

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Übersicht	1
1.2	Modernes naturwissenschaftliches Klimaverständnis	4
1.3	Modelle in der Klimaforschung	5
<b>2</b>	<b>Klimarelevante Prozesse</b>	<b>9</b>
2.1	Energie und Strahlung	10
2.1.1	Strahlung	10
2.1.2	Wärmetransporte	15
2.1.3	Transport von Energie im Wasserkreislauf	15
2.2	Dynamik der Atmosphäre	16
2.2.1	Erzeugung von Bewegung	16
2.2.2	Vertikalstruktur der Atmosphäre	17
2.2.3	Allgemeine Zirkulation	21
2.2.4	Regionale Strukturen	28
2.2.5	Turbulenz	29
2.2.6	Aerosolpartikel	31
2.2.7	Wolken und Niederschlag	33
2.3	Zirkulation des Ozeans	34
2.3.1	Meeresoberflächenströmungen	35
2.3.2	Tiefenzirkulation	37
2.3.3	Wellen und Wirbel	40
2.4	Spurenstoffkreisläufe	41
2.4.1	Wasserdampf	42
2.4.2	Kohlendioxid	43
2.4.3	Methan	46
2.4.4	Stickstoffverbindungen	47
2.5	Kryosphäre	47
<b>3</b>	<b>Natürliche Klimavariabilität</b>	<b>51</b>
3.1	Jahres- und Tagesgang	52
3.2	Wetter	56
3.3	Interannuale Klimaschwankungen	61
3.3.1	ENSO-Phänomen	61
3.3.2	Nordatlantische Oszillation	64
3.3.3	Temperaturentwicklung seit 1900	65
3.3.4	Die Frage der Sonnenflecken	66
3.4	Homogenitätsproblematik	68
3.5	Historische Klimavariationen	69
3.6	Paläoklimatologie	71

3.6.1 Vereisungen . . . . .	71
3.6.2 Klimarekonstruktion der Kalt- und Warmzeiten . . . . .	72
3.6.3 Milanković-Theorie . . . . .	76
<b>4 Konzeptionelle Modelle</b> . . . . .	<b>79</b>
4.1 Klimazonen . . . . .	79
4.2 Ein exemplarisches Energiebilanzmodell . . . . .	81
4.2.1 Vereinfachte Bilanzgleichung für Energie . . . . .	81
4.2.2 Diskretisierung . . . . .	82
4.2.3 Schließung der Gleichung . . . . .	82
4.2.4 Berechnungen: Integration . . . . .	84
4.3 Physikalisch orientierte Modelle . . . . .	85
4.4 Nichtlinearität und Chaos . . . . .	88
4.5 Fluktuationen als stochastische Vorgänge . . . . .	90
4.6 Wechselwirkungen verschiedener Prozesse . . . . .	93
4.6.1 Gedämpftes System mit Störungen . . . . .	93
4.6.2 Wirkung von positiven Rückkopplungen . . . . .	96
<b>5 Grundlagen von Strömungsmodellen</b> . . . . .	<b>99</b>
5.1 Grundgleichungen der Strömungs- und Thermodynamik . . . . .	99
5.1.1 Zustandsvariablen . . . . .	99
5.1.2 Gesetz der Massenerhaltung . . . . .	100
5.1.3 Prinzip der Energieerhaltung . . . . .	101
5.1.4 Impulserhaltung . . . . .	102
5.1.5 Massenbilanzen für Beimengungen . . . . .	102
5.1.6 Zustandsgleichungen . . . . .	103
5.1.7 Zusammenfassung . . . . .	104
5.2 Diskretisierung . . . . .	105
5.2.1 Räumliche Diskretisierung . . . . .	105
5.2.2 Zeitliche Diskretisierung . . . . .	107
5.3 Parametrisierung und subskalige Prozesse . . . . .	108
5.3.1 Schließungsproblem . . . . .	108
5.3.2 Beispiel 1: Turbulenz . . . . .	109
5.3.3 Beispiel 2: Konvektion und Wolkenbildung . . . . .	110
5.3.4 Kritische Übersicht . . . . .	111
5.4 Numerische Integration . . . . .	114
<b>6 Realitätsnahe Modelle des Klimasystems</b> . . . . .	<b>117</b>
6.1 Wettervorhersagemodelle . . . . .	117
6.2 Modelle zur Klimasimulation . . . . .	124
6.2.1 Methodik von Simulationen . . . . .	124
6.2.2 Wechselwirkung von Atmosphäre und Ozean . . . . .	125
6.2.3 Klimadrift und Flußkorrektur . . . . .	127
6.2.4 Technische Details . . . . .	128
6.2.5 Modellierung von Stoffkreisläufen und Biosphäre . . . . .	129

6.3	Simulationen von Klimazuständen . . . . .	133
6.3.1	Kontrollsimulationen des derzeitigen Klimas . . . . .	134
6.3.2	Rekonstruktion von Paläoklimaten . . . . .	141
6.3.3	Klimate anderer Planeten . . . . .	145
6.3.4	Regionale und lokale Strukturen . . . . .	145
6.4	Numerische Experimente mit Modellen . . . . .	149
6.4.1	Zielsetzung . . . . .	149
6.4.2	Wirksamkeit von Prozessen . . . . .	149
6.4.3	Einschwingzeit der Atmosphäre . . . . .	151
6.4.4	Sensitivität gegenüber Randbedingungen . . . . .	152
6.5	Anwendung zur Klimavorhersage . . . . .	155
6.5.1	Prognosen des ENSO-Phänomens . . . . .	155
6.5.2	Großskalige Ölbrände in Kuwait . . . . .	156
6.6	Beurteilung der Klimamodelle . . . . .	157
<b>7</b>	<b>Anthropogene Klimaänderung</b> . . . . .	<b>163</b>
7.1	Übersicht . . . . .	163
7.2	Emissions- und Konzentrations-Szenarien . . . . .	164
7.2.1	Szenarien zukünftiger Emissionen . . . . .	164
7.2.2	Erwartete Konzentrationen der Treibhausgase . . . . .	166
7.3	Klimaszenarien realitätsnaher Modelle . . . . .	167
7.3.1	Transiente Szenarienrechnungen . . . . .	167
7.3.2	Ergebnisse eines exemplarischen Klima-Szenarios . . . . .	168
7.3.3	Problem Kaltstart . . . . .	173
7.3.4	2 × CO <sub>2</sub> Simulationen . . . . .	175
7.3.5	Informationswert von Szenarienrechnungen . . . . .	176
7.3.6	Kritische Bewertung der Szenarien . . . . .	178
7.4	Nachweis anthropogener Klimabeeinflussung . . . . .	180
7.4.1	Zielsetzung . . . . .	180
7.4.2	Natürliche Variabilität . . . . .	182
7.4.3	Gewichtungsmuster und Nachweisvariable . . . . .	184
7.4.4	Nachweis . . . . .	186
7.4.5	Beurteilung . . . . .	187
7.5	Lokale und regionale Szenarien . . . . .	188
7.5.1	Hochaufgelöste Zeitscheibenexperimente . . . . .	188
7.5.2	Regionalmodelle . . . . .	191
7.5.3	Empirische Modelle . . . . .	197
7.5.4	Implikationen . . . . .	200
<b>8</b>	<b>Klima und Gesellschaft</b> . . . . .	<b>203</b>
8.1	Übersicht . . . . .	203
8.2	Historischer Überblick : gesellschaftliche Vorstellungen zum Einfluß von Klima . . . . .	204
8.3	Klimafolgenforschung . . . . .	207
8.3.1	Grundproblematik . . . . .	207