

Wärmetechnische Abnahmemessungen an Naßkühltürmen (VDI-Kühlturmregeln)

DIN
1947

Thermal acceptance tests on wet cooling towers (VDI cooling tower code)

Ersatz für Ausgabe 06.59

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	1	6 Bestimmung der Unsicherheit des Ergebnisses ..	6
1.1 Anwendungsbereich	1	6.1 Bestimmung der Unsicherheit aufgrund nicht	
1.2 Zweck	1	erfaßbarer systematischer Abweichungen der	
1.3 Gegenstand der wärmetechnischen Gewähr-		Meßergebnisse	6
leistung	1	6.2 Bestimmung der durch nicht erfaßbare syste-	
2 Kennfelder	2	matische Abweichungen der Meßergebnisse	
2.1 Aufbau der Kennfelder	2	bedingten Meßunsicherheit einer Meßgröße ..	8
2.2 Parameter der Kennfelder	2	6.3 Bestimmung der Unsicherheit aufgrund zufäl-	
2.3 Ausführungsbeispiel	2	liger Abweichungen der Meßergebnisse und	
3 Meßverfahren und Meßgeräte	2	zeitlicher Schwankungen der Meßgrößen	8
3.1 Allgemeines	2	6.4 Anwendungsbeispiel	9
3.2 Messungen	2	7 Abnahmebericht	9
4 Abnahmemessungen	3	8 Formelzeichen	9
4.1 Vertragliche Vereinbarungen	3	Anhang A: Darstellung von Kennfeldern	10
4.2 Vorbereitung der Abnahmemessungen	4	Anhang B: Meßstellenpläne	12
4.3 Durchführung der Abnahmemessungen	5	Anhang C: Beispiel zur Auswertung der Meßer-	
5 Auswertung der Meßergebnisse und Gewähr-		gebnisse und zur Bestimmung der	
leistungsnachweis	5	Unsicherheit des Ergebnisses	16
5.1 Auswertung der Meßwerte	5	Anhang D: <i>t</i> -Verteilung nach Student	23
5.2 Vergleich mit zugesicherten Werten	6		
5.3 Übertragung der Abweichung auf Gewähr-	6		
leistungsbedingungen			

1 Anwendungsbereich und Zweck

1.1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für wärmetechnische Abnahmemessungen an Naturzug- und Ventilator-Naßkühltürmen.

Die Festlegungen betreffen die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Abnahmemessungen. Sie sollen bereits im Liefervertrag berücksichtigt und als verbindlich anerkannt werden. Abweichungen von diesen Regeln sowie Ergänzungen sollen besonders vereinbart werden.

Bei kleinen, serienmäßig gebauten Kühltürmen genügt im allgemeinen eine Abnahmemessung an einem Prototyp der Serie unter Anwendung dieser Norm.

Die Norm wendet sich an:

- Lieferer
- Besteller
- Betreiber
- Sachverständige
- Genehmigungsbehörden

1.2 Zweck

Die im Vertrag zwischen Lieferer und Besteller zugesicherten thermischen und hydraulischen Eigenschaften

des Naßkühlturms sollen durch Abnahmemessungen nachgewiesen werden.

Die Begriffe „Gewährleistung“, „Werte“ und „Abnahme“ sind in dieser Norm im technischen und nicht im juristischen oder kaufmännischen Sinne zu verstehen.

Juristische und kaufmännische Folgerungen aus einer Erfüllung oder Nichterfüllung der in einem Vertrag zugesicherten Werte sind nicht Gegenstand der vorliegenden Norm.

1.3 Gegenstand der wärmetechnischen Gewährleistung

Der Kühlturm muß in einem Gewährleistungspunkt (t_{LG} , ϕ_{LG} , z_G , $\dot{m}_{WG}$, bei Ventilatorkühltürmen zusätzlich P_G) eine bestimmte Kaltwassertemperatur erreichen oder unterschreiten. Das für den Kühlturm geltende Kennfeld enthält vor allem den um den Gewährleistungspunkt liegenden Bereich, in dem die Abnahmemessungen durchgeführt werden dürfen (siehe Abschnitt 4.3.3).

Liegt nur der Gewährleistungspunkt vor, kann die Theorie der Verdunstungskühlung, auf deren Darstellung hier verzichtet wird, zur Aufstellung des Kennfeldes benutzt werden.

Fortsetzung Seite 2 bis 24

Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

2 Kennfelder

2.1 Aufbau der Kennfelder

Ein bestimmter Aufbau der Kennfelder ist nicht vorgegeben. Der Bereich, in dem die Abnahmemessungen durchgeführt werden dürfen, ist nach Abschnitt 4.3.3 im Kennfeld einzugrenzen. Der Maßstab ist so zu wählen, daß Temperaturen auf 0,1 K abgelesen werden können.

2.2 Parameter der Kennfelder

Der Sollwert der Kaltwassertemperatur soll in Abhängigkeit von folgenden Größen dargestellt werden:

- Temperatur der Umgebungsluft
- Relative Luftfeuchte der Umgebungsluft
- Warmwassermassenstrom
- Warmwassertemperatur

Zusätzlich sollte die Kühlzonenbreite eingetragen werden.

Bei Ventilator-Kühltürmen muß noch der Leistungsbedarf der Ventilatoren als Parameter einbezogen werden, während der Zustand der Umgebungsluft vereinfachend allein durch die Temperatur des feuchten Thermometers erfaßt werden kann.

Liegen Korrekturkurven für den Einfluß weiterer Größen (z. B. Windgeschwindigkeit, Temperaturschichtung der Atmosphäre) vor, so sind diese zusätzlich zu berücksichtigen.

2.3 Ausführungsbeispiel

Im Anhang A ist je ein Beispiel für ein Kennfeld eines Naturzug-Naßkühlturms und eines Ventilator-Naßkühlturms enthalten.

3 Meßverfahren und Meßgeräte

3.1 Allgemeines

Bei Abnahmemessungen sind folgende Größen zu messen:

- Warmwassermassenstrom
- Warmwassertemperatur
- Kaltwassertemperatur
- Temperatur der Umgebungsluft
- Temperatur des feuchten Thermometers in der Umgebungsluft
- Leistungsbedarf der Ventilatoren (bei Ventilator-Kühltürmen)
- Windgeschwindigkeit
- Luftdruck
- Kühlturm-Pumpförderhöhe

Im Bedarfsfall sind zu messen:

- Windrichtung
- Temperaturschichtung der Atmosphäre (bei Naturzug-Kühltürmen)
- Luftmassenstrom
- Schwadenzustand
- Temperatur und Massenstrom des Zusatzwassers

DIN-Normen oder andere Regelwerke, die für ein hier eingesetztes Meßverfahren bestehen, sind anzuwenden.

Einen Überblick über die Instrumentierung geben die Meßstellenpläne in Anhang B.

Die Geräte sind vor und nach den Messungen zu kalibrieren oder zu prüfen. Bei der Prüfung nach der Messung reicht eine Stichprobe aus. Die ermittelten Korrekturen sind bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Der Meßbereich der Geräte ist so zu wählen, daß sich möglichst enge Fehlergrenzen ergeben. Ihre Genauigkeitsklasse soll der angestrebten Meßgenauigkeit entsprechen. Zählende Meßgeräte sind zugelassen, sofern durch zusätzliche Messung von Augenblickswerten nachgewiesen wird, daß sich Schwankungen in den zulässigen Grenzen halten.

3.2 Messungen

3.2.1 Temperatur

Zu messen sind die Warmwassertemperatur t_{w1} , die Kaltwassertemperatur t_{w2} und die Temperaturen des trockenen und des feuchten Thermometers t_L und t_F in der Umgebungsluft. Besondere Aufmerksamkeit verdient die Kaltwassertemperatur t_{w2} wegen ihres unmittelbaren Einflusses auf den Gewährleistungsvergleich.

Zur Messung werden geeichte Instrumente eingesetzt, und zwar vornehmlich

- Flüssigkeits-Thermometer
- Platin-Widerstandsthermometer
- Thermoelemente
- Quarzthermometer

Die Messungen sind nach VDI/VDE 3511 und VDI/VDE 2640 Blatt 4 durchzuführen.

3.2.1.1 Wassertemperatur

Die Temperatur des Warmwassers wird im Zulauf zum Naßkühlturm oder in der Wasserverteilung des Naßkühlturms gemessen.

Die Kaltwassertemperatur wird vorzugsweise im Auslauffteil des Naßkühlturms vor der Kühlwasserpumpe gemessen. Bei großen Naßkühltürmen können hier beträchtliche Temperaturunterschiede im Meßquerschnitt zwischen den verschiedenen Meßstellen auftreten. Weicht innerhalb einer Meßperiode für mindestens einen Meßort der zeitliche Mittelwert um mehr als 1 K vom (vorläufigen) Gesamtmittelwert ab, d. h.

$$\Delta_k = \max \left| \bar{t}'_{w2, m_k} - \bar{t}_{w2, m_k, i} \right| > 1 \text{ K} \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, M$$

$$\bar{t}'_{w2, m_k} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \bar{t}_{w2, m_k, i} \quad (2)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

dann muß mindestens einmal, vorzugsweise jedoch zu Beginn und Ende der Abnahmemessungen, an den einzelnen Temperaturmeßstellen die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. In diesem Fall werden bei der Berechnung des Gesamtmittelwertes der Kaltwassertemperatur die einzelnen Meßwerte mit dem Verhältnis der örtlichen zur durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit gewichtet.

Bei Einspeisung von Zusatzwasser in das Naßkühlbeckensystem muß dessen Einfluß auf die Kaltwassertemperatur berücksichtigt werden.

3.2.1.2 Luftzustand

Zur Messung der Temperatur der Umgebungsluft und der Temperatur des feuchten Thermometers in der Umgebungsluft werden vorwiegend Aspirations-Psychrometer eingesetzt.

3.2.2 Wassermassenstrom

Es wird der zugeführte Massenstrom bestimmt. Die Meßeinrichtung ist daher in der Warmwasserleitung vorzusehen. Sollte wegen der örtlichen Gegebenheiten eine Messung dort nicht möglich sein, kann sinngemäß in der Kaltwasserleitung gemessen werden. Hierbei muß jedoch die Differenz zwischen Warm- und Kaltwassermassenstrom mit Hilfe einer Massenbilanz berücksichtigt werden.

Geräte zur Messung des Wassermassenstroms sind mit ihren Meßunsicherheiten in Abschnitt 6.2.2 angegeben (siehe auch DIN 1944).

3.2.3 Leistungsbedarf der Ventilatoren

Die Genauigkeit der einzusetzenden Strom- und Spannungswandler sowie Leistungsmesser soll betragen:

- $\leq 1\%$ der Motorleistung für Motorleistungen unter 250 kW
- $\leq 0,2\%$ der Motorleistung für Motorleistungen über 250 kW

Die Prüfprotokolle für die verwendeten Meßgeräte müssen vorliegen.

Es soll nur die elektrische Leistungsaufnahme der Antriebsmotoren gemessen werden. Bezieht sich die vertragliche Zusicherung auf die Leistungsaufnahme an der Ventilatorwelle, so ist die gemessene elektrische Leistungsaufnahme mit dem Wirkungsgrad des Antriebs nach dem Prüfprotokoll zu korrigieren.

3.2.4 Kühlturm-Pumpförderhöhe

Die gemessene Kühlturm-Pumpförderhöhe

$$H_p = \frac{v}{g} \left[(p - p_0) + \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \right] + H \quad (3)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

– H ist die Höhendifferenz zwischen Meßstelle und Beckenoberkante – ist um die Strömungsverluste zwischen Meßstelle und Zulaufkanal in Höhe der Beckenoberkante zu korrigieren. Strömungsverluste in diesem Sinne sind z.B. bedingt durch Wandreibung, Umlenkung, abrupte Querschnittsänderung.

3.2.5 Luftdruck

Der Luftdruck wird vorwiegend mit einem Quecksilber-Barometer, einem Siedebrometer oder einem Dosenbarometer gemessen.

3.2.6 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Die Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden mit einer Wetterfahne und einem Schalenkreuzanemometer in 10 m Höhe über Grund an einer von Bauten möglichst nicht gestörten Stelle gemessen.

3.2.7 Temperaturschichtung der Atmosphäre

Bei Naturzug-Naßkühltürmen und Ventilator-Naßkühltürmen mit zusätzlicher Kaminwirkung hat die Dichte der Umgebungsluft Einfluß auf den Luftdurchsatz und damit die Kühlleistung des Kühlturms.

Um den Einfluß einer Dichteschichtung berücksichtigen zu können, kann die Temperatur (nötigenfalls auch die Feuchte) der Umgebungsluft neben dem Kamin gemessen werden. Dazu können an Drahtseilen hängende oder von Ballons getragene Thermometer (bzw. Psychrometer) benutzt werden.

3.2.8 Temperatur und Massenstrom des Zusatzwassers und des Abflutwassers

Hierfür können die Verfahren verwendet werden, die für das Kreislaufwasser geeignet sind.

4 Abnahmemessungen

4.1 Vertragliche Vereinbarungen

4.1.1 Allgemeines

Zwischen Besteller und Lieferer sind bereits bei Vertragsabschluß Vereinbarungen über die Abnahmemessungen zu treffen.

Hierbei sind die Verfahren und gegebenenfalls erforderliche Abweichungen von dieser Norm festzulegen. Falls auch die Hinzuziehung von neutralen Sachverständigen gewünscht wird, ist dies bei Vertragsabschluß zu vereinbaren.

Soweit bei den Messungen Verfahren angewendet werden, für die bereits VDI-Richtlinien oder DIN-Normen bestehen, sind die dort angegebenen Festlegungen anzuwenden. Dabei ist auch zu vereinbaren, ob zur Kontrolle mit zwei unabhängigen Meßsystemen gemessen werden soll.

Einen Überblick über Meßgrößen und Meßstellen gibt Anhang B.

Sofern es nicht möglich ist, die Meßstellen nach den Regeln einzurichten, müssen die Vertragspartner die sich daraus ergebenden Meßunsicherheiten vor den Abnahmemessungen feststellen.

4.1.2 Zeitpunkt der Abnahmemessungen

Die Abnahmemessungen sind innerhalb von 12 Monaten nach der Inbetriebnahme, möglichst bei den klimatischen Verhältnissen, der Kühlzonenbreite und dem Wassermassenstrom vorzunehmen, die der Gewährleistung zugrunde gelegt sind.

4.1.3 Leitung der Abnahmemessungen

Die Abwicklung des Abnahmeverfahrens ist zwischen Lieferer und Besteller möglichst schon bei Vertragsabschluß zu vereinbaren. Die Leitung der Abnahmemessungen kann einem neutralen Sachverständigen übertragen werden.

Der Leiter ist für die ordnungsgemäße Durchführung und Auswertung der Abnahmemessungen verantwortlich. Er hat im Einvernehmen mit den Vertragspartnern unter Beachtung der anlagenbedingten Meßmöglichkeiten festzulegen, welche der in Abschnitt 3 aufgeführten Messungen durchzuführen sind.

Die Vertragspartner müssen über die Einzelheiten der Abnahmemessungen unterrichtet werden.

4.1.4 Wiederholung der Abnahmemessungen

Die Abnahmemessungen sind zu wiederholen, wenn

- begründete Zweifel an der Richtigkeit oder an der ausreichenden Genauigkeit der Messungen vorliegen,
- die zugesicherten Garantiewerte nicht erreicht wurden und der Erfolg vorgenommener Nachbesserungen durch Messungen nachzuprüfen ist.

4.1.5 Kosten, Gestellung von Meßgeräten und Personal

Die Vertragspartner bzw. deren Beauftragte sollen sich frühzeitig über die Gestellung der für die Abnahmemessungen benötigten Meßinstrumente und über das einzusetzende Personal einigen. Die Übernahme der Kosten ist vertraglich festzulegen. Dies gilt auch für Vergleichs- und Wiederholungsmessungen und die Hinzuziehung von Dritten.

4.2 Vorbereitung der Abnahmemessungen

Bei den wichtigsten Meßgrößen wird empfohlen, für die Meßgeräte besondere Anschlußmöglichkeiten wie Stutzen und Tauchhülsen vorzusehen, damit die Abnahmemessungen durchgeführt werden können, ohne daß die Anzeige der Betriebsmeßgeräte beeinträchtigt wird.

4.2.1 Umfang und Anordnung der Meßstellen

Der Lieferer erstellt bei Vertragsabschluß im Einvernehmen mit dem Besteller oder dessen Beauftragtem den für die Durchführung der Abnahmemessungen erforderlichen Meßstellenplan, aus dem sämtliche Meßstellen sowie die für die Messung notwendigen Voraussetzungen ersichtlich sind (siehe Anhang B). Spätere Abweichungen von diesem Plan bedürfen des Einverständnisses der Vertragsparteien.

Die Festlegung der Mindestanzahl der Meßstellen erfolgt anhand der Tabelle 1. Die Meßstellenanzahl ergibt sich unter zusätzlicher Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten.

4.2.2 Meßprogramm

Zwischen Besteller und Lieferer oder deren Beauftragten sind bei der technischen Bearbeitung des in Auftrag gegebenen Naßkühlturms das Programm der Abnahmemessungen, die zu messenden Größen und die Meßverfahren sowie eine eventuelle Aufteilung der Meßstellen und Meßgeräte unter den Vertragsparteien zu vereinbaren.

4.2.3 Zustand der Anlage

Vor der Durchführung der Abnahmemessungen ist der Naßkühlturm von den Vertragsparteien gemeinsam zu besichtigen und auf ordnungsgemäßen Zustand zu überprüfen.

Insbesondere ist zu prüfen, ob

- alle Funktionsteile unbeschädigt und betriebsbereit sind,
- die Kühleleinbauten und der Tropfenabscheider frei von Verschmutzungen, Ablagerungen und Bewuchs sind,
- die Wasserverteilung keine Verschmutzungen oder Verstopfungen aufweist,
- die Kühleluft- und Wasserführung keine Undichtigkeiten erkennen lassen.

Es muß sichergestellt sein, daß das Kühlwasser in Qualität und Zusammensetzung den der Bestellung zugrundegelegten Daten entspricht, daß es insbesondere frei von Ölen und Fetten ist.

Der Lieferer hat den abnahmebereiten Zustand des Kühlturms vor Beginn der Messung schriftlich zu bestätigen.

Tabelle 1. Mindestanzahl und Anordnung der Meßstellen

Nr	Meßgröße	Mindestanzahl M	Anordnung
1	Wassermassenstrom $\dot{m}_w$	$M = 1$ je Zulaufleitung	In der Zulaufleitung
2	Warmwassertemperatur t_{w1}	$M = 0,5 \left(\frac{A}{m^2} \right)$ $A =$ Querschnittsfläche der Leitung am Meßort	In der Kernströmung der Zuläufe
3	Kaltwassertemperatur t_{w2}	$M = 2,5 \left(\frac{\dot{m}_w}{\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}} \cdot 10^{-3} \right)^{0,5}$	Messungen im Auslaufbauwerk Anordnung im Teilflächenschwerpunkt bei Aufteilung des Fließquerschnittes in M flächengleiche Teilquerschnitte. Bei Wassertiefe $\geq 1,5$ m mindestens 2 Meßlinien übereinander
4	Temperatur der Umgebungsluft t_L	$M = \left(\frac{L_{LE}}{m} \right)^{0,3}$	Abstand vom Kühlturm: Außerhalb der Rezirkulation, mindestens aber Höhe des Lufteintritts
	Temperatur des feuchten Thermometers in der Umgebungsluft t_F	$L_{LE} =$ Länge des Lufteintritts	
5	Luftdruck p	$M = 1$	Beliebig
6	Windgeschwindigkeit w	$M = 1$	Siehe Abschnitt 3.2.6
7	Leistungsbedarf der Ventilatoren P	$M = 1$	Direkt am Antrieb oder in der Schaltwarte, gegebenenfalls mehrere Antriebe zusammengefaßt
8	Pumpförderhöhe H_p	$M = 1$	Siehe Abschnitt 3.2.4

4.3 Durchführung der Abnahmemessungen

4.3.1 Voraussetzungen

Für den Beginn der Abnahmemessungen müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Schriftliche Mitteilung des Lieferers an den Besteller über den abnahmebereiten Zustand der Anlage liegt vor.
- Alle erforderlichen Abnahmeunterlagen liegen vor.
- Abzweigende Rohrleitungen, deren Stoffströme nicht erfaßt werden können, sind, soweit vertretbar, blind geflanscht. Anderenfalls muß die Dichtheit der Absperrungen auf andere Weise nachgewiesen werden oder Strom und Zustand des hindurchgehenden Stoffes bestimmbar sein.

4.3.2 Probemessungen

Den mit der Durchführung der Abnahmemessungen Beauftragten ist vor Versuchsbeginn die Möglichkeit zu Probemessungen zu geben, bei denen die Meßgeräte überprüft und das Ablesepersonal unterwiesen werden können. Eine Probemessung kann nachträglich bei gegenseitigem Einverständnis als Abnahmemessung gelten, sofern alle für eine Abnahmemessung geltenden Bedingungen erfüllt waren.

4.3.3 Gültigkeitsgrenzen bei abweichenden Meßbedingungen

Können die Bedingungen des Gewährleistungspunktes (t_{LG} , ϕ_{LG} , z_G , $\dot{m}_{WG}$, bei Ventilator-Naßkühltürmen zusätzlich P_G) bei den Abnahmemessungen nicht eingestellt werden, dürfen die Abweichungen die in Tabelle 2 angegebenen Werte nicht überschreiten.

Tabelle 2. **Höchstzulässige Abweichungen von den Bedingungen des Gewährleistungspunktes während der Abnahmemessungen** (gilt nicht für Typprüfung)

Meßgröße		Abweichungen
Temperatur des feuchten Thermometers in der Umgebungsluft	t_F	$\pm 10 \text{ K}$ (aber $t_F \geq +4 \text{ °C}$)
Kühlzonenbreite	z	$\pm 20 \%$
Wassermassenstrom	$\dot{m}_W$	$\pm 10 \%$
Leistungsbedarf der Ventilatoren	P	
– bei Drehzahlregelung oder verstellbaren Schaufeln		$\pm 5 \%$
– bei nicht regelbaren Ventilatoren		$\pm 20 \%$

Die Abnahmemessungen sind bei niederschlagsfreier Witterung durchzuführen. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund darf innerhalb einer Meßperiode den Wert von 3 m/s nicht überschreiten, wobei Spitzen von mehr als 5 m/s nicht öfter als 10mal innerhalb einer Stunde auftreten dürfen. Sollten Vereinbarungen zwischen den Vertragspartnern an eine Windgeschwindigkeit in anderer Höhe H_x über Grund geknüpft werden, so ist nach folgender Gleichung umzurechnen:

$$w_x = w_{10} \left(\frac{H_x}{10 \text{ m}} \right)^{0,2} \quad (4)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die Temperatur der Umgebungsluft darf während der Abnahmemessungen weder von der Höhe des Lufteintritts bis zur einfachen noch von dieser bis zur doppelten Höhe des Kühlturms im Mittel um mehr als $1 \cdot 10^{-2} \text{ K}$ je m ansteigen.

Falls in Ausnahmefällen die Gültigkeitsgrenzen nicht eingehalten werden können, ist das Ergebnis der Abnahmemessung nur verbindlich, wenn sich die Vertragspartner über den zahlenmäßigen Einfluß der abweichenden Betriebs- und Witterungsbedingungen einigen.

4.3.4 Dauer der Abnahmemessungen

Die Dauer der Abnahmemessungen ist unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Lufttemperatur und der Lastschwankungen so festzulegen, daß eine befriedigend genaue Mittelwertbildung möglich ist. Falls der Gang der Lufttemperatur während der Meßzeit größer als $\pm 1 \text{ K/h}$ ist, müssen in dem zur Auswertung heranzuziehenden Zeitabschnitt Meßperioden mit steigender und fallender Lufttemperatur gleichgewichtig enthalten sein.

Die Abnahmemessungen sollten max. 24 h dauern. Hierbei gilt eine Zeit von einer Stunde als einzelne Meßperiode. Können Zeiträume wegen starker Änderungen der Meßgrößen nicht gewertet werden, so gilt die Meßzeit als ausreichend, wenn insgesamt 10 Meßperioden verwertbar sind.

Wenn die meteorologischen Verhältnisse und die thermische Last konstant sind, ist auch eine kürzere Meßzeit zulässig.

4.3.5 Häufigkeit der Ablesungen

Alle Messungen müssen in gleichbleibenden Zeitabständen vorgenommen werden, die umso länger gewählt werden können, je weniger sich die einzelnen Größen ändern.

Die Meßintervalle sollen bei den Meßgrößen, die größeren Schwankungen unterliegen, 15 min nicht überschreiten.

Luft- und Wassertemperatur sind nach Möglichkeit alle 10 min zu messen. Die Windgeschwindigkeit muß kontinuierlich gemessen werden, damit auch Böen registriert werden können.

5 Auswertung der Meßergebnisse und Gewährleistungsnachweis

5.1 Auswertung der Meßwerte

Nach Beendigung der Messung wird vom Kühlturbetreiber oder seinem Vertreter und dem Lieferer entschieden, welche Meßperioden zur endgültigen Auswertung herangezogen werden sollen. Unstetigkeiten in der Betriebsweise, kurzzeitige Schlechtwetterperioden, Ausfall von Meßgeräten oder ähnliche Vorkommnisse können dazu berechtigen, einzelne Meßperioden von der Auswertung auszuschließen.

Für jede zur Auswertung gelangende Periode wird zuerst der arithmetische Mittelwert jeder Meßgröße gebildet und in das Auswerteprotokoll eingetragen (siehe Anhang C). Danach wird unter Verwendung dieser Mittelwerte der Sollwert der Kaltwassertemperatur t_{W2, g_k} für jede Meßperiode dem Kennfeld entnommen.

5.2 Vergleich mit zugesicherten Werten

Für jede Meßperiode ist die Differenz zwischen dem Mittelwert der gemessenen Kaltwassertemperatur $\bar{t}_{W2, m_k}$ und dem Sollwert t_{W2, g_k}

$$\Delta t_k = \bar{t}_{W2, m_k} - t_{W2, g_k} \quad (5)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

zu bilden und daraus der arithmetische Mittelwert über alle Meßperioden zu berechnen:

$$\Delta t = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta t_k \quad (6)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Der Gewährleistungsnachweis ist uneingeschränkt erbracht, wenn $\Delta t \leq 0$. Er ist unter Inanspruchnahme der Meßunsicherheit erbracht, wenn:

$$0 < \Delta t_G \leq \delta t_{ges} = \delta t_{W2} + \delta t_{tol} \quad (7)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die bei Gewährleistungsbedingungen gültige Abweichung Δt_G wird nach Abschnitt 5.3 und die Unsicherheit δt_{W2} des Vergleichs zwischen gemessener und gewährleisteter Kaltwassertemperatur nach Abschnitt 6 ermittelt. Die Basistoleranz δt_{tol} berücksichtigt analytisch nicht erfaßte Einflüsse auf das Betriebsverhalten des Kühlturms (z. B. Einflüsse durch wechselnde Windrichtung bedingt durch nahestehende Gebäude, Einflüsse des Windprofils, Einflüsse durch Additive im Kühlwasser usw.) und wird mit 0,2 K beziffert.

5.3 Übertragung der Abweichung auf Gewährleistungsbedingungen

Da eine Überschreitung des Sollwertes t_{W2, g_k} innerhalb des Bereiches des Kennfeldes, in dem Abnahmemessungen durchgeführt werden dürfen (siehe Abschnitt 4.3.3), variabel ist, wird zur meßpunktunabhängigen Beurteilung die Differenz Δt_k für jede Meßperiode auf die Gewährleistungsbedingungen (t_{LG}, ϕ_{LG}, z_G , bei Ventilatorkühltürmen zusätzlich P_G) übertragen.

Die Übertragung wird mit Hilfe des Kennfeldes wie folgt vorgenommen:

Mit den Meßergebnissen für die k -te Meßperiode

- Temperatur der Umgebungsluft $\bar{t}_{Lk}$
- relative Luftfeuchte der Umgebungsluft $\bar{\phi}_{Lk}$
- Warmwassertemperatur $\bar{t}_{W1k}$
- Kaltwassertemperatur $\bar{t}_{W2, m_k}$

und bei Ventilatorkühltürmen

- Leistungsbedarf der Ventilatoren $\bar{P}_k$

läßt sich aus dem Kennfeld ein fiktiver Wassermassenstrom $\dot{m}_{WF}$ bestimmen, bei dem die Sollkaltwassertemperatur erreicht worden wäre. Mit diesem fiktiven

Massenstrom und den Gewährleistungsbedingungen (t_{LG}, ϕ_{LG}, z_G , bei Ventilatorkühltürmen zusätzlich P_G) wird eine fiktive Kaltwassertemperatur $t_{W2, G F_k}$ aus dem Kennfeld bestimmt. Die Differenz

$$\Delta t_{G_k} = t_{W2, G F_k} - t_{W2, g_k} \quad (8)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

entspricht der Abweichung der gemessenen Kaltwassertemperatur vom Sollwert bei Gewährleistungsbedingungen. Dabei ist t_{W2, g_k} dieser Sollwert. Er ergibt sich mit dem gemessenen Wassermassenstrom $\dot{m}_{Wk}$ und den Gewährleistungsbedingungen (t_{LG}, ϕ_{LG}, z_G , bei Ventilatorkühltürmen zusätzlich P_G) aus dem Kennfeld.

Die für Gewährleistungsbedingungen gültige Abweichung Δt_G erhält man als arithmetischen Mittelwert über alle Meßperioden:

$$\Delta t_G = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta t_{G_k} \quad (9)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Das hier aufgezeigte Übertragungsverfahren kann auch für eine meßpunktunabhängige Beurteilung einer Unterschreitung der zugesicherten Kaltwassertemperatur dienen, wenn z. B. zwischen den Vertragsparteien für diesen Fall ein Bonus vereinbart wurde.

6 Bestimmung der Unsicherheit des Ergebnisses

Die Unsicherheit δt_{W2} des Vergleichs zwischen gemessener und gewährleisteter Kaltwassertemperatur wird aus zwei Komponenten berechnet:

$$\delta t_{W2} = \sqrt{\delta t_{W2, S}^2 + \delta t_{W2, Z}^2} \quad (10)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die erste Komponente stellt die Unsicherheit des Vergleichs aufgrund nicht erfaßbarer systematischer Abweichungen der Meßergebnisse dar, die zweite berücksichtigt die Unsicherheit aufgrund zufälliger Abweichungen der Meßergebnisse und zeitlicher Schwankungen der Meßgrößen (siehe VDI 2048).

6.1 Bestimmung der Unsicherheit aufgrund nicht erfaßbarer systematischer Abweichungen der Meßergebnisse

Die Unsicherheit des Vergleichs aufgrund nicht erfaßbarer systematischer Abweichungen der Meßergebnisse ergibt sich aus der Unsicherheit der gewährleisteten Kaltwassertemperatur $\delta t_{W2, g}$ und der durch nicht erfaßbare systematische Abweichungen der Meßergebnisse bedingten Meßunsicherheit der Kaltwassertemperatur $\epsilon_{t_{W2}}$:

$$\delta t_{W2, S} = \sqrt{\delta t_{W2, g}^2 + \epsilon_{t_{W2}}^2} \quad (11)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die Unsicherheit der gewährleisteten Kaltwassertemperatur resultiert aus den durch nicht erfaßbare systematische Abweichungen der Meßergebnisse bedingten Unsicherheiten bei der Messung der Größen, die zur Bestimmung des gewährleisteten Wertes der Kaltwassertemperatur erforderlich sind. Die funktionale Abhängigkeit der gewährleisteten Kaltwassertemperatur von diesen Größen ist in Form des Kennfeldes dargestellt:

Naturzug-Naßkühlturm

$$F(t_L, \phi_L, \dot{m}_W, t_{W1}, t_{W2,g}) = 0 \quad (12)$$

Ventilator-Naßkühlturm

$$F(t_F, \dot{m}_W, P, t_{W1}, t_{W2,g}) = 0 \quad (13)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Das Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt für die Unsicherheit der gewährleisteten Kaltwassertemperatur mit den durch nicht erfaßbare systematische Abweichungen der Meßergebnisse bedingten Meßunsicherheiten ϵ_x der einzelnen Größen x :

Naturzug-Naßkühlturm

$$\delta t_{W2,g} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial t_L} \cdot \epsilon_{t_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial \phi_L} \cdot \epsilon_{\phi_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial \dot{m}_W} \cdot \epsilon_{\dot{m}_W}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial t_{W1}} \cdot \epsilon_{t_{W1}}\right)^2} \quad (14)$$

Ventilator-Naßkühlturm

$$\delta t_{W2,g} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial t_F} \cdot \epsilon_{t_F}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial \dot{m}_W} \cdot \epsilon_{\dot{m}_W}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial P} \cdot \epsilon_P\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{W2}}{\partial t_{W1}} \cdot \epsilon_{t_{W1}}\right)^2} \quad (15)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die in diesen Gleichungen vorkommenden Ableitungen lassen sich für den jeweiligen Betriebspunkt graphisch aus dem Kennfeld bestimmen, mit dem das Betriebsverhalten gewährleistet ist. Für einen Naturzug-Naßkühlturm erhält man z. B.

$$\frac{\partial t_{W2}}{\partial t_L} = \frac{t_{W2}(t_L + \Delta t_L, \phi_L, \dot{m}_W, t_{W1}) - t_{W2}(t_L - \Delta t_L, \phi_L, \dot{m}_W, t_{W1})}{2 \cdot \Delta t_L} \quad (16)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Während die Umgebungstemperatur t_L , der Wassermassenstrom $\dot{m}_W$ und die Warmwassertemperatur t_{W1} direkt gemessen werden, ergibt sich die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft ϕ_L aus Messungen mit dem Aspirations-Psychrometer

$$\phi_L = \phi_L(t_L, t_F) \quad (17)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Damit erhält man für die durch nicht erfaßbare systematische Abweichungen der Meßergebnisse bedingte Meßunsicherheit der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft

$$\epsilon_{\phi_L} = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi_L}{\partial t_L} \cdot \epsilon_{t_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_L}{\partial t_F} \cdot \epsilon_{t_F}\right)^2} \quad (18)$$

Die Ableitungen $\frac{\partial \phi_L}{\partial t_L}$ und $\frac{\partial \phi_L}{\partial t_F}$ lassen sich aus einem h_{1+x} , x -Diagramm graphisch bestimmen, mit Hilfe von Psychrometertafeln ermitteln oder analytisch berechnen,

$$\left(\frac{\partial \phi_L}{\partial t_L}\right)_{t_F} = -\frac{c_{pL}}{r_0} \cdot \frac{R_D}{R_L} \cdot \left(\frac{p}{p_s(t_L)} - 2 \cdot \phi_L\right) - \frac{r_G}{R_D \cdot T_L^2} \cdot \phi_L \quad (19)$$

$$\left(\frac{\partial \phi_L}{\partial t_F}\right)_{t_L} = \frac{c_{pL}}{r_0} \cdot \frac{R_D}{R_L} \cdot \left(\frac{p}{p_s(t_L)} - 2 \cdot \phi_L\right) + \frac{r_G}{R_D \cdot T_F^2} \cdot \frac{p_s(t_F)}{p_s(t_L)} \quad (20)$$

$$p_s(T) = p_s(T_{LG}) \cdot \exp\left(\frac{r_G}{R_D} \cdot \left(\frac{1}{T_{LG}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (21)$$

($p_s(T_{LG})$ und r_G sind für den Gewährleistungspunkt den VDI-Wasserdampftafeln zu entnehmen.)

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

6.2 Bestimmung der durch nicht erfaßbare systematische Abweichungen der Meßergebnisse bedingten Meßunsicherheit einer Meßgröße

6.2.1 Grundsätzliches

Die Meßunsicherheit einer Meßgröße aufgrund nicht erfaßbarer systematischer Abweichungen der Meßergebnisse beträgt (siehe VDI/VDE 2640 Blatt 4/10.83, Absatz 5):

$$\epsilon_x = \sqrt{\epsilon_{xM}^2 + \epsilon_{xV}^2 + \epsilon_{xW}^2} \quad (22)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Hierin bedeuten:

- ϵ_{xM} Systematische Komponente der Meßunsicherheit der Meßeinrichtung
- ϵ_{xV} Unsicherheit aufgrund der räumlichen Verteilung der Meßgröße
- ϵ_{xW} Unsicherheit aus der Geschwindigkeitsverteilung, die zu Fehlern bei der Mittelwertbildung führen kann, wenn mit der Geschwindigkeit gewichtet wird.

Als Maße für die systematische Komponente der Meßunsicherheit ϵ_{xM} einer Meßeinrichtung können beispielsweise die „Fehlergrenze“ eines Instruments, die „Grundtoleranz“ eines Meßverfahrens oder ein empirischer Pauschalwert dienen (siehe Abschnitt 6.2.2).

Die zusätzliche Unsicherheit aufgrund der räumlichen Verteilung der Meßgröße ϵ_{xV} ergibt sich nach VDI/VDE 2640 Blatt 4/10.83, Absatz 5:

$$\epsilon_{xV} = \frac{1}{2 \cdot M} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^M \max(\bar{x}_{k,i} - \bar{x}_{k, \text{Nachbar}})^2} \quad (23)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Werden bei der Berechnung des Mittelwertes einer Größe die einzelnen Meßwerte mit dem Verhältnis der örtlichen zur durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit gewichtet, so muß zusätzlich die Unsicherheit

$$\epsilon_{xW} = \frac{1}{M} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{w_i}{\bar{w}} \cdot (\bar{x}_{k,i} - \bar{x}_k) \cdot \frac{\epsilon_w}{w_i} \right)^2} \quad (24)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

berücksichtigt werden, die von der relativen Unsicherheit der Geschwindigkeitsmessung ϵ_w/w_i herrührt. Dabei ist

$$\bar{w} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M w_i \quad (25)$$

(Formelzeichen siehe Abschnitt 8)

Die Meßunsicherheiten ϵ_{xV} und, falls erforderlich, ϵ_{xW} sollen aus den für alle Meßorte gebildeten zeitlichen Mittelwerten der Meßgröße in einer für die gesamte Meßzeit charakteristischen Meßperiode ermittelt werden. Bei sehr stark schwankenden Meßbedingungen sollen mehrere charakteristische Meßperioden ausgesucht werden, für die dann mittlere Meßunsicherheiten bestimmt werden.

6.2.2 Systematische Komponente der Meßunsicherheit einzelner Meßeinrichtungen

6.2.2.1 Temperatur

Richtwert: $\epsilon_{tM} = 0,1 \text{ K}$

6.2.2.2 Wassermassenstrom

Tabelle 3. Richtwerte (siehe DIN 1944, VDI/VDE 2640 Blatt 2 und VDI/VDE 2040 Blatt 5)

Messung mit	ϵ_{mWM}
a) Zähler, bei einer Meßdauer $t \geq 50 \text{ s}$ und bei Verwendung – eines volumenmessenden Zählers im zugelassenen Bereich – eines Flügelradzählers im zugelassenen Bereich	1,0 % 1,5 %
b) Drosselmeßgerät (nach DIN 1952 und VDI 2040 Blatt 5)	1,0 bis 1,5 %
c) Hydrometrischen Flügeln in Rohrleitungen mit $D \geq 1500 \text{ mm}$ $800 \leq D < 1500 \text{ mm}$ in offenen Kanälen mit rechteckigem Querschnitt	1,0 % 1,2 % 1,5 %
d) Staurohren in Rohrleitungen mit $D \geq 800 \text{ mm}$ bei Schwankungen des Staudruckes – um weniger als 1 % des abgelesenen Wertes – bei stärkeren Schwankungen des Staudruckes	1,5 % 2,0 %
e) Meßüberfall - bei geeichten Überfällen - bei Benutzung einer Überfallformel: – für rechteckigen Überfall ohne Seiteneinschnürung – für rechteckigen Überfall mit Seiteneinschnürung	1,0 % 1,5 % 2,0 %
f) Induktivem Meßgerät bei Durchflußgeschwindigkeit $w \geq 1,5 \text{ m/s}$ $0,8 \text{ m/s} < w < 1,5 \text{ m/s}$	1,5 % 2,0 %

6.2.2.3 Antriebsleistung der Ventilatoren

Tabelle 4. Richtwerte (siehe DIN 1944)

Leistung	ϵ_{PM}
$P \leq 25 \text{ kW}$	1,5 %
$25 \text{ kW} < P \leq 250 \text{ kW}$	1,0 %
$P > 250 \text{ kW}$	0,8 %

6.3 Bestimmung der Unsicherheit aufgrund zufälliger Abweichungen der Meßergebnisse und zeitlicher Schwankungen der Meßgrößen

Zufällige Ereignisse haben zur Folge, daß die nach Abschnitt 5.2 berechneten Differenzen Δt_k zwischen gemessener und gewährleisteter Kaltwassertemperatur um ihren über alle Meßperioden gebildeten Mittelwert Δt schwanken. Maß für diese Schwankung ist die empirische Standardabweichung