}$, der spezifischen Wärmekapazität c_p , der Dichte ρ des Fluids und der Temperaturspreizung ΔT . Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe $P_{el,pu}$ wird durch den zu überwindenden Druckverlust Δp , den Volumenstrom $\dot{V}$ und den Pumpenwirkungsgrad η_{pu} bestimmt.

Die vom Prozess benötigte Spreizung ist ein wesentliches Merkmal für die Dimensionierung der Wärmeübertrager. Besonders im Teillastfall muss geprüft werden, dass beim Zielvolumenstrom die Spreizung so groß ist, dass die gewünschte Leistung übertragen werden kann.

3.1.4 Systemtrennung & hydr. Weichen

Wenn prozessbedingt eine Systemtrennung durch Wärmeübertrager für die Integration der Freien Kühlung notwendig ist, muss berücksichtigt werden, dass sich hierdurch die Nutzungsdauer der Freien Kühlung reduzieren kann.

Bei Wärmeübertragern ist dies auf die sogenannte „Grädigkeit“ zurückzuführen, also auf die verbleibende Temperaturdifferenz zwischen der Eintrittstemperatur des Kühlmediums und der Austrittstemperatur des zur Verbraucherkühlung bereitgestellten Mediums (Bezug: Gegenstrom-WÜ; Kälte).

Der betriebsseitige Einfluss einer hydraulischen Weiche hängt vom Verhältnis der primärseitigen und sekundärseitigen Volumenströme ab. Ist der primärseitige Volumenstrom größer, wird bereits abgekühltes Wasser in den Eintritt zur Freien Kühlung beige-mischt, wodurch die Eintrittstemperatur abgesenkt wird. Ist dagegen der sekundärseitige Volumenstrom größer, wird warmer Verbraucherrücklauf dem Verbrauchervorlauf beigemischt, wodurch die Eintrittstemperatur am Verbraucher ansteigt.

3.1.5 Redundanz

Redundanz beschreibt die gezielte Implementierung einer alternativen Kältebereitstellung, die aktiviert wird, wenn der primäre Kälteerzeuger nicht verfügbar ist. Sie gewährleistet die kontinuierliche und zuverlässige Prozessfähigkeit, indem sie Ausfälle kompensiert und eine unterbrechungsfreie Temperaturregelung sicherstellt. Technische Redundanz kann durch parallele Kühltssysteme, Umschaltstrategien oder zusätzliche Speicherkapazitäten realisiert werden, um die Betriebssicherheit und Systemstabilität zu maximieren.

Grundsätzlich muss geklärt werden, ob die Freie Kühlung als „Redundantes System“ oder als Ersatz für bestimmte Zeiträume mit geeigneten Außentemperaturen am Standort genutzt wird oder ob sie basierend auf dem prozessbedingten Lastprofil, der erforderlichen Prozessstabilität und den Standortbedingungen ganzjährig als „Primäres System“ betrieben werden kann und ob dann ein redundantes System, z.B. ein Kaltwassersatz, vorhanden ist.

Diese Analyse ist entscheidend für die Planung, Betriebsstrategie und wirtschaftliche Bewertung von Systemen mit Freier Kühlung.

Eine Freie Kühlung zur Absicherung muss dabei immer eine Art Notbetrieb bedeuten, da aufgrund schwankender Außentemperaturen eine definierte Kaltwassertemperatur nicht garantiert werden kann. Ist die Kaltwassertemperatur einer Freien Kühlung für einen planmäßigen Betrieb ausreichend, sollte geprüft werden, dieses System als „Primäres System“ zu verwenden, da damit höhere Arbeitszahlen gegenüber der verdichtergestützten Kälteerzeugung erreicht werden können.

Bei entsprechender hydraulischer Einbindung eines Redundanzsystems können die Rückkühlwerke bzw. Freikühler des Primär- und Redundanzsystems miteinander gekoppelt und gemeinsam genutzt werden. Durch die kombinierte Nutzung steht eine größere Wärmeübertragungsfläche zur Verfügung. Dadurch können entweder die maximale Leistungskapazität und die Effizienz erhöht und/oder die verbleibende Temperaturdifferenz zwischen den Medien („Grädigkeit“) verringert werden, was die Betriebszeiten der Freien Kühlung erhöht.

3.2 Standort

Die klimatischen Gegebenheiten des Standortes, insbesondere die jahreszeitlichen Temperaturverläufe, beeinflussen maßgeblich die mögliche Betriebsdauer und Wirtschaftlichkeit der Freien Kühlung.

3.2.1 Referenzstandort

Als klimatische Referenz wird in diesem Leitfaden der Standort Würzburg herangezogen. Die Datenbasis bildet der METEOSTAT-Wetterdatensatz 2024, der sich auf die Wetterstation mit der Kennnummer WMO 10655 bezieht und den Zeitraum vom 01. Januar bis 31. Dezember 2024 umfasst. Die im **Anhang D** enthaltenen Abbildungen zeigen den Außentemperaturverlauf und den Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft.

3.2.2 Aufstellhinweise

Die Aufstellhinweise und Materialempfehlungen der Komponentenhersteller sowie die Immissionsrichtwerte der TA-Lärm [6] und des Wasserhaushaltsgesetzes [7] (bei Verwendung von wassergefährdenden Stoffen) müssen für jedes Projekt individuell betrachtet und an die spezifischen Anforderungen des gewählten Standorts angepasst werden. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle, darunter die örtlichen Gegebenheiten (z.B. Geräuschimmissionen am Standort, vorhandene Geräte, Abstände zu Wänden), die baulichen Vorgaben (z.B. Optik, Statik, Einbringung), die Umweltbedingungen (z.B. Windstärke und -richtung, Belastung durch Schadstoffe oder salzhaltige Luft) sowie ergänzende Vorgaben des Auftraggebers. Auch der Einfluss gewerksfremder Bauteile (z.B. Fortluftöffnungen) sind zu beachten.

3.3 Wirtschaftlichkeit und ROI

Um die Eignung der Freien Kühlung für einen konkreten Anwendungsfall bewerten zu können, sind insbesondere die möglichen Nutzungszeiten sowie die Effizienzvorteile gegenüber dem Kältemaschinenbetrieb zu betrachten. Beide Faktoren bestimmen maßgeblich das Energieeinsparpotenzial, die Wirtschaftlichkeit einer Integration und den Return of Invest (ROI). Denn: „Nur weil Free-Cooling ein positiv belegter Begriff ist, heisst das nicht, dass der Einbau eines indirekten Free-Coolings[systems] in jedem Fall wirtschaftlich und energetisch sinnvoll ist.“ [5] [8]

Für die wirtschaftliche Bewertung einer Freien Kühlung reicht eine alleinige Betrachtung der Anschaffungskosten nicht aus. Neben den Investitionskosten sind insbesondere die während der Nutzungsdauer anfallenden Energie-, Wartungs-, Instandhaltungskosten zu berücksichtigen, wie in Gl. (3) ersichtlich (ggf. zusätzliche Wasserkosten bei hybrider Rückkühlung).

Bei Kälteanlagen können die Betriebskosten über die Lebensdauer ein Vielfaches der ursprünglichen Investitionskosten erreichen. Eine höhere Anfangsinvestition kann deshalb wirtschaftlich vorteilhaft sein, wenn hierdurch der jährliche Energiebedarf (deutlich) reduziert wird. [9]

$$Kosten = \frac{Investitionskosten}{Lebensdauer} + SK + IK \quad (3)$$

Die angenommene **Lebensdauer der Anlage** ist projektspezifisch mit dem Betreiber festzulegen. Als orientierende Werte werden beispielsweise folgende mittlere Lebensdauern genannt [10]:

Supermarkt:	12 Jahre
Gewerbekälte:	15 Jahre
Klimakälte:	15 Jahre
Industriekälte:	20 Jahre

Bei unterschiedlichen Tages-, Nacht- oder Wochenendtarifen sollte für die Ermittlung der **Stromkosten (SK)** auf Grundlage der jeweiligen Betriebszeiten ein repräsentativer Mischstrompreis gebildet werden. Für eine vereinfachte statische Betrachtung können zukünftige Strompreisänderungen zunächst unberücksichtigt bleiben.

Die jährlichen **Instandhaltungskosten (IK)** können überschlägig als Anteil der Investitionskosten angesetzt werden. Für eine erste Abschätzung kann ein jährlicher Instandhaltungskostensatz von 3 % angesetzt werden (vgl. DIN 31051). [9]

Für eine detailliertere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollten die Wartungs- und Instandsetzungsaufwendungen komponentenspezifisch berücksichtigt werden. Die VDI 2067 weist z.B. für Wärmeübertrager einen jährlichen Instandsetzungsaufwand von 2 % der Investitionskosten aus, während keine zusätzlichen Wartungskosten angesetzt werden. Für Kältemaschinen wird ebenfalls ein jährlicher Instandsetzungsaufwand von 2 % berücksichtigt.

Zusätzlich werden Wartungskosten in Höhe von 4 % der Investitionskosten pro Jahr angesetzt [11].

Das Teilsystem der Freien Kühlung weist aufgrund des fehlenden Verdichters und des fehlenden eigenen Kältemittelkreislaufs in der Regel geringere spezifische Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen auf als eine mechanische Kälteerzeugung. Pumpen, Ventilatoren, Wärmeübertrager, Armaturen und Regelungskomponenten verursachen jedoch weiterhin laufende Kosten.

Durch die Erweiterung eines Kältesystems um eine Freie Kühlung erhöhen sich die Wartungs- und Instandsetzungskosten grundsätzlich, da zusätzliche Komponenten hinzukommen und die Systemkomplexität zunimmt. Der Kostenanstieg fällt jedoch in der Regel geringer aus als bei der Installation einer zusätzlichen Kältemaschine. Bei einem Variantenvergleich sind daher die tatsächlichen zusätzlich entstehenden bzw. entfallenden Wartungs- und Instandhaltungskosten zu berücksichtigen.

Der erläuterte Berechnungsansatz entspricht einer vereinfachten statischen Jahreskostenbetrachtung. Kapitalzinsen, Restwerte, Ersatzinvestitionen, allgemeine Preissteigerungen und prognostizierte Änderungen der Energiepreise werden dabei nicht oder nur teilweise berücksichtigt. Für größere Investitionen oder längere Betrachtungszeiträume sollte ergänzend eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt werden. [9]

Beispiel: Kostenoptimum bei der Wärmeübertragerauslegung

Das wirtschaftliche Optimum einer Anlagenkomponente lässt sich beispielhaft anhand der Auslegung eines Wärmeübertragers veranschaulichen, die vor allem bei der Freien Kühlung eine hohe Relevanz aufweist.

Eine geringe Grädigkeit erfordert eine größere Wärmeübertragerfläche und führt damit zu höheren Investitionskosten. Gleichzeitig verbessert sie die Wärmeübertragung, reduziert die erforderlichen Temperaturdifferenzen im System und kann bei einer Freien Kühlung das nutzbare Betriebsfenster (deutlich) vergrößern. Dadurch können die Betriebsstunden der Freien Kühlung erhöht und der Energiebedarf der mechanischen Kälteerzeugung reduziert werden.

Eine höhere Grädigkeit ermöglicht dagegen eine kleinere und kostengünstigere Wärmeübertragerfläche. Gleichzeitig verschlechtern sich jedoch die thermischen Betriebsbedingungen. Bei einer Freien Kühlung kann dies dazu führen, dass höhere Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Kälte-träger erforderlich sind und die Freie Kühlung während weniger Stunden genutzt werden kann. Der Anteil der mechanischen Kälteerzeugung und die damit verbundenen Betriebskosten steigen entsprechend.

Das wirtschaftliche Optimum liegt am Minimum der Gesamtkosten aus annualisierten Investitionskosten und jährlichen Betriebskosten, wie in **Abbildung 3-1** dargestellt.

Der in der Abbildung ersichtliche Optimalwert von etwa 3,8 K dient ausschließlich der Veranschaulichung. Das tatsächliche Kostenoptimum ist projektspezifisch und hängt unter anderem von der Wärmeübertragerbauart, den erforderlichen Temperaturniveaus, dem Lastprofil, den Betriebsstunden, den Energiepreisen, den Investitionskosten und der Betriebsstrategie ab.

Anmerkung: Da steigende Strompreise das wirtschaftliche Optimum zu geringeren Grädigkeiten verschieben können, sollte die ermittelte optimale Grädigkeit bei der Planung als maximaler Auslegungswert betrachtet und nach Möglichkeit eine etwas geringere Grädigkeit vorgesehen werden [Empfehlung max. 3 K, (siehe **Kapitel 4.3.1**)]. Dabei sind die daraus resultierenden höheren Investitionskosten sowie die projektspezifischen Betriebsbedingungen zu berücksichtigen.

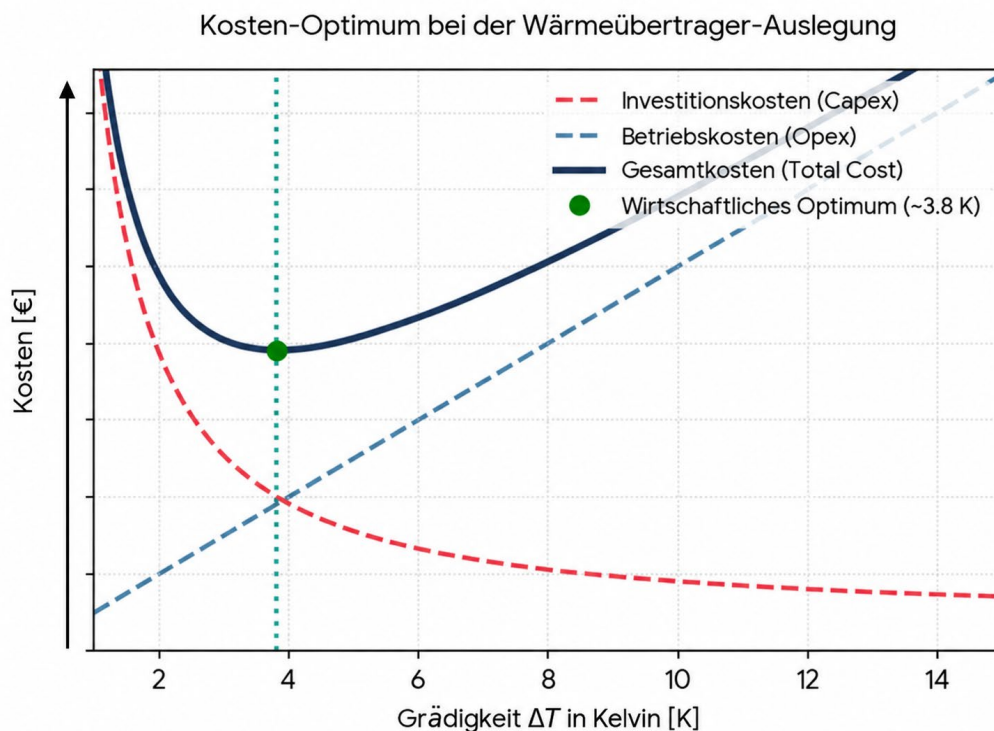


Abbildung 3-1 Beispielhafte Darstellung des Kostenoptimums bei der Auslegung eines Wärmeübertragers.
(KI-generiert mit ChatGPT (OpenAI); inhaltlich und redaktionell geprüft.)

Return of Invest (ROI)

Die Berechnung des ROI für die Erweiterung eines Kältesystems mit Freier Kühlung hängt wesentlich von den projektspezifischen Randbedingungen ab. Zu den wichtigsten Einflussgrößen zählen die erforderlichen Kaltwassertemperaturen, der Standort, der zeitliche Verlauf des Kältebedarfs, der erreichbare Anteil der Freien Kühlung sowie der elektrische Energiebedarf von Pumpen und Ventilatoren. Darüber hinaus wird der ROI maßgeblich von der Effizienz der Kältemaschine beeinflusst, da die Freie Kühlung oftmals in Anwendungen als Ergänzung zur Kältemaschine eingesetzt wird. Entscheidend ist daher nicht nur der Anteil der durch Freie Kühlung bereitgestellten Kälte, sondern auch die Effizienzsteigerung des Gesamtsystems im Zusammenspiel mit und gegenüber der Kältemaschine. Für eine belastbare Bewertung ist daher eine Variantenrechnung unter Berücksichtigung der konkreten Anlagen- und Betriebsbedingungen zwingend erforderlich.

4 PLANUNG

Die Planung ist der wesentliche Schritt für die Errichtung von Neuanlagen oder Anlagenweiterungen. Fehler oder Versäumnisse der Planung können im späteren Projektverlauf zu erheblichen Mehrkosten und/oder Anlagenausfällen führen.

4.1 Wärmeträgerflüssigkeiten

Als Wärmeträgermedien können unter anderem Wasser, Wasser-Glykol-Gemische (z.B. Ethylenglykol oder Propylenglykol in unterschiedlichen Konzentrationen) sowie spezielle synthetische oder organische Wärmeträgerflüssigkeiten eingesetzt werden. Die Auswahl des Mediums richtet sich nach thermischen, chemischen und betrieblichen Anforderungen wie z.B. Temperaturbeständigkeit, Viskosität, Korrosionsverhalten sowie Umwelt- und Sicherheitsaspekten (siehe z.B. [12]).

Im Hinblick auf die jeweiligen Einsatzgrenzen sind bereits bei der Planung für die jeweiligen Randbedingungen geeignete Medien auszuwählen. Ein späterer Wechsel der Wärmeträgerflüssigkeit kann erhebliche Auswirkungen auf die Systemleistung, den Energiebedarf, die Einsatzgrenzen sowie auf das Korrosionsverhalten, die Fouling-Neigung und die Materialverträglichkeit (z.B. bei Dichtungen) innerhalb der Kreisläufe und Anlagenkomponenten haben.

In geschlossenen Rückkühlkreisläufen ist der Einsatz von Frostschutzadditiven zweckmäßig, um die Notwendigkeit einer Entleerung des Freikühlers und von Rohrleitungen bei Frostgefahr, insbesondere bei Anlagenstillstand oder unzureichender Teillast zu vermeiden.

Eine elektrische Frostschutzeinrichtung bedarf neben einer Rohrbegleitheizung auch eines Zwangsumlaufs (Freikühler und Kühlwasserkreislauf) und einer entsprechenden Überwachung.

Nur wenn diese sichergestellt ist, kann auf Frostschutzzusätze im Wärmeträgermedium verzichtet werden.

Selbstentleerende Freikühler bzw. Rückkühler sind ebenfalls möglich, jedoch stellt deren Auslegung erhöhte Anforderungen an die Konstruktion der Wärmeübertrager, die zulässige Temperaturgrädigkeit, die bauliche Integration sowie an den Betrieb und die Wiederbefüllung nach Entleerung.

In Anlagen, in denen ausschließlich Wasser als Wärmeträger eingesetzt wird, wird gemäß VDI 2035 [13] die salzarme Betriebsweise mit einer elektrischen Leitfähigkeit im Bereich von 10 bis 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ empfohlen. Der Einsatz von vollentsalztem (VE-)Wasser ist aufgrund der damit verbundenen kontinuierlich erforderlichen pH-Wert-Überwachung nur eingeschränkt zu empfehlen.

Bei Verwendung unterschiedlicher Werkstoffkombinationen innerhalb der Anlage sollte nach vorheriger Wasseranalyse der gezielte Einsatz geeigneter Korrosionsschutzinhibitoren geprüft werden, um Werkstoffanriffe und unerwünschte Reaktionen im System zu vermeiden.

4.2 Hydraulische Schaltungen

Bei der Einbindung einer Freien Kühlung können sowohl im kaltwasserseitigen Prozess- und Verbraucherkreislauf als auch im kühlwasserseitigen Rück- und Freikühlkreislauf verschiedene hydraulische Schaltungsvarianten zum Einsatz kommen. Der Einbau von Wärmeübertragern ermöglicht außerdem den Einsatz unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten.

4.2.1 Benennungssystem von Einbindevarianten

Zur Typisierung variierender Einbindevarianten der Freien Kühlung in Kältesystemen kann eine Benennungssystematik eingeführt werden, die bei Bedarf für Vergleichszwecke und zur Beschreibung der jeweiligen Systemvarianten angewendet werden kann.

Wie in **Abbildung 4-1** dargestellt, wird dabei zunächst zwischen einer direkten und einer indirekten Freien Kühlung unterschieden. Bei den indirekten Systemen wird anschließend die Anzahl der Wärmeübertrager angegeben. Ein möglicher Wärmeübertrager an der Wärmequelle wird dabei nicht mitgezählt, da er in der Regel prozessbedingt vorhanden und nicht Bestandteil der eigentlichen Einbindung der Freien Kühlung ist. Berücksichtigt werden ausschließlich die Wärmeübertrager, die dem Freikühlsystem direkt zuzuordnen sind bzw. werden können. Der letzte Teil der Benennung ergibt sich aus der konkreten Einbindung auf der Kaltwasser- und Rückkühlkreisseite.



Abbildung 4-1: Unterscheidungsmerkmale von Freikühlsystemen

Die **Tabelle 1** enthält eine Übersicht der verwendeten Abkürzungen des Benennungssystems. Die jeweilige Bezeichnung des Systems, z.B. iFC-2HX-P/P, setzt sich entsprechend der Benennungstabelle aus den drei Bestandteilen 1–2–3 zusammen. Eine

erweiterte Übersicht grundlegender Typisierungen einschließlich der zugehörigen Anlagenschemata befindet sich im **Anhang B**.

Tabelle 1: Benennungssystematik Freikühlsysteme

TEIL	KÜRZEL	BEZEICHNUNG
1	dFC	Direkte Freie Kühlung
1	iFC	Indirekte Freie Kühlung
2	1HX	Mit 1-facher Wärmeübertragung
2	2HX	Mit 2-facher Wärmeübertragung
2	nHX	Mit n-facher Wärmeübertragung
3	0	Ohne Einbindung im betreffenden Kreislauf
3	S	Serielle Einbindung der Freien Kühlung zwischen Kältemaschine und Speicher/hyd. Weiche
3	S+	Serielle Einbindung der Freien Kühlung zwischen Speicher/hyd. Weiche und Verbraucher
3	SC	Getrennter Kreislauf mit serieller Wärmeübertragungsabsicherung
3	P	Parallele Einbindung der Freien Kühlung
3	PC	Getrennter Kreislauf mit paralleler Wärmeübertragungsabsicherung
3	X _{KaWa} /X _{KüWa}	Einbindung im Kaltwasserkreis / Einbindung im Kühlwasserkreis
3	[X/X; X/X]	Kombination variierender Einbindungsvarianten in Abhängigkeit des Betriebsmodus

4.2.2 Einbindevarianten mit 1-facher Wärmeübertragung

Bei Einbindungsvarianten mit 1-facher Wärmeübertragung zirkuliert dasselbe Wärmeträgermedium durch den Freikühler/Rückkühler bis zu den Verbrauchern.

Wird Wasser ohne Frostschutzmittel eingesetzt, ist ein sicherer Anlagenbetrieb grundsätzlich nur möglich, wenn das eingesetzte Wärmeträgermedium ausreichend Abstand zum Gefrierpunkt besitzt.

Bei zu niedrigeren Außentemperaturen sind zusätzliche Frostschutzmaßnahmen erforderlich, um das Wärmeträgermedium sicher oberhalb des Gefrierpunkts zu halten oder mittels Frostschutzmittel den Gefrierpunkt herabzusetzen. An Standorten ohne Frostgefahr können diese Varianten mit Wasser als Trägermedium dementsprechend ohne zusätzliche Frostschutzmaßnahmen sinnvoll eingesetzt werden. Da auf einen zusätzlichen Wärmeübertrager für die Freie Kühlung verzichtet werden kann, entfallen sowohl dessen zusätzlich benötigte Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Verbraucherkühlmedium als auch der durch ihn verursachte Druckverlust. Dies kann die Effizienz des Gesamtsystems verbessern.

4.2.3 Serielle Einbindevarianten

Eine rein hydraulisch serielle Einbindung zeichnet sich dadurch aus, dass der Wärmeübertrager der Freien Kühlung und der Kaltwassersatz in Reihe nacheinander durchströmt werden. Sowohl im Kühl- als auch im Kaltwasserkreis ist es dabei sinnvoll, dass der Wärmeübertrager der Freien Kühlung vor dem Kaltwassersatz durchströmt wird. Die Freie Kühlung kann in dieser Einbindung als Vorkühlung wirken.

Der Kaltwassersatz stellt anschließend sicher, dass die erforderliche Kaltwassertemperatur erreicht wird und stellt bei Bedarf die noch fehlende Kälteleistung bereit.

Bei kaltwasserseitiger Einbindungsvariante S+ wird der Freien Kühlung das Kaltwasser mit der höchsten im Kreislauf auftretenden Temperatur zugeführt. Bei der Variante S steht dieses Temperaturniveau je nach Speicherbewirtschaftung nur eingeschränkt zur Verfügung (vgl. **Kapitel 4.4.1**).

Bei einer hydraulisch seriellen S-Varianten-einbindung von Freier Kühlung und Kaltwassersatz kann der Massenstrom im Kühl- und Kaltwasserkreis grundsätzlich mit einer gemeinsamen Pumpe je Kreislauf gefördert werden (siehe **Abbildung 4-2**). Diese muss so ausgelegt sein, dass sie in allen Betriebszuständen die Druckverluste beider Komponenten überwinden kann.

Werden stattdessen getrennte Pumpen im selben Kreislauf eingesetzt, müssen deren Regelungen hydraulisch aufeinander abgestimmt werden. Die Pumpe der Freien Kühlung sollte einen konstanten Vordruck am Eintritt der Kaltwassersatzpumpen sicherstellen, um gegenseitige Beeinflussungen und ein instabiles Regelverhalten zu vermeiden.

iFC-2HX-S/S

*Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in serieller Kühl- und Kaltwasserkreislauf-einbindung
zwischen Kältemaschine und hyd. Weiche mit gekoppelter Rückkühlung*

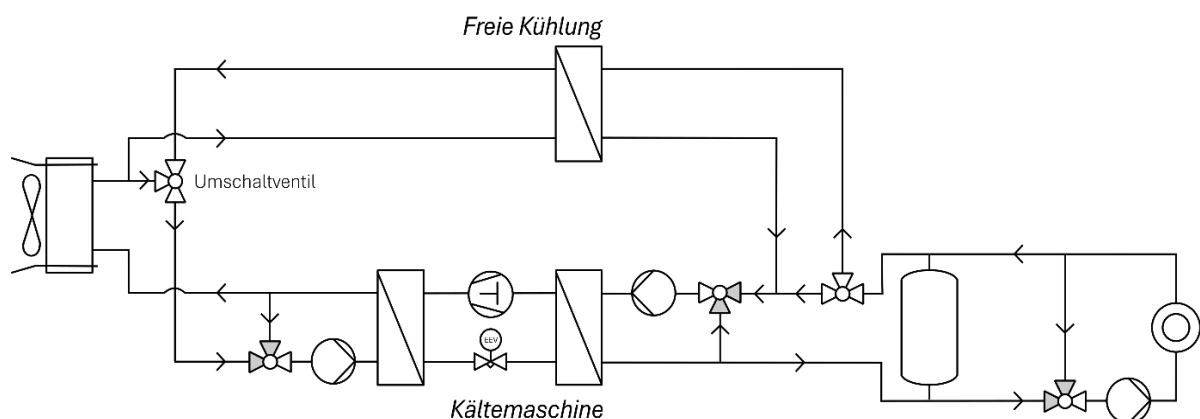


Abbildung 4-2: Beispielhaftes serielles Hydraulikschema. Systemtyp iFC-2HX-S/S

Eine zweite Pumpe kann im Kühlwasserkreis auch für eine Beimischschaltung erforderlich sein. Diese schützt den Wärmeübertrager vor Vereisung, wenn nur der Kühlkreis Frostschutzmittel enthält und kühlwasserseitig Temperaturen unter 0 °C auftreten können, beispielsweise infolge einer dynamischen Temperaturregelung oder während eines Anlagenstillstands. Hierzu wird ein Teil des wärmeren Austrittsströms dem kälteren Eintrittsstrom beigemischt.

Für den alleinigen Betrieb des Kaltwassersatzes ist in rein serieller Einbindung ein Umlenkenventil oder eine Bypassschaltung erforderlich, um den Wärmeübertrager der Freien Kühlung hydraulisch zu umgehen.

4.2.4 Parallele Einbindungsvarianten

Eine rein hydraulisch parallele Einbindung zeichnet sich dadurch aus, dass der Gesamtmassenstrom auf den Wärmeübertrager der Freien Kühlung und den Kaltwassersatz aufgeteilt wird. Die Verteilung der Teilmassenströme wird durch die Druckverluste der beiden Anlagenzweige, den eingesetzten Regelarmaturen sowie den Kennlinien der jeweiligen Pumpen bestimmt.

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer reinen seriellen Einbindung, wie sie in **Abbildung 4-2** dargestellt ist, besteht in der Möglichkeit, die beiden Anlagenzweige auch im alleinigen Freikühlbetrieb hydraulisch getrennt voneinander zu betreiben. Im Freikühlbetrieb kann der Kaltwassersatz vollständig umgangen werden, sodass der Massenstrom nicht durch dessen Verdampfer geführt werden muss. Dadurch entfällt der entsprechende Druckverlust, wodurch die erforderliche Pumpenleistung reduziert und die Effizienz des alleinigen Freikühlbetriebs erhöht werden kann. Darüber hinaus lässt sich eine parallele Einbindung häufig einfacher in bestehende Anlagen integrieren.

Nachteilig ist, dass die Freie Kühlung im Parallelbetrieb die geforderte Kaltwasservorlauftemperatur selbstständig erreichen muss. Im Gegensatz zur seriellen Einbindung kann der Kaltwassersatz den von der Freien Kühlung geführten Teilmassenstrom nicht unmittelbar nachkühlen. Wird die Solltemperatur durch die Freie Kühlung nicht erreicht, müsste der andere Teilmassenstrom durch den Kaltwassersatz entsprechend stärker abgekühlt werden, damit sich nach der Zusammenführung die geforderte Mischtemperatur einstellt. Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit von Teilmassenströmen und Austrittstemperaturen ist dies regelungstechnisch aufwendig. Die nutzbare Betriebsdauer der Freien Kühlung im Simultanbetrieb ist daher bei paralleler Einbindung in der Regel geringer als bei einer seriellen Einbindung mit Vorkühlung.

4.2.5 Variantenwahl bei reiner serieller und paralleler hyd. Einbindung

Die Wahl zwischen einer (rein) parallelen und einer seriellen Einbindung hängt maßgeblich von der vorgesehenen Betriebsstrategie und dem Aufbau der Gesamtanlage ab. Ist ausschließlich ein wechselnder Einzelbetrieb vorgesehen, bei dem entweder die Freie Kühlung oder der Kaltwassersatz singular betrieben wird, ist die rein parallele Einbindung grundsätzlich vorzuziehen. Sie ermöglicht die hydraulische Umgehung des jeweils nicht benötigten Anlagenzweigs und reduziert dadurch die zu überwindenden Druckverluste.

Ist hingegen ein Mischbetrieb von Freier Kühlung und Kaltwassersatz vorgesehen, sollte bereits während der Planung eine Effizienzanalyse der möglichen Einbindungsvarianten durchgeführt werden. Die serielle Einbindung ermöglicht zwar eine effiziente Vorkühlung und kann dadurch die Betriebsdauer der Freien Kühlung verlängern.

Der daraus resultierende Effizienzgewinn im Simultanbetrieb von Kältemaschine und Freier Kühlung kann jedoch durch den höheren Druckverlust und den damit verbundenen zusätzlichen Pumpenenergiebedarf im alleinigen Freikühlbetrieb bei dauerhafter Durchströmung von Verdampfer und Verflüssiger teilweise oder vollständig kompensiert werden.

Für die Auswahl der geeigneten Einbindungsvariante sind daher die erwarteten Betriebszeiten und Energieverbräuche des alleinigen Freikühlbetriebs denjenigen des Simultanbetriebs gegenüberzustellen. Die Entscheidung muss daher auf Grundlage einer ganzheitlichen energetischen und wirtschaftlichen Bewertung unter Berücksichtigung der projektspezifischen Betriebsbedingungen getroffen werden.

4.2.6 Kombinierte Einbindevarianten

Grundsätzlich ist auch eine kombinierte Einbindungsvariante möglich, die durch eine betriebsabhängige Umschaltung von Leitungs- bzw. Hydraulikstrecken die Vorteile der seriellen und parallelen Einbindung miteinander verbindet. Dadurch kann die Anlage flexibel an die jeweiligen Betriebsbedingungen angepasst und das energetische Potenzial der Freien Kühlung bzw. des Gesamtsystems bestmöglich ausgeschöpft werden.

Ein konzeptionelles Beispiel für eine optimierte Einbindungsvariante ist in **Anhang C** dargestellt. Die hydraulische Schaltung ermöglicht sowohl den Wechsel zwischen serieller und paralleler Einbindung als auch die bedarfsgerechte Aufteilung beziehungsweise Kopplung der Rückkühlwerks- und Freikühlsysteme. Auf diese Weise kann die verfügbare Wärmeübertragungsfläche für jeden Betriebsmodus möglichst effizient genutzt werden, sowohl beim alleinigen singulären Betrieb der Freien Kühlung oder der Kältemaschine als auch beim gemeinsamen simultanen Betrieb beider Systeme.

Aufgrund der damit einhergehenden Komplexität sei an dieser Stelle jedoch auf Kapitel 8.1.2 des Schlussberichts [14] verwiesen.

4.3 Informationen zur Auslegung und Dimensionierung von Komponenten

Eine Freie Kühlung kann einen vergleichsweise einfachen Anlagenaufbau mit nur wenigen Komponenten von Freikühler bzw. Rückkühler, Pumpen und weiteren Wärmeübertragungseinheiten besitzen. In diesem Abschnitt wird auf diese Komponenten eingegangen und es werden grundlegende Informationen zur Auslegung und deren Einsatz geteilt.

4.3.1 Wärmeübertrager

Die Auswahl der geeigneten Bauart eines Wärmeübertragers ist ein zentraler Schritt bei der Auslegung thermischer Systeme. Sie beeinflusst nicht nur die Effizienz der Wärmeübertragung, sondern auch die Betriebssicherheit, Wartungsfreundlichkeit und Investitionskosten. Im Folgenden werden die gängigsten Bauarten vorgestellt und deren typische Einsatzgebiete aufgezeigt.

Bauarten:

Lamellenwärmeübertrager:

Leistungsbereich 1 – 300 kW/K_{Grädigkeit} [15]. Sie bestehen traditionell aus Kupferrohren mit aufgesetzten Aluminiumlamellen zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche und sind weit verbreitet in luftgekühlten Rückkühlern. *Einsatz:* z.B. Freikühler zur Wärmeabfuhr. *Transportmedium:* Luft-Fluid.

Plattenwärmeübertrager:

Leistungsbereich 1 – 700 kW/K_{Grädigkeit} [16]. Haben eine kompakte Bauweise mit hoher Wärmeübertragungsleistung, insbesondere bei Flüssig-Flüssig-Anwendungen. *Einsatz:* Systemtrennung, Wärmeaufnahme. *Transportmedium:* Fluid-Fluid.

Rohrbündelwärmeübertrager:

Leistungsbereich 10 – 5000 kW/K_{Grädigkeit} [17]

Sie haben eine besonders robuste wartungsfreundliche Ausführung für hohe Drücke, hohe Volumenströme oder hohe Leistungen.

Einsatz: Systemtrennung, Wärmeaufnahme, Wärmeabfuhr. *Transportmedium:* Fluid-Fluid.

Dimensionierung von Wärmeübertragern:

Bei einer realen Wärmeübertragung stellt sich zwischen dem Eintritt des kalten beziehungsweise kühlenden Mediums (Wärmesenke) und dem Austritt des zu kühlenden Mediums (Wärmequelle) eine verbleibende Temperaturdifferenz am Pinch-Point ein (Grädigkeit).

Werden mehrere Wärmeübertrager hintereinander angeordnet, addieren sich die jeweiligen Temperaturdifferenzen. Die Grädigkeit steigt. Dadurch kann das zu kühlende Wärmequellenmedium bei der Trockenkühlung nur auf ein Temperaturniveau abgekühlt werden, das entsprechend oberhalb der Temperatur des verfügbaren Kühlmediums liegt.

Dies ist insbesondere bei der Freien Kühlung von Bedeutung. Mit zunehmender Grädigkeit der gesamten Wärmeübertragung ist eine niedrigere Außenlufttemperatur erforderlich, um das Wärmequellenmedium auf das gewünschte Temperaturniveau abzukühlen.

Dadurch verkleinert sich das nutzbare Temperaturfenster der Freien Kühlung, wodurch sich ihre möglichen Einsatzzeiten deutlich reduzieren können. Unter bestimmten Randbedingungen kann der Freikühlbetrieb somit trotz grundsätzlich geeigneter Außenlufttemperaturen vollständig verhindert werden.

Bei einem Kaltwassersatz bleibt die Kälteerzeugung dagegen grundsätzlich möglich. Die zusätzlichen Temperaturdifferenzen erhöhen jedoch den erforderlichen Temperaturhub zwischen Verdampfung und Verflüssigung und verringern damit die Effizienz des Kältemaschinenprozesses. Ausgehend vom idealen Carnot-Prozess sinkt der

theoretische COP mit zunehmendem Temperaturhub.

Für reale Kälteanlagen kann im typischen Betriebsbereich der Klimakälte näherungsweise von einer Effizienzminderung von etwa 1,5 – 3,5 % je Kelvin zusätzlichem Temperaturhub ausgegangen werden.

Die Anzahl der Wärmeübertrager und deren jeweilige Grädigkeit sollten daher möglichst gering gehalten werden. Bei Systemen mit Freier Kühlung besitzt dies eine besonders hohe Bedeutung, da eine zusätzliche Temperaturdifferenz nicht nur die Effizienz beeinflusst, sondern unmittelbar die Verfügbarkeit und die jährlichen Betriebsstunden der Freien Kühlung begrenzen kann.

Bei der Auslegung von Fluid/Fluid-Wärmeübertragern sollte unter Volllast- beziehungsweise Auslegungsbedingungen eine Grädigkeit von etwa 1 bis 3 K pro Wärmeübertragung für die Freie Kühlung angestrebt werden. Dadurch kann das verfügbare Temperaturniveau weitgehend genutzt und eine hohe Energieeffizienz des Gesamtsystems erreicht werden.

Werden die Volumenströme eines Systems im Voll- und Teillastbetrieb geregelt, ist die Leistungsfähigkeit der Wärmeübertrager insbesondere unter Teillastbedingungen sorgfältig zu überprüfen. Dadurch sollen eine unzureichende Wärmeübertragung sowie mögliche Betriebsinstabilitäten vermieden werden. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf den Einfluss der Volumenströme auf die Wärmeübergangskoeffizienten und den daraus resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) zu richten.

Bei reduziertem Volumenstrom sollte der Wärmedurchgangskoeffizient nur moderat abnehmen, sodass die übertragbare Wärmeleistung in einem geeigneten Verhältnis zur Lastreduzierung steht. Diese kann näherungsweise nach Gl. (4) beschrieben werden.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\log} = U \cdot A \cdot \frac{T_{\text{ein,warm}} - T_{\text{aus,kalt}} - T_{\text{aus,warm}} + T_{\text{ein,kalt}}}{\ln \left(\frac{T_{\text{ein,warm}} - T_{\text{aus,kalt}}}{T_{\text{aus,warm}} - T_{\text{ein,kalt}}} \right)} \quad (4)$$

In Gl. (4) ergibt sich die übertragene thermische Leistung ($\dot{Q}$) aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U), der Wärmeübertragungsfläche (A) und der logarithmischen mittleren Temperaturdifferenz ($\Delta T_{\log}$). Die logarithmische mittlere Temperaturdifferenz wird aus den Eintritts- und Austrittstemperaturen des warmen beziehungsweise zu kühlenden Mediums ($T_{\text{ein,warm}}$) und ($T_{\text{aus,warm}}$) sowie des kalten beziehungsweise kühlenden Mediums ($T_{\text{ein,kalt}}$) und ($T_{\text{aus,kalt}}$) bestimmt.

Bleiben die Temperaturbedingungen und die Wärmeübertragerfläche im Teillastbetrieb unverändert, führt eine Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten zu einer entsprechenden Reduzierung der übertragbaren Wärmeleistung. Eine annähernd proportionale Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten und der erforderlichen Wärmeleistung ist daher grundsätzlich unkritisch.

Da der Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten im realen Betrieb nur begrenzt beeinflusst werden kann, sollte bereits bei der Auswahl und Auslegung der Wärmeübertrager darauf geachtet werden, dass deren Teillastverhalten den betrieblichen Anforderungen entspricht. Die erforderliche Leistungsfähigkeit über den vorgesehenen Volumenstrom- und Lastbereich sollte vom Planer als verbindlicher Bestandteil der Herstellerspezifikation definiert werden. Nur so können Volumenstromanpassungen im Betrieb sicher umgesetzt und die damit verbundenen Energieeinsparpotenziale erschlossen werden.

4.3.2 Freikühler/Rückkühler

In diesem Leitfadens bezeichnet der Begriff Freikühler einen luftbeaufschlagten Wärmeübertrager, der im Betrieb der Freien Kühlung die vom Kühlmedium aufgenommene Wärme an die Außenluft abführt.

Freikühler/Rückkühler sind in unterschiedlichen Bauformen und Ausführungen erhältlich. Ihre Auswahl richtet sich insbesondere nach der erforderlichen Kühlleistung, den verfügbaren Aufstellflächen sowie den Umgebungs- und Betriebsbedingungen.

Im Folgenden werden ausschließlich lamellierte Wärmeübertrager betrachtet, die trocken betrieben werden. Eine adiabatische Vorkühlung der angesaugten Außenluft kann ergänzend vorgesehen werden. Gängige Bauformen sind:

Tischbauform (horizontal):

Die Wärmeübertrager sind liegend angeordnet, die Luftführung ist horizontal. Diese Bauform eignet sich gut für Flachdächer oder ebenerdige Aufstellungen.

Vertikalbauform:

Die Wärmeübertrager sind senkrecht angeordnet, was eine platzsparende Aufstellung bei begrenzter Aufstellfläche erlaubt. Auf die Windrichtung ist zu achten, damit der Ventilator zum einen nicht überströmt wird und zum anderen nicht gegen den Wind arbeiten muss.

V-Form (V-förmige Anordnung der Wärmeübertrager):

Kompakte Bauweise mit hoher Leistungsdichte. Die Luftansaugung erfolgt seitlich, was eine gute Raumausnutzung ermöglicht, die Luftausblasrichtung ist vertikal.

W-Form (zweifach V-förmige Anordnung der Wärmeübertrager):

Kompakte Bauweise mit erhöhter Leistungsdichte. Die Luftansaugung erfolgt seitlich, was eine gute Raumausnutzung ermöglicht, die Luftausblasrichtung ist vertikal.

Selbstentleerende Freikühler (Tischbauform mit Gefälle):

Speziell für den Einsatz ohne Frostschutzadditive, projektbezogen konzipierte Sondergeräte. Sie entleeren sich bei Stillstand automatisch, wodurch auf Zusätze verzichtet werden kann. Die sichere Funktion erfordert eine sorgfältige hydraulische Planung und eine auf die jeweilige Anlage abgestimmte Ausführung.

Freikühler mit adiabatischer Vorkühlung:

Bei diesen Geräten wird die angesaugte Außenluft vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager durch Wasserverdunstung abgekühlt. Dadurch kann die Kühlleistung insbesondere bei hohen Außenlufttemperaturen gesteigert und die erreichbare Fluidtemperatur abgesenkt werden. Der Wärmeübertrager selbst kann weiterhin trocken betrieben werden. Bei der Auslegung und beim Betrieb sind

jedoch der zusätzliche Wasserbedarf, die Wasserqualität sowie hygienische Anforderungen zu berücksichtigen.

Freikühler mit EC-Ventilatoren

Drehzahlgeregelte EC-Ventilatoren sind Stand der Technik und müssen den Mindestanforderungen der ErP Richtlinie genügen. Durch die bedarfsgerechte Anpassung der Drehzahl kann der Energieverbrauch der Ventilatoren signifikant reduziert werden.

Für Aufstellorte mit erhöhten Anforderungen an den Geräuschpegel sind geeignete Schallschutzmaßnahmen unerlässlich. Hierzu zählen unter anderem der Einsatz von Schalldämpfern, schalloptimierten Ventilatorflügeln sowie die Implementierung von Nachtabsenkstrategien zur Reduktion der Schallemissionen außerhalb der Betriebszeiten.

4.3.3 Pumpen

Die **Abbildung 4-3** stellt die Pumpenkennlinie und die zugehörige Anlagenkennlinie gegenüber und verdeutlicht damit die wesentlichen Grundlagen der Pumpenauslegung. Der Betriebspunkt einer Pumpe liegt im

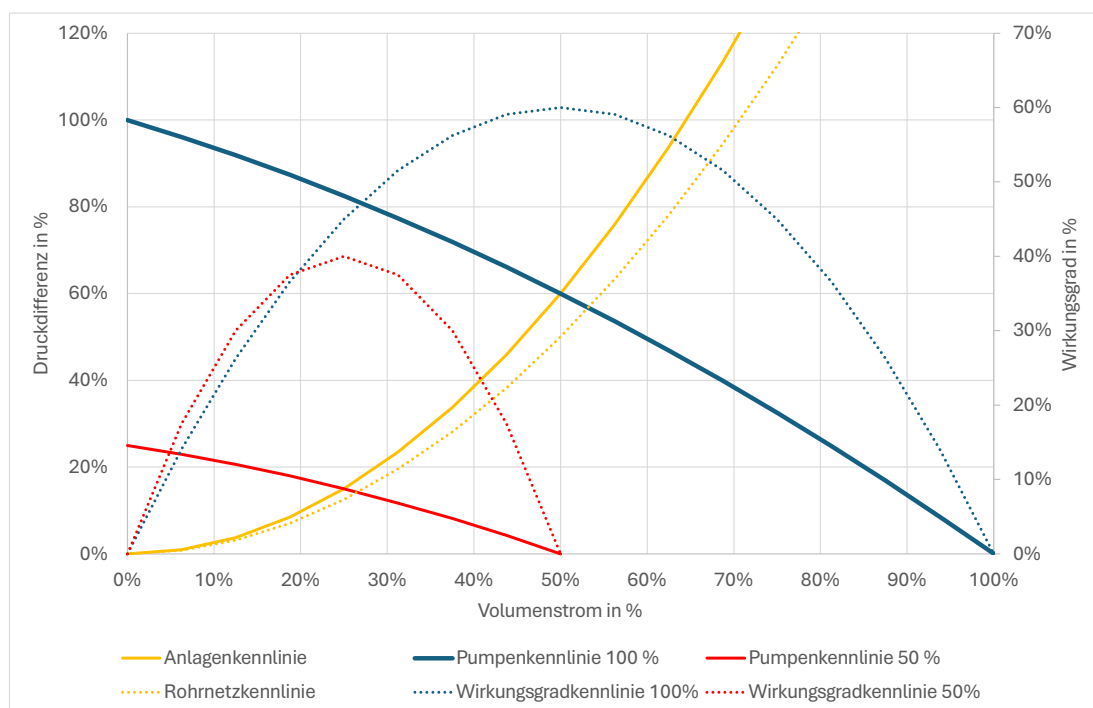


Abbildung 4-3: Beispielhafte Kennlinien zur Pumpendimensionierung

Schnittpunkt von Pumpenkennlinie und Anlagenkennlinie.

Wird eine Pumpe häufig im Nennbetriebspunkt betrieben, liefert also einen überwiegend konstanten Volumenstrom, so sollte der Auslegungsbetriebspunkt im Bereich des Wirkungsgradoptimums der Pumpe liegen.

Überwiegen die Teillastfälle, also Betriebspunkte mit verringertem und variierendem Volumenstrom, so sollte der Auslegungsbetriebspunkt rechts vom Wirkungsgradoptimum liegen, damit die optimalen Wirkungsgrade im Teillastfall erreicht werden können. Daher sollte die Anlagenkennlinie im Verhältnis zur Pumpenkennlinie nicht zu steil verlaufen. Andernfalls liegt der Auslegungsbetriebspunkt links des Wirkungsgradoptimums, wodurch der Wirkungsgrad im Teillastbetrieb weiter abnimmt.

Bei einer Überdimensionierung der Pumpe verschiebt sich der reale Betriebspunkt entlang der Anlagenkennlinie nach rechts zu einem höheren Volumenstrom. Dadurch wird entweder zu viel Fluid gefördert oder der nutzbare Regelbereich eingeschränkt. Zudem arbeitet die Pumpe am vorgesehenen Auslegungspunkt mit einem geringeren Wirkungsgrad. Pauschale Sicherheitszuschläge bei der Druckverlustberechnung sollten daher auf ein technisch begründetes Maß beschränkt werden.

Idealisierte Pumpenauslegung Bestand

Beim Austausch einer Pumpe in Bestandsanlagen könnte die Anlagenkennlinie mithilfe der Bestands- oder einer Behelfspumpe messtechnisch ermittelt und anschließend eine passende Pumpe ausgewählt werden. Der Auslegungspunkt muss dabei nicht erreicht werden, da sich der grundlegende Kennlinienverlauf aus Messungen bei geringeren Volumenströmen ableiten lässt. Bei Neuanlagen wäre dieses Vorgehen dagegen mit einem erhöhten Aufwand verbunden.

4.3.4 Hydraulische Weichen

Eine hydraulische Weiche dient zur hydraulischen Entkopplung von Erzeuger- und Verbraucherseite bzw. Rückkühlseite. Hierbei sind verschiedene Bauarten möglich. Die einfachste Bauart ist eine einfache Rohrverbindung über zwei Abzweige, eine weiter häufig vorkommende, ist eine Kompaktweiche aus einer Rechteckkammer mit Flanschanschlüssen. Hierin sind oft auch Luft- und Schlammabscheider integrierbar.

Die Dimensionierung erfolgt in beiden Fällen ausgehend von einer sehr geringen Druckdifferenz zwischen Eintritt und Austritt derselben Seite. Um einen hydraulischen Nullpunkt und damit die vollständige Entkopplung zwischen den beiden Seiten innerhalb der Weiche zu gewährleisten, wird empfohlen, dass der überströmende Volumenstrom mit einer Geschwindigkeit von maximal 0,2 m/s durch die Weiche strömt. Kleinere Auslegungsgeschwindigkeiten sind vorteilhafter.

Der Überströmvolumenstrom sollte möglichst gering gehalten werden. Ist der Erzeugervolumenstrom im Prozesskreis zu hoch, wird kaltes Wasser zum Erzeugereintritt zurückgeführt und senkt die eintretende Temperatur ab, was vorallem beim Betrieb der Freien Kühlung zu betrieblichen und leistungstechnischen Einbußen führt. Sowohl für den Freien Kühlungs- als auch für den Kältemaschinenbetrieb steigt der Pumpenergiebedarf. Ist der Verbrauchervolumenstrom höher, wird warmes Rücklaufwasser dem Prozessvorlauf beigemischt. Die dadurch erforderliche Absenkung der Erzeugeraustrittstemperatur verringert die Effizienz und sollte vermieden werden.

Eine geringe Überströmung der Weiche lässt sich meist einfacher sicherstellen als ein exakter Abgleich der Volumenströme beider Kreise.

Hinweis: Aufgrund der hydraulischen Entkopplung eignet sich der Differenzdruck nicht unmittelbar als Regelgröße für die Erzeugerkreis-pumpe(n). Ohne eine alternative Regelgröße, beispielsweise die Temperaturdifferenz zwischen Prozesskreisaustritt und Erzeugereintritt, oder eine volumenstromabhängige Regelung bleibt der Volumenstrom im Erzeugerkreis konstant. Dies kann bei schlechter Regelung insbesondere im Teillastbetrieb zu hohen Überströmungen führen.

In der Praxis kommen weitere Ausführungen hydraulischer Weichen zum Einsatz, beispielsweise Kombinationen aus Weiche und Verteiler sowie Pufferspeicher mit hydraulischer Entkopplungsfunktion. Die zuvor genannten Hinweise gelten auch für diese Ausführungen.

4.3.5 Rohrleitungen, Dämmung

Für die Dimensionierung von Rohrleitungen werden in der Praxis unterschiedliche Auslegungskriterien und Richtwerte herangezogen. Je nach gewähltem Ansatz können sich dabei erhebliche Unterschiede hinsichtlich Rohrquerschnitt, Druckverlust und Pumpenenergiebedarf ergeben. Durch eine sorgfältige hydraulische Planung und Dimensionierung lässt sich der Energieaufwand der Pumpen deutlich reduzieren.

Für Kaltwasserkreisläufe werden z.B. nach [18] Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 bis 1,5 m/s in Saugleitungen sowie 1,0 bis 3,5 m/s in Druckleitungen empfohlen. Daraus können spezifische Druckverluste zwischen 60 und 7.000 Pa/m (rechnerisches Extrem bei kleinen Rohrdurchmessern an der oberen Geschwindigkeitsgrenze, Druckleitung) resultieren. In der Heizungstechnik werden dagegen häufig 50 bis 80 Pa/m im gesamten Rohrnetz angesetzt [19], entsprechend Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,2 bis 1,0 m/s. Bei konsequenter Anwendung dieser geringeren Planungs- und Druckverlustwerte im Gesamtsystem kann der elektrische Pumpenenergiebedarf auf 10 bis 20 % des ursprünglichen Maximalwerts reduziert werden.

Der geringere Rohrdruckverlust ermöglicht zudem größere Regelventile, ohne deren Regelfähigkeit beziehungsweise Ventilautorität einzuschränken.

Die erforderliche Minstdämmdicke von Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen ist entsprechend nach den jeweils geltenden gesetzlichen und technischen Anforderungen festzulegen. Das Gebäudemodernisierungsgesetz (GModG) definiert hierzu in § 70 in Verbindung mit Anlage 8 Mindestanforderungen an die Wärmedämmung von Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen [4].

Über diese Mindestanforderungen hinausgehende Dämmdicken können den Wärmeeintrag aus der Umgebung zusätzlich reduzieren und damit zu einer verbesserten Temperaturhaltung des Kaltwassers sowie zu geringeren thermischen Verlusten im Verteilnetz sowie zur Steigerung der Gesamteffizienz des Kältesystems beitragen.

4.4 Hinweise zur energieeffizienten Betriebsführung

Eine energieeffiziente Betriebsführung von Kälteanlagenssystemen mit Freier Kühlung setzt ein abgestimmtes Zusammenspiel aus hydraulischer Einbindung, Automatisierung sowie der Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Kriterien voraus. Nur durch die integrative Betrachtung dieser Einflussgrößen kann ein durchgängig optimierter Betrieb erreicht werden, der sowohl hohe Jahresarbeitszahlen als auch die zuverlässige Versorgung sicherstellt.

Für Systeme mit Freier Kühlung (ohne Wärmerückgewinnung) besteht das übergeordnete Ziel darin, die Laufzeit der Freien Kühlung zu maximieren und damit Laufzeiten sowie den energieintensiven Einsatz der Kältemaschine weitgehend zu reduzieren (Einschränkung siehe **Kapitel 4.4.6**). Grundlegende Aspekte zur energieeffizienten Betriebsführung sowie potenzielle Effizienzverlustquellen werden im Folgenden systematisch dargestellt. [14]

Abbildung 4-4 veranschaulicht exemplarisch das hydraulische Konzept des Typs iFC-2HX-P/P mit den möglichen Betriebsmodi. Komponenten und Systemparameter mit maßgeblichem Einfluss auf die Energieeffizienz sind farblich hervorgehoben. Die Kennbuchstaben a) bis f) dienen als Referenz zu den nachfolgenden Abschnitten, in denen die Auswirkungen auf Betrieb und Effizienz erläutert werden.

4.4.1 a) Einfluss der Verbraucher-Rücklauf-temperaturabsenkung auf Betrieb und Effizienz

Je nach gewähltem Hydraulikkonzept kann die Eintrittstemperatur in die Freie Kühlung im Kaltwasserkreislauf maßgeblich von der Regelung und Abstimmung der kaltwasserseitigen Volumenströme von Prozess- und Verbraucherkreis beeinflusst werden.

Besonders bei Konzepten, die eine Freie Kühlung zwischen Kältemaschine und Speicher (bzw. hydraulischer Weiche) integriert haben (P/P u. S/S Konzepte), kann es durch Massenströmmischungen zwischen Speicher- und Verbrauchermassenstrom zu unerwünschten Absenkungen der Verbraucher-Rücklauf-temperatur hin zur Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager der Freien Kühlung

kommen. Die Absenkung reduziert die treibende Temperaturdifferenz (min. und max. Temperaturen) am Wärmeübertrager der Freien Kühlung und kann deren Leistungsfähigkeit, Effizienz und Laufzeit deutlich mindern.

Eine abgestimmte Volumenstromregelung zwischen Verbraucher- und Prozesskreis im Kaltwasser ist dabei wesentlich für einen effizienten Betrieb, insbesondere bei gleichzeitiger Kälteanforderung der Verbraucher und Beladung des Speichers. In diesem Betriebsfall muss der Überströmungsvolumenstrom über den Speicher so geregelt werden, dass eine definierte Strömungsrichtung zwischen Speicher und Verbraucherkreis gewährleistet ist und gleichzeitig eine geschichtete Beladung des Speichers erfolgen kann. Kleine Überströmungsvolumenströme begünstigen im Beladungszustand eine stabile Temperaturschichtung im Speicher. Durch diese Schichtung werden Temperaturverluste infolge von Beimischungen zwischen Speicher- und Verbrauchermassenstrom reduziert, sodass die Austrittstemperatur in Richtung der Freien Kühlung über längere Betriebszeiträume hochgehalten werden kann.

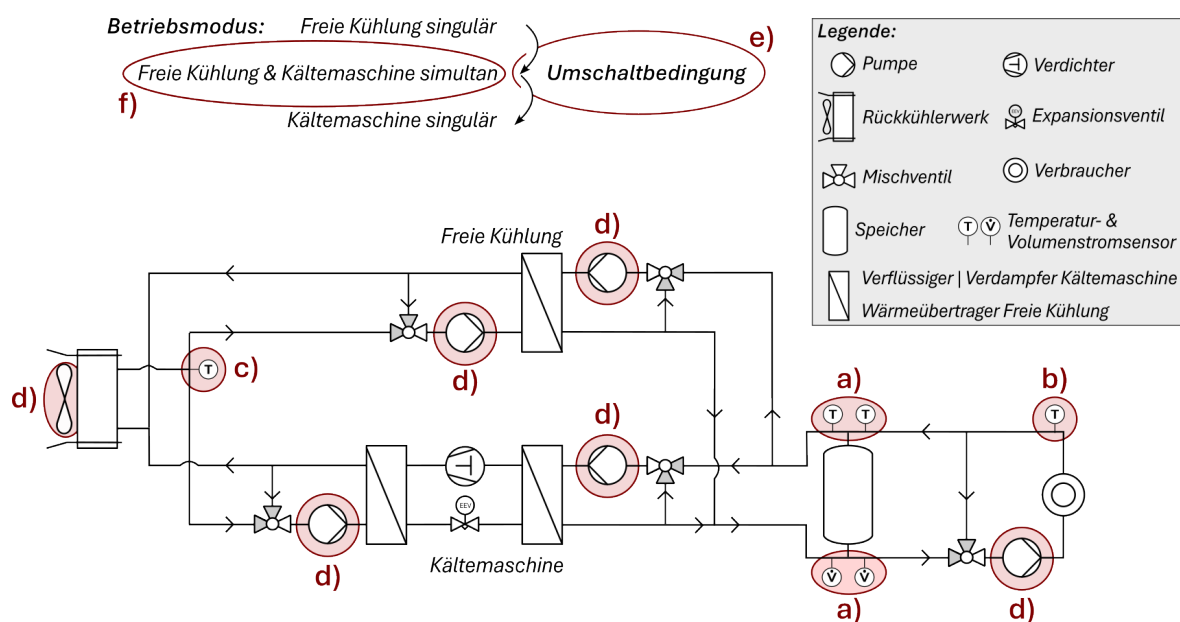


Abbildung 4-4: Eingezeichnete Hinweise zur energieeffizienten Betriebsführung und Regelung

Werden eine mögliche Absenkung der Verbraucherrücklauf­temperatur und ausreichende technisch notwendige Auslegungsreserven für Wärmeübertrager, Rückkühlwerke und Pumpen nicht berücksichtigt, besteht die Möglichkeit, dass die Freie Kühlung den Kältebedarf im alleinigen Voll­lastbetrieb nicht vollständig decken kann. Eine genaue Planungsleistung ist hierbei wesentlich.

Die Zuschaltung der Kältemaschine sollte daher nicht ausschließlich über einen statischen Außentemperaturgrenzwert erfolgen. Ohne zusätzliche, leistungs- oder temperaturabhängige Sicherheitsfunktionen kann sie zu spät aktiviert werden, wodurch kritische Temperaturanstiege im versorgten Prozess auftreten können.

Für Systeme mit serieller Einbindung von Freier Kühlung kann deren Integration in den Rücklaufstrang zwischen Verbraucher und Speicher beziehungsweise hydraulischer Weiche empfehlenswert sein (S+/0, S+/S Varianten), insbesondere wenn Überströmungen über den Speicher oder die hydraulische Weiche nicht ausreichend geregelt werden können. Diese S+-Konzepte (vgl. Anhang in **Abbildung B 4**) ermöglichen regelungstechnisch eine robuste Aufrechterhaltung hoher Rücklauf­temperaturen zur Freien Kühlung, wodurch sowohl die Effizienz als auch die möglichen Laufzeiten erhöht werden können. Dennoch muss eine Abstimmung von Strömungsrichtungen beachtet werden.

4.4.2 b) Einfluss der Verbraucherrücklauf­temperatur­regelung auf die Effizienz

Um die Eintrittstemp­eratur zur Freien Kühlung und somit deren Laufzeit und Effizienz hochzuhalten, empfiehlt sich eine Regelung der Rücklauf­temperatur am Verbraucher. Auf diese Weise kann auch unter Teillastbedingungen eine hohe Rücklauf­temperatur gewährleistet werden, was die Betriebszeiten und die Energieeffizienz der Freien Kühlung verlängert und den Einsatz der Kältemaschine reduziert.

4.4.3 c) Einfluss der unteren Systemtemperaturbegrenzung auf die Effizienz

Aus Sicherheitsgründen (Vermeidung des Einfrierens der Wärmeübertrager bei wasserbasierten Systemen) sollte die untere Begrenzung der Systemtemperatu­ren (untere Kühlwassertemperatur) stets oberhalb des Gefrierpunktes liegen. Sofern die Regelung des Systems dynamische Systemtemperatu­ren in Primär- oder Sekundärkreisläufen vorsieht, ist diese Grenze gleichzeitig so niedrig wie möglich zu wählen, um die betriebliche Effizienz der Freien Kühlung bei tiefen Außenlufttemperatu­ren maximal ausschöpfen zu können.

4.4.4 d) Optimierung von Volumenströmen zur Steigerung der Effizienz

Im Auslegungspunkt (Voll­last) treten die höchsten Massen- bzw. Volumenströme auf. Im Teillastbetrieb eröffnet sich dadurch ein erhebliches Effizienzpotenzial für die Freie Kühlung. Durch die Reduzierung der Volumenströme lassen sich Temperaturspreizungen erhöhen bzw. aufrecht erhalten, während gleichzeitig die Förderströme und die zugehörigen Pumpstrombedarfe deutlich sinken können.

Prinzipiell sollten alle Wärmeübertrager-Auslegungen im Teillastbetrieb nachgerechnet werden, um die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten (einschließlich Reynolds-Zahl und Druckverlust) sowie den dafür erforderlichen Volumenstrom zu bestimmen. Erst nach Kenntnis dieser minimalen Betriebsgrenzen kann eine Optimierung von Volumenströmen erfolgen. Eine gleichzeitige Reduzierung von Luft- und Fluidvolumenstrom bei einem Freikühler ist im Detail zu untersuchen, da sich beide Größen direkt auf die Wärmeübertragungsleistung und das Betriebsverhalten auswirken.

Da die Effizienz der Freien Kühlung maßgeblich von den treibenden Temperaturdifferenzen an den jeweiligen Wärmeübertragungseinheiten abhängt, ist eine hohe Effektivität anzustreben (hohe Ausnutzung der maximal möglichen Temperaturübertragung der Wärmeübertragung). Erfolgt die Wärmeübertragung über einen sekundären Kühlwasserkreislauf, empfiehlt es sich aus energetischer Sicht, diesen mit geringeren Volumenströmen im Vergleich zu Luft- und Kaltwasservolumenströmen zu betreiben und zu regeln.

Ein reduzierter Kühlwasservolumenstrom kann die Austrittstemperatur des Rückkühlwerks stärker an die Außenlufttemperatur annähern. Die geringere Grädigkeit vergrößert die treibende Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager zwischen Kühl- und Kaltwasserkreis. Dadurch kann die Freie Kühlung länger zur Teillastdeckung beitragen und die geforderte Kaltwasservorlauftemperatur besser einhalten. Voraussetzung ist eine ausreichende Wärmeübertragung trotz des reduzierten Volumenstroms.

4.4.5 e) Einfluss der gewählten Umschaltbedingungen auf die Effizienz

Grundsätzlich kann zwischen statischen und dynamischen Umschaltbedingungen für den Wechsel der Betriebsmodi von Freier Kühlung und Kältemaschine im alleinsehenden (singulären) und/oder dem gleichzeitigen Betrieb (simultan) beider Erzeugerteilsysteme unterschieden werden.

Wird die Freie Kühlung statisch, beispielsweise über einen Außenlufttemperaturschwellwert, betrieben, ist dieser so festzulegen, dass die Freie Kühlung bis zum Umschaltzeitpunkt die maximale auftretende Kältebelastung zuverlässig decken kann, sofern Punkt a) berücksichtigt wird.

Oberhalb des Schwellwerts ist auf den kombinierten oder maschinellen Kühlbetrieb umzuschalten.

Dynamische Umschaltbedingungen ermöglichen eine leistungsgeführte beziehungsweise gleitende Regelung der Betriebsmodi in Abhängigkeit von Außenluft-, Systemtemperaturen und aktuellen Lastbedingungen. Dadurch kann insbesondere der Teillastbetrieb über längere Zeiträume effizient durch die Freie Kühlung abgedeckt werden. Die Freie Kühlung bleibt somit über einen größeren Betriebsbereich aktiv, wodurch sich ihre Laufzeiten verlängern. In Folge kann ein größerer Anteil der jährlichen Kühlleistung ohne Einsatz der Kältemaschine bereitgestellt werden, was zu einer Steigerung der Gesamtanlageneffizienz führen kann.

Um den Zusammenhang der Umschaltbedingungen auf den Betrieb darzustellen, zeigt **Abbildung 4-5** ein Betriebskennfeld des alleinsehenden (singulären) Freien Kühlungsbetriebs eines untersuchten Laborkältesystems (Hydraulikkonzept: iFC-2HX-P/P). Dargestellt ist die mittlere betriebliche Leistungszahl $TCOP_{III}^*$ der Freien Kühlung nach VDMA 24247-7 in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Abszisse) und der thermischen Kaltwasserleistung (Ordinate). (*hier: $TCOP$ im Bilanzraum III, ohne Verbraucherkreispumpe, vgl. **Abbildung 4-4**) Die Abbildung verdeutlicht den möglichen Unterschied der Betriebsdauer der Freien Kühlung über der Außentemperatur zwischen den dynamischen und statischen Umschaltstrategien.

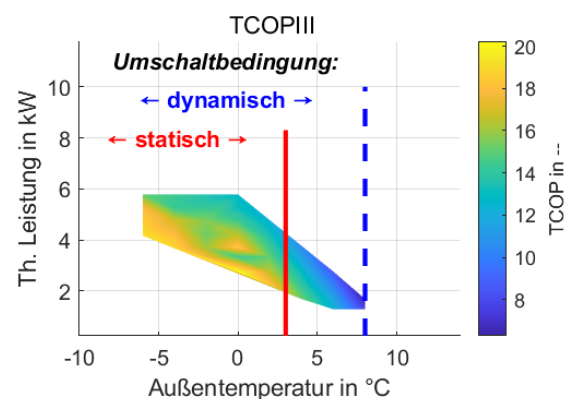


Abbildung 4-5: Statische vs. dynamische Umschaltbedingung im singulären Betriebskennfeld einer indirekten Freien Kühlung

Beide Umschaltbedingungen erlauben eine angesetzte Vollastübernahme von 4 kW bei 3 °C Außenlufttemperatur. Der Teillastbetrieb bis 8 °C kann durch den singulären Betrieb der Freien Kühlung jedoch nur über die dynamische Umschaltbedingung realisiert werden. Bei der statischen Umschaltbedingung tritt bereits der simultane Betrieb von Freier Kühlung und Kältemaschine oder der singuläre Kältemaschinenbetrieb auf.

Alle automatisierungstechnisch umgesetzten Strategien zum Wechsel der Betriebsmodi müssen sicherstellen, dass während des gesamten Betriebs, auch in den Umschaltvorgängen, jederzeit eine ausreichend stabile Kälteversorgung und Betriebssicherheit gewährleistet wird. Je nach Prozess können sich daraus erweiterte Anforderungen an die Regelung und Umschaltstrategien ergeben.

4.4.6 f) Aufrechterhaltung des Simultanbetriebs von Freier Kühlung und Kältemaschine

Der gleichzeitige Betrieb von Freier Kühlung und Kältemaschine (Simultanbetrieb) kann energetisch vorteilhaft sein, insbesondere bei serieller Einbindung der Freien Kühlung vor der Kältemaschine. Dabei wird das Kaltwasser zunächst durch die Freie Kühlung vorgekühlt und anschließend durch die Kältemaschine auf das erforderliche Temperaturniveau weiter abgekühlt. Die Einsatzdauer der Freien Kühlung wird hierdurch verlängert und die Kältemaschine im Betrieb entlastet. Gleichzeitig kann der Simultanbetrieb als gleitende Umschaltstrategie zwischen den Betriebsmodi dienen und so eine stabile Kälteversorgung sicherstellen.

Eine abgestimmte Regelung ist hierbei zwingend erforderlich, da sonst die Effizienzvorteile des Simultanbetriebs gegenüber dem singulären Kältemaschinenbetrieb verloren gehen. Analysen eines Kältesystems mit hydraulisch paralleler Einbindung von Freier

Kühlung zeigen, dass der Simultanbetrieb bei unzureichender Regelungsabstimmung eine geringere betriebliche Effizienz aufweisen kann als ein singulärer Kältemaschinenbetrieb.

Als erster Richtwert kann für die Lastübernahme durch die Freie Kühlung ein Mindestanteil von 20 % an der zu kühlenden Gesamtlast angesetzt werden. Sinkt die Lastübernahme infolge steigender Außenlufttemperaturen unter diesen Richtwert, sollte ein Wechsel des Betriebsmodus zum reinen Kältemaschinenbetrieb erfolgen, um die durch den Simultanbetrieb möglichen Effizienzverluste zu vermeiden. Der exakte Schwellenwert hängt vom Hydraulikkonzept, der Auslegung der Wärmeübertrager und Pumpen sowie der Effizienz der Kältemaschine ab und ist projektspezifisch zu bestimmen. Besondere Aufmerksamkeit erfordert dieser Zusammenhang bei Systemen mit gekoppelter Rückkühlung für die Freie Kühlung und Kältemaschine. [14]

5 MONITORING, MANAGEMENT & KENNZAHLEN

Ein sicherer Betrieb sowie die nachhaltige Aufrechterhaltung und Steigerung der Energieeffizienz von Kältesystemen mit Freier Kühlung erfordert ein strukturiertes Vorgehen zur Erfassung, Bewertung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Eine hohe betriebliche Effizienz lässt sich dabei nicht allein durch den Einsatz energieeffizienter Komponenten oder der Einführung neuer Betriebsführungs- und Regelstrategien sicherstellen. Erst durch eine systematische Datenerfassung und deren Einbindung in einen übergeordneten Energiemanagementprozess können die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Effizienz bewertet und energetische Potenziale im Betrieb langfristig verbessert und genutzt werden.

Das Zusammenspiel im Energiemanagement aus Monitoring, Accounting, Controlling und Management bildet den Handlungsrahmen [20]. Dieser schafft Transparenz über Energieflüsse und Betriebszustände und ermöglicht die Ableitung zielgerichteter Optimierungsmaßnahmen. Ergänzend bieten systematisch erfasste Kennzahlen in definierten Bilanzräumen die Grundlage für:

- die Bewertung und den Vergleich von Betriebsvarianten,
- die Identifikation von Effizienzverlusten und Optimierungspotenzialen,
- die Erfolgskontrolle umgesetzter Maßnahmen.

Im Folgenden wird dieser Prozess auf Kälteanlagenssysteme mit Freier Kühlung übertragen und durch spezifische Anforderungen an Monitoring, Messtechnik, Effizienzbewertung und Systemgrenzen konkretisiert. Grundlage bildet das VDMA-Einheitsblatt 24247-7, erweitert und auf indirekte Systeme mit Freier Kühlung angewendet. [21]

5.1 Energiemanagementprozess

Um nachhaltige Effizienzsteigerungen in Kälteanlagenssystemen zu erreichen, ist ein systematischer Energiemanagementprozess erforderlich. Dieser umfasst dabei im Wesentlichen vier Schritte, wie in **Abbildung 5-1** aufgeführt. Das Vorgehen orientiert sich dabei am Prinzip des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. [20]

Monitoring

Erfassung und Analyse relevanter Energie- und Betriebsdaten wie Temperatur, Druck, Volumenstrom, elektrische Leistung und Kälteleistung. Eine kontinuierliche, automatisierte Datenerhebung ist Voraussetzung, um Transparenz über Betriebszustände und Lastsituationen zu gewinnen.

Accounting

Basierend auf den Messdaten erfolgt die energetische Bilanzierung. Die erfassten Verbräuche werden den einzelnen Komponenten und Systembereiche (z.B. Kältemaschine, Rückkühlwerk, Pumpen, Freie

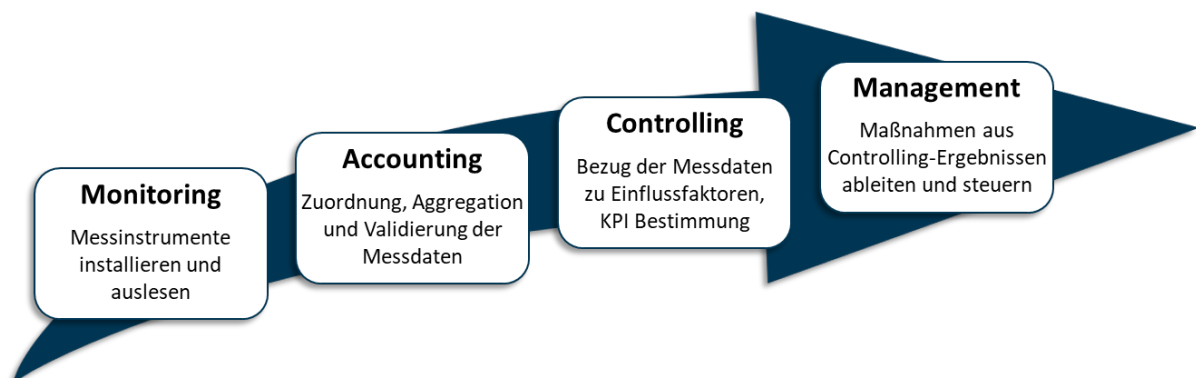


Abbildung 5-1: Energiemanagementprozess von Monitoring bis Management (Quelle: Anlehnung an [20])

Kühlung) zugeordnet. Nur durch eine eindeutige Zuordnung der Energieverbräuche lassen sich die Hauptverbraucher und Optimierungspotenziale identifizieren.

Controlling

In diesem Schritt werden Key Performance Indicators (KPIs) wie z.B. der Total Energy Performance Factor (TEPF), die Effektivität der Wärmeübertragungsprozesse (ϵ) oder die relativen Wärmekapazitätsströme (C_R) gebildet und überwacht. Durch den Abgleich von Soll- und Ist-Werten können Abweichungen identifiziert, Ursachen analysiert und Optimierungspotenziale aufgezeigt werden.

Management

Auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Controlling werden Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet und priorisiert.

Dabei werden sowohl Auslastungsschwankungen als auch deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz berücksichtigt, sodass eine kontinuierliche Verbesserung des Anlagenbetriebs sichergestellt wird [20].

Hinweis: Die beschriebenen Schritte entsprechen inhaltlich dem Grundgedanken der DIN EN ISO 50001, die den Energiemanagementprozess im Sinne des PDCA-Zyklus (Plan – Do – Check – Act) beschreibt [24].

Tabelle 2: Typische Aufgabenfelder eines Anlagenmonitorings

AUFGABE	BESCHREIBUNG	ZIEL / NUTZEN
Überwachung von Betrieb und Betriebsparametern	Kontinuierliche Erfassung von Temperatur, Druck, Durchfluss, elektrischer Leistung.	Sicherstellung stabiler, effizienter Betriebszustände.
Überwachung der Betriebsführungs- und Regelstrategien	Kontinuierliche Analyse und Bewertung der im Betrieb umgesetzten Regelungs- und Betriebsstrategien sowie deren Abgleich mit den geplanten Soll-Strategien.	Sicherstellung einer konsistenten, energieeffizienten und konzeptkonformen Anlagenbetriebsweise sowie Identifikation von Abweichungen zwischen Planung und Betrieb sowie Optimierungspotenzialen.
Erkennung von Störungen und Anomalien	Identifikation von Abweichungen gegenüber Sollwerten oder erwarteten Betriebscharakteristiken.	Früherkennung von Ausfällen, Vermeidung von Effizienzverlusten.
Optimierung der Anlagenleistung und -effizienz	Auswertung von Monitoring-Daten zur Anpassung von Regelparametern und Betriebsarten.	Steigerung der Energieeffizienz, Senkung der Betriebskosten.
Fernüberwachung und -steuerung	Überwachung und Steuerung aus der Ferne via Gebäudemanagementsystem oder Cloud.	Flexible, schnelle Eingriffe ohne Vor-Ort-Präsenz.
Wartungsplanung	Zustandsorientierte Planung von Wartung und Instandhaltung basierend auf Monitoring-Daten.	Verlängerung der Lebensdauer, Reduzierung ungeplanter Stillstände.
Einhaltung von Sicherheitsstandards	Überwachung sicherheitsrelevanter Parameter und Dokumentation.	Sicherstellung von Normenkonformität und Betriebssicherheit.
Dokumentation und Berichterstattung	Erstellung von Protokollen und Effizienzberichten.	Nachverfolgung, Optimierung und Kommunikation von Betriebsdaten.

[Quellen: Eigene Aufbereitung auf Grundlage der Anforderungen und Empfehlungen aus VDI 6041 [22], VDI 3814 Blatt 4.3 [23], DIN EN ISO 50001 [24], DIN EN ISO 52120-1 [25], DIN ISO 50006 [26] und DIN EN 13306 [27]]

5.3.1 Bilanzraumdefinition nach VDMA 24247-7

In **Abbildung 5-2** am Anlagentypbeispiel iFC-2HX-P/P definiert der Bilanzraum I zunächst die Kältemaschine. Bilanzraum II umfasst zusätzlich alle Komponenten des Kühlwasserkreises, bestehend aus dem Wärmeübertrager der Freien Kühlung, den Pumpen sowie dem Rückkühlwerk. Zusätzlich umfasst Bilanzraum III den gesamten Kaltwasserkreislauf mit Pumpen und Verbrauchern sowie weiteren Komponenten. [21]

5.3.2 Messtechnischer Ausstattungsgrad nach VDMA 24247-7

Für Kälteanlagensysteme mit Freier Kühlung, deren Effizienz und Betriebssicherheit stark von Temperaturen und Volumenströmen abhängen, wird mindestens die **mittlere messtechnische Ausstattung gemäß VDMA 24247-7** empfohlen. Sie umfasst die Erfassung der relevanten Temperaturen und Volumenströme in den Hauptkreisläufen und bildet die Grundlage für eine belastbare Effizienzbewertung. [21]

Für spezifische Anlagenkonfigurationen sollten zusätzliche Messstellen vorgesehen werden, insbesondere wenn in Systemen mit Freier Kühlung Wärmeströme hydraulisch gemischt werden. Dadurch können Temperaturabsenkungen entstehen, die den Betriebsbereich und die Effizienz der Freien Kühlung beeinflussen.

Eine separate messtechnische Erfassung der Wärmeströme an solchen Mischpunkten ermöglicht die präzise Analyse von Temperatur- und Volumenstromänderungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen. Dies erleichtert die Bewertung hydraulischer Einflüsse auf die betriebliche Effizienz, unterstützt die Identifikation von Optimierungspotenzialen und verbessert die Betriebsführung der Freien Kühlung sowie des Gesamtsystems.

5.3.3 Effizienzkennzahlen nach VDMA 24247-7

Das VDMA-Einheitsblatt 24247-7 schlägt zwei Indikatoren zur Effizienzbewertung eines Kälteanlagensystems unter realen Betriebsbedingungen vor. Durch die Nutzung standardisierter Bilanzräume und gezielter Messtechnik liefern die Kennzahlen TCOP und TEPF belastbare Ergebnisse, die zur Bewertung der Systemeffizienz und als Grundlage für Optimierungsmaßnahmen dienen.

TCOP (Total Coefficient of Performance):

Diese Kenngröße ist eine Leistungszahl. Sie bewertet die leistungsbezogene Effizienz eines Bilanzraums und wird berechnet als Verhältnis der summierten thermischen Kälteleistungen auf der Verbraucher- bzw. Kaltwasserseite $\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{0,j,\text{Bilanzraum}}$ zur summierten elektrischen Leistung aller Komponenten innerhalb des Bilanzraums $\sum_{i=1}^m P_{el,i}$: [21]

$$TCOP = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{0,j,\text{Bilanzraum}}}{\sum_{i=1}^m P_{el,i}} \quad (5)$$

TEPF (Total Energy Performance Factor):

Diese Kenngröße ist eine Arbeitszahl. Sie bewertet die energiebezogene Effizienz über einen Zeitraum t_1 bis t_2 als Verhältnis der zeitlich integrierten thermischen Leistung zur zeitlich integrierten elektrischen Leistung: [21]

$$TEPF = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{0,j,\text{Bilanzraum}}(t) dt}{\sum_{i=1}^m \int_{t_1}^{t_2} P_{el,i}(t) dt} \quad (6)$$

5.4 Ergänzende Indikatoren zur Systemanalyse der Freien Kühlung

Neben den zentralen Kennzahlen TCOP und TEPF können zusätzliche Indikatoren wichtige Informationen für das Monitoring, die Analyse und Optimierung von Kältesystemen mit Freier Kühlung liefern. Sie eignen sich besonders, um die Effizienz des Teilsystems Freie Kühlung detaillierter zu bewerten. Darüber hinaus können diese nicht nur auf Momentanwerte angewendet, sondern auch über längere Zeiträume ausgewertet werden. Auf diese Weise ermöglichen sie eine fundierte Beurteilung des realen Anlagenbetriebs und bilden eine wertvolle Grundlage für Vergleich, Optimierung und Nachweis der Effizienz und Aufrechterhaltung der Betriebsstrategie.

Wärmekapazitätsstromverhältnis (C_R)

Das relative Wärmekapazitätsstromverhältnis C_R beschreibt das Verhältnis der Wärmekapazitätsströme der beteiligten Medienströme im Wärmeübertragungsprozess:

$$C_R = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} = \frac{\dot{m}_{min} * c_{p,min}}{\dot{m}_{max} * c_{p,max}} \quad (7)$$

mit $0 \leq C_R \leq 1$

Hierbei definieren sich die Indizes min und max über das Produkt aus Massenstrom $\dot{m}$ und spezifischer Wärmekapazität c_p . Der Strom mit dem kleineren Produkt wird als $\dot{C}_{min}$ festgelegt.

C_R quantifiziert das thermische Gleichgewicht zwischen den Stoffströmen. Ein Wert von $C_R = 1$ kennzeichnet einen theoretisch idealen Fall für den (Gegenstrom-)Wärmeübertrager, da hier die Temperaturänderungen beider Medien identisch sind.

In der Praxis wird jedoch häufig ein Betriebspunkt mit $C_R < 1$ angestrebt. Dies ermöglicht eine gezielte Pinch-Point-Optimierung: Durch die Ungleichheit der Kapazitätsströme

kann die Austrittstemperatur des zu kühlenden Mediums näher an die Eintrittstemperatur des Kühlmediums herangeführt werden. Abweichungen vom Idealwert sind somit nicht zwangsläufig ein Zeichen für Ineffizienz, sondern oft das Ergebnis einer bewussten hydraulischen Abstimmung, um die nutzbare Temperaturdifferenz (Grädigkeit) zu minimieren.

Effektivität der Wärmeübertragung (ε)

Die Effektivität ε eines Wärmeübertragers bzw. des Wärmeübertragungsprozesses wird durch das Verhältnis der tatsächlich übertragenen Wärmeleistung $\dot{Q}_{real}$ zur maximal theoretisch möglichen Leistung $\dot{Q}_{max}$ im Betriebspunkt definiert:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} \quad (8)$$

$$= \frac{C_{min} * (T_{min,ein} - T_{min,aus})}{C_{min} * (T_{heiß,ein} - T_{kalt,ein})}$$

Dabei ist C_{min} der minimale Wärmekapazitätsstrom. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} ist durch die Differenz der beiden Eintrittstemperaturen $T_{heiß,ein}$ und $T_{kalt,ein}$ am Wärmeübertrager begrenzt. Die Kennzahl ε gibt an, wie nah der reale Prozess an das (theoretisch) thermodynamische Maximum im Betriebspunkt ankommt.

Da sich bei der Berechnung der minimale Wärmekapazitätsstrom C_{min} im Zähler und Nenner herauskürzt, reduziert sich die Effektivität auf ein reines Verhältnis der Temperaturdifferenzen. Da die Effizienz und Leistungsfähigkeit der Freien Kühlung direkt von den Temperaturen abhängig sind, kann die Effektivität ein zentraler Indikator für den Wärmeübertragungsprozess bei variierenden Volumen- bzw. Massenströmen darstellen.

Ausnutzungsgrad der Freien Kühlung (η_{FK})

Der Ausnutzungsgrad η_{FK} beschreibt, in welchem Verhältnis die tatsächlich eingesetzte Leistung $\dot{Q}_{FK,real}$ zur planmäßig verfügbaren Kälteleistung $\dot{Q}_{FK,Auslegung}$ der Freien Kühlung genutzt wird.

$$\eta_{FK} = \frac{\dot{Q}_{FK,real}}{\dot{Q}_{FK,Auslegung}} \quad (9)$$

Ein hoher Wert zeigt, dass das Freikühlpotenzial gegenüber der geplanten Leistung effizient genutzt wird, während Abweichungen Unterauslastungen oder Optimierungspotenziale aufdecken können

Anteil der Freien Kühlung an der Gesamtleistung (ϕ_{FK})

Der Anteil der Freien Kühlung ϕ_{FK} wird bestimmt durch:

$$\phi_{FK} = \frac{\dot{Q}_{FK,real}}{\dot{Q}_{Gesamt,real}} \quad (10)$$

wobei $\dot{Q}_{Gesamt,real}$ die gesamte Kälteleistung des Systems darstellt. $\phi_{FK,real}$ quantifiziert, wie viel der Kälteleistung durch die Freie Kühlung bereitgestellt wird und erlaubt die direkte Bewertung des Beitrags des Teilsystems zur Entlastung der Kältemaschine. Diese Kennzahl unterstützt die Analyse der kältetechnischen Erzeugungsaufteilung des Gesamtsystems.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Forschungsrat Kältetechnik e.V., „Energiebedarf für Kältetechnik - Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland“, Frankfurt am Main, 2019.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Energieeffizienz in Zahlen - Entwicklungen und Trends in Deutschland 2022“, Berlin, 2023.
- [3] *Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz (Energieeffizienzgesetz - EnEfG)*, 13.11.2023.
- [4] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Modernisierung der Wärmeversorgung in Gebäuden (Gebäudemodernisierungsgesetz – GModG)*, 10.08.2026.
- [5] Brunner, Kriegers, Prochaska und Tillenkamp, "Klimakälte heute - Kluge Lösungen für ein angenehmes Raumklima", Zürich: Faktor Verlag, 2021.
- [6] *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz*, 07.07.2017.
- [7] *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts*, 09.01.2026.
- [8] S. Rohrer, M. König und F. Tillenkamp, „Free Cooling in der Klimakälte - Untersuchung des Potentials in der Schweiz“, *IEFE Energy Papers*, p. 71, 2018.
- [9] VDMA e. V., Fachverband Allgemeine Lufttechnik, Kälte- und Wärmepumpentechnik (Hrsg.), *Energieeffizienz von Kälteanlagen. Information Nr. 2: Grundlagen. Leitfaden zur Planung von Kälteanlagen*, Frankfurt am Main, 2024.
- [10] EnergieSchweiz und Schweizerischer Verein für Kältetechnik SVK (Hrsg.), *Grundlagendokument zur Leistungsgarantie Kälteanlagen. Kampagne effiziente Kälte*, Ittigen, 2024.
- [11] *VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*, September 2012.
- [12] W. Wagner, *Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden*, Würzburg: Vogel Buchverlag, 2011.
- [13] *VDI 2035: Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen*, März 2021.
- [14] S. R. Wagner, S. Haußer und S. Volkmer, „Untersuchung optimierter Konzepte zur Nutzung der Freien Kühlung und Entwicklung von Planungstools und eines -leitfadens (Abschlussbericht FK: 37819/01)“, Biberach, Juni 2026.
- [15] Güntner GmbH & Co.KG, „Auslegungssoftware myGPC“, Fürstenfeldbruck, 2026.
- [16] Danfoss A/S, „HEXSelector Software V1.6.9“, DK-Nordborg, 2026.
- [17] Alfa Laval Mid Europe GmbH, „Shell-and-tube heat exchangers: Product range“, Hamburg, 2026.

- [18] M. Bode, „Kälteanlagen: Auslegung einfach erklärt,“ 30.12.2025. [Online]. Available: <https://www.deutsche-thermo.de/wiki/kaelteanlagen-auslegung-berechnung/#h-rohrleitungen-einer-kalteanlage-fachgerecht-auslegen>. [Zugriff am 20.01.2026].
- [19] R. Nussbaum AG, „Dimensionierung von Rohrleitungssystemen,“ R. Nussbaum AG, CH-Olten, 28.07.2025.
- [20] L. Ackermann, J. Arend und A. Miede, „Energiemanagement in der IT und im Rechenzentrum,“ in *Informatik 2013*, Koblenz, 2013.
- [21] VDMA 24247-7:2021-09, „Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 7: Regelung, Energiemanagement und effiziente Betriebsführung,“ 2021.
- [22] VDI 6041:2017-07, *Facility-Management – Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf, 2017.
- [23] VDI 3814 Blatt 4.3:2022-07, *Gebäudeautomation (GA) – Methoden und Arbeitsmittel für Planung, Ausführung und Übergabe – GA-Automationsschema, GA-Funktionsliste, GA-Funktionsbeschreibung*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf, 2022.
- [24] DIN EN ISO 50001:2018-12, *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018)*; Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2018.
- [25] DIN EN ISO 52120-1:2025-02, *Energieeffizienz von Gebäuden – Beitrag von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement – Teil 1: Allgemeiner Rahmen und Verfahren*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2025.
- [26] DIN ISO 50006:2025-02, *Energiemanagementsysteme – Bewertung der energiebezogenen Leistung anhand von Energieleistungskennzahlen und energetischen Ausgangsbasen (ISO 50006:2023)*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2025.
- [27] DIN EN 13306:2018-02, *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2018.
- [28] S. R. Wagner, S. Volkmer, S. Haußer, W. Chen und M. Becker, *Systematik zur Effizienzbewertung von Kälteanlagenssystemen mit Freier Kühlung*, Dresden: Tagungsbericht - DKV Tagung, 2024, ISBN: 978-3-9312715-59-4.
- [29] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbare Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*, 08.08.2020.

GLOSSAR

Tabelle 3: Im Leitfaden verwendete Begriffe und Erläuterungen - Glossar

BEGRIFF	ERLÄUTERUNG
Austrittstemperatur <i>engl. outlet temperature</i>	Temperatur des Transport- bzw. Wärmeträgermediums am Austritt aus der betrachteten Komponente oder dem Kreislauf.
Direkte Freie Kühlung (dFC) <i>engl. direct free cooling</i>	Nutzung eines natürlich verfügbaren Kühlmediums ohne hydraulische Trennung durch einen Wärmeübertrager (z.B. Nächtliche Fensterlüftung)
Eintrittstemperatur <i>engl. inlet temperature</i>	Temperatur des Transportmediums am Eintritt in die betrachtete Komponente oder dem Kreislauf.
Freikühler <i>engl. free cooler</i>	Luftbeaufschlagter Wärmeübertrager, der ausschließlich im Betrieb der Freien Kühlung die vom Kühlmedium aufgenommene Wärme an die Außenluft abführt.
Freikühlkreislauf <i>engl. free cooling circuit</i>	Hydraulischer Kreislauf, der die am Wärmeübertrager der Freien Kühlung aufgenommene Wärme zum Freikühler transportiert. Bei gemeinsamer Rückkühlung von Freier Kühlung und Kältemaschine kann derselbe Kreislauf zugleich als Freikühl- und Rückkühlkreislauf dienen.
Grädigkeit <i>engl. approach temperature difference</i>	Temperaturdifferenz zwischen einem wärmeabgebenden, heißen Medium und einem wärmeaufnehmenden, kälteren Medium. Im Leitfaden wird die kleinste verbleibende Temperaturdifferenz zwischen den beteiligten Medien eines Wärmeübertragers damit beschrieben. Hier gleichzusetzen mit dem Pinch-Point der Wärmeübertragung.
Indirekte Freie Kühlung (iFC-HX) <i>engl. indirect free cooling</i>	Nutzung einer natürlichen Wärmesenke, wobei das Medium der Wärmesenke und das Medium der Kältenutzung durch mindestens einen Wärmeübertrager hydraulisch voneinander getrennt sind.
Indirekte Freie Kühlung mit n-facher Wärmeübertragung (iFC-n-HX) <i>engl. indirect free cooling with n-stage heat transfer</i>	Indirekte Freie Kühlung mit n-facher Wärmeübertragung zwischen Kältenutzung und Wärmesenke. Wärmeübertrager innerhalb der Kältenutzung / der Verbraucher werden dabei nicht berücksichtigt.
Kältebedarf <i>engl. cooling demand</i>	Über einen definierten Zeitraum erforderliche Nutzkälteenergie, die dem zu kühlenden Prozess oder Medium entzogen werden muss.
Kälteerzeuger <i>engl. cooling unit</i>	Maschine, Anlage oder Komponente, die einem zu kühlenden System Wärme entzieht und dadurch Nutzkälte bereitstellt.
Kältelast <i>engl. cooling load</i>	Zu einem bestimmten Zeitpunkt erforderliche thermische Leistung, die dem zu kühlenden Prozess, Raum oder Medium entzogen werden muss.
Kältelastprofil <i>engl. cooling load profile</i>	Der zeitliche Verlauf der erforderlichen thermischen Leistung, die dem zu kühlenden Prozess, Raum oder Medium entzogen werden muss.
Kältenutzung <i>engl. useful cooling</i>	Bereich des Kältesystems, infolge dem Verbraucher oder Prozess Wärme entzogen und die erforderliche Kälte bereitgestellt wird. Die technischen Anforderungen der Kältenutzung bestimmen dabei das Temperaturniveau, die erforderlichen Volumenströme sowie den Kältebedarf und die Kältelast.
Kaltwasserkreislauf <i>engl. chilled water circuit</i>	Hydraulischer Kreislauf, in dem Kaltwasser Wärme zwischen der Kältenutzung bzw. den Verbrauchern und der Kälteerzeugung transportiert.
Pinch-Point <i>engl. pinch point</i>	Stelle innerhalb eines Wärmeübertragers, an der die Temperaturdifferenz zwischen den beteiligten Medien minimal ist. Hier gleichzusetzen mit Grädigkeit.
Primäres System <i>engl. primary system</i>	Im Regelbetrieb hauptsächlich genutzter Kälteerzeuger beziehungsweise hauptsächlich genutztes Kälteerzeugungssystem.

BEGRIFF	ERLÄUTERUNG
Prozesskreislauf <i>engl. process circuit</i>	Ereugerseitiger Kaltwasserkreislauf.
Redundantes System <i>engl. backup system</i>	Kälteerzeuger oder Teilsystem, das bei Ausfall oder unzureichender Leistung des primären Systems die Kälteversorgung absichert.
Rückkühlkreislauf <i>engl. recooling circuit</i>	Hydraulischer Kreislauf, der die am Verflüssiger aufgenommene Wärme zum Rückkühlwerk transportiert. Bei gemeinsamer Rückkühlung von Freier Kühlung und Kältemaschine kann derselbe Kreislauf zugleich als Freikühl- und Rückkühlkreislauf dienen.
Rückkühler <i>engl. dry cooler / heat rejection unit</i>	Luftbeaufschlagter Wärmeübertrager, der die im Rückkühlkreis aufgenommene Wärme, insbesondere die Verflüssigerwärme einer Kältemaschine, an die Außenluft abführt.
Simultanbetrieb <i>engl. simultaneous operation</i>	Kombinierter, gleichzeitiger Betrieb von Kältemaschine und Freier Kühlung zur Deckung der erforderlichen Kälteleistung.
Singulärbetrieb <i>engl. stand-alone operation</i>	Betrieb ausschließlich der Kältemaschine oder der Freien Kühlung zur vollständigen Deckung der erforderlichen Kälteleistung.
Spreizung <i>engl. temperature difference</i>	Temperaturdifferenz des Transportmediums zwischen Eintritt und Austritt einer betrachteten Komponente oder eines Kreislaufs.
TCOP <i>engl. total coefficient of performance</i>	Leistungsbezogene Effizienzkennzahl nach VDMA 24247-7. Sie beschreibt das Verhältnis der bereitgestellten Nutzkälteleistung zur gesamten Leistungsaufnahme innerhalb des betrachteten Bilanzraums.
TEPF <i>engl. total energy performance factor</i>	Energiebezogene Effizienzkennzahl nach VDMA 24247-7. Sie beschreibt über einen Betrachtungszeitraum das Verhältnis der bereitgestellten Nutzkälteenergie zum gesamten Energieeinsatz innerhalb des betrachteten Bilanzraums.
Transportmedium <i>engl. heat transfer fluid</i>	Medium, das thermische Energie zwischen Komponenten oder Teilsystemen transportiert, beispielsweise Luft, Wasser oder Sole.
Verbraucherkreislauf <i>engl. load circuit</i>	Teil des Kaltwasserkreislaufs, über den die Kälteverbraucher mit Kaltwasser versorgt und die aufgenommene Wärme abgeführt wird.
Verdampfer <i>engl. evaporator</i>	Bauteil, in dem ein Kältemittelmassenstrom verdampft wird und dabei einem sekundärseitigen Trägermedium Wärme entzieht.
Verdichter <i>engl. compressor</i>	Bauteil, das einen gasförmigen Kältemittelmassenstrom auf einen höheren Druck verdichtet. Dabei steigt üblicherweise auch dessen Temperatur.
Verflüssiger <i>engl. condenser</i>	Bauteil, in dem ein Kältemittelmassenstrom verflüssigt wird und dabei Wärme an einen sekundärseitigen Stoffstrom abgibt.
Wärmeabgabe <i>engl. heat dissipation</i>	Übertragung von Wärme von einem wärmeren Medium oder System an ein kälteres Medium beziehungsweise eine Wärmesenke.
Wärmequelle <i>engl. heat source</i>	System, Prozess oder Medium, das Wärme bereitstellt beziehungsweise aus dem Wärme aufgenommen wird, beispielsweise eine zu kühlende Maschine.
Wärmesenke <i>engl. heat sink</i>	System, Prozess oder Medium, das Wärme aufnimmt, beispielsweise die Außenluft am Rückkühlwerk.
Wärmeübertrager <i>engl. heat exchanger</i>	Bauteil, in dem thermische Energie von einem wärmeren auf ein kälteres Medium übertragen wird, ohne dass sich die beiden Medien stofflich vermischen.

A ANHANG: KÄLTETECHNISCHE ANWENDUNGSFELDER

Tabelle 4: Anwendungsfelder und mögliche Betriebsstunden der Freien Kühlung (Referenzstandort Würzburg)

Anwendungsfeld	Typische Temperaturbereiche [°C]	Lastverhalten	Beispiele	Mögliche Betriebsstunden FC für Würzburg [h/a]
Rechenzentren	VL 18–45 (Vorlauftemperatur)	Dauerbetrieb mit geringer Lastdynamik	Serverräume, IT-Infrastruktur, Telekommunikationsanlagen, ...	6900–8760
Industrielle Maschinenkühlung	VL 20–45	Schichtabhängiger Betrieb (häufig 24/7) mit moderaten bis ausgeprägten Lastschwankungen	Metallbearbeitung, Kunststoffbearbeitung, Werkzeugmaschinen, ...	7500-8760
Gebäudekühlung (ohne Entfeuchtung)	VL 16–22	Saisonaler Betrieb mit ausgeprägten Lastschwankungen	Bürogebäude, Hotels, Wohngebäude, ...	2600–4300 (von April bis Oktober)
Gebäudeklimatisierung (mit Entfeuchtung)	VL 6–12	Saisonaler Betrieb mit ausgeprägten Lastschwankungen	Bürogebäude, Hotels, Museen und Archive, ...	230–1300 (von April bis Oktober)
Industrielle Prozesskühlung	VL 3–14	Schichtabhängiger Betrieb (häufig 24/7) mit moderaten bis ausgeprägten Lastschwankungen	Pharmazeutische Produktion, Kunststoff- und Chemieindustrie, Getränke- und Lebensmittelindustrie, ...	1200-5600
Gewerbekälte	NT 2–10 (Nutztemperatur)	Kontinuierlicher Betrieb mit saisonalen Schwankungen	Supermärkte, Lagerhäuser, ...	950-4000
Tiefkühlanwendungen	NT –70 bis –20	Kontinuierlicher Betrieb mit saisonalen Schwankungen	TK-Lager, Pharma, Labore, ...	--

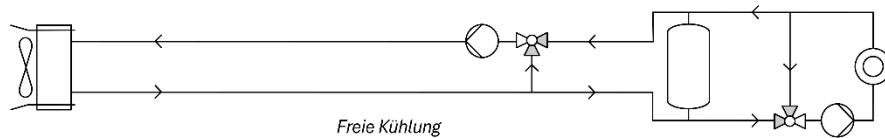
*Die möglichen Betriebsstunden beziehen sich auf die Nutz- oder Vorlauftemperaturen (z. B. 18–45 °C) und die entsprechenden Jahresstunden am Referenzstandort. Es wird ermittelt, wie viele Stunden pro Jahr die Temperatur unterhalb der jeweiligen Temperatur liegt und damit die Freie Kühlung (trockene Rückkühlung) theoretisch genutzt werden kann. Verluste und Grädigkeiten der Wärmeübertragungsprozesse sowie Betriebsstunden für Vorkühlprozesse der Freien Kühlung sind in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

B ANHANG: GRUNDLEGENDE EINBINDUNGSVARIANTEN VON FREIER KÜHLUNG

Indirekte Kälteanlagen Systeme mit Freier Kühlung im Reinkonzept sowie mit integrierter thermischer Absicherung im Kaltwasserkreislauf

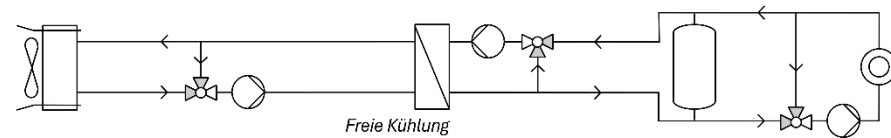
iFC-1HX

Indirekte Freie Kühlung mit 1-facher Wärmeübertragung



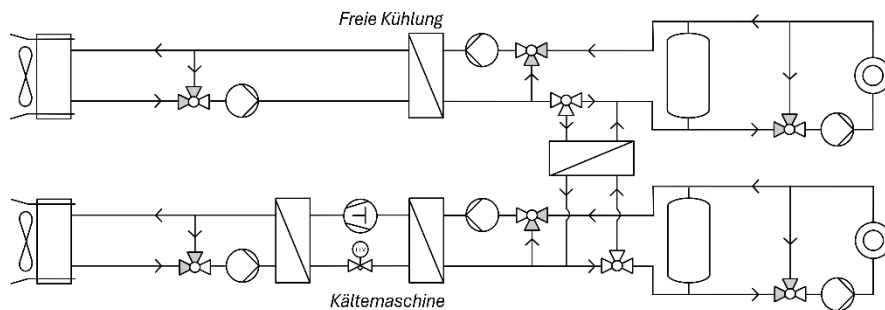
iFC-2HX

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung



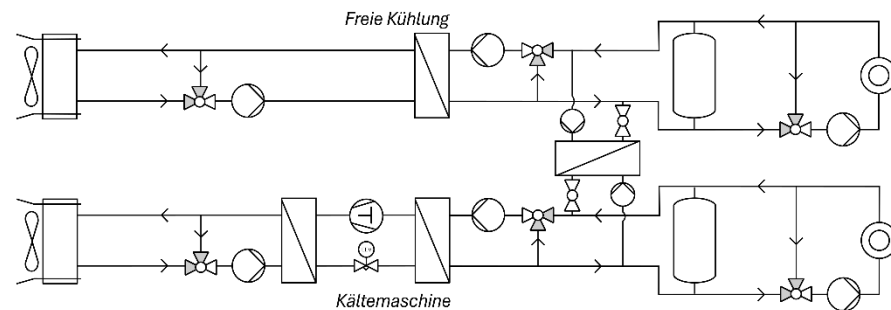
iFC-2HX-SC

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung mit getrennter Verbraucherkühlung und serieller Absicherung (coverage)



iFC-2HX-PC

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung mit getrennter Verbraucherkühlung und paralleler Absicherung (coverage)



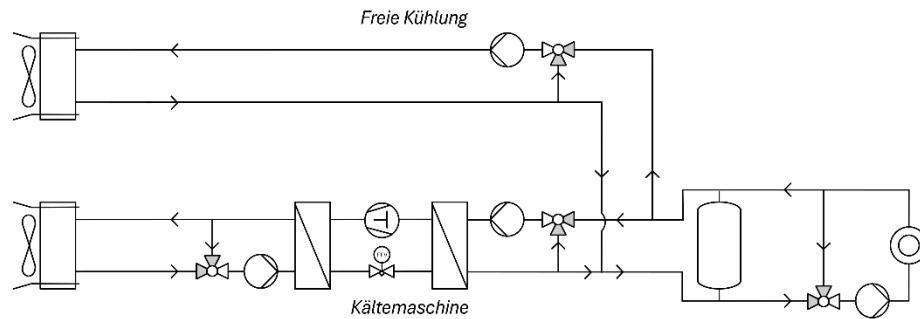
*Absicherungskonzepte können auch mit 1-facher Wärmeübertragung vorliegen

Abbildung B 1: Grundlegende Einbindungskonzepte von Freier Kühlung – Reinkonzept & Absicherung

Indirekte Kälteanlagen Systeme mit paralleler Einbindung von Freier Kühlung im Kaltwasserkreislauf

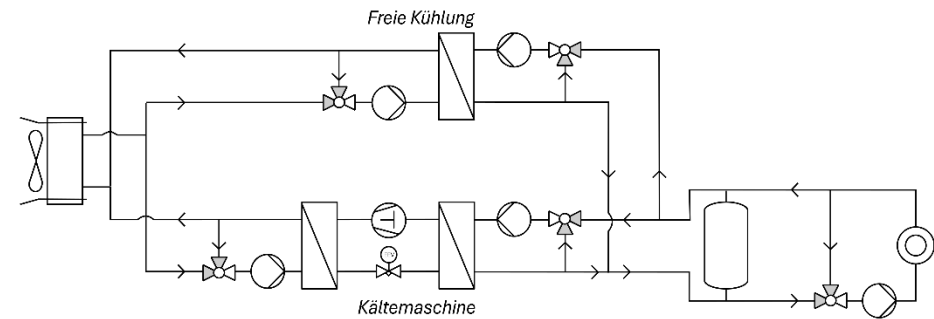
iFC-1HX-P

Indirekte Freie Kühlung mit 1-facher Wärmeübertragung
in paralleler Kaltwasserkreislaufeinbindung
mit getrennter Rückkkühlung



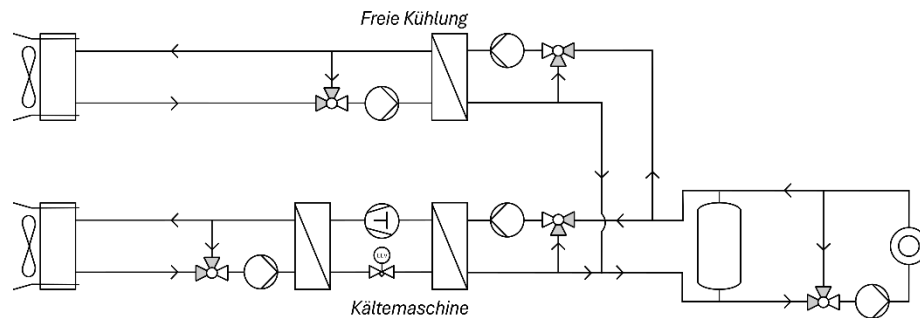
iFC-2HX-P/P

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in paralleler Kühl- und Kaltwasserkreislaufeinbindung
mit gekoppelter Rückkkühlung



iFC-2HX-P/0

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in paralleler Kaltwasserkreislaufeinbindung
mit getrennter Rückkkühlung



iFC-2HX-P/S

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in paralleler Kaltwasserkreislaufeinbindung und
serieller Kühlwasserkreislaufeinbindung mit gekoppelter Rückkkühlung

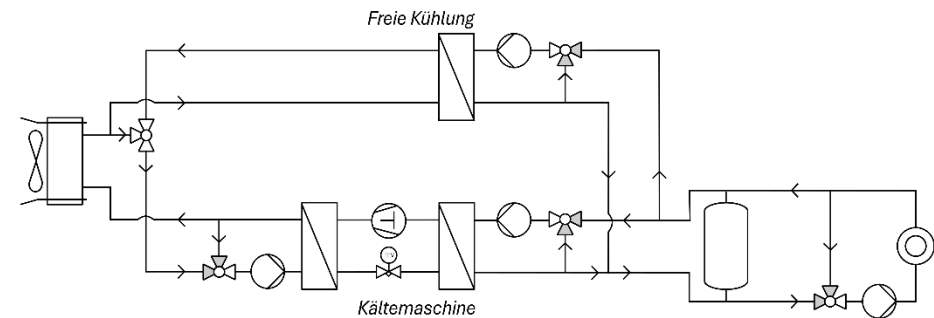
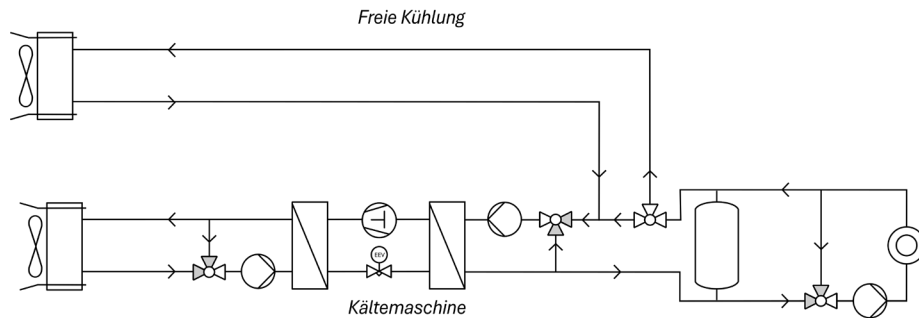


Abbildung B 2: Grundlegende Einbindungskonzepte von Freier Kühlung – kaltwasserseitig parallel

Indirekte Kälteanlagen Systeme mit serieller Einbindung von Freier Kühlung im Kaltwasserkreislauf zwischen Kältemaschine und Speicher

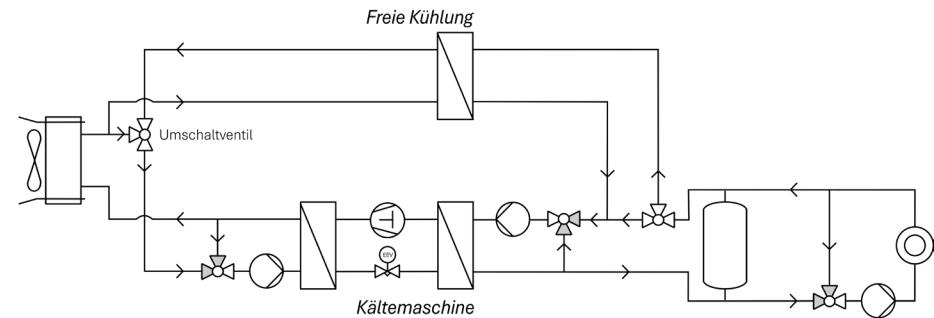
iFC-1HX-S

Indirekte Freie Kühlung mit 1-facher Wärmeübertragung
in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung
zwischen Kältemaschine und Speicher mit getrennter Rückkkühlung



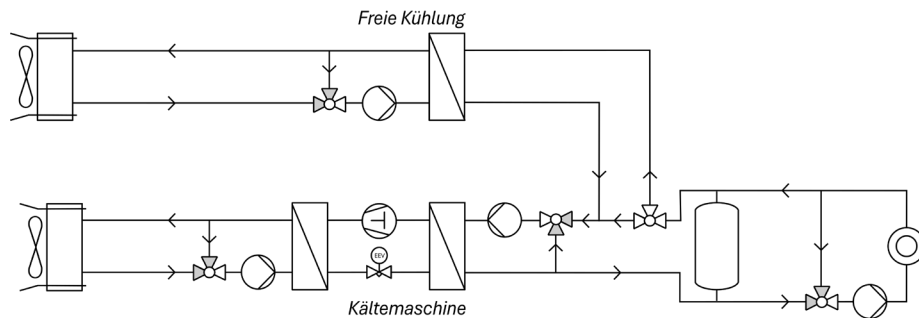
iFC-2HX-S/S

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in serieller Kühl- und Kaltwasserkreislaufeinbindung
zwischen Kältemaschine und hyd. Weiche mit gekoppelter Rückkkühlung



iFC-2HX-S/0

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung
zwischen Kältemaschine und Speicher mit getrennter Rückkkühlung



iFC-2HX-S/P

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung
in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung zwischen Kältemaschine und Speicher
und paralleler Kühlwasserkreislaufeinbindung mit gekoppelter Rückkkühlung

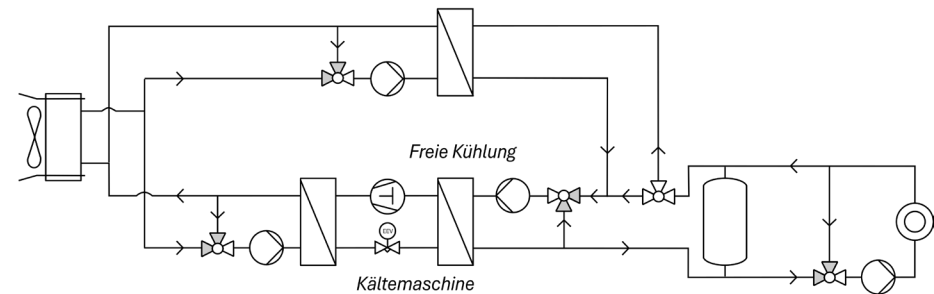
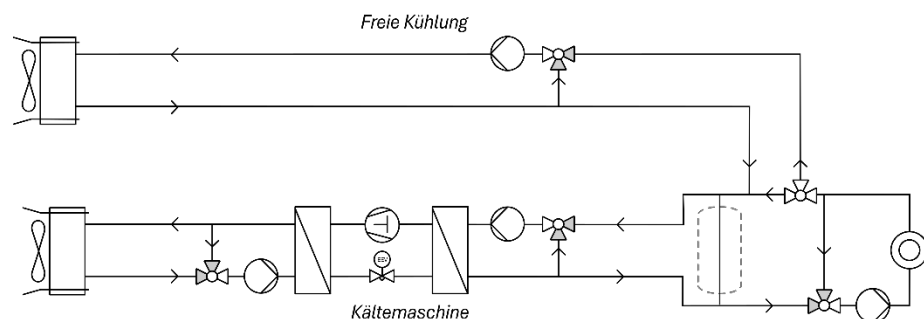


Abbildung B 3: Grundlegende Einbindungskonzepte von Freier Kühlung – kaltwasserseitig seriell (1)

Indirekte Kälteanlagen Systeme mit serieller Einbindung von Freier Kühlung im Kaltwasserkreislauf zwischen Verbraucher und hydraulischer Weiche bzw. Speicher

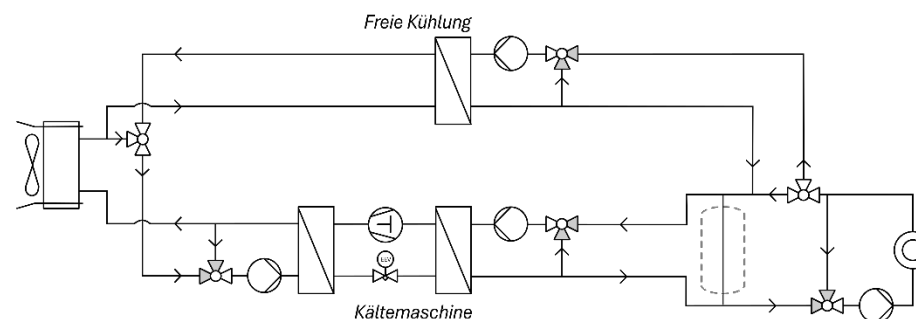
iFC-1HX-S+

Indirekte Freie Kühlung mit 1-facher Wärmeübertragung in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung zwischen Verbraucher und hyd. Weiche mit getrennter Rückkühlung



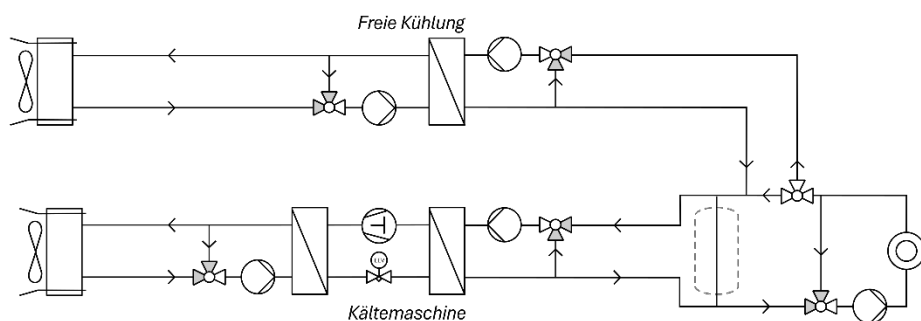
iFC-2HX-S+/S

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung in serieller Kühl- und Kaltwasserkreislaufeinbindung zwischen Verbraucher und Speicher mit gekoppelter Rückkühlung



iFC-2HX-S+/0

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung zwischen Verbraucher und hyd. Weiche mit getrennter Rückkühlung



iFC-2HX-S+/P

Indirekte Freie Kühlung mit 2-facher Wärmeübertragung in serieller Kaltwasserkreislaufeinbindung zwischen Verbraucher und hyd. Weiche und paralleler Kühlwasserkreislaufeinbindung mit gekoppelter Rückkühlung

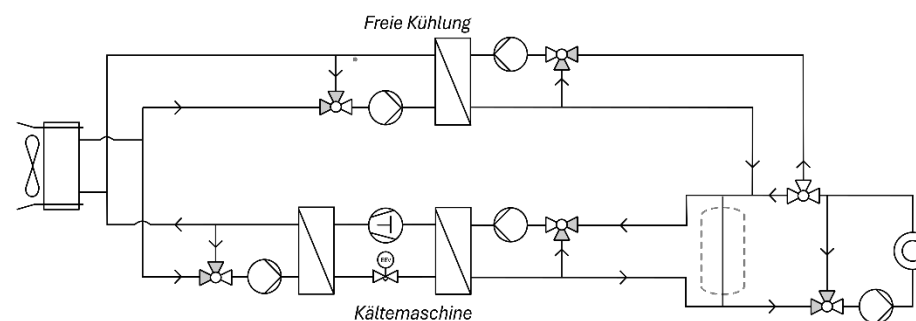


Abbildung B 4: Grundlegende Einbindungsvarianten von Freier Kühlung – kaltwasserseitig seriell (2)

C ANHANG: OPTIMIERTE EINBINDUNGSVARIANTEN VON FREIER KÜHLUNG

Indirekte Kälteanlagensysteme mit beispielhaften optimierten Einbindungsvarianten von Freier Kühlung

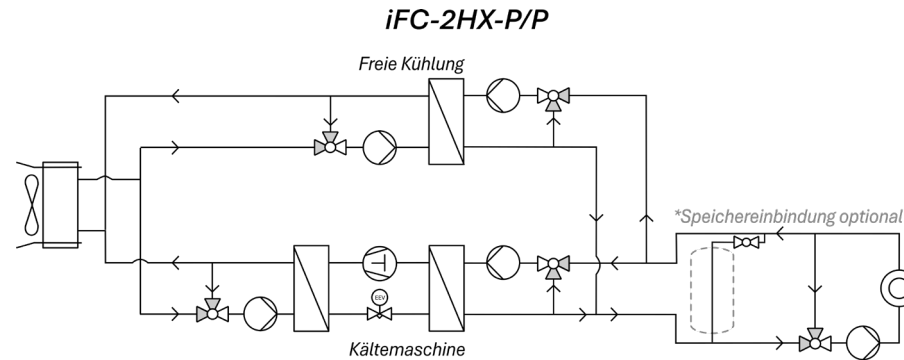
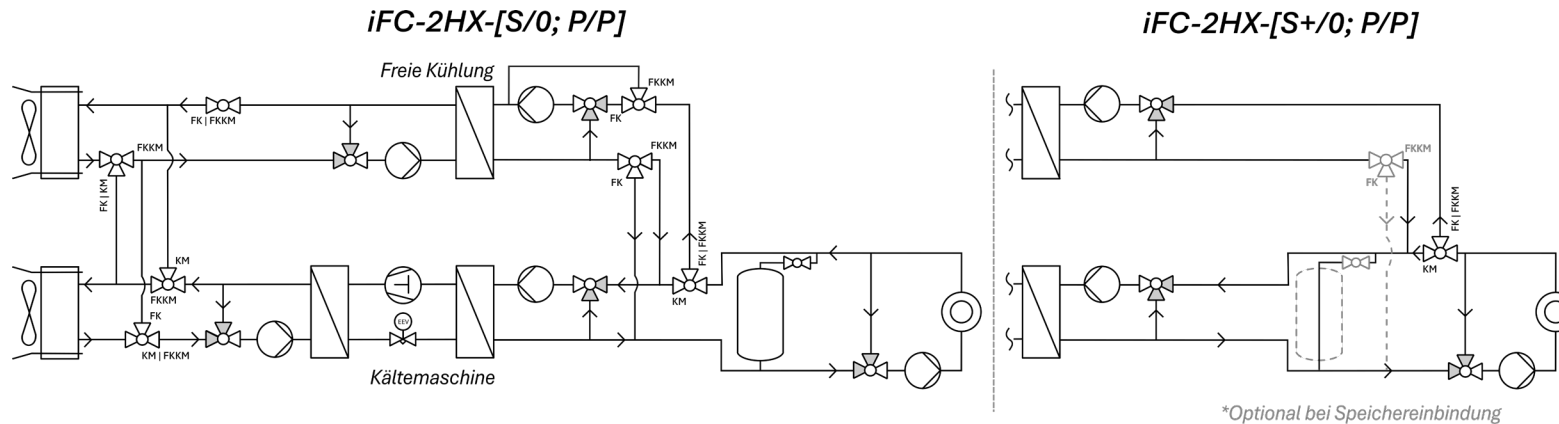


Abbildung C 1: Optimiertes Hydraulikkonzept für 2HX-Einbindung und reinem singulären Betriebszuständen von FK und KM: Anlagentyp iFC-2HX-P/P mit Speicherabspernung



Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Anlagenhydraulik wurden alle Absperrventile in den Schemata mit ihrer jeweiligen Öffnungs- und Durchflussrichtung gekennzeichnet.

Die Kennzeichnung erfolgt abhängig vom aktuellen Betriebsmodus:

FK = Freie Kühlung (singulärer Betrieb); KM – Kältemaschine (singulärer Betrieb); FKKM – Freie Kühlung und Kältemaschine im parallelen/simultanen Betrieb.

In jedem Betriebsmodus ist die jeweils alternative Durchflussrichtung abgesperrt, sodass klar erkennbar ist, welche Leitungswege aktiv und welche geschlossen sind.

Abbildung C 2: Optimiertes Hydraulikkonzept für 2HX-Einbindung mit singulären und simultanen Betriebszuständen von FK und KM: Anlagentyp kombinierte Einbindung iFC-2HX-[S/0; P/P] (links) bzw. iFC-2HX-[S+/0; P/P] mit Speicherabspernung

D ANHANG: WETTERDATEN DES REFERENZSTANDORTES WÜRZBURG

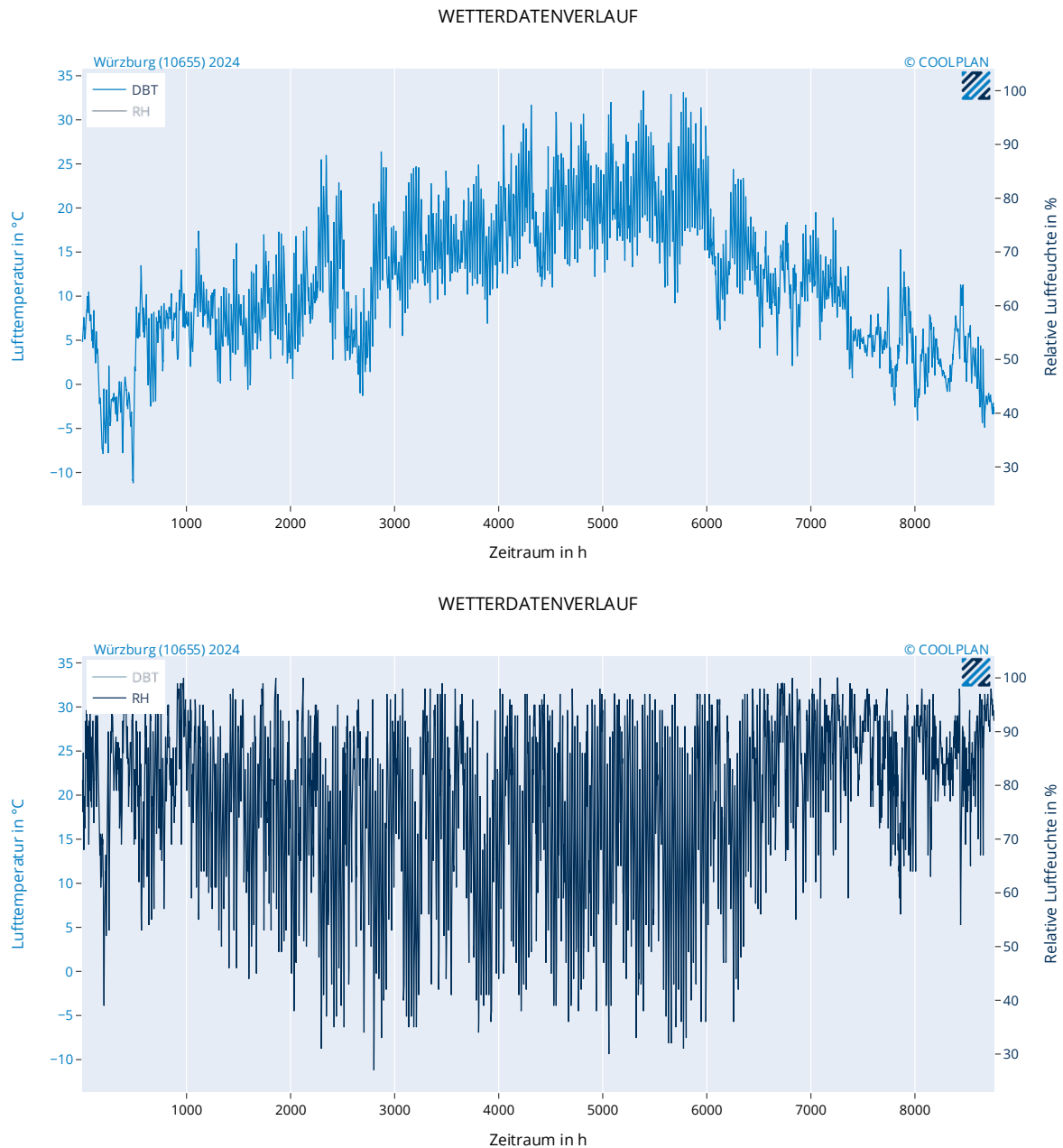


Abbildung D 1: Wetterdatenverlauf am Referenzstandort Würzburg. Oben: Verlauf der Außentemperatur.
Unten: Verlauf der relativen Feuchte