
Angewandte Meteorologie

Thomas Foken

Angewandte Meteorologie

Mikrometeorologische Methoden

3. Auflage



Springer Spektrum

Thomas Foken
Am Herrgottsbaum 28
D-96120 Bischberg, Deutschland

Universität Bayreuth, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER)
Bayreuth, Deutschland

ISBN 978-3-642-25524-3 ISBN 978-3-642-25525-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-25525-0

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2006, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort

Nach fast 10 Jahren nach Erscheinen der 2. Auflage ist eine Überarbeitung und Neuauflage längst überfällig. Ich habe dieses sehr behutsam vorgenommen und den bestehenden Text durch fachliche Entwicklungen der letzten Jahre und vor allem neuere Publikationen ergänzt. An einigen Stellen habe ich aus didaktischen Gründen leichte Verschiebungen vorgenommen, so die Einführung der Verschiebungshöhe bereits im Abschnitt 2. Ergänzt habe ich einige Ausführungen zur atmosphärischen Grenzschicht, die aus mikrometeorologischer Sicht wichtig sind, einige Messmethoden wie Bodenkammermessungen und vertiefende Ausführungen zum lokalen Klima in Anlehnung an ein zwischenzeitlich erschienenenes kleines Buch (Foken 2013). Im Gegensatz zu anderen Monographien enthält das Buch weiterhin eine Vielzahl an historischen und aktuellen Quellen, die es dem Leser ermöglichen, beschriebene Zusammenhänge besser nachvollziehen zu können bzw. weiterzuführen.

In den letzten Jahren sind erfreulicherweise eine Reihe guter Monographien zur Thematik erschienen. Beim näheren Hinsehen wird das vorliegende Buch durch diese in hervorragender Weise ergänzt, ohne dass es ersetzt wird. Bei Überlappungen ist im rein mikrometeorologischen Teil – insbesondere bei den experimentellen Bezügen – im vorliegenden Buch weiterhin der größte Grad der Detailierung. Diese Bücher betreffen die atmosphärische Grenzschicht (Kraus 2008; Vilà-Guerau de Arellano et al. 2015), die Grundlagen der atmosphärischen Turbulenz (Wyngaard 2010), die physikalischen Grundlagen der Mikrometeorologie (Monteith und Unsworth 2008), die stärkere Betonung von pflanzlichen und Bodenprozessen (Hari et al. 2013; Moene und van Dam 2014; Monson und Baldochi 2014) und die Messtechnik (Emeis 2010). Damit stehen dem Leser nun eine Reihe Fachbücher zur Verfügung, die sich in hervorragender Weise bei aller Unterschiedlichkeit der Darstellung durch ihre Autoren ergänzen. Es ist vorgesehen, dass das vorliegende Buch in Kürze auch in englischer Sprache in der 2. Auflage unter dem Titel „Mikrometeorology“ weitgehend inhaltlich identisch erscheint.

An dieser Stelle ist es mein aufrichtiges Bedürfnis, meinen KollegInnen und StudentInnen für die Hinweise auf vorhandene Fehler und zur Verbesserung des

Buches zu danken. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Ute, die mich auch bei dieser Auflage immer wieder unterstützte.

Bischberg, Dezember 2015

Thomas Foken

Vorwort zur 1. Auflage

Auch wenn die Wiege der modernen Mikrometeorologie vor 60–80 Jahren im deutschsprachigen Raum stand, ist diese auf raum-zeitlichen Maßstäben beruhende Einteilung der Meteorologie gerade in Deutschland eher weniger gebräuchlich. Vielleicht hat der inzwischen in der 5. Auflage erschienene Klassiker „Das Klima der bodennahen Luftschicht“ von R. Geiger (1927) in den Folgejahren zu einer stark phänomenologischen Beschreibung bodennaher Prozesse geführt und „Mikro“ auch nur mit sehr kleinräumigen Prozessen in Verbindung gebracht. Die an die Fortschritte der Turbulenztheorie gebundene Weiterentwicklung der Mikrometeorologie begann in den 40er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts in der damaligen Sowjetunion und setzte sich u. a. über Australien und die USA fort. Dort ist „Mikrometeorologie“ als maßstabsbezogener Teil der Meteorologie für bodennahe Prozesse mit einigen Dekametern vertikaler und Kilometern horizontaler Ausdehnung wohl etabliert. Im russischen Sprachraum ist „Experimentelle Meteorologie“ verbreiteter, doch wird dieser Begriff heute eher nicht maßstabsabhängig für alle Experimente angewandt. Da der Untersuchungsraum der Mikrometeorologie mit dem Teil der Atmosphäre übereinstimmt, in dem die wesentlichen menschlichen Aktivitäten stattfinden, ist es naheliegend, dass Angewandte Meteorologie und Mikrometeorologie sich gegenseitig bedingen, wobei letztere eher theoretisch und grundlagenorientiert ist. Dass beide eine Einheit darstellen, zeigt die Themenauswahl des „Journal of Applied Meteorology“. In Deutschland hat sich im Rahmen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft die angewandte Meteorologie durch die umweltbezogenen Fachtagungen „METTOOLS“ gut etabliert, die notwendigen Grundlagen müssen aber mühevoll aus verschiedenen Quellen, meist englischsprachigen, zusammengestellt werden. Nachdem bereits Flemming (1991) eine allgemein verständliche Einführung in Kapitel der Meteorologie, die für die angewandte Meteorologie von Bedeutung sind, gegeben hat, sollen mit dem vorliegenden Buch die mikrometeorologischen Grundlagen deutlicher dargestellt werden. Es ist daher verständlich, dass mit einem deutschsprachigen Buch nicht nur der leichtere fachliche Zugang für den Anwender, sondern auch die Verbreitung der deutschen Fachsprache bewusst bezweckt werden. Des Weiteren wird der Spagat versucht, dem Anwender unmittelbar einsatzfähige Berechnungs- und Messverfahren darzustellen, dabei dem Experten aber auch Grundlagen und weiterführende Arbeiten aufzuzeigen.

Das vorliegende Buch hat eine lange Vorgeschichte. In fast 30 Jahren vorzugsweise experimenteller Forschung in der Mikrometeorologie war es für mich immer faszinierend, wie Messverfahren und Messgeräteinsatz vom Zustand der atmosphärischen Turbulenz, d. h. von den theoretischen Grundlagen und den vielen abweichenden Phänomenen, abhängig sind. Dieser enge Zusammenhang ist eigentlich nur im Buch von Dobson et al. (1980) ansatzweise herausgearbeitet. Didaktisch ist es eine fast unlösbare Aufgabe, mehrere immer wieder getrennt dargestellte Gebiete zusammenzuführen und Querbezüge aufzuzeigen. Das vorliegende Buch stellt diesbezüglich einen bescheidenen Versuch dar. Im Gegensatz zur klassischen mikrometeorologischen Betrachtungsweise, d. h. der Untersuchung von Prozessen über ebenem und höchstens mit niedriger Vegetation bedecktem Gelände, wird die Übertragung der Gesetzmäßigkeiten auf heterogenes Gelände und hohen Bewuchs durchgeführt. Dabei wird Bezug genommen zu sehr aktuellen Forschungen, wobei durchaus nicht alle Entwicklungen auch in der Zukunft Bestand haben werden. Die fortschreitende Nutzung mikrometeorologischer Grundlagen in der Ökologie (Campbell und Norman 2013) erfordert aber dringend diesen Schritt.

Die eigentliche Quelle für das Buch waren die Vorlesungen zur „Experimentellen Meteorologie“ an der Humboldt-Universität zu Berlin und zur „Mikrometeorologie“ an der Universität Potsdam und ab 1997 an der Universität Bayreuth sowie die damit im Zusammenhang herausgegebenen Skripten. Das Buch wäre aber nicht möglich gewesen ohne meine deutschen und russischen Lehrer, meine Fachkolleginnen und -kollegen, meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und nicht zuletzt meine Doktorandinnen und Doktoranden, Diplomandinnen und Diplomanden und Studentinnen und Studenten, die in vielfältiger Weise zum Gelingen beigetragen haben. Viele Verlage und Firmen haben in dankenswerter Weise Abbildungen zur Verfügung gestellt bzw. deren Wiederabdruck gestattet. Herr Engelbrecht hat einige Abbildungen neu gezeichnet. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. P. Schmid für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und Ute für die verständnisvolle Unterstützung der Arbeiten und das Aufdecken mancher Schwachstellen im Manuskript.

Bayreuth, Oktober 2002

Thomas Foken

Literatur

- Campbell GS, Norman JM (2013) Introduction to environmental biophysics. Springer, New York
- Dobson F, Hasse L, Davis R (Hrsg) (1980) Air-sea interaction, instruments and methods. Plenum Press, New York
- Emeis S (2010) Measurement methods in atmospheric sciences. Borntraeger Science Publishers, Stuttgart
- Flemming G (1991) Einführung in die Angewandte Meteorologie. Akademie-Verlag, Berlin
- Foken T (2013) Energieaustausch an der Erdoberfläche. Edition am Gutenbergplatz, Leipzig
- Geiger R (1927) Das Klima der bodennahen Luftschicht. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

-
- Hari P, Heliövaara K, Kulmala L (Hrsg) (2013) Physical and physiological forest ecology. Springer, Dordrecht/Heidelberg/New York/London
- Kraus H (2008) Grundlagen der Grenzschichtmeteorologie. Springer, Berlin/Heidelberg
- Moene AF, van Dam JC (2014) Transport in the atmosphere-vegetation-soil continuum. Cambridge University Press, Cambridge
- Monson R, Baldocchi D (2014) Terrestrial biosphere-atmosphere fluxes. Cambridge University Press, New York
- Monteith JL, Unsworth MH (2008) Principles of environmental physics, 3. Aufl. Elsevier/Academic Press, Amsterdam/Boston
- Vilà-Guerau de Arellano J, Van Heerwaarden CC, van Stratum BJH, van den Dries K (2015) Atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, Cambridge
- Wyngaard JC (2010) Turbulence in the atmosphere. Cambridge University Press, Cambridge

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Grundlagen	1
1.1	Mikrometeorologie	1
1.2	Atmosphärische Maßstäbe	6
1.3	Atmosphärische Grenzschicht	8
1.4	Energiebilanz an der Erdoberfläche	11
1.4.1	Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche	13
1.4.2	Bodenwärmestrom und Bodenwärmespeicherung	19
1.4.3	Turbulente Austauschströme	23
1.5	Wasserbilanzgleichung	28
	Literatur	29
2	Grundgleichungen der atmosphärischen Turbulenz	35
2.1	Bewegungsgleichung	35
2.1.1	Navier–Stokes-Gleichung für mittlere Bewegung	35
2.1.2	Turbulente Bewegungsgleichung	36
2.1.3	Schließungsansätze	42
2.2	Gleichung der turbulenten kinetischen Energie	47
2.3	Fluss-Gradient-Ähnlichkeit	49
2.3.1	Profilgleichungen für neutrale Schichtung	49
2.3.2	Integration der Profilgleichungen – Rauigkeit und Verschiebungshöhe	53
2.3.3	Monin-Obukhov’sche Ähnlichkeitstheorie	57
2.3.4	Bowen-Verhältnis-Ähnlichkeit	65
2.4	Fluss-Varianz-Ähnlichkeit	66
2.5	Turbulenzspektrum	68
2.6	Atmosphärische Grenzschicht	76
2.6.1	Mischungsschichthöhe	76
2.6.2	Widerstandsgesetz	78
2.6.3	Integrale Turbulenzcharakteristiken	79
	Literatur	80
3	Besonderheiten der bodennahen Turbulenz	87
3.1	Eigenschaften der Unterlage	87
3.1.1	Rauigkeit – ergänzende Anmerkungen	88

3.1.2	Verschiebungshöhe – ergänzende Anmerkungen	91
3.1.3	Profile in Pflanzenbeständen	93
3.2	Interne Grenzschichten	96
3.2.1	Definition	96
3.2.2	Experimentelle Befunde	100
3.2.3	Thermische interne Grenzschicht	103
3.2.4	Das „Blending-height“-Konzept	105
3.2.5	Praktische Bedeutung interner Grenzschichten	106
3.3	Hindernisse	107
3.4	Footprint	110
3.4.1	Definition	110
3.4.2	Footprint-Modelle	111
3.4.3	Anwendung von Footprint-Modellen	113
3.5	Hohe Vegetation	117
3.5.1	Verhalten meteorologischer Größen im Wald	117
3.5.2	Flüsse gegen den Gradienten – kohärente Strukturen	119
3.5.3	Raue Unterschicht – Verwirbelungsschicht	125
3.5.4	Kopplung zwischen Atmosphäre und Pflanzenbeständen	128
3.6	Advektion	130
3.7	Bedingungen bei stabiler Schichtung	133
3.8	Schließung der Energiebilanz	135
	Literatur	140
4	Experimentelle Bestimmung des Energie- und Stoffaustausches	151
4.1	Profilmethode	151
4.1.1	Profilmethode mit zwei Messhöhen	152
4.1.2	Profilmessung mit mehreren Messhöhen	163
4.1.3	Potenzansätze	165
4.2	Eddy-Kovarianz-Methode	167
4.2.1	Allgemeine Grundlagen	167
4.2.2	Messtechnische Grundlagen	169
4.2.3	Anzuwendende Korrekturverfahren	172
4.2.4	Nicht oder nur mit Vorsicht anzuwendende Korrekturverfahren	182
4.2.5	Qualitätssicherung	184
4.2.6	Ergänzen von Datenlücken	187
4.2.7	Gesamteinschätzung	189
4.3	Fluss-Varianz-Beziehungen	191
4.4	Akkumulationsverfahren	192
4.4.1	Eddy-Akkumulations-Methode (EA)	192
4.4.2	Relaxed Eddy-Akkumulations-Methode (REA)	193
4.4.3	Disjunct Eddy-Kovarianz-Methode (DEC)	198
4.4.4	Boden Renewal-Methode	198

4.5 Flüsse chemischer Beimengungen	200
Literatur	207
5 Modellierung des Energie- und Stoffaustausches	217
5.1 Energiebilanzverfahren	217
5.1.1 Bestimmung der potenziellen Verdunstung	218
5.1.2 Bestimmung der aktuellen Verdunstung	222
5.1.3 Bestimmung aus Routine-Wetterbeobachtungen	227
5.2 Hydrodynamische Mehrschichtenmodelle	229
5.3 Widerstandsansätze	231
5.4 Modellierung für Wasserflächen	236
5.5 Grenzschichtmodellierung	237
5.5.1 Prognostische Modelle für die Mischungsschichthöhe	237
5.5.2 Parametrisierungen für das Windprofil in der Grenzschicht	238
5.6 Modellierung in großmaßstäblichen Modellen	240
5.7 Large Eddy-Simulation	243
5.8 Flächenmittelung	244
5.8.1 Einfache Flächenmittelungsverfahren	246
5.8.2 Aufwändige Flächenmittelungsverfahren	248
5.8.3 Modellkopplung	249
Literatur	250
6 Messtechnik	259
6.1 Datenerfassung	259
6.1.1 Prinzip der digitalen Datenerfassung	260
6.1.2 Signalabtastung	262
6.1.3 Übertragungsfunktionen	265
6.1.4 Trägheit eines Messsystems	266
6.2 Messung meteorologischer Elemente	269
6.2.1 Strahlungsmessung	270
6.2.2 Windmessung	277
6.2.3 Temperatur- und Feuchtemessung	284
6.2.4 Niederschlagsmessung	293
6.2.5 Indirekte Messverfahren	294
6.2.6 Sonstige Messtechniken	298
6.3 Qualitätsmanagement	305
6.3.1 Messplanung	305
6.3.2 Qualitätskontrolle	307
6.3.3 Messgerätevergleiche	309
Literatur	311
7 Mikroklimatologie	319
7.1 Klimatologische Maßstäbe	319
7.2 Herausbildung lokaler Klimate	320

7.2.1	Kleinräumige Veränderlichkeit von Klimaelementen	320
7.2.2	Lokale Klimatypen	321
7.3	Mikroklimatologisch relevante Zirkulationen	324
7.3.1	Land-Seewind-Zirkulation	324
7.3.2	Berg-Talwind-Zirkulation	324
7.4	Lokale Kaltluftabflüsse	325
7.5	Landnutzungsänderungen und Lokalklima	329
7.5.1	Änderung der Oberflächenrauigkeit	329
7.5.2	Änderung der Verdunstung	331
7.5.3	Änderung der Albedo	331
7.5.4	Degradation	332
7.6	Mikroklimatologische Messungen	332
	Literatur	334
8	Angewandte Meteorologie	337
8.1	Richtlinien im Bereich der Angewandten Meteorologie	337
8.2	Beispiele aus dem Bereich der Angewandten Meteorologie	339
8.2.1	Ausbreitung von Luftbeimengungen	339
8.2.2	Meteorologische Bedingungen der Windenergienutzung	342
8.2.3	Schallausbreitung in der Atmosphäre	344
8.2.4	Human-Biometeorologie	346
8.3	Perspektiven der Angewandten Meteorologie	349
	Literatur	350
9	Anhang	353
9.1	Weiterführende Monografien	353
9.1.1	Deutschsprachige Meteorologie- und Klimatologielehrbücher	353
9.1.2	Weiterführende mikrometeorologische Literatur	354
9.1.3	Weiterführende messtechnische Literatur	355
9.2	Gebrauch der SI-Einheiten	356
9.3	Konstanten und wichtige Parameter	356
9.4	Ergänzende Gleichungen	359
9.4.1	Berechnung astronomischer Größen	359
9.4.2	Universelle Funktionen	360
9.4.3	Integrale Turbulenzcharakteristiken in der Bodenschicht	363
9.5	Übersicht zu Experimenten	364
9.5.1	Experimente zur Untersuchung der Bodenschicht	364
9.5.2	Experimente in heterogenen Landschaften	365
9.5.3	Experimente in der städtischen Grenzschicht	366
9.5.4	Sonstige Experimente, auf die Bezug genommen wird	367

9.6	Meteorologische Messstationen	367
9.7	Bearbeitungssoftware für Eddy-Kovarianz-Messungen	368
9.8	Glossar	371
9.9	Deutsch–Englisches–Wörterverzeichnis	374
	Literatur	381
	Sachwortverzeichnis	387

Symbolverzeichnis

Symbole, die nur in einzelnen Formeln genutzt werden, sind nicht in diesem Verzeichnis enthalten, sondern werden im Text erläutert.

a	Albedo	
a	absolute Feuchte	kg m^{-3}
a	Skalar (allgemein)	*
a_G	molekularer Wärmeleitkoeffizient im Boden	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
a_T	molekularer Wärmeleitkoeffizient in Luft	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
A	Abfluss	mm
A	Austauschkoeffizient	*
A	Koeffizient im Widerstandsgesetz	
b	Genauigkeit (bias)	*
b	Konstante bei REA-Messungen	
b_{st}	artspezifische Konstante nach Jarvis	W m^{-2}
B	Sublayer-Stanton-Zahl	
B	Koeffizient im Widerstandsgesetz	
Bo	Bowen-Verhältnis	
C_D	Spannungskoeffizient	
C_E	Dalton-Zahl	
C_G	volumetrische Wärmekapazität	$\text{W s m}^{-3} \text{K}^{-1}$
C_H	Stanton-Zahl	
C_n^2	Refraktionsstrukturkoeffizientenparameter	$\text{m}^{-2/3}$
C_T^2	Temperaturstrukturkoeffizientenparameter	$\text{K m}^{-2/3}$
$C_{x,y}, Co$	Cospektrum (allgemein)	*
c	Schallgeschwindigkeit	m s^{-1}
c	Konzentration (allgemein)	*
c	Vergleichbarkeit (comparability)	*
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_x	Strukturkonstante (allgemein)	
d	Verschiebungshöhe	m
d	Messstreckenlänge	m
D	molekulare Diffusionskonstante (allgemein)	*
D	Strukturfunktion (allgemein)	*
Da_k	Kolmogorov-Damköhler-Zahl	
Da_t	turbulente Damköhler-Zahl	
DOY	Tag des Jahres: 1. Jan. = 1	
e	Basis des natürlichen Logarithmus	
e	Dampfdruck	hPa
e'	Schwankung des Dampfdruckes	hPa

E	Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T	hPa
E	Energiespektrum (allgemein)	*
E_a	Ventilationsterm	hPa m s ⁻¹
Eu	Euler-Zahl	
f	Funktion (allgemein)	
f	Frequenz	s ⁻¹
f	Coriolis-Parameter	s ⁻¹
f	Footprint-Funktion	*
f_g	Grenzfrequenz	s ⁻¹
f_H	Haude-Faktor	
f_N	Nyquist-Frequenz	s ⁻¹
F	Fluss (allgemein)	*
F	Energiespektrum (allgemein)	*
F_w	Ventilationsstrom	kg m ⁻¹ s ⁻¹
F_x	Fluss eines Skalars	*
Fi	inverse Froude-Zahl	
Fi_o	inverse externe Froude-Zahl	
g	Schwerebeschleunigung	m s ⁻²
g_0	konstante Schwerebeschleunigung	m s ⁻²
h	Höhe eines Volumenelementes	m
h	Wellenhöhe	m
H	Wassertiefe	m
I	langwellige Strahlung	W m ⁻²
I_{\downarrow}	einfallende langwellige Strahlung, Gegenstrahlung	W m ⁻²
I_{\uparrow}	langwellige Ausstrahlung	W m ⁻²
I^*	langwellige Strahlungsbilanz	W m ⁻²
k	Wellenzahl	m ⁻¹
k	Absorptionskoeffizient	m ⁻¹
k	Reaktionsrate	*
K	turbulenter Diffusionskoeffizient (allgemein)	m ⁻² s ⁻¹
K_E	turbulenter Diffusionskoeffizient für latente Wärme	m ⁻² s ⁻¹
K_H	turbulenter Diffusionskoeffizient für fühlbare Wärme	m ⁻² s ⁻¹
K_m	turbulenter Diffusionskoeffizient für Impuls	m ⁻² s ⁻¹
K_{\downarrow}	einfallende kurzwellige Strahlung (am Boden), Globalstrahlung	W m ⁻²
$K_{\downarrow\text{extr}}$	extraterrestrische Strahlung	W m ⁻²
K_{\uparrow}	reflektierte kurzwellige Strahlung (am Boden), Reflexstrahlung	W m ⁻²
l	Mischungsweg	m
L	Obukhov-Länge	m
L	charakteristische Länge	m
L	Abstandskonstante	m
L_h	horizontale charakteristische Länge	m
L_s	Scherungsparameter	m
L_z	vertikale charakteristische Länge	m
LAI	Leaf-Area-Index, Blattflächenindex	m ² m ⁻²
m	Mischungsverhältnis	kg kg ⁻¹
n	dimensionslose Frequenz	
N	Niederschlag	mm
N	Brunt-Väisälä-Frequenz	Hz

N	Bedeckungsgrad	
N	Dissipationsrate (allgemein)	*
Nu	Nusselt-Zahl	
Og	Ogivenessfunktion	*
p	Luftdruck	hPa
p_0	Luftdruck auf Meeresspiegelhöhe	hPa
p'	Druckschwankung	hPa
P_{WKA}	Leistung einer Windkraftanlage	W
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Pr	Prandtl-Zahl	
Pr_t	turbulente Prandtl-Zahl	
q	spezifische Feuchte	kg kg^{-1}
q_c	spezifischer Beimengungsgehalt	*
q_a	spezifische Feuchte in der Nähe der Unterlage	kg kg^{-1}
q_e	Umrechnungsfaktor spezifische Feuchte in Dampfdruck	$\text{kg kg}^{-1} \text{hPa}^{-1}$
q_s, q_{sat}	spezifische Feuchte bei Sättigung	kg kg^{-1}
q^*	Maßstab für das Mischungsverhältnis	kg kg^{-1}
Q	Quelldichte (allgemein)	*
Q_c	trockene Deposition	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Q_E	latenter Wärmestrom	W m^{-2}
Q_E	latenter Wärmestrom als Wassersäule	mm
Q_G	Bodenwärmestrom	W m^{-2}
Q_H	fühlbarer Wärmestrom	W m^{-2}
Q_{HB}	Auftriebsstrom	W m^{-2}
Q_s^*	Strahlungsbilanz	W m^{-2}
Q_η	Quelldichte der Größe η	*
r	Korrelationskoeffizient	
r_a, r_t	turbulenter atmosphärischer Widerstand	s m^{-1}
r_c	Canopy-Widerstand	s m^{-1}
r_g	Gesamtwiderstand	s m^{-1}
r_{mt}	molekular-turbulenter Widerstand	s m^{-1}
r_{st}	Stomata-Widerstand	s m^{-1}
r_{si}	Stomata-Widerstand des Einzelblattes	s m^{-1}
R	Widerstand	Ω
R	relative Luftfeuchtigkeit	%
R	universelle Gaskonstante	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
R_G	relative Feuchte an der Unterlage	%
R_L	Gaskonstante trockener Luft	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
R_s	relative Feuchte in der Nähe der Unterlage	%
R_W	Gaskonstante von Wasserdampf	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Re	Reynolds-Zahl	
Re_s	Rauigkeits-Reynolds-Zahl	
Rf	Richardson-Fluss-Zahl	
Ri	Richardson-Zahl (Gradient-Richardson-Zahl)	
Ri_B	Bulk-Richardson-Zahl	
Ri_c	kritische Richardson-Zahl	
Ro	Rossby-Zahl	
s	Präzision	*
s_c	Temperaturabhängigkeit der spezifischen Feuchte bei Sättigung	$\text{kg kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
S	Energiespektrum (allgemein)	*
S	Solarkonstante	W m^{-2}

Sc	Schmidt-Zahl	
Sc_t	turbulente Schmidt-Zahl	
Sd	Sonnenscheindauer	h
Sd_0	astronomisch maximal mögliche Sonnenscheindauer	h
Sf	Strahlungsfehler	K
t	Zeit	s
t	Temperatur, Trockentemperatur	°C
t'	Feuchttemperatur	°C
T	Übertragungsfunktion	
T	Temperatur, Temperaturdifferenz	K
T^*	Temperaturschwankung	K
T_*	Temperaturmaßstab	K
T^+	dimensionslose Temperatur	
T_K	Transmissionskoeffizient	
T_0	Oberflächentemperatur	K
T_p	Waveletkoeffizient	*
T_s	Schalltemperatur	K
T_v	virtuelle Temperatur	K
u	Windgeschwindigkeit (allgemein)	$m\ s^{-1}$
u	longitudinale Komponente der Windgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
u_g	Horizontalkomponente des geostrophischen Windes	$m\ s^{-1}$
u_{10}	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	$m\ s^{-1}$
u'	Schwankung der Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
v	laterale Windkomponente	$m\ s^{-1}$
v_g	laterale Komponente des geostrophischen Windes	$m\ s^{-1}$
v'	Schwankung der lateralen Windkomponente	$m\ s^{-1}$
v_D	Depositionsgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
V	charakteristische Geschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
w	Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
w'	Schwankung der Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
w_*	Deardorff- (konvektive) Geschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
w_0	Totzone bei REA-Methode	$m\ s^{-1}$
x	Windwirklänge (fetch)	m
x	horizontale Richtung (Länge)	m
x, X	Messgröße (allgemein)	*
y	horizontale Richtung (Länge, senkrecht zu x)	m
y, Y	Messgröße (allgemein)	
Z	geopotenzielle Höhe	m
Z	Zeitgleichung	min
z	Höhe (allgemein, geometrisch)	m
z_H	Gebäudehöhe	m
z_i	Mischungsschichthöhe	m
z_m	Messhöhe	m
z_R	Referenzhöhe	m
z_0	Rauigkeitshöhe	m
z_{0eff}	effektive Rauigkeitshöhe	m
z_{0E}	fiktive Rauigkeitshöhe für den Dampfdruck	m

z_{0T}	fiktive Rauigkeitslänge für die Temperatur	m
z'	Höhe (aerodynamisch)	m
z^+	dimensionslose Höhe	
z_*	Höhe der rauen Unterschicht	m
α	Anströmwinkel	°
α_{pt}	= 1,25 Priestley-Taylor-Koeffizient	
β	Kolmogorov-Konstante (allgemein)	
β_T	Obukhov-Corrsin-Konstante (allgemein)	
γ	Psychrometerkonstante	hPa K ⁻¹ , K ⁻¹
γ	Faktor in O'KEYPS-Formel	
Γ	Profilkoeffizient	m s ⁻¹
Γ_d	trockenadiabatischer Temperaturgradient	K m ⁻¹
δ	Höhe der internen Grenzschicht	m
δ	Höhe der molekular-turbulenten (viskosen) Unterschicht	m
δ	Deklination	°
δ_{ij}	Kronecker-Symbol	
δ_T	Dicke der thermischen internen Grenzschicht	m
δ_T	Dicke der molekularen Temperaturgrenzschicht	m
δ_T^+	dimensionslose Dicke der molekularen Temperaturgrenzschicht	m
δ_w	Dicke der Verwirbelungsschicht	m
Δc	Konzentrationsdifferenz	*
Δe	Dampfdruckdifferenz	hPa
ΔP	charakteristische Druckdifferenz	hPa
ΔT	Temperaturdifferenz	K
Δu	Windgeschwindigkeitsdifferenz	m s ⁻¹
Δz	Höhendifferenz	m
ΔQ_S	Energiequelle bzw. -senke	W m ⁻²
ΔS_w	Wasserquelle bzw. -senke	mm
Δ_z	charakteristischer vertikaler Gradient	*
ε	Energiedissipation	m ² s ⁻³
ε	kleiner Messfehler	*
ε_{IR}	infrarotes Emissionsvermögen	
ε_{ijk}	Levi-Civita-Symbol (ε -Tensor)	
ζ	Obukhov-Parameter (= z/L)	
η	Messgröße	*
θ	potenzielle Temperatur	K
θ_v	virtuelle potenzielle Temperatur	K
κ	von-Kármán-Konstante	
λ	Verdampfungswärme von Wasser	J kg ⁻¹
λ	geographische Länge	°
λ_F	Flächenanteil der Frontseite der Gebäude	
λ_P	Anteil der bebauten Fläche an Gesamtfläche	
Λ	lokale Obukhov-Länge	m
Λ_u	Eulerscher turbulenter Längenmaßstab für den Horizontalwind	m
Λ_x	Rampenstrukturparameter	m
μ	dynamische Zähigkeit	kg m ⁻¹ s ⁻¹
μ	Stabilitätsparameter der atmosphärischen Grenzschicht	
ν	kinematische Zähigkeit	m ² s ⁻¹
ν_T	thermischer Diffusionskoeffizient	m ² s ⁻¹
ξ	Skalar (allgemein)	*

ξ	Zeitverschiebung	s
ρ	Luftdichte	kg m^{-3}
ρ'	Schwankungen der Luftdichte	kg m^{-3}
ρ_c	Partialdichte	$\text{kg}^1 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$
σ_{cH}	Bedeckungsgrad an hohen Wolken	
σ_{cL}	Bedeckungsgrad an tiefen Wolken	
σ_{cM}	Bedeckungsgrad an mittelhohen Wolken	
σ_c	Standardabweichung der Konzentration	*
σ_{SB}	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
σ_T	Standardabweichung der Temperatur	K
σ_u	Standardabweichung der longitudinalen Windgeschwindigkeit	m s^{-1}
σ_v	Standardabweichung der lateralen Windgeschwindigkeit	m s^{-1}
σ_w	Standardabweichung der vertikalen Windgeschwindigkeit	m s^{-1}
σ_θ	Standardabweichung der potenziellen Temperatur	K
σ_φ	Standardabweichung der Windrichtung	°
τ	Taupunkttemperatur	K
τ	Schubspannung	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
τ	Zeitkonstante	s
Φ	Geopotenzial	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
φ	geographische Breite	°
φ_E	universelle Funktion für den latenten Wärmestrom	
φ_H	universelle Funktion für den fühlbaren Wärmestrom	
φ_m	universelle Funktion für den Impulsaustausch	
φ_T	universelle Funktion für den Temperaturstruktur- funktionsparameter	
φ_ε	universelle Funktion für die Energiedissipation	
φ_*	Korrekturfunktion für raue Unterschicht	
χ	Skalar (allgemein)	*
ψ	Integral der universellen Funktion	
Ψ	Höhenwinkel der Sonne	°
ω	Kreisfrequenz	
ω	Stundenwinkel	°
Ω	Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation	s^{-1}
Indizes:		
L	Luft	
W	Wasser	

Anmerkung

*Dimension entsprechend Verwendung der Größe