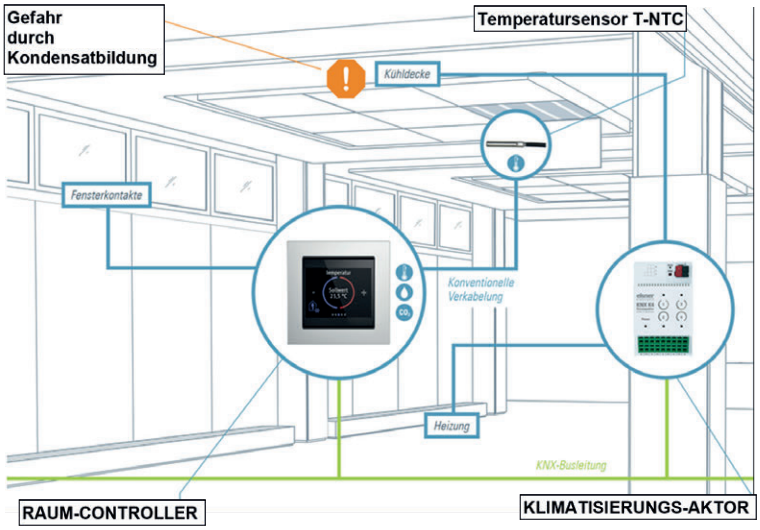

Abbildung 1.7 Komponenten der Taupunkt-Überwachung am Beispiel einer Kühldecke (Elsner Elektronik GmbH 2017)

Es soll im Hinblick auf die Anwendung der Stillen Kühlung in der Raumlufttechnik explizit darauf hingewiesen werden, dass Lösungsvarianten erarbeitet und untersucht worden sind, bei denen Kältemittel (z. B. R410A) im Flächenkühlelement verdampft, das zuvor auf Verdampfungsdruck gedrosselt wurde. Es muss aber gesagt werden, dass diese Versuche keinen praktikablen Ansatz ergeben haben. Hier ist und bleibt die Anwendung Indirekter Kühlsysteme die einzig realisierbare Lösung.

1.1.3 Kälteträgersysteme in der Lebensmittelkühlung

Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden im Bereich der Lebensmittelkühlung mit Indirekten Kühlsystemen Projektlösungen entwickelt und erste Betriebserfahrungen gesammelt. Im Zusammenhang mit der Halon-Verbotsverordnung in den 1990er-Jahren wurde in mehreren europäischen Ländern begonnen, die Normen für den Fachbereich Kälteanlagentechnik zu verschärfen. Spätestens in (Bendtsen, Vieth 1995) wird die schwedische Kühlnorm „Svenska Kylnorm Faktablad 2“ von 1992 erwähnt, die 1994 geändert und in der der Umbau weiterer 4000 Supermärkte in den nächsten sechs bis sieben Jahren gefordert wurde. Auch in der Schweiz wird die Anwendung der Indirekten Kühlung im Normalkühlbereich forciert. Außerdem wurden in mehreren europäischen Ländern Testanlagen mit Indirekter Kühlung aufgestellt sowie Versuche mit Solekreisläufen im Tiefkühlbereich durchgeführt. Zu dieser Zeit begann bei den Herstellern kältetechnischer Komponenten die Entwicklungsarbeit, um den einsetzenden Marktimpulsen gerecht zu werden. Dabei gelang es auch, die Vorteile von Kälteträgersystemen deutlich zu machen. Dem Ingenieur Lars-Olof Johansson ist es zu verdanken, dass eine ausführliche Untersuchung der Verhältnisse in den Kühlstellen eine belastbare Gegenüberstellung der beiden Kühlverfahren Direktverdampfung (DX, engl.: direct expansion) und Kälteträgersysteme in der Fachliteratur vorhanden ist. Infolge der FCKW-Diskussion wurde in Schweden eine neue Kühlnorm erarbeitet. Sie schrieb u. a. sol-

che konstruktiven Lösungen vor, die eine nur geringe Menge an Kältemittel beinhalten sollen. Dies galt auch dann, wenn die zu diesem Zeitpunkt tolerierten, FCKW- und HFCKW-Kältemittel eingesetzt werden konnten. Daher erfuhren in Schweden Indirekte Kühlsysteme einen starken Aufschwung. Sie wurden inzwischen u. a. für Industrie und Lagerzentren hergestellt, aber auch für den Einzelhandel und Pflegeeinrichtungen. Indirekte Kühlsysteme haben viele Vorteile, die sie in der Geschichte der Kältetechnik technisch und auch wirtschaftlich interessant gemacht haben. Viele dieser Kühlsysteme sind schon über 30 Jahre mit außerordentlich guten Ergebnissen in Betrieb. Die Technik war seinerzeit demnach auch nicht „neu"; sie wurde vielmehr von dem Bereich der Kältebranche „wiederentdeckt". Das traf selbst auf die Fachkreise zu, die sich früher auf „Frigen"-Anlagen (herkömmliche Kälteanlagen, in denen das Kältemittel in den Kühlstellen selbst verdampft) spezialisiert hatte. Ein wesentlicher Faktor dürfte auch gewesen sein, dass die Behörden und auch die öffentliche Meinung auf die Betreiber von Kälteanlagen Druck ausübten, diese neue Technik auszuprobieren. Es darf aber auch nicht unerwähnt bleiben, dass die Betreiber, wie zum Beispiel die Lebensmittelhändler, manchmal Vorbehalte äußerten, dass die Sole auslaufen und für die Kunden sichtbare Verschmutzungen verursachen könnte. Mit dem wachsenden Einsatz indirekter Kühlsysteme entdeckten immer mehr Planer und auch Betreiber von Kälteanlagen, dass es für diese technische Lösung stichhaltige Gründe gibt, auch wenn die Kühlnorm dies nicht explizit vorschreibt. Um die Vorteile des Einsatzes der Kälteträgersystems in der Lebensmittelkühlung deutlich zu machen, sind in der Tabelle 1.2 einige für die Projektplanung relevante Merkmale zusammengestellt. Als konkretes Beispiel wurde eine Kurzzeitlagerung von Gemüse betrachtet und drei unterschiedliche Verfahren der Kälteerzeugung miteinander verglichen.

A: DX-System als herkömmliches System, ein Kompressor pro Kühlraum

B: DX-System als Verbundsystem

C: Systeme mit Kälteträgern, im Folgenden auch Flüssigkeitskühler genannt

„0" stellt die Vergleichsbasis dar, „+" bedeutet einen Vorteil, „–" einen Nachteil.

Die hervorgehobenen Merkmale können als besonders wichtig angesehen werden.

Tabelle 1.2 Vergleich verschiedener Kühltechnologien für Gemüselager (Johansson 1992)

Nr.	Merkmal	A	B	C
1.	Art des Kältemittels	–	**0**	+
2.	Platzbedarf, Maschinenraum	**0**	+	+
3.	Kalkulation der Kälteleistung	–	**0**	+
4.	Maschinengröße und -leistung	–	+	+
5.	Kältefaktor, (Praxis) über das Jahr	–	**0**	+
6.	Lagerungsklima	–	–	+
7.	Einfache Erweiterung	–	–	+
8.	Wartung, Instandhaltung	–	**0**	+
Summe	Betriebskosten	–	**0**	+

Die Merkmale sowie die jeweiligen Unterschiede darin sollen nun ausführlich beschrieben werden:

- Wenn Sole in modernen Wärmeübertragern verwendet wird, beträgt die Bedarfsmenge an Kältemittel in einem Flüssigkeitskühlaggregat – wie bei Variante C – nur 10 bis 20 % der Menge, die für Variante A benötigt werden bzw. 20 bis 30 % der Variante B.
- Viele Kompressoren brauchen mehr Platz als wenige, auch wenn die wenigen groß sind. Der Platzbedarf der Varianten A und B ist etwa gleich groß.
- Durch genaue Kalkulation der Kälteleistung können bei den Varianten B und C 20 bis 50 % der installierten Gesamtleistung der Variante A eingespart werden. Die Art des Betriebs ist selbstverständlich entscheidend für die Größe dieser Einsparung. Dank der thermischen Masse in der Sole werden Spitzenbelastungen zeitlich besser verteilt. Die Spitzenbelastung beispielsweise kurz vor der Mittagspause wird während dieser Pause wieder ausgeglichen.
- Der durchschnittliche Kältefaktor über das Jahr ist entscheidend für die Betriebskosten. Unter den nachfolgenden Überschriften „Teilbelastung“ und „Energiebedarf“ wird näher darauf eingegangen.
- Ein Solesystem lässt sich bei laufendem Betrieb leicht erweitern, vorausgesetzt, dass Stammleitungen und Pumpenleistung nicht zu knapp dimensioniert wurden. An der Anlage sind vor Ort nur Klempnerarbeiten durchzuführen. Bei der Variante A sind bei jeder Erweiterung neue Kältemittelleitungen erforderlich. Durch Druck- und Dichtheitstests wird der Betrieb gestört. Für Variante B ergeben sich unter Berücksichtigung des Druckabfalls und der Ölrückführung größere Probleme bei der Auswahl der richtigen Rohrdimensionen. Die Überwindung des zusätzlichen Druckabfalls in der Saugleitung (vom Verdampfer zum Verdichter) wird mehr Antriebs- bzw. elektrische Leistung benötigt als für die größere Fördermenge der Kälteträgerpumpen.
- Es gibt noch mehr Beispiele dafür, dass die vielen Expansionsventile in den Anlagen der Art A und B zu Störungen führen können. Es besteht die Gefahr von Undichtigkeiten, sodass es sogar zum Ausfall des gesamten Systems durch Kältemittelverlust führen kann, noch bevor Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Die Expansionsventile eines Flüssigkeitskühlers halten weit besser dicht, da sie seltener Temperaturwechseln ausgesetzt werden. Die Erfahrung zeigt, dass Flüssigkeitskühlaggregate fast nie neue Expansionsventile benötigen, u. a. weil die Ventile eines serienmäßig hergestellten Aggregats in einer Werkstatt bei guten Arbeitsbedingungen und genauer Kontrolle eingebaut werden.

Neben den offensichtlichen und praktischen Vorteilen von Kälteanlagen mit Kälteträgern wurde in (Johansson 1992) auf die Qualitätsmerkmale eingegangen, die die Obst- und Gemüselagerung als Kälteanwendung kennzeichnen. Zu diesen spezifischen Merkmalen gehört die Lagerungsqualität für die Produkte. Um diese Lagerungsqualität zu erreichen und abzusichern, werden Anforderungen an die Anlagentechnik gestellt, wie zum Beispiel die Temperaturdifferenzen innerhalb der Wärmeübertrager, das Teillastverhalten der Kälteanlage, die Feuchtigkeitsbilanz der Raumluft und der Bedarf an elektrischer Antriebsenergie der Kälteerzeugung.

Lagerungsklima

Den wirtschaftlich entscheidenden Faktor stellt fast immer die Qualität der gelagerten Waren dar. Die Qualität wird vom „Lagerungsklima“ in den Kühlräumen bestimmt, dieses wiederum wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Richtige Temperatur: Für alle Produkte gibt es eine „optimale Temperatur“, die manchmal nur äußerst geringe Toleranzen erlaubt. Besonders kritisch wird es bei Temperaturen um den Gefrierpunkt.
- Gleichmäßige Temperatur: Die Unterschiede der Temperaturen im Kühlraum zwischen Boden und Decke sowie Abweichungen von der gewünschten Temperatur im Tagesverlauf sollten möglichst klein sein. Solche Abweichungen führen zu kürzerer Haltbarkeit und tragen zur Austrocknung des Kühlguts bei.
- Richtige Luftfeuchtigkeit: Für die meisten Lebensmittel ist eine hohe relative Luftfeuchtigkeit „optimal“. Dadurch wird die Austrocknung reduziert, die zu Gewichtsverlusten und Qualitätseinbußen führt.
- Optimale Luftgeschwindigkeit: Das heißt, eine möglichst geringe Luftgeschwindigkeit, wenn das Kühlgut seine Lagertemperatur erreicht hat, bzw. eine erheblich höhere Luftgeschwindigkeit während des Abkühlungsprozesses. Hierbei muss der Planer aufgrund seiner Erfahrung mit den betreffenden Produkten und dem infrage kommenden Betrieb in der Regel geeignete Kompromisse schließen. Heute besteht auch die Möglichkeit, die Drehzahl des Gebläses mittels einfacher PLC-Steuerungen den Erfordernissen automatisch anzupassen.

Die beiden ersten Punkte stehen in Zusammenhang mit der Genauigkeit der Temperaturregelung. Hier kann mit dem Solesystem eine größere Genauigkeit und auch eine gleichmäßigere Raumtemperatur erzielt werden. Die DX-Systeme werden fast immer von einem einfachen An-/Aus-Thermostat gesteuert. Eine Thermostat-Schaltdifferenz von 1,5 Grad ergibt für den Raum Temperaturvariationen in derselben Größenordnung. Die andauernd pulsartige Unterschreitung von Kühlraum-/Kühlguttemperatur und Feuchtigkeit – wie diese für die DX-Systeme nachgewiesen werden konnte – führt zu längeren Laufzeiten des Verdichters bei zusätzlich erhöhtem elektrischen Energiebedarf. Ein vom einem vergleichbaren Kühlstellenthermostat geregelter Solekühler kann das etwas besser. Durch eine modulierende bzw. stetige Regelung zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Systemen viel deutlicher. Der Solefluss lässt sich exakter bzw. in einem Bereich von 10 % bis 100 % stetig regeln, ein DX-System jedoch nur ein- oder ausgeschaltet werden, wobei zur Verbesserung der Genauigkeit dieser Temperaturregelung vieles versucht wurde, beispielsweise mit einem Verdampfungsdruck-Regler, jedoch meist nur mit mäßigem Erfolg. Mit einer eigenen Vorlauftemperatur-Regelung in der Hydraulik (vgl. Kapitel 5) des Kälteträgers, bezogen auf die Kühlaufgabe lässt sich eine wesentlich höhere Genauigkeit erzielen. Die Sole für die Kühler im Kühlraum hat dadurch eine gleichmäßigere Temperatur, die dem momentanen Bedarf genau angepasst ist.

Tabelle 1.3 Gleichmäßigkeit der Temperatur (Johansson 1992)

System	Regelung	Bandbreite (Regeldifferenz)
DX-Systeme	an/aus	3 °C
Solesysteme	Modulation	1 °C
Solesysteme mit Mischkreisläufen	Modulation	0,3 °C

In einem Kühlraum, dessen Temperatur manchmal 2 °C und manchmal 15 °C betragen soll, entstehen leicht Probleme bei der DX-Alternative der o. g. Systemart A. Der Kompressor und der DX-Kühler werden hier für die niedrigere Temperatur dimensioniert. Während der Kältebedarf bei der höheren Temperatur sinkt, läuft der Kompressor dennoch mit der fast doppelten der dann eigentlich benötigten Leistung. Das Ergebnis ist eine große Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Verdampferoberfläche. Dies führt zur verstärkten Austrocknung. Das Solesystem dagegen erlaubt wegen der Möglichkeit einer exakten Definition der Kälteträger- und Kühleroberflächentemperatur eine größere Flexibilität bei den vielfältigen, anwendungsbedingten Anforderungen im Bereich der Lebensmittel- bzw. Produktkühlung

Temperaturdifferenzen

Der häufigste Einwand gegen Solesysteme ist, dass sie einen zusätzlichen Wärmeübertrager zwischen dem Kältemittel und der Sole erfordern. Dieser müsse zwangsweise zu einer niedrigeren Verdampfungstemperatur führen, die wiederum einen größeren Kompressor und dadurch einen größeren Strombedarf erfordert (siehe Abbildung 1.8). Das Diagramm zeigt links die Temperaturen der Luft und des Kältemittels in einem DX-Kühler und rechts in einem Solekühler. Der Luftstrom kommt von links. Wie erwartet benötigt der DX-Luftkühler im Abstand „D"-Kelvin (siehe Abbildung 1.8) ein höheres Verdampfungstemperaturniveau, als es für die Abkühlung des Kälteträgers im Flüssigkeitskühlsatz notwendig wäre. Dies ist jedoch reine Theorie.

Die Abszisse in diesen Abbildungen gibt jeweils die Fläche des Wärmeübertragers an.

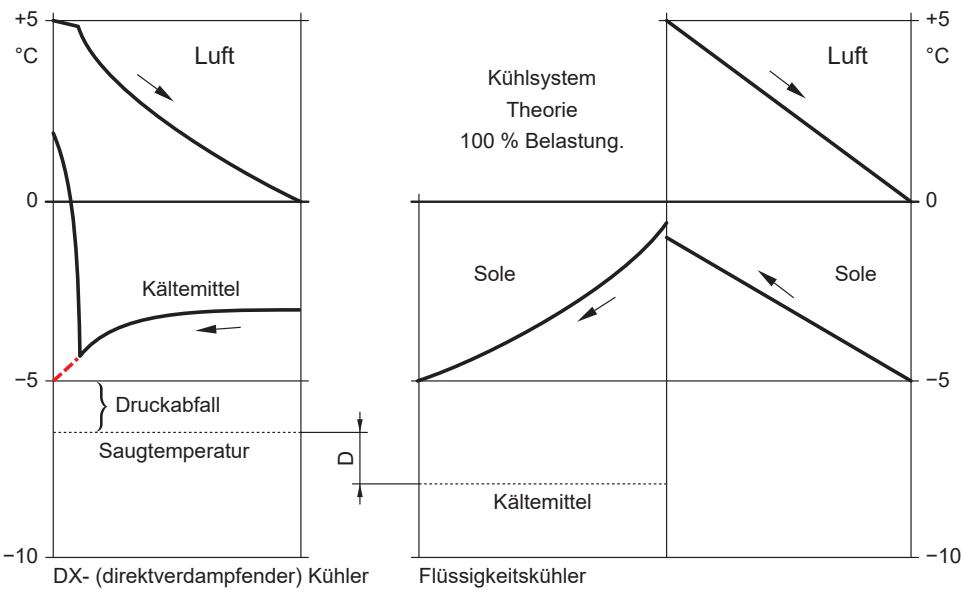

Abbildung 1.8 Temperaturdifferenzen an einer Kühlstelle (theoretisch) (Johansson1992)

In der Praxis sieht es anders aus, vgl. Abbildung 1.9. Der DX-Kühler zeigt einige Unvollkommenheiten:

- Ein einigermaßen großer DX-Kühler besitzt i. d. R. mehrere Kältemittelkreise. Es ist fast unmöglich, einen völlig gleichmäßigen Fluss in allen Kreisen herzustellen.
- Die Frostbildung an den Oberflächen des DX-Kühlers ist ungleichmäßig. Dies verschiebt die Belastung zwischen den Kreisen, was wiederum dazu führt, dass einige Kreise mit größerer Überhitzung laufen als vorgesehen.
- Der Luftstrom ist ungleichmäßig. Dadurch werden die Kreise unterschiedlich belastet.
- Das Expansionsventil ist selten richtig dimensioniert oder eingestellt. Daher läuft es instabil und oszilliert zwischen einer offenen und einer gedrosselten Lage (Johansson 1992).

Die Kurve a in Abbildung 1.9 zeigt, wie ein Kreis einige Augenblicke lang voll ausgenutzt sein kann. Wird die Auswirkung aller genannten Faktoren kombiniert, ergibt sich der Verlauf der Kurve b. Sie stellt bildhaft dar, wie schwierig es ist, einen DX-Kühler wirkungsvoll auszunutzen. Die Kurve b gilt jedoch nur für den einen Fall, wenn das Thermostat am Anfang einer Laufperiode soeben eingeschaltet hat. Während des Kompressorbetriebs wird die Temperatur immer weiter herabgesetzt und erreicht die Kurve c, noch bevor das Thermostat ausschaltet. Über den Zeitraum betrachtet, ergibt sich eine erheblich geringere durchschnittliche Saugastemperatur als in Abbildung 1.8. Die Differenz D zur Saugtemperatur des Solesystems ist unerheblich.

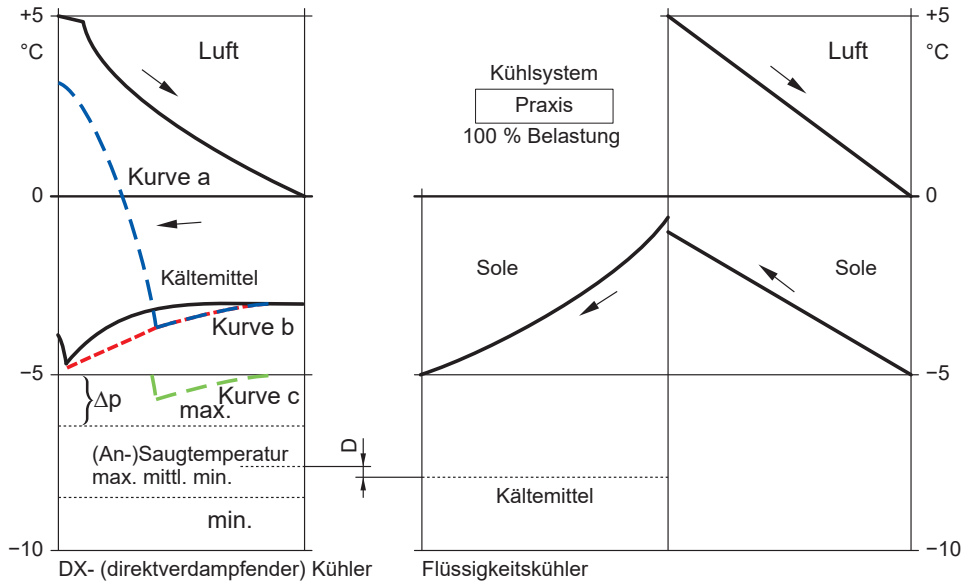

Abbildung 1.9 Temperaturdifferenzen an einer Kühlstelle (praktisch) (Johansson, L. O. 1992)

Um die tatsächlichen Temperaturverhältnisse in einem direktverdampfenden Kühler darzustellen, wurden etwa zehn Thermoelemente an dem Verdampfer positioniert und ein ausreichend langes Protokollieren der Temperaturen durchgeführt.

5 Hydraulische Systeme

Es ist grundsätzlich zu empfehlen, die hydraulischen Systemkreisläufe sowohl auf der Seite der Energieumwandlung (Kälte-/Wärmeerzeugung) als auch an den Stellen der Energieanwendung (Kühl- und Heizstellen) differenziert zu betrachten. Diese These lässt sich aus den unterschiedlichen Aufgaben der jeweiligen Teilsysteme ableiten. In der VDI 6018 wird ausgeführt, dass die Hydraulik im Kaltwasserkreis maßgeblichen Einfluss auf den Betrieb des Wasserkühlsatzes und die Regelung des gesamten Systems hat. Sie entscheidet über die Güte der Wärmeabfuhr am Verbraucher. Fehler in der Hydraulik eines Kaltwassersystems haben wegen der geringeren Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauftemperatur deutlich stärkere Rückwirkungen auf die Erzeugung und den Verbraucher als z. B. in der Heiztechnik. Die Unterscheidung der grundsätzlichen Schaltungsarten von Kälteträgersystemen erfolgt wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

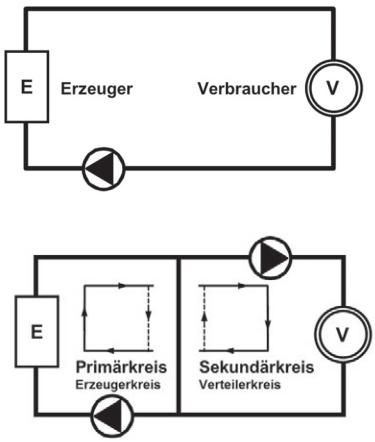

Abbildung 5.1 Hydraulische Grundsysteme in indirekten Systemen (VDI 6018)

5.1 Methoden zur Auftrennung in Primär- und Sekundärkreisläufe

Zunächst stellt sich die Frage, ob eine hydraulisch klar definierte Trennung zwischen primär- und Sekundärkreislauf erfolgen muss. Die Überlegung selbst resultiert einmal mehr aus den Erfahrungen des praktischen Anlagenbetriebs, die seit Beginn der Entwicklung dieses Fachgebiets gemacht worden sind. Es hat sich gezeigt, dass sich bei Vorhandensein mehrerer gleichartiger Bauelemente (Kältemaschinen, Verbraucher) und gleichzeitig schwankender Kälteleistung an den Kühlstellen bzw. dem verfügbaren Leistungspotenzial der Kälteerzeugung Probleme ergeben können. Diese Beeinflussung mehrerer Kältequellen und -senken untereinander lässt sich aus den strömungsphysikalischen Gesetzmäßigkeiten parallel geschalteter, hydraulischer Kreise ableiten, die im Kapitel 2 grundsätzlich erläutert wurden.

Zur Vorausberechnung der Druckverluste – bei vorgegebenen Volumenströmen – wird davon ausgegangen, dass die Widerstände in den parallelen Kreisen weitestgehend gleich sein sollen. Wenn dem nicht so ist, dann wird ein Element nicht mit dem vorausberechneten Volumenstrom versorgt. Einer der unmittelbar benachbarten Bauteile oder Kreisläufe wird dagegen deutlich mehr als notwendig überströmt. Letztendlich treten dadurch Leistungsdiskrepanzen im Gesamtsystem auf, die sich trotz leistungsfähigster Steuerungs- und Regelungssysteme nicht zufriedenstellend ausgleichen lassen. Um nun die oben beschriebenen Kreisläufe berechenbar zu machen, wird in der Praxis oft der maximal notwendige Kälteträger-Volumenstrom für die Dimensionierung der Teilsysteme verwendet. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass diese Annahme auch für alle verbundenen Teilsysteme zutrifft. Dieser Betriebszustand wird aber real nur in wenigen Situationen einer Anlage erreicht und erleichtert eigentlich nur die Berechnung und Dimensionierung. Tatsache ist aber, dass auf der Seite der Kälteanwendung, bedingt durch die Bauteile der Leistungsregelung (z. B. Regelventile), ausgeprägte Schwankungen der miteinander in Verbindung stehenden Volumenströme eintreten. Deshalb wird dieser Anlagenteil als derjenige hydraulische Kreislauf aufgefasst, in dem sich ändernde Volumenströme einstellen werden. Eine nähere Beschreibung der Funktionalität dieser hydraulischen Regelkreise wird in Kapitel 5.4 noch durchgeführt. Die dort gezeigten Mengen- bzw. Volumenstromregelungen an den Kühlstellen werden dazu führen, dass über den Wärmeübertrager schwankende Stoffströme fließen und sich daraus resultierend im gesamten Hydraulikkreislauf veränderliche Strömungsverhältnisse einstellen. Deshalb wird der Einsatz eines hydraulischen Trennglieds in indirekten Kühlsystemen im Allgemeinen kaum noch bezweifelt. In der Fachliteratur finden sich deshalb auch verschieden Hinleitungen, die aber zuallermeist zweckdienlich funktionieren. In der VDI 6018 werden für die Trennstelle zwischen den Erzeugungs- und Anwendungskreisläufen Varianten empfohlen, die in Abbildung 5.2 angegeben sind.

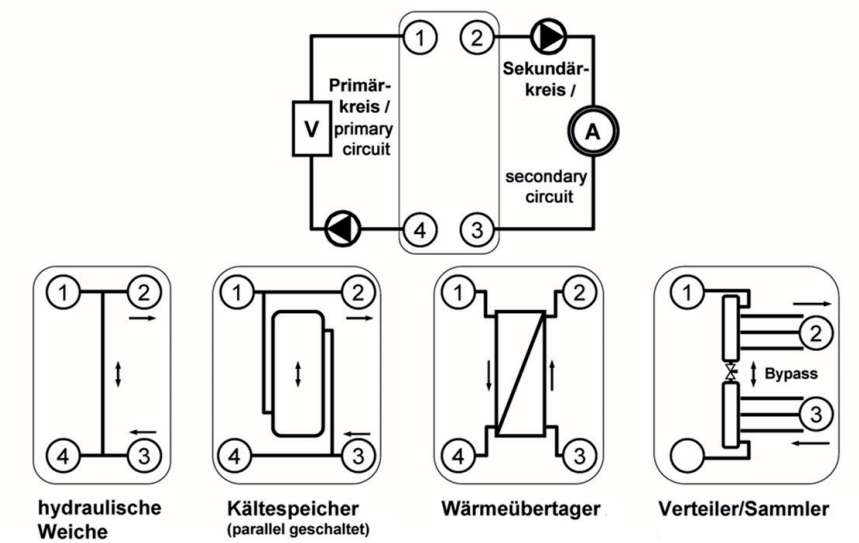

Abbildung 5.2 Beispiele für die Trennung von Primär-/Erzeugerkreis und Sekundär-Verteilerkreis (VDI 6018)

Die Entscheidung, welche Anlagenvariante gemäß Abbildung 5.2 realisiert werden soll, kann aus den Aspekten eines kontinuierlicher Anlagenbetriebs, einer möglichst geringen Aufnahme an elektrischer Antriebsleistung für die Förderanlagen und einer hohen Regelgüte der Regelkreise abgeleitet werden.

5.1.1 Die hydraulische Weiche

Als Grundvoraussetzung für die Trennung der hydraulischen Kreisläufe soll die hydraulische Weiche verwendet werden. Dadurch wird die wichtigste Voraussetzung zur Sicherung eines kontinuierlichen Anlagenbetriebs erfüllt: Die möglichst kontinuierlichen Fluidströme über den Flüssigkeitskühlern und die zwangsläufig oft diskontinuierlichen Volumenströme über den Teilkreisläufen der Kälteanwendung können sich nicht mehr gegenseitig beeinflussen.

Das strömungstechnische Grundprinzip wird in Abbildung 5.3 gezeigt.

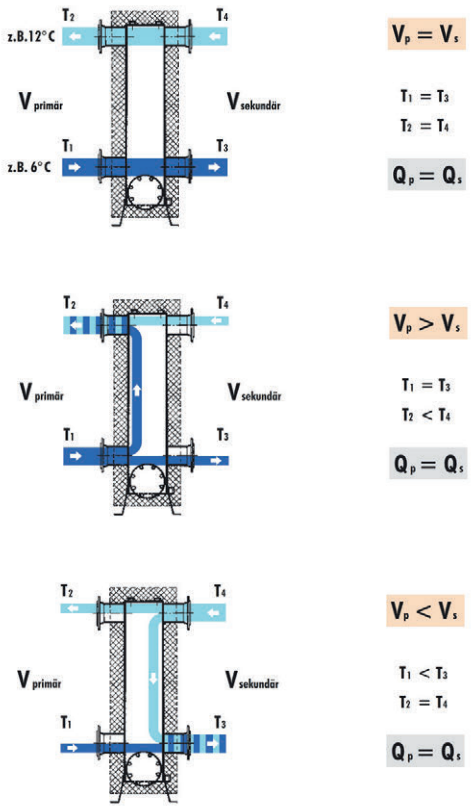

Abbildung 5.3 Variationen der Anlagenparameter an hydraulischen Weichen (Magra 2021b)

Eine räumliche Trennung der Wasserströme findet nicht statt. Durch den Einsatz einer hydraulischen Weiche werden trotz stark variierender Volumenströme auf der Wärmeabnehmer-Seite

5.6.1 Arten der flüssigen Kälteträger

5.6.1.1 Wasser

Wasser ist der billigste und beste Kälteträger. Die hohe spezifische Wärmekapazität, niedrige Viskosität und eine gute Wärmeleitfähigkeit ermöglichen eine große Transportleistung. Bei einer Temperaturdifferenz von 5 K sind als umzuwälzendes Volumen 0,17 m³/h je kW erforderlich. Es sollte kein vollentsalztes Wasser verwendet werden, denn dieses greift als aggressives Lösungsmittel Dichtungsmaterial an, wirkt schon durch geringe pH-Wert-Veränderungen korrosiv und kann keine Schutzschicht bilden. Bei Wasser mit einem Anteil gelösten Calciumcarbonats $Ca(HCO_2)_3$ wirken die Calcium- beziehungsweise Carbonationen puffernd. Die untere Einsatzgrenze liegt beim Gefrierpunkt 0 °C (Piatti 1968).

Am Anfang der Betrachtungen zum Kälteträger Wasser und den wässrigen Gemischen sollen die mannigfaltigen und rein praktischen Probleme aufgezeigt werden, die bei Nichtberücksichtigung der korrekten Aufbereitung eintreten können.

Praxisausflug – Häufige Probleme und Ziele von Unternehmen (Aqua-Technik 2020)

Neben den zentralen Punkten Korrosion, (Kalk-)Ablagerungen, Biofilmen und Legionellen gibt es noch einige differenziertere Herausforderungen und Ziele bei vielen Unternehmen. Eine kleine Sammlung aus unserer Praxis sehen Sie hier:

- Dichtungen gehen regelmäßig kaputt.
- Maschinen schalten aufgrund Druckverluste ab.
- Die Verrohrung korrodiert stark.
- Querschnittsverengungen durch Eisen-/Manganablagerungen, speziell bei Nutzung von Brunnenwasser
- Die Energiekosten sollen gesenkt werden.
- Die Maschinenverfügbarkeit soll gesteigert werden.
- Hergestellte Produkte sind verschmutzt.
- Der Gesundheitsschutz für Mitarbeiter soll erhöht werden.
- Haftungsrisiken sollen reduziert werden.
- Reparatur- und Wartungskosten sollen gesenkt werden.
- Der Wasserverbrauch soll reduziert werden.
- Filter verstopfen ständig.
- Die Geschäftsleitung bzw. der Einkauf wünscht eine Kostenreduzierung bei Wasserchemikalien.
- Die Wasserqualität soll regelmäßig kontrolliert werden.
- Es wird eine Gefährdungsbeurteilung gemäß § 42. BImSchV benötigt (bei Nassrückkühlwerken).
- Verstopfte Zuleitungen zu Kühlstellen in Maschinen sorgen für Produktionsausfälle.
- Die allgemeine Anlagenlebensdauer der Kühlsysteme soll erhöht werden.
- Die Kühlleistung ist saisonal zu gering (z. B. im Sommer).

- Es werden Produkte für interne Prüfungen benötigt (z. B. bei Nassrückkühlwerken: Dip-Slides-Tests, pH-Messgeräte, Leitfähigkeitsmessgeräte).
- Das Kühlsystem soll desinfiziert werden.
- Das Kühlsystem soll entkalkt/gereinigt werden.
- Der Kühlturm (Verdunstungskühlanlage) soll gereinigt werden.
- An bzw. in Wärmeübertragern sind starke Ablagerungen bzw. diese werden „zerfressen".
- Es soll eine Fremdfirma mit Wartung der Anlagen betreut werden (Wartungsvertrag).
- Bereits installierte Wasseraufbereitungsanlagen funktionieren nicht (mehr) richtig (Aqua-Technik 2020).

5.6.1.2 Solen (Salz-/Wassergemische)

Solen sind Lösungen von Salzen in Wasser. Durch Zugabe von Salz in Wasser wird der Gefrierpunkt der entstehenden Lösung gesenkt. Am eutektischen Punkt wird die tiefste Gefriertemperatur einer Salzlösung erreicht, weitere Zugabe von Salz erhöht den Gefrierpunkt der Lösung wieder. Dies sei am Beispiel einer Calciumchloridlösung in Abbildung 5.56 erläutert.

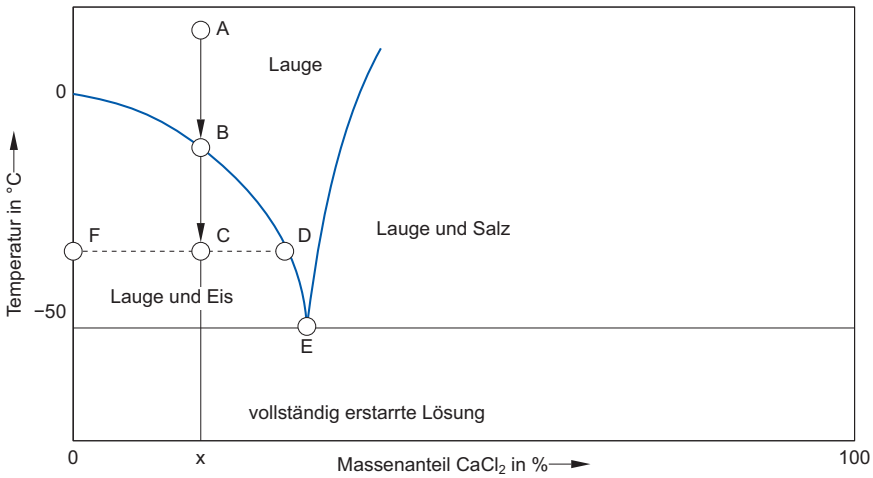

Abbildung 5.56 Wässrige Lösung von Calciumchlorid als Beispiel eines Eutektikums (Cube, Steimle 1997)

0: Schmelzpunkt reinen Wassers
A: flüssige Salzlösung der Konzentration *x*
B: Bildung reiner Wasserkristalle aus der Lösung
C: Wasserkristalle und Lauge nebeneinander
E: Eutektikum, an dem die ganze Lösung erstarrt
F: Eis mit der verbliebenen Mutterlauge der Konzentration am Punkt D

Der Kurvenverlauf entspricht der Gefrierpunktlinie der Salzlösung. Oberhalb der Kurven ist Flüssigkeit, am eutektischen Punkt E und darunter ist die Lösung vollständig gefroren. Interessant sind die beiden Bereiche links und rechts der Kurven. Zunächst der linke Bereich gemäß Beispiel eine Lösung am Punkt A mit einem Salzanteil *x*. Beim Abkühlen wird Punkt B, der

Gefrierbeginn der Lösung, erreicht. Wird die Sole weiter abgekühlt, so gefriert reines Wasser zu Eis. Dadurch nimmt der Salzanteil in der verbleibenden Lösung zu und die Solekonzentration verläuft entlang der Grenzkurve nach rechts unten. Eiskristalle und Lauge existieren nebeneinander, im Mengenverhältnis abhängig von der Temperatur. Am Punkt C entspricht die Menge Eis zur Menge Restlauge als Hebelverhältnis der Strecken C–D zu C–F. Erst wenn beim weiteren Abkühlen der eutektische Punkt E erreicht oder unterschritten wird, ist die gesamte Sole erstarrt. Da beim Ausfrieren von Eis aus der Lösung die Schmelzwärme von Wasser aufzuwenden ist. kann in einer teilweise gefrorenen Sole eine erhebliche Kältemenge gespeichert oder transportiert werden; das Eis sollte dazu in feinverteilter Körnung vorliegen. Üblich ist aber bislang, nur die fühlbare Wärme der Sole für den Kältetransport zu nutzen.

Abbildung 5.56 macht deutlich, dass die Gefrierpunktlinie rechts des eutektischen Punkts viel steiler verläuft und dieses Gebiet für den technischen Gebrauch nicht geeignet ist. Ist der Salzanteil in der Lösung höher, als er der eutektischen Konzentration entspricht, so wird beim Abkühlen Salz ausfrieren, bis wieder die eutektische Konzentration erreicht ist (Cube, Steimle 1997).

Chloridhaltige Salzlösungen

Verwendet werden Calciumchlorid, Gemische aus Calcium- und Magnesiumchlorid und seltener das billige Natriumchlorid. Reines Magnesiumchlorid neigt leicht zu Ausfällungen. Günstig sind die guten Transporteigenschaften, aber alle chlorhaltigen Solen greifen Chromnickelstähle und Leichtmetalle an und sind sorgfältig zu inhibieren. Der pH-Wert wird in den Bereich 8 bis 8,5 verschoben; eine laufende Überwachung ist zu empfehlen. Für Lebensmittelbetriebe stehen geeignete Inhibitoren zur Verfügung.

Chlorfreie Salzlösungen

Verwendet werden Kaliumcarbonat K_2CO_3 und Gemische aus Kaliumcarbonat und Silikat K_2SiO_3. Vorteil dieser Solen ist die Verträglichkeit mit Edelstahl, Leichtmetallen und Kupferwerkstoffen. Inhibitoren sind erforderlich, da die Sole sonst stark alkalisch reagiert (Cube, Steimle 1997).

5.6.1.3 Wässrige Alkohollösungen

Dazu zählen einwertige Alkohole, wie Methanol und Ethanol, zweiwertige Alkohole, wie die Ethylen- und Propylenglykole, und dreiwertige Alkohole, wie das Glycerin. Die Lösungen sind zunächst nicht oder wenig korrosiv und für alle gängigen Werkstoffe verwendbar. Durch in Wasser eingebrachten Sauerstoff und durch Luftsauerstoff an offenen Oberflächen werden Alkohole oxidiert. Es entstehen stark korrosiv wirkende organische Säuren. Solche Systeme sollten deshalb geschlossen gehalten und inhibiert werden; eine jährliche Kontrolle ist zu empfehlen. Die Gefrierpunktlinie von Ethanol-Wasser hat eine kleine, aber unwesentliche Unstetigkeit. Die eutektischen Punkte der Glykole sind nicht eindeutig, die Lösung erstarrt glasig bei ungefähr 70 % Glykolgehalt. Eine Variante der löslichen Gemische ist eine wässrige Emulsion, deren Gefrierpunkt so tief liegt, dass der Einsatz bis zu Temperaturen von –50 °C möglich ist. Die Emulsion ist für Lebensmittelbetriebe zugelassen (Cube, Steimle 1997).

5.6.1.4 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen

In dieser Gruppe gibt es reine Stoffe und auch Gemische, die tiefe Gefrierpunkte bei relativ günstiger Viskosität aufweisen. Sie sind immer brennbar, je dünnflüssiger sind und umso niedriger der Flammpunkt liegt. Die spezifische Wärmekapazität ist deutlich kleiner als die von Wasser oder wässrigen Lösungen, für eine bestimmte Kühlleistung ist deshalb immer ein größeres Flüssigkeitsvolumen umzupumpen. Aus einer großen Palette von Stoffen können hier vor allem auch geeignete Kälteträger für den kombinierten Einsatz Heizen/Kühlen gefunden werden. Die früher verwendeten, besonders günstigen Chlorverbindungen, wie zum Beispiel das Tetrachlormethan, unterliegen der Verbotsverordnung halogenierter Substanzen und stehen nicht mehr zur Verfügung. Die in der Kältetechnik üblichen metallischen Werkstoffe sind mit organischen Kohlenwasserstoffen verträglich, bei Schläuchen und flexiblen Dichtungen muss allerdings die Eignung geprüft werden. Aromatische Kohlenwasserstoffe haben aufgrund ihrer Molekülstruktur eine besonders hohe thermische Stabilität und werden für Anwendungen bis 400 °C eingesetzt (zum Beispiel DP/DPO) (Cube, Steimle 1997).

5.6.1.5 Perfluorierte Kohlenstoffverbindungen

Bei diesen Verbindungen sind alle Wasserstoff- durch Fluoratome ersetzt. Durch die sehr starke Fluorverbindung sind diese Stoffe stabil, nicht giftig, nicht brennbar und damit für lebensmittelverarbeitende Anwendungen geeignet. Die Dampfdrücke dieser Stoffe gehen mit zunehmender Molekülgröße zurück, die Gefrierpunkte steigen dagegen an. Wegen der chemischen Stabilität besitzen die in die Atmosphäre entlassenen Gase dieser Perfluorverbindungen im Übrigen ein hohes Treibhauspotenzial (Cube, Steimle 1997).

5.6.1.6 Silikonöle

Diese metallorganischen Stoffe sind nicht giftig und nicht korrosiv. Die niedrigviskosen Typen haben sehr tiefe Gefrierpunkte, aber auch einen niedrigen Flammpunkt. Die Viskositätskurven aller Silikonöle sind flach und damit sehr günstig für den Einsatz bei tieferen Temperaturen, die spezifischen Wärmekapazitäten sind dagegen klein, sodass große Flüssigkeitsmengen umzupumpen sind. Silikonöle der Viskositätsklasse 100 und höher (100 cSt bei 25 °C) sind physiologisch völlig inert und damit für den Einsatz in Lebensmittelbetrieben gut geeignet, allerdings sind sie auch im höheren Preissegment angeordnet (Cube, Steimle 1997).

Silikonöle sind polymere Methylsiloxane oder polymere Phenylsiloxane. Allerdings sind die spezifischen Wärmekapazitäten vergleichsweise gering.

5.6.1.7 Mineralöle (zum Beispiel Dieselöle)

Mineralöle, besser Wärmeträgeröle, sind Kohlenwasserstoffe und werden aus Erdöl gewonnen. Sie sind relativ preisgünstig, jedoch üblicherweise brennbar und chemisch aggressiv gegenüber vielen Dichtungsmaterialien; die Aussage zur Brennbarkeit ist dabei zu relativieren. Wärmeträgeröle auf Mineralölbasis sind im Anlieferungszustand bei Raumtemperatur nur schwer zu entzünden, erst nach thermischer Belastung bilden sich leichtsiedende Zersetzungsprodukte, die den Flammpunkt des Öls senken. Durch geeignete Pflegemaßnahmen können die Leichtsieder ausgeschleust werden, sodass der hohe Flammpunkt erhalten bleibt. Mineralische Wärmeträgeröle greifen keine IT-vergleichbaren Dichtungen an. Es gibt aber synthetische Öle, die besondere Dichtungssysteme fordern (Cube, Steimle 1997).

5.6.1.8 Biologische Öle (zum Beispiel D-Limonene)

Öle aus den Schalen von Zitrusfrüchten (Handelsname z. B. D-Limonene) sind lebensmitteltechnisch unbedenklich und werden u. a. zur Kühlung von Gussformen in der Schokoladenproduktion eingesetzt.

5.6.2 Unterschiede bei der Energieübertragung durch Kälteträger

In Tabelle 5.3 sind für verschiedene Gruppen von Kälteträgern die maßgebenden Kennzahlen aufgelistet. Dazu werden die Eigenschaften der Kälteübertragungsflüssigkeiten bei –10 °C mit denen von Wasser bei +5 °C verglichen.

Tabelle 5.3 Charakteristische Verhältniswerte im Vergleich zu Wasser (Cube, Steimle 1997)

Kälteträger-Gruppe	Volumenstrom $m^3/(h \cdot kW)$	Druckabfall Pa	Durchmesser m	Wärmeübergang $W/(m^2 \cdot K)$
Wasser (Basis)	1,00	1,0	1,0	1,0
Anorganische Salzlösung	1,05–1,15	1,5–2,2	1,1–1,2	0,6–0,8
Alkoholische Lösungen	1,0–1,1	1,4–2,1	1,1–1,2	0,4–0,6
Wässrige Emulsionen	0,8	1,5	1,0	0,4
Organische Stoffe	1,9–3,0	3–12	1,5–2,1	0,2–0,8
Perflour-Verbindungen	2,0–2,1	4,9–6,1	1,7	0,3–0,5
Silikonöle	2,7–3,1	7–12	1,9–2,4	0,1–0,5

Die Tabelle soll zunächst einen groben Vergleich innerhalb eines großen Fluidspektrums ermöglichen. Für einen schlüssigen Vergleich sind immer die aktuellen Stoffdaten der Hersteller zu verwenden. Beispiele mit den aktuell zur Verfügung stehenden Parametern werden in den Abbildung 6.18 und Abbildung 6.34 vorgestellt. In (Eckert et al. 2025) werden weiterführende Betrachtungen im Hinblick auf die Kennzahlen des Energietransports bei unterschiedlichen Kälteträgern durchgeführt. Für den Transport einer bestimmten Kälteleistung bei einer bestimmten Erwärmung der Flüssigkeit wird die umzuwälzende Flüssigkeitsmenge aus der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte bestimmt. Aus

$$\dot{Q}_0 = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \tag{5.7}$$

wird durch Umstellen

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_0}{\rho \cdot c \cdot \Delta t} \tag{5.8}$$

und daraus der auf die Masse bezogene Wert berechnet:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_W} = \frac{\rho_W \cdot c_W}{\rho \cdot c} \tag{5.9}$$

Je kleiner die spezifische Wärmekapazität des Mediums, umso größer ist die umzuwälzende Menge. Der Druckverlust des Kälteträgers gleichen Durchmessers wird durch diesen Volumenstrom stark beeinflusst, wobei der Druckabfall mit niedriger Viskosität verringert wird. Die Änderung der rohrhydraulischen Kennwerte sowie der Wärmeübertragungskoeffizienten ist im Kapitel 2.3 dargestellt.

5.6.3 Grundlagen der Chemie und Biologie für Wasser als Kälteträger

Optimale Qualität bei Wasser

Selbst das Wasser, das aus der Trinkwasserleitung entnommen wird, ist nicht ohne Weiteres für den direkten Einsatz und zum Befüllen von Kühlkreisläufen geeignet. Vielmehr wäre es notwendig, ein sogenanntes „ideales" Wasser als Betriebsstoff in Kaltwasserkreisläufen zu verwenden. Ein derartiges Kühlwasser müsste ein mittelhartes Gleichgewichtswasser sein, das daher nicht zur Bildung von Wasserstein neigt, Metalle nicht angreift und etwa folgendermaßen gekennzeichnet ist:

Tabelle 5.4 Bestandteile des „idealen Kühlwassers" (Piatti 1968)

pH-Wert	7,6…7,8
Carbonathärte	8…10 ° dH
Kohlensäure, freie	8…15 mg/Liter
Kohlensäure, zugehörige	8…15 mg/Liter
Kohlensäure, aggressive	0 mg/ Liter
Langelier-Index	möglichst 0
Sauerstoff	mindestens 4…5 mg/Liter
Chlorionen	maximal 50 mg/Liter
Sulfationen	maximal 50 mg/Liter
Nitrate und Nitrite	maximal 10 mg/Liter
Ammoniak	maximal 10 mg/Liter
Phosphate und Silikate	unschädlich
Eisen und Mangan	maximal 0,2 bzw. 0,1 mg/Liter
Abdampfrückstand	maximal 500 mg/Liter
Sinkstoffe	maximal 250 mg/Liter
Verbrauch an Kaliumpermanganat	maximal 25 mg/Liter

Leider ist dieses „ideale Kühlmittel" selten verfügbar und Inhibitoren, wie die industriell angebotenen Härtestabilisatoren, Korrosionsschutzmittel und Biozide, gehören heute zum Stand der Technik. Deshalb ist es zumeist notwendig, das Wasser, welches als Betriebsmittel verwendet

werden soll, aufzubereiten. Grund- und Oberflächenwässer ungünstiger Beschaffenheit können durch geeignete Maßnahmen so verändert und verbessert werden, dass sie in ihrem Verhalten dem „idealen Kühlwasser“ nahekommen (Piatti 1968).

Die Wasserhärte

Beabsichtigt man jedoch eine praktisch vollständige Enthärtung, verwendet man stark saure Kationenaustauscher in der Na^+-Form. Eine Verrieselung im Vakuum beispielsweise vermindert gleichzeitig den Gehalt an gelöstem Luftsauerstoff, jedoch ist zu bemerken, dass es wesentlich häufiger ist, diese Menge erhöhen zu müssen. Dazu dienen unterschiedliche Verfahren der Wasserbelüftung, die insbesondere in jüngster Zeit weitgehende Anwendung finden. Auf solche Weise kann auch eine unerwünschte Konzentration an Eisen und Mangan durch Ausfällen von Hydroxiden und anschließendem Filtern beseitigt werden. Vorwiegend handelt es sich aber darum, die Menge des im Wasser gelösten Sauerstoffs zu erhöhen. So müssen in einem Kühlwasser mit weniger als 6 °dH und einem negativen Langelier-Index mindestens 4 bis 6 mg Sauerstoff pro Liter vorhanden sein, um auf Eisen eine Kalk-Rost-Schutzschicht bilden zu können (Piatti 1968).

Sehr einfach lässt sich daher ein Wasser nach dem Langelier-Index

$$I = \Delta pH = pH_{\text{gemessen}} - pH_{\text{Gleichgewicht}} \tag{5.10}$$

beurteilen. Dieser gibt für eine bestimmte Carbonathärte die Differenz zwischen dem gemessenen pH-Wert des Wassers und demjenigen nach der Gleichgewichtskurve gemäß Abbildung 5.57 an.

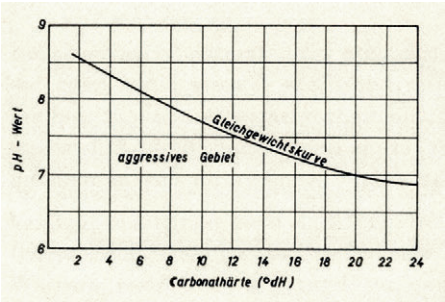

Abbildung 5.57 pH-Wert von Gleichgewichtswasser (Piatti 1968)

Null ist der Index dann, wenn das geprüfte Wasser ebenfalls im Gleichgewicht ist. Bei einem negativen Wert ist das Wasser eisenangreifend, und zwar umso stärker, je mehr dieser Wert unter null absinkt. Ein positiver Index zeigt dagegen, dass das Wasser leicht Härtebildner ausscheidet, die sich dann als Deckschicht, nicht aber als Schutzschicht auf Oberflächen ansetzen. Der Langelier-Index gibt die Korrosivität von Wasser an und liefert auf einfache Weise ein angenähertes Bild des Verhaltens eines Kühlwassers. Allerdings sagt er nichts über gefährliche Ionen aus, wie etwa die Chloridionen; die Nichtcarbonathärte kann er eben nicht berücksichtigen. Nicht zu vernachlässigen ist aber die Tatsache, dass der pH-Wert eines Wassers bei einer Temperatur von 20 °C gemessen wird. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieser Wert temperaturabhängig ist. Dies gilt selbst für chemisch reines Wasser, das also weder saure noch basische Stoffe enthält. Erwärmt man solches Wasser, so verringert sich sein pH-Wert mit steigender Temperatur. Diese Abhängigkeit ist der Abbildung 5.58 zu entnehmen.

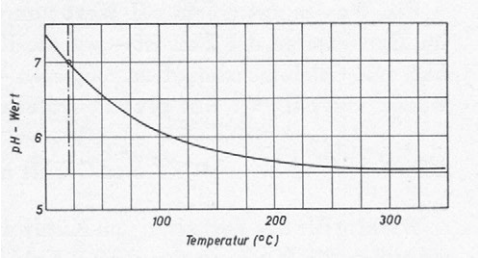

Abbildung 5.58 Abhängigkeit des pH-Werts chemisch reinen Wassers von der Temperatur (Piatti 1968)

Der pH-Wert eines Wassers oder einer wässrigen Lösung gibt keineswegs den Gehalt an Säure oder Alkali an, sondern vielmehr die Konzentration an Oxoniumionen (H_3O^+). Weiter oben wurde schon dargelegt, dass Wasser stets zum Teil in Wasserstoff- sowie Hydroxylionen dissoziiert, also gespalten ist. Diese Dissoziation nimmt mit steigender Temperatur zu. Das Ionenprodukt des Wassers K_W hat bei 25 °C den Wert von $1{,}0 \cdot 10^{14}$ $(mol/l)^2$, bei 0 °C jedoch $0{,}114 \cdot 10^{14}$ $(mol/l)^2$ und bei 100 °C $65 \cdot 10^{14}$ $(mol/l)^2$. Es wurde bereits betont, dass diese beiden Ionenarten stets in gleicher Konzentration vorhanden sind, dass also chemisch reines Wasser auch dann neutral bleibt, wenn sein pH-Wert sinkt. Ein tieferer pH-Wert als 7 zeigt demnach bei solchem Wasser nicht die Anwesenheit einer Säure an, sondern vielmehr seine erhöhte Reaktivität. Er ist dann ein Maß der Reaktionsstufe. Reines Wasser ist bei erhöhter Temperatur reaktionsfähiger und greift deshalb Metalle verstärkt an; es ist korrosiver. Wie aus Abbildung 5.58 hervorgeht, hat chemisch reines Wasser bei 80 °C einen pH-Wert von 6,3 – eine Tatsache, die wichtig ist, wenn es zur Kühlung verwendet wird (Piatti 1968).

Im Hinblick auf die Auswahl der Rohrwerkstoffe erhält die Kenntnis über den pH-Wert eine zusätzliche Bedeutung. Eine Übersicht über diesen Zusammenhang kann aus Abbildung 5.59 entnommen werden.

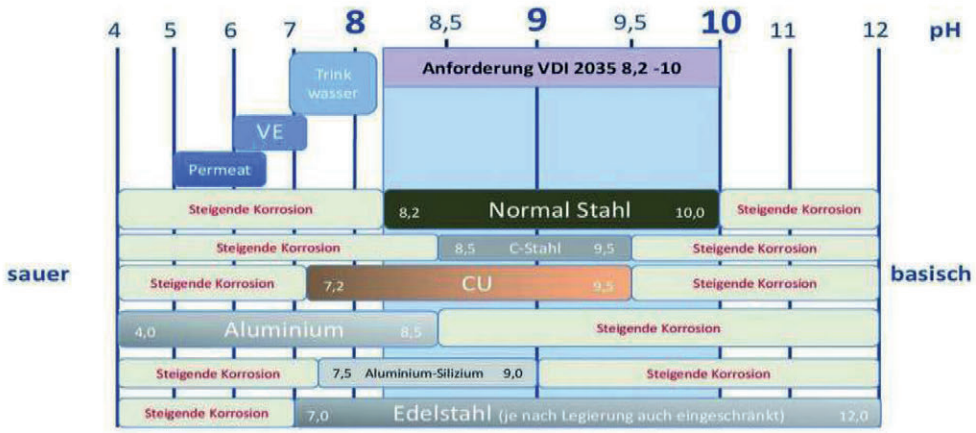

Abbildung 5.59 Korrosionsaktivität über dem pH-Wert (Aqua-Technik 2020)

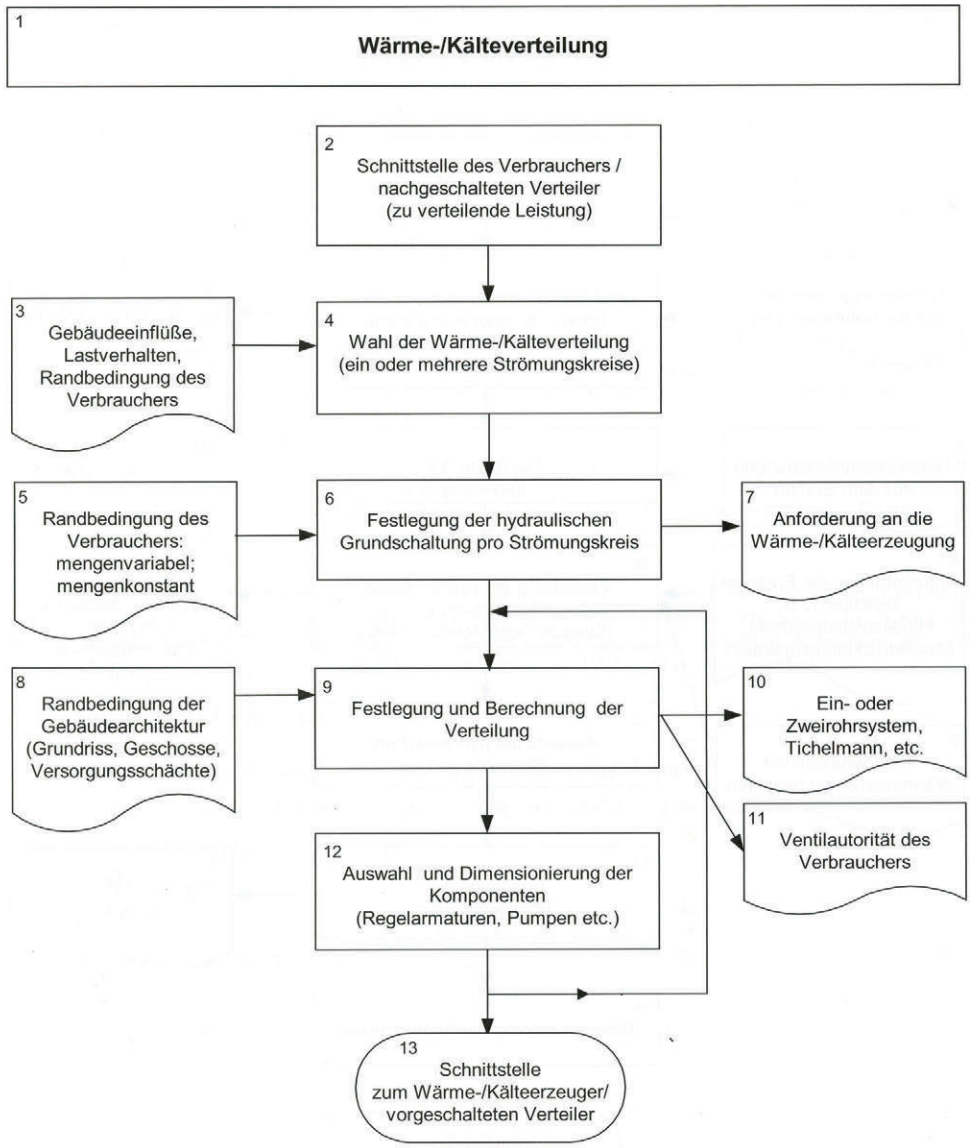

Abbildung 6.1 Ablaufdiagramm zur Planung der Elemente der Kälteerzeugung (VDMA 24199)

6.1.1 Ermittlung der Lasten für die Raumlufttechnik

Die möglichst exakte Lastbilanz der Kühl- bzw. Klimatisierungsaufgabe ist die wichtigste Voraussetzung jeglicher Planung. Praxiserfahrungen zeigen, dass es mithilfe diffuser Annahmen oder sog. Erfahrungswerte zu oft zu Über- bzw. Unterdimensionierungen des Anlagensystems

kommt. Ganz gleich, ob die thermische Anlagenleistung zu hoch oder zu tief abgeschätzt wird, ein effizienter und bestimmungsgemäßer Betrieb wird tendenziell kaum erreicht werden können.

Je nach der durch den Betreiber vorgegebenen Kühlaufgabe sind unterschiedliche Lastbilanzen aufzustellen. Diese Differenzierung resultiert aus den sehr unterschiedlichen thermischen und stofflichen Lastanteilen, die Einfluss auf die jeweilige Bilanzierung haben.

Kühllast klimatisierter Räume

Für die Kühllastberechnung bei der sogenannten Klimakühlung wird zumeist die VDI 2078 anzuwenden sein. Weiterhin existieren Richtlinien, die für ganz bestimmte, häufig technologisch geprägte Kühlaufgaben in Gebäuden aufgestellt wurden. Als Beispiel soll hier die DIN V 18599-7, auch in Verbindung mit der VDI 2054, genannt werden, die für Rechenzentren bzw. größere Serverräume als Berechnungsrichtlinie anzuwenden sind. Das Berechnungsverfahren nach der VDI 2078 soll grundsätzlich mithilfe von Softwarelösungen durchgeführt werden. Die auf dem Markt angebotenen Produkte müssen ganz bestimmten Qualitätskriterien entsprechen, die in der Richtlinie selbst sowie in den mitgeltenden Empfehlungen (z. B. VDI 6007-1) festgeschrieben sind. So ist es möglich, alle auf den zu klimatisierenden Raum einwirkenden Energiequellen und -senken zu bewerten. Die Auswirkungen der Anlagentechnik, wie beispielsweise die Zuführung von konditionierter Luft in den Raum oder die Übertragung von Kühlleistung durch Flächenkühlungssysteme, fließen ebenfalls in die Gesamtbilanz mit ein.

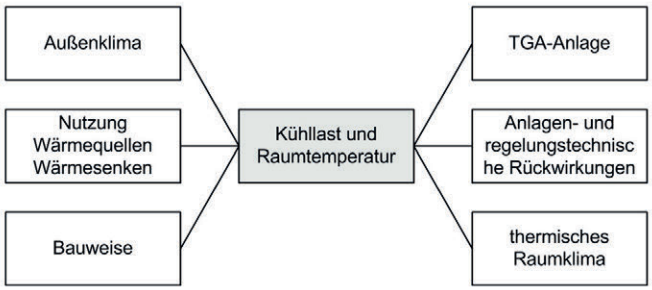

Abbildung 6.2 Einflussparameter auf Kühllast und Raumtemperatur (VDI 2078)

Um eine Kühllastberechnung nach VDI 2078 durchführen zu können, sind alle auf den Raum bzw. das Gebäude einwirkenden Einflussgrößen zu berücksichtigen.

Gesamtlast:

Die Summe aller zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden Lasten bezeichnet man als Gesamtlast

$$\dot{Q}_{\mathrm{Ges}}(t) = \sum_{\mathrm{j}} \dot{Q}_{\mathrm{j}}(t)$$

Innere und äußere Last:

Entsprechend der Entstehungsart unterteilt man die Gesamtlast in eine innere Last (I) und eine äußere Last (A)

$$\dot{Q}_{\mathrm{Ges}}(t) = \dot{Q}_{\mathrm{I}}(t) + \dot{Q}_{\mathrm{A}}(t)$$

Zur besseren Differenzierung der Kühllasten erfolgt zunächst deren Einteilung in sensible und latente Kühllasten.

Sensible (trockene) Kühllast $\dot{Q}_{sens}$:

Sie umfasst die fühlbare Wärme, die durch Kühlung aus dem Raum abgeführt werden muss. Der Bezugs-Raumzustand wird nur durch die Lufttemperatur oder eine zusammengesetzte Größe aus Lufttemperatur und den Oberflächentemperaturen des Raums (operative Raumtemperatur) definiert.

Latente (feuchte) Kühllast $\dot{Q}_{latent}$:

Sie umfasst die „gebundene" Wärme (Kondensationswärme), die zur Entfeuchtung aus dem Raum abgeführt werden muss. Der Bezugs-Raumzustand ist durch die oben genannten Raumtemperatur- und Raumfeuchtebedingungen definiert.

Als innere Lasten gelten:

- Personen (sensible und latente Lastanteile)
- Beleuchtung (sensible Lasten)
- Geräte und Maschinen (sensible Lasten)
- Stoffdurchsatz (vorwiegend sensible Lasten)
- chemische Reaktionen (sensible und latente Lastanteile)

Zu den äußeren Anteilen der Kühllast gehören:

- Transmissionswärmestrom durch Wände und Dächer (sensible Lasten)
- Transmissions- und Strahlungswärmestrom durch Fenster (sensible Lasten)
- Fugenlüftung und Infiltration (sensible und latente Lastanteile)

Bei der Ermittlung der inneren Lastanteile soll der Fokus vor allem auf den Wärmeströmen durch die Personen sowie der Geräte und Maschinen liegen. Im Hinblick auf die Lasten infolge des Außenklimas sind die Wärmeströme durch Fenster bzw. transparente Bauteile die entscheidenden Einflussgrößen. Dabei ist der solar geprägte Strahlungswärmestrom von entscheidender Bedeutung. In den Formeln der Kühllastberechnung wird weiterhin berücksichtigt, dass die Speicherfunktion der Bauteilmassen sowie die Ausrichtung der transparenten Elemente – und damit auch der sogenannte Berechnungszeitpunkt – erheblichen Einfluss auf die Lastbilanz ausüben. Deshalb muss der Gesamtlast eine Zeitfunktion zugeordnet werden. Zu weiteren ausführlichen Darlegungen zur Systematik der Kühllastberechnung klimatisierter Räume sei an dieser Stelle auf (Casties 2025) und (Trogisch 2021) verwiesen. Dort wird u. a. auch auf überschlägige Berechnungsverfahren hingewiesen, die die Planungsarbeit ebenfalls wirksam unterstützen können.

6.1.2 Praktische Ermittlung der Kühllast bei Lagerräumen für Lebensmittel

Wegen der Vielgestalt der Kühlaufgaben, die aus einer ganz bestimmten Produktqualität heraus entstehen, sind Lastbilanzen kaum formell vorzudefinieren. Deshalb kann die Berechnung der thermischen Last aus der Kühlaufgabe selbst und ihren Randbedingungen abgeleitet werden. Für die Kühllastbilanz gewerblicher Kühlräume, als eine der häufig vorkommenden Kühlaufgaben, hat sich jedoch ein Berechnungsschema gemäß Tabelle 6.2 in der Praxis bewährt. Um aber Einblick in die Kühllastbilanz gewerblicher Kühlräume zu gewinnen, sind zunächst die thermischen Quellen zu definieren, die einen Einfluss auf die Lastbilanz ausüben.

Lasten bei Kühlräumen mit Luftabkühlung zur Sicherung der Produktqualität

Die Kühllast gewerblicher Kühlräume kann grundsätzlich beschrieben werden als die Summe der Wärmeströme, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums, z. B. innerhalb 24 h, zufließenden Wärmemengen. Diese Definition kann mathematisch ausgedrückt werden als:

$$\dot{Q}_{KL} = \sum Q_{Last}/\tau \tag{6.1}$$

Diese Herangehensweise stellt den markantesten Unterschied zu dem Verfahren zur Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume gem. VDI 2078 dar.

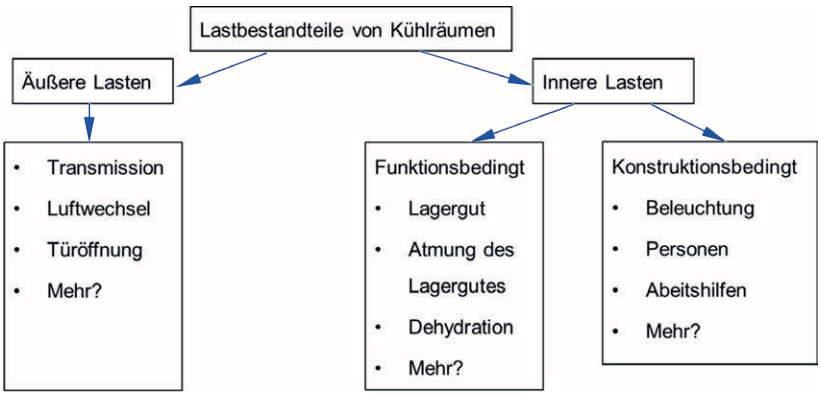

Abbildung 6.3 Einflussgrößen auf die Kühllast von Kühlräumen

In gewerblich genutzten Kühlräumen, wie diese z. B. im Lebensmitteleinzelhandel zumeist anzutreffen sind, können die thermischen und stofflichen Lasten gemäß Abbildung 6.3 zusammengefasst werden. Diese Aufzählung kann jedoch nicht bei jeder denkbaren Kühlaufgabe vollständig sein. Es sollte die gesamte Peripherie der jeweiligen Kühlaufgabe betrachtet werden, um weitere Einflussgrößen implementieren zu können. Eine weitere Grundvoraussetzung für die Kühllastberechnung ist die Festlegung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit, bei der das Kühlgut gelagert werden soll. Wenn die Raumluft das Bindeglied zwischen dem Kühlgut und der Kühlstelle bildet, dann kann mit guter Annäherung die Raumlufttemperatur und die mittlere Temperatur des Produkts gleichgesetzt werden. Auskunft über diese Sollwerte geben die Kühlguttabellen, die in der Fachliteratur vertafelt sind, siehe Abbildung 6.4 (Breidert 2023).