

Hans-Joachim Lange

Die Physik des Wetters und des Klimas

Ein Grundkurs zur Theorie des Systems Atmosphäre



Reimer

Hans-Joachim Lange

Die Physik des Wetters und des Klimas

Ein Grundkurs zur Theorie
des Systems Atmosphäre

D III 284

Dk: 551.511.33, 551.511.32, 551.510.522
551.521, 551.582,

347/4/84 INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHÄUSER STR. 2 - 30419 HANNOVER

Dietrich Reimer Verlag Berlin

INHALTSVERZEICHNIS

1	THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN	
1.1	Massenpunkte und Luftteilchen	1
	(a) HAMILTON-THEORIE UND GIBBS-THEORIE	1
	(b) EXTENSIVE UND INTENSIVE GRÖSSEN	3
1.2	Thermodynamische Mittelung und Luftteilchen	5
	(a) GIBBS'SCHE FUNDAMENTALFORM DES TROCKENEN LUFTEILCHENS	5
	(b) ENERGIEARTEN UND ENERGIEFORMEN, THERMODYNAMISCHES GLEICHGEWICHT	7
	(c) GIBBS'SCHE FUNDAMENTALFORM DES FEUCHTEN LUFTEILCHENS	10
	(d) ERSTE STATISTISCHE INTERPRETATION	13
1.3	Chemische Energie und Oberflächenenergie	14
1.4	Hauptsätze und Reduzierte Gibbsformen	16
	(a) HAUPTSÄTZE ALS AUSSAGEN ZU ENERGIE- UND ENTROPIEQUELLEN	16
	(b) WÄRME - UND ENTROPIESTROM BEI THERMISCHEM GLEICHGEWICHT	17
	(c) DIE CLAUSIUS'SCHE WÄRME UND DER ZWEITE HAUPTSATZ	18
	(d) DER ERSTE HAUPTSATZ ALS REDUZIERTER GIBBSFORM, SYSTEME MIT REIBUNG	18
	(e) DER ERSTE HAUPTSATZ ALS REDUZIERTER GIBBSFORM, SYSTEME MIT REIBUNG	21
	(f) DER BEZUG ZUR HYDRODYNAMIK, HEURISTISCHE EINFÜHRUNG	23
1.5	Quasistatische Prozesse und Realisierungen in der Atmosphäre	25
	(a) ATMOSPHÄRISCHE REALISIERUNGS-APPROXIMATION	25
	(b) QUASISTATISCHE PROZESSE	26
1.6	Thermodynamische Potentiale und Legendretransformation	27
1.7	Euler'sche und Gibbs-Duhem'sche Gleichung	31
1.8	Thermodynamische Gleichgewichte und ihre Stabilität	32
	(a) VORBETRACHTUNGEN	32
	(b) ISOLIERTE SYSTEME	34
	(c) OFFENE SYSTEME	38
	(d) ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERE STABILITÄTSBETRACHTUNGEN	41
1.9	Nichtgleichgewichts-Thermodynamik, Übersicht	45
1.10	Lineare Nichtgleichgewichte und ihre Stabilität	47
	(a) ONSAGER-THEORIE	47
	(b) DAS PRIGOGINE-PRINZIP DER MINIMALEN ENTROPIEPRODUKTION	49
1.11	Nichtlineare Nichtgleichgewichte und ihre Stabilität	51
	(a) DIE LIAPUNOV-METHODE	51
	(b) EXCESS-GRÖSSEN ALS DEFINITE FUNKTIONEN	54
	(c) ZUSAMMENFASSUNG, DISSIPATIVE STRUKTUREN	56
1.12	Molekularkinetische Interpretationen	58
	(a) DIE MAXWELL'SCHE GESCHWINDIGKEITS-VERTEILUNG	58
	(b) STATISTISCHE GLEICHVERTEILUNG DURCH DIFFUSION	59
	(c) NEBENBEDINGUNGEN UND KANONISCHE VERTEILUNG	61
	(d) STATISTISCHE INTERPRETATION DER REVERSIBLEN GASEXPANSION	63

EXKURS: VEKTOREN UND TENSOREN IN DER HYDRODYNAMIK

E.1	Vektor- und Tensoralgebra	65
E.2	Vektor- und Tensoranalysis	71
E.3	Anwendungen in Hydrodynamik und Meteorologie	74
	(a) HORIZONTALER UND VERTIKALER VEKTORKOMPONENTEN	74
	(b) ADVEKTION UND KINEMATIK IN DREI UND ZWEI DIMENSIONEN	76
	(c) ZWEIDIMENSIONALE KINEMATIK UND TENSOR-INVARIANTEN	79
E.4	Die Integralsätze von Gauß und Stokes	82
E.5	Invarianten, Orthogonaltransformation und Eigenwertgleichung	84
2	HYDRODYNAMISCHE GRUNDLAGEN	
2.1	Luftteilchen und Luftpakete	91
2.2	Hydrodynamische Bilanzgleichungen	93
	(a) ALLGEMEINE BILANZGLEICHUNG FÜR RAUMFESTES VOLUMEN	93
	(b) ALLGEMEINE BILANZGLEICHUNG FÜR MATERIELLES VOLUMEN	95
	(c) DIE ENERGIE-BILANZGLEICHUNG	97
	(d) DIE BEWEGUNGSGLEICHUNG ALS IMPULS-BILANZGLEICHUNG. INTERN OFFENE SYSTEME	99
	(e) DIE KONTINUITÄTSGLEICHUNG ALS MASSEN-BILANZGLEICHUNG	101
	(f) HYDRODYNAMISCHE GRUNDGLEICHUNGEN IM RELATIVSYSTEM	102
	(g) BILANZEN FÜR DIE POTENTIELLE, KINETISCHE UND INNERE ENERGIE	104
2.3	Hydrodynamik und Reduzierte Gibbsformen	106
	(a) BEZIEHUNGEN ZWISCHEN HYDRODYNAMIK UND REDUZIRTER THERMODYNAMIK	106
	(b) HOMOGENE UND HETEROGENE THEORIEN	109
2.4	Hydrodynamischer Bezug zur Verallgemeinerten Thermodynamik	110
2.5	Bilanzgleichungen heterogener Systeme	112
	(a) GRUNDBEGRIFFE	112
	(b) MASSENBILANZ	113
	(c) IMPULSBILANZ	113
	(d) ENERGIEBILANZEN	114
	(e) KONTEXT ZUR REDUZIRTE THERMODYNAMIK	116
2.6	Die Entropie-Bilanzgleichung homogener Systeme	117
2.7	Die Entropie-Bilanzgleichung heterogener Systeme	119
	(a) HERLEITUNG	119
	(b) INTERPRETATION	122
	(c) NÄHERE DISKUSSION DES CHEMISCHEN UMWANDLUNGSTERMES	123
	(d) KONTEXT ZUR REALISIERUNGSTHEORIE UND ZUR STRALUNGSTHEORIE	125
3	ANWENDUNGEN DER GRUNDGLEICHUNGEN	
3.1	Das verkürzte Gleichungssystem der großräumigen Atmosphäre	127
	(a) DAS GESCHLOSSENE SYSTEM	127
	(b) "SCALE-ANALYSE" DER GROSSRÄUMIGEN BEWEGUNG	129

3.2 Die Flachwasser-Atmosphäre	131
(a) MODELLGLEICHUNGEN	131
(b) VERGLEICH ZWISCHEN FLACHWASSER- UND HOMOGENER ATMOSPHERE	133
3.3 Darstellungen in natürlichen Koordinaten	135
(a) HORIZONTALBEWEGUNG IN NATÜRLICHEN KOORDINATEN	135
(b) INTERPRETATION DER TANGENTIALGLEICHUNG (ISOTACHENGLEICHUNG)	137
(c) INTERPRETATION DER NORMALGLEICHUNG (ISOGONENGLEICHUNG)	138
(d) STROMLINIEN UND TRAJEKTORIEN, BLATONSCHE GLEICHUNG	139
(e) DIVERGENZ UND VORTICITY IN NATÜRLICHEN KOORDINATEN	141
(f) DER GRADIENTWIND	142
3.4 Drucktendenz, longitudinale und transversale Divergenz	144
(a) KONTINUITÄTSGLEICHUNG UND DRUCKTENDENZ	144
(b) DRUCKTENDENZ UND LONGITUDINALE MASSENDIVERGENZ, QUALITATIV	144
(c) DRUCKTENDENZ UND LONGITUDINALE MASSENDIVERGENZ, QUANTITATIV	146
3.5 Barotropie, Baroklinität und planetare Wellen	149
(a) BAROKLINITÄT UND THERMISCHER WIND	149
(b) BAROTROPE PLANETARE WELLEN	151
(c) BAROKLINE PLANETARE WELLEN UND BAROKLINE INSTABILITÄT	152
(d) DIE STEUERUNG VON ZYKLONEN DURCH DIE PLANETAREN WELLEN	154
3.6 Der Erste Hauptsatz und die statische Stabilität	155
(a) ERSTER HAUPTSATZ IN ENERGIE - UND ENTHALPIEFORM	155
(b) POTENTIELLE TEMPERATUR UND STATISCHE STABILITÄTSKRITERIEN	157
(c) ERSTER HAUPTSATZ IN ENTROPIEFORM	159
(d) "ADIABATENGLEICHUNGEN" DER PHYSIK	159
3.7 Entropiefunktionen	160
3.8 Polytrope Prozesse	162
3.9 Kreisprozesse und Wärmekraftmaschinen	165
3.10 Linearisierte Gleichungen und atmosphärische Wellen	171
(a) STÖRANSATZ UND WELLENTYPEN	171
(b) SCHALLWELLEN	173
(c) EINFACHSTE SCHWEREWELLEN IM FLACHWASSERMODELL	175
(d) ROSSBYWELLEN UND HAURWITZWELLEN	177
(e) VERGLEICH MIT DER LONGITUDINALDIVERGENZ - METHODE	180
3.11 Nichtlineare Wellenlösung der Vorticitygleichung	183
3.12 Barokline und barotrope Instabilität	184
(a) BAROKLINE INSTABILITÄT ALS NEIGUNGS-KONVEKTION	184
(b) INSTABILE BAROKLINE WELLEN	186
(c) INSTABILE BAROTROPE WELLEN	187
3.13 Sphärische Wellen und das Phillips'sche Stromfeld	188
3.14 Allgemeine Übersicht über numerische Modelle	196

3.15 Numerische Modellierung im kartesischen Gitter	199
(a) MODELLGLEICHUNGEN	199
(b) ANFANGSBEDINGUNGEN	201
(c) DISKRETISIERUNG UND RANDBEDINGUNGEN	203
3.16 Numerische Modellierung im sphärischen Gitter	205
(a) MODELLGLEICHUNGEN UND ANFANGSBEDINGUNGEN	205
(b) DISKRETISIERUNG UND RANDBEDINGUNGEN	206
3.17 Sensible Abhängigkeiten in einem sphärischen Flachwassermodell	208
4 DIVERGENZ, WIRBELGRÖSSEN UND QUASIGEOSTROPHISCHE DYNAMIK	
4.1 Divergenz- und Balancegleichung	213
(a) HERLEITUNG DER DIVERGENZGLEICHUNG	213
(b) FILTERUNG VON SCHWEREWELLEN UND BALANCEGLEICHUNG	215
4.2 Vorticitygleichung	216
4.3 Die Gleichungen im "p-System"	217
(a) HORIZONTALE BEWEGUNGSGLEICHUNG UND HYDROSTATISCHE APPROXIMATION	218
(b) KONTINUITÄTSGLEICHUNG	219
(c) ERSTER HAUPTSATZ	219
(d) DIVERGENZGLEICHUNG, BALANCEGLEICHUNG UND VORTICITYGLEICHUNG	220
4.4 "Scaleanalyse" der Balance- und der Vorticitygleichung	221
(a) DIE DIVERGENTE VORTICITYGLEICHUNG	221
(b) DIE DIVERGENZFREIE VORTICITYGLEICHUNG, ROSSBYWELLEN	223
(c) VOLLSTÄNDIGE VORTICITYGLEICHUNG IN LOKALER UND INDIVIDUELLER FORM	224
(d) BALANCEGLEICHUNG	225
4.5 Konsistenzbedingung für die Vorticitygleichung	225
4.6 Das quasisolenoidale System	227
4.7 Das quasigeostrophische System	229
4.8 Qualitative Form der quasigeostrophischen Gleichungen	230
4.9 Diskussion der quasigeostrophischen Primärzirkulation	234
(a) BAROTROPE VORTICITYADVEKTION	234
(b) BAROKLINE ADVEKTIONEN VON VORTICITY UND TEMPERATUR	235
(c) ZUSAMMENFASSUNG	236
4.10 Barokline Sekundärzirkulation und Anpassungsprozesse	237
(a) VORTICITY-TEMPERATUR-KOPPLUNG UND GROSSRÄUMIGE GLEICHGEWICHTE	237
(b) BAROKLINE SEKUNDÄRZIRKULATION UND STABILISIERUNG DER GLEICHGEWICHTE	238
(c) ZUSAMMENFASSUNG UND LENZ'SCHE REGEL	241
4.11 Zur Physik des geostrophisch-hydrostatischen Gleichgewichtes	243
(a) FOLGERUNGEN AUS DER GEOSTROPHISCHEN DIVERGENZ UND VORTICITY	243
(b) GEOSTROPHISCH-HYDROSTATISCHES GLEICHGEWICHT UND PARTIKELMETHODE	245

4.12 Alternative Formen der quasigeostrophischen Gleichungen	246
(a) DIE GEOPOTENTIALTENDENZ-GLEICHUNG ALS ERHALTUNGSGLEICHUNG FÜR DIE QUASIGEOSTROPHISCHE POTENTIELLE VORTICITY	247
(b) UNGEFILTRTE QUASIGEOSTROPHISCHE GLEICHUNGEN	247
(c) DIE OMEGAGLEICHUNG IN DER HOSKIN'SCHEN Q-VEKTOR FORM	249
4.13 Quasigeostrophische Dynamik nach N�vir	250
(a) ISOTROPER LAPLACEOPERATOR IN DEN QUASIGEOSTROPHISCHEN GLEICHUNGEN	250
(b) ZUSAMMENFASSUNG VON BEWEGUNGSGLEICHUNG UND ERSTEM HAUPTSATZ	252
(c) GEOPOTENTIALTENDENZ-, BALANCE- UND SAWYER-ELIASSEN-GLEICHUNG ALS SPEZIALFÄLLE DER N�VIR'SCHEN GLEICHUNG	253
(d) DIE VERALLGEMEINERUNG DES HOSKIN'SCHEN Q-VEKTORS UND DIAGNOSE-GLEICHUNGEN FÜR DIE DREIDIMENSIONALE SEKUNDÄRZIRKULATION	256
4.14 Die Ertel'sche Potentielle Vorticity	257
(a) DIE DREIDIMENSIONALE WIRBELGLEICHUNG	257
(b) DIE ERHALTUNG DER ERTEL'SCHEN POTENTIELLEN VORTICITY	259
(c) ZUSAMMENHANG MIT DER QUASIGEOSTROPHISCHEN POTENTIELLEN VORTICITY	260
(d) PHYSIKALISCHE INTERPRETATION	260
5 DIE FEUCHTE ATMOSPHÄRE	
5.1 Einführung	263
(a) TYPISCHE BERECHNUNGEN IN TROCKENER LUFT	263
(b) BEMERKUNGEN ZUR QUASISTATISCHEN ANNAHME	265
5.2 Zustandsgleichungen und Feuchtemae	266
(a) ABSOLUTE FEUCHTEMASSE	266
(b) ZUSTANDSGLEICHUNG DER FEUCHTLUFT	267
(c) VIRTUELLE TEMPERATUR	268
(d) RELATIVE FEUCHTEMASSE	269
5.3 Enthalpie und individuelle Temperaturgradienten	271
(a) ENTHALPIE DER WOLKENLUFT	271
(b) INDIVIDUELLE TEMPERATURGRADIENTEN FEUCHTER LUFT	273
5.4 Entropie und Feucht-Temperaturen	277
5.5 Instabilitäten im van der Waals'schen Gas	281
5.6 Phasenumwandlungen	283
(a) GLEICHGEWICHTS-PHASENUMWANDLUNGEN	283
(b) NICHTGLEICHGEWICHTS-PHASENUMWANDLUNGEN	287
(c) THEORIE DER MAXWELL'SCHEN GERADEN UND METASTABILE ZUSTÄNDE	289
5.7 Dampfdruckkurve und Clausius-Clapeyron'sche Gleichung	292
5.8 Tripelpunkt und Phasendiagramme	294
5.9 Oberflächenspannung und Gleichgewichtsbeziehungen	295
5.10 Tröpfchenbildung	296
(a) DAMPFDRUCKERHÖHUNG ÜBER TRÖPFCHEN	296
(b) HERDBILDUNG UND KRITISCHER TROPFENRADIUS	298

6	DIE ATMOSPHERISCHE GRENZSCHICHT	
6.1	Scale-Wechselwirkung und Energietransfer	301
	(a) TURBULENZ UND REYNOLDS-TERM	301
	(b) TEST DES REYNOLDS'SCHEN POSTULATES	303
	(c) VERANSCHAULICHUNG DER NICHTLINEAREN SKALENWECHSELWIRKUNG	306
6.2	Gewöhnliche und gewogene Mittelung	308
6.3	Die "turbulenten" Energiegleichungen	311
6.4	Auftrieb und vertikaler Wärmestrom	315
	(a) BOUSSINESQ-APPROXIMATION, DEFINITION	315
	(b) VERTIKALE BEWEGUNGSGLEICHUNG IN BOUSSINESQ-APPROXIMATION, AUFTRIEB	316
	(c) DIE ENERGIEGLEICHUNGEN IN BOUSSINESQ-APPROXIMATION	316
	(d) EINFÜHRUNG DES TURBULENTEN ENTHALPIETRANSPORTES	318
	(e) BRUNT-VÄISÄLÄ-SCHWINGUNG UND VERTIKALER WÄRMESTROM	320
6.5	Unterteilung der atmosphärischen Grenzschicht	322
6.6	Die Prandtl-Schicht	322
	(a) DIE "HAUPTGLEICHUNG" DER PRANDTL-SCHICHT	322
	(b) DAS LOGARITHMISCHE PROFIL	324
	(c) ÄHNLICHKEITSTHEORIE UND MISCHUNGSWEGKONZEPT	325
	(d) DIABATISCHE PROFILE	326
	(e) DIE "KEYPS"-GLEICHUNG	330
6.7	Die lineare Ekman-Schicht	336
	(a) DIE EKMAN-SPIRALE	336
	(b) DIE REIBUNGSBEDINGTE SEKUNDÄRZIRKULATION	338
	(c) LINEARES EKMAN-PUMPING NACH CHARNEY UND ELIASSEN	342
6.8	Die nichtlineare Ekman-Schicht	346
	(a) NICHTLINEARES EKMAN-PUMPING NACH FORTAK UND LANGE	346
	(b) GRENZSCHICHT-STRAHLSTRÖME ("LOW LEVEL JETS")	352
7	STRAHLUNG UND ATMOSPHERISCHE ENERGETIK	
7.1	Strahlung und Thermodynamik	355
7.2	Grundbegriffe der Strahlungsphysik	358
	(a) DAS ELEMENTARE STRAHLENBÜNDEL	358
	(b) RADIOMETRISCHE STRAHLUNGSGRÖSSEN	360
	(c) ÜBERBLICK ÜBER IRREVERSIBLE STRAHLUNGSVORGÄNGE	364
7.3	Strahlungsgesetze	365
	(a) DAS PLANCK'SCHE GESETZ UND SPEZIALFÄLLE	365
	(b) EMISSION, ABSORPTION, REFLEXION, TRANSMISSION	368
	(c) DAS KIRCHHOFF'SCHE GESETZ	369
7.4	Die Gibbs'sche Beschreibung des Strahlungsfeldes	370
7.5	Die Strahlungsübertragungsgleichung	375
7.6	Die Gibbs'sche Beschreibung elementarer Strahlungsbündel	380
7.7	Energiebilanzen der Materie und des Strahlungsfeldes	384

7.8	Entropiebilanzen nach Callies und Herbert	387
7.9	Strahlungsbilanzen und Treibhauseffekt	390
7.10	Entropik und Energetik der Atmosphäre	396
	(a) DIFFERENTIELLE ERWÄRMUNG UND ENTROPIK	396
	(b) ZUM HAUSHALT DER TOTALEN POTENTIELLEN ENERGIE	397
	(c) DIFFERENTIELLE ERWÄRMUNG UND ENERGETIK	399
7.11	Verfügbare Potentielle Energie und atmosphärischer Kreisprozeß	401
7.12	Die Bilanzgleichungen der Verfügbaren Potentiellen Energie	404
	(a) KINETISCHE UND TOTALE POTENTIELLE ENERGIE	404
	(b) REFERENZ-ATMOSPHERE UND VERFÜGBARE POTENTIELLE ENERGIE	407
	(c) DIE BILANZGLEICHUNGEN	409
	(d) DIE GROSSTURBULENTE AUFSPALTUNG DER BILANZGLEICHUNGEN	411
7.13	Zur Klimatologie des Lorenz'schen Energiezyklus	413
7.14	Energetik der Flachwasser – Atmosphäre	417
8	KLIMA UND KLIMATHEORIEN	
8.1	Definition und Phänomenologie des Klimasystems	427
	(a) SYSTEMKOMPONENTEN UND SKALEN DES KLIMAS	427
	(b) KLIMAGESCHICHTE	430
	(c) BESCHREIBUNG DES STATIONÄREN GEGENWARTSKLIMAS	436
	(d) BESCHREIBUNG DES OSZILLIERENDEN GEGENWARTSKLIMAS	441
	(e) BESONDERHEITEN IN STRATOSPHERE UND MESOSPHERE	443
8.2	Klimaphysik: Extraterrestrische Wirkungsfaktoren und Tektonik	446
8.3	Klimaphysik: Interne Wirkungsfaktoren im Klimasystem	449
	(a) OZEANISCHE DRIFTSTRÖME, WALKERZIRKULATION UND SÜDLICHE OSZILLATION	449
	(b) DIE THERMOHALINE ZIRKULATION	451
	(c) DER EINFLUSS DER KRYOSPHERE	452
	(d) DER KOHLENSTOFFKREISLAUF UND SEINE "UNTERKREISLÄUFE"	453
	(e) SPURENGASE UND DAS OZONPROBLEM	456
	(f) AEROSOLE, HYDROMETEORE, WOLKEN UND STRÖMUNGEN	460
	(g) EIN VERGLEICH MIT DER KLIMATOLOGIE VON MARS UND VENUS	462
	(h) ATMOSPHERISCH-INTERNE WECHSELWIRKUNGEN	464
	(i) ZUSAMMENFASSUNG	467
8.4	Übersicht über Methoden und Probleme der Klimamodellierung	469
8.5	Allgemeine Bemerkungen zur Skalenwechselwirkung und Signaltrennung in Statistisch-Dynamischen Modellen	471
8.6	Exemplarische Beschreibung einiger Modellansätze	474
	(a) EIN STRAHLUNGSBILANZ-KLIMAMODELL	474
	(b) EIN KLIMAMODELL NACH HASSELMANN	477
	(c) SKALENTRENNUNG WETTER-KLIMA NACH HAUSCHILD, LANGE UND SPITZER	479
	(d) ZUR STRUKTUR PALÄOKLIMATISCHER MODELLE NACH SALTZMAN	486

9	DER EINFLUSS DER CHAOSTHEORIE	
9.1	Grundlegende Begriffsbestimmungen	489
	(a) STARKE UND SCHWACHE KAUSALITÄT	489
	(b) GRUNDLAGEN DER SYSTEMTHEORIE	490
	(c) CHAOTISCHE ATTRAKTOREN IN KONTINUIERLICHEN UND DISKRETEN SYSTEMEN	492
9.2	Eindimensionale Iterationen	494
	(a) FEIGENBAUM-SZENARIO IN DER STRAHLUNGSBILANZ-ITERATION	494
	(b) LOGISTISCHE ITERATIONSGLEICHUNG UND FRAKTALE	497
	(c) BERNOULLI-VERSCHIEBUNG UND GEDÄCHTNISVERLUST DES SYSTEMS	501
	(d) LOGISTISCHE DIFFERENTIALGLEICHUNG UND NUMERISCHE EFFEKTE	502
9.3	Zweidimensionale Iterationen	505
	(a) DIE BÄCKERTRANSFORMATION	505
	(b) CHAOSTHEORIE UND DAS PRINZIP DER ATMOSPHERISCHEN STEUERUNG	506
	(c) DETERMINISTISCHES UND STOCHASTISCHES CHAOS	508
9.4	Chaos in kontinuierlichen Systemen	509
	(a) LORENZ-ATTRAKTOR, RÖSSLER-ATTRAKTOR UND HUFEISENTRANSFORMATION	509
	(b) HÖHERDIMENSIONALE SYSTEME	513
	(c) DETERMINISTISCHES CHAOS IN KONSERVATIVEN HAMILTONSYSTEMEN	515
	(d) DETERMINISTISCHES CHAOS IM KONSERVATIVEN HÉNON-SYSTEM	517
	(e) CHAOSTHEORIE UND SENSIBLE ABHÄNGIGKEIT IM BAROTROPEN MODELL	520
	(f) FRONTENSTRUKTUREN AUS "SYNOPTISCHEM CHAOS"	522
	(g) ZUSAMMENFASSUNG: THERMODYNAMIK, CHAOS, SYNERGETIK UND EVOLUTION	523
10	DIE ENERGIE-WIRBEL-THEORIE DER HYDRODYNAMIK UND DER PHYSIK DER ATMOSPHERE	
10.1	Motivation und heuristische Überlegungen	529
	(a) DIE ANTISYMMETRISCHE STRUKTUR DER KANONISCHEN HAMILTON-THEORIE	529
	(b) DIE GRENZEN DER HAMILTON'SCHEN "ENERGIE-THEORIE"	531
10.2	Nichtkanonische Hamilton-Theorie und Nambu-Theorie diskreter Systeme	535
	(a) THEORIE-ENTWICKLUNG AM BEISPIEL DER KREISEL-GLEICHUNGEN	535
	(b) PHASENRAUMGEOMETRIE DES LORENZ-ATTRAKTORS	539
	(c) DIE ANTISYMMETRISCHE STRUKTUR DER NAMBU-THEORIE	540
10.3	Die kontinuierliche Energie-Wirbel-Theorie	543
	(a) VORTICITYDYNAMIK	543
	(b) DREIDIMENSIONALE INKOMPRESSIBLE WIRBELDYNAMIK	546
	(c) KOMPRESSIBLE "ADIABATISCHE" HYDRO-THERMODYNAMIK	548
	(d) STATIONÄRE ENERGIE-WIRBEL-THEORIE UND DER DSI	552
10.4	Anwendungen der Energie-Wirbel-Theorie	555
10.5	Ausblick	559

ANHANG A DEFORMATIONEN, SPANNUNGEN UND FLUIDE

A.1	Deformationstensor	561
A.2	Spannungstensor	564
A.3	Deformationsarbeit	566
A.4	Spannungs-Deformationsbeziehung und Definition eines Fluids	567

ANHANG B KUGELKOORDINATEN UND -FUNKTIONEN

B.1	Die Grundgleichungen in Kugelkoordinaten	571
	(a) BEWEGUNGSGLEICHUNG	571
	(b) KONTINUITÄTSGLEICHUNG	576
	(c) ERSTER HAUPTSATZ	578
	(d) BAROTROPE VORTICITYGLEICHUNG	578
B.2	Legendre-Polynome und Kugelfunktionen	580

ANHANG C WELLEN UND SPEKTRALTHEORIE

C.1	Ebene Wellen	585
C.2	Orthogonalsysteme	587
C.3	Spektralmodelle	589
C.4	Aspekte der spektralen Turbulenztheorie	592
C.5	Gruppengeschwindigkeit und Dispersion	595
C.6	Korrespondenz, Spin und PV-Thinking	597

ANHANG D FUNKTIONALE UND FUNKTIONALABLEITUNGEN

D.1	Definitionen	599
D.2	Beispiele	601
D.3	Funktionalableitungen in der Punktmechanik	603
D.4	Funktionalableitungen in der Feldtheorie	604
	Häufig verwendete Symbole	607
	Literaturverzeichnis	609
	Sachwortverzeichnis	613