

620.1 633.1  
Gerd W. Prölss

---

# Physik des erdnahen Weltraums

Eine Einführung

Zweite Auflage

Mit 263 Abbildungen, davon 4 in Farbe  
und 15 Tabellen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Definition und Abgrenzung der Thematik	1
1.2 Stoffumfang, Gliederung und Literatur	4
1.3 Zur Geschichte der Weltraumforschung	6
<b>2. Neutrale Hochatmosphäre</b>	<b>11</b>
2.1 Zustandsgrößen von Gasen und ihre gaskinetische Deutung	11
2.1.1 Definition und Ableitung gaskinetischer Kenngrößen	13
2.1.2 Makroskopische Zustandsgrößen	18
2.2 Höhenverlauf der Zustandsgrößen	28
2.3 Barosphärische Dichteverteilung	33
2.3.1 Aerostatische Grundgleichung	33
2.3.2 Druckgradientkraft	36
2.3.3 Barometrische Höhenformel	37
2.3.4 Heterosphärische Dichteverteilung	40
2.3.5 Gaskinetik der barometrischen Höhenformel	45
2.3.6 Homopausenhöhe	49
2.3.7 Atomarer Sauerstoff und Wasserstoff	54
2.4 Exosphärische Dichteverteilung	57
2.4.1 Exobasenhöhe	57
2.4.2 Entweichgeschwindigkeit	60
2.4.3 Geschwindigkeitsverteilung in Gasen	60
2.4.4 Entweichfluß und Stabilität der Atmosphäre	67
2.4.5 Exosphärische Dichteverteilung	70
<b>3. Absorption von Sonnenstrahlungsenergie</b>	<b>79</b>
3.1 Ursprung und Eigenschaften der Sonnenstrahlung	79
3.1.1 Aufbau der Sonne	80
3.1.2 Sonnenatmosphäre	85
3.1.3 Strahlungsspektrum	96
3.1.4 Variation der Strahlungsintensität	102
3.2 Extinktion von Sonnenstrahlung in der Hochatmosphäre	107
3.2.1 Absorptionsprozesse	107
3.2.2 Strahlungsextinktion in Gasen	110
3.2.3 Strahlungsextinktion in der Hochatmosphäre	112

3.2.4	Strahlungsabsorptionsbedingte Energieablagerung . . . .	114
3.3	Aufheizung und Temperaturverlauf . . . . .	119
3.3.1	Wärmeerzeugung . . . . .	120
3.3.2	Aufheizungsbedingter Temperaturanstieg . . . . .	124
3.3.3	Wärmeverluste durch Abstrahlung . . . . .	125
3.3.4	Wärmeverluste durch molekulare Wärmeleitung . . . . .	125
3.3.5	Wärmebilanzgleichung und Temperaturverlauf . . . . .	129
3.3.6	Abschätzung der Thermopausentemperatur . . . . .	132
3.3.7	Temperatur- und Dichteschwankungen . . . . .	133
3.3.8	Luftleuchten . . . . .	136
3.4	Thermosphärische Winde . . . . .	138
3.4.1	Tageszeitliche Windzirkulation: Beobachtungen . . . . .	139
3.4.2	Bestandsaufnahme der zu berücksichtigenden Kräfte . .	140
3.4.3	Impulsbilanzgleichung . . . . .	147
3.4.4	Thermosphärische Winde . . . . .	150
3.5	Atmosphärische Wellen . . . . .	152
3.5.1	Wellenparameter . . . . .	153
3.5.2	Akustische Wellen . . . . .	153
3.5.3	Auftriebsoszillationen . . . . .	157
3.5.4	Schwerewellen . . . . .	160
<b>4.</b>	<b>Ionosphäre . . . . .</b>	<b>165</b>
4.1	Höhenverlauf ionosphärischer Zustandsgrößen . . . . .	166
4.2	Produktion und Verlust von Ionisation . . . . .	170
4.2.1	Ionisationsproduktion . . . . .	170
4.2.2	Ionisationsverluste . . . . .	177
4.2.3	Chemische Zusammensetzung . . . . .	180
4.3	Dichteverlauf in der unteren Ionosphäre . . . . .	181
4.3.1	Dichtebilanzgleichung . . . . .	181
4.3.2	Dichteverlauf in der E-Region . . . . .	183
4.3.3	Dichteverlauf in der unteren F-Region . . . . .	183
4.4	Dichteverlauf in der oberen Ionosphäre . . . . .	186
4.4.1	Barometrische Dichteverteilung . . . . .	186
4.4.2	Polarisationsfeld . . . . .	188
4.4.3	Transportgleichgewicht . . . . .	189
4.4.4	Produktionsbedingter Sinkstrom . . . . .	193
4.5	Dichtemaximum und ionosphärische Zeitkonstanten . . . . .	194
4.5.1	Ionosphärische Zeitkonstanten . . . . .	195
4.5.2	Ionisationsdichtemaximum . . . . .	198
4.5.3	Ionoexosphäre . . . . .	199
4.6	Systematische Variationen der Ionisationsdichte . . . . .	200
4.7	Radiowellen in der Ionosphäre . . . . .	203
4.7.1	Schwingungen eines Plasmas . . . . .	204
4.7.2	Die Ionosphäre als Dielektrikum . . . . .	206
4.7.3	Die Ionosphäre als leitende Reflexionsschicht . . . . .	209

4.7.4	Magnetfeldeinfluß .....	213
<b>5.</b>	<b>Magnetosphäre .....</b>	<b>217</b>
5.1	Grundlagen .....	217
5.2	Erdnahes Magnetfeld .....	219
5.3	Bewegung geladener Teilchen im Magnetfeld der Erde .....	227
5.3.1	Gyrationsbewegung .....	229
5.3.2	Oszillationsbewegung .....	233
5.3.3	Driftbewegung .....	237
5.3.4	Zusammengesetzte Ladungsträgersbewegung .....	244
5.3.5	Coulomb-Stöße .....	244
5.4	Teilchenpopulationen der inneren Magnetosphäre .....	250
5.4.1	Strahlungsgürtel .....	252
5.4.2	Ringstrom .....	255
5.4.3	Plasmasphäre .....	260
5.5	Erdfernes Magnetfeld .....	265
5.5.1	Gestalt und Gliederung .....	265
5.5.2	Tagseitiger Magnetopausenstrom .....	268
5.5.3	Stromsystem des Magnetosphärenschweif's .....	275
5.6	Teilchenpopulationen der äußeren Magnetosphäre .....	277
5.6.1	Schweifplasmaschicht .....	279
5.6.2	Schweifflügelplasma .....	280
5.6.3	Magnetosphärengrenzschicht .....	281
5.7	Magnetoplasma-Wellen in der Magnetosphäre .....	282
<b>6.</b>	<b>Interplanetares Medium .....</b>	<b>287</b>
6.1	Der Sonnenwind .....	287
6.1.1	Eigenschaften des Sonnenwindes in Erdbahnnähe .....	289
6.1.2	Gasdynamisches Modell .....	292
6.1.3	Temperaturverlauf .....	298
6.1.4	Erweiterte gasdynamische Modelle .....	302
6.1.5	Exosphärisches Modell .....	302
6.1.6	Großräumige Sonnenwindstruktur in der Ekliptik .....	306
6.1.7	Sonnenwindeigenschaften außerhalb der Ekliptik .....	310
6.2	Interplanetares Magnetfeld .....	312
6.2.1	Beobachtungen .....	312
6.2.2	Einfaches Modell des interplanetaren Magnetfeldes ...	315
6.2.3	Magnetfeldstruktur außerhalb der Ekliptik .....	318
6.2.4	Heliosphärische Stromschicht .....	319
6.2.5	Sektorstruktur und $B_{\varphi}$ -Komponente .....	321
6.2.6	Interplanetares elektrisches Feld .....	323
6.2.7	Das interplanetare Medium als Magnetoplasma .....	326
6.3	Magnetoplasma-Wellen im interplanetaren Medium .....	329
6.3.1	Plasma-akustische Wellen .....	330
6.3.2	Alfvén-Wellen .....	331

6.3.3	Magnetosonische Wellen . . . . .	335
6.4	Modifikation des Sonnenwindes durch die Bugstoßwelle . . . . .	337
6.4.1	Zur Entstehung der Bugstoßwelle . . . . .	338
6.4.2	Änderung des Sonnenwindes durch die Bugstoßwelle . .	340
6.4.3	Ergebnisse von Modellrechnungen . . . . .	341
6.4.4	Druckgleichgewicht an der Magnetopause . . . . .	343
6.4.5	Die Bugstoßwelle als plasmadynamisches Phänomen . .	346
6.5	Wechselwirkung Sonnenwind - interstellares Medium . . . . .	348
6.6	Energiereiche Teilchen im interplanetaren Raum . . . . .	353
6.6.1	Energiereiche Teilchen galaktischen Ursprungs . . . . .	353
6.6.2	Energiereiche Teilchen interplanetaren Ursprungs . . . .	355
6.6.3	Energiereiche Teilchen solar-planetaren Ursprungs . . .	358
<b>7.</b>	<b>Absorption und Dissipation von Sonnenwindenergie . . . . .</b>	<b>361</b>
7.1	Topologie der polaren Hochatmosphäre . . . . .	361
7.2	Elektrische Felder und Plasmakonvektion . . . . .	362
7.3	Ionosphärische Leitfähigkeit und Ströme . . . . .	365
7.3.1	Stoßmodifizierte Ladungsträgerbewegung . . . . .	365
7.3.2	Ionosphärische Transversalleitfähigkeit . . . . .	367
7.3.3	Parallelleitfähigkeit . . . . .	370
7.3.4	Ionosphärische Ströme . . . . .	373
7.3.5	Magnetfeldeffekte . . . . .	374
7.4	Polarlichter . . . . .	376
7.4.1	Morphologie . . . . .	376
7.4.2	Dissipation der Polarlichtteilchenenergie . . . . .	379
7.4.3	Ursprung der Polarlichtteilchen . . . . .	386
7.5	Neutralatmosphärische Effekte . . . . .	390
7.5.1	Driftinduzierte Winde . . . . .	390
7.5.2	Aufheizung . . . . .	391
7.5.3	Zusammensetzungsstörungen . . . . .	392
7.6	Energietransfer Sonnenwind-Magnetosphäre . . . . .	394
7.6.1	Sonnenwinddynamo . . . . .	395
7.6.2	Offene Magnetosphäre . . . . .	397
7.6.3	Plasmakonvektion in der offenen Magnetosphäre . . . .	398
7.6.4	Offene Magnetosphäre mit Schweif . . . . .	400
7.6.5	Rekonnexion . . . . .	402
7.6.6	Ursprung der Birkeland-Ströme . . . . .	404
7.6.7	Plasmaflankendynamo . . . . .	409
<b>8.</b>	<b>Geosphärenstürme . . . . .</b>	<b>413</b>
8.1	Magnetische Stürme . . . . .	414
8.1.1	Reguläre Variationen . . . . .	414
8.1.2	Magnetische Aktivität in niedrigen Breiten . . . . .	418
8.1.3	Magnetische Aktivität in hohen Breiten . . . . .	421
8.1.4	Magnetische Aktivität in mittleren Breiten . . . . .	425

8.2	Polarlichtteilstürme .....	427
8.3	Magnetosphärische Teilstürme .....	429
8.3.1	Wachstumsphase .....	430
8.3.2	Expansionsphase .....	431
8.4	Thermosphärenstürme .....	435
8.4.1	Zusammensetzungsstörungen in mittleren Breiten ....	436
8.4.2	Dichtestörungen in niedrigen Breiten .....	438
8.5	Ionosphärenstürme .....	441
8.5.1	Negative Ionosphärenstürme .....	442
8.5.2	Positive Ionosphärenstürme .....	444
8.6	Die Sonne als Ursprungsort von Geosphärenstürmen .....	447
8.6.1	Solare Massenauswürfe und magnetische Wolken ....	449
8.6.2	Korotierende Wechselwirkungsregionen .....	452
8.6.3	Sonneneruptionen .....	453
8.7	Technische Störungen .....	457
<b>A.</b>	<b>Formeln, Tabellen und Ableitungen .....</b>	<b>461</b>
A.1	Ausgewählte mathematische Formeln .....	461
A.2	Erdparameter .....	466
A.3	Planetendaten .....	466
A.4	Modellatmosphäre .....	467
A.5	Diffusionsgleichung für Gase .....	470
A.6	Ableitung der Impulsbilanzgleichung .....	471
A.7	Energiebilanzgleichung einer adiabatischen Gasströmung ....	475
A.8	Bernoulli-Gleichung .....	480
A.9	Rankine-Hugoniot-Gleichungen .....	481
A.10	Maxwell-Gleichungen .....	483
A.11	Krümmung einer Dipolfeldlinie .....	485
A.12	Gradientendriftgeschwindigkeit .....	487
A.13	Gleichungssystem der idealen Magnetoplasmadynamik .....	488
A.13.1	Bilanzgleichungen eines Magnetoplasmas .....	489
A.13.2	Maxwell-Gleichungen und Ohmsches Gesetz .....	493
A.13.3	Überprüfung der Approximationen .....	496
A.14	Zwei Theoreme der Magnetoplasmadynamik .....	498
A.15	Magnetoplasma-Wellen .....	501
A.15.1	Vereinfachung des Gleichungssystems .....	501
A.15.2	Magnetfeldparallele Wellenausbreitung .....	503
A.15.3	Magnetfeldsenkrechte Wellenausbreitung .....	508
A.15.4	Überprüfung der Approximationen .....	509
A.16	Plasma-Instabilitäten .....	511
<b>B.</b>	<b>Abbildungsreferenzen .....</b>	<b>515</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>519</b>