

## 2 Meteorologische Grundlagen

M. Schmidt, aktualisiert und überarbeitet durch G. Mügge

### Formelzeichen

Formelzeichen	Erklärung	Maßeinheit/Wert	Bemerkung
$Gh_K$	Kühlgradstunden	K h	
$Gh_L$	Lüftungsgradstunden	K h	
$Gt_H$	Heizgradtage	K d	
$g$	lokale Erdbeschleunigung	$m/s^2$	
$\dot{H}$	Intensität der Himmelsstrahlung	$W/m^2$	
$\dot{H}_G$	Intensität der auf die Horizontalfläche gerichteten Himmelsstrahlung	$W/m^2$	
$h$	Enthalpie	kJ/kg	
$mt_B$	Befeuchtungsgrammtage	g d	
$p_b$	barometrischer Luftdruck	hPa	
$p_{D,a}$	Partialdruck des Außenluftwassergehalts	Pa	
$Q_H$	Heizwärmebedarf	kW	
$\dot{q}$	flächenbezogener Wärmestrom	$W/m^2$	
$\dot{S}_D$	Intensität der Diffusstrahlung	$W/m^2$	
$\dot{S}_G$	Intensität der Globalstrahlung	$W/m^2$	
$\dot{S}_I$	Intensität der Direktstrahlung	$W/m^2$	
$T$	thermodynamische Temperatur	K	
$T$	Trübungsfaktor		
$\theta_{AUL}$	Außenlufttemperatur	°C	
$\theta_{AUL,m}^d$	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur	°C	
$\theta_{AUL,max}^d$	Tagesmaximalwert der Außenlufttemperatur	°C	
$\theta_{f,a}$	Feuchtkugeltemperatur der Außenluft	°C	
$w_a$	Windgeschwindigkeit	m/s	
$x_a$	Wassergehalt der Außenluft	g/ kg tr. Luft	
$x_i$	Wassergehalt der Raumluft	g/ kg tr. Luft	
$Z_H$	Heiztage eines Jahres	d/a	
$Z_K$	Kühlstunden eines Jahres	h/a	
$z$	Höhe	m	
$\Delta p$	Druckänderung	Pa	
$\delta$	Sonnendeklination	°	

Formelzeichen	Erklärung	Maßeinheit/Wert	Bemerkung
$\varepsilon$	Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf eine geneigte Fläche	°	
$\theta_{\text{ZUL}}$	Zulufttemperatur	°C	
$\lambda$	Wellenlänge	nm	
$\varrho_a$	Dichte der Außenluft	kg/m <sup>3</sup>	
$t$	Zeit	s	

### Abkürzungen

<b>AM-Spektrum</b>	Air Mass-Spektrum
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>MEZ</b>	Mitteleuropäische Zeit
<b>MOZ</b>	Mittlere Ortszeit
<b>RLT</b>	Raumlufttechnisch (z. B. RLT-Anlage)
<b>TRY</b>	Test Reference Year
<b>WCP</b>	World Climate Programme
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization

## 2.1 Einleitung

Raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) sollen je nach Aufgabenstellung zu einem benötigten/gewünschten/geforderten Raumklima bei unterschiedlichsten äußeren Bedingungen beitragen. Die Bedingungen im Außenraum sind durch meteorologische Einflüsse geprägt, die sich durch meteorologische Elemente, auch Klimaelemente genannt, quantifizieren lassen.

Meteorologische Elemente sind

- barometrischer Luftdruck  $p_b$
- Windgeschwindigkeit  $w_a$
- Windrichtung
- Außenlufttemperatur  $\theta_{\text{AUL}}$
- Wassergehalt der Außenluft  $x_a$
- relative Außenluftfeuchte  $\varphi_a$
- Sonnenstrahlungsintensität  $\dot{S}$
- Sonnenscheindauer

- Bewölkung
- Niederschlag.

Die meteorologischen Elemente, insbesondere die Sonneneinstrahlung, die Außentemperatur und die Außenluftfeuchte bestimmen wesentlich die thermischen und hygrischen Lasten eines Raums, die durch die RLT-Anlage abgeführt werden sollen. Sie wirken sich über den Zustand der Außenluft auf die Luftaufbereitung einer RLT-Anlage aus.

Die Meteorologie als Wissenschaft von den physikalischen und chemischen Zuständen, Vorgängen und Gesetzmäßigkeiten in der Atmosphäre stellt Daten für den außenraumabhängigen Teil der Planung und des Betriebs von Gebäuden und deren gebäudetechnischen Anlagen bereit. Die meteorologischen Erscheinungen haben weitgehend stochastischen Charakter. Dennoch lassen sich Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchte und Sonnenstrahlungsintensität näherungsweise durch funktionalisierte Tages- und Jahresgänge beschreiben. Die große Variabilität des meteorologischen Geschehens muss für gebäudetechnische Berechnungen zu handhabbaren Daten der meteorologischen Elemente komprimiert werden. Dazu dienen statistische Methoden. Als statistisch gesichert gelten meteorologische Messreihen von mindestens zehn Jahren.

Das Messen und Sammeln meteorologischer Daten und ihr Aufbereiten für praktische Anwendungen ist in Deutschland Aufgabe des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Sitz in Offenbach/Main. In Ostdeutschland wurde diese Aufgabe bis 1990 vom Meteorologischen Dienst der DDR in Potsdam bearbeitet, dokumentiert in [2-2] bis [2-4]. Dort wurden auch meteorologische Daten aus dem Ausland zusammengetragen und für technische Anwendungen aufbereitet. Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland stehen inzwischen historische und aktuelle Messdaten für eine Vielzahl von Wetterstationen online und frei zugänglich zur Verfügung [2-1]. Weltweit sammelt die World Meteorological Organization (WMO) meteorologische Daten im Rahmen des World Climate Programme (WCP). Weitere Quellen für meteorologische Daten sind die Literaturstellen [2-5] und [2-6].

Die statistische Aufbereitung von Daten der meteorologischen Elemente für Berechnungen erfolgt mithilfe der Mittelwertklimatologie unter Berücksichtigung der Häufigkeit und der Dauer des Auftretens bestimmter klimatologischer Zustände. Praktisch nutzbare Ergebnisse sind

- Normwerte der Außenlufttemperatur und der relativen Außenluftfeuchte für die Auslegung von RLT- und anderen Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung,
- Zeitintegrale meteorologischer Größen wie Gradtage, Gradstunden und Grammstunden für Bedarfsberechnungen und für die Witterungsbereinigung von gemessenen Verbräuchen, um den Energieverbrauch unterschiedlicher Jahre oder unterschiedlicher Standorte vergleichen zu können sowie
- Testdaten aus Testreferenzjahren zum Vergleich und zur Simulation.

In der Meteorologie werden die komplexen Begriffe Wetter, Witterung und Klima verwendet. Ihre heiz- und klimatechnische Relevanz wird nachfolgend erläutert.

### 2.2 Wetter, Witterung, Klima

#### 2.2.1 Wetter

Das Wetter charakterisiert den Zustand und die Zustandsänderungen (ablaufende physikalische Vorgänge) der Atmosphäre überall auf der Erde in jedem Augenblick. Das Wetter ist damit eine Funktion der Zeit. Es beeinflusst den Betrieb der RLT-Anlagen und bestimmt so deren Betriebskosten.

Das Wettergeschehen spielt sich in der untersten Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre, ab. Die Mächtigkeit der Troposphäre variiert in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der geographischen Breite. Sie beträgt im Mittel an den Polen 8 km und am Äquator 16 km. Die Troposphäre beinhaltet 97 % der Luftmasse der Atmosphäre. Motor für das Wettergeschehen ist die Sonne, deren Energieeintrag wegen der Kugelgestalt der Erde vom Äquator zu den Polen hin abnimmt und sich auf den Land- und Meeresflächen aufgrund der jeweiligen Absorptionsbedingungen unterschiedlich auswirkt

In der globalen Energiebilanz überwiegt im Äquatorbereich die kurzwellige solare Einstrahlung und in den höheren geographischen Breiten die langwellige terrestrische Ausstrahlung. Diese ungleichmäßige Energiezufuhr führt zu einem globalen konvektiven Luftaustausch, bei dem in äquatorialen Breiten die erwärmte Luft in die Atmosphäre aufsteigt und sich in den Polarregionen wieder abgekühlt und zur Erdoberfläche herab sinkt. In der Folge kommt es auch zu horizontalen Ausgleichsströmungen. Wegen der geneigten Erdachse und der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne verändert sich die lokale Energiebilanz im Jahresverlauf. In der Troposphäre kann sich deshalb kein stationärer Strömungsablauf einstellen.

Der größte räumliche Gegensatz im Temperatur- und Strahlungsfeld ergibt sich über den mittleren geographischen Breiten zwischen 30 und 50°. Das führt zur Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten, die sehr wirksam warme Äquatorluft in Richtung Pole und polare Kaltluft in Richtung Äquator transportieren. So wird immer wieder über diesen mittleren geographischen Breiten der horizontale Enthalpieausgleich erfolgen. Das Wettergeschehen in diesen Breiten erhält damit einen turbulenten bzw. chaotischen Charakter, was die Vorhersage des Wetters – wichtig für den vorausschauenden Betrieb der RLT-Anlagen – schwierig macht und gegenwärtig nur für wenige Tage ermöglicht.

In den pol- und äquatornahen Gebieten dagegen ist der Wetterablauf sehr gleichmäßig und damit auch für längere Zeiträume gut voraussagbar.

#### 2.2.2 Witterung

Unter Witterung wird gleich bleibendes Wetter über einen Zeitraum von mehreren Tagen oder Wochen verstanden, z. B. eine kühle Sommer- oder eine Schönwetterperiode. Die Witterung ist weitgehend ortgebunden. Schönwetterperioden sind meist mit hohem Luftdruck verbunden. Im Sommer führt das zu einer starken Aufheizung der Gebäude und Innenstädte, was durch deren große Speichermassen auch nach dem Ende der Hochdruckwitterung noch nachwirkt. Im Winter führt das in mitteleuropäischen meerfernen Gebieten zu sehr kalten Nächten.

Typische Witterungen werden sowohl beim Festlegen von Bemessungswerten für RLT-Anlagen als auch bei der Bildung von normierten Jahresabläufen des Wetters berücksichtigt. Der Begriff Witterung leitet über vom zeitlich abhängigen Wetter zum örtlich fixierten Klima.

### 2.2.3 Klima

Das Klima gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre für größere Gebiete der Erde wieder. Das über lange Messreihen (ca. 10 bis 30 Jahre) beobachtete komplexe Wettergeschehen wird in für diese Gebiete typische Jahresverläufe umgesetzt. Damit ist das Klima der charakteristische periodische jährlich wiederkehrende Ablauf des Wetters eines Gebiets, also eine Funktion des Orts. Es sollte beim Gebäudeentwurf berücksichtigt werden, bestimmt die Auslegung von RLT-Anlagen und damit wesentlich deren Investitionskosten.

In Deutschland lassen sich deutlich Küstenklima, Mittelgebirgsklima, Tieflandklima und Klima der Oberelbe, der Saale und des Oberrheingraben unterscheiden. Durch das dichte Netz von Klimastationen und den dort durchgeführten langjährigen Messungen sind ausreichende Angaben zur Formulierung von Klimaten vorhanden. Sie erfassen aber noch nicht mikroklimatische Unterschiede, die sich zwischen ländlichem Raum, Stadtrandlage und Innenstadt ergeben.

Erste Rückschlüsse auf das Klima lassen sich mit Klimafaktoren ziehen. Solche Faktoren sind:

- geographische Breite,
- Höhenlage,
- Entfernung von großen Gewässern (Meere, große Binnenseen),
- Luv und Lee von Gebirgen.

Die geographische Breite ist der erste Anhaltswert für die klimatologische Zuordnung eines Gebiets auf der Erde. Wegen des Erdreliefs und der Verteilung von Meer und Landmasse reicht sie allein allerdings nicht für die Zuordnung des Klimas aus.

Großen Einfluss auf das Klima hat die Höhenlage. Selbst in den Tropen herrschen bei entsprechender Höhenlage niedrige Temperaturen. So ist der nahe des Äquators liegende Kilimandscharo (3° südl. Breite, 5895 m Höhe) ganzjährig von Schnee bedeckt. In Harare, der Hauptstadt Zimbabwes (17° 50' südl. Breite, 1490 m Höhe), kann z. B. wegen der Höhenlage trotz hoher Tagestemperaturen ein Bürogebäude ohne maschinelle Kühlung betrieben werden, da mit den relativ niedrigen nächtlichen Außenlufttemperaturen das Gebäude nachts ausgekühlt und in Bauwerksmassen ein „Kältespeicher“ für die Raumkühlung des folgenden warmen Tages angelegt werden kann.

Aber auch die Entfernung von großen Gewässern und die Lage im Luv und Lee von Gebirgen spielen bei der Charakterisierung des Klimas eine wesentliche Rolle. Dies zeigt der Vergleich der Klimata der Städte Mailand, Gagra am Schwarzen Meer und Almaty in Kasachstan, die auf dem gleichen Breitengrad liegen. Das Mailänder Klima unterscheidet sich nicht sehr von dem in Süddeutschland, während sich in Gagra, geschützt durch den Kaukasus, der die kalten Nordwinde zurückhält, eine subtropische Vegetation herausbilden konnte. In Almaty dagegen herrscht Kontinentalklima mit sehr kalten Wintern (kein schützendes Gebirge im Norden) und sehr warmen Sommern. Der Einfluss der Lage von Gebirgszügen bzw. der Landmassenverteilung zeigt sich auch im Vergleich winterlicher Großwetterlagen in Nordamerika und Mitteleuropa. Bedingt durch kontinentale Hochdrucklagen über den Rocky Mountains und Tiefdruck-

gebieten an der Ostküste Nordamerikas kommt es dort häufig zu sehr kalten Nordwinden aus der Polarregion. In Mitteleuropa dominieren dagegen auch im Winter eher maritime Westwinde mit im Vergleich zu Nordamerika deutlich milderen Temperaturen. Hier wirkt sich auch der warme Golfstrom aus.

Globale Klimagebiete können wie folgt charakterisiert werden:

- extrem kalt Grönland, nördliches Mittelsibirien,
- kalt nördliches Nordamerika, Sibirien,
- gemäßigt mittleres Nordamerika, nördliches China, Europa,
- trockenwarm Nordafrika, Kleinasien, Nordaustralien,
- extrem trockenwarm südliche Sahara, Mittelastralien,
- feuchtwarm nördliches Südamerika, mittleres Afrika,
- extrem feuchtwarm Golf von Persien,
- alternierend mittleres Südamerika.

Kenntnisse zu Klimagebieten werden im internationalen Projektgeschäft für die Planung von RLT- und anderen Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung, aber auch zur Auslegung von RLT-Anlagen für Fahrzeuge im interkontinentalen Verkehr benötigt.

Eine nationale Norm zu Klimadaten ist DIN 4710 [7,8]. Die aktuelle Ausgabe beschreibt die Korrelation der Außentemperatur und des Wasserdampfgehalts für 15 Klimastationen in Deutschland. Hierfür wurden Messdaten aus dem Zeitraum von 1961 bis 1990 zugrunde gelegt. Diese Datensammlung wurde durch die parallele Richtlinienreihe VDI 4710 mit gleicher Systematik ergänzt. Blatt 1 [2-9] gibt Daten für 20 außereuropäische Stationen, Blatt 4 [2-12] die für 122 europäische Stationen an. Blatt 3 [2-11] gibt dagegen für die gleichen Stationen wie in DIN 4710, aber für den Zeitraum 1991 bis 2005 aktualisierte Daten an. Diese Aktualisierung erschien notwendig, da sich gegenüber dem mittleren Klima für den Zeitraum 1961 bis 1990 gemäß DIN 4710 bereits deutliche Verschiebungen hin zu höheren Temperaturen ergeben haben.

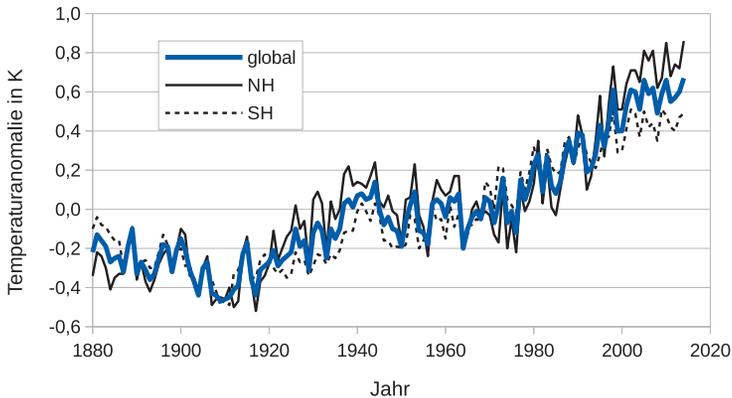
### 2.2.4 Klimaänderung

Das globale und regionale Klima unterliegt einer permanenten Veränderung. In geologischen Zeiträumen sind drastische Klimaänderungen aufgetreten, z. B. der Wechsel von Warm- und Eiszeiten in vorgeschichtlicher Zeit. Aber auch während des Spätmittelalters bis in die Neuzeit (ca. 1250–1850 n. Chr.) herrschten während der „kleinen Eiszeit“ in Europa deutlich niedrigere Außentemperaturen als heute (vgl. Wanner [2-13]).

Die Ursachen für die vergangenen Klimaänderungen sind vielfältig. Hier sind z. B. die schwankende Sonnenaktivität und andere astronomische Einflüsse (Milanković-Zyklen) zu nennen, die zu Änderungen der der Erde zugestrahlten Energie führten oder auch Einflüsse innerhalb der Atmosphäre (Wolkenbildung, Treibhausgase). Seit ca. Mitte des 19. Jahrhunderts ist ein Anstieg der globalen Mitteltemperaturen zu verzeichnen. Als ursächlich gilt der anthropogene Einfluss aufgrund vermehrter CO<sub>2</sub>-Emission infolge der massiven Verbrennung fossiler Energieträger nach Beginn der Industrialisierung und der Reduktion natürlicher CO<sub>2</sub>-Speicher (z. B. Abholzung von Regenwäldern). Die in aktuellen Forschungen prognostizierte Klimaänderung wird u. a. in regelmäßigen Berichten [2-14] des IPCC (International Panel on Climatic Change)

veröffentlicht. Durch internationale Verhandlungen zum Klimaschutz soll die globale Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von 2 K gegenüber den vorindustriellen Verhältnissen begrenzt werden. Für ungünstige Szenarien werden mittlere Erwärmungen bis zu 4 K erwartet.

Bild 2-1 zeigt beispielhaft die Abweichung globaler Mitteltemperaturen in den Jahren 1880 bis 2012 gegenüber dem Mittelwert für diesen Zeitraum.



**Bild 2-1:** Temperaturabweichungen der Jahre 1880 bis 2012 gegenüber dem Mittelwert für diesen Referenzzeitraum. NH: nördliche Hemisphäre, SH: Südliche Hemisphäre. Datenquelle [2-15]

Aufgrund der für die nächsten Jahrzehnte zu erwartenden Klimaänderung ergeben sich auch bereits praktische Konsequenzen für die Planung von RLT-Anlagen. Zur Berücksichtigung der Klimaänderung sind in Deutschland bereits Testreferenzjahre für zukünftige Klimaverhältnisse verfügbar (s.a. Abschnitt 2.5.3).

## 2.3 Technische Aufbereitung meteorologischer Daten

### 2.3.1 Mittelwertklimatologie

Die gesammelten meteorologischen Messwerte müssen für technische Zwecke aufbereitet werden. Deshalb werden für die meteorologischen Elemente in der Regel

- absolute Jahresextremwerte, die in einem Beobachtungszeitraum aufgetreten sind,
- Normalwerte der Jahresextreme als langjähriger Mittelwert dieser Jahresextreme,
- extreme Monatsmittelwerte,
- extreme Tagesmittelwerte des heißesten Sommer- und des kältesten Wintermonats und
- Normalwerte des Monatsmittels als der Mittelwert aller Tagesmittel eines Monats gebildet.

Soll eine RLT-Anlage zu jeder Zeit ein punktuell Raumklima einhalten, muss sie für den meteorologischen Extremzustand, also für die absoluten Extremwerte, die für die Betriebszeit

der Anlage zu erwarten sind, ausgelegt werden. Das hat sehr große und teure RLT-Anlagen zur Folge. In der Regel nimmt man in Kauf, dass bei wenigen extremen Außenklimazuständen der Raumklimazustand vorgegebene Schwellen geringfügig überschreitet. Klimatologische Aussagen für die technische Umsetzung basieren deshalb nicht auf absoluten Extremwerten, sondern überwiegend auf Tagesmittelwerten und auf Mittelwerten der täglichen Extremwerte. Die für die Auslegung der Anlagen zugrunde zu legenden Außenbedingungen richten sich nach der noch tolerierbaren Häufigkeit für eine bestimmte Abweichung der Raumzustände von den gewünschten Sollwerten. Darf eine Sollwertabweichung nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten, so folgt daraus eine großzügiger dimensionierte und damit teurere Anlage. Anhand von Häufigkeitsangaben (siehe Abschnitt 2.3.2) lässt sich zeigen, welche Konsequenzen ein solches Vorgehen für die Investitionskosten von RLT-Anlagen hat.

Die Tagesmittelwerte für die Außenlufttemperatur und die Außenluftfeuchte können mit der – beispielhaft für die Außenlufttemperatur geschriebenen – Gleichung

$$\theta_{\text{AUL},m}^d = \frac{\theta_{\text{AUL},7:30} + \theta_{\text{AUL},14:30} + 2 \theta_{\text{AUL},21:30}}{4} \quad (2-1)$$

ermittelt werden. Der Zahlenzeiger an der Temperatur gibt die Uhrzeit der Messung an. Für statistische Auswertungen werden seit dem 01.01.1986 die Messungen zu den Terminen 7.30 Uhr, 14.30 Uhr und 21.30 Uhr mitteleuropäischer Zeit (MEZ) durchgeführt. In modernen Messstationen wird der Tagesverlauf der Temperatur fortlaufend gemessen, sodass der Tagesmittelwert durch Integration gebildet werden kann. Vielen Auswertungen liegt der mit dem Tagesmittelwert gebildete Normalwert des Monatsmittels zugrunde. Es wird also für jeden Monat aus den Tagemittelwerten der Tage eines Monats ein Mittelwert gebildet, der von Extremwerten ziemlich weit entfernt ist.

### 2.3.2 Häufigkeitsangaben

Zum Darstellen der Häufigkeit des Auftretens von meteorologischen Zuständen können

- die Häufigkeitsverteilung,
- die Summenhäufigkeit und
- Häufigkeitszahlen

verwendet werden.

Bei der Häufigkeitsverteilung wird für ein meteorologisches Element eine Klassenbreite, z. B. bei der Außenlufttemperatur 1 °C, festgelegt und die Häufigkeiten, mit denen das jeweilige Element innerhalb der einzelnen Klassen auftritt, für den Beobachtungszeitraum ermittelt. Dargestellt werden können die absolute Häufigkeit des meteorologischen Elements in den jeweiligen Klassen (Histogramm) oder die Häufigkeitsdichte (sinnvoll bei kleiner Klassenbreite).

Als Beispiel zeigt Bild 2-2 die Häufigkeitsverteilung der Außenlufttemperatur für Potsdam.