
Thomas Foken · Matthias Mauder

Angewandte Meteorologie

Mikrometeorologische Methoden

4. Auflage

 Springer Spektrum

Thomas Foken
Bayreuther Zentrum für Ökologie und
Umweltforschung, Universität Bayreuth
Bayreuth, Deutschland

Matthias Mauder
Institut für Hydrologie und Meteorologie,
Technische Universität Dresden
Tharandt, Deutschland

ISBN 978-3-662-68332-3 ISBN 978-3-662-68333-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68333-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2003, 2006, 2016, 2024

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Simon Shah-Rohlfis

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Grundlagen	1
1.1 Mikrometeorologie	1
1.2 Atmosphärische Maßstäbe	6
1.3 Atmosphärische Grenzschicht	8
1.4 Energie- und Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche	11
1.4.1 Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche	12
1.4.2 Energiebilanz an der Erdoberfläche	17
1.4.3 Bodenwärmestrom und Bodenwärmespeicherung	21
1.4.4 Turbulente Austauschströme	25
1.5 Wasserbilanzgleichung	30
Literatur	32
2 Grundgleichungen der atmosphärischen Turbulenz	41
2.1 Bewegungsgleichung	41
2.1.1 Navier–Stokes-Gleichung für mittlere Bewegung	42
2.1.2 Turbulente Bewegungsgleichung	43
2.1.3 Schließungsansätze	48
2.2 Gleichung der turbulenten kinetischen Energie	51
2.3 Fluss-Gradient-Ähnlichkeit	53
2.3.1 Profilgleichungen für neutrale Schichtung	53
2.3.2 Integration der Profilgleichungen – Rauigkeitslänge und Verschiebungshöhe	56
2.3.3 Monin–Obukhov’sche Ähnlichkeitstheorie	62
2.3.4 Bowen-Verhältnis Ähnlichkeit	73
2.4 Fluss-Varianz-Ähnlichkeit	74
2.5 Turbulenzspektrum	77
2.6 Atmosphärische Grenzschicht	85
2.6.1 Mischungsschichthöhe	85
2.6.2 Widerstandsgesetz	86
2.6.3 Integrale Turbulenzcharakteristiken	87
Literatur	88

3	Besonderheiten der bodennahen Turbulenz	97
3.1	Eigenschaften der Unterlage.	97
3.1.1	Rauigkeit – ergänzende Anmerkungen	98
3.1.2	Verschiebungshöhe – ergänzende Anmerkungen	100
3.1.3	Profile in Pflanzenbeständen	102
3.2	Interne Grenzschichten.	105
3.2.1	Definition.	105
3.2.2	Experimentelle Befunde	109
3.2.3	Thermische interne Grenzschicht	110
3.2.4	Das „Blending-height“-Konzept	112
3.2.5	Praktische Bedeutung interner Grenzschichten	113
3.3	Hindernisse.	114
3.4	Footprint.	117
3.4.1	Definition.	117
3.4.2	Footprint-Modelle	118
3.4.3	Anwendung von Footprint-Modellen	121
3.4.4	Environmental Response Function	123
3.5	Hohe Vegetation	124
3.5.1	Verhalten meteorologischer Größen im Wald	125
3.5.2	Flüsse gegen den Gradienten – kohärente Strukturen.	126
3.5.3	Raue Unterschicht – Verwirbelungsschicht.	132
3.5.4	Kopplung zwischen Atmosphäre und Pflanzenbeständen.	135
3.6	Advektion	139
3.7	Bedingungen bei stabiler Schichtung.	142
3.8	Schließung der Energiebilanz.	145
	Literatur.	149
4	Experimentelle Bestimmung des Energie- und Stoffaustausches	167
4.1	Profilmethode	167
4.1.1	Profilmethode mit zwei Messhöhen	168
4.1.2	Profilmessung mit mehreren Messhöhen	178
4.1.3	Potenzansätze	181
4.2	Eddy-Kovarianz-Methode	184
4.2.1	Allgemeine Grundlagen	184
4.2.2	Messtechnische Grundlagen	186
4.2.3	Anzuwendende Korrekturverfahren	189
4.2.4	Nicht oder nur mit Vorsicht anzuwendende Korrekturverfahren.	198
4.2.5	Qualitätssicherung.	201
4.2.6	Ergänzen von Datenlücken	204
4.2.7	Gesamteinschätzung	206
4.3	Disjunct Eddy-Kovarianz-Methode (DEC)	208
4.4	Fluss-Varianz-Beziehungen	209
4.5	Akkumulationsverfahren	211
4.5.1	Eddy-Akkumulations-Methode (EA)	211

4.5.2	Relaxed Eddy-Akkumulations Methode (REA)	212
4.5.3	Hyperbolische Relaxed Eddy-Akkumulations Methode (HREA)	215
4.5.4	Surface-Renewal-Methode	216
4.6	Flüsse chemischer Beimengungen	219
	Literatur	225
5	Modellierung des Energie- und Stoffaustausches.	239
5.1	Energiebilanzverfahren.	239
5.1.1	Bestimmung der potenziellen Verdunstung.	240
5.1.2	Bestimmung der aktuellen Verdunstung	243
5.1.3	Bestimmung aus Routine-Wetterbeobachtungen	247
5.2	Hydrodynamische Mehrschichtenmodelle	248
5.3	Widerstandsansätze.	250
5.4	Modellierung für Wasserflächen	255
5.5	Grenzschichtmodellierung	256
5.5.1	Prognostische Modelle für die Mischungsschichthöhe	256
5.5.2	Parametrisierungen für das Windprofil in der Grenzschicht	257
5.6	Large Eddy-Simulation.	258
5.7	Flächenmittelung	260
5.7.1	Einfache Flächenmittelungsverfahren.	262
5.7.2	Aufwändige Flächenmittelungsverfahren	263
5.7.3	Modellkopplung	265
	Literatur	267
6	Messtechnik	275
6.1	Datenerfassung	275
6.1.1	Prinzip der digitalen Datenerfassung	276
6.1.2	Signalabtastung	277
6.1.3	Übertragungsfunktionen	280
6.1.4	Trägheit eines Messsystems	281
6.2	Anpassung der Messgeräte an das Messobjekt	284
6.2.1	Anpassung an den Maßstab atmosphärischer Prozesse	285
6.2.2	Bewegte Messsysteme	287
6.3	Messung meteorologischer Elemente.	288
6.3.1	Strahlungsmessung	288
6.3.2	Windmessung	292
6.3.3	Temperatur- und Feuchtemessung	299
6.3.4	Niederschlagsmessungen	307
6.3.5	Indirekte Messverfahren	308
6.3.6	Messungen im Erdboden.	314
6.3.7	Weitere Messmethoden	320

6.4	Qualitätsmanagement	322
6.4.1	Messplanung	322
6.4.2	Qualitätskontrolle	324
6.4.3	Messgerätevergleiche	328
	Literatur	330
7	Mikroklimatologie	341
7.1	Klimatologische Maßstäbe	341
7.2	Herausbildung lokaler Klimate.	342
7.2.1	Kleinräumige Veränderlichkeit von Klimaelementen	343
7.2.2	Lokale Klimazonen	344
7.3	Mikroklimatologisch relevante Zirkulationen	349
7.3.1	Land-Seewind-Zirkulation	349
7.3.2	Berg-Talwind-Zirkulation	350
7.4	Lokale Kaltluftabflüsse.	351
7.5	Landnutzungsänderungen und Lokalklima	354
7.5.1	Änderung der Oberflächenrauigkeit	355
7.5.2	Änderung der Verdunstung	356
7.5.3	Änderung der Albedo	357
7.5.4	Degradation	358
7.6	Mikroklimatologische Messungen	359
	Literatur	360
8	Ausgewählte praktische Anwendungen	365
8.1	Ausbreitung von Luftbeimengungen	365
8.2	Meteorologische Bedingungen der Windenergienutzung	369
8.3	Schallausbreitung in der Atmosphäre	370
8.4	Human-Biometeorologie	372
8.5	Perspektiven der Angewandten Meteorologie	376
	Literatur	377
	Anhang	381
	Stichwortverzeichnis	425