

---

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

<b>1 Allgemeine Grundlagen</b> .....	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
<b>2 Grundgleichungen der atmosphärischen Turbulenz</b> .....	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

<b>3</b>	<b>Besonderheiten der bodennahen Turbulenz</b> . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Experimentelle Bestimmung des Energie- und Stoffaustausches</b> . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Modellierung des Energie- und Stoffaustausches.</b> . . . . .	<b>239</b>
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
<b>6</b>	<b>Messtechnik</b> . . . . .	<b>275</b>
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
<b>7</b>	<b>Mikroklimatologie</b> . . . . .	<b>341</b>
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
<b>8</b>	<b>Ausgewählte praktische Anwendungen</b> . . . . .	<b>365</b>
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
	<b>Anhang</b> . . . . .	<b>381</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>425</b>