

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Übersicht	1
1.2 Modernes naturwissenschaftliches Klimaverständnis	4
1.3 Modelle in der Klimaforschung	5
2 Klimarelevante Prozesse	9
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
3 Natürliche Klimavariabilität	51
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
4 Konzeptionelle Modelle	79
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
5 Grundlagen von Strömungsmodellen	99
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
6 Realitätsnahe Modelle des Klimasystems	117
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
7 Anthropogene Klimaänderung	163
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 $2 \times \text{CO}_2$ -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 Hocho aufgelöste Zeitscheibenexperimente	188
7.5.2 Regionalmodelle	191
7.5.3 Empirische Modelle	197
7.5.4 Implikationen	200
8 Klima und Gesellschaft	203
8.1 Übersicht	203
8.2 Historischer Überblick : gesellschaftliche Vorstellungen zum Einfluß von Klima	204
8.3 Klimafolgenforschung	207
8.3.1 Grundproblematik	207

8.3.2	Direkt beeinflusste Systeme	208
8.3.3	Indirekt beeinflusste Systeme	212
8.4	Ökonomische Aspekte des Klimawandels	213
8.4.1	Klimaänderung als Kostenfaktor	213
8.4.2	Ein zeitabhängiges Sechs-Komponenten-Modell	214
8.4.3	Beurteilung	220
8.4.4	Übersicht Klimapolitik	222
8.5	Vorstellungen von Klimawandel	223
8.5.1	Problemstellung	223
8.5.2	Natürliche Variabilität versus Kausalitätsdenken	225
8.5.3	Die Kempton-Studie	226
8.5.4	Soziale Interpretationsmechanismen	227
9	Résumé	231
10	Anhang	233
11	Literatur	239
	Stichwortverzeichnis	248