

Thomas Foken

# **Angewandte Meteorologie**

Mikrometeorologische Methoden

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 112 Abbildungen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Allgemeine Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
1.1 Mikrometeorologie .....	1
1.2 Atmosphärische Maßstäbe .....	5
1.3 Atmosphärische Grenzschicht .....	7
1.4 Energiebilanz an der Erdoberfläche .....	9
1.4.1 Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche .....	12
1.4.2 Bodenwärmestrom und Bodenwärmespeicherung .....	16
1.4.3 Turbulente Austauschströme .....	19
1.5 Wasserbilanzgleichung .....	24
<b>2 Grundgleichungen der atmosphärischen Turbulenz</b> .....	<b>27</b>
2.1 Bewegungsgleichung .....	27
2.1.1 Navier-Stokes-Gleichung für mittlere Bewegung .....	27
2.1.2 Turbulente Bewegungsgleichung .....	28
2.1.3 Schließungsansätze .....	34
2.2 Gleichung der turbulenten kinetischen Energie .....	38
2.3 Fluss-Gradient-Ähnlichkeit .....	39
2.3.1 Profilgleichungen für neutrale Schichtung .....	39
2.3.2 Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie .....	45
2.3.3 Bowen-Verhältnis Ähnlichkeit .....	52
2.4 Fluss-Varianz-Ähnlichkeit .....	52
2.5 Turbulenzspektrum .....	55
<b>3 Besonderheiten der bodennahen Turbulenz</b> .....	<b>63</b>
3.1 Eigenschaften der Unterlage .....	63

3.1.1	Rauhigkeit .....	63
3.1.2	Verschiebungshöhe.....	69
3.1.3	Profile in Pflanzenbeständen .....	71
3.2	Interne Grenzschichten.....	73
3.2.1	Definition.....	73
3.2.2	Experimentelle Befunde .....	76
3.2.3	Thermische interne Grenzschicht .....	79
3.2.4	Das „Blending-height“-Konzept.....	80
3.2.5	Praktische Bedeutung interner Grenzschichten .....	81
3.3	Hindernisse.....	82
3.4	Footprint.....	84
3.4.1	Definition.....	84
3.4.2	Footprint-Modelle .....	85
3.4.3	Anwendung von Footprint-Modellen .....	87
3.5	Hohe Vegetation.....	90
3.5.1	Verhalten meteorologischer Größen im Wald .....	90
3.5.2	Flüsse gegen den Gradienten .....	92
3.5.3	Raue Unterschicht .....	93
3.5.4	Turbulente Strukturen in und über dem Wald .....	94
3.5.5	Verwirbelungsschicht Analogie .....	98
3.5.6	Kopplung zwischen Atmosphäre und Pflanzenbeständen .....	99
3.6	Bedingungen bei stabiler Schichtung .....	101
3.7	Schließung der Energiebilanz.....	104
<b>4</b>	<b>Experimentelle Bestimmung des Energie- und Stoffaustausches.....</b>	<b>109</b>
4.1	Eddy-Kovarianz-Methode .....	109
4.1.1	Messtechnische Grundlagen .....	110
4.1.2	Korrekturverfahren .....	113
4.1.3	Qualitätssicherung .....	122
4.1.4	Ergänzen von Datenlücken.....	125
4.1.5	Gesamteinschätzung.....	126
4.2	Profilmethode .....	127
4.2.1	Bulk-Verfahren.....	128
4.2.2	Bowen-Verhältnis-Methode .....	130
4.2.3	Modifizierte Bowen-Verhältnis-Methode .....	133
4.2.4	Weitere Parametrisierungsverfahren .....	135
4.2.5	Profilauswertung .....	137
4.2.6	Qualitätssicherung .....	140
4.2.7	Potenzansätze .....	141
4.3	Fluss-Varianz-Beziehungen .....	143
4.4	Akkumulationsverfahren .....	145
4.4.1	Eddy-Akkumulations-Methode (EA) .....	145
4.4.2	Relaxed Eddy-Akkumulations Methode (REA) .....	145
4.4.3	Disjunct Eddy-Kovarianz-Methode (DEC) .....	149
4.4.4	Boden Renewal-Methode .....	150
4.5	Flüsse chemischer Beimengungen.....	152

---

<b>5</b>	<b>Modellierung des Energie- und Stoffaustausches</b> .....	<b>157</b>
5.1	Energiebilanzverfahren.....	157
5.1.1	Bestimmung der potenziellen Verdunstung.....	158
5.1.2	Bestimmung der aktuellen Verdunstung.....	162
5.1.3	Bestimmung aus Routine-Wetterbeobachtungen.....	167
5.2	Hydrodynamische Mehrschichtenmodelle.....	168
5.3	Widerstandsansätze.....	171
5.4	Modellierung für Wasserflächen.....	175
5.5	Modellierung in großmaßstäblichen Modellen.....	176
5.6	Large Eddy-Simulation.....	179
5.7	Flächenmittelung.....	180
5.7.1	Einfache Flächenmittelungsverfahren.....	181
5.7.2	Aufwändige Flächenmittelungsverfahren.....	183
5.7.3	Modellkopplung.....	185
<b>6</b>	<b>Messtechnik</b> .....	<b>187</b>
6.1	Datenerfassung.....	187
6.1.1	Prinzip der digitalen Datenerfassung.....	187
6.1.2	Signalabtastung.....	189
6.1.3	Übertragungsfunktionen.....	192
6.1.4	Trägheit eines Messsystems.....	193
6.2	Messung meteorologischer Elemente.....	196
6.2.1	Strahlungsmessungen.....	199
6.2.2	Windmessungen.....	202
6.2.3	Temperatur- und Feuchtemessungen.....	209
6.2.4	Niederschlagsmessungen.....	217
6.2.5	Indirekte Messverfahren.....	218
6.2.6	Sonstige Messtechniken.....	221
6.3	Qualitätssicherung.....	226
6.3.1	Qualitätskontrolle.....	228
6.3.2	Messgerätevergleiche.....	229
<b>7</b>	<b>Mikroklimatologie</b> .....	<b>233</b>
7.1	Klimatologische Maßstäbe.....	233
7.2	Kleinräumige Veränderlichkeit von Klimaelementen.....	235
7.3	Mikroklimatologisch relevante Zirkulationen.....	236
7.3.1	Land-Seewind-Zirkulation.....	236
7.3.2	Berg-Talwind-Zirkulation.....	236
7.4	Lokale Kaltluftabflüsse.....	238
7.5	Mikroklimatologische Messungen.....	240
<b>8</b>	<b>Angewandte Meteorologie</b> .....	<b>243</b>
8.1	Richtlinien im Bereich der Angewandten Meteorologie.....	243
8.2	Beispiele aus dem Bereich der Angewandten Meteorologie.....	245
8.2.1	Ausbreitung von Luftbeimengungen.....	245
8.2.2	Meteorologische Bedingungen der Windenergienutzung.....	248

8.2.3	Schallausbreitung in der Atmosphäre .....	249
8.2.4	Human-Biometeorologie .....	251
8.2.5	Klimabewertung im Planungsprozess.....	254
8.3	Perspektiven der Angewandten Meteorologie.....	254
<b>Anhang</b>	.....	<b>257</b>
A1	Weiterführende Monografien.....	257
A2	Gebrauch der SI-Einheiten.....	258
A3	Konstanten und wichtige Parameter .....	259
A4	Ergänzende Gleichungen .....	261
	Berechnung astronomischer Größen .....	261
	Universelle Funktionen .....	263
	Integrale Turbulenzcharakteristiken in der Bodenschicht .....	267
A5	Übersicht zu Experimenten.....	268
A6	Meteorologische Messstationen.....	270
A7	Glossar .....	271
A8	Deutsch-Englisches-Wörterverzeichnis.....	274
<b>Literatur</b>	.....	<b>283</b>
<b>Quellenverzeichnis</b>	.....	<b>315</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>319</b>