

Christoph Sinder · Meinolf Gringel · Hartmut Hardt
Hermann Langerbein

Legionellenrisiken in Verdunstungs- kühlanlagen und Kühltürmen

Ursachen und Vermeidung



DIE KÜHLTURM-KOLLEKTION

- ADIABATISCHE TROCKENKÜHLER

- VERDUNSTUNGSKÜHLTÜRME

- HYBRIDKÜHLER

GOHL-KTK

MADE IN GERMANY



z. B. TOPAZ - Trockenkühler mit einer adiabatischen Kühlstrecke vor dem Lufteintritt

- ▶ Keine Versprühung des Wassers in den Luftstrom
- ▶ Einfache Wartung durch „Walk-In“ und EC-Ventilatoren
- ▶ Sehr hoher Umschaltpunkt
- ▶ Sehr niedrige Betriebskosten
- ▶ Keine Wasseraufbereitung notwendig

TOPAZ

WWW.KUEHLTURM.DE



GOHL[®]

AUF DAUER GUT GEKÜHLT



KTK[®]

KÜHLTURM KARLSRUHE

Christoph Sinder • Meinolf Gringel • Hartmut Hardt • Hermann Langerbein

Legionellenrisiken in Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen

Ihre Meinung zählt!

Sagen Sie uns Ihre Meinung zum aktuellen E-Book und teilen uns Ihre weiteren Informationswünsche mit. Alle Einsender nehmen an der quartalsweisen Verlosung einer LED-Taschenleuchte oder einer original VDE-Umhängetasche teil.

Einfach auf **Feedback** klicken (ggf. Online-Verbindung prüfen) und los geht's!

www.vde-verlag.de/newsletter

VDE

VERLAG

Technik. Wissen.
Weiterwissen.

Christoph Sinder · Meinolf Gringel · Hartmut Hardt
Hermann Langerbein

Legionellenrisiken in Verdunstungs- kühlanlagen und Kühltürmen

Ursachen und Vermeidung

VDE VERLAG GMBH

Beuth

“Die in diesem Werk aus den jeweils genannten VDI-Richtlinien zitierten Tabellenwerte und Abbildungen sind wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e.V.“

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des jeweiligen Inhabers der Urhebernutzungsrechte unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Werk berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Normen oder Richtlinien (z. B. DIN) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, können die Verlage keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Normen und Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen. Alle in diesem Werk genannten DIN-Normen sind wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Normen ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2020 VDE VERLAG GMBH
Bismarckstr. 33
10625 Berlin

Telefon: +49 30 348001-0
Telefax: +49 30 348001-9088
Internet: www.vde-verlag.de
E-Mail: kundenservice@vde-verlag.de

ISBN 978-3-8007-4554-8 (Print)
ISBN 978-3-8007-4555-5 (E-Book)

© 2020 Beuth Verlag GmbH Berlin · Wien · Zürich
Saatwinkler Damm 42/43
13627 Berlin

Telefon: +049 30 2601-0
Telefax: +049 30 2601-1260
Internet: www.beuth.de
E-Mail: kundenservice@beuth.de

ISBN 978-3-410-29059-9 (Print)
ISBN 978-3-410-29060-5 (E-Book)

Alle Rechte vorbehalten.

Titelmotiv: BAC Baltimore Aircoil International nv
Satz: Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld

Vorwort

Das vorliegende Fachbuch richtet sich an die betroffenen Verkehrskreise, wie Anlagenbetreiber, Hersteller, Errichter, Planer, Instandhalter und Aufsichtsbehörden, die sich mit Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen beschäftigen. Es soll dazu beitragen, die mit diesen Anlagen verbundenen hygienischen Risiken, deren Ursachen sowie die zum Problemverständnis notwendigen hygienischen und technischen Hintergründe in verständlicher Weise zu erläutern. Dazu werden die Anforderungen, welche sich aus den gesetzlichen und technischen Regelwerken ergeben, zusammenfassend dargelegt und kommentiert, insbesondere die 42. Bundes-Immissionsschutzverordnung sowie die VDI 2047.

Das Thema berührt mikrobiologisch-hygienische, kältetechnische, wasserchemische, organisatorische und rechtliche Aspekte. Diese Komplexität macht die Zusammenarbeit von Autoren verschiedener Disziplinen für das Fachbuch notwendig, die für die verschiedenen Kapitel verantwortlich sind. Gleichzeitig finden die Leser in diesem Fachbuch aber auch das Ergebnis der gemeinsamen Auslegung der Regelwerke durch die verschiedenen Autoren.

Der Anstoß für dieses Buch kam aus zahlreichen Gesprächen, die insbesondere in Seminaren und Tagungen zu dieser Thematik geführt wurden. Mit ihren Fragen haben die Teilnehmer den Bedarf an einem Fachbuch aufgezeigt, das eine Übersicht zu den verschiedenen Aspekten bietet. Dabei geht es den Autoren nicht darum, ein wissenschaftliches Fachbuch zu erstellen, sondern vor allem den betroffenen Anlagenbetreibern einen verständlichen Überblick zum Thema an die Hand zu geben. Es lässt sich aber nicht verhindern, dass bei den einzelnen Themen auch Details aufgeführt werden. Dies ist für das Gesamtverständnis notwendig, insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass die Anforderungen aus den gesetzlichen Regelwerken die Umsetzung dieser Details erfordern.

Wir würden uns sehr freuen, wenn die Leser dieses Fachbuchs uns ihre Fragen, Anmerkungen und Kritik zukommen ließen, die wir bei der nächsten Auflage gerne berücksichtigen werden. Das entspricht auch dem Ziel des Buchs, bei der Nutzung dieser Technologie in Zukunft immer besser und sicherer zu werden.

Dr. Christoph Sinder • Dr. Meinolf Gringel • RA Hartmut Hardt • Dipl.-Ing. Hermann Langerbein
im November 2019

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	11
2 Technische Grundlagen von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen ...	17
2.1 Einleitung	17
2.2 Zustandsgrößen der feuchten Luft	18
2.3 Aufbau des Mollier- bzw. h,x-Diagramms	19
2.3.1 Temperatur und Isothermen	19
2.3.2 Absolute Feuchtigkeit	19
2.3.3 Dampfdruck	19
2.3.4 Sättigungsdruck und Sättigungslinie	20
2.3.5 Sättigungstemperatur und Taupunkttemperatur	20
2.3.6 Linien mit konstanter relativer Feuchtigkeit	21
2.3.7 Linien mit konstanter Enthalpie	21
2.3.8 Feuchtkugel- oder Feuchttemperatur	22
2.3.9 Dichte	23
2.4 Zustandsänderungen im h,x-Diagramm	24
2.5 Kühltürme (Verdunstungskühlanlagen)	27
2.5.1 Definition Kühlturm und Verdunstungskühlanlage	27
2.5.2 Aufbau und Funktion von Verdunstungskühlanlagen	28
2.5.3 Ventilator-Bauarten	29
2.5.4 Bauarten von Kühltürmen	29
2.5.5 Kühltürme mit offenem Kreislauf	30
2.5.6 Kühltürme mit geschlossenem Kreislauf	31
2.5.7 Gegenstrom-Kühltürme mit saugenden Axialventilatoren	33
2.5.8 Gegenstrom-Kühltürme mit drückenden Axialventilatoren	34
2.5.9 Gegenstrom-Kühltürme mit Radialventilatoren	34
2.5.10 Kreuzstrom-Kühltürme mit saugenden Axialventilatoren	35
2.5.11 Komponenten von Verdunstungskühlanlagen	35
2.5.12 Betrieb von Verdunstungskühlanlagen	39
2.6 Trockenkühler	43
2.6.1 Trockenrückkühler mit Besprühung	44
2.7 Hybride Kühltürme	46
2.8 Verflüssiger	49
2.8.1 Verdunstungsverflüssiger	49
2.8.2 Hybride Verflüssiger	51

2.9	Energetische Bewertung von Rückkühlssystemen.....	52
2.9.1	Grundlagen für die wirtschaftliche Betrachtung	53
2.9.2	Leistungszahl der Kälteanlage	53
2.9.3	Temperaturdifferenzen an Wärmeübertragern.....	54
2.9.4	Vergleich unterschiedlicher Rückkühlssysteme	56
3	Grundlagen der Mikrobiologie und Ursachen des Hygienerisikos.....	61
3.1	Mikrobiologische Grundlagen	61
3.1.1	Mikroorganismen.....	61
3.1.2	Eigenschaften und Wachstumsbedingungen von Mikroorganismen	64
3.1.3	Legionellen.....	70
3.1.4	Mikroorganismen und Biofilme.....	71
3.1.5	Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme als Lebensräume von Mikroorganismen.....	72
3.1.6	Nachweis von Mikroorganismen in Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen	79
3.1.7	Bekämpfung von Mikroorganismen	93
3.1.8	Förderung mikrobiellen Wachstums durch Werkstoffe aus organischem Material.....	103
3.2	Gesundheitliche Risiken und Legionellenausbrüche.....	104
3.2.1	Gesundheitliche Risiken durch Mikroorganismen und deren Bestandteile	105
3.2.2	Legionellenausbrüche	114
3.3	Gefährdungsbeurteilung für Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme	118
3.3.1	Gefährdungsbeurteilungen bei biologischen Gefährdungen im Arbeitsschutz ..	119
3.3.2	Gefährdungsbeurteilung nach VDI 2047 und 42. BImSchV.....	124
4	Gesetzliche Anforderungen.....	143
4.1	Zuordnung der Verantwortungsträger, der Verantwortungsbereiche und die Festlegung der damit verbundenen Pflichten.....	143
4.2	Arbeitsschutz beim Betrieb von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen ...	146
4.3	Das Immissionsschutzrecht	150
4.4	Die 42. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV).....	156
5	Anforderungen aus dem technischen Regelwerk	209
5.1	Die Bedeutung des technischen Regelwerks im Recht	209
5.2	Überblick zum technischen Regelwerk.....	211
5.2.1	VDI 2047 Blatt 2 (01/2019) Rückkühlwerke: Sicherstellung des hygiene- gerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen (VDI-Kühlturmregeln)	211
5.2.2	VDI 2047 Blatt 3 (04/2018) Rückkühlwerke: Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen – Kühltürme über 200 MW Kühlleistung (VDI-Kühlturmregeln).....	214

5.2.3	VDI-MT 2047 Blatt 4 (01/2019) Rückkühlwerke: Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen (VDI-Kühlturmregeln) – Qualifikation von Personal zum Betreiben von Verdunstungskühlanlagen	216
5.2.4	VDMA 24649 (01/2018) Betriebsempfehlungen für Verdunstungskühlanlagen	217
5.2.5	VGB-R 455 (01/2000) Kühlwasser-Richtlinie – Wasserbehandlung und Werkstoffeinsatz in Kühlsystemen	219
5.2.6	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) – Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlsystemen, Umweltbundesamt, Dezember 2001.....	221
5.3	Hygieneanforderungen an Planung und Errichtung	224
5.3.1	Hygieneanforderungen an die Konstruktion	225
5.3.2	Hygieneanforderungen an Werkstoffe	231
5.3.3	Standortauswahl und Aufstellort unter hygienischen Aspekten	232
5.3.4	Stoffeintrag in Kühlsysteme	234
5.3.5	Prozesssteuerung und Überwachung	234
5.3.6	Wasserbeschaffenheit: Hygieneanforderungen an Wasseraufbereitung und -behandlung	238
5.4	Hygieneanforderungen an Betrieb und Instandhaltung	240
5.4.1	Übernehmen	242
5.4.2	Inbetriebnahme	242
5.4.3	Betätigen (Überwachen, Stellen, Störungsbeseitigung)	245
5.4.4	Instandhalten	257
5.4.5	Außerbetriebnehmen / Ausmustern / Stilllegen	262
5.4.6	Anforderung an die Schulung und Qualifikation des Personals	263
5.5	Gefährdungsbeurteilung und Anlagenprüfung	263
5.5.1	Gefährdungsbeurteilung	263
5.5.2	Anlagenprüfung	266
Anhang: Normen und Vorschriften		269
Literaturverzeichnis		273
Stichwortverzeichnis		277

1 Einführung

Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme dienen der Wärmeabfuhr aus unterschiedlichen Prozessen und finden seit mehr als einem Jahrhundert ihren Einsatz in der Kältetechnik. Als Technik sind sie etabliert und hinsichtlich ihrer Energieeffizienz zunehmend optimiert. Da sie in zahlreichen Anwendungsfällen erhebliche technische, wirtschaftliche und auch umweltrelevante Vorteile gegenüber anderen Systemen der Kältetechnik haben, sind sie aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken. Dazu gehören z. B. Energieerzeugungsanlagen oder viele industrielle Prozesse mit dem Bedarf, hohe Wärmelasten abzuführen.

Physikalische Grundlage dieser kältetechnischen Anlagen ist die Wärmeabfuhr und die damit verbundene Kühlung von Prozessen durch das Verdunsten von Wasser in Luft. Dieser kältetechnische Prozess spiegelt sich in verschiedenen Anlagentypen wieder. Dabei gibt es für diese Anlagen unterschiedliche Begriffe und Bezeichnungen, die in den Verkehrskreisen, der Literatur und den Regelwerken Verwendung finden und das gemeinsame Verständnis der Thematik manchmal erschweren. Die größten Anlagen finden sich in Energieerzeugungsanlagen als Naturzugkühltürme, die allein aufgrund ihrer Höhe von bis zu 200 m für alle sichtbare Landmarken darstellen. Der absolut größte Anteil aller mit 30.000 bis 50.000 geschätzten Anlagen ist ventilator-gestützt, der druck- oder saugseitig die Luft im Gegenstromprinzip durch das versprühte oder verrieselte Kühlwasser transportiert. Da diese Anlagen überwiegend eine Kühlleistung unter 200 MW aufweisen, fallen sie in die Gruppe der Verdunstungskühlanlagen. Begrifflich wird aber auch für diese Anlagen häufig der „Kühlturm“ herangezogen. Verdunstungskühlanlagen gibt es in unterschiedlichen technischen Ausführungen, die im Markt als Nasskühltürme, Hybride, Adiabatiksysteme etc. bezeichnet werden. Die einzelnen Systeme inkl. ihrer Funktionsweise mit den Vor-/Nachteilen in den verschiedenen Anwendungsbereichen werden in Kapitel 2 beschrieben. Das grundlegende Verständnis der technischen Vorgänge in diesen Anlagen ist notwendig, um den Einfluss der Anlagentechnik, der Werkstoffe, der Betriebsstoffe und der Betriebsweise auf die mikrobiologischen Lebensbedingungen in diesen Systemen zu verstehen. In der Praxis lässt sich so der Einfluss der Anlagentechnik auf die Hygiene deutlich besser beurteilen. Dadurch können alle Beteiligten mögliche Risiken einer Vermehrung und eines Austrags von Krankheitserregern besser identifizieren und Gegenmaßnahmen ergreifen.

Nach den verschiedenen Legionellenausbrüchen wie in Warstein und Ulm, verbunden mit zahlreichen durch Legionellen infizierten Menschen und Todesfällen, wurde diese Notwendigkeit immer deutlicher. Bis in die zweite Hälfte der siebziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts waren Legionellen und damit ein mit ihnen verbundenes Gesundheitsrisiko nicht bekannt. Erst durch einen Legionellenausbruch in Philadelphia, USA, wurde das mögliche Infektionsrisiko durch diesen Krankheitserreger offensichtlich. Trotzdem hat es noch eine geraume Zeit gedauert, bis dieses Risiko auch für Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme erkannt wurde. Legionellen, eine Gruppe von miteinander verwandten Bakterienarten, sind in Süßwasserlebensräumen nach aktuellem Kenntnisstand weltweit verbreitet. In ihren natürlichen Lebensräumen finden sie sich aufgrund eingeschränkter Wachstumsbedingungen scheinbar nur in geringer Zahl. Das ändert sich in wasserführenden technischen Anlagen, wie Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen, wenn die Lebensbedingungen sich für diese Bakterien deutlich verbessern. Einmal mit der Nachspeisung von Kühlwasser in Form von Oberflächen-, Grund- oder Trinkwasser in die Anlage eingebracht, können sich Legionellen dort innerhalb weniger Tage in

großer Zahl vermehren. Aktuell ist davon auszugehen, dass Legionellen als Krankheitserreger nur dann zu einer Infektion führen, wenn sie von Menschen inhaliert werden und in die Lunge gelangen. Das kann über den Austrag von Legionellen-haltigem Kühlwasser in Form von Aerosolen aus Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen erfolgen. Auf diese Weise sind erhebliche Legionellen-Emissionen in die Umwelt möglich, die Menschen in der Umgebung solcher Anlagen gefährden. Legionelleninfektionen können sich in leichter Verlaufsform, ähnlich einer Sommergrippe, aber auch als schwere Lungenentzündung auswirken. Letztere scheint nach Einschätzung des Robert Koch-Instituts (RKI) in ca. 30.000 Fällen pro Jahr in Deutschland auf Legionellen zurückzuführen sein. Wie viele davon ursächlich auf Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen zurückgehen, ist nicht bekannt. Es ist auch unbekannt, wie groß die Zahl der durch einen Menschen aufgenommenen Legionellen sein muss, damit es zu einer Infektion kommt. Betrachtet man aber das Risikopotenzial bei der weiträumigen Ausbreitung über die Aerosolausträge in den Kühlwasserschwadern, so wird schnell deutlich, dass Maßnahmen zur Risikominimierung notwendig sind. Anders als bei Trinkwasserinstallationen ist die mögliche Zahl der Betroffenen hier potenziell deutlich höher.

Während in zahlreichen anderen Ländern, wie Frankreich und Großbritannien, aufgrund schwerer Legionellenausbrüche bereits seit Jahren konkrete gesetzliche Regelungen zur Gefahrenvorsorge bei diesen Anlagen getroffen wurden, haben solche in Deutschland auf sich warten lassen. Nachdem es in der Folge des Legionellenausbruchs in Warstein aber zu weiteren Ausbrüchen, wie in Jülich und Bremen, gekommen ist, sind diese Anlagen zunehmend in den öffentlichen Fokus gerückt. Das Risikopotenzial, welches von den Anlagen bei unsachgemäßer Planung, Errichtung, Instandhaltung und/oder Betrieb ausgehen kann, hat sowohl aufseiten des Gesetzgebers als auch bei der technischen Regelwerkssetzung einen Handlungsdruck ausgelöst. Mit der im Juli 2017 veröffentlichten 42. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) ist ein gesetzliches Regelwerk in Kraft getreten, das Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider im Anwendungsbereich hat. Letztere werden in diesem Buch nicht behandelt. Als Teil des Immissionsschutzrechts fordert die Verordnung von den Verkehrskreisen den Stand der Technik bei Planung, Herstellung, Errichtung und Betrieb ein. Auslegung und Anwendungsbereich der Verordnung werden in den betroffenen Verkehrskreisen sehr kontrovers diskutiert.

Kapitel 4 gibt nicht nur die Verordnung im Originaltext wieder, sondern beleuchtet die Diskussionen und legt den Text auch aus. Die Anforderungen der Verordnung sind in Teilen sehr spezifisch, in denen es z. B. um die Anzeige der Anlage auf einer Online-Plattform oder die mikrobiologische Überwachung des Kühlwassers geht. Einige grundsätzliche Forderungen, wie die Eignung von Werkstoffen oder Betriebsstoffen, eröffnen aber zahlreiche Handlungsoptionen. Ähnliches gilt für die Betriebsweise, um eine mikrobielle Vermehrung und Ausbreitung von Legionellen zu minimieren. Die Verordnung geht nicht so weit, dass sie die Einhaltung von Legionellengehalten einfordert, die technisch utopisch erscheinen. Mit der Einführung von Prüf- und Maßnahmenwerten für Legionellen im Kühlwasser setzt sie im Normalbetrieb der absoluten Zahl aller Anlagen erreichbare Zielwerte. Deren Einhaltung hat der Anlagenbetreiber regelmäßig durch ein unabhängiges Labor überwachen zu lassen. Sobald es zur Überschreitung dieser Prüf- und Maßnahmenwerte kommt, verpflichtet der Gesetzgeber den Anlagenbetreiber zur Ergreifung von geeigneten Maßnahmen, um wieder einen sicheren Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es bei Überschreitung des sogenannten Maßnahmenwerts für Legionellen, der als eine Art Gefahrenwert betrachtet wird, eine Mel-

depflicht des Anlagenbetreibers an die zuständige Behörde gibt. Auf diesem Weg versucht der Verordnungsgeber, möglichst frühzeitig Informationen über Gefahrensituationen zu erhalten. Diese kann er dann innerhalb der Umgebung einer Anlage mit den Erkenntnissen der Gesundheitsbehörden zu gemeldeten Legionelleninfektionen abgleichen. So sollte sich einerseits sehr frühzeitig ein Legionellenausbruch erkennen und im Weiteren auch eindämmen lassen. Eine neue Forderung der Verordnung betrifft auch die regelmäßige, im Abstand von fünf Jahren durchzuführende, unabhängige Überprüfung der Anlagen durch Sachverständige. Neben verschiedenen weiteren Verpflichtungen des Anlagenbetreibers gilt eine umfangliche Dokumentationspflicht.

Bereits vor Inkrafttreten der Verordnung wurde mit der VDI 2047 Blatt 2 für Verdunstungskühlanlagen ein technisches Regelwerk erarbeitet, das den Stand der Technik zu den Hygieneanforderungen maßgeblich widerspiegelt. Mit dem Blatt 3 der VDI-Richtlinie 2047 liegt ein solches Regelwerk auch für Kühltürme vor. Neben diesen beiden technischen Regelwerken, die durch die VDI MT 2047 Blatt 4 für Schulungsmaßnahmen zu diesem Thema ergänzt werden, finden sich für die beiden Anlagentypen noch weitere technische Regeln. Abgesehen vom Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlsystemen (BVT) handelt es sich sowohl bei der Richtlinienreihe VDI 2047 als auch der VGB-R 455 und dem VDMA-Einheitsblatt 24649 um nationale technische Regelwerke.

Kapitel 5 stellt diese technischen Regelwerke vor dem Hintergrund der hygienischen Fragestellungen zusammenfassend vor. So soll einerseits das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilthemen Mikrobiologie/Hygiene, Anlagentechnik und Kühlwasserqualitäten gefördert werden. Andererseits ist es das Ziel, einen kurzen Überblick zu diesen technischen Regeln zu geben, diese miteinander zu vergleichen und dabei auch die vorhandenen Widersprüche aufzuzeigen. Das ersetzt natürlich im Einzelfall nicht die intensive Lektüre der jeweiligen technischen Regelwerke. Allerdings behandeln sowohl das Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlsystemen (BVT) als auch die VGB-R 455, die beide primär Kühltürme im Anwendungsbereich haben, mikrobiologisch-hygienische Fragestellungen nur am Rande. Hier ist das Blatt 3 der VDI 2047 deutlich aktueller und auf die Hygienethematik fokussiert. Da sich in den Diskussionen zum Umgang mit technischen Regelwerken von privaten Normungsorganisationen oder Verbänden immer wieder auch die Frage nach der rechtlichen Einordnung und deren Verbindlichkeit stellt, wird diese Frage in Kapitel 5 thematisiert. Insbesondere die Blätter der VDI 2047 behandeln die hygienerrelevante Anforderungen zu den Themen Planung, Errichtung und Inbetriebnahme, Gefährdungsbeurteilung und Prüfung sowie Betrieb und Instandhaltung, die im Grundsatz auch in der 42. BImSchV beschrieben werden. Es wird dabei an verschiedenen Stellen deutlich, dass die VDI 2047 teilweise eine „Blaupause“ der Verordnung darstellt. Kapitel 5 greift ausschließlich die hygienisch relevanten Aspekte im Zusammenhang mit Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen auf. Diese lassen sich naturgemäß häufig nicht von Anforderungen an den wirtschaftlichen oder technisch sicheren Betrieb trennen.

Es muss das Ziel der Regelwerkssetzung sein, die mit dem Betrieb von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen verbundenen hygienischen Risiken zu minimieren und weiterhin gleichzeitig einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu ermöglichen. Dazu ist es in einem ersten Schritt erforderlich, in den betroffenen Verkehrskreisen das hygienische und technische Wissen um die Risiken, deren Ursachen und mögliche Maßnahmen zur Abhilfe bekannt zu machen. Gleichzeitig bedarf es aber auch gemeinsamer Anstrengungen, um möglichst zahlreiche Erfahrungen,

z. B. rund um die Fragestellungen zur hygienischen Bedeutung von Werkstoffen, zu Wasserqualitäten, zum Einsatz von Betriebsstoffen, der jeweiligen Betriebsweise und den mikrobiologischen Untersuchungen, zusammenzuführen. Nur so wird es auf Dauer möglich sein, die Randbedingungen für den hygiesicheren Betrieb so zu definieren, dass ein maximal wirtschaftlicher Betrieb dieser Anlagen auf Dauer möglich ist. Auf welchem Weg dies zu erreichen ist, lässt sich auch aus den Inhalten der nachfolgenden Kapitel ableiten. Nicht selten kreisen aber bereits zu Beginn der Arbeit an einem Fachbuch Fragen im Kopf des Lesers, von denen wir hier einige antizipiert und mit dem Verweis auf die entsprechenden Kapitel beantwortet haben. Der Leser möge es den Autoren nachsehen, dass einige Fragen keine einfachen Antworten zulassen.

Häufige Fragen zu den verschiedenen Themen und Verweise zu den Kapiteln im Buch:

lfd. Nr.	Frage	Antwort in Kapitel
Grundlagen der Technik von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen		
1	Was ist ein Kühlturm und was eine Verdunstungskühlanlage; was ist die genaue Definition?	2.5.1; 4.4
2	Was ist unter dem Betrieb von Verdunstungskühlanlagen zu verstehen?	2.5.12
3	Fallen Trockenkühler in den Anwendungsbereich der 42. BImSchV	2.6; 4.4
4	Warum ist bei Verflüssigern ein besonderes Augenmerk auf die Mikrobiologie und die hygienischen Schutzziele gemäß der 42. BImSchV zu legen?	2.8
5	Wie ist die energetische Bewertung von Rückkühlsystemen in Bezug zu den Anforderungen der 42. BImSchV zu sehen?	2.9
Mikrobiologie, Legionellen und gesundheitliche Risiken im Zusammenhang mit Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen		
6	Welche Bedingungen fördern das Wachstum von Mikroorganismen in den Anlagen?	3.1.2; 3.1.5
7	Was sind Biozide, wie wirken sie und unter welchen Randbedingungen?	3.1.7
8	Welche mikrobiologischen Untersuchungen müssen für eine Verdunstungskühlanlage durchgeführt werden?	3.1.6; 4.4
9	Welche mikrobiologischen Untersuchungen müssen für einen Kühlturm durchgeführt werden?	3.1.6; 4.4.
10	Was muss ein Anlagenbetreiber berücksichtigen, wenn er mikrobiologische Untersuchungen beauftragt?	3.1.6.; 4.4
11	Was sagt das Ergebnis der mikrobiologischen Untersuchung der allgemeinen Koloniezahl aus?	3.1.6.2; 3.2
12	Welche Erkrankungen können durch Legionellen ausgelöst werden?	3.2
13	Ab welcher Anzahl von Legionellen im Kühlwasser ist eine Infektion möglich?	3.2
14	Warum ist es notwendig, dass nach Überschreitung des Maßnahmenwerts eine Differenzierung der Legionellen durch eine sogenannte Serotypisierung durchgeführt wird?	3.2; 4.4
15	Wie können die von einer Anlage ausgehenden hygienischen Risiken identifiziert und bewertet werden?	3.3

Gesetzliche Anforderungen an Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme

16	Fällt ein Adiabatiksystem im Umlaufbetrieb unter die 42. BImSchV?	4.4; 5.2.1
17	Fällt ein Adiabatiksystem mit Frischwasser unter die 42. BImSchV?	4.4; 5.2.1
18	Wie ist ein Trockenkühler mit provisorischem Adiabatiksystem (Gardena) zu bewerten?	4.4; 5.2.1
19	Fällt ein Hybridkühler unter die 42. BImSchV?	4.4; 5.2.1
20	Fällt ein Kaltwassersatz mit Frischwasser-Berieselung unter die 42. BImSchV?	4.4; 5.2.1
21	Wer ist im Fall eines Leihgeräts (z. B. Kühlturm) für die Umsetzung der 42. BImSchV verantwortlich?	4.1
22	Legt die Aufsichtsbehörde im Falle einer Überschreitung des Maßnahmenwerts einen Kühlturm still, obwohl die gesamte Produktion (z. B. Rechenzentrum) daran hängt?	4.3
23	Können im Fall einer Stilllegung (s. Frage 22) Kühlturm/Hybridkühler ohne Wasserkreislauf weiterbetrieben werden?	4.3
24	Bei einer Neuinstallation: Ab wann ist die 42. BImSchV anzuwenden; gibt es einen Probebetrieb?	4.2
25	Warum wird ein Trockenkühler mit temporärem Adiabatiksystem anders beurteilt (42. BImSchV) als ein Nassabscheider?	4.4
26	Was muss man vor dem Hintergrund des Arbeitsschutzrechts beim Betrieb der Anlagen berücksichtigen?	4.2
27	Was ist eine hygienisch fachkundige Person?	4.1

Anforderungen der technischen Regelwerke an Verdunstungskühlanlagen und Kühltürme

28	Welche rechtliche Bedeutung besitzen technische Regelwerke?	5.1
29	Welche Anlagen fallen in den Anwendungsbereich der VDI 2047 Blatt 2?	5.2.1
30	Welche Anlagen fallen in den Anwendungsbereich der VDI 2047 Blatt 3?	5.2.2
31	Welche Schulungen sind mindestens Voraussetzung für eine hygienisch fachkundige Person?	5.2.3
32	Gibt es Anforderungen an den Standort einer Verdunstungskühlanlage?	5.3.3
33	Lassen sich aus den technischen Regelwerken Anforderungen an die Ausführung von Tropfenabscheidern ableiten?	5.3.1
34	Sind für Werkstoffe von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen hygienische Anforderungen festgelegt?	5.3.2
35	Welche chemisch-physikalischen Untersuchungen sind zur Kontrolle der Kühlwasserqualität vorgegeben?	4.4; 5.3.6; 5.4.4
36	Ist der Einsatz von Anlagen zur UV-Desinfektion von Kühlwasser geregelt?	3.1.7; 5.3.6

2 Technische Grundlagen von Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen der Kühlung von Prozessen durch das Verdunsten von Wasser in Luft durch Nasskühltürme, Trockenkühltürme, Hybride (also Trocken- und Nasskühltürme), Adiabatsysteme etc. beschrieben. Auch wenn sich nicht direkt ein Zusammenhang zwischen diesen grundlegenden technischen Vorgängen im Kühlturm und den in diesem Buch thematisierten mikrobiologischen Themenstellungen herstellen lässt, so ist dieses Verständnis doch notwendig, um in der Praxis die Anlagentechnik und den Einfluss auf die technische Hygiene beurteilen zu können. Weiterhin dient dieses Kapitel der Beschreibung der unterschiedlichen Anlagentechniken und unterstützt somit die richtige Anwendung der 42. BImSchV und der technischen Regelwerke für die verschiedenen Anlagentypen.

2.1 Einleitung

Die Aufgabe eines Kühlturms ist die Abgabe einer Wärmemenge an die Umgebung. Insbesondere Kraftwerke verfügen über einen Kühlturm, um die anfallende Abwärme der Dampfturbinen abzuführen, soweit sie nicht nutzbar ist (z. B. als Fernwärme). Selbst wenn die Wärme genutzt wird (Kraft-Wärme-Kopplung), kann ein Kühlturm unter besonderen Umständen (z. B. verminderter Wärmebedarf im Sommer) die überschüssige Wärme abführen. Ein Kühlturm wird z. B. ständig eingesetzt, um den elektrischen Wirkungsgrad zu erhöhen, indem man den Druck im Wasserdampf-Kondensator vermindert.

Auch wenn bei einem Kraftwerk Flusswasser zur Kühlung verfügbar ist, wird meist ein Kühlturm eingesetzt, um einen Großteil der Abwärme in die Umgebungsluft abzugeben. Hiermit wird ein hoher Wärmeeintrag in den Fluss vermieden, der sonst negative Auswirkungen auf die Fauna und Flora haben könnte. Das zu kühlende Wasser fließt zunächst durch den Kühlturm und wird erst danach durch einen Wärmeüberträger mit Flusswasser noch weiter abgekühlt, um einen höheren Wirkungsgrad des Kraftwerks zu ermöglichen.

Das elementare Grundprinzip eines Kühlturms ist, Wärme vom warmen Kühlwasser auf die kühlere Umgebungsluft zu übertragen. Wegen der geringen Wärmekapazität von Luft müssen durch einen Kraftwerkskühlturm große Luftmengen bewegt werden. Dies geschieht in der Regel rein passiv über den sogenannten Kamineffekt: Die erwärmte Luft im Kühlturm dehnt sich aus, verliert also an Dichte, erfährt somit einen Auftrieb und steigt nach oben. Von unten wird frische Luft nachgeführt. Ein ausreichend starker Kamineffekt erfordert eine gewisse Höhe des Kühlturms. Wesentlich niedrigere Bauformen sind möglich, indem die Luft zusätzlich mit Ventilatoren angetrieben wird. Hierdurch wird ein weiterer Energieaufwand, der den Gesamtwirkungsgrad beeinträchtigt, erforderlich.

Die Effektivität eines Kühlturms kann deutlich gesteigert werden, indem nicht nur die Luft erwärmt, sondern auch Wasser verdunstet wird. In einem solchen Nasskühlturm wird das zu kühlende Wasser versprüht, sodass einerseits ein guter Wärmekontakt mit der Luft erfolgt und andererseits ein Teil des umgewälzten Wassers verdunstet. Die Verdunstung von Wasser in Luft

führt zur Wärmeabfuhr als latente Wärmemenge. Oberhalb des Kühlturms kondensiert ein Teil des erzeugten Wasserdampfs wieder aus, wodurch Dampfschwaden entstehen können.

Nasskühltürme sind bedingt durch die latente Wärmeübertragung besonders effektiv, d. h., sie können große Wärmemengen abführen und das Kühlwasser auf relativ niedrige Temperaturen bringen. Nachteile sind der Wasserverbrauch und die Schwadenbildung. Außerdem sind bei Umlaufkühlung (Nutzung des Wassers in einem Kreislauf) Maßnahmen z. B. gegen Algenbewuchs, Verkalkung und Legionellen erforderlich.

An besonders kalten Standorten besteht die Gefahr des Einfrierens. All dies wird mit Trockenkühltürmen vermieden, in welchen das Kühlwasser mit der Luft nicht in Berührung kommt; es durchfließt lediglich einen Wärmeübertrager mit Lamellen, welche die Wärme an die Luft abgeben. Trockenkühltürme sind weniger effektiv und beeinträchtigen somit den Wirkungsgrad der jeweiligen Anwendung (siehe Kapitel 2.6).

Eine Mischlösung ist die Hybridkühlung (siehe auch Kapitel 2.4), bei der Wasser in geringeren Mengen verdunstet. Hier sind starke Ventilatoren nötig, mit denen ein warmer Luftstrom dem Dampf beigemischt wird, sodass die Abluft weniger feucht ist und entsprechend weniger starke Dampfschwaden bildet.

Die thermodynamischen Vorgänge in einem Kühlturm lassen sich mittels der Zustandsgrößen der feuchten Luft beschreiben.

2.2 Zustandsgrößen der feuchten Luft

Luft setzt sich aus einem Anteil trockener Luft und einem Anteil Wasserdampf zusammen und ist daher immer „feuchte Luft“. Dies wird an alltäglichen Phänomenen deutlich, wie z. B. anhand des Wasserdampfs, der beim Duschen oder Kochen entsteht und von der Raumluft aufgenommen wird, ebenso bei der Kondensation des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs an kalten Oberflächen, z. B. an einer gekühlten Flasche oder an einfachverglasten Fenstern im Winter etc. Betrachtet man Luft, so müssen bei der Definition der Zustandsgrößen die Eigenschaften sowohl der trockenen Luft als auch des Wasserdampfs berücksichtigt werden. Diese Zustandsgrößen und insbesondere Zustandsänderungen von feuchter Luft lassen sich im sogenannten Mollier- oder auch im h,x -Diagramm darstellen.

Richard Mollier (1863 bis 1935) war Professor für angewandte Physik und Maschinenbau in Göttingen und Dresden und ein Pionier der Erforschung physikalischer Daten für die Wärmelehre, insbesondere für Wasser, Dampf und feuchte Luft.

2.3 Aufbau des Mollier- bzw. h,x-Diagramms

2.3.1 Temperatur und Isothermen

Die Temperaturskala dient als Grundmaßstab für das Mollier-Diagramm (siehe Bild 2.1). Je nach gewünschter Temperatur wird sie auf der Vertikalen aufgetragen. In der Klimatechnik variiert die Temperaturskala von etwa -15 °C bis $+50\text{ °C}$. Die Isothermen sind von links nach rechts gezeichnete Hilfslinien. Diese Linien beschreiben einen Zustand mit konstanter Lufttemperatur. Bei 0 °C verläuft die Isotherme parallel zur waagrechten Achse und bei höheren Temperaturen nach rechts zunehmend ansteigend – aufgrund des Wärmeinhalts des hierbei zunehmenden Wassergehalts.

Es wird die Trockentemperatur t , die üblicherweise mit einem herkömmlichen Thermometer gemessen wird, von der Feuchttemperatur t_f unterschieden, die sich an einem mit feuchtem Baumwollgewebe überzogenen Thermometer einstellt. Im Kontakt mit der Luft verdunstet das im Baumwollgewebe enthaltene Wasser, sodass durch den Entzug der Verdampfungsenthalpie und der damit verbundenen Abkühlung das Thermometer in ungesättigter Luft eine Temperatur unterhalb der Trockentemperatur anzeigt. Diese Feuchttemperatur ist abhängig von der relativen Feuchte der Luft. Ist die relative Feuchte hoch, wird wenig Wasser verdunstet, das heißt, die Feuchttemperatur liegt dann nur wenig unterhalb der Trockentemperatur. Bei trockener Luft (also geringer relativer Feuchte) liegt die Feuchttemperatur weit unterhalb der Trockentemperatur.

2.3.2 Absolute Feuchtigkeit

Der Wassergehalt beschreibt die absolute Feuchte der Luft x und wird als zweite wichtige Zustandsgröße senkrecht auf einer Achse im Mollier-Diagramm aufgetragen. Diese vertikal verlaufenden Hilfslinien sind Linien mit einem konstanten Wassergehalt. Wenn die Trockentemperatur und der Wassergehalt x bekannt sind, lässt sich der Zustandspunkt dieser Luft im h,x-Diagramm eindeutig festlegen. Die Maßeinheit für die absolute Feuchte oder den Wassergehalt x ist: Gramm Wasser je Kilogramm trockene Luft (g/kg).

Die relative Feuchte bezeichnet das Verhältnis des Wasserdampfanteils in der Luft zum maximalen Wasseranteil, also Sättigung bei gleicher Temperatur T . Die relative Feuchte eines Luftzustands liegt somit zwischen 0 % (trockene Luft) und 100 % (mit Wasserdampf gesättigte Luft) annehmen.

2.3.3 Dampfdruck

Der Druck ist die Kraft (in Newton), die auf eine Oberfläche (in m^2) einwirkt. Der Druck, der durch das Gewicht der Luft auf die Erdoberfläche ausgeübt wird, ist der atmosphärische Druck. Auf Meereshöhe beträgt dieser Druck im Durchschnitt $1.013\text{ mbar} = 760\text{ mmHg}$. Im internationalen Einheitensystem (SI-Einheiten) lautet die Druckeinheit wie folgt:

$$1\text{ Newton/m}^2 = 1\text{ N/m}^2 = 1\text{ Pa (Pascal)}$$

In der Klimatechnik wird die Einheit Bar jedoch häufiger verwendet:

$$1 \text{ bar} = 1.000 \text{ mbar (Millibar)} = 100.000 \text{ Pa}$$

Der Dampfdruck des Wasserdampfs ist ein Teil des gesamten Luftdrucks und wird deshalb auch als Teil- oder Partialdruck des Wasserdampfs bezeichnet. Dieser Partialdruck hängt vom Mischungsverhältnis Wasserdampf/trockene Luft ab. Je höher der Wasserdampfanteil ist, umso größer ist der Partialdruck des Wasserdampfs p_D . Man kann deshalb auf einer parallelen Horizontalen zum Wassergehalt x den Partialdampfdruck p_D in mbar darstellen und so aus dem Diagramm leicht ermitteln, welcher Partialdruck p_D einem bestimmten Wassergehalt x g/kg entspricht (beispielsweise: $x = 6 \text{ g/kg} \Rightarrow p_D \approx 9,5 \text{ mbar}$).

2.3.4 Sättigungsdruck und Sättigungslinie

Weiterhin existiert der Begriff Taupunkttemperatur t_p , bei der die Luft vollständig (also zu 100 %) mit Wasserdampf gesättigt ist. Dies bedeutet, dass bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur die Kondensation des in der Luft befindlichen Wasserdampfs beginnt. Bei der Ermittlung der Masse m in kg einer Luftmenge müssen die Masse der trockenen Luft und die Masse des Wasserdampfs berücksichtigt werden. Die Wasserdampfkonzentration und somit auch der Partialdruck wird so lange erhöht, bis der Sättigungsdruck p_s erreicht ist. Weiterer Wasserdampf kann nicht mehr von der Luft aufgenommen werden, weil der Partialdruck über den Sättigungsdruck steigen würde. In diesem Fall wird der Dampf kondensieren und als feine Nebeltropfen sichtbar werden (z. B. als Schwaden). Der Sättigungsdruck p_s ist abhängig von der Lufttemperatur und vom Luftdruck (konstant im Diagramm). Der Sättigungsdruck p_s kann für jede Temperatur bis 100 °C bestimmt und in das Mollier-Diagramm eingetragen werden. So kann z. B. Luft von 20 °C (bei 1.013 mbar) maximal 14,7 g/kg Wasserdampf aufnehmen. Wenn man im h,x -Diagramm die Sättigungsdrücke der verschiedenen Temperaturen miteinander verbindet, bildet sich die sogenannte Sättigungslinie (Taupunktlinie) ab.

2.3.5 Sättigungstemperatur und Taupunkttemperatur

Stellt man Zustandsänderungen im Mollier-Diagramm dar, zeigt sich, dass die Sättigungslinie sowohl durch Erhöhung des Wassergehalts x als auch durch das Abkühlen der Luft erreicht werden kann. Kühlt man Luft mit einem absoluten Wassergehalt von $x = 6 \text{ g/kg}$ von +20 °C auf +5 °C ab, so wird bei ca. +6,5 °C die Sättigungslinie erreicht. Eine weitere Abkühlung auf 5 °C muss also zwangsläufig zur Kondensatausscheidung führen. Man bezeichnet deshalb den Schnittpunkt einer vertikalen x -Linie mit der Sättigungslinie als Taupunkt und die entsprechende Temperatur als Taupunkt- oder Sättigungstemperatur. Der Wasserdampf kondensiert an Flächen und Körpern, deren Temperatur unterhalb der Taupunkt- oder Sättigungstemperatur liegt. Es kommt somit zu einer Tropfenbildung. Wenn man z. B. ein Wasserdampf/Luft-Gemisch entfeuchten will, wird man es so tief abkühlen, bis seine Taupunkttemperatur unterschritten wird. Je größer die Taupunktunterschreitung ist, umso höher wird der Entfeuchtungseffekt.

2.3.6 Linien mit konstanter relativer Feuchtigkeit

Entlang der Sättigungslinie (Taupunktlinie) ist die Luft zu 100 % mit Wasserdampf gesättigt, d. h., die relative Feuchte beträgt 100 %. Enthält die Luft aber beispielsweise nur die Hälfte, also 50 % der Sättigungs-Wasserdampfmenge, dann bezeichnet man diesen Sättigungsgrad mit $\varphi = 50\%$ relativer Feuchte (r. F.). Trägt man nun im h,x-Diagramm (siehe Bild 2.1) zu jeder Temperatur den Punkt mit 50 % der entsprechenden Sättigungs-Wasserdampfmenge ein, so ergibt die Verbindung aller Punkte eine Linie mit einer konstanten relativen Feuchte φ von 50 %.

Beispiel:

- bei einer Temperatur von $\theta = 17,5\text{ °C}$, $x = 12,4\text{ g/kg}$: relative Feuchte $\varphi = 100\%$
- bei einer Temperatur von $\theta = 17,5\text{ °C}$, $x = 6,2\text{ g/kg}$: relative Feuchte $\varphi = 50\%$
- bei einer Temperatur von $\theta = 7,5\text{ °C}$, $x = 6,4\text{ g/kg}$: relative Feuchte $\varphi = 100\%$
- bei einer Temperatur von $\theta = 7,5\text{ °C}$, $x = 3,2\text{ g/kg}$: relative Feuchte $\varphi = 50\%$

2.3.7 Linien mit konstanter Enthalpie

Die spezifische Enthalpie h der feuchten Luft setzt sich zusammen aus der Enthalpie der trockenen Luft und der Enthalpie des Wasserdampfanteils.

Die Enthalpie des Wasserdampfs besteht wiederum aus zwei Komponenten, nämlich der Verdampfungswärme und der Überhitzungswärme. Um die Enthalpie des Wasserdampfs zu ermitteln, geht man davon aus, dass Wasser bei 0 °C und dem dazugehörigen Sättigungsdruck verdampft. Dazu ist eine Energie von $r = 2.500\text{ kJ/(kg}\cdot\text{W)}$ erforderlich. Zusätzlich muss die Überhitzungswärme des Wasserdampfs berücksichtigt werden, die mithilfe der spezifischen Wärmekapazität c_{pw} bestimmt wird.

Die Enthalpie h (Wärmeinhalt in kJ/kg) der feuchten Luft setzt sich aus der Enthalpie der trockenen Luft und der des Wasserdampfanteils zusammen. Die spezifische Wasserdampfenthalpie ist viel größer als die von trockener Luft. Daher enthält Wasserdampf einen wesentlichen Anteil der Enthalpie von feuchter Luft. Ab diesem Zustand kann die Enthalpie für jeden Punkt des Graphen berechnet werden, indem der Energieaufwand für die Luftaufheizung und Wassererwärmung summiert wird. Wenn Wasser in die Luft gesprüht wird oder die Luft mit feuchten Oberflächen in Berührung kommt, verdunstet das Wasser und eliminiert die Verdampfungswärme ausschließlich aus der resultierenden Mischung. Da bei diesem Vorgang praktisch keine externe Energie von außen zugeführt oder abgeleitet wird, ändert sich die Enthalpie des Luft/Wasser-Gemischs nicht und die Zustandsänderung setzt sich bei konstanter Enthalpie fort. Dieses ist eine adiabatische Zustandsänderung. Es gibt jedoch eine Verschiebung zwischen dem abnehmenden fühlbaren Anteil und dem zunehmenden latenten Anteil der in der Luft enthaltenen Wärme.

Diese Verschiebung bewirkt, dass die Luft abkühlt. In dem Diagramm wird die Steigung der Linien mit konstanter Enthalpie (Isenthalpen oder Adiabate) durch das Verhältnis zwischen dem sensiblen und dem latenten Wärmehalt bestimmt. Vorausgesetzt, dass die Auslegung der Isothermen die unterschiedliche spezifische Wärme von trockener und feuchter Luft berücksichtigt, sind die Isenthalpen parallel. Die Enthalpie-Skala ist im h,x -Diagramm unterhalb der Sättigungslinie dargestellt. Auf dieser Skala können wir die definierte Enthalpie für die Luft mit einer Temperatur von $\theta = 20\text{ °C}$ und einer absoluten Feuchte von $x = 6\text{ g/kg}$, 35 kJ/kg ablesen.

Eine der wichtigsten Berechnungen für die Luftbehandlung ist die Bestimmung der Wärmemenge, die benötigt wird, um die gewünschten Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen im Raum zu erreichen. In diesem Fall muss die Luft, deren Zustand bekannt ist, durch geeignete Behandlung, wie Mischen, Heizen, Kühlen, Befeuchten oder Entfeuchten, in einen anderen erforderlichen Zustand überführt werden. Die meisten dieser Behandlungsarten führen auch zu einer Veränderung des Wärmehalts der behandelten Luft.

In der Thermodynamik bezieht sich die spezifische Enthalpie h , ausgedrückt in kJ/kg , auf den Wärmehalt einer 1 kg schweren Substanz. Die absolut trockene Luft mit einer Temperatur $\theta = 0\text{ °C}$ und einem theoretischen Wassergehalt von $x = 0\text{ g/kg}$ hat einen definierten Wärmehalt $h = 0\text{ kJ/kg}$. Dieser Zustand entspricht dem festen Nullpunkt der Enthalpie-Skala.

Enthalpiewerte $< 0\text{ kJ/kg}$ werden negativ ($-$) bezeichnet. Der Unterschied in der Enthalpie, d. h. zwischen den Anfangs- und Endzuständen einer Luftbehandlung, kann leicht grafisch aus dem h,x -Diagramm bestimmt werden. Wird dann die Masse der behandelten Luft in kg mit der grafisch ermittelten Enthalpiedifferenz Δh multipliziert, so ergibt sich die für diese Zustandsänderung erforderliche Wärmemenge in kW .

2.3.8 Feuchtkugel- oder Feuchttemperatur

Ein anderer Ausdruck der Thermodynamik von feuchter Luft ist die sogenannte „Feuchtkugeltemperatur“ t_p . Die Luft kann durch Verdampfen des Wassers bis zur Sättigung befeuchtet werden. Wenn das zu verdampfende Wasser bereits die Temperatur der Luft hat, ist für dessen Verdampfung nur eine latente Wärmemenge erforderlich, die durch sensible Wärmeabfuhr (Verdunstungskühlung) der Luft entzogen wird. In dieser Situation tritt also eine Zustandsänderung mit konstanter Enthalpie auf, bis der Sättigungsdruck (Schnittpunkt mit der Sättigungslinie) erreicht ist.

Die Temperatur dieses Schnittpunkts der Isenthalpen mit der Sättigungslinie wird in der Klimatechnik als Feuchtkugeltemperatur oder Kühlgrenze bezeichnet. Will man die Linien mit konstanter Feuchtkugeltemperatur (adiabatisch) in das h,x -Diagramm eintragen, so stellt man fest, dass sie die gleiche Steigung wie die Isenthalpen haben müssen. Für genaue Berechnungen sollte man jedoch sicherstellen, dass die Berechnung der Enthalpie auch auf der Enthalpie des Wassergehalts, bezogen auf 0 °C , basiert.

Im Fall von Adiabaten wird davon ausgegangen, dass die Wassertemperatur zu Beginn der Änderung des Zustands gleich der Temperatur der Luft ist. Dies bewirkt eine leichte Änderung der Neigung von Adiabaten im Vergleich zu Isenthalpen.

Die Feuchtkugeltemperatur wird mit einem Psychrometer gemessen. Das Psychrometer enthält zwei Thermometer. Ein Thermometer befindet sich in einer saugfähigen Stoffsocke, die vor jeder Messung mit reinem Wasser getränkt wird. Während der Messung muss das „nasse“ Thermometer dem Luftvolumenstrom der zu messenden Luft ausgesetzt werden, um den Verdampfungsprozess zu bewirken.

Dies geschieht durch einen kleinen installierten Ventilator. Der Messvorgang sollte mindestens so lange dauern (ca. 1 bis 2 min.), bis das nasse Sensorelement die Kühlgrenztemperatur bzw. die Feuchtkugeltemperatur erreicht hat. Mit einem Psychrometer können praktisch alle Luftbedingungen gemessen und in Kombination mit einem h,x-Diagramm definiert werden. Will man im Diagramm die Feuchtkugeltemperatur für einen Punkt der Luftzufuhr bestimmen, so zieht man von diesem Punkt eine Linie parallel zu den Isenthalpen bis zur Sättigungslinie. Die Temperatur des Schnittpunkts dieser Linie mit der Sättigungslinie ist die Feuchtkugeltemperatur dieses Klimatisierungszustands. Für eine definierte Klimaanwendung mit einer Temperatur von $\theta = 20\text{ °C}$ und einer absoluten Feuchtigkeit von $x = 6\text{ g/kg}$ ergibt sich eine Feuchtkugeltemperatur von etwa 13 °C .

2.3.9 Dichte

Die Dichte gibt die Masse m in kg einer Substanz mit einem Volumen V von einem Kubikmeter an. Die Dichteeinheit ρ ist daher kg/m^3 feuchte Luft und hängt von drei verschiedenen Kriterien ab:

- von atmosphärischen Druck: Das h,x-Diagramm wird immer nur für einen bestimmten barometrischen Druck aufgezeichnet. Es ist daher wichtig, sicherzustellen, dass ein Diagramm für die Berechnung der Klimatisierung verwendet wird, das für die entsprechende Höhe über dem Meeresspiegel (also den zugehörigen Luftdruck) gilt. Wenn keine dieser Informationen verfügbar ist, werden die Variablen auf den erforderlichen Luftdruck umgerechnet. Die Dichte der trockenen Luft beträgt bei 0 °C auf Höhe des Meeresspiegels $\rho = 1,293\text{ kg/m}^3$, die Dichte des Wasserdampfs liegt bei $\rho = 0,804\text{ kg/m}^3$
- von der Temperatur: Je höher die Temperatur der Luft ist, umso mehr dehnt sie sich aus und ihre Dichte nimmt somit ab.
- von dem Wasserdampfgehalt: Wasserdampf ist spezifisch leichter als Luft. Infolgedessen nimmt die Dichte der Mischung mit zunehmendem Wasserdampfgehalt ab. Linien konstanter Dichte müssen somit nach rechts geneigt sein. Hieraus ergibt sich, dass feuchte Luft, die schwerer ist als trockene Luft, nach oben steigt und dadurch beispielsweise in Gebäuden Schimmelbildung eher im Deckenbereich entsteht.

2.4 Zustandsänderungen im h,x-Diagramm

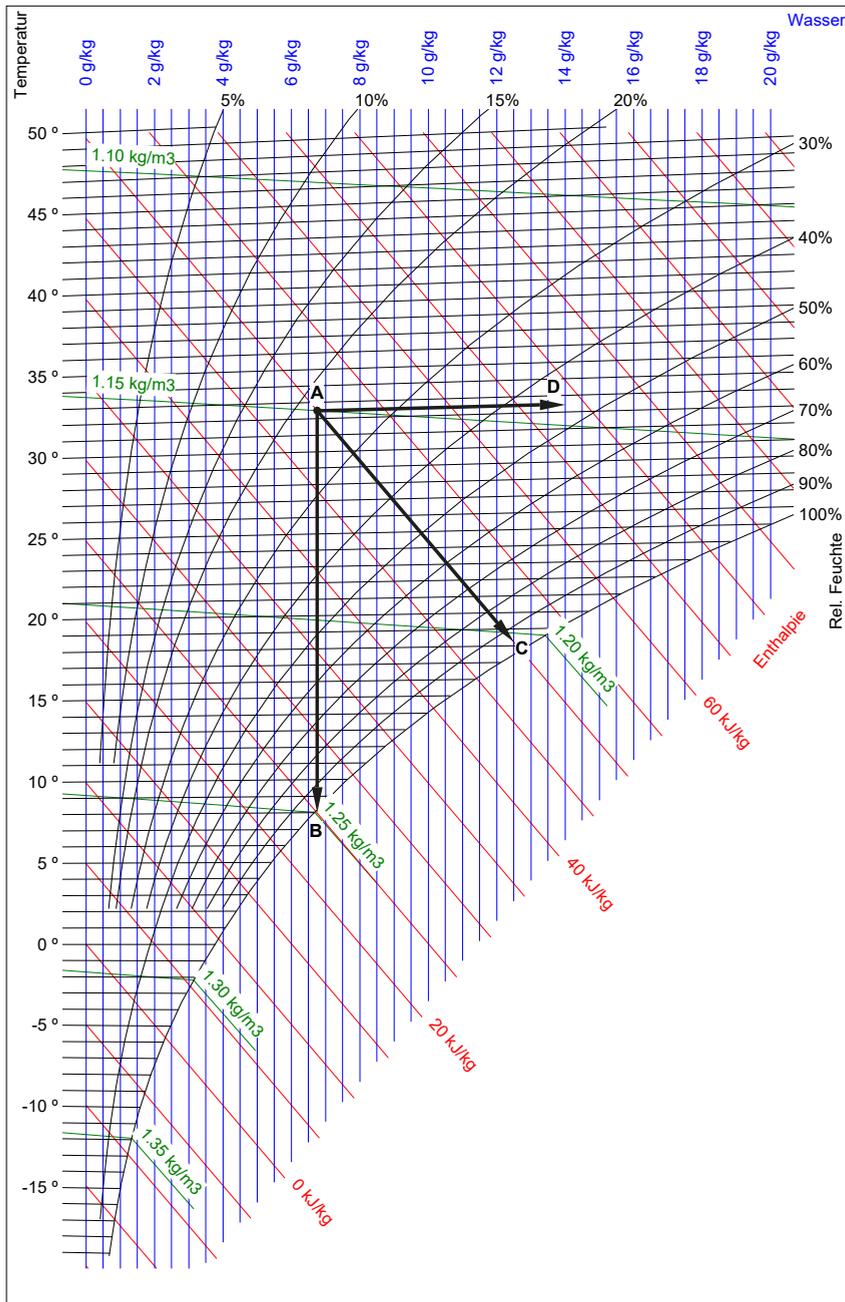


Bild 2.1: Zustandsänderungen im h,x-Diagramm (Quelle: www.dolder-ing.ch)

Sind von einem Luftzustand zwei Zustandsgrößen, zum Beispiel die Trockentemperatur t und die relative Feuchte, bekannt, so lässt sich der Zustandspunkt im h,x-Diagramm darstellen. Werden nun bestimmte Luftbehandlungen durchgeführt, wie Erwärmung oder Abkühlung, so verändert sich die Lage des Zustandspunkts.

Zustandsänderungen beim Erwärmen und Abkühlen

Bei den Zustandsänderungen *Erwärmen* und *Abkühlen* feuchter Luft bleibt der Wassergehalt x konstant, sodass diese Zustandsänderungen im h,x-Diagramm auf einer senkrechten Linie nach oben beziehungsweise nach unten verlaufen. Damit verbunden ist sowohl eine Änderung der Trocken- und Feuchttemperatur als auch der relativen Feuchtigkeit und der spezifischen Enthalpie h der feuchten Luft. Sind beide Luftzustände vor und nach der Erwärmung beziehungsweise Abkühlung bekannt, so können diese ins h,x-Diagramm eingetragen und die jeweils zugehörige Enthalpie h abgelesen werden. Aus der Differenz der beiden spezifischen Enthalpiewerte ergibt sich pro kg trockener Luft die zu- oder abzuführende Wärmemenge. Der dabei übertragene Wärmestrom Q kann mittels des Massenstroms der trockenen Luft berechnet werden.

Zustandsänderungen an einem Oberflächenkühler

Betrachtet man einen Wärmeübertrager, der zur Kühlung der Luft eingesetzt wird, so wird sich bei einer bestimmten Wassertemperatur die oben beschriebene Zustandsänderung einstellen, welche durch die Luftzustände A und B dargestellt sind. Aufgrund der endlichen Wärmeübertragungsfläche und Verweilzeit wird der aus dem Wärmeübertrager austretende Luftstrom die Wassertemperatur nicht erreichen, sondern stets eine etwas höhere Temperatur annehmen. Liegt die Wassertemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur des Luftzustands, wird sich der Luftstrom zunächst abkühlen, bis die Sättigungslinie (100 %) im Zustandspunkt B erreicht ist (siehe Bild 2.1). Dann wird ein Teil des in der Luft enthaltenen Wassers auskondensiert.

Befeuchtung mit Sattdampf

Bei der Befeuchtung von Luft mit Sattdampf wird diese bis auf einen bestimmten neuen Luftzustand mit Wasserdampf angereichert. Es ändert sich auch die Dichte (geringe Zunahme), die relative Feuchte (nimmt zu), die Enthalpie und der absolute Wassergehalt der Luft (nehmen zu). Nur die Temperatur bleibt konstant. Dabei ist zur Bestimmung des neuen Luftstands die zugeführte Sattdampfmenge entscheidend. Die Befeuchtung verläuft, wie oben dargestellt, von links (Zustandspunkt A) nach rechts (Zustandspunkt D). Entscheidend ist bei dieser Art der Befeuchtung die Zuführung von gesättigtem Dampf (reiner Dampf von 100 °C, nicht überhitzt).

Befeuchtung/Kühlung mit Wasser (adiabate Kühlung)

Bei der Befeuchtung von Luft mit Wasser befeuchtet und kühlt man diese bis auf einen bestimmten neuen Luftzustand (siehe Bild 2.1; Zustandsänderung A–C). Es ändern sich auch die Dichte (nimmt zu), die relative Feuchte (nimmt zu) und der absolute Wassergehalt der Luft (nimmt zu). Nur die Enthalpie bleibt konstant. Dabei ist zur Bestimmung des neuen Luftstands die zugeführte Wassermenge entscheidend.

Kühlgrenze – Kühlgrenztemperatur (TKG)

Die durch Verdunstungskühlung maximal erreichbare Temperatur wird als Kühlgrenze bezeichnet. Diese für Kühltürme und Adiabatiksysteme relevante Grenztemperatur ist somit nicht die Umgebungstemperatur, sondern die Feuchtkugeltemperatur der Luft. Bei warmen und trockenen Umgebungsbedingungen ist eine Abkühlung bis unterhalb der Umgebungstemperatur möglich. Diese durch Verdunstungskühlung maximal erreichbare Temperatur kann nicht berechnet werden, sondern muss mithilfe des h,x -Diagramms oder iterativ ermittelt werden. Im h,x -Diagramm ergibt sich die Kühlgrenze eines beliebigen Luftzustands als Schnittpunkt der Nebelisotherme mit der Sättigungslinie.

Kühlgrenzabstand (KGA):

Bei luftgekühlten Rückkühlsystemen sind den Rücklauftemperaturen physikalische Grenzen gesetzt. Bei trockenen Systemen sind die Umgebungslufttemperaturen maßgebend und bei Verdunstungssystemen die Feuchtkugeltemperaturen.

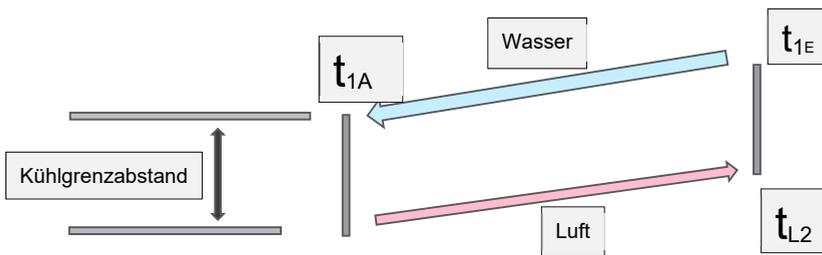


Bild 2.2: Kühlgrenzabstand (KGA)

Bei trockenen Systemen gilt ein Kühlgrenzabstand (KGA) von ca. 6 K bis 8 K noch als wirtschaftlich, d. h., bei 34 °C Außenlufttemperatur kann wirtschaftlich eine Rücklauftemperatur von ca. 40 °C realisiert werden. Bei Verdunstungssystemen gilt ein wirtschaftlicher KGA von 4 K bis 7 K, d. h., man kann Rücklauftemperaturen von 26 °C bis 29 °C realisieren, wenn eine Feuchtkugeltemperatur von 22 °C vorliegt.

2.5 Kühltürme (Verdunstungskühlanlagen)

2.5.1 Definition Kühlturm und Verdunstungskühlanlage

Die 42. BImSchV unterscheidet lediglich drei unterschiedliche Anlagen gemäß ihrem Anwendungsbereich:

§ 1 Anwendungsbereich

(1) Diese Verordnung gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb folgender Anlagen, in denen Wasser verrieselt oder versprüht wird oder anderweitig in Kontakt mit der Atmosphäre kommen kann:

1. Verdunstungskühlanlagen,
2. Kühltürme und
3. Nassabscheider.

Gemäß den Begriffsbestimmungen gilt für einen Kühlturm der 42. BImSchV:

§ 2 Begriffsbestimmung

5. „Kühlturm“: eine Anlage, bei der durch Verdunstung von Wasser Wärme an die Umgebungsluft abgeführt wird, insbesondere bestehend aus einer Verrieselungs- oder Verregnungseinrichtung für Kühlwasser und einem Wärmeübertrager, in der die Luft im Wesentlichen durch den natürlichen Zug, der im Kaminbauwerk des Kühlturms erzeugt wird, durch den Kühlturm gefördert wird, und einer Kühlleistung von mehr als 200 Megawatt je Luftaustritt einschließlich der Nassabscheider, deren gereinigte Rauchgase über den Kühlturm abgeleitet werden; der Einsatz drückend angeordneter Ventilatoren zur Unterstützung der Luftzufuhr ist unschädlich, soweit diese das Charakteristikum des Kühlturms nur unwesentlich beeinflussen.

Gemäß den Begriffsbestimmungen gilt für eine Verdunstungskühlanlage der 42. BImSchV:

- § 11. „Verdunstungskühlanlage“: eine Anlage, bei der durch Verdunstung von Wasser Wärme an die Umgebungsluft abgeführt wird, insbesondere bestehend aus einer Verrieselungs- oder Verregnungseinrichtung für Kühlwasser und einem Wärmeübertrager, ausgenommen Kühltürme.

Diese Definitionen in der 42. BImSchV stellen eine erhebliche Diskrepanz zum allgemeinen Verständnis des Begriffs Kühlturm in der Kälte- und Klimatechnik dar. In der Verordnung werden Anlagen ab einer Kühlleistung von mehr als 200 Megawatt mit natürlichem Zug als Kühlturm und kleinere zwangsbeflügelte Anlagen als Verdunstungskühlanlage definiert, wohingegen in der Kälte- und Klimatechnik auch Verdunstungskühlanlagen (gem. Definition 42. BImSchV) als Kühlturm bezeichnet werden. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels sind Anlagen