Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

FAKULTÄT
FÜR MATHEMATIK, INFORMATIK
UND NATURWISSENSCHAFTEN

Merkblatt

Daten vom Wettermast Hamburg

Stand: 29. Mai 2026

Ingo Lange, Universität Hamburg, Meteorologie

Inhaltsverzeichnis

1. Beschreibung des Datenexports **2**
1.1. Aufbau der Dateinamen . . . 3
1.2. Werte . . . 4
1.2.1. Formatierung . . . 4
1.2.2. Lage der Mittelungsintervalle . . . 5
1.2.3. Aggregatfunktionen (Mittelwerte, Summen usw.) . . . 5
1.2.4. Plausibilitätskontrolle und Fehlerbereinigung . . . 8
1.3. Wichtige Messwert-Kürzel . . . 11

2. Besondere Datenformate **12**
2.1. Tagesdateien . . . 12
2.2. Wochendateien . . . 14
2.3. Hochaufgelöste Turbulenzdaten (20 Hz-Daten) . . . 14
2.3.1. USAT (mit externen Geräten) . . . 15
2.3.2. LI-7500 . . . 17
2.4. Turbulenzdaten als Tagesdateien (20 Hz-Daten) . . . 18

3. Nutzungbedingungen **20**

4. Zitierweise **20**

5. Belegexemplar **21**

6. Literatur **21**

7. Kontakt **21**

A. Berechnung abgeleiteter Größen **22**
A.1. Konstanten . . . 22
A.2. Luftdruck in den Stationshöhen . . . 22
A.3. Staudruck . . . 23
A.4. Dichte . . . 23

A.5. Massendichte . . . 23
A.6. Teilchenkonzentration . . . 23
A.7. Potenzielle Temperatur . . . 23
A.8. Äquivalenttemperatur . . . 24
A.9. Potenzielle Äquivalenttemperatur . . . 24
A.10. Feuchtemaße . . . 24
A.10.1. Sättigungsdampfdruck . . . 24
A.10.2. Taupunkt (aus Temperatur und relativer Feuchte) . . . 25
A.10.3. Wasserdampfdruck (aus Temperatur und relativer Feuchte) . . . 25
A.10.4. Relative Feuchte (aus Temperatur und Taupunkt) . . . 25
A.10.5. Absolute Feuchte (aus Wasserdampfdruck) . . . 25
A.10.6. Spezifische Feuchte (aus Wasserdampfdruck) . . . 26
A.10.7. Massenmischungsverhältnis (aus Wasserdampfdruck) . . . 26
A.10.8. Wasserdampfdruck (Psychrometer) . . . 26
A.10.9. Feuchttemperatur . . . 27
A.10.10. Virtuelle Temperatur . . . 27
A.11. Strahlungsgrößen . . . 27
A.11.1. Kurzwellige Strahlung von unten . . . 27
A.11.2. Langwellige Strahlung von unten . . . 27
A.11.3. Strahlungsbilanz . . . 28
A.11.4. Globalstrahlung bei wolkenlosen Bedingungen . . . 28
A.11.5. Sonnenscheindauer . . . 28
A.11.6. Direkte Sonnenstrahlung . . . 28
A.11.7. Diffuse Himmelsstrahlung . . . 29
A.11.8. Extinktionskoeffizient . . . 29
A.12. Ceilometer . . . 29
A.12.1. Gesamtbedeckungsgrad . . . 29
A.13. Bodenfeuchte . . . 29
A.13.1. Wassergehalt der Bodensäule . . . 29
A.14. Schneedetektion . . . 30
A.15. Turbulenzgrößen . . . 30
A.15.1. Turbulente kinetische Energie . . . 31
A.16. Thermo-physiologische Kenngrößen und Indizes . . . 31
A.16.1. Gefühlte Temperatur . . . 31
A.16.2. Windchill-Temperatur . . . 31
A.16.3. Hitze-Index (USA) . . . 31
A.16.4. Humidex (Kanada) . . . 32
A.16.5. UTCI . . . 33
A.17. Literatur zum Anhang . . . 33

1. Beschreibung des Datenexports

Der Export von Daten aus der Datenbank des Wettermast Hamburg erfolgt in der Regel in Form von einfachen Textdateien (ASCII-Dateien). Wichtige Informationen über Messgröße, Messhöhe, Mittelungsintervall und Zeitraum finden sich dabei im Dateinamen, während der Inhalt der

Dateien nur aus den eigentlichen Messwerten besteht. Für jede Messgröße wird eine eigene Datei erstellt.

Alle Zeitstempel für Daten des Wettermast Hamburg geben die Uhrzeit ganzjährig in MEZ (Mitteleuropäische Zeit) an, das ist UTC+1. Es erfolgt keine Umstellung auf Sommerzeit.

1.1. Aufbau der Dateinamen

Die Namen der Dateien werden beim Datenexport automatisch erzeugt und sind, mit wenigen Varianten, einheitlich aufgebaut (Abb. 1).

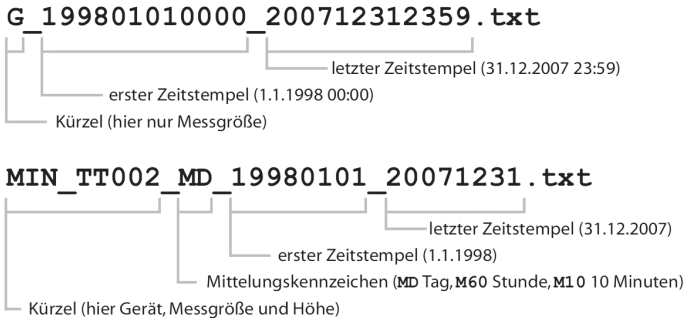

Abb. 1: Aufbau der Dateinamen

Der Dateiname beginnt immer mit dem **Kürzel** für die Messgröße. Im einfachsten Fall besteht das Kürzel nur aus einer kurzen Buchstabenfolge, z. B. `G` für Globalstrahlung oder `RR` für Regenrate.

Zusätzlich kann das Kürzel eine Angabe über die **Messhöhe** enthalten. Diese ist am Wettermast meistens, aber nicht zwingend, dreistellig, z. B. `TT002` für die Temperatur in 2 m Höhe oder `FF280` für die Windgeschwindigkeit in 280 m Höhe.

Bei einigen Größen beginnt das Kürzel mit einer Bezeichnung des **Gerätes**, um gleiche Messgrößen verschiedener Geräte zu unterscheiden, z. B. `MIN_G` für die mit MINERVA aufgezeichnete Globalstrahlung und `STR_G` für die mit der neuen Strahlungsstation aufgezeichnete Globalstrahlung.

Messgrößen, die aus dem „virtuellen“ Gerät `MASTER` stammen, haben kein Gerätekürzel. Diese Werte stammen eventuell aus unterschiedlichen Quellen, die im `MASTER` zu einheitlichen Zeitreihen zusammengesetzt werden, z. B. `FF010` für die aus alten und neuen Sonics zusammengesetzte Zeitreihe der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.

Als nächstes kann, nach einem Unterstrich, eines der Kennzeichen `M10`, `M60` oder `MD` folgen, das das **Mittelungsintervall** angibt. In diesem Fall liegen die Werte nicht in der ursprünglichen Auflösung vor (meistens 1 Minute, aber auch 5 oder 10 Minuten möglich), sondern als Mittelwerte über 10 Minuten (`M10`), 1 Stunde (`M60`) oder 1 Tag (`MD`). Statt des arithmetischen Mittels werden bei einzelnen Messgrößen auch entsprechend andere Arten der Zusammenfassung vorgenommen, z. B. bei der Niederschlagsmenge die Summe, bei den Böen das Maximum oder bei der Sonnenscheindetektion der häufigste Wert (s. u.).

Es folgt, nach einem Unterstrich, der **Zeitstempel des ersten Wertes** in der Zeitreihe. Das Format ist *jjjjmmdd* bei ganzen Tagen, sonst *jjjjmmddhhnn*. Die Angabe `201311181037` steht also für den 18. November 2013, 10.37 Uhr MEZ (UTC+1).

Als letztes folgt, nach einem Unterstrich, der **Zeitstempel des letzten Wertes** in der Zeitreihe. Das Format ist dasselbe wie beim ersten Wert.

Die Erweiterung des Dateinamen ist meistens `.txt`. Die Erweiterung `.csv` kenzeichnet ein Format, das einfach in deutsche Excel-Versionen eingelesen werden kann. Die Erweiterung `.mpd` steht für ein internes Format mit zusätzlichen Informationen in der Datei.

1.2. Werte

Der Inhalt der Dateien besteht aus einer chronologischen, äquidistanten Abfolge der Messwerte vom ersten bis zum letzten Zeitstempel.

1.2.1. Formatierung

Der **zeitliche Abstand** der Messwerte ergibt sich aus den im Dateinamen angegebenen Kennzeichen `M10` (10 Minuten), `M60` (1 Stunde) oder `MD` (1 Tag). Fehlt eine solche Angabe, handelt es sich um das ursprüngliche Aufzeichnungsintervall des Gerätes. Dieses beträgt meistens 1 Minute, bei einigen Geräten aber auch 5 oder 10 Minuten. Hierüber gibt die vollständige Kürzelliste Auskunft. Der zeitliche Abstand ergibt sich auch aus der Zeitdifferenz zwischen End- und Anfangszeitstempel geteilt durch die um eins verminderte Anzahl der Werte in der Datei:

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{n - 1}$$

Das **Zeilenende** wird, wie unter DOS oder Windows üblich, durch eine `CR-LF`-Sequenz gekennzeichnet. Für die Verwendung unter Linux, Unix oder MacOS muss eventuell eine Anpassung vorgenommen werden. Moderne Programme können dies jedoch auch automatisch erkennen.

Fehlende Werte sind in der Regel durch den Wert 99999 gekennzeichnet, in einigen Spezialformaten auch durch eine leere Zeile.

Das verwendete **Dezimaltrennzeichen** (Punkt oder Komma) hängt von der gewählten Option beim Export ab. Für wissenschaftliche Zwecke wird meistens der Punkt verwendet, für das einfache Einlesen z. B. in eine deutsche Excel-Version das Komma.

Als **Minus-Zeichen** wird wie üblich der Bindestrich verwendet.

Die Anzahl der **Nachkommastellen** richtet sich nach den Angaben in der Datenbank. Es werden immer alle verfügbaren Stellen ausgegeben. Nullen am Ende und gegebenenfalls das Dezimaltrennzeichen werden jedoch weggelassen.

Beispiel:

`12.83`	positiver Wert
`12.22`	
`-14.42`	negativer Wert
`-8.21`	
`11.9`	0 am Ende weggelassen
`14.51`	
`99999`	Fehlwertkennung
`99999`	
`13.74`	
`14`	00 am Ende und Dezimalzeichen weggelassen
`99999`	
`9.3`	keine Leerzeichen am Anfang, keine Ausrichtung

```
10.33
3.45E12
-5.5E-9
```
Exponentenschreibweise (selten) bei sehr großen oder kleinen Werten

1.2.2. Lage der Mittelungsintervalle

Ein Zeitstempel gibt immer einen Zeit*punkt* an, ein Messwert stammt jedoch in der Regel aus einem Zeit*intervall* und wurde z. B. als Mittelwert über viele Einzelmessungen berechnet. Es ist daher wichtig zu wissen, auf welches Intervall sich der Zeitstempel bezieht.

Abbildung 2 zeigt, wie sich die Mittelwerte bei der Aufzeichnung aus den Messungen und daraus dann die weiteren Mittelwerte über 10 Minuten, 1 Stunde und 1 Tag berechnen.

Bei den ursprünglich aufgezeichneten Messwerten, also Zeitreihen **ohne** die Mittelungskennzeichen `M10`, `M60` und `MD`, bezeichnet der Zeitstempel immer den Zeitpunkt der Aufzeichnung und damit das **Ende** des Aufzeichnungsintervalls. Werden die Werte jede Minute aufgezeichnet, basiert der Wert für 12.00 Uhr also auf Messungen in der Zeit von 11.59 Uhr bis 12.00 Uhr. Beträgt das Aufzeichnungsintervall 5 Minuten, so stammt der 12-Uhr-Wert aus der Zeit von 11.55 Uhr bis 12.00 Uhr.

Bei den nachträglich gemittelten oder anderweitig zusammengefassten Zeitreihen, die eines der Kennzeichen `M10`, `M60` oder `MD` im Dateinamen tragen, bezeichnet der Zeitstempel dagegen den Zeitstempel des **ersten** in die Mittelung eingeflossenen Aufzeichnungswertes. Der Wert für 12.00 Uhr aus einer Zeitreihe mit `M10` wurde also berechnet aus den ursprünglich aufgezeichneten Werten mit den Zeitstempeln von 12.00 Uhr bis zum letzten vor dem Beginn des nächsten Intervalls, in der Regel also aus den zehn Werten mit den Zeitstempeln 12.00 Uhr bis 12.09 Uhr. Daraus ergibt sich, dass die Messungen aus der Zeit von 11.59 Uhr bis 12.09 Uhr stammen. Bei Zeitreihen **mit** Mittelungskennzeichen liegt der Zeitstempel eines Wertes also **innerhalb** des Mittelungsintervalls. Die genaue Lage ergibt sich wie beschrieben aus dem zugrunde liegenden Aufzeichnungsintervall.

Etwas ungenauer formuliert, bezeichnet der Zeitstempel bei den gemittelten Zeitreihen also den **Anfang** des Mittelungszeitraums. Insbesondere ergibt sich hieraus, dass der Mittelwert eines Tages auch den Zeitstempel dieses Tages (mit Uhrzeit 0) trägt.

1.2.3. Aggregatfunktionen (Mittelwerte, Summen usw.)

Die meisten Messwerte werden bei der Erstellung der 10-Minuten-Zeitreihen arithmetisch gemittelt, so dass aus zehn Werten ein neuer Wert entsteht. Für die 1-Stunden- und 1-Tages-Zeitreihen gilt entsprechend dasselbe. Für bestimmte Messgrößen können jedoch auch andere Aggregatfunktionen zur Anwendung kommen. Welche Messgrößen wie zusammengefasst werden, ist im Zweifel der Dokumentation zu entnehmen oder bei uns nachzufragen. In der Regel ergibt sie sich aber aus der Art der Messgröße.

Mittel Das arithmetische Mittel nach der Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

wird für die meisten kontinuierlichen, reellwertigen, skalaren Messgrößen verwendet, z. B. Temperaturen, Feuchtemaße, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung usw. (zum

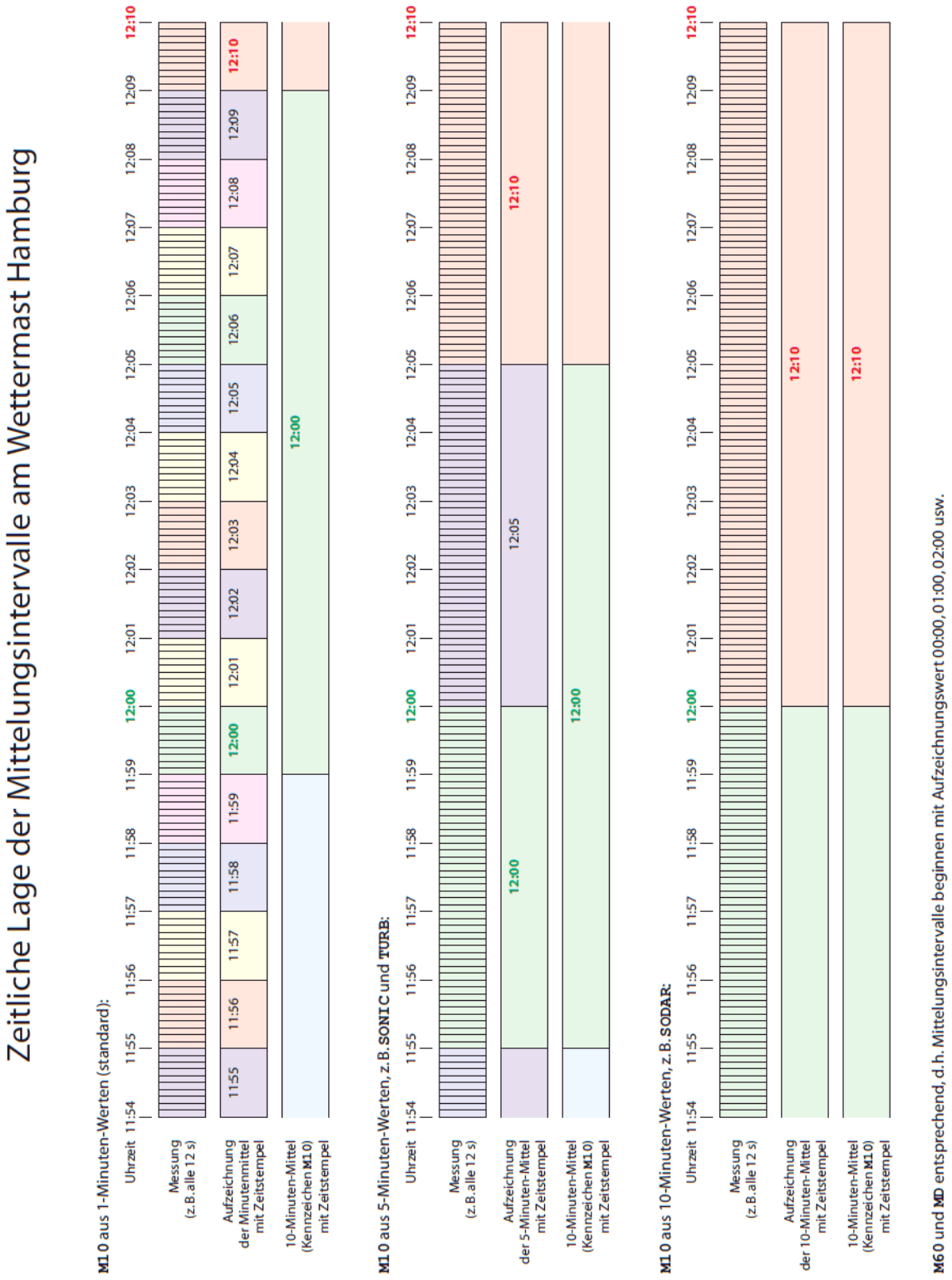

Abb. 2: Lage der Mittelungsintervalle

Mittelwert von Winkeln siehe unten). Fehlen im Intervall einzelne Werte x_i, so wird der Mittelwert aus den übrigen berechnet, im Extremfall aus dem einzig vorhandenen.

Maximum Das Maximum nach der Formel

$$x_{\max} \geq x_i \text{ für alle } i \in \{1, \ldots, n\}$$

wird vor allem für die Böen und die Berechnung von Tagesmaxima der Temperatur verwendet.

Minimum Das Minimum nach der Formel

$$x_{\min} \leq x_i \text{ für alle } i \in \{1, \ldots, n\}$$

wird vor allem für die Berechnung von Tagesminima der Temperatur verwendet.

Summe Die Summe nach der Formel

$$x_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{n} x_i$$

wird für die Berechnung der Niederschlagsmenge, aber auch der Niederschlags- und Sonnenscheindauer benutzt.

Häufigster Wert Die Berechnung des häufigsten Wertes eignet sich nur für diskrete Messgrößen. Sie wird z. B. für die Niederschlags- und Sonnenscheindetektionen benutzt, die für jeden Zeitpunkt als 0 oder 1 vorliegen. In der 10-Minuten-Zeitreihe zeigt eine 1 also an, dass in diesen zehn Minuten die 1 häufiger vorkommt als die 0 und dementsprechend „überwiegend“ Niederschlag bzw. Sonnenschein vorliegt. Sind zwei oder mehr Werte gleich häufig, wird der zuerst im Intervall vorkommende genommen.

Seltenster Wert Die Berechnung des seltensten Wertes eignet sich ebenfalls nur für diskrete Messgrößen. Sind zwei oder mehr Werte gleich selten, wird der erste im Intervall vorkommende genommen.

Winkelmittel Winkel oder Richtungen können nicht einfach arithmetisch gemittelt werden, weil 0° und 360° denselben Wert bezeichnen, im arithmetischen Mittel jedoch 180° ergeben würden. Stattdessen wird eine Aufspaltung in die Komponenten des Einheitsvektors nach

$$e_u = -\sin \alpha_i$$
$$e_v = -\cos \alpha_i$$

vorgenommen. Diese werden dann jeweils für sich zu $\bar{e}_u$ und $\bar{e}_v$ arithmetisch gemittelt und in einen mittleren Winkel zurückgerechnet:

$$\bar{\alpha} = \arctan2\left(-\bar{e}_u, -\bar{e}_v\right)$$

Das Winkelmittel wird vor allem für die Windrichtung verwendet.

Rechtswert Der Rechtswert von mehreren Winkeln ist der am weitesten rechts liegende. Dabei liegt ein Winkel „weiter rechts“ von einem anderen, wenn er im 180°-Sektor rechts von diesem Wert liegt. 260° ist also weiter rechts als 90°, 280° aber nicht. Die Suche beginnt mit dem ersten Wert im Intervall. Das Ergebnis ist in der Regel nur sinnvoll, wenn alle Winkel in einer ähnlichen Richtung liegen.

Linkswert Der Linkswert von mehreren Winkeln ist der am weitesten links liegende. Dabei liegt ein Winkel „weiter links“ von einem anderen, wenn er im 180°-Sektor links von diesem Wert liegt. 280° ist also weiter links als 90°, 260° aber nicht. Die Suche beginnt mit dem ersten Wert im Intervall. Das Ergebnis ist in der Regel nur sinnvoll, wenn alle Winkel in einer ähnlichen Richtung liegen.

RGB-Mittel Diese spezielle Mittelung wird verwendet für Farbwerte, die als ganze Zahlen im Format *bbggrr* vorliegen, wobei *bb* für die hexadezimale Darstellung des Blauwerts im Bereich von 00 bis FF steht (dezimal 0 bis 256), *gg* entsprechend für den Grünwert und *rr* für den Rotwert. Die drei Farbwerte werden je für sich arithmetisch gemittelt und wieder zu einem RGB-Wert zusammengefasst, der die „mittlere Farbe“ repräsentiert.

Standardabweichung Die Standardabweichung über ein längeres Intervall ist nicht der Mittelwert der Standardabweichungen aus den einzelnen Teilintervallen. Die Aggregatfunktion „Standardabweichung“ sorgt für eine korrekte Neuberechnung der Standardabweichung unter Verwendung der Standardabweichungen und Mittelwerte aus den Teilintervallen.

Kovarianz Die Kovarianz über ein längeres Intervall ist nicht der Mittelwert der Kovarianzen aus den einzelnen Teilintervallen. Die Aggregatfunktion „Kovarianz“ sorgt für eine korrekte Neuberechnung der Kovarianz unter Verwendung der Kovarianzen und Mittelwerte aus den Teilintervallen.

Neuberechnung Für viele abgeleitete Größen gilt, dass der Mittelwert dieser Größe nicht dem Wert entspricht, den man erhalten würde, wenn man die Größe aus den gemittelten Grundgrößen berechnen würde, d. h. es ist oft

$$\overline{f(x,y)} \neq f(\bar{x},\bar{y})\,.$$

Für die meisten Größen ist dieser Fehler jedoch vernachlässigbar, sind doch viele abgeleitete Größen mit anderer Instrumentierung selbst Grundgrößen, z. B. die verschiedenen Feuchtemaße. Für manche Größen gilt dies jedoch nicht, so dass es die spezielle Aggregatfunktion „Neuberechnung“ gibt. Bei dieser wird der aggregierte Wert aus den gemittelten Grundgrößen neu berechnet, also $f(\bar{x},\bar{y})$ genommen. Insbesondere ist dies für die turbulenten Flüsse sinnvoll.

Für alle Arten der Aggregation gilt, dass das Ergebnis leer ist (d. h. Fehlwertkennung), wenn das Intervall keinen Wert enthält. Auch die Summe ist in diesem Fall nicht 0, sondern leer.

1.2.4. Plausibilitätskontrolle und Fehlerbereinigung

Die meisten Zeitreihen werden beim Import in die Datenbank einer Plausibilitätskontrolle unterzogen, um offensichtliche Fehlmessungen aus den Daten zu eliminieren und so die Datenqualität zu erhöhen bzw. den späteren Aufwand zur Datenbereinigung beim Nutzer zu minimieren. Die Fehlerbereinigung erfolgt in drei Stufen:

1. Werte außerhalb eines gültigen Bereichs werden gelöscht. Die Grenzen sind meist großzügig gewählt, z. B. −40 °C bis 60 °C für die Lufttemperatur oder 0 bis 100 m/s beim Wind.
2. Eine Reihe auf die jeweilige Messgröße abgestimmter Bereinigungsverfahren wird durchgeführt (s. u.).

3. Bei der Sichtung der Daten als fehlerhaft erkannte Abschnitte werden in einer Liste manuell erfasst und so aus den Zeitreihen entfernt oder durch den richtigen Wert ersetzt (z. B. 0 beim Regenmesser, wenn es während einer Störung nicht geregnet hat). Diese Liste, die oft auch einen Grund für die Störung nennt (z. B. Lüfter defekt oder Sensor verschmutzt), ist auf Anfrage erhältlich.

Es gibt folgende Fehlerbereinigungen, die **je nach Messgröße** angewandt werden (siehe Liste weiter unten):

Isolierte Werte entfernen Steht ein Wert allein, liegt also direkt vor ihm und direkt nach ihm eine Lücke, so wird dieser Wert ebenfalls gelöscht. Es muss davon ausgegangen werden, dass hier keine ordentliche Messung vorliegt.

Fehlende Einzelwerte interpolieren Fehlt in einer Lücke nur ein einziger Wert, so wird dieser auf den Mittelwert der beiden Werte direkt davor und danach gesetzt.

Sprung nach Lücke entfernen Wenn nach einer Lücke die ersten beiden Werte eine gewisse Differenz aufweisen, wird der erste Wert gelöscht. Dies kann bei einigen Aufzeichnungssystemen vorkommen, die beim Neustart falsche Mittelwerte für die erste, unvollständige Minute liefern.

Sprung vor Lücke entfernen Analog zum vorigen Absatz.

Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen Ändert sich ein Messwert eine gewisse Zeit nicht, muss von einem Fehler ausgegangen werden. Ausnahmen sind bei einzelnen Messgrößen möglich, z. B. kann die Feuchte längere Zeit konstant bei hohen Werten nahe 100 % liegen. Auch der Wert 0 kann ein gültiger Dauerwert sein, z. B. bei der Windgeschwindigkeit mit mechanischen Anemometern.

Ausreißer entfernen Weist ein einzelner Wert eine gewisse Differenz zum vorigen und folgenden Wert auf, so wird er entfernt. Dies gilt für positive und negative Abweichungen.

Extremwerte löschen Werte oberhalb einer oberen Grenze und unterhalb einer unteren Grenze werden gelöscht.

Deckelung Werte oberhalb einer oberen Grenze werden auf die obere Grenze gesetzt, entsprechendes gilt für die untere Grenze.

Tag löschen, wenn Schwankung zu klein Wenn die Werte einer Größe während eines Tages nur innerhalb eines kleinen Intervalls schwanken, wird der gesamte Tag gelöscht.

Ausreißer in langwelliger Strahlung Eine spezielle Funktion erkennt, löscht und interpoliert viele Ausreißer in der langwelligen Strahlung durch aufsitzende Vögel.

Ausreißer in Oberflächentemperatur Eine spezielle Funktion erkennt, löscht und interpoliert Ausreißer in der Oberflächentemperatur. Dabei dürfen die vier umgebenden Werte (die zwei vorangehenden und die zwei folgenden) eine gewisse Schwankung nicht überschreiten und der Wert selbst muss größer sein das Maximum dieser vier Werte plus einer gewissenen Differenz.

Für die wichtigsten Messgrößen werden konkret folgende Bereinigungen durchgeführt, und zwar nacheinander in der aufgeführten Reihenfolge (Stand: 29. Mai 2015)

Lufttemperatur

1. Sprung nach Lücke entfernen: $> 0{,}5$ K

2. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 30
3. Ausreißer entfernen: > 2 K
4. Isolierte Werte entfernen
5. Einzelwerte interpolieren
6. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $< 0{,}1$ K

Oberflächentemperatur

1. Sprung nach Lücke entfernen: $> 0{,}5$ K
2. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 30
3. Ausreißer entfernen: > 10 K
4. Ausreißer in Oberflächentemperatur: $\sigma_4 < 1{,}5$ K, $\Delta > 5$ K
5. Ausreißer in Oberflächentemperatur: $\sigma_4 < 2$ K, $\Delta > 7$ K
6. Isolierte Werte entfernen
7. Einzelwerte interpolieren
8. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $< 0{,}1$ K

Erdbodentemperatur

1. Ausreißer entfernen: > 5 K
2. Isolierte Werte entfernen
3. Einzelwerte interpolieren
4. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $< 0{,}05$ K

Relative Feuchte

1. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 200, wenn < 95 %
2. Ausreißer entfernen: $> 7{,}5$ %-Punkte
3. Isolierte Werte entfernen
4. Einzelwerte interpolieren
5. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $< 0{,}1$ %-Punkte
6. Deckelung: unten 0 %, oben 100 %

Windgeschwindigkeit

1. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 10, außer Wert 0
2. Ausreißer entfernen: > 30 m/s
3. Isolierte Werte entfernen
4. Einzelwerte interpolieren
5. Deckelung: unten 0 m/s [1]
6. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $< 0{,}5$ m/s

Windrichtung

1. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 6
2. Isolierte Werte entfernen
3. Einzelwerte interpolieren (unter Berücksichtigung, dass $0° = 360°$)
4. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: $2°$

Globalstrahlung

1. Isolierte Werte entfernen

[1] Geringe negative Werte sind bei Anemometern mit Generator möglich, wenn sie sich bei sehr schwachem Wind rückwärts drehen.

2. Einzelwerte interpolieren
3. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: 0,1 W/m^2
4. Deckelung: unten 0 W/m^2 [2]

Langwellige Strahlung

1. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 10
2. Isolierte Werte entfernen
3. Ausreißer in langwelliger Strahlung entfernen
4. Einzelwerte interpolieren
5. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: 0,1 W/m^2

Luftdruck

1. Aufeinander folgende gleiche Werte entfernen: ab 50
2. Ausreißer entfernen: > 2 hPa
3. Isolierte Werte entfernen
4. Einzelwerte interpolieren
5. Tag löschen, wenn Schwankung zu klein: 0,1 hPa

Niederschlagsdetektor

1. Isolierte Werte entfernen (eine 1 umgeben von je zwei 0, also 00100)
2. Einzelwerte interpolieren
3. Isolierte Werte entfernen (normal)

Andere kontinuierliche Messgrößen Hierunter fallen fast alle Messgrößen, die sich nicht mit einem der oben aufgeführten speziellen Verfahren behandeln lassen.

1. Isolierte Werte entfernen
2. Einzelwerte interpolieren

1.3. Wichtige Messwert-Kürzel

Die folgende Aufstellung zeigt die wichtigsten Kürzel am Wettermast Hamburg. Eine aktuelle und vollständige Liste aller Kürzel, auch mit Höhenangaben, und ist auf Anfrage erhältlich.

`P` Luftdruck (hPa, Mittelwert)
`TT` Lufttemperatur (°C, Mittelwert)
`TP` Potentielle Temperatur (°C, Mittelwert)
`TG` Gefühlte Temperatur (°C, Mittelwert)
`TS` Erdbodenoberflächentemperatur (°C, Mittelwert)
`TE` Erdbodentemperatur (°C, Mittelwert)
`RH` Relative Feuchte (%, Mittelwert)
`AH` Absolute Feuchte (g/m^3, Mittelwert)
`SH` Spezifische Feuchte (g/kg, Mittelwert)
`MH` Massenmischungsverhältnis (g/kg, Mittelwert)
`VP` Wasserdampfdruck (hPa, Mittelwert)
`DT` Taupunkt (°C, Mittelwert)
`FF` Windgeschwindigkeit (m/s, Mittelwert)

[2] Geringe negative Werte in der Nacht werden auf Null gesetzt.

FB	Maximale Windgeschwindigkeit (Böen) (m/s, Maximum)
DD	Windrichtung (°, Mittelwert)
G	Kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung) (W/m^2, Mittelwert)
R	Kurzwellige Ausstrahlung (W/m^2, Mittelwert)
L	Langwellige Einstrahlung (W/m^2, Mittelwert)
E	Langwellige Ausstrahlung (W/m^2, Mittelwert)
GSM	Sonnenscheindauer (min, Summe)
RR	Niederschlagsmenge (mm, Summe)
RDM	Niederschlagsdauer (min, Summe)
NC	Bedeckungsgrad (Achtel, Mittelwert)

2. Besondere Datenformate

In der Regel geben wir Wettermast-Daten als ASCII-Export aus der Datenbank heraus, wie oben beschrieben. Im Einzelfall können jedoch auch andere Formate günstiger sein oder Daten benötigt werden, die gar nicht in der Datenbank enthalten sind. Die wichtigsten dieser alternativen oder externen Datenformate sind im Folgenden ausgeführt.

2.1. Tagesdateien

Alle regulären Messdaten, die meist im 1-Minuten-Abstand, teilweise auch alle 10 Minuten aufgezeichnet werden, liegen zunächst und vor Ort auf den Aufzeichnungsrechnern in gerätespezifischen Dateien vor, die tageweise angelegt sind. Aus diesen Aufzeichnungsdateien werden für die Wettermast-Datenbank zunächst einheitliche *Tagesdateien* erstellt, auf die unter Umständen zugegriffen werden kann. Da diese Tagesdateien in der Verarbeitungskette weiter zu Wochendateien (s. u.) zusammengefasst und selbst nicht mehr benötigt werden, sind sie jedoch nicht immer verfügbar. Sie können jedoch jederzeit neu erzeugt werden.

Die Tagesdateien gibt es nur für das ursprüngliche Aufzeichnungsintervall des Geräts, also meist als 1-Minuten-Werte. Es gibt sie *nicht* als 10-Minuten-Werte, Stunden- oder Tageswerte.

Die Tagesdateien sind organisiert in Jahresordnern, darin Monatsordner und darin Tagesordner mit den einzelnen Dateien, die das Gerät als Dateinamen tragen. Der Pfad zu einer Tagesdateien lautet also allgemein

.*jjjj**mm**tt**ggg*.txt .

Dabei ist *ggg* das Kürzel für das Gerät.

Die Tagesdateien beginnen immer um 0 Uhr und enden mit dem letzten Wert vor 24 Uhr (am Wettermast immer MEZ).

Die folgende Beschreibung der Tagesdateien gilt sinngemäß auch für die **Wochendateien**, die jeweils montags um 0 Uhr beginnen. Weitere Informationen zu den Wochendateien im nächsten Abschnitt.

Der Inhalt der Dateien besteht aus einem Kopf mit einigen Angaben zu den Daten und den Daten selbst:

```
#=1440
$FirstDateTime=27.05.2015 00:00:00
$JSDBaseDateTime=27.03.1995 00:00:00
$FirstJSD=636422400
$TimeLagSec=60
$DefaultValue=99999
$Names=DATE;TIME;STR_GU;STR_G;STR_GT;STR_LT;STR_LU;STR_LI;STR_TSU;STR_TS;STR_TSHU;...
27.05.2015;00:00;-0.033;0;11.04;10.83;-0.75;-89.84;4.672;6.72;0;2.421;2.483;279.87;...
27.05.2015;00:01;-0.032;0;11.02;10.82;-0.74;-89.6;4.647;6.47;0;2.421;2.484;279.62;...
27.05.2015;00:02;-0.032;0;11.01;10.8;-0.74;-89.31;4.688;6.88;0;2.421;2.48;280.03;...
:
27.05.2015;12:34;2.927;;;;;-42.21;5.379;;0;;;286.94;3.58;-0.75;0.842;0.689;0.68;...
:
27.05.2015;15:10;;;;;;;;;;;;;;;;;;;...
:
27.05.2015;23:56;-0.023;0;13.57;13.35;-0.29;-34.8;5.007;10.07;0;2.42;2.476;283.22;...
27.05.2015;23:57;-0.022;0;13.57;13.36;-0.28;-34.23;5.008;10.08;0;2.419;2.481;283.23;...
27.05.2015;23:58;-0.022;0;13.56;13.36;-0.28;-34.31;5.013;10.13;0;2.417;2.482;283.28;...
27.05.2015;23:59;-0.022;0;13.56;13.36;-0.3;-35.99;5.018;10.18;0;2.417;2.482;283.33;...
```

In der ersten Zeile, die mit `#=` beginnt, steht die Anzahl der in dieser Datei enthaltenen Datenzeilen, bei Minutenwerten also immer der Wert 1440. Das System legt immer vollständige Tagesdateien von 0 bis vor 24 Uhr an, auch wenn Datensätze fehlen.

Die Zeilen, die mit `$` beginnen, werden hauptsächlich von der Datenbank selbst genutzt. Wichtig für andere Nutzer dieser Dateien ist nur die Zeile mit der Bezeichnung `$Names`, in der die Messwertkürzel stehen. Im Einzelnen bedeuten

FirstDateTime Angabe des ersten Zeitstempels in dieser Datei

JSDBaseDateTime Basisdatum und -uhrzeit für julianische Sekundenzählung

FirstJSD Julianische Sekunden des ersten Zeitstempels in dieser Datei

TimeLagSec Zeitlicher Abstand der Datensätze in Sekunden

DefaultValue Standardwert für fehlende Daten (nicht in den Dateien selbst, sondern nach dem Einlesen)

Names Mit Semikolon getrennt die Kürzel der Messgrößen, die in dieser Datei enthalten sind

Es folgen die eigentlichen Daten. Sie beginnen in der ersten Zeile, die nicht mit einem `#` oder `$` beginnt. Jede Zeile enthält die Daten für einen Zeitpunkt, die Zeilen sind mit Semikolon in Felder (Spalten) getrennt. Die Angabe von Datum und Uhrzeit in den ersten beiden Feldern (`DATE` und `TIME`) ist obligatorisch. Es folgen die eigentlichen Messwerte gemäß den weiteren Kürzeln.

Fehlt ein Wert, so bleibt das Feld leer (`;;`) wie im Beispiel bei 12.34 Uhr. Fehlen alle Werte zu einer Zeit, erscheint die Zeile trotzdem mit dem Zeitstempel, aber ansonsten nur leeren Feldern wie im Beispiel um 15.10 Uhr.

Die Tagesdateien des laufenden Tages („von heute“) werden nach dieser Festlegung immer vollständig mit allen Zeitstempeln von 0 bis vor 24 Uhr angelegt. Im Tagesverlauf füllen sich nach und nach die Zeilen mit den eintreffenden Werten. In einigen Dateien gibt es neben Messwerten auch rein berechnete Größen, z. B. der Sonnenstand oder Konstanten. Diese werden sofort bis Tagesende eingetragen, also auch schon für die Zukunft.

2.2. Wochendateien

Die eigentliche Wettermast-Datenbank besteht aus *Wochendateien*. Diese werden aus den im vorigen Abschnitt beschriebenen Tagesdateien erzeugt und sind immer verfügbar (während die Tagesdateien durchaus gelöscht werden können, da sie selbst nicht mehr benötigt, aber jederzeit wieder aus den Aufzeichnungsdateien erzeugt werden können).

Wochendateien gibt es für das ursprüngliche Aufzeichnungsintervall, also in der Regel 1 Minute, und für die weiteren Mittelungsintervalle 10 Minuten, 1 Stunde und 1 Tag.

Die Wochendateien sind organisiert in Jahresordnern und darin Wochenordner mit den einzelnen Dateien, die das Gerät und evtl. das Mittelungsintervall als Dateinamen tragen. Der Pfad zu einer Wochendateien lautet also allgemein

`.\`*`jjjj`*`\`*`ww`*`\`*`ggg`*`[_Mx].txt`.

Dabei ist *ggg* das Kürzel für das Gerät wie bei den Tagesdateien. Für die Mittelwerte über 10 Minuten, 1 Stunde und 1 Tag folgt, nach einem Unterstrich, noch die entsprechende Kennung `M10`, `M60` oder `MD` (s. a. Seite 3).

ww ist die Kalenderwoche. Die Wochenzählung erfolgt dabei nach ISO 8601 (ehem. DIN 1355-1). Die erste Woche eines Jahres ist die, in die der erste Donnerstag des Jahres fällt. Ein Jahr kann 52 oder 53 Wochen haben.

Die Wochendateien beginnen immer montags um 0 Uhr und enden am darauf folgenden Sonntag mit dem letzten Wert vor 24 Uhr (am Wettermast immer MEZ).

Die Wochendateien sehen genauso aus wie die Tagesdateien, die im vorigen Abschnitt beschrieben werden. Zu beachten ist, dass die Kürzel in der `$Names`-Zeile evtl. eine Mittelungskennung enthalten.

2.3. Hochaufgelöste Turbulenzdaten (20 Hz-Daten)

Sowohl die 3D-Ultraschall-Anemometer (Metek uSonic-3 Scientific, vormals USA-1) als auch die H_2O-/CO_2-Sensoren (LI-COR LI-7500) liefern 20 Datensätze pro Sekunde. In die Wettermast-Datenbank fließen hiervon nur 1-Minuten-Werte, die dann z. B. als mittlere Windgeschwindigkeit, Böen oder Wärmefluss verfügbar sind. Die 20 Hz-Daten selbst werden zusätzlich in 6-Stunden-Dateien[3] gespeichert.

Dabei sind die analogen Spannungsausgänge des Licors direkt an die entsprechenden Eingänge des USAT angeschlossen. Der USAT-Datensatz enthält daher automatisch auch die H_2O- und CO_2-Konzentrationen (allerdings in der Einheit V). Der Licor-Datensatz, der die digital vom Licor empfangenen Werte enthält, wird daher meist nicht benötigt. Dieser enthält als wichtigsten Wert den Grad der Fensterverschmutzung (AGC), allerdings kann dieser auch als 1-Minuten-Wert aus der Datenbank exportiert werden.

Die Dateien beginnen in der Regel alle 6 Stunden ab 0 Uhr (Systemzeit des Aufzeichnungsrechners), bei Unterbrechungen auch dazwischen. Der Dateiname gibt Auskunft über den Beginn der Datei und das darin enthaltene Gerät:

`20140824-120000-UTCp1-u050-COM13.raw`

[3] Bei anderen Stationen sind auch 1-Stunden-Dateien möglich.

Dabei ist `20140824-120000-UTCp1` der Zeitstempel, zu dem die Datei angelegt wurde, hier der 24. 8. 2014 um 12 Uhr UTC+1. Neben `UTCp`*h* sind auch die Angaben `UTC` und `UTCm`*h* möglich, wobei *h* für die Abweichung von UTC in Stunden steht. `u050` steht für das Gerät, hier das USAT in 50 m Höhe. Die entsprechende Licor-Datei wäre `l050`. Am Ende steht `COM13` für die serielle Schnittstelle, an der das Gerät angeschlossen war.

Die Dateien sind Textdateien (ASCII-Dateien). Die wichtigsten allgemeinen Eigenschaften sind:

1. Zellen, die mit einem **%-Zeichen** beginnen, sind **Kommentare**. Diese sind jedoch automatisch erstellt und können durchaus nützliche Informationen enthalten, die ausgewertet werden sollten, insbesondere:
   a) Die erste Zeile, beginnend mit „`% Aufzeichnung gestartet:`“, enthält bei älteren Versionen den Zeitstempel des Anlegens der Datei, bei neueren Versionen genauer den Zeitstempel des ersten Datensatzes. Letzteres ist erkennbar an dem Zusatz „`(erster Datensatz)`“ am Ende der Zeile. In diesem Fall kann der hier angegebene Zeitpunkt vom Dateinamen abweichen, wenn beim Starten der Aufzeichnung das Gerät noch keine Daten gesendet hat.
   b) Eine der letzten Zeilen, beginnend mit „`% Aufzeichnung beendet:`“, enthält bei älteren Versionen den Zeitstempel des Schließens der Datei, bei neueren Versionen genauer den Zeitstempel des letztes Datensatzes. Letzteres ist erkennbar an dem Zusatz „`(letzter Datensatz)`“ am Ende der Zeile. Dies gilt auch dann, wenn das Gerät aufgehört hat zu senden und die Datei erst später geschlossen wird.
2. Jede echte Zeile enthält einen **Datensatz**, der wiederum durch das Trennzeichen **Semikolon** in Felder bzw. **Werte** unterteilt ist.
3. Die erste echte Zeile enthält die **Spaltenköpfe**, also eine Liste von Kürzeln, die angeben, welche Größen in den entsprechenden Spalten enthalten sind.
4. Das **Dezimaltrennzeichen** in diesen Dateien ist das **Komma**.
5. Fehlt ein Wert, bleibt das Feld leer (;;)
6. Es gibt neben den Anfangs- und Endzeitstempeln **keine Zeitstempel** für die einzelnen Datensätze. Die Messfrequenz ist in der Regel bekannt und kann mit der Rate der wirklich empfangenen Datensätze, die in einer Kommentarzeile am Ende steht, verglichen werden. Weichen Messfrequenz und Empfangsrate zu stark voneinander ab, sollte die Datei verworfen werden. Dies ist meist verursacht durch zwischenzeitliche Ausfälle des Geräts oder Korrekturen der Rechnerzeit.

2.3.1. USAT (mit externen Geräten)

Ein Auszug aus den Daten eines USAT mit angeschlossenen analogen Geräten (z. B. Pt100, HMP45, Licor, Kippwaage, . . .):

```
% Aufzeichnung gestartet: 24.08.2014 12:00:00,078 UTC+1 (erster Datensatz)
S;X;Y;Z;T;V;D;E1;E2;E3;E4;E5;E6;E7;E8;C1;C2
0;-5,96;8,26;0,27;14,32;10,19;305,8;1,462;1,443;0,6424;0,0003;0,0134;3,6731;...
0;-5,74;8,27;-0,04;14,45;10,07;304,8;1,458;1,444;0,6421;0;0,0333;3,7082;4,9792;...
:
```

```
:
0;1,82;7,92;-0,28;15,48;8,13;257,1;1,516;1,455;0,6052;-0,0003;1,828;1,5784;...
0;2,06;8,42;0,52;15,82;8,67;256,3;1,516;1,457;0,6052;-0,0003;1,8283;1,5778;...
% Aufzeichnung beendet (Dateiwechsel)
% Aufzeichnung beendet: 24.08.2014 18:00:00,031 UTC+1 (letzter Datensatz)
% Anzahl Datensätze: 432061, Anzahl Zeilen: 432061, Dauer: 21599,953 s, Rate: 20,0029 Hz
% Fehlerhafte Daten: 10 (0,0023 %)
```

Bei Ultraschall-Anemometern ohne Anschlussmöglichkeit analoger Geräte entfallen die Spalten E1 bis E8 sowie C1 und C2.

Die Spalten V und D sind optional.

Die Spalten haben folgende Bedeutung:

S Status des Ultraschall-Datensatzes (nur Wind und Temperatur, ohne externe Größen)

0: Datensatz in Ordnung
1: empfangene Daten fehlerhaft, voriger Datensatz wird wiederholt
2: Datensatz fehlerhaft

X Windkomponente x-Richtung (m/s)

Y Windkomponente y-Richtung (m/s)

Z Windkomponente z-Richtung (m/s)

T Temperatur T_v (°C)

V Horizontale Windgeschwindigkeit (aus x und y) (m/s)

D Windrichtung (aus x und y) (°)

E1, E2 Temperaturen von bis zu 2 angeschlossenen Pt100-Thermometern (10 °C)

E3–E8 Spannungssignale von bis zu 6 angeschlossenen Geräten (V)

C1, C2 Werte der beiden Zählereingänge

Die Spannungen aus den Werten E3 bis E8 müssen üblicherweise in den eigentlichen Messwert umgerechnet werden.

Am Wettermast Hamburg sind alle Anemometer so ausgerichtet, dass x nach Norden (v) zeigt, y nach Osten (u) und z nach oben (w)[4]. T_v ist die vom Anemometer hochfrequent gemessene Schalltemperatur, die nahezu der virtuellen Temperatur entspricht. Diese muss für die Berechnung der Wärmeflüsse verwendet werden.

Speziell am Wettermast Hamburg sind die analogen Eingänge der Anemometer folgendermaßen belegt. Die Anemometer in 10 und 50 m Höhe verarbeiten auch einige Geräte aus 2 bzw. 70 Höhe.

E1 Pt100-Thermometer im Ofenrohr (bei zwei Pt100 die untere Höhe)

Berechnung der Temperatur in °C: $T_1 = 10 \times \mathrm{E1}$.

E2 Zweites Pt100-Thermometer im Ofenrohr (die obere Höhe)

Berechnung der Temperatur in °C: $T_2 = 10 \times \mathrm{E2}$.

[4]Das geräteeigene Koordinatensystem mit x, y und z bildet ein Linkssystem.

E3 Feuchtesensor HMP 45 (bei zweien die untere Höhe)

Berechnung der relativen Feuchte in %: RH = 100 × E3.

E4 Zweiter Feuchtesensor HMP 45 (obere Höhe)

Berechnung der relativen Feuchte in %: $\mathrm{RH}_{\mathrm{oben}} = 100 \times \mathrm{E4}$.

E5 H_2O-Konzentration (Licor)

Berechnung der Konzentration in mmol/m^3: $C_{\mathrm{H_2O}} = 240 \times \mathrm{E5}$.

E6 CO_2-Konzentration (Licor)

Berechnung der Konzentration in mmol/m^3: $C_{\mathrm{CO_2}} = 4{,}8 \times \mathrm{E6} + 8$.

C1 Drehzahlüberwachung des Ofenrohrlüfters (bei zwei Lüftern die untere Höhe)

C2 Drehzahlüberwachung des Ofenrohrlüfters (obere Höhe)

An anderen Standorten kann die Berechnung der Konzentrationen aus den Licor-Spannungen abweichend sein. Die Umrechnung ist jedoch immer linear in der Form $C = aU + b$. Die Parameter a und b bzw. deren Umkehrung zur Berechnung von U aus C sind im Licor selbst gespeichert und können mit der Licor-Software ausgelesen (und auch geändert) werden. Man beachte, dass bei einigen Installationen Spannungsverstärker zwischen Licor und USAT geschaltet sind, die z. B aus den 0 bis 5 V des Licors −10 bis +10 V machen, um den Eingangsbereich des USATs voll auszunutzen (siehe gesondertes Memo zum Licor-Betrieb).

2.3.2. LI-7500

Ein Auszug aus den digitalen 20 Hz-Daten eines LI-7500:

```
% Aufzeichnung gestartet: 24.08.2014 12:00:00,078 UTC+1
S;B01;B02;B03;B04;B05;B06;B07;B08;B09;B10;B11;B12;B13;B14
0;606008845;15;0,133;25,2891;-0,0014;18,471;16,15;101;0;1,4612;0;75;0;0
0;606008853;15;0,1232;24,3161;-0,0067;-3,923;16,16;101;0;1,4622;0;75;0;0
0;606008861;15;0,1303;25,1416;-0,0084;-33,344;16,15;101;0;1,4612;0;75;0;0
0;606008868;15;0,1272;26,7729;-0,0074;-25,78;16,16;101;0;1,4648;0;75;0;0
0;606008876;15;0,128;26,7832;-0,0028;-15,912;16,13;101;0;1,4632;0;75;0;0
0;606008883;15;0,128;26,1701;-0,0023;-26,882;16,13;101;0;1,4632;0;81,25;0;0
:
:
0;609304688;15;0,0876;15,5816;0,0804;439,248;18,31;101;0;1,5091;0;50;0;0
0;609304696;15;0,0878;15,5889;0,0804;439,314;18,28;101;0;1,5091;0;50;0;0
0;609304703;15;0,0877;15,5895;0,0803;439,095;18,28;101;0;1,5127;0;50;0;0
% Aufzeichnung beendet (Dateiwechsel)
% Aufzeichnung beendet: 24.08.2014 18:00:00,031 UTC+1
% Anzahl Datensätze: 432000, Anzahl Zeilen: 432000, Dauer: 21599,953 s, Rate: 20,0000 Hz
% Fehlerhafte Daten: 0 (0,0000 %)
```

Die Spalten haben folgende Bedeutung:

S Status (immer 0)

B01 Laufender Index (das Licor misst schneller, als die digitale Übertragung erfolgt, daher nicht fortlaufend)

B02 Diagnose-Byte (nur Sync, PLL, Detector, Chopper)

B03 CO_2-Absorption (1)

B04 CO_2-Konzentration (mmol/m^3)

B05 H_2O-Absorption (1)

B06 H_2O-Konzentration (mmol/m^3)

B07 Temperatur (°C)

B08 Luftdruck (kPa)

B09 Zusätzlicher Eingangswert AUX

B10 Detektorkühlerspannung (V)

B11 unbenutzt

B12 Fensterverschmutzung AGC (%)

Weitere Informationen können dem Handbuch des LI-7500 entnommen werden.

2.4. Turbulenzdaten als Tagesdateien (20 Hz-Daten)

Zur einfacheren Nutzung können aus den 6-stündigen Einzelwertdateien ohne Zeitstempel Tagesdateien mit Zeitstempel erzeugt werden, die ebenfalls die 20 Hz-Daten der USATs enthalten. Diese sind jedoch nicht auf geringen Speicherbedarf optimiert und daher etwa doppelt so groß. Bei der Erstellung dieser Tagesdateien werden einige grundlegende Plausibiltätsprüfungen vorgenommen:

- Beträgt die Datenrate in einer Quelldatei nicht relativ genau 20 Hz, so wird diese Quelldatei nicht eingelesen. Die erlaubten Abweichungen können individuell festgelegt werden, z. B. 19,997 bis 20,01 Hz. Damit werden Zeiträume mit Geräteausfällen (Datenrate kleiner 20 Hz) oder größere Korrekturen der Systemzeit (Datenrate kleiner, aber auch größer als 20 Hz möglich) herausgefiltert.
- Quelldateien, die abrupt und ohne Schlusszeilen enden, z. B. durch einen Rechnerabsturz, müssen manuell zugelassen oder ausgeschlossen werden. Bei einem Rechnerabsturz spricht nichts gegen eine Zulassung der Daten, da die Aufzeichnung bis dahin in Ordnung ist.

Der Zeitstempel des ersten Wertes in einer Quelldatei ergibt sich aus der in jeder Quelldatei angegebenen Startzeit. Der Zeitstempel der folgenden Werte ergibt sich dann jeweils aus der laufenden Nummer und der bekannten Messfrequenz. Bei einer Frequenz von 20 Hz erhöht sich der Zeitstempel also in Schritten von 0,05 s.

Auf diese Weise werden die Einzelwerte in die Tagesdatei einsortiert. Die zu erwartende Anzahl Werte pro 6-Stunden-Datei beträgt $6 \times 60 \times 60 \times 20 = 432\,000$. Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der internen Geräteuhr, bei Abweichungen oder geringen Korrekturen der Rechneruhr, bei Verzögerungen beim Abschließen der Dateien usw. enthalten die meisten 6-Stunden-Dateien jedoch nicht exakt diese Anzahl von Werten. Dabei wird folgendermaßen verfahren:

- Enthält eine 6-Stunden-Datei *mehr* als die zu erwartende Anzahl Werte, so werden diese trotzdem streng nach der theoretischen Frequenz einsortiert. Die überzähligen Werte werden ggf. von den ersten Werten der folgenden 6-Stunden-Datei überschrieben.

- Enthält eine 6-Stunden-Datei *weniger* als die zu erwartende Anzahl Werte, so endet die Reihe vor Ablauf der 6 Stunden. Der Rest bleibt leer. Die Werte der nächsten 6-Stunden-Datei beginnen gemäß deren eigener Startzeit.

Auf diese Weise ergeben sich qualitativ hochwertige Tagesdateien mit den gemessenen Einzelwerten. Lediglich an den Stellen, wo zwei Quelldateien aneinanderstoßen, kann es zu geringen zeitlichen Anpassungen, d. h. zu Lücken oder Überschneidungen kommen.

```
DATE;TIME;TIMEZONE;VERSION;LAT;LON;ALT;SN;IDX;S;X;Y;Z;T;AZI;UU;VV;WW;FF;DD
24.01.2017;00:00:00.00;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;0;0;0.96;0.37;-0.36;
24.01.2017;00:00:00.05;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1;0;0.97;0.4;-0.42;
24.01.2017;00:00:00.10;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;2;0;0.94;0.39;-0.39;
24.01.2017;00:00:00.15;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;3;0;0.88;0.44;-0.28;
24.01.2017;00:00:00.20;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;4;;;;;;;;;;
24.01.2017;00:00:00.25;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;5;0;0.97;0.53;-0.28;
24.01.2017;00:00:00.30;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;6;0;0.93;0.52;-0.27;
24.01.2017;00:00:00.35;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;7;0;0.84;0.48;-0.26;
24.01.2017;00:00:00.40;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;8;0;0.78;0.38;-0.2;
24.01.2017;00:00:00.45;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;9;0;0.76;0.57;-0.26;
...
24.01.2017;23:59:59.75;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1727995;0;0.83;-0.08;
24.01.2017;23:59:59.80;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1727996;0;0.73;-0.09;
24.01.2017;23:59:59.85;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1727997;0;0.74;-0.13;
24.01.2017;23:59:59.90;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1727998;0;0.76;-0.06;
24.01.2017;23:59:59.95;UTC+1;USATRAW-1;53.5406;10.0053;6.5;Delta;1727999;0;0.73;-0.05;
```

Die Spalten `S`, `X`, `Y`, `Z` und `T`, optional auch `V` und `D` sowie `E1` bis `E8` und `C1` und `C2` enthalten dieselben Werte wie die gleichnamigen Spalten in den Quelldateien (s. o.). Neu hinzu kommen in jedem Fall die ersten neun Spalten:

DATE Das Datum des Zeitstempels im Format *dd.mm.jjjj*.

TIME Die Uhrzeit des Zeitstempels, hier aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung mit zwei Nachkommastellen bei den Sekunden, also im Format *hh:mm:ss.zz*.

TIMEZONE Enthält die Zeitdifferenz zwischen der angegebenen Uhrzeit und UTC im Format `UTC+`*h* für positive Differenzen, `UTC-`*h* für negative Differenzen oder `UTC` für UTC selbst. Insbesondere ist bei einer Aufzeichnung in MEZ der Wert `UTC+1` und bei MESZ `UTC+2`.

VERSION Enthält die Versionsbezeichnung des Datensatzes.

LAT Vorgesehen für die geografische Breite der Station, sofern verfügbar.

LON Vorgesehen für die geografische Länge der Station, sofern verfügbar.

ALT Vorgesehen für die Höhe Station, sofern verfügbar.

SN Vorgesehen für eine Seriennummer oder Stationsbezeichnung.

IDX Laufende Nummer des Datensatzes beginnend mit 0.

Da das Gerätesystem mit den Koordinaten x und y nicht den üblichen Koordinaten u und v entspricht, erst recht nicht, wenn die Nordmarkierung des Geräts nicht nach Norden zeigt, können den Tagesdateien bei der Erstellung noch folgende Spalten hinzugefügt werden:

AZI Richtung der Nordmarkierung bzw. der x-Richtung des Geräts.

UU u-Komponente der Windgeschwindigkeit (West-Ost-Komponente).

VV v-Komponente der Windgeschwindigkeit (Süd-Nord-Komponente).

WW Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit (identisch mit Spalte `Z`).

FF Horizontale Windgeschwindigkeit (identisch mit Spalte `V`, sofern vorhanden).

DD Windrichtung (0° = Wind aus Nord, 90° = Ost).

3. Nutzungbedingungen

Daten vom Wettermast Hamburg dürfen von den Nutzern nur für den vereinbarten Zweck verwendet werden. Die Daten oder Teile davon dürfen nicht an Dritte weitergegeben werden. Insbesondere ist die kommerzielle Nutzung der Daten nur mit unserer Einwilligung gestattet. Unter kommerzieller Nutzung ist in der Regel alles zu zählen, was nicht unter den Begriff „Forschung und Lehre“ an Universitäten, Hochschulen, öffentlichen Forschungseinrichtungen, Schulen usw. fällt.

Produkte (insbesondere Abbildungen und Tabellen), die mit den Daten vom Wettermast Hamburg erstellt werden, dürfen selbstverständlich veröffentlicht werden. Bedingung ist auch hier, dass mit den Produkten keine kommerziellen Interessen verbunden sind, sofern keine anderslautende Vereinbarung getroffen wurde.

Die Einwilligung zur Nutzung von gegen Gebühr überlassenen Daten gilt mit vollständiger Bezahlung der Rechnung als erteilt.

4. Zitierweise

Werden Daten in wissenschaftlichen Arbeiten verwendet, so ist in der Regel eine Angabe über die Herkunft erforderlich. Für die Daten vom Wettermast Hamburg kann dies auf unterschiedliche Weise geschehen, es obliegt den Autoren, sich für eine adäquate Variante zu entscheiden.

Danksagung Dies ist die schwächste Art des Quellennachweises, da die Danksagung meist nicht als Teil der eigentlichen Arbeit angesehen wird. Möglich wäre eine Formulierung wie „Wir danken der Meteorologie an der Universität Hamburg für die Bereitstellung von Wind- und Temperaturdaten vom Wettermast Hamburg für den Zeitraum . . . “.

Bildunterschrift Werden Daten nur in einer oder wenigen Abbildungen gezeigt, so kann ein Quellennachweis in der Bildunterschrift erfolgen: „Temperaturdaten aus 10 und 50 m Höhe vom Wettermast Hamburg der Meteorologie an der Universität Hamburg.“

Fußnoten Gehen Daten nur an wenigen Stellen in die Arbeit ein, z. B. als Vergleichswert im Text, so kann ein Quellennachweis in einer Fußnote erfolgen: „Vergleichsdaten vom Wettermast Hamburg der Meteorologie an der Universität Hamburg.“

Literaturverzeichnis Ein Eintrag in das Literaturverzeichnis ist die stärkste Form des Quellennachweises. Dieser kann als persönliche Mitteilung ausgeführt werden, anpasst an die Zitierweise der übrigen Literatur:

Lange, I., 2014: Wind- und Temperaturdaten vom Wettermast Hamburg der Meteorologie an der Universität Hamburg für den Zeitraum 2010 bis 2012. – Persönliche Mitteilung vom 22. 1. 2014.

Quellenverzeichnis Besitzt die Arbeit ein besonderes Verzeichnis für Quellen- und Herkunftsangaben, so kann dort ein entsprechender Eintrag platziert werde.

Es sollte ausschließlich die Bezeichnung Wettermast Hamburg (engl.: Hamburg Weather Mast) verwendet werden (und nicht etwa Hamburger Wettermast, Wettermast Billwerder, NDR-Sendemast, ZMAW-Mast oder dergleichen). Die Verkürzung auf Wettermast ist unkritisch, wenn dies dem Sprachstil dienlich ist und eine Verwechslung ausgeschlossen ist.

5. Belegexemplar

Wir würden uns freuen, von veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten, in die unsere Daten eingeflossen sind, eine Kopie z. B. als PDF-Datei zu erhalten oder einen Link zu einer allgemein zugänglichen Quelle im Internet.

6. Literatur

Weitere Informationen über den Wettermast Hamburg finden Sie in folgenden Veröffentlichungen:

Brümmer, B., I. Lange, H. Konow (2012): *Atmospheric boundary layer measurements at the 280 m high Hamburg weather mast 1995–2011: mean annual and diurnal cycles*, Meteorol. Z., Vol. **21**, No. 4, pp. 319–335 (open access).

Konow, H. M. (2015): *Tall Wind Profiles in Heteorogeneous Terrain*, Dissertation, FB Geowissenschaften, Universität Hamburg, 107 S.

Jacob, M. (2013): *Beeinflussung von Windmessungen an einem Rohrmast durch die Maststruktur*, Bachelorarbeit, MIN-Fakultät, Universität Hamburg, 35 S.

Sowie in zahlreichen Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten. Eine aktuelle Liste findet sich unter wettermast.uni-hamburg.de/Literatur.htm.

7. Kontakt

Der Wettermast Hamburg wird betrieben von der Arbeitsgruppe „Atmosphärenmessungen und Prozessmodellierung“ der Disziplin Meteorologie an der Universität Hamburg. Datenanfragen richten Sie bitte an

Prof. Dr. Felix Ament
Universität Hamburg – Meteorologie
Bundesstraße 55
20146 Hamburg

Tel.: 040 2395-2-3597
E-Mail: felix.ament@uni-hamburg.de

Für Fragen zur Aufzeichnung und Aufbereitung der Daten, zu Datenformaten usw. steht Ihnen zur Verfügung

Ingo Lange

Tel.: 040 2395-2-7810
E-Mail: ingo.lange@uni-hamburg.de

Wettermast Hamburg im Internet:

wettermast.uni-hamburg.de

meteorologie.hamburg in den Netzwerken:

Instagram, Threads, YouTube, Facebook

A. Berechnung abgeleiteter Größen

Die Wettermast-Datenbank enthält neben den direkten Messgrößen auch abgeleitete Größen, z. B. den Luftdruck in den einzelnen Höhen, die potenzielle Temperatur, diverse Feuchtemaße, die gefühlte Temperatur uvm. Wie genau diese Größen berechnet werden, können Sie bei uns erfragen. Im Folgenden sind die wichtigsten Berechnungen aufgeführt:

A.1. Konstanten

Folgende Werte werden in den Berechnungen benutzt:

$g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$	(Erdbeschleunigung)
$R = 8{,}3144598\ \mathrm{J/(mol\,K)}$	(Universelle Gaskonstante)
$R_\mathrm{L} = 287{,}05\ \mathrm{J/(kg\,K)}$	(Gaskonstante für trockene Luft)
$R_\mathrm{W} = 461{,}45\ \mathrm{J/(kg\,K)}$	(Gaskonstante für Wasserdampf)
$c_p = 1005{,}0\ \mathrm{J/(kg\,K)}$	(Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck)
$I_0 = 1367{,}0\ \mathrm{W/m^2}$	(Solarkonstante)
$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2\,K^4)}$	(Stefan-Boltzmann-Konstante)

A.2. Luftdruck in den Stationshöhen

Gemessen wird der Luftdruck p_2 in der Höhe $z_2 = 2$ m (über Grund ≈ über NN). Der Druck p_h in der Stationshöhe z_h berechnet sich dann nach der barometrischen Höhenformel zu

$$p_h = p_2 \exp \frac{-(z_h - z_2)g}{R_\mathrm{L}\bar{T}}\,.$$

Dabei ist $\bar{T}$ der Mittelwert aus den Temperaturen in z_2 und z_h, also

$$\bar{T} = \frac{T_2 + T_h}{2}\,.$$

Der Druck in der Höhe wird also nur berechnet, wenn neben dem Luftdruck am Boden auch die Lufttemperaturen in 2 m Höhe und in der oberen Höhe vorliegen.

Die Luftfeuchtigkeit wird vernachlässigt. Ansonsten müsste in der barometrischen Höhenformel die virtuelle Temperatur verwendet werden, zu deren Berechnung der Luftdruck aber bereits benötigt würde (Abschnitt A.10.10 bzw. A.10.6).

A.3. Staudruck

Der Staudruck (auch: kinetischer oder dynamischer Druck oder Windlast) berechnet sich aus

$$p_\mathrm{k} = \frac{1}{2}\rho V^2$$

mit der Luftdichte ρ (Abschnitt A.4) und der Windgeschwindigkeit V.

A.4. Dichte

Die Luftdichte ρ als eigene Größe in der Datenbank wird berechnet mit der Zustandsgleichung für ideale Gase aus dem Luftdruck p und der virtuellen Temperatur T_v, jeweils in Stationshöhe:

$$\rho = \frac{p}{R_\mathrm{L} T_\mathrm{v}}$$

Für die Berechnung von p siehe Abschnitt A.2 und von T_v siehe Abschnitt A.10.10.

A.5. Massendichte

Die Massendichte ρ_x (insbesondere von H_2O und CO_2 beim LI-7500) berechnet sich aus der gemessenen Teilchendichte τ_x zu

$$\rho_x = \frac{\tau_x}{M_x}$$

mit der Molmasse M_x des Stoffes x.

A.6. Teilchenkonzentration

Die Teilchenkonzentration c_x (Verhältnis der Stoffmenge eines bestimmten Gases x zur Gesamtstoffmenge des Gasmischung) berechnet sich aus der Teilchendichte τ_x (Stoffmenge pro Volumen) mit der Gasgleichung zu

$$c_x = \frac{\tau_x R T}{p}\,.$$

Dabei sind T die Temperatur und p der Gesamtdruck.

A.7. Potenzielle Temperatur

Die Berechnung der potenziellen Temperatur Θ aus der Lufttemperatur T und dem Luftdruck p erfolgt über

$$\Theta = T\left(\frac{1000\ \mathrm{hPa}}{p}\right)^{\frac{R_\mathrm{L}}{c_p}}\,. \tag{1}$$

Dabei ist p der Luftdruck in der Messhöhe von T, der aus dem am Boden gemessenen Druck berechnet wird (Abschnitt A.2).

A.8. Äquivalenttemperatur

Die Äquivalenttemperatur t_e ist die Temperatur, die feuchte Luft annähme, wenn der gesamte darin enthaltene Wasserdampf bei konstantem Druck vollständig kondensieren und die dabei freigesetzte Kondensationswärme ausschließlich der Luft zugeführt würde. Mit der temperaturabhängigen spezifischen Verdampfungswärme von Wasser

$$L = 2500000{,}78\ \mathrm{J/kg} - 2325{,}734\ \mathrm{J/kg} \cdot \{t\}\,,$$

der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

$$c_\mathrm{W} = 4186{,}74\ \mathrm{J/(kg\,K)}$$

und dem Massenmischungsverhältnis r ist

$$t_\mathrm{e} = t + r\frac{L}{c_p + r c_\mathrm{W}} \tag{2}$$

(DWD, 2018a).

A.9. Potenzielle Äquivalenttemperatur

Die potentielle Äquivalenttemperatur (auch: äquivalentpotentielle Temperatur) Θ_e ist die Temperatur, die feuchte Luft annähme, wenn der gesamte darin enthaltene Wasserdampf bei konstantem Druck vollständig kondensieren, die dabei freigesetzte Kondensationswärme ausschließlich der Luft zugeführt und es anschließend trockenadiabatisch auf 1000 hPa gebracht würde. Sie berechnet sich demnach aus den Formeln für die Äquivalenttemperatur (Gl. 2) und der potenziellen Temperatur (Gl. 1) (DWD, 2018b):

$$\Theta_\mathrm{e} = \Theta(t_\mathrm{e}(t),p)$$

A.10. Feuchtemaße

A.10.1. Sättigungsdampfdruck

Die Berechnung des Sättigungsdampfdrucks von Wasserdampf über einer ebenen Oberfläche **flüssigen** Wassers bei der Temperatur t (in °C) erfolgt gemäß dem CIMO Guide (WMO, 2014) mit der Magnus-Formel

$$e_\mathrm{s,w}(t) = 6{,}112\ \mathrm{hPa} \cdot \mathrm{e}^{\frac{17{,}62\cdot\{t\}}{243{,}12+\{t\}}}\,. \tag{3}$$

Anmerkungen: 1. Diese Formel gilt nur für eine reine Wasserdampfphase (ohne Luft). Eine Korrektur für feuchte Luft wäre unter Berücksichtigung des Luftdrucks in Stationshöhe p mit dem Faktor

$$f(p) = 1{,}0016 + 3{,}15 \cdot 10^{-6} p\ \mathrm{hPa}^{-1} - \frac{0{,}074\ \mathrm{hPa}}{p}$$

möglich, wird hier aber nicht durchgeführt. 2. Die Formel wird zudem nur für Temperaturen zwischen −45 °C bis +60 °C empfohlen. Darüber ergeben sich zu hohe Werte, z. B. 1038,45 hPa bei 100 °C. Für diesen Bereich besser geeignet sind die Koeffizienten nach Magnus (1844): 6,0328 hPa (4,525 mm Hg), 17,149 und 234,69.

Über **Eis** (−65 °C bis 0 °C) gilt abweichend

$$e_{\mathrm{s,i}}(t) = 6{,}112\ \mathrm{hPa} \cdot \mathrm{e}^{\frac{22{,}46 \cdot t}{272{,}62 + t}}\ .$$

Auch diese Formel gilt nur für eine reine Wasserdampfphase. Für feuchte Luft kann derselbe Korrekturfaktor $f(p)$ wie über flüssigem Wasser angewendet werden.

A.10.2. Taupunkt (aus Temperatur und relativer Feuchte)

Bei gemessener Lufttemperatur t (in °C) und relativer Feuchte U (in %) berechnet sich der Taupunkt t_{d} (in °C) aus der Umkehrung der MAGNUS-Formel (Gl. 3):

$$\begin{aligned} a &= 17{,}62 \\ b &= 243{,}12\ ^\circ\mathrm{C} \\ c &= \frac{at}{b+t} + \ln\frac{U}{100\,\%} \\ t_{\mathrm{d}} &= \frac{bc}{a-c} \end{aligned}$$

A.10.3. Wasserdampfdruck (aus Temperatur und relativer Feuchte)

Bei gemessener Lufttemperatur t (in °C) und relativer Feuchte U berechnet sich der Partialdruck des Wasserdampfs e aus

$$e = e_{\mathrm{s,w}}(t) \cdot \frac{U}{100\,\%}$$

mit $e_{\mathrm{s,w}}(t)$ nach Gl. 3. Die relative Feuchte bezieht sich laut Definition immer auf flüssiges Wasser.

A.10.4. Relative Feuchte (aus Temperatur und Taupunkt)

Bei gemessener Lufttemperatur t und Taupunkt t_{d} (beides in °C) berechnet sich die relative Feuchte U aus

$$U = \frac{e_{\mathrm{s,w}}(t_{\mathrm{d}})}{e_{\mathrm{s,w}}(t)} \cdot 100\ \%$$

mit $e_{\mathrm{s,w}}(\cdot)$ nach Gl. 3. Die relative Feuchte bezieht sich laut Definition immer auf flüssiges Wasser.

A.10.5. Absolute Feuchte (aus Wasserdampfdruck)

Die absolute Feuchte (Wasserdampfdichte) berechnet sich mit der Zustandsgleichug für ideale Gase aus

$$\rho_{\mathrm{W}} = \frac{e}{R_{\mathrm{W}} T}\,.$$

A.10.6. Spezifische Feuchte (aus Wasserdampfdruck)

Die spezifische Feuchte (das Verhältnis der Masse Wasserdampf zur Masse feuchter Luft) berechnet sich aus

$$q = \frac{\rho_\mathrm{W}}{\rho_\mathrm{W} + \rho_\mathrm{L}} = \frac{R_\mathrm{L}}{R_\mathrm{W}} \cdot \frac{e}{p + e(R_\mathrm{L}/R_\mathrm{W} - 1)} \,,$$

wohei p der Luftdruck in Stationshöhe ist.

A.10.7. Massenmischungsverhältnis (aus Wasserdampfdruck)

Das Massenmischungsverhältnis (das Verhältnis der Masse Wasserdampf zur Masse trockener Luft) berechnet sich aus

$$r = \frac{\rho_\mathrm{W}}{\rho_\mathrm{L}} = \frac{R_\mathrm{L}}{R_\mathrm{W}} \cdot \frac{e}{p - e} \,,$$

wohei p der Luftdruck in Stationshöhe ist.

A.10.8. Wasserdampfdruck (Psychrometer)

Wir folgen hier weitgehend den Ausführungen in Möller (1991). Aus den an einem Psychrometer gemessenen Trocken- und Feuchttemperaturen t und t_f kann mit der Sprungschen Formel der Wasserdampfdruck berechnet werden:

$$e = e_{\mathrm{s},x}(t) - p \cdot (t - t_\mathrm{f}) \frac{c_p}{L_x R_\mathrm{L}/R_\mathrm{W}} (1 + 0{,}00115 t_\mathrm{f}) \tag{4}$$

Dabei wird für die Phase x Eis angenommen ($x = \mathrm{i}$), wenn $t_\mathrm{f} < 0$ °C, sonst flüssiges Wasser ($x = \mathrm{w}$). Für L_x werden folgende Werte genommen:

$$\begin{aligned} L_\mathrm{w} &= 2478521{,}5566 \text{ J/kg} \qquad \text{(Wert für Wasser bei 10 °C)} \\ L_\mathrm{i} &= 2835449{,}5302 \text{ J/kg} \qquad \text{(Wert für Eis bei 0 °C)} \end{aligned}$$

Der Luftdruck p ist optional. Wenn kein Wert verfügbar ist, wird $p = 1007$ hPa gesetzt.

Bei einer Feuchttemperatur unter 0 °C wird Vereisung angenommen. Falls das Wasser unterkühlt und daher noch flüssig ist, beträgt der Fehler im ungünstigsten Fall 0,9 hPa.

Das Ergebnis für e ist größer als der Sättigungsdampfdruck, wenn $t_\mathrm{f} > t$ ist. Der Wert von e ist negativ, wenn t_f kleiner als t_f bei trockener Luft ist.

Der Luftdruck p kann für niedrige Höhen bis 500 m auf 1007 hPa gesetzt werden.

L_w ist abhängig von der Temperatur, es kann jedoch der Wert für 10 °C genommen werden. Der Fehler in e ist deutlich kleiner als 0,1 hPa, der daraus resultierende Fehler in der relativen Feuchte U deutlich kleiner als 1 Prozentpunkt. L_i ist weniger temperaturabhängig. Die Fehler in e und U sind gering.

A.10.9. Feuchttemperatur

Die Berechnung der psychrometrischen Feuchttemperatur aus der Lufttemperatur t und dem Wasserdampfdruck e erfolgt aus der Umkehrung der SPRUNGschen Formel (Gl. 4) mit dem NEWTON-Verfahren (Nullstellensuche).

Dabei wird t_f zunächst über Wasser bestimmt. Wenn sich für t_f ein Wert kleiner als 0 °C ergibt, wird t_f über Eis berechnet.

Aus numerischen Gründen kann t_f in seltenen Fällen geringfügig größer als t werden.

A.10.10. Virtuelle Temperatur

Die virtuelle Temperatur T_v wird eingeführt, um in der Zustandsgleichung für ideale Gase auch bei feuchter Luft mit der Gaskonstanten für trockene Luft rechnen zu können:

$$p = \rho R_\mathrm{L} T_\mathrm{v}$$

Dies wird bei einer spezifischen Feuchte q erreicht durch

$$T_\mathrm{v} = T \left(1 + \left[\frac{R_\mathrm{W}}{R_\mathrm{L}} - 1 \right] q \right) .$$

A.11. Strahlungsgrößen

Am Wettermast Hamburg werden lediglich die aus dem oberen Halbraum eintreffende kurzwellige und langwellige Strahlung (Pyranometer und Pyrgeometer) sowie die Oberflächentemperatur (IR-Thermometer aus etwa 2 m Höhe) direkt gemessen.

A.11.1. Kurzwellige Strahlung von unten

Die kurzwellige Strahlung von unten R ergibt sich aus der kurzwelligen Strahlung von oben G (Globalstrahlung) und der Albedo α zu

$$R = \alpha G .$$

Dabei wird für α der feste Wert 0,21 verwendet, der sich für eine grüne Wiese aus Messungen an anderen Stationen als guter Richtwert ergeben hat. Der wirkliche Wert der Albedo hängt jedoch von der Beschaffenheit des Grases sowie dem Höhenwinkel der Sonne ab. Bei einer Schneedecke ist die Albedo selbstverständlich eine gänzlich andere.

A.11.2. Langwellige Strahlung von unten

Die langwellige Strahlung von unten E ergibt sich mit dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz aus der Oberflächentemperatur des Erdbodens T_O, der Emissivität ε und der STEFAN-BOLTZMANN-Konstanten σ zu

$$E = \sigma \varepsilon T_\mathrm{O}^4 .$$

Dabei wird für ε der feste Wert 0,984 verwendet (Literaturwert für Gras). Der wirkliche Wert der Emissivität hängt jedoch auch von der Beschaffenheit des Grases ab.

A.11.3. Strahlungsbilanz

Die Strahlungsbilanz (**lang- und kurzwellig**) ist die Nettostrahlungsflussdichte

$$Q = G - R + L - E$$

mit kurzwelliger Strahlung von oben G, kurzwelliger Strahlung von unten R, langwelliger Strahlung von oben L und langwelliger Strahlung von unten E. Sie ist positiv bei abwärts gerichtetem Nettostrahlungsfluss.

Die **langwellige** Strahlungsbilanz ist lediglich

$$Q_{\mathrm{L}} = L - E\,.$$

A.11.4. Globalstrahlung bei wolkenlosen Bedingungen

Die bei wolkenlosem Himmel zu erwartende maximale Globalstrahlung G_{c} ist kein Messwert, sondern ergibt sich aus astronomischen Parametern wie dem Sonnenstand, der Jahreszeit und der Solarkonstanten I_0. G_{c} ist im Wesentlichen die abwärts gerichtete kurzwellige Sonnenstrahlung am Oberrand der Atmosphäre bezüglich einer horizontalen Einheitsfläche multipliziert mit einem konstanten Faktor a, der die Absorption in der Atmosphäre parametrisiert:

$$G_{\mathrm{c}} = aI_0 \cos\zeta$$

Für a hat sich ein Wert von 0,78 als geeignet erwiesen. Die Berechnung des Zenitwinkels der Sonne ζ ist in einer besonderen Dokumentation über die Bestimmung der Sonnenscheindauer enthalten (Lange, 2015).

A.11.5. Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer wird am Wettermast Hamburg nicht direkt gemessen, sondern aus der Globalstrahlung abgeleitet. Hierfür ist ein tages- und jahreszeitabhängiger Schwellwert G_{w} bestimmt worden. Liegt in einer Minute die Globalstrahlung über dem Schwellwert ($G > G_{\mathrm{w}}$), wird Sonnenschein angenommen, liegt er darunter, kein Sonnenschein. Die Bestimmung dieses Schwellwerts ist in einer besonderen Dokumentation beschrieben (Lange, 2015).

A.11.6. Direkte Sonnenstrahlung

Die direkte Sonnenstrahlung ist die Strahlungsflussdichte aus Richtung der Sonne bezüglich einer zu dieser Richtung senkrechten Fläche (im Gegensatz zur Globalstrahlung, bei der die gesamte Strahlung aus dem oberen Halbraum durch eine immer waagerechte Bezugsfläche gezählt wird). Die direkte Sonnenstrahlung wird am Wettermast Hamburg nicht direkt gemessen, sondern aus der Globalstrahlung und einigen Annahmen abgeschätzt. Weitere Informationen dazu sind in einer gesonderten Dokumentation auf Anfrage erhältlich.

A.11.7. Diffuse Himmelsstrahlung

Die diffuse Strahlung ist die Globalstrahlung abzüglich der direkten Sonnenstrahlung,

$$D = G - I \sin \gamma \,,$$

wobei γ der Höhenwinkel der Sonne ist.

A.11.8. Extinktionskoeffizient

Aus der gemessenen meteorologischen Sichtweite V_M erhält man nach Klose und Klose (2016) den Extinktionskoeffizienten

$$\sigma = \frac{\ln(1/0{,}05)}{V_\mathrm{M}} = \frac{2{,}996}{V_\mathrm{M}} \,.$$

Dabei ist 0,05 der Schwellwert für den Kontrast.

A.12. Ceilometer

A.12.1. Gesamtbedeckungsgrad

Die Ceilometer CT25k, CL31 und CL51 berechnen nach dem Sky-Condition-Algorithmus Bedeckungsgrad und Wolkenhöhe für bis zu vier (CT25k) bzw. fünf (CL31 und CL51) Wolkenschichten. Daraus bestimmt sich ein Gesamtbedeckungsgrad als das Maximum der einzelnen Bedeckungsgrade. Laut Ch. Münkel (Vaisala) ist in den Bedeckungsgraden der höheren Schichten der Bedeckungsgrad der darunter liegenden Schichten bereits enthalten.

A.13. Bodenfeuchte

A.13.1. Wassergehalt der Bodensäule

Der Wassergehalt der Bodensäule gibt an, wie viel Flüssigwasser sich im Boden von der Oberfläche bis zu einer Tiefe d befindet. Die Angabe erfolgt in Liter Wasser pro Quadratmeter Boden. Da 1 $\ell/\mathrm{m}^2 = 1$ mm ist, verwenden wir hierfür ebenfalls die Einheit mm und haben damit einen direkten Vergleich mit der Niederschlagsmenge, die üblicherweise auch in mm angegeben wird.

Die Berechnung erfolgt anhand der gemessenen volumetrischen Bodenfeuchte, die angibt, wie viel Prozent des Bodenvolumens mit Flüssigwasser gefüllt ist. Diese Messung erfolgt in diskreten Tiefen mit TDR-Sonden. Für eine Abschätzung der gesamten Wassermenge wird der Boden in vertikale Abschnitte (Horizonte) aufgeteilt (Abb. 3). Die Grenze zwischen zwei Horizonten liegt immer in der Mitte zwischen zwei Messhöhen. Der oberste Horizont beginnt an der Oberfläche, der unterste endet bei der untersten Messung. Die von den Sonden gemessene volumetrische Bodenfeuchte wird dann für den gesamten Horizont angenommen, in der sich die Sonde befindet.

Im Horizont i der Dicke h_i und der Bezugsfläche A befindet sich bei einem volumetrischen Wassergehalt VWC_i das Wasservolumen

$$V_i = \frac{\mathrm{VWC}_i}{100} \cdot h_i \cdot A \,.$$

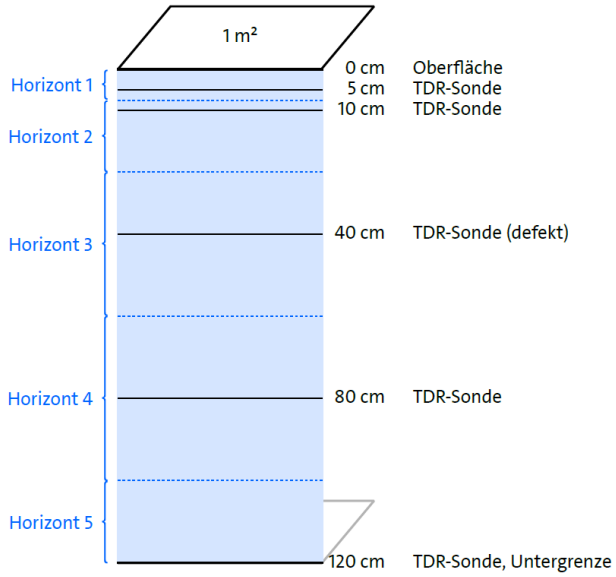

Abb. 3: Messtiefen der volumetrischen Bodenfeuchte (TDR-Sonden) und Unterteilung des Bodens in Horizonte zur Bestimmung des Gesamtwassergehalts.

Das Volumen pro Fläche (und damit die „Höhe“des Wassers) ist dann

$$v_i = \frac{V_i}{A} = \frac{\mathrm{VWC}_i}{100} \cdot h_i \,.$$

Die Summe über alle Horizonte ergibt dann den gesamten Wassergehalt in der betrachten Bodensäule:

$$v = \sum_i v_i$$

A.14. Schneedetektion

Zur Unterscheidung zwischen Regen und Schnee wird in erster Linie das Mikroregenradar (MRR) herangezogen. Die MRR-Aufzeichnungssoftware MRR-Grep ermittelt aus der Regenrate und der Fallgeschwindigkeit, ob der Niederschlag schnell (Regen, Hagel) oder langsam (Schnee) fällt. Näheres dazu in der Dokumentation zu MRR-Grep. Sind vom MRR keine Werte verfügbar oder wird vom MRR kein Niederschlag detektiert, wird als Niederschlagsdetektor der IR-Sensor IRSS88 genommen und bei vorhandenem Niederschlag anhand der Lufttemperatur in 2 m Höhe entschieden, ob es sich um Regen ($T > 2$ °C) oder Schnee ($T \leq 2$ °C) handelt.

A.15. Turbulenzgrößen

Die meisten Turbulenzgrößen wie Mittelwerte, Standardabweichungen, Kovarianzen, Turbulenzintensität, Monin-Obuchow-Länge usw. werden bereits während der Datenaufzeichnung von der Aufzeichnungsoftware USATBoe berechnet. Die entsprechenden Formeln finden sich daher in der zugehörigen Dokumentation (Lange, 2017).

A.15.1. Turbulente kinetische Energie

Die turbulente kinetische Energie (TKE) k ist die halbe Summe der Geschwindigkeitsvarianzen in den drei kartesischen Raumrichtungen (Schatzmann, 1993):

$$k = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$$

Die Varianz σ_i^2 ist dabei das Quadrat der Standardabweichung σ_i der Windgeschwindigkeit in i-Richtung.

A.16. Thermo-physiologische Kenngrößen und Indizes

A.16.1. Gefühlte Temperatur

Für die gefühlte Temperatur haben wir noch keine echte Dokumentation. Die Berechnung folgt im Wesentlichen Jendritzky (1990) und Staiger et al. (1997).

A.16.2. Windchill-Temperatur

Die Windchill-Temperatur t_{WCT} für einen Menschen **am Boden** berechnet sich aus der Lufttemperatur t (in °C) und der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe V_{10}:

$$t_{\mathrm{WCT}} = \left[13{,}12 + 0{,}6215\{t\} + (0{,}3965\{t\} - 11{,}37)\left(\frac{V_{10}}{\mathrm{km/h}}\right)^{0{,}16}\right] \,^{\circ}\mathrm{C}\,. \tag{5}$$

Ergibt sich ein Wert größer als t, so wird $t_{\mathrm{WCT}} = t$ gesetzt.

Für einen Standort **oberhalb des Bodens** kann nicht einfach die dortige Windgeschwindigkeit genommen werden, da die Reduzierung der Windgeschwindigkeit von 10 m auf etwa 1 m Höhe bereits in der Formel implizit enthalten ist. Der auf Höhe der Person gemessene Wind muss also zunächst so erhöht werden, wie es bei einer Höhenänderung von 1 m auf 10 m zu erwarten wäre. Aus dem logarithmischen Windprofil ergibt sich mit $z_0 = 0{,}01$ m (Flughafen, kurz geschnittene Wiese)

$$V_{10} = V_1 \cdot \frac{\ln(10\,\mathrm{m}/z_0)}{\ln(1\,\mathrm{m}/z_0)} = V_1 \cdot \frac{\ln 1000}{\ln 100} = V_1 \cdot \frac{3}{2}\,.$$

Eine bei der Person gemessene Windgeschwindigkeit ist daher mit dem Faktor 3/2 zu multiplizieren, bevor sie in die Gl. 5 als V_{10} eingesetzt werden kann.

A.16.3. Hitze-Index (USA)

Die Berechnung des in den USA verwendeten Hitze-Index *HI* stammt aus Wikipedia (2018a), dort aus Stull (2000). Der Wert berechnet sich aus der Lufttemperatur t und der relativen Feuchte U (in %). Die Formel ist für Temperaturen in Grad Fahrenheit aufgeschrieben, hier mit τ bezeichnet. Die Umrechnung von Celsius nach Fahrenheit lautet

$$\{\tau\} = 1{,}8\{t\} + 32\,.$$

Für $\tau < 80$ °F ($t < 26{,}67$ °C) ist $HI = \tau$, sonst

$$\begin{aligned} HI = {} & 16{,}923 + 1{,}85212 \cdot 10^{-1}\tau + 5{,}37941U - 1{,}00254 \cdot 10^{-1}\tau U + 9{,}41695 \cdot 10^{-3}\tau^2 \\ & + 7{,}28898 \cdot 10^{-3}U^2 + 3{,}45372 \cdot 10^{-4}\tau^2 U - 8{,}14971 \cdot 10^{-4}\tau U^2 + 1{,}02102 \cdot 10^{-5}\tau^2 U^2 \\ & - 3{,}86460 \cdot 10^{-5}\tau^3 + 2{,}91583 \cdot 10^{-5}U^3 + 1{,}42721 \cdot 10^{-6}\tau^3 U + 1{,}97483 \cdot 10^{-7}\tau U^3 \\ & - 2{,}18429 \cdot 10^{-8}\tau^3 U^2 + 8{,}43296 \cdot 10^{-10}\tau^2 U^3 - 4{,}81975 \cdot 10^{-11}\tau^3 U^3 \end{aligned}$$

Ergibt sich daraus $HI < \tau$, so wird ebenfalls $HI = \tau$ gesetzt.

Der Hitze-Index in der Wettermast-Datenbank ist in °C angegeben. Die abschließende Umrechnung lautet daher

$$HI_{\mathrm{C}} = (HI - 32)/1{,}8\,.$$

Anmerkungen: Die obige Berechnung hat einen Sprung von $HI = \tau$ auf das HI aus der Formel, wenn bei relativen Feuchten über 40 % die Temperatur über 80 °F steigt.

Die folgende Tabelle zeigt die physiologischen Auswirkungen der *HI*-Werte ab 27 °C bei Exposition im Schatten (in der Sonne kann der Wert um bis zu 8 K höher liegen):

HI	Wirkung
27–32 °C	Vorsicht geboten: Erschöpfung bei längerem Aufenthalt im Freien möglich. Hitzekrämpfe bei andauernder Aktivität.
32–41 °C	Besondere Vorsicht geboten: Hitzekrämpfe und Erschöpfung möglich. Hitzschlag bei andauernder Aktivität.
41–54 °C	Gefahr: Hitzekrämpfe und Erschöpfung wahrscheinlich; Hitzschlag wahrscheinlich bei andauernder Aktivität.
> 54 °C	Äußerste Gefahr: Hitzschlag droht unmittelbar.

A.16.4. Humidex (Kanada)

Der Humidex (für *humidity index*) berechnet sich aus der Lufttemperatur t und dem Wasserdampfdruck e (Environment Canada, 2017). Für $e > 10$ hPa ist

$$HD = t + \frac{5}{9}(e - 10\ \mathrm{hPa})\,,$$

sonst gleich t. Der Humidex wird als dimensionslose Größe angegeben, seine Zahlenwerte sind aber als Temperaturen in °C interpretierbar. Der Faktor 5/9 stammt aus der Umrechnung von °F in °C.

Die folgende Tabelle zeigt die physiologische Bedeutung der *HD*-Werte ab 20 (Wikipedia, 2018b):

HD	Wirkung
20–29	Geringer oder kein Diskomfort
30–39	Mittlerer Diskomfort
40–45	Hoher Diskomfort, Anstrengungen vermeiden
> 45	Gefahr, Hitzschlag möglich

A.16.5. UTCI

Der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) in °C wird mit einem Polynom 6. Ordnung aus den vier Eingangsparametern Lufttemperatur T (in °C), Wasserdampfdruck e (in kPa), mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung T_{mrt} (in °C) und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe V (in m/s) berechnet (Broede, 2009). Mit $D = T_{\mathrm{mrt}} - T$ und V mindestens 0,5 m/s und höchstens 17 m/s ist

$$
\begin{aligned}
\mathrm{UTCI} = \; & T + 6{,}07562052 \cdot 10^{-1} \\
& - 2{,}27712343 \cdot 10^{-2} \cdot T \\
& + 8{,}06470249 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \\
& - 1{,}54271372 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 \\
& - 3{,}24651735 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 \\
& + 7{,}32602852 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 \\
& + 1{,}35959073 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 \\
& - 2{,}25836520 \cdot 10^{0} \cdot V \\
& + 8{,}80326035 \cdot 10^{-2} \cdot TV \\
& + 2{,}16844454 \cdot 10^{-3} \cdot T^2V \\
& - 1{,}53347087 \cdot 10^{-5} \cdot T^3V \\
& \vdots \\
& [228 \text{ weitere Terme}] \\
& \vdots \\
& - 6{,}80434415 \cdot 10^{-6} \cdot VDe^4 \\
& - 9{,}77675906 \cdot 10^{-6} \cdot D^2e^4 \\
& + 8{,}82773108 \cdot 10^{-2} \cdot e^5 \\
& - 3{,}01859306 \cdot 10^{-3} \cdot Te^5 \\
& + 1{,}04452989 \cdot 10^{-3} \cdot Ve^5 \\
& + 2{,}47090539 \cdot 10^{-4} \cdot De^5 \\
& + 1{,}48348065 \cdot 10^{-3} \cdot e^6 \,.
\end{aligned}
$$

A.17. Literatur zum Anhang

Broede, P. (2009): *Fortran-Code der Funktion* `UTCI_approx`, Version a 0.002

DWD (2018a): *Online-Wetterlexikon: Stichwort Äquivalenttemperatur*, `www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/A/Aequivalenttemperatur_pdf.pdf`, zuletzt aufgerufen am 22.2.2018.

DWD (2018b): *Online-Wetterlexikon: Stichwort Potentielle Äquivalenttemperatur*, `www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/P/Potentielle_Aequivalenttemperatur_pdf.pdf`, zuletzt aufgerufen am 22.2.2018.

Environment and Climate Change Canada (2017): *Canadian Climate Normals 1981–2010*, `ftp.tor.ec.gc.ca/Pub/Documentation_Canadian_Climate_Normals/1981_2010/`

`Canadian_Climate_Normals_1981_2010_Calculation_Information.pdf`, zuletzt aufgerufen am 26.2.2018.

Jendritzky, G. (1990): *Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen, Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell.* Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover: Beiträge; Bd. 114

Klose, B., H. Klose (2016): *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Lange, I. (2015): *Ein statistisches Verfahren zur pyranometrischen Bestimmung der Sonnenscheindauer am Wettermast Hamburg*, Technische Dokumentation, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, 16 S.

Lange, I. (2017): *Turbulenzdatenaufzeichnung mit USAT-Bö*, Softwaredokumentation, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, 22 S.

Magnus, G. (1844): *Versuche über die Spannkräfte des Wasserdampfes*, Ann. Phys. Chem., Bd. 61, Nr. 2, S. 225–247.

Möller, F. (1991): *Einführung in die Meteorologie I*, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Schatzmann, M. (1993): *Turbulenz und Grenzschicht*, Vorlesungsskript, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, 151 S.

Staiger, H., K. Bucher, G. Jendritzky (1997): *Gefühlte Temperatur – Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestreß beim Aufenthalt im Freien mit der Maßzahl Grad Celsius.* Ann. d. Met., DWD Offenbach 33, 100–107

Stull, R. (2000): *Meteorology for Scientists and Engineers*, Second Edition. Brooks/Cole.

Wikipedia (2018a): *Wikipedia, The Free Encyclopedia: Heat index*, `en.wikipedia.org/wiki/Heat_index`, zuletzt aufgerufen am 23.2.2018.

Wikipedia (2018b): *Wikipedia, The Free Encyclopedia: Humidex*, `en.wikipedia.org/wiki/Humidex`, zuletzt aufgerufen am 26.2.2018.

WMO (2014): *WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (the CIMO Guide)*, WMO, No. 8, 2014 edition, updated in 2017