

Raumfahrttechnik (Engineering)
Raumfahrtumweltbedingungen
Deutsche Fassung EN 14092:2002

DIN
EN 14092

ICS 49.140

Space engineering — Space environment;
German version EN 14092:2002

Ingénierie spatiale — Environnement spatial;
Version allemande EN 14092:2002

Die Europäische Norm EN 14092:2002 hat den Status einer Deutschen Norm.

Nationales Vorwort

Die *European Cooperation for Space Standardization (ECSS)*, eine Einrichtung zur Erstellung eines kohärenten, einheitlichen Normenwerkes zur Anwendung in allen europäischen Raumfahrtprojekten, hat am 1996-11-13 vom *Europäischen Komitee für Normung (CEN)* das Mandat (M/237) erhalten, für den CEN-Subsector T02 „Aerospace“ Europäische Normen (EN) auszuarbeiten.

Aufgrund der zwischen ISO/TC 20/SC 14 „Raumfahrt“ und ECSS vereinbarten A-Liaison werden die Normungsprogramme dieser Partner abgestimmt und die Abstimmungsregeln gemäß Abschnitt 5.2 der Wiener-Vereinbarung angewendet.

Die vorliegende Norm EN 14092:2002 wurde von CEN/CS T02 auf Basis der ECSS-E-10-04 erarbeitet und in das parallele Abstimmungsverfahren gegeben.

Fortsetzung 183 Seiten EN

Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

— Leerseite —

Deutsche Fassung

Raumfahrttechnik (Engineering)
Raumfahrtumweltbedingungen

Space engineering — Space environment

Ingénierie spatiale — Environnement spatial

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 26. Dezember 2001 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	10
Einleitung	11
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe und Abkürzungen	12
3.1 Begriffe.....	12
3.2 Abkürzungen	18
4 Gravitation	20
4.1 Einleitung	20
4.1.1 Newtonsches Gravitationsgesetz.....	20
4.1.2 Abweichung vom Punkt-Masse-Modell	20
4.1.3 Genaue Darstellung des Geopotentials	21
4.2 Vorstellung von Modellen	23
4.2.1 Modell	23
4.2.2 Verbindliche Modellparameter.....	23
4.2.3 Anwendungsrichtlinien	23
4.3 Referenzdaten.....	23
4.3.1 Modellausgabe	23
4.3.2 Ergebnisse typischer Missionen	23
4.4 Verweisungen	25
5 Geomagnetische Felder	26
5.1 Einleitung — Übersicht über das geomagnetische Feld und Effekte.....	26
5.2 Referenzdaten über das magnetischen Feld.....	26
5.3 Modelle des geomagnetischen Felds und Analysemodelle	27
5.3.1 Dipolmodell.....	27
5.3.2 Feldmodelle mit interner Quelle	27
5.3.3 Exzentrisches Dipolmodell	28
5.3.4 Geomagnetische Koordinaten B und L	29
5.3.5 Feldmodelle mit externer Quelle.....	31
5.3.6 Grenzen der Magnetosphäre.....	32
5.4 Anpassungsrichtlinien	32
5.5 Bilder	33
5.6 Verweisungen	35
6 Elektromagnetische Strahlung von Sonne und Erde und Indizes	36
6.1 Einleitung	36
6.2 Solare elektromagnetische Strahlung	37
6.2.1 Solarkonstante	37
6.2.2 Sonnenspektrum	37
6.3 Elektromagnetische Strahlung der Erde	38
6.3.1 Erdalbedo.....	38
6.3.2 Infrarotstrahlung der Erde (Erdeigenstrahlung)	39
6.4 Solare und geomagnetische Indizes	39
6.4.1 Allgemeines	39
6.4.2 Beschreibung von Indizes.....	39
6.4.3 Sonnenzyklusabhängigkeit.....	40
6.4.4 Referenzindexwerte	43
6.4.5 Anpassungsrichtlinien	43
6.5 Bilder	44
6.6 Verweisungen	45

7	Die neutrale Erdatmosphäre	45
7.1	Einleitung	45
7.2	Empfohlenes Referenzmodell	45
7.3	Struktur der Erdatmosphäre	45
7.4	Atmosphärische Zustandsparameter	46
7.5	Temperatur-, Zusammensetzungs- und Dichtemodell der Erdatmosphäre	47
7.6	Temperatur-, Zusammensetzungs- und Dichtemodell der Erdatmosphäre	56
7.7	Ausgabe des Referenzmodells	57
7.8	Windmodell der Homosphäre und Heterosphäre der Erde	57
7.9	Einfache Dichtemodelle der Planetenatmosphären	59
7.10	Aerodynamik in der Erdatmosphäre	60
7.11	Bilder	62
7.12	Verweisungen	68
8	Plasmen	68
8.1	Einleitung	68
8.2	Die Ionosphäre	70
8.2.1	Beschreibung	70
8.2.2	Effekte	70
8.2.3	Modelle	70
8.2.4	Typische und Worst-Case-Parameter	71
8.3	Plasmasphäre	73
8.3.1	Beschreibung	73
8.3.2	Effekte	73
8.3.3	Modelle	73
8.3.4	Typische Parameter	74
8.4	Die äußere Magnetosphäre	74
8.4.1	Beschreibung	74
8.4.2	Effekte	75
8.4.3	Modelle	75
8.4.4	Typische und Worst-Case-Parameter	76
8.5	Der Sonnenwind	77
8.5.1	Beschreibung	77
8.5.2	Effekte	77
8.5.3	Modelle	77
8.6	Künstlich erzeugte Weltraumumgebungen	78
8.6.1	Beschreibung	78
8.6.2	Effekte	78
8.6.3	Modelle	79
8.6.4	Typische Parameter	80
8.7	Anpassungsrichtlinien	80
8.8	Verweisungen	81
9	Energiereiche Teilchenstrahlung	82
9.1	Einleitung — Übersicht über Umgebung und Effekte energiereicher Teilchenstrahlung	82
9.1.1	Allgemeines	82
9.1.2	Weltraumumgebungen	82
9.1.3	Übersicht über Effekte	83
9.2	Quantifizierung von Effekten und zugehörige Umgebungen	84
9.3	Referenzdaten, Modelle und Analyseverfahren für die Strahlungsumgebung energiereicher Teilchen	85
9.3.1	Eingefangene Strahlungsgürtel	85
9.3.2	Modelle für Ereignisse durch Sonnenteilchen	87
9.3.3	Modelle der kosmischen Strahlungsumgebung und Modelle der Effekte	90
9.3.4	Geomagnetische Abschirmung	91
9.3.5	Sekundärstrahlung des Raumfahrzeugs	92
9.3.6	Neutronen	92

9.4	Analyseverfahren für abgeleitete Größen	92
9.4.1	Allgemeines	92
9.4.2	Ionisationsdosis	92
9.4.3	Referenzdosisdaten der Umlaufbahn	93
9.4.4	Störungsrate durch ein Einzelereignis	94
9.4.5	Verschlechterung der Sonnenzellen	95
9.4.6	Interne elektrostatische Aufladung	95
9.4.7	Äquivalentdosis	95
9.4.8	Nicht-ionisierende Dosis	95
9.5	Anpassungsrichtlinien: Orbital- und Missionsregime	96
9.5.1	Allgemeines	96
9.5.2	Geostationäre Umlaufbahn	96
9.5.3	MEO, HEO	96
9.5.4	LEO	96
9.5.5	Polar	96
9.5.6	Interplanetare und planetare Umgebung	97
9.6	Erstellung einer Spezifikation für eine Strahlungsumgebung	97
9.7	Bilder	98
9.8	Verweisungen	112
10	Aus Teilchen bestehende Stoffe	113
10.1	Einleitung	113
10.2	Analyseverfahren	114
10.3	Vorstellung von Modellen	115
10.3.1	Meteoroiden	115
10.3.2	Weltraummüll	118
10.3.3	Staub	118
10.3.4	Marsstaub	119
10.4	Referenzdaten	119
10.4.1	Verfolgbarer Weltraummüll	119
10.4.2	Statistische Flussdichtemodelle	120
10.5	Bilder	124
10.6	Verweisungen	128
11	Verunreinigung	129
11.1	Einleitung	129
11.2	Molekulare Verunreinigung	129
11.2.1	Quellen für molekulare Verunreinigungen	129
11.2.2	Transportmechanismen	130
11.3	Teilchenverunreinigung	131
11.3.1	Quellen für eine Teilchenverunreinigung	131
11.3.2	Transportmechanismen	132
11.4	Verunreinigungseffekt	132
11.5	Modelle	132
11.5.1	Quellen	133
11.5.2	Transport von molekularen Verunreinigungen	135
11.6	Verweisungen	136
Anhang A	(informativ)	138
Anhang B	(informativ) Gravitation	139
B.1	Zugehörige Werkzeuge	139
B.2	Effekte	139
B.3	Gravitationsfeld an der Oberfläche eines Planeten	141
B.4	Unsicherheiten	142
B.5	Verweisungen	143

	Seite
Anhang C (informativ) Geomagnetisches Feld	144
C.1 Beschreibung der Magnetosphäre.....	144
C.2 Herleitung der Dipolstärke aus Feldmodellkoeffizienten	144
C.3 Unverträglichkeiten und Inkonsistenzen.....	145
C.4 Einzelheiten und Verfügbarkeit des IGRF-Modells	146
C.5 Verweisungen.....	146
Anhang D (informativ) Elektromagnetische Strahlung von Sonne und Erde und Indizes	147
D.1 Einzelheiten über das Sonnenspektrum	147
D.2 Albedo- und Infrarotveränderlichkeit.....	147
D.3 Informationen über die Aktivitätsindizes	148
D.4 Rauschen im Radiofrequenzbereich.....	148
D.5 Sonnenstrahlungsdruck.....	148
D.6 Bilder	149
D.7 Verweisungen.....	153
Anhang E (informativ) Die neutrale Erdatmosphäre	154
E.1 Übersicht über Atmosphärenmodelle.....	154
E.2 Zugang zum MSISE-90-Modell.....	154
E.3 Verweisungen.....	155
Anhang F (informativ) Plasma.....	156
F.1 Oberflächenaufladung.....	156
F.2 Aufladung in der erdnahen Umlaufbahn (LEO)	157
F.3 NASCAP-Aufladungskode	159
F.4 POLAR-Aufladungskode	160
F.5 Weitere Aufladungskodes.....	160
F.6 NASA-Worst-Case-Aufladungsumgebung	160
F.7 Staudruck- und Nachlaufströmungseffekte	160
F.8 Stromansammlungseffekte.....	161
F.9 Zerstäubung	162
F.10 Ausbreitungseffekte in der Ionosphäre.....	162
F.11 Verfügbarkeit des IRI95-Modells	163
F.12 Verweisungen.....	164
Anhang G (informativ) Strahlung.....	165
G.1 Zusammenhänge mit der Strahlungsprüfung.....	165
G.2 Künftige Modelle	166
G.3 Quellen von Modellen.....	167
G.4 Werkzeuge für die Analyse der inneren elektrostatischen Aufladung.....	168
G.5 Weitere Informationen	168
G.6 Verweisungen.....	168
Anhang H (informativ) Aus Teilchen bestehende Stoffe	169
H.1 Modelle der Weltraummüllflussdichte	169
H.1.1 Allgemeines	169
H.1.2 MASTER-97	169
H.1.3 ORDEM-96	169
H.1.4 Geschwindigkeitsverteilung	170
H.1.5 Massendichte	170
H.1.6 Anwendbarkeitsarten	170
H.1.7 Anpassungsrichtlinien	170
H.1.8 Weitere Weltraummüllmodelle	171
H.2 Modellunsicherheiten	171
H.2.1 Allgemeines	171
H.2.2 Meteoroiden	171
H.2.3 Weltraummüll	171
H.3 Bewertung von Schädigungen	172

	Seite
H.4 Analysewerkzeuge	173
H.4.1 Allgemeines	173
H.4.2 Deterministische Analyse	174
H.4.3 Statistische Analyse	174
H.5 Nachahmung von Mondstaub	174
H.6 Verweisungen	175
Anhang I (informativ) Verunreinigungen	176
I.1 Vorhandene Werkzeuge	176
I.2 ESABASE: OUTGASSING-, PLUME-PLUMFLOW- und CONTAMINE-Module	176
I.3 JMS3D	177
I.4 CONTAM 3.2 oder CONTAM III	178
I.5 TRICONTAM	179
I.6 SOCRATES	179
I.7 SPACE II	180
I.8 MOLFLUX	180
I.9 ISEM	181
I.10 OPT	181
I.11 CAP	182
I.12 Datenbanken	182
I.13 Verweisungen	182
 Bild 1 — Geomagnetische Feldstärke in einer Höhe von 400 km, basiert auf IGRF-1995	 33
Bild 2 — Ausgabe von geomagnetischen Feldmodellen, die die täglichen Deformationen des Felds und jahreszeitliche Änderungen in der Deformation darstellen [RD5.8]	34
Bild 3 — Änderung des geomagnetischen Felds als Funktion der Höhe	35
Bild 4 — Standardvorhersagen der Sonnen- und geomagnetischen Aktivität während eines Zyklus	44
Bild 5 — Entsprechend Modell MSISE-90 Änderung der mittleren Temperatur mit der Höhe für extrem geringe, mittlere und extrem hohe Aktivitäten	62
Bild 6 — Entsprechend Modell MSISE-90 Änderung der mittleren Luftdichte mit der Höhe für geringe, mittlere und extrem hohe Aktivitäten	62
Bild 7 — Entsprechend Modell MSISE-90 Änderung des mittleren atomaren Sauerstoffs mit der Höhe für extrem geringe, mittlere und extrem hohe Aktivitäten	63
Bild 8 — Entsprechend Modell MSISE-90 Änderung des mittleren Konzentrationsprofils der atmosphärischen Bestandteile N ₂ , O, O ₂ , He, Ar, H und N mit der Höhe für mittlere Aktivitäten	63
Bild 9 — Entsprechend Modell MSISE-90 Tages- (a) und jahreszeitliche Breiten- (b) Schwankungen der örtlichen Temperatur in einer Höhe von $h = 400$ km	64
Bild 10 — Entsprechend Modell MSISE-90 Tages- (a) und jahreszeitliche Breiten- (b) Schwankungen der Luftdichte in einer Höhe von $h = 400$ km für mittlere atmosphärische Bedingungen	65
Bild 11 — Entsprechend Modell MSISE-90 Tages- (a) und jahreszeitliche Breiten- (b) Schwankungen der Konzentration des atomaren Sauerstoffs in einer Höhe von $h = 400$ km für mittlere atmosphärische Bedingungen	66
Bild 12 — Entsprechend Modell HWM-93 Tages- (a) und jahreszeitliche Breiten- (b) Schwankungen der Windbeträge und -richtungen in einer Höhe von $h = 400$ km für mittlere atmosphärische Bedingungen	67
Bild 13 — Mittlere Bereiche von Protonen und Elektronen in Aluminium	98
Bild 14 — Konturendarstellungen der Elektronen- und Protonenstrahlungsgürtel	99
Bild 15 — Ungerichtete Flussdichten für Elektronen (a) und Protonen (b), Integral nach der Energie, auf dem geomagnetischen Äquator für unterschiedliche Energieschwellen	100

Bild 16 — Integral der ungerichteten Flussdichten von Protonen (>10 MeV) und Elektronen (>10 MeV) in einer Höhe von 400 km, das den inneren Strahlungsgürtel „Südantlantische Anomalie“ und im Falle von Elektronen den äußeren Strahlungsgürtel in hohen Breiten darstellt	101
Bild 17 — Die Anisotropie der Flussdichte in der erdnahen Umlaufbahn, gemittelt über eine Umlaufbahn der Raumstation für Protonen mit einer Energie von >100 MeV	102
Bild 18 — Fluenzspektren für Sonnenprotonen für unterschiedliche Konfidenzniveaus (99 %, 95 %, 90 %, 75 % und 50 % von oben nach unten in jedem Diagramm) für unterschiedliche Missionszeiträume (Daten vom Modell JPL-1991).....	102
Bild 19 — LET-Spektren der kosmischen Strahlung für typische Missionen	104
Bild 20 — SHIELDOSE-Datensatz zur Berechnung der Dosis für beliebige Spektren (a) Elektronendosis als Funktion von Energie und Tiefe	105
Bild 21 — Jährliche Dosis hinter einer sphärischen Abschirmung von 4 mm auf kreisförmigen äquatorialen Umlaufbahnen in den Strahlungsgürteln als Funktion der Höhe der Umlaufbahn.....	108
Bild 22 — Vorhersagen typischer Dosiswerte für typische Missionen	109
Typische jährliche Missionsdosis (sphärische Al- Abschirmung)	110
Bild 23 — Typische Tiefendosiskurven für Erdumlaufbahnen	110
Bild 24 — Von der ICRP festgelegte Qualitätsfaktoren für die Berechnungen der Äquivalentdosis für radiobiologische Effekte.....	111
Bild 25 — Die NIEL-Kurve: (1) Energieverlust durch Protonen bei nicht-ionisierenden Wechselwirkungen (ausgedehnte Versetzungsschädigung, Versetzungsschädigung); (2) NIEL bezogen auf 10 MeV zur Ermittlung der Schädigungsäquivalenz von anderen Energien.....	111
Bild 26 — Zeitliche Entwicklung der Anzahl der verfolgbaren Objekte in der Umlaufbahn	124
Bild 27 — Höhenverteilung von verfolgbaren Objekten in LEO-Umlaufbahnen	124
Bild 28 — Verteilung verfolgbarer Objekte als Funktion ihrer Inklination	125
Bild 29 — Kumulative Anzahl von Einschlägen N von einer Seite auf einer willkürlich ausgerichteten Platte für einen Bereich von Mindestteilchengrößen.....	125
Bild 30 — Aktivitätsverhältnisfaktor über der Dauer der Aktivität für Hauptmeteoroidenströme (a) Januar – August	126
Bild 30 (<i>fortgesetzt</i>) — Aktivitätsverhältnisfaktor über der Dauer der Aktivität für Hauptmeteoroidenströme (b) September – Dezember	127
Verweisungen.....	128
Bild C.1 — Schematische Darstellung der Magnetosphäre mit Stromflüssen und Magnetfeldlinien... ..	145
Bild D.1 — Normal einfallende Sonnenstrahlung auf Meereshöhe an sehr klaren Tagen, spektrale Irradianz der Sonne außerhalb der Erdatmosphäre bei 1 AU, und spektrale Irradianzkurve des schwarzen Körpers bei $T = 5\,762\text{ K}$	149
Bild D.2 — Tägliche Sonnen- und geomagnetische Aktivitätsindizes über die letzten zwei Sonnenzyklen	150
Bild D.3 — Monatliche mittlere Sonnen- und geomagnetische Aktivitätsindizes über die letzten zwei Sonnenzyklen	151
Bild D.4 — Leistungsflussdichtepegel für unterschiedliche Frequenzbereiche von natürlich auftretenden elektromagnetischen und Plasmawellen (aus [RDD.2]).....	152
Bild F.1 — Spektrogramme für Elektronen- und Ionenflussdichten während einer Aufladung	157
Bild F.2 — Satellitenpotential und Integral der Elektronen(anzahl)flussdichte größer als 30 eV und bei 14 keV [RDF.1].....	158
Bild F.3 — Oberflächenpotential über der Elektronentemperatur für eine Anzahl von Materialien.....	159

Tabellen

Tabelle 1 — Verbindliche Modellparameter.....	23
Tabelle 2 — Werte der normierten Koeffizienten $\bar{C}_{nm}$ vom JGM-2-Modell für Grad (n) und Ordnung (m) 9	24
Tabelle 3 — Werte der normierten Koeffizienten $\bar{S}_{nm}$ vom JGM-2-Modell für Grad (n) und Ordnung (m) 9	24
Tabelle 4 — Vorhergesagter Fehler der Umlaufbahn mittels des JGM-2-Schwerkraftmodells.....	25
Tabelle 5 — Änderungen der Dipolmomente von 1945 bis 1995	27
Tabelle 6 — Das IGRF-95-Modell: Koeffizienten und ihre Säkularvariationen für Grad und Ordnung 3.....	29
Tabelle 7 — Änderungen der Dipolterme und abgeleiteten Dipolmomente der IGRF-Modelle.....	29
Tabelle 8 — Magnetopausenmodell nach Sibeck u. a. [RD5.17]	32
Tabelle 9 — Hochenergetische solare elektromagnetische Flussdichte	38
Tabelle 10 — Umrechnung von K_p in a_p	40
Tabelle 11 — Höchst-, Mittel- und Mindestwerte der über 13 Monate geglätteten solaren 10,7-cm-Radiofrequenz-Flussdichte- und des geomagnetischen Aktivitätsindex über den mittleren Sonnenzyklus.....	40
Tabelle 12 — Referenzindexwerte	43
Tabelle 13 — MSISE-90-Höhenprofile der Temperatur T , der Gesamtdichte ρ , des Drucks p , des mittleren Molekulargewichts M und der Dichteskalenhöhe H für geringe Aktivitäten	50
Tabelle 14 — MSISE-90-Höhenprofile der Temperatur T , der Gesamtdichte ρ , des Drucks p , des mittleren Molekulargewichts M und der Dichteskalenhöhe H für mittlere Aktivitäten	52
Tabelle 15 — MSISE-90-Höhenprofile der Temperatur T , der Gesamtdichte ρ , des Drucks p , des mittleren Molekulargewichts M und der Dichteskalenhöhe H für extrem hohe Aktivitäten	54
Tabelle 16 — Hauptsächliche technische Probleme infolge Weltraumplasmen	69
Tabelle 17 — Parameter für das Modell USAF für diffuse Polarlichter.....	71
Tabelle 18 — Elektronendichteprofile der Ionosphäre, abgeleitet von IRI95 [RD8.2]	72
Tabelle 19 — Elektronendichte über der L -Schale für das Modell von Carpenter und Anderson [RD8.7] unter Vernachlässigung von jahreszeitlichen und Sonnenzykluseffekten	74
Tabelle 10 — Typische Plasmaparameter in der geostationären Umlaufbahn.....	76
Tabelle 11 — Worst-Case-Standardumgebung für die Maxwellsche Zweiteilchen-Verteilungsfunktion	76
Tabelle 22 — Sonnenwindparameter (aus RD8.14)	77
Tabelle 23 — Typische Plasmaparameter der Magnetosheath (aus RD8.14)	78
Tabelle 24 — Einige solare UV-Photoionisationsraten bei 1 AU (nach RD8.17).....	79
Tabelle 25 — Photoelektronenparameter der Hülle.....	80
Tabelle 26 — Beispiele geeigneter Plasmaumgebungen für verschiedene Missionen	80
Tabelle 27 — Parameter zur Quantifizierung von Strahlungseffekten	84
Tabelle 28 — Kenngrößen von typischen Strahlungsgürtelteilchen	85
Tabelle 29 — Standardfeldmodelle, die mit Strahlungsgürtelmodellen zu verwenden sind.....	86
Tabelle 30 — Fluenzwerte für Energie, Missionsdauer und Konfidenzniveau aus dem Modell JPL-1991	88
Tabelle 31 — Standardwahrscheinlichkeits(Vertrauens)niveaus für verschiedene Missionszeiten.....	89

Tabelle 32 — Kumulative Anzahl von Einschlägen N von einer Seite auf eine willkürlich ausgerichtete Platte für einen Bereich von Mindestteilchengrößen mit dem ORDEM-96-Weltraummüllmodell	120
Tabelle 33 — Kumulative Anzahl von Einschlägen N von einer Seite auf eine willkürlich ausgerichtete Platte für einen Bereich von Mindestteilchengrößen mit dem ORDEM-96-Modell	121
Tabelle 34 — Kumulative Anzahl von Einschlägen N von einer Seite auf eine willkürlich ausgerichtete Platte für einen Bereich von Mindestteilchengrößen mit dem MASTER-Weltraummüllmodell.....	122
Tabelle B.1 — Gravitationskenngrößen von Planeten	142
Tabelle B.2 — Kovarianzfehler in normierten Koeffizienten $\bar{C}_{nm}$ (Einheiten von 10^{-6}) vom JGM-2-Modell mit dem Grad (n) und der Ordnung (m) 9.....	142
Tabelle B.3 — Kovarianzfehler in normierten Koeffizienten $\bar{S}_{nm}$ (Einheiten von 10^{-6}) vom JGM-2-Modell mit dem Grad (n) und der Ordnung (m) 9.....	143
Tabelle D.1 — Gleitendes Mittel (gemittelt über 90 min) der Albedoperzentildaten	147
Tabelle D.2 — Gleitendes Mittel (gemittelt über 90 min) der Perzentilwerte der Infrarotstrahlung der Erde in W/m^2	148
Tabelle F.1 — NASA-Worst-Case-Umgebung	160
Tabelle G.1 — Strahlungsprüfungen	165
Tabelle H.1 — Nenn- und Worst-Case-Parameter und Massendichten für das Müllmodell.....	170
Tabelle H.2 — Unsicherheit für ein Konfidenzniveau von 90 % für Weltraummüll	172

Vorwort

Dieses Dokument EN 14092:2002 wurde von CMC erarbeitet.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2002, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis August 2002 zurückgezogen werden.

Sie basiert auf einer früheren Version¹⁾, die ursprünglich von der ECSS-Normungsarbeitsgruppe ECSS-E-10-04 „Weltraumumgebungsnorm“ ausgearbeitet, vom Technischen ECSS-Ausschuss überprüft und vom ECSS-Lenkungsgremium verabschiedet wurde. Die Europäische Kooperation für Raumfahrtnormung (ECSS) ist eine Kooperation der Europäischen Raumfahrtagentur, nationaler Raumfahrtagenturen und europäischer Industrievereinigungen mit dem Ziel der Ausarbeitung und Pflege von einheitlichen Normen.

Diese Norm gehört zu einer Reihe von Raumfahrtnormen, die sich mit dem Management, der Technik (Engineering) und der Produktsicherung in Raumfahrtprojekten und -anwendungen befassen.

Diese Norm formuliert Anforderungen als Festlegungen dessen, was erreicht und weniger, wie die erforderliche Arbeit organisiert und durchgeführt werden soll. Dadurch können bestehende Organisationsstrukturen und -methoden beibehalten werden, wo sie effektiv sind, und sich weiterentwickeln, soweit erforderlich, ohne die Normen neu abfassen zu müssen.

Bei der Abfassung dieser Norm wurde die vorliegende EN ISO 9000-Normenreihe berücksichtigt.

Die Anhänge A, B, C, D, E, F, G, H und I sind informativ.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich.

1) ECSS-E-10-04

Einleitung

Diese Europäische Norm unterstützt die konsequente Anwendung der Weltraumumgebungstechnik auf Raumfahrtprodukte durch Spezifizierung der geforderten oder empfohlenen Verfahren, Daten und Modelle hinsichtlich der Problematik der Sicherstellung der größten Leistungsfähigkeit, der Vermeidung des Auftretens von Problemen oder Überlebensfähigkeit eines Produkts unter Weltraumbedingungen.

Die Weltraumumgebung kann Raumfahrtsystemen erhebliche Schwierigkeiten bereiten. Die geeignete Beurteilung möglicher Effekte erfolgt in den frühen Phasen einer Mission, z. B. wenn Überlegungen zur Wahl der Umlaufbahn, zur Massenbilanz, zum Hitzeschutz und zu den Grundsätzen für die Auswahl der Bauteile angestellt werden. Während der Entwurfsphase eines Raumfahrtsystems sind gewöhnlich weitere technische Anpassungen mit detaillierteren Analysen erforderlich.

Obwohl in dieser Europäischen Norm Synergien und Vernetzungen von Modellen festgelegt werden, wird jede Komponente der Weltraumumgebung gesondert behandelt. Ausführliche informative Anhänge geben erläuternde Hintergrundinformationen zu jedem Abschnitt.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für alle für den Betrieb im Weltraum vorliegenden und eingesetzten Produkttypen und legt die natürlichen Umgebungsbedingungen für alle Raumflugregime fest. Sie legt weiterhin allgemeine Modelle und Regeln zur Bestimmung der vor Ort künstlich erzeugten Umgebung fest.

Projektspezifische oder projektklassenspezifische Abnahmekriterien, Analysemethoden oder -verfahren werden nicht festgelegt.

Die natürliche Weltraumumgebung einer gegebenen Einheit ist der Satz Umgebungsbedingungen, die durch die externe körperliche Umwelt für eine gegebene Mission vorgegeben sind (z. B. Atmosphäre, Meteoroiden und energiereiche Teilchenstrahlung). Die künstlich erzeugte Weltraumumgebung ist der Satz Umgebungsbedingungen, die durch das Vorhandensein oder den Betrieb der Einheit und ihrer Mission hervorgerufen oder modifiziert werden (z. B. Kontamination, Sekundärstrahlungen und Aufladung des Raumfahrzeugs). Weiterhin umfasst die Weltraumumgebung Elemente, die infolge der Durchführung anderer Aktivitäten im Weltraum künstlich erzeugt werden (z. B. Weltraummüll und Kontamination).

2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN 13701, *Raumfahrtsysteme — Glossar*.

ECSS-E-10, *Raumfahrttechnik — Systemtechnik*.

ECSS-E-30, *Teil 1, Raumfahrttechnik — Temperaturregelung*.

ECSS-Q-70-01²⁾, *Raumfahrtproduktsicherung — Überwachung von Reinheit und Verunreinigung*.

Normative Verweisungen für die spezifischen Komponenten der Weltraumumgebung sind in den entsprechenden Abschnitten der Komponenten behandelt.

ANMERKUNG Informative Verweisungen für die spezifischen Komponenten der Weltraumumgebung sind in den entsprechenden Abschnitten der Komponenten behandelt.

3 Begriffe und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1.1

A_p -, K_p -Indizes

Indizes der geomagnetischen Aktivität zur Beschreibung von Schwankungen des geomagnetischen Felds

ANMERKUNG A_p -Werte reichen von 0 bis 400 und werden in Einheiten von 2 nT (Nanotesla) angegeben. K_p ist im Wesentlichen der Logarithmus von A_p .

3.1.2

Energiedosis

Energie, die durch Strahlenbelastung infolge Ionisation und Anregung je Masseneinheit örtlich absorbiert wird

ANMERKUNG Ein Teil der Energieabsorption kann auf Grund einer Verrückung von Atomen zu einer Beschädigung der Gitterstruktur von Feststoffen führen, und das wird gewöhnlich als nicht-ionisierender Energieverlust (NIEL) bezeichnet.

3.1.3

Akkommodationskoeffizient

Maß für die Größe der Energieübertragung zwischen einem Molekül und einer Oberfläche

3.1.4

Albedo

Teil des Sonnenlichts, der von einem Planeten reflektiert wird

3.1.5

Bremsstrahlung

hochenergetische elektromagnetische Strahlung im Energiebereich von Röntgen- bis Gammastrahlung, die durch Abbremsen geladener Teilchen infolge Streuung an Atomkernen emittiert werden

ANMERKUNG Das Primärteilchen wird schließlich absorbiert, während die Bremsstrahlung hoch durchdringend ist. In der Raumfahrt ist die üblichste Quelle für Bremsstrahlung die Elektronenstreuung.

3.1.6

Verunreinigung

fremde (oder unerwünschte) molekulare oder teilchenförmige Substanz, die die Wirksamkeit eines Bauteils beeinflussen oder verschlechtern kann, wenn sie sich in Sicht zu diesem Bauteil oder sich auf diesem befindet

3.1.7

Verunreinigungsumgebung

die durch ein Raumfahrzeug in seiner Nähe verursachte molekulare oder teilchenförmige Umgebung

3.1.8

Strom

häufig bei der Untersuchung des Strahlungstransports als Bezug für die Bewertung des Teilchentransports durch eine Grenzfläche verwendet

ANMERKUNG Im Gegensatz zur Flussdichte hängt der Strom von der Richtung des Durchgangs der Teilchen durch die Grenzfläche ab (sie ist ein Vektorintegral). Eine isotrope ungerichtete Flussdichte f , die auf eine Ebene einfällt, führt gewöhnlich zu einem Strom von $\frac{1}{4}f$ in jeder Richtung durch die Ebene.

3.1.9**direkte Flusssdichte**

freie Strömung oder Ausgasung von Molekülen, die direkt auf eine kritische Oberfläche auftrifft, d. h. ohne vorherige Kollision mit anderen Gasen oder einer anderen Oberfläche

3.1.10**Verteilungsfunktion $f(x, v)$**

Funktion, die die Teilchendichte eines Plasmas im 6-D-Raum beschreibt, der aus den drei Raumvektoren und den drei Geschwindigkeitsvektoren gebildet wird, in $\text{s}^3 \cdot \text{m}^{-6}$

ANMERKUNG Für räumlich gleichmäßige und isotrope Verteilungen wird sie oft mit $f(v)$, einer Funktion der skalaren Geschwindigkeit, in $\text{s} \cdot \text{m}^{-4}$, oder mit $f(E)$, einer Energiefunktion, in $\text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, bezeichnet und kann wie folgt in die Flusssdichte umgewandelt werden:

$$\text{Flusssdichte} = \int v f(v) dv \quad \text{oder}$$

$$\text{Flusssdichte} = \int \frac{f(E)}{m} dE$$

Dabei ist

v die skalare Geschwindigkeit;

E die Energie;

m die Teilchenmasse.

3.1.11**Dosis**

an eine Stelle übertragene Strahlungsenergiemenge

ANMERKUNG Im weitesten Sinne kann hierzu die Teilchenflusssdichte gehören, jedoch bezieht sie sich im Zusammenhang mit den Wirkungen der energiereichen Teilchenstrahlung des Weltraums auf die Energie, die je Masseneinheit infolge von Strahlenbelastung absorbiert wird.

3.1.12**Äquivalentdosis**

Größe, die gewöhnlich für die biologischen Strahlenwirkungen angewendet wird und zur Berücksichtigung der stärkeren Wirkungen bestimmter Strahlungsarten Normierungsfaktoren enthält

3.1.13**Staub**

Teilchen von einem spezifischen Körper des Sonnensystems, das gewöhnlich in der Nähe der Oberfläche dieses Körpers auftritt (z. B. Mond-, Mars- oder Kometenstaub)

3.1.14**Infrarotstrahlung der Erde (Erdeigenstrahlung)**

von der Erde emittierte Wärmestrahlung

ANMERKUNG Auch ausgesandte Langwellenstrahlung genannt.

3.1.15**energiereiches Teilchen**

Teilchen, das hinsichtlich der Wirkung von Strahlung auf Raumfahrtsysteme die Außenflächen des Raumfahrzeugs durchdringen kann

ANMERKUNG Bei Elektronen tritt dies oberhalb von 100 keV auf, bei Protonen und anderen Ionen oberhalb von 1 MeV. Neutronen, Gammastrahlen und Röntgenstrahlen werden in diesem Zusammenhang ebenfalls als energiereiche Teilchen betrachtet.

3.1.16

Äquivalentfluenz

Größe, mit der versucht wird, die Schädigung bei verschiedenen Energien und von verschiedenen Spezies darzustellen

BEISPIEL Für den Güteabfall von Solarzellen beispielsweise wird oft verwendet, dass ein 10-MeV-Proton 3 000 1-MeV-Elektronen „äquivalent“ ist. Diesem Konzept begegnet man auch bei der Betrachtung von Effekten von nicht-ionisierenden Energieverlusten (NIEL).

ANMERKUNG Güteabfallkoeffizienten werden benutzt, um den Schaden einzuschätzen, der durch ein gegebenes Teilchen relativ zu einem Normteilchen und einer Normenergie verursacht wird.

3.1.17

Exosphäre

Teil der Erdatmosphäre, der sich an die Thermosphäre anschließt und sich in den Weltraum erstreckt

ANMERKUNG H- und He-Atome können Fluchtgeschwindigkeiten am Außenrand der Exosphäre erreichen.

3.1.18

$F_{10,7}$ -Flussdichte

solare Flussdichte bei einer Wellenlänge von 10,7 cm in Einheiten von 10^4 Jansky (1 Jansky entspricht $10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)

3.1.19

Fluenz

zeitliches Integral der Flussdichte

3.1.20

Flussdichte

Strahlungsmenge, die eine Fläche je Zeiteinheit durchsetzt, oft in „integraler Form“ als Teilchen je Flächeneinheit je Zeiteinheit (z. B. Elektronen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) über einer bestimmten Schwellenenergie angegeben

ANMERKUNG Die gerichtete Flussdichte ist das Differential, bezogen auf den Raumwinkel (z. B. Teilchen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{Steradian}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), während die „differentielle“ Flussdichte das Differential, bezogen auf die Energie (z. B. Teilchen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), ist. In manchen Fällen werden Flussdichten auch als Differential, bezogen auf das lineare Energieübertragungsvermögen, behandelt (siehe 3.1.28).

3.1.21

freie Molekularströmung

die mittlere freie Weglänge eines Moleküls ist größer als die Abmessungen des interessierenden Volumens (charakteristische Länge)

3.1.22

sonnenorientierte, geozentrische Koordinaten der Erdmagnetosphäre (GSM)

Elemente eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems (X , Y , Z), dessen Ursprung der Erdmittelpunkt ist

ANMERKUNG X weist zur Sonne; Z verläuft senkrecht zu X und liegt in der Ebene, die die X - und die geomagnetische Dipolachse enthält; Y verläuft senkrecht zu X und Z und weist in etwa in Richtung der magnetischen Ortszeit (MLT) der Abenddämmerung.

3.1.23

Heterosphäre

Erdatmosphäre oberhalb 105 km, wo wegen des Diffusionsgleichgewichts artenweise neutrale Konzentrationsprofile bei N_2 -Dominanz unter 200 km, O-Dominanz von 200 km bis 600 km und He-Dominanz ab 600 km Höhe auftreten.

3.1.24**Homosphäre**

Erdatmosphäre unter 105 km, wo eine vollständige vertikale Durchmischung zu einer nahezu homogenen Zusammensetzung von etwa 78,1 % N₂, 20,9 % O₂, 0,9 % Ar und 0,1 % CO₂ und von Spurenbestandteilen führt; die Homopause (oder Turbopause) kennzeichnet den oberen Abschluss der Homosphäre

3.1.25**indirekte Flusssdichte**

Moleküle, die nach Zusammenstoß mit anderen Molekülen oder nach Zusammenstoß und Verweilen auf anderen Oberflächen auf eine kritische Oberfläche auftreffen

3.1.26**isotrop**

Eigenschaft einer Verteilung von Teilchen, bei der die Flusssdichte über alle Richtungen konstant ist

3.1.27***L* oder *L*-Schale**

Parameter des geomagnetischen Felds, der häufig zur Beschreibung von Positionen im erdnahen Weltraum verwendet wird

ANMERKUNG Die *L* oder *L*-Schale hat einen komplizierten Ursprung, der auf einer Invarianten der Bewegung geladener Teilchen im Erdmagnetfeld beruht (siehe Abschnitt 5). Bei der Definition von Plasmaregimen innerhalb der Magnetosphäre ist sie jedoch sinnvoll, weil sie für ein Dipolmagnetfeld gleich der geozentrischen Höhe in Erdradien der örtlichen Magnetfeldlinie ist, wo sie den Äquator kreuzt.

3.1.28**lineares Energieübertragungsvermögen (LET)**

Energie, die von einem abgebremsten energiereichen Teilchen beim Durchlaufen eines Wegs dem Material zugeführt wird

ANMERKUNG Der Begriff wird gewöhnlich zur Beschreibung der Ionisierungsspur infolge eines durchlaufenden Ions verwendet. Das LET ist materialabhängig und weiterhin eine Funktion der Teilchenenergie. Bei Ionen, die an Strahlenwirkungen bei der Raumfahrt beteiligt sind, erhöht es sich mit abnehmender Energie (es erhöht sich auch bei hohen Energien über die Mindestionisierungsenergie). Das LET ermöglicht es, unterschiedliche Ionen durch einfaches Darstellen der Ionenumgebung als Summe der Flusssichten aller Ionen als Funktionen ihrer LET gemeinsam zu betrachten. Dies vereinfacht die Berechnung der Störung durch ein Einzelereignis. Die Energieverlustrate eines Teilchens, die auch emittierte Sekundärstrahlungen umfasst, wird als Bremsvermögen bezeichnet.

3.1.29**magnetische Ortszeit (MLT)**

Parameter, der analog zum Längengrad häufig zur Beschreibung von Positionen im erdnahen Weltraum verwendet wird

ANMERKUNG Der Druck des Sonnenwinds verformt das Erdmagnetfeld in eine kometenähnliche Form. Diese Struktur bleibt fest mit ihrem Vorderteil auf die Sonne und mit dem Schweif von ihr abgewandt gerichtet, wobei die Erde sich in ihr dreht. Somit ist der sich mit der Erde drehende Längengrad kein sinnvoller Weg zur Beschreibung der Position in der Magnetosphäre. Statt dessen wird die magnetische Ortszeit verwendet. Sie hat den Wert 0 (Mitternacht) in der von der Sonne abgewandten Richtung, 12 (Mittag) in der auf die Sonne weisenden Richtung und 6 (Morgendämmerung) und 18 (Abenddämmerung) in Richtung senkrecht zur Sonnen-/Antisonnen-Linie. Sie bedeutet im Grunde eine Ausdehnung der solaren Ortszeit auf der Erde vertikal aufwärts in den Weltraum, wobei die Neigung des Dipols berücksichtigt wird.

3.1.30**Massenstrom**

Masse (g) von Molekülen, die eine festgelegte Ebene je Zeiteinheit und Flächeneinheit ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) durchdringt

3.1.31**Maxwell-Verteilung**

im thermischen Gleichgewicht können Plasmaverteilungsfunktionen als Funktion der skalaren Geschwindigkeit v durch die Maxwell-Verteilung beschrieben werden

$$f(v) = 4 \pi n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(- \frac{v^2 m}{2kT} \right)$$

Dabei ist

n die Dichte;

k die Boltzmann-Konstante;

T die Temperatur.

ANMERKUNG Die vollständige Verteilung ist somit durch ein Zahlenpaar aus Dichte und Temperatur beschrieben. Auch Verteilungen, die sich nicht im Gleichgewicht befinden, können häufig durch die Kombination von zwei Maxwell-Verteilungen sinnvoll beschrieben werden.

3.1.32

Meteoroiden

Teilchen natürlichen Ursprungs im Weltraum; nahezu alle Meteoroiden haben ihren Ursprung in Asteroiden oder Kometen

3.1.33

Molekulare Säulendichte (MCD)

Integral der Anzahlichte (Anzahl einer besonderen Molekülspezies je Volumeneinheit) längs einer festgelegten Sichtlinie, die von einer (Target-, kritischen, Mess-, Referenz-)Oberfläche ausgeht

3.1.34

molekulare Verunreinigung

Verunreinigung ohne messbare Abmessungen

3.1.35

ungerichtete Flussdichte

Skalares Integral der Flussdichte über alle Richtungen

ANMERKUNG Dies besagt, dass eine Richtungsverteilung, die auch nicht-isotrop sein kann, nicht berücksichtigt wird. Die Flussdichte an einem Punkt ist die Anzahl der Teilchen, die eine Kugel mit Einheitsquerschnittsfläche (d. h. mit dem Radius $1/\sqrt{\pi}$) durchdringen. Eine ungerichtete Flussdichte darf nicht mit einer isotropen Flussdichte verwechselt werden.

3.1.36

Ausgasrate

Masse einer Molekülspezies, die von einem Material je Zeiteinheit und je Flächeneinheit ausgeht ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

ANMERKUNG Die Ausgasrate kann auch in anderen Einheiten angegeben werden, wie z. B. in relativer Masseneinheit je Zeiteinheit ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), ($\% \cdot \text{s}^{-1}$) oder ($\% \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$).

3.1.37

Teilchenverunreinigung

feste oder flüssige Verunreinigungsteilchen

3.1.38

permanente molekulare Ablagerung

molekularer Stoff, der infolge Reaktion mit dem Oberflächenmaterial, einer UV-Bestrahlung oder Reaktionen auslösenden Restatmosphäre (z. B. Polymerisation, Bildung von anorganischen Oxiden) ständig auf einer Oberfläche (nichtflüchtig unter den gegebenen Umständen) haftet

3.1.39**Plasma**

Teilweise oder vollständig ionisiertes Gas, dessen Teilchen eine gemeinsame Reaktion auf Magnet- und elektrische Felder aufweisen

ANMERKUNG Die gemeinsame Bewegung erfolgt auf Grund der elektrostatischen Coulomb-Kraft zwischen geladenen Teilchen. Diese bewirkt eine Neuordnung der Teilchen, um elektrischen Feldern innerhalb einer Entfernung in der Größenordnung der Debye-Länge entgegen zu wirken. Bei räumlichen Abmessungen größer als die Debye-Länge ist ein Plasma elektrisch neutral.

3.1.40**Strahlung**

Energieübertragung durch Teilchen (einschließlich Photonen)

ANMERKUNG In dieser Norm wird elektromagnetische Strahlung unterhalb des Röntgenstrahlungsbands nicht behandelt. Damit werden UV-, sichtbare, thermische, Mikrowellen- und Radiowellenstrahlung nicht behandelt.

3.1.41**Rückflusssichte**

Moleküle, die zur (in Richtung der) Quelle oder einer Oberfläche, die nicht direkt sichtbar ist, zurückkehren; Ursachen können sein:

- Zusammenstöße mit anderen natürlichen atmosphärischen Restspezies (Umgebungsstreuung) oder mit anderen identischen oder nicht identischen Verunreinigungsspezies (Eigenstreuung) vor Erreichen der kritischen Oberfläche;
- Ionisation oder dissoziative Ionisation der Moleküle bei Bestrahlung (z. B. UV- oder Teilchenstrahlung) und anschließende Anziehung an eine geladene Oberfläche

3.1.42**Störung durch ein Einzelereignis (SEU), Auswirkung durch ein Einzelereignis (SEE), permanenter Schaden durch ein Einzelereignis (SEL)**

diese Effekte sind das Ergebnis einer örtlich eng begrenzten Energiedeposition durch einzelne Teilchen oder deren Reaktionsprodukte: die Energiedeposition reicht aus, um sichtbare Effekte hervorzurufen

3.1.43**Weltraummüll**

künstliche Objekte oder Teile davon im Weltraum, die keine Funktion erfüllen

ANMERKUNG 1 Der Begriff „Weltraummüll“ ("Space Debris") wird ausschließlich für künstliche Objekte im Weltraum verwendet.

ANMERKUNG 2 In einigen Dokumenten der NASA werden diese künstlichen Objekte als „Orbitmüll“ ("Orbital Debris") bezeichnet, und der Begriff „Space Debris“ wird sowohl für natürliche Meteoroiden als auch für künstliche Objekte verwendet.

3.1.44**Solarkonstante**

elektromagnetische Strahlung der Sonne, die je Zeiteinheit auf eine über der Atmosphäre bei einer astronomischen Einheit (1 AU = mittlerer Abstand Erde-Sonne) liegende, senkrecht zu den einfallenden Sonnenstrahlen gerichtete, Flächeneinheit einer Oberfläche fällt

3.1.45**Sonneneruption**

Emission optischer, UV- und Röntgenstrahlung infolge eines energiereichen Ereignisses auf der Sonne

ANMERKUNG Es gibt kontroverse Ansichten über den kausalen Zusammenhang von Sonneneruptionen und dem Eintreffen großer energiereicher Teilchenströme auf der Erde. Somit ist es günstiger, sich allein auf die Ereignisse durch energiereiche Sonnenteilchen (SEPE) zu beziehen.

3.1.46

Haftwert

Parameter, der die Wahrscheinlichkeit definiert, dass ein auf eine Oberfläche auftreffendes Molekül, verglichen mit den untersuchten Erscheinungen, lange auf ihr verweilt

ANMERKUNG Er ist eine Funktion von Parametern, wie z. B. der Paarung von Verunreinigung und Materialoberfläche, Temperatur, Photo-Polymerisation, Reaktionsfreudigkeit mit atomarem Sauerstoff

3.1.47

Oberflächenakkommodation

Situation, die auftritt, wenn ein Molekül lange genug auf einer Oberfläche haftet, um mit dieser Oberfläche in thermisches Gleichgewicht zu kommen

3.1.48

Thermosphäre

Erdatmosphäre zwischen 120 km und 250 km bis 400 km (abhängig vom Aktivitätswert), wo die Temperatur exponentiell bis zu einem Grenzwert T_{∞} bei der Thermopause ansteigt (Dabei ist T_{∞} die Temperatur der Exosphäre)

3.1.49

VCM-Test

Thermovakuum-Screening-Test zur Bestimmung der Ausgaseigenschaften von Materialien

ANMERKUNG Der Test ist in ECSS-Q-70-04 und in ASTM-E595-90 [RD11.1, RD11.2] beschrieben.

Der Test führte zu folgenden Ergebnissen:

- TML — Gesamtmasseverlust, gemessen nach dem als Differenz der Masse vor und nach einer Vakuumbelastung unter den im Ausgasversuch festgelegten Bedingungen, der gewöhnlich in % der Anfangsmasse des Materials angegeben wird.
- CVCM — Gesammeltes flüchtiges kondensierbares Material, gemessen nicht am Einsatzort auf einer Kollektorplatte nach einer Vakuumbelastung unter den im Ausgasversuch festgelegten Bedingungen, das gewöhnlich in % der Anfangsmasse des Materials angegeben wird.

3.2 Abkürzungen

Abkürzung		Bedeutung
ASTM	American Society for Testing and Materials	American Society for Testing and Materials
AE	Auroral electrojet	Polarer Elektrojet
AO	Atomic oxygen	Atomarer Sauerstoff
BIRA	Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie	Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie
CIRA	COSPAR International Reference Atmosphere	COSPAR Internationale Bezugsatmosphäre
COSPAR	Committee on Space Research	Committee on Space Research
CVCM	Collected volatile condensable material	Gesammeltes flüchtiges kondensierbares Material
DISCOS	ESA's database and information system characterizing objects in space	Datenbank und Informationssystem der ESA zur Charakterisierung von Objekten im Weltraum
DTM	Density and temperature model	Dichte- und Temperaturmodell
e.m.f.	Electro-motive force	Elektromotorische Kraft (EMK)
GCR	Galactic cosmic ray	Galaktische kosmische Strahlung

(fortgesetzt)

Abkürzung		Bedeutung
GEO	Geostationary Earth orbit	Geostationäre Erdumlaufbahn
GRAM	Global reference atmosphere model	Globales Bezugsatmosphärenmodell
GSM	Geocentric solar magnetospheric co-ordinates	Sonnenorientierte, geozentrische Koordinaten der Erdmagnetosphäre (GSM)
HEO	High eccentric orbit	Umlaufbahn mit großer Exzentrizität
HWM	Horizontal wind model	Horizontales Windmodell
IASB	Institute d'Aeronomie Spatiale de Belgique	Institute d'Aeronomie Spatiale de Belgique
IDES	Integrated debris evolution suite	Umfassende aktualisierte Liste für Weltraummüll
IECM	In-flight experiment for contamination monitoring	Experiment zur Überwachung der Kontamination während des Fluges
LDEF	Long duration exposure facility	Langzeit-Bestrahlungseinrichtung
LEO	Low Earth orbit	Erdnahe Umlaufbahn
LET	Linear energy transfer	Lineares Energieübertragungsvermögen
MAH	Model of the high atmosphere	Modell der Hochatmosphäre
MASTER	Meteoroid and space debris terrestrial environment reference model	Referenzmodell der Erdumgebung für Meteoroiden und Weltraummüll
MCD	Molecular column density	Molekulare Säulendichte
MEO	Medium (altitude) Earth orbit	Mittlere Erdumlaufbahn (Höhe)
MET	Marshall engineering thermosphere model	Technisches Thermosphärenmodell nach Marshall
MLT	Magnetic local time	Magnetische Ortszeit
MSIS	Mass spectrometer and incoherent scatter	Massenspektrometer und inkohärente Rückstrahlung
NIEL	Non-ionizing energy loss	Nicht-ionisierender Energieverlust
PMD	Permanent molecular deposition	Ständiger molekularer Niederschlag
R	Sunspot number	Fleckenrelativzahl
r.m.s.	Root-mean-square	Effektivwert
RTG	Radioisotope thermo-electric generator	Thermoelektrischer Radioisotopgenerator
SEU	Single-event upset	Störung durch ein Einzelereignis
SEE	Single-event effect	Auswirkung durch ein Einzelereignis
SEL	Single-event latch-up	Energiekonzentration durch ein Einzelereignis
SEPs	Solar energetic particles	Energiereiche Sonnenteilchen
SEPE	Solar energetic particle events	Ereignisse durch energiereiche Sonnenteilchen
SPE	Solar particle events	Ereignisse durch Sonnenteilchen
TML	Total mass loss	Gesamtmasseverlust
TD	Total density model	Gesamtdichtemodell
USSA	US standard atmosphere	US-Normalatmosphäre
VCM	Volatile condensable material	Flüchtiges kondensierbares Material
VUV	Vacuum ultra violet	Vakuum-Ultraviolett

4 Gravitation

4.1 Einleitung

4.1.1 Newtonsches Gravitationsgesetz

Um die Bewegung eines Satelliten in der Umlaufbahn um einen Zentralkörper festlegen zu können, sind Gravitationsmodelle erforderlich. Das Schwerefeld beeinflusst sowohl die Bewegung des Massenschwerpunkts (Flugbahn) des Satelliten als auch die um seinen Massenschwerpunkt (Fluglage). Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz ziehen sich zwei Körper gegenseitig mit einer Kraft an, die proportional dem Produkt ihrer Massen ist und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstands zwischen ihnen. Diese Beziehung wird für die Festlegung der auf einen Satelliten wirkenden Kraft durch einen Zentralkörper und umgekehrt benutzt, d. h.:

$$F = -\frac{GMm}{r^2}$$

Dabei ist

- F die Schwerkraft;
- G der Proportionalitätsfaktor im Newtonschen Gravitationsgesetz, die sogenannte universelle Gravitationskonstante;
- m die Masse des Satelliten;
- M die Masse des Zentralkörpers;
- r der Abstand zwischen ihren Massezentren.

Ist der Zentralkörper eine Kugel und steht nicht in Wechselwirkung mit anderen Körpern, dann ist unter der Annahme, dass keine Atmosphäre vorhanden ist, die Umlaufbahn eines Satelliten um diesen Körper eine Ellipse konstanter Größe und Form in einer Ebene, deren Richtung im Raum feststehend ist. Das Moment, das sich durch die Wirkung der Schwerkraft auf die verschiedenen Masselemente des Satelliten ergibt, wird Gravitationsmoment genannt. Ohne andere störende Momente bewirkt dieses die Ausrichtung der Längsachse des Satelliten auf die Mitte des Körpers. Damit nimmt das Gravitationsmoment mit der dritten Potenz des Abstands zwischen den Massen ab.

4.1.2 Abweichung vom Punkt-Masse-Modell

Die Erde ist weder eine perfekte Kugel, noch ist sie allein im Weltraum. Somit weicht die Bewegung eines Satelliten in der Erdumlaufbahn vom oben beschriebenen einfachen Verhalten ab. Je nach Anwendung kann ein komplexeres Modell des Erdgravitationsfelds erforderlich sein. Für technische Voranalysen bestehen einfache analytische Ausdrücke, die die maßgebenden Störungen der Umlaufbahn eines Satelliten infolge Erdanziehungsanomalien charakterisieren. Diese Beziehungen sind von den umfassenderen Kugelfunktionsdarstellungen des Erdgravitationsfelds hergeleitet, die in 4.3.1 ausgeführt sind, setzen jedoch voraus, dass die Erde um ihre Polarachse symmetrisch ist und betrachten nur die maßgebenden Terme der Fourier-Entwicklungen. Diese Ausdrücke sind in Anhang B angegeben. Die Schwerkraftgradienten-Stabilisierung wird gewöhnlich verwendet, wenn nur eine grobe Genauigkeit der geozentrischen Richtung erforderlich ist ($> 1^\circ$), und damit ist für die meisten Anwendungen das oben angegebene Punkt-Masse-Modell gültig. Bei Regan und Anandakrishnan [RD4.1] und Wiesel [RD4.2] wird eine umfassende Abhandlung über die Schwerkraftgradienten-Stabilisierung angegeben. Betrachtet man die gravitative Anziehung infolge Sonne und Mond für einen Satelliten in der Erdumlaufbahn, sind Punkt-Masse-Modelle gewöhnlich ausreichend. In Anhang B sind Massewerte für diese Himmelskörper und die anderen Planeten im Sonnensystem angegeben.

4.1.3 Genaue Darstellung des Geopotentials

Für Vorhersagen der Umlaufbahn oder Flugbahnbestimmungen ist eine genaue Darstellung des Gravitationsfelds der Erde notwendig. Da die Erde keine perfekte Kugel ist, muss das Geopotentialfeld mittels der Zentralkraft dargestellt werden, die durch eine Reihe von Kugelfunktionen²⁾ genähert wird, die der Laplace-Gleichung im leeren Raum ($\nabla^2 U = 0$) genügen. Das Geopotential kann dargestellt werden durch:

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM_{\oplus}}{\gamma} \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) [C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda)] \right)$$

Dabei ist

G	die Gravitationskonstante;
$M_{\oplus}$	die Erdmasse;
r	der radiale Abstand vom Schwerpunkt der Erde;
a	die große Halbachse des Referenzellipsoids (gewöhnlich der Äquatorradius der Erde, $R_{\oplus}$);
n	der Grad des Terms der Kugelfunktion;
m	die Ordnung des Terms der Kugelfunktion;
ϕ	die geozentrische Breite;
λ	die geozentrische Länge;
C_{nm}, S_{nm}	Kugelfunktionskoeffizienten;
$P_{nm}(\sin \phi)$	zugeordnete Legendresche Funktionen erster Art, wobei

$$P_{nm}(\sin \phi) = \frac{(\cos \phi)^m}{2^n n!} \frac{d^{n+m}(\sin^2 \phi - 1)^n}{d^{n+m}(\sin \phi)}$$

die Legendreschen Polynome sind.

Für Computerzwecke werden diese Ausdrücke und ihre zugehörigen Koeffizienten in normierter Form, $\bar{P}_{nm}$, $\bar{C}_{nm}$ und $\bar{S}_{nm}$ verwendet, mit:

2) Es wurden auch andere Formen des Potentials in elliptischen Raumkoordinaten entwickelt, was jedoch zu einer komplexeren Darstellung führt und die die Verwendung von elliptischen Legendreschen Polynomen zweiter Art erforderlich macht. Die Entwicklung des Potentials als Kugelfunktionen ist eine natürliche Entwicklung, die in der Analyse der Umlaufbahn der Satelliten angewendet werden kann, weil die Symmetrieeigenschaften der Kugelfunktionen der Unterteilung des Potentials entsprechend der Art der Änderung klassischer Bahnelemente entsprechen.

$$\bar{P}_{nm} = \left[\frac{(2n+1)k(n-m)!}{(n+m)!} \right]^{1/2} P_{nm}$$

$$\bar{C}_{nm} = \left[\frac{(n+m)!}{(2n+1)k(n-m)!} \right]^{1/2} C_{nm}$$

$$\bar{S}_{nm} = \left[\frac{(n+m)!}{(2n+1)k(n-m)!} \right]^{1/2} S_{nm}$$

wobei $k = 1$, wenn $m = 0$ und $k = 2$, wenn $m \neq 0$ ist.

In Abhängigkeit von ihrem Grad n und ihrer Ordnung m wird eine Legendresche Funktion bezeichnet als

1. *zonale* Kugelfunktion, wenn $m = 0$;
2. *sektorielle* Kugelfunktion, wenn $m = n$;
3. *tesserales* Kugelfunktion, wenn $m \neq n$

Eine zonale Kugelfunktion entspricht geometrisch einer besonderen Form der Geopotentialfläche [RD4.3]. Die zonale Kugelfunktion des Grads 2 ($m = 0$, $n = 2$), die den Haupteffekt der Erdabplattung ausdrückt, bewirkt, dass ein Nord-Süd-Schnitt durch die Erde eine elliptische Gestalt besitzt; die zonale Kugelfunktion des Grads 3 ($m = 0$, $n = 3$) liefert ein Profil in Form eines Dreiecks, die Kugelfunktion des Grads 4 in Form eines Vierecks, die des Grads 5 in Form eines Fünfecks und so weiter.

Eine ähnliche Darstellung kann man sich für eine Änderung der Länge vorstellen. Demgemäß ist bei jeder festen Breite ϕ die Änderung der Geoidhöhe mit der Länge λ eine Sinusschwingung mit einer Wellenlänge $2\pi m$, z. B. erzeugt jede Kugelfunktion der Ordnung 15 alle 24 Längengrade *Ausbauchungen*.

Die Bewertung der Kugelfunktionskoeffizienten ist eine einfache Aufgabe. Modelle basieren auf Analysen von entweder photographischen, Doppler oder Laser-Satellitenbeobachtungen zusammen mit Messungen der Erdschwere und mit Satelliten-Höhenmessern gewonnenen Daten.

Die Entwicklung der Schwerkraftmodelle und die Bewertung der Geopotentialkoeffizienten ist ein progressiver Prozess [RD4.4]. Die ersten Schwerkraftmodelle basierten auf der Analyse von Daten der Doppler-Bahnvermessung von Transit-Satelliten und Beobachtungen mit der Baker-Nunn-Kamera und wurden vom John Hopkins University's Applied Physics Laboratory und dem Smithsonian Astrophysical Observatory erstellt. Diese waren bis zu Grad und Ordnung 8 ausgeführt.

In der Astrodynamik werden gegenwärtig fünf moderne Schwerkraftmodelle verwendet. Diese sind WGS-84, entwickelt vom United States of America's Department of Defence, TEG-2B, entwickelt von der University of Texas (UT), OSU-91A, entwickelt von der Ohio State University (OSU), GRIM4, entwickelt von der Europäischen Gemeinschaft und JGM-2, entwickelt von NASA, UT, CNES und OSU. Alle diese Modelle liefern eine Genauigkeit für die Berechnung der Umlaufbahn im Meterbereich. Empfohlen wird das JGM-2-Modell, da es die gegenwärtig beste Darstellung der Erde mittels langer Wellenlängen liefert und die Genauigkeit im Meterbereich gewährleisten kann. Das JGM-2-Modell beruht in seiner Formulierung auf Ergebnissen von OSU-91A [RD4.5] und TEG-2B [RD4.6]. Die WGS-84- und GRIM4-Modelle werden im Anhang kurz erörtert. Vor kurzem wurde von der National Imaginary and Mapping Agency, dem Goddard Space Flight Center und der OSU ein neues Modell EGM-96 entwickelt. Obwohl es in der EU noch nicht eingesetzt wird, ist anzunehmen, dass es JGM-2 als ESA-Standardmodell ablöst (siehe Anhang B).

4.2 Vorstellung von Modellen

4.2.1 Modell

Das JGM-2-Modell (Kombiniertes Schwerkraft-Modell) [RD4.7] wurde aus einer Kombination von Satelliten-Bahnvermessungsdaten, Oberflächengravimetrie und Satelliten-Höhenbeobachtungen entwickelt. Es ist in Kugelfunktionen in Grad und Ordnung bis 70 ausgeführt.

4.2.2 Verbindliche Modellparameter

Tabelle 1 — Verbindliche Modellparameter

Parameter	Wert	Einheiten
Gravitationskonstante G	$6,672\ 59 \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Radius des Erdäquators $R_{\oplus}$	6 378 136,3	m
Geozentrische Masse $M_{\oplus}$	$5,973\ 70 \times 10^{24}$	kg
$GM_{\oplus}$	398 600,441 5	$\text{km}^3 \cdot \text{s}^{-2}$

4.2.3 Anwendungsrichtlinien

Innerhalb der JGM-2-Familie wurden drei Modelle entwickelt. JGM-2S enthält nur die in JGM-2 verwendeten Satelliten-Bahnvermessungsdaten. JGM-2S ist bis zum Grad 70 ausgeführt. Damit auch die Geophysik einbezogen wird, wurde die Version JGM-2G entwickelt. Der Hauptgrund der Ungenauigkeit im JGM-2-Modell besteht darin, dass Satelliten-Bahnvermessungsdaten in den verschiedenen Inklinationsbändern nicht in ausreichendem Umfang und für sehr niedrige Umlaufbahnen keine genauen Satelliten-Bahnvermessungsdaten zur Verfügung stehen. Der Teil des Modells bis zu Grad 70 ist wegen der Bahnvermessungsdaten des Satelliten LAGEOS prinzipiell gut bekannt. Die kurzen Wellenlängen des JGM-2-Modells wurden vorrangig mittels Höhenmessungen und Oberflächenschwerkraftdaten bestimmt und sind damit von Natur aus weniger genau. Jedoch ist das JGM-2-Modell für die meisten Anwendungen der Astrodynamik und Technik mehr als ausreichend, den Ozeanographen, die genaue Höhenmesserberechnungen durchführen, jedoch empfohlen wird, die JGM-2G-Version des Modells zu verwenden. Die Koeffizienten für alle diese Modelle können über das Science-Internet über anonyme Dateiübertragungsprotokolle (ftp) von geodesy@gsfc.nasa.gov bezogen werden. Wird ein gekürzter Koeffizientensatz verwendet, sollte für die besondere Anwendung eine Validierung des Datensatzes durchgeführt werden.

4.3 Referenzdaten

4.3.1 Modellausgabe

In den Tabellen 2 und 3 sind die Werte für die normierten Kugelfunktionskoeffizienten $\bar{C}_{nm}$ und $\bar{S}_{nm}$ bis zu Grad und Ordnung 9 angegeben. In Anhang B sind die zugehörigen 1σ -Fehler angegeben.

4.3.2 Ergebnisse typischer Missionen

In Tabelle 4 ist für repräsentative Missionen bei Verwendung des vollständigen JGM-2-Schwerkraftmodells ein Schätzwert des vorhergesagten Fehlers der Umlaufbahn radial, quer und längs zur Richtung der Bahn angegeben.

Tabelle 2 — Werte der normierten Koeffizienten $\bar{C}_{nm}$ vom JGM-2-Modell für Grad (n) und Ordnung (m) 9

	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0	−484,1654663	0,9571224	0,5401433	0,0684645	−0,1500030	0,0909460	0,0493049	0,0267036
1	−0,0001870	2,0283997	−0,5363680	−0,0591214	−0,0761294	0,2758256	0,0232834	0,1462664
2	2,4390838	0,9044086	0,3503493	0,6533875	0,0486483	0,3278766	0,0787560	0,0245294
3		0,7211539	0,9902582	−0,4519017	0,0579537	0,2508965	−0,0208114	−0,1619243
m 4			−0,1884885	−0,2950801	−0,0862993	−0,2755462	−0,2448369	−0,0085254
5				0,1749710	−0,2671890	0,0018128	−0,0251488	−0,0166623
6					0,0098855	−0,3590382	−0,0651558	0,0626750
7						0,0012547	0,0671575	−0,1184886
8							−0,1238923	0,1884251
9								−0,0481248

Einheiten in 10^{-6}

Tabelle 3 — Werte der normierten Koeffizienten $\bar{S}_{nm}$ vom JGM-2-Modell für Grad (n) und Ordnung (m) 9

	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,0011953	0,2488066	−0,4734226	−0,0955327	0,0265588	0,0967770	0,0591996	0,0206503
2	−1,4001093	−0,6192306	0,6628689	−0,3237786	−0,3737880	0,0940337	0,0662488	−0,0337777
3		1,4140369	−0,2010099	−0,2150966	0,0090304	−0,2166254	−0,0866613	−0,0751423
m 4			0,3088453	0,0496700	−0,4716700	−0,1238634	0,0702875	0,0192064
5				−0,6696502	−0,5365234	0,0177164	0,0892490	−0,0543111
6					−0,2370946	0,1517702	0,3092402	0,2224258
7						0,0244337	0,0746269	−0,0965854
8							0,1204626	−0,0031477
9								0,0966002

Einheiten in 10^{-6}

Tabelle 4 — Vorhergesagter Fehler der Umlaufbahn mittels des JGM-Schwerkraftmodells

Satellit	Große Halbachse (km)	Exzentrizität	Inklination (°)	Vorhergesagter Fehler der Umlaufbahn (cm)		
				Radial	Quer zur Bahn	Längs der Bahn
ERS-1	7153	0,001	98,8	8,0	15,1	160,4
Ajisai	7870	0,001	50,0	2,6	3,6	13,2
Starlette	7331	0,020	49,8	5,2	7,2	16,1
GEOS 3	7226	0,001	114,9	6,6	9,6	72,5
GEOS 1	8075	0,073	59,3	2,3	3,0	45,1
GEOS 2	7711	0,031	105,8	3,3	5,1	63,8
Peole	7006	0,016	15,0	981,0	106,7	353,5
BE-C	7507	0,025	41,2	9,2	11,4	60,0
DI-C	7341	0,053	40,0	14,5	16,9	70,7
DI-D	7622	0,084	39,5	10,1	11,2	88,9
NOVA	7559	0,001	90,0	9,6	21,7	397,0

4.4 Verweisungen

RD4.1, Regan F.J. and S.M. Anandakrishnan, „Dynamics of Atmospheric Re-entry“, ISBN 1-56347-048-9, 1993.

RD4.2, Wiesel, W.E., „Space Dynamics“, McGraw-Hill, Hightstown, NJ, 1989.

RD4.3, King-Hele D.G., „Satellite Orbits in an Atmosphere“, ISBN 0-216-92252-6, Published by Blackie and Son, Ltd, Glasgow, 1987.

RD4.4, „Recommended Practice: Astrodynamics — Concepts, Terms, and Symbols — Part 1“, BSR/AIAA R-064-1994.

RD4.5, Rapp, R.H., Y.M. Wang, and N.K. Pavlis, „The Ohio State 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficient Models“, Report 410, Depart of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1991.

RD4.6, Tapley, B.D., C.K. Shum, D.N. Yuan, J.C. Ries, R.J. Eanes, M.M. Watkins and B.E. Schutz, „The University of Texas Earth Gravity Model“, Paper presented at IUGG XX General Assembly, IAG Symp. G3, Gravity Field Determination from Space and Airborne Measurements, Vienna, Austria, August 12-24, 1991.

RD4.7, Nerem R.S., F.J. Lerch, J.A. Marshall, E.C. Pavlis, B.H. Putney, B.D. Tapley, R.J. Eanes, J.C. Ries, B.E. Schutz, C.K. Shum, M.M. Watkins, S.M. Iosko, J.C. Chan, S.B. Luthcke, G.B. Patel, N.K. Pavlis, R.G. Williamson, R.H. Rapp, R. Biancale, and F. Nouel, „Gravity Model Development for TOPEX/POSEIDON: Joint Gravity Models 1 and 2“, J. Geophys. Res., Vol. 99, No c12, Pages 24, 421-24, 447, December 15, 1994.

5 Geomagnetische Felder

5.1 Einleitung — Übersicht über das geomagnetische Feld und Effekte

In geringer Höhe entspricht das Erdfeld etwa dem eines magnetischen Dipols, wohingegen es in großer Höhe stark durch die Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind gestört wird.

Neben den Modellen für die durch eingefangene Teilchen (Strahlungsgürtel) und Teilchen der Sonnen- und der kosmischen Strahlung gegebene Umgebung sind Modelle des Magnetfelds der Erde erforderlich. Die Morphologien der eingefangenen Teilchen werden als Ort im idealisierten geomagnetischen Dipolraum beschrieben (B , L -Koordinaten), während das Feld benötigt wird, um die magnetischen Abschirmeffekte für die Umgebung energiereicher Sontenteilchen und kosmischer Strahlung zu erfassen. Magnetfeldmodelle werden weiterhin für Untersuchungen der Physik der Magnetosphäre verwendet, wie beispielsweise zur Verfolgung der Flugbahnen von Teilchen durch die Magnetosphäre.

Die Bewegung des Raumfahrzeugs quer zum geomagnetischen Feld führt zu einer induzierten Bewegungs-EMK, die durch $E = v \times B$ im Raumfahrzeug gegeben ist. Wenn ein geschlossener Strompfad aufgebaut werden kann, fließt ein Strom durch das Raumfahrzeug und das umgebende Plasma. Diese Erscheinung kann zur Erzeugung von einigen Volt Potentialdifferenz auf dem großen Raumfahrzeug im LEO führen. Der Effekt wird auch bei Missionen mit seilgefesseltem Satelliten genutzt oder untersucht, wo die Länge der Fessel senkrecht zu B zu großen Strömen und Potentialen führen kann.

Die Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld und einem magnetischen Moment m an Bord führt zu einem Kraftzuwachs:

$$F = (m \times \nabla) B$$

der für die Höhensteuerung verwendet werden kann, wobei ein bordeigener, magnetischer Drehmoment-erzeuger die Größe m liefert.

Dieser Abschnitt befasst sich überwiegend mit quasistatischen geomagnetischen Feldern und Daten, die für die meisten Anwendungen benötigt werden. Die Magnetosphäre ist jedoch ein dynamisches System und besonders in den äußeren Teilen durch große Schwankungen der Plasmapulsaationen und elektrischer und magnetischer Felder gekennzeichnet. Durch die in das geomagnetische Hauptfeld induzierten Störungen kann das Einsetzen der geomagnetischen Substürme in großer Höhe überwacht werden. Diese Störungen werden durch Beobachtungen der bekannten K_p , A_p , D_{st} und anderer geomagnetischer Indizes auf der Erdoberfläche quantifiziert (siehe Abschnitt 6 bezüglich weiterer Einzelheiten über Indizes der geomagnetischen Aktivität). Die gestörte Plasmaumgebung, die häufig in Begleitung solcher Teilstürmen auftritt, kann zur elektrostatischen Aufladung führen (siehe Abschnitt 8 für Einzelheiten).

5.2 Referenzdaten über das magnetischen Feld

Die Gesamtfeldstärke eines idealen Dipols ist gegeben durch:

$$B = MR^{-3} [1 + 3 \sin^2 \lambda]^{-1/2}$$

wobei λ die magnetische Breite und R die radiale Koordinate bedeuten (R , λ bilden ein polares Koordinatensystem). M ist das magnetische Dipolmoment. In einer Dipolnäherung des Erdfelds hat M gegenwärtig einen Wert von etwa $7,9 \times 10^{30}$ nT cm³ oder $30\,400$ nT R_E^3 , wobei R_E den mittleren Erdradius bedeutet. Die Dipolnäherung ist, bezogen auf die Rotationsachse der Erde, sowohl geneigt als auch versetzt, so dass die geomagnetischen Pole nicht mit den geographischen Polen zusammen fallen, und die Feldstärke ist nicht vom Längengrad unabhängig. Diese Konfiguration wird exzentrischer Dipol genannt [RD5.1]. Darüber hinaus ist das geomagnetische Feld langsamen Veränderungen unterworfen. Im Jahre 1990 betrug die Abweichung des exzentrischen Dipols 515 km und vergrößert sich um 2,6 km/Jahr in Richtung 15,6° N und 150,9° O. Ein exzentrischer Dipol besitzt axiale Pole, jedoch auch magnetische Pole, wo die Feldlinien senkrecht auf der Erdoberfläche stehen [RD5.1]. Der axiale Nordpol (geomagnetischer Süden) lag im Jahre 1985 bei 82,05° N und 270,2° O. In Verweisung RD5.1 werden zum geomagnetischen Dipol und seinen

Veränderungen umfassende Ausführungen gemacht. In Tabelle 5 ist die langsame Abnahme des Dipolmoments angegeben.

Tabelle 5 — Änderungen der Dipolmomente von 1945 bis 1995

Jahr	$M \text{ (nT } R_E^3)$	$M \text{ (nT cm}^3)$
1945	31 259,7	$8,0844 \times 10^{30}$
1955	31 125,9	$8,0498 \times 10^{30}$
1965	30 951,6	$8,0047 \times 10^{30}$
1975	30 696,4	$7,9387 \times 10^{30}$
1985	30 438,0	$7,8719 \times 10^{30}$
1995	30 207,7	$7,8123 \times 10^{30}$

5.3 Modelle des geomagnetischen Felds und Analysemodelle

5.3.1 Dipolmodell

Mit der Annahme eines Dipolmodells für das Erdfeld können umfangreiche Schätzwerte der Effekte des geomagnetischen Felds gewonnen werden, wie oben angegeben. Es sollten jedoch die in 5.2 beschriebene Neigung und Verschiebung der Dipolachse berücksichtigt werden.

Die radiale und Breitenkomponente des Felds in Polarkoordinaten bestimmen sich zu:

$$B_R = -\frac{M}{R^3} 2 \sin \lambda$$

$$B_\lambda = \frac{M}{R^3} \cos \lambda$$

und in Kartesischen Koordinaten zu:

$$B_x = 3 xz M R^{-5}$$

$$B_y = 3 yz M R^{-5}$$

$$B_z = (3z^2 - R^2) M R^{-5}$$

Dabei ist

M kann obiger Tabelle entnommen werden;

R der Radius des Orts in Einheiten, die mit den Einheiten von M in Übereinstimmung stehen. Die z -Achse verläuft entlang der Dipolachse.

5.3.2 Feldmodelle mit interner Quelle

Obwohl in erster Näherung das von der Erde intern erzeugte Magnetfeld dipolar ist, sind die nicht dipolaren Beiträge bedeutsam und werden am besten durch numerische Modelle des Felds beschrieben, die auch den

Versatz und die Neigung der geomagnetischen Achse bezogen auf die Rotationsachse der Erde berücksichtigen.

Die gebräuchlichen Standardmodelle des geomagnetischen Felds beschreiben das interne Feld und seine Säkularvariationen durch Kugelfunktionsentwicklungen des skalaren Potentials V [RD5.2]:

$$B = -\nabla V$$

Obwohl eine Anzahl geomagnetischer Feldmodelle zur Verfügung stehen, gehören die international hauptsächlich anerkannten Standardmodelle zu den Modellen der Internationalen Geomagnetischen Referenzfeld-Reihe (IGRF) [RD5.3]. Diese sind als Standard zu verwenden, es sei denn, es liegen besondere Gründe vor, die in diesem Abschnitt und in Abschnitt 9 ausgeführt sind. Die Potentialentwicklung ergibt sich zu:

$$V = a \sum_{n=1}^k \left\{ \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n \left[g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right] P_n^m(\cos\theta) \right\} \quad (5.1)$$

wobei a den Radius der Referenzkugel bedeutet und einen Wert von 6 371,2 km für die IGRF-Modelle besitzt, was dem mittleren Erdradius entspricht. Die Position eines interessierenden Punkts wird durch R , θ und ϕ festgelegt, der geozentrischen Distanz, dem 90°-n-Komplement der Breite der Erde (gemessen vom geographischen Nordpol) bzw. der Länge; g_n^m und h_n^m sind die Modellkoeffizienten und P_n^m die nach Schmidt normierten zugehörigen Legendreschen Funktionen.

Die seit 1960 freigegebenen IGRF-Modelle haben 120 Kugelfunktionskoeffizienten (bis Grad und Ordnung 10) und weitere 80 (bis Grad und Ordnung 8), die die Säkularvariationen der entsprechenden Feldhauptkoeffizienten in linearer Form beschreiben.

5.3.3 Exzentrisches Dipolmodell

In Tabelle 6 sind die ersten 15 Koeffizienten und ihre Säkularvariationen für das IGRF-95-Modell [RD5.4] angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass die ersten 3 Terme Beiträge für einen mittigen (geneigten) Dipol von Dipolen längs der drei Kartesischen Achsen darstellen, während die ersten 8 Terme einen exzentrischen (versetzten und geneigten) Dipol darstellen. Fraser-Smith [RD5.1] beschreibt, wie die Exzentrizität, Neigung und die axialen Pole aus diesen Termen berechnet werden können.

Bild 1 zeigt die Gesamtfeldstärke in einer Höhe von 400 km, die über einer Weltkarte dargestellt ist.

Nach Anhang C kann die Gesamtdipolstärke (Moment) aus den ersten drei Termen wie folgt abgeleitet werden:

$$M = a^3 \left[(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \right]^{1/2}$$

Mit dem so vorgegebenen Feldmodell ist es möglich, einen Wert des Dipolmoments zu bestimmen, der über Säkularvariationen an g und h Änderungen mit der Zeit beinhaltet. In Tabelle 7 ist dargestellt, wie sich die ersten 3 Modellkoeffizienten der Modelle der IGRF-Reihe mit der Zeit geändert haben, und die sich daraus ergebenden Änderungen des geomagnetischen Dipolmoments.

Tabelle 6 — Das IGRF-95-Modell: Koeffizienten und ihre Säkularvariationen für Grad und Ordnung 3

	m	n	Koeffizient (nT)	Säkularvariation (nT/Jahr)
g	0	1	−29 682	17,6
g	1	1	−1 789	13,0
h	1	1	518	−18,3
g	0	2	−2 197	−13,2
g	1	2	3 074	3,7
h	1	2	−2 356	−15,0
g	2	2	1 685	−0,8
h	2	2	−425	−8,8
g	0	3	1 329	1,5
g	1	3	−2 268	−6,4
h	1	3	−263	4,1
g	2	3	1 249	−0,2
h	2	3	302	2,2
g	3	3	769	−8,1
h	3	3	−406	−12,1

Tabelle 7 — Änderungen der Dipolterme und abgeleiteten Dipolmomente der IGRF-Modelle

IGRF-Modell	Modellkoeffizienten			M (nT R_E^3)	M (nT cm ³)
	g_0^1	g_1^1	h_1^1		
1945	−30 634,	−2 240,	5 806,	31 259,7	$8,084\,4 \times 10^{30}$
1955	−30 507,	−2 134,	5 796,	31 125,9	$8,049\,8 \times 10^{30}$
1965	−30 334,	−2 119,	5 776,	30 951,6	$8,004\,7 \times 10^{30}$
1975	−30 100,	−2 013,	5 675,	30 696,4	$7,938\,7 \times 10^{30}$
1985	−29 877,	−1 903,	5 497,	30 438,0	$7,871\,9 \times 10^{30}$
1990	−29 775,	−1 851,	5 411,	30 319,2	$7,841\,2 \times 10^{30}$
1995	−29 682	−1 789,	5 318,	30 207,7	$7,812\,3 \times 10^{30}$

5.3.4 Geomagnetische Koordinaten B und L

Geomagnetische Koordinaten sind für eine Anzahl von Anwendungen sinnvoll oder notwendig, bei denen die Morphologie oder das Verhalten geladener Teilchen in der Magnetosphäre beschrieben werden muss. Die Hauptanwendung erfolgt in Modellen des Strahlungsgürtels der Erde (siehe Abschnitt 9). Diese Teilchenmodelle geben Flussdichten der eingefangenen energiereichen Teilchen als Funktion der Teilchenenergie und der geomagnetischen McIlwain-Koordinaten L und B/B_0 an. L ist in einem idealen Dipolfeld der radiale Abstand der Feldlinie von der Achse am geomagnetischen Äquator, und B ist die magnetische Feldstärke, die die Position längs einer Feldlinie vom Mindestwert B_0 am geomagnetischen Äquator bestimmt. Für viele Anwendungen ist das Paar, B , L (oder entsprechend B/B_0 , L) wegen seiner

Azimutsymmetrie und der Azimutsymmetrie in Teilchenpopulationen ausreichend, um einen Ort im Feld zu definieren.

In einem tatsächlichen geomagnetischen Feld, das nur quasi-dipolar ist, ist L formal über eine Funktion der adiabatischen Integralinvariante I definiert [RD5.5]:

$$I = \int_{l_1}^{l_2} \left(1 - \frac{B}{B_m} \right)^{1/2} dl$$

wobei das Integral längs der Feldlinie zwischen den beiden konjugierten Spiegelpunkten l_1 und l_2 berechnet wird, und B_m ist das Feld an den Spiegelpunkten. I ist eine Konstante auf einer Feldlinie oder einer Driftschale. Die Definition von L ergibt sich dann zu [RD5.5, RD5.6]:

$$L^3 \left(\frac{B}{M} \right) = f \left(\frac{I^3 B}{M} \right) \quad (5.2)$$

wobei M das Geodipolmoment bedeutet (McIlwain verwendete einen konstanten Wert $M = 31\,165,3 \text{ nT } R_E$). Die Funktion f wird mit den Werten für I und B berechnet, die von dem tatsächlichen geomagnetischen Feld über ein Modell abgeleitet wurden. Hilton [RD5.7] lieferte eine einfache Näherung für die Funktion f :

$$f(x) = 1 + a_1 x^{1/3} + a_2 x^{2/3} + a_3 x \quad (5.3)$$

Dabei ist

$$x = I^3 B / M;$$

$$a_1 = 1,350\,47;$$

$$a_2 = 0,456\,376;$$

$$a_3 = 0,047\,545\,5.$$

L ist auf einer Feldlinie oder „Driftschale“ etwa konstant. Ein geladenes Teilchen führt im geomagnetischen Feld drei charakteristische Bewegungsformen aus: eine Gyration um Feldlinien, eine Bouncebewegung zwischen magnetischen Spiegeln in Gebieten mit hoher magnetischer Feldstärke und eine azimutale Drift um die Erde, die eine Driftschale beschreibt. Durch Übertragung der Orbitalorte in das B , L -Koordinatensystem und Einbeziehung der Modelle für die Strahlungsumgebung für den ganzen Orbit können Vorhersagen der Strahlungsbelastung des Satelliten gemacht werden (siehe Abschnitt 9).

Daraus folgt, dass die Berechnung von L an einem Punkt eine Integration längs einer Feldlinie mittels eines magnetischen Feldmodells bedeutet. Es ist wesentlich, dass das Verfahren der Integration und die Parameter M und a_1 , a_2 und a_3 bei der Erstellung der Modelle der Teilchenumgebung und ihrer Einbeziehung miteinander vereinbar sind. Für Modelle des Strahlungsgürtels wurde der McIlwain-Wert verwendet, der für Änderungen des magnetischen Moments nicht auf dem neuesten Stand ist, und dieser Wert ist bei den Zugriffsroutinen für die AE-8- und AP-8-Modelle, die in Abschnitt 9 festgelegt sind, zu verwenden. Weiterhin sind nur die in Abschnitt 9 festgelegten Magnetfeldmodelle für die Erstellung von B , L -Koordinaten zur Anwendung dieser Teilchenmodelle zu verwenden.

Für den geomagnetischen Äquator, der mit der Position einer Feldlinie mit dem Mindestwert von B übereinstimmt, ergibt sich:

$$B = B_0 = ML^{-3}$$

wobei M das geomagnetische Dipolmoment bedeutet.

Polarkoordinaten im idealisierten Dipolraum werden auf B und L bezogen entsprechend:

$$R = L \cos^2 \lambda$$

und die Feldstärke ergibt sich zu:

$$B = \frac{M}{R^3} (1 + 3 \sin^2 \lambda)^{1/2}$$

wobei λ die magnetische Breite und R die radiale Koordinate bedeuten, die am magnetischen Äquator eindeutig einen Wert von $R_0 = L$ besitzt.

5.3.5 Feldmodelle mit externer Quelle

Die oben beschriebenen Modelle beschreiben nur das durch Vorgänge innerhalb der Erde erzeugte Feld. In großen Höhen sind die meisten Terme höherer Ordnung vernachlässigbar, und die Dipolnäherung ist häufig ausreichend für die Beschreibung dieses Beitrags. Jedoch bewirken die Sonnenwinde tägliche große Deformationen des Felds in großer Höhe (siehe Bild 2 [RD5.8]). Dieser Effekt bedeutet zusammen mit dem Ringstrom von azimuthal driftenden Teilchen und anderen Stromsystemen, dass das interne Feld das Gesamtfeld nur mangelhaft darstellt. Die Effekte der anderen Stromsysteme bewirken einen Tagesgang des Magnetfelds und eine Störung externer Stromsysteme, die sich mit der Sonnen- und geomagnetischen Aktivität ändern (Sonnenwinddruck, Ringstromintensität, K_p -Schwankungen).

Von Tsyganenko [RD5.9, RD5.10], Olsen und Pfitzer [RD5.11] und Mead und Fairfield [RD5.12] sind verschiedene Modelle für die externen Beiträge des Felds entwickelt worden. Es ist noch kein international anerkanntes Standardmodell vorhanden, obwohl in dieser Richtung Fortschritte erzielt wurden [RD5.13]. Da diese Modelle die Tagesasymmetrie des Felds beachten und von geomagnetischen Aktivitätsindizes abhängen, sind sie für die Anwendung bei der Kartographierung von energiereichen Teilchenflussdichten und ihren Reaktionen auf Aktivitätsänderungen sehr interessant. Das Programm für die Datenanalyse nach dem Flug für die CRRES-Mission verwendet Modelle des externen Felds [RD5.14]. Der Effekt von Deformationen in großer Höhe bewirkt, dass der Äquatorradius der Driftschale eines Teilchens vom Pitchwinkel des Teilchens abhängt, so dass die Populationen getrennt werden und in einer Weise azimuthal zusammenlaufen, dass die Nachbildung ihrer Morphologien erschwert wird.

Modelle externer Quellen sollten nicht in Verbindung mit den in Abschnitt 9 beschriebenen Stromstandardmodellen für den Strahlungsgürtel verwendet werden.

Es ist kein besonderes Modell als Standard der externen Quelle erforderlich.

Die Beträge des Felds externer Quellen sind sehr klein, und es wird betont, dass sie nur unter speziellen Umständen betrachtet werden müssen. Bass und Jordan [RD5.15] verglichen verschiedene Modelle miteinander und zeigten, dass die Beträge der Fehler mit verschiedenen Modellen und auch verglichen mit den CRRES-Magnetometerdaten sehr groß sein können, jedoch sollte nochmals betont werden, dass die Felder selbst hier relativ schwach sind.

Einer der Bereiche, bei denen ein externes Modell des geomagnetischen Felds sinnvoll ist, ist der für eine verbesserte Berechnung der B , L -Koordinaten bei Modellen für Strahlungsgürtel der eingefangenen Teilchen. Die Verwendung von einem nur internen Feld ist bei großen Höhen bis zu einem (1) Erdradius fehlerhafter als ein Modell, das interne und externe Felder umfasst. Solche verbesserten Modelle sind, wie bereits früher angemerkt, konsequent anzuwenden: die Modellerstellung und die Zugriffsroutinen müssen für die Berechnung von B und L die gleichen Verfahren verwenden.

Das Feld in der geostationären Umlaufbahn ist von etwa 100 nT Stärke mit einer Modulation von etwa 50 % infolge der Tagesasymmetrie. Während starker geomagnetischer Stürme kann sich die Feldstärke vollständig umkehren und -200 nT erreichen. Im geomagnetischen Schweif (von der Sonne abgewandt) kann die Feldrichtung nicht parallel zur geomagnetischen oder Rotationsachse der Erde sein. Im Datenarchiv für die Weltraumumgebung des GOES-Satelliten sind Daten über Schwankungen des Magnetfelds in der geostationären Umlaufbahn verfügbar [RD5.16].

Bild 3 zeigt die aus einem kombinierten Modell der internen und externen Quelle abgeleitete Veränderung des gesamten geomagnetischen Felds als Funktion der Höhe. Es sind Bedingungen für verschiedene Ortszeiten und Aktivitäten angegeben. Der Fehlerbalken bei der geostationären Höhe stellt qualitativ die Variabilität dar.

5.3.6 Grenzen der Magnetosphäre

Zur Einschätzung der hauptsächlichen Orte der Grenzen der Magnetosphäre für die Planung von Missionen können einige einfache Darstellungen verwendet werden. Der geozentrische Abstand der Magnetopause auf der Tagseite ist gegeben nach:

$$L_{\text{mp}} = 107,4 (n_{\text{sw}} u_{\text{sw}}^2)^{-1/6}$$

wobei L_{mp} in Einheiten des Erdradius, n_{sw} die Protonenzahldichte des Solarwinds in cm^{-3} und u_{sw} die Kollektivgeschwindigkeit des Solarwinds in km/s bedeuten. Typische Werte für n_{sw} und u_{sw} sind 8 cm^{-3} bzw. 450 km/s, die zu einem geozentrischen Abstand von etwa 10 Erdradien führen.

Der Ort der Magnetopause ist mittels des folgenden Modells von Sibeck u. a. [RD5.17] nachzubilden. Dieses stellt den Ort der Magnetopause in Form der folgenden Funktion dar:

$$R^2 + A x^2 + B x + C = 0$$

wobei

$$R^2 = y^2 + z^2;$$

x, y und z sind GSM-Koordinaten in Erdradien;

A, B und C sind Anpassungsparameter, die von dem Sonnenwinddruck entsprechend Tabelle 8 abhängig sind.

Tabelle 8 — Magnetopausenmodell nach Sibeck u. a. [RD5.17]

Druckbereich des Sonnenwinds (nPa)	A	B	C	Subsolarpunkt (R_E)	Meridian der Morgendämmerung (R_E)
0,54 – 0,87	0,19	19,3	–272,4	12,6	16,5
0,87 – 1,47	0,19	19,7	–243,9	11,7	15,6
1,47 – 2,60	0,14	18,2	–217,2	11,0	14,7
2,60 – 4,90	0,15	17,3	–187,4	10,0	13,7
4,90 – 9,90	0,18	14,2	–139,2	8,8	11,8

5.4 Anpassungsrichtlinien

Wie bereits erwähnt, sollte vor Auswahl eines Modells eine sorgfältige Betrachtung der Erfordernisse der Anwendung erfolgen. Ein Dipolmodell mit geringer Wiedergabetreue (axial ausgerichtete, exzentrische oder geneigte Dipole) kann vielen technischen Anwendungen genügen. Für die meisten technischen Anwendungen bestand nie die Notwendigkeit, auf das Modell einer externen Quelle zurückgreifen zu müssen. Diese können nur bei der Missionsplanung für magnetosphärische Missionen notwendig werden, oder wenn Daten aus Gebieten hoher Breite oder großer Veränderlichkeit der Höhe der Felder hinsichtlich Ortszeit und solar-geomagnetischer Aktivität, erforderlich sind. Sie können auch notwendig werden, wenn in großen Höhen, wie z. B. in der geostationären Umlaufbahn, die Erzeugung eines magnetischen Drehmoments verwendet wird, obwohl die dynamische Veränderlichkeit des Felds in großen Höhen zu beachten ist.

Für die Anwendung der Nachbildung des Strahlungsgürtels muss die Vereinbarkeit zwischen dem Konstruktions-Feldmodell und dem Anwenderzugangs-Feldmodell des Modells sichergestellt sein (z. B. Jensen-Cain- und GSFC-Modelle für Modelle der AE- und AP-Reihe, siehe Abschnitt 9).

5.5 Bilder

Magnetische Feldstärke (Gauss) bei 400 km, IGRF-1995

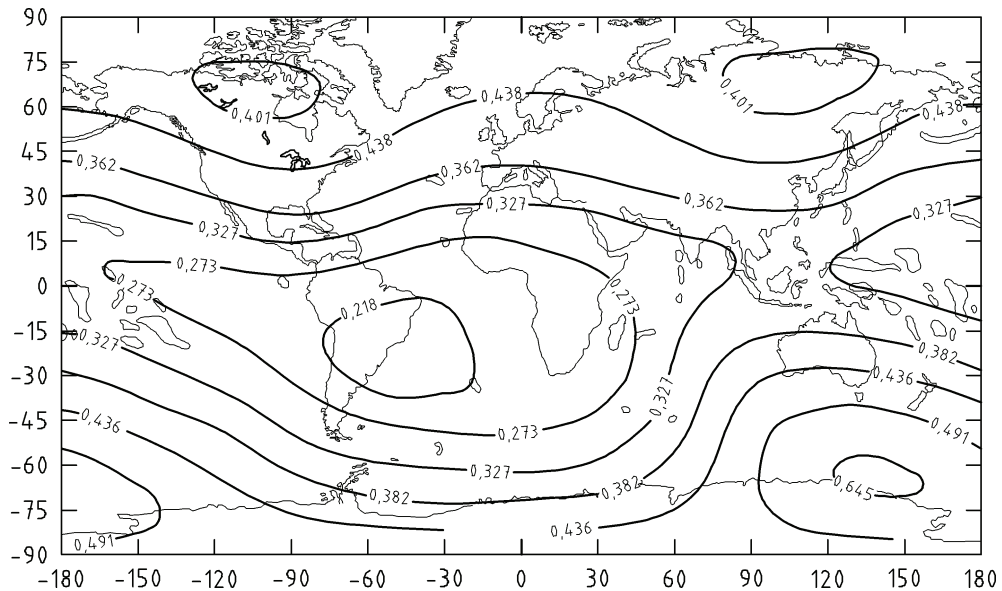
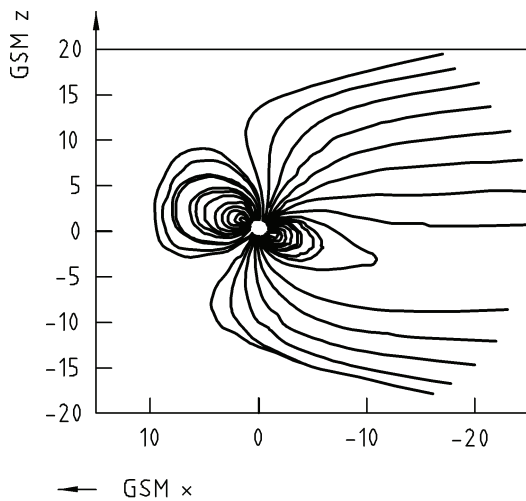
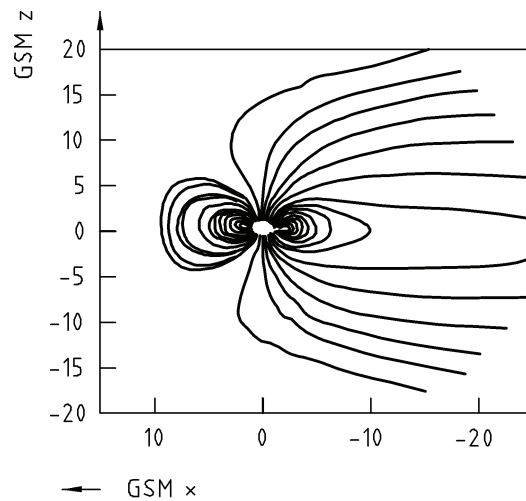


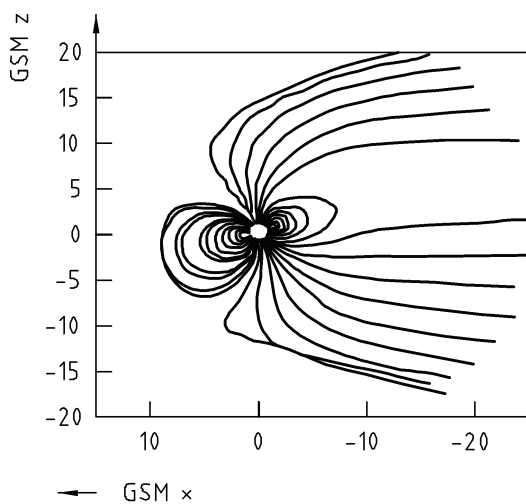
Bild 1 — Geomagnetische Feldstärke in einer Höhe von 400 km, basiert auf IGRF-1995



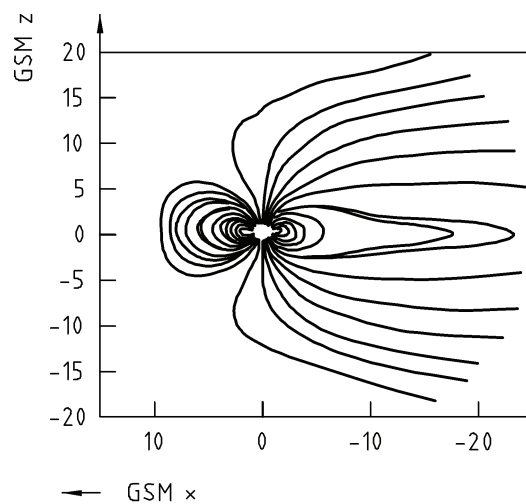
a)



b)



c)

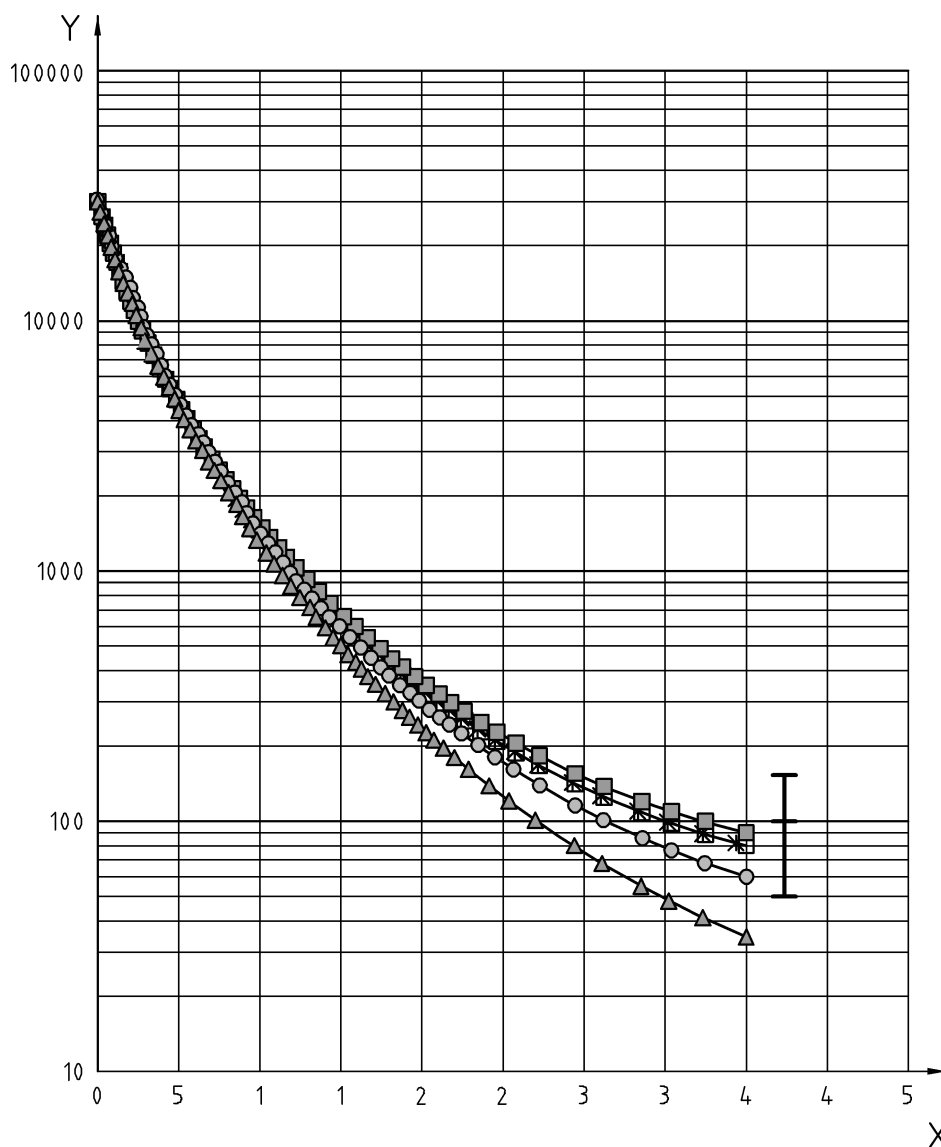


d)

Legende

- a) Winter;
- b) Frühling;
- c) Sommer;
- d) Herbst

Bild 2 — Ausgabe von geomagnetischen Feldmodellen, die die täglichen Deformationen des Felds und jahreszeitliche Änderungen in der Deformation darstellen [RD5.8]



Legende

Y Geomagnetisches Feld B

X Höhe in 10^3 km

—■— Ortszeit 12.00, $K_p = 0$

—□— IGRF-interne Feld

—*— Ortszeit 12.00, $K_p = 5$

—●— Ortszeit 00.00, $K_p = 0$

—▲— Ortszeit 00.00, $K_p = 5$

— Stormänderungen

Feldmodelle enthalten nur interne (IGRF-) und Modelle der externen Quelle für verschiedene Bedingungen. Es ist auch die typische dynamische Änderung für eine geostationäre Umlaufbahn während der gestörten Perioden dargestellt.

Bild 3 — Änderung des geomagnetischen Felds als Funktion der Höhe

5.6 Verweisungen

RD5.1, Fraser-Smith, A.C., „Centered and Eccentric Geomagnetic Dipoles and Their Poles, 1600-1985“, Rev. Geophys., 25, 1-16, 1987.

RD5.2, Stern D. „Representation of Magnetic Fields in Space“, Rev. Geophys. and Space Phys. 14, 199, 1976.

RD5.3, Peddie, N.W., „International Geomagnetic Reference Field: The Third Generation“, J. Geomag. Geoelectr. 34, 309-326, 1982.

RD5.4, Barton C.E., „Revision of International Geomagnetic Reference Field Released“, EOS Transactions of the AGU 77, 16, April 16, 1996.

RD5.5, Hess W.N., „The Radiation Belt and the Magnetosphere“, Blaisdell Publ. Co. New York, 1968.

RD5.6, McIlwain C.E., Co-ordinates for Mapping the Distribution of Geomagnetically Trapped Particles“, J. Geophys. Res., 66, 3681, 1961.

RD5.7, Hilton H.H., „L Parameter - A New Approximation“, J. Geophys. Res., 76, 6952, 1971 (Es ist zu beachten, dass dieser Artikel einen Schreibfehler in der Darstellung für a_3 von Gleichung 5.3 enthält).

RD5.8, Rasinkangas R., K. Munsula, T. Ulich, and J. Kangas, „Magnetic field models“ in „Space Physics Textbook“, <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/bmodels.html>, Oulu University, 1998.

RD5.9, Tsyganenko N.A., „A Magnetospheric Magnetic Field Model with a Warped Tail Current Sheet“, Planet. Space Sci. 37, 5-20, 1989.

RD5.10, Tsyganenko N.A. and D.P. Stern, „Modeling the Global Magnetic Field of the Large-Scale Birkeland Current Systems“, J. Geophys. Res., 101, 27187-27198, 1996.

RD5.11 Olsen W.P. and K.A. Pfitzer, „A Quantitative Model of the Magnetospheric Magnetic Field“, J. Geophys. Res., 79, 3739, 1974.

RD5.12, Mead G.D. and D.H. Fairfield, „Magnetospheric Mapping with a Quantitative Geomagnetic Field Model“, J. Geophys. Res. 80, 523, 1975.

RD5.13, Stern D.P. and N.A. Tsyganenko, „Uses and Limitations of the Tsyganenko Magnetic Field Models“, EOS, Transactions, American Geophysical Union, 73, no. 46, 489, 17 November 1992.

RD5.14, Pfitzer K.A., „Improved Models of the Inner and Outer Radiation Belts“, Phillips Lab Scientific Report PL-TR-91-2187, US Air Force Systems Command, PLGD, Hanscom AFB, Ma., 1991.

RD5.15, Bass, J.N. and C.E. Jordan, „Models of the External Source Contribution to Magnetospheric Magnetic Fields for CRRES Data Analysis, Scientific Report No. 2“, GL-TR-90-0009, Geophysics Laboratory, AFSC, 1990.

RD5.16, National Geophysical Data Center, „Space Environment Data from NOAA's GOES Satellites“, National Geophysical Data Center, Code E/GC2, Dept. 946, 325 Broadway Boulder Co 80303 3328 USA., also Space Physics Interactive Data Resource at <http://www.ngdc.noaa.gov:8080/>.

RD5.17, Sibeck D.G., R.E. Lopez and E.C. Roelof, „Solar Wind Control of the Magnetopause Shape, Location and Motion“, J. Geophys. Res. 96, p. 5489, 1991.

6 Elektromagnetische Strahlung von Sonne und Erde und Indizes

6.1 Einleitung

Ein Raumfahrzeug in der LEO empfängt elektromagnetische Strahlung von drei externen Hauptquellen. Die größte Quelle ist die direkte solare Flussdichte. Der Mittelwert dieser solaren Flussdichte beim mittleren Abstand Sonne-Erde wird als „Solarkonstante“ bezeichnet. Sie ist nicht tatsächlich eine Konstante, sondern schwankt während eines Jahrs wegen der leicht elliptischen Umlaufbahn der Erde um die Sonne um 3,4 %. Weiterhin schwankt die von der Sonne emittierte Strahlungsmenge leicht (um etwa $\pm 0,1$ %) über den 11-Jahre-Sonnenzyklus.

Der Teil des einfallenden Sonnenlichts, der von einem Planeten diffus reflektiert wird, wird mit Albedo bezeichnet. Für ein Raumschiff in der Umlaufbahn hängt der Albedowert hauptsächlich von dem Teil des Sonnenlichts der Erde ab, den das Raumfahrzeug sehen kann. Albedostrahlung besitzt etwa die gleiche

spektrale Verteilung wie die Sonne, und in dieser Norm bezieht sich die Albedo auf die gesamte Albedo des Sonnenspektrums. Die Albedo ist über die Erdkugel stark veränderlich und hängt von Oberflächeneigenschaften und der Bewölkung ab. Weiterhin hängt sie vom solaren Zenitwinkel ab.

Die dritte Quelle ist die Infrarotstrahlung der Erde. Die von der Erde emittierte Wärmestrahlung hat ein Schwarzkörperspektrum mit einer charakteristischen mittleren Temperatur von 288 K. Die Infrarotstrahlung der Erde verändert sich auch über die Erdkugel, jedoch weniger als die Albedo. Sie weist außerdem einen Tagesgang auf, der über dem Ozean gering ist, jedoch in Wüstengebieten bis zu 20 % betragen kann.

Sonnen- und geomagnetische Aktivitäten werden häufig durch Indizes ausgedrückt. Die UV-Strahlung der Sonne, die die Erdatmosphäre stark beeinflusst, kann von der Erdoberfläche aus nicht direkt gemessen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass sie beispielsweise mit der Fleckenrelativzahl und der Sonnenstrahlung im Zentimeterbereich gut korreliert. Der weit verbreitete 10,7-cm-Radiofrequenz-Flussdichteindex ($F_{10,7}$) liefert ein gutes Maß für die solare UV-Abstrahlung, die über einen Sonnenzyklus sehr variabel ist.

Geomagnetische Indizes beschreiben gewöhnlich die Veränderung des geomagnetischen Felds über einen bestimmten Zeitraum. Sie liefern ein Maß für die Störung der Magnetosphäre, was direkte Auswirkungen auf die geladenen Teilchen des Weltraums hat.

Solare und geomagnetische Indizes sind als Eingangsgröße für die obere Atmosphäre und andere Modelle der Umgebung des erdnahen Weltraums erforderlich. Sie liegen für kurze Zeiträume oder als Langzeitmittelwerte vor. Vorhersagen für künftige Indexwerte liegen gewöhnlich bei verschiedenen Vertrauensbereichen vor, und sie stehen für vollständige Sonnenzyklen zur Verfügung.

Die gegebenen Daten sind hauptsächlich Mittelwerte. Für detaillierte Wärmeanalysen oder bestimmte Spezialanwendungen sind detailliertere Daten und Modelle erforderlich, die nicht im Geltungsbereich dieser Norm liegen. Anforderungen für Wärmeanalysen sind in ECSS-E-30, Teil 1, festgelegt [RD6.1].

6.2 Solare elektromagnetische Strahlung

6.2.1 Solarkonstante

Die Solarkonstante ist definiert als die Strahlung je Zeiteinheit, die eine über der Erdatmosphäre liegende, senkrecht zu den einfallenden Sonnenstrahlen gerichtete Flächeneinheit in der Zeiteinheit von der Sonne bei einer astronomischen Einheit (1 AU = Mittlerer Abstand Erde-Sonne) empfängt.

Die Solarkonstante hat eine Unsicherheit von etwa $\pm 10 \text{ W/m}^2$ [RD6.2]. Es sind die folgenden Werte für die elektromagnetische Strahlung zu verwenden:

Solarkonstante bei 1 AU	1 371 W/m^2
Größte solare Energieflussdichte (Wintersonnenwende)	1 428 W/m^2
Kleinste solare Energieflussdichte (Sommersonnenwende)	1 316 W/m^2
Solarer Strahlungsdruck (100 % reflektierende Platte)	$9,02 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$

6.2.2 Sonnenspektrum

Das Sonnenspektrum ist durch eine Schwarzkörperkurve mit einer charakteristischen Temperatur von 5 762 K anzunähern. Es ist eine Weltraumhintergrundtemperatur von 3 K anzunehmen.

Der UV-Anteil (Wellenlänge $\lambda < 300 \text{ nm}$) des elektromagnetischen Spektrums ist von besonderer Bedeutung bei der Bestimmung der Wirkungen der Sonnenstrahlung auf die obere Atmosphäre und auf die Materialeigenschaften. Die integrierte Irradianz des nahen elektromagnetischen UV-Strahlungsenergieflusses ($180 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) beträgt etwa 118 W/m^2 . Der ferne UV-Anteil ($\lambda < 180 \text{ nm}$) beträgt etwa $0,023 \text{ W/m}^2$.

Die Solarkonstante ändert sich um nur etwa $\pm 0,1\%$ um den Mittelwert über einen Sonnenzyklus [RD6.3] und ist während der Dauer der maximalen Sonnenaktivität am größten.

Bestimmte Teile des Spektrums sind sowohl über die Rotationsdauer der Sonne von 27 Tagen als auch über den Sonnenzyklus von 11 Jahren veränderlicher. Diese Änderung reicht von etwa 50 % für den nahen UV-Anteil bis zu einem Faktor 2 für den UV- und fernen UV-Anteil und kann Größenordnungen für Röntgenstrahlen aus Sonneneruptionen erreichen.

Die mittleren und die Worst-Case-Irradianzpegel für das hochenergetische Spektrum sind in Tabelle 9 zusammen gestellt. Die Mittelwerte wurden RD6.2 entnommen.

Für Entwurfszwecke sind die Worst-Case-Werte von Tabelle 9 zu verwenden. Die für die Röntgenstrahlung aus Sonneneruptionen angegebenen Flussdichten sind Spitzenwerte für große Sonneneruptionen. Für Entwürfe ist eine solche Röntgenstrahlen-Sonneneruption von einer Stunde je Woche anzunehmen.

In Anhang D sind weitere Einzelheiten über das Sonnenspektrum angegeben.

Tabelle 9 — Hochenergetische solare elektromagnetische Flussdichte

Typ	Wellenlänge	Mittlere Flussdichte	Worst-Case-Flussdichte
	(nm)	(W/m ²)	(W/m ²)
Nahes UV	180 – 400	118	177
UV	<180	$2,3 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$
UV	100 – 150	$7,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
EUV	10 – 100	2×10^{-3}	4×10^{-3}
Röntgenstrahlen	1 – 10	5×10^{-5}	1×10^{-4}
Sonneneruption-Röntgenstrahlung	0,1 – 1	1×10^{-4}	1×10^{-3}

6.3 Elektromagnetische Strahlung der Erde

6.3.1 Erdalbedo

Die Albedo ist der Teil des Sonnenlichts, der diffus von einem Planeten reflektiert wird.

Die mittlere Albedo der Erde beträgt etwa 0,3. Kurzzeitig kann die Albedo zwischen etwa 0,05 und 0,6 schwanken.

Für Albedostrahlung ist dieselbe Spektralform wie für Sonnenlicht anzunehmen.

Die Albedowerte sind nur anwendbar, wenn ein Teil der Erde, die vom Satelliten gesehen wird, von der Sonne beleuchtet ist. Albedowerte ändern sich mit dem solaren Zenitwinkel. Für Albedoanalysen sind der von der Sonne beschienene Teil der Erde und der solare Zenitwinkel zu beachten.

Mittlere Albedowerte sind manchmal mit Vorsicht zu verwenden, z. B. für Kurzzeitanalysen oder für sonnensynchrone Umlaufbahnen, wo die Albedo von spezifischen Ortszeiten herrührt.

In Anhang D sind zusätzliche Informationen über die Veränderlichkeit der Albedo angegeben.

6.3.2 Infrarotstrahlung der Erde (Erdeigenstrahlung)

Die von der Erde emittierte Wärmestrahlung wird auch „Infrarotstrahlung der Erde“ oder „ausgesandte Langwellenstrahlung“ genannt.

Für die Infrarotstrahlung der Erde ist ein Schwarzkörperspektrum mit einer charakteristischen Temperatur von 288 K anzunehmen.

Die von der Erde emittierte mittlere Infrarotstrahlung beträgt 230 W/m^2 . Kurzzeitig kann sie zwischen 150 W/m^2 und 350 W/m^2 schwanken.

Der Tagesgang kann über Wüstengebieten etwa 20 % betragen, während er über Ozeanen gering ist.

In Anhang D sind zusätzliche Informationen über die Veränderlichkeit der Infrarotstrahlung der Erde angegeben.

6.4 Solare und geomagnetische Indizes

6.4.1 Allgemeines

Die solaren und geomagnetischen Indizes werden zur Beschreibung der Aktivitätspegel der Sonne und der Deformation des geomagnetischen Felds verwendet. Die meisten Aktivitätsindizes sind für kurze Zeiträume und als Langzeitmittelwerte angegeben. Sie werden auch für Langzeitvorhersagen von Sonnenaktivitäten verwendet. Für viele Weltraummodelle werden Aktivitätsindexwerte als Eingabeparameter benötigt.

6.4.2 Beschreibung von Indizes

6.4.2.1 Sonnenaktivitätsindizes

Die am häufigsten verwendeten Sonnenaktivitätsindizes sind die Fleckenrelativzahl R und die 10,7-cm-Radiofrequenz-Flussdichte $F_{10,7}$. Diese Werte, die auf der Erdoberfläche gemessen werden können, weisen eine strenge Korrelation zur UV-Strahlung der Sonne auf, die einen starken Einfluss auf die Erdatmosphäre besitzt.

Der Sonnenaktivitätsindex $F_{10,7}$ gibt die Flussdichte bei einer Wellenlänge von 10,7 cm in 10^4 Jansky (1 Jansky entspricht $10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) an.

Der $F_{10,7}$ -Index und die Fleckenrelativzahl R werden korreliert. (Über einen Monat oder länger) gemittelte Werte können nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$F_{10,7} = 63,7 + 0,728 R + 8,9 \times 10^{-4} R^2$$

6.4.2.2 Geomagnetische Aktivitätsindizes

Geomagnetische Aktivitätsindizes werden zur Beschreibung von Schwankungen des geomagnetischen Felds verwendet. Die am weitesten verbreiteten planetaren Indizes sind K_p und a_p . Sie basieren auf 3-Stunden-Messungen von 12 Bodenstationen. Werte von a_p liegen im Bereich von 0 bis 400 und werden in 2 nT angegeben. K_p ist im Wesentlichen der Logarithmus von a_p . Die Umrechnung von K_p in a_p ist in Tabelle 10 angegeben (RD6.4 entnommen). Ein Tagesindex A_p wird durch Mittelung der acht Werte von a_p für jeden Tag ermittelt.

Neben K_p und a_p werden weitere Aktivitätsindizes zur Beschreibung der verschiedenen Aspekte der Aktivität des geomagnetischen Felds verwendet. Eine Übersicht über die verschiedenen Aktivitätsindizes und ihre Definitionen ist in RD6.5 angegeben.

Tabelle 10 — Umrechnung von K_p in a_p

K_p	0	0+	1–	10	1+	2–	20	2+	3	30	3+	4–	40	4+
a_p	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
K_p	5–	50	5+	6–	60	6+	7–	70	7+	8–	80	8+	9–	90
a_p	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

6.4.3 Sonnenzyklusabhängigkeit

Tabelle 11 listet die geglätteten Mindest, Mittel- und Höchstwerte von 13 Monaten für $F_{10,7}$ und A_p über einen mittleren Sonnenzyklus von 11 Jahren auf. Dieser Werte sind RD6.2 entnommen. Die Mindest- und Höchstwerte sind Extremwerte im Aufzeichnungszeitraum für jeden Punkt im Zyklus und wurden ermittelt, nachdem die Werte über 13 Monate geglättet und auf den Hauptzyklus beschränkt wurden. Die Standardabweichung der mittleren Zykluslänge über den Aufzeichnungszeitraum beträgt 1,23 Jahre. In Bild 4 sind diese Daten graphisch dargestellt.

Tabelle 11 — Höchst-, Mittel- und Mindestwerte der über 13 Monate geglätteten solaren 10,7-cm-Radiofrequenz-Flussdichte- und des geomagnetischen Aktivitätsindex über den mittleren Sonnenzyklus

Zyklus- monat	$F_{10,7}$			A_p		
	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert
1	73,3	69,6	67,0	11,5	9,5	7,6
2	73,4	69,7	67,0	11,7	9,6	7,7
3	74,0	70,0	67,0	11,8	9,7	7,7
4	74,5	70,4	67,0	11,9	9,7	7,6
5	74,9	70,7	67,0	11,9	9,7	7,4
6	76,2	71,1	67,1	12,2	9,9	7,3
7	78,4	71,6	67,2	12,5	10,0	7,2
8	79,8	72,2	67,3	12,9	10,3	7,2
9	81,5	72,8	67,4	13,3	10,6	7,8
10	84,1	73,6	67,5	14,1	10,9	8,1
11	87,7	74,5	67,7	15,1	11,2	8,2
12	93,4	75,7	67,9	15,7	11,5	8,3
13	97,9	77,0	68,0	15,9	11,8	8,3
14	101,7	78,4	68,0	16,4	12,0	8,3
15	107,7	80,1	68,0	17,4	12,3	8,5
16	114,5	82,0	68,0	18,4	12,7	8,4
17	121,1	84,0	68,1	18,7	12,9	8,5
18	129,1	86,2	68,4	18,8	13,1	8,7
19	137,6	88,5	68,5	18,6	13,2	9,0
20	143,4	91,0	68,6	18,3	13,2	9,3
21	147,6	93,7	68,8	18,1	13,2	9,7
22	151,7	96,3	68,7	18,4	13,4	9,5
23	155,7	98,9	68,8	18,4	13,5	9,3
24	160,1	101,6	69,2	17,6	13,5	9,1
25	164,8	104,4	69,7	17,1	13,6	9,0
26	169,1	107,2	70,1	17,4	13,6	9,1
27	173,0	110,2	70,6	17,4	13,6	9,4

Tabelle 11 (fortgesetzt)

Zyklus- monat	$F_{10,7}$			A_p		
	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert
28	177,1	113,2	70,7	18,5	13,8	9,8
29	186,1	116,2	71,3	19,9	14,0	10,0
30	191,5	119,3	72,2	19,9	14,1	10,0
31	194,3	122,0	72,6	19,9	14,1	10,0
32	196,9	124,3	73,3	20,1	14,1	10,4
33	199,6	126,5	73,9	20,4	14,2	10,2
34	204,2	128,6	74,1	20,8	14,2	10,3
35	210,6	131,0	74,4	20,9	14,1	10,6
36	214,8	133,3	74,5	21,0	14,0	10,6
37	217,2	135,6	74,6	21,2	14,0	10,5
38	221,6	137,6	74,5	21,6	14,1	10,4
39	226,9	139,6	74,1	22,1	14,1	10,6
40	229,9	141,4	73,6	22,2	14,0	10,8
41	231,7	143,2	73,5	21,0	13,7	10,7
42	233,7	144,6	73,6	20,1	13,4	10,4
43	233,7	144,6	73,6	20,1	13,4	10,4
44	235,6	145,6	74,0	19,8	13,3	10,5
45	238,8	146,7	75,1	19,3	13,3	10,7
46	242,8	147,2	75,8	19,2	13,3	10,8
47	245,2	147,7	76,5	19,0	13,4	11,0
48	244,5	148,1	78,1	18,8	13,3	10,7
49	243,3	148,4	80,1	18,6	13,4	10,8
50	244,7	148,7	82,5	18,6	13,4	10,6
51	245,7	148,2	84,0	18,3	13,4	10,2
52	243,3	146,8	85,5	18,2	13,5	10,6
53	239,4	145,7	87,9	18,7	13,8	11,3
54	235,0	145,1	89,5	19,2	14,1	11,4
55	232,9	144,9	92,2	19,6	14,2	11,3
56	233,3	144,9	93,8	20,3	14,4	11,3
57	233,1	144,7	94,9	21,0	14,6	11,5
58	231,2	144,2	95,0	21,4	14,8	11,6
59	229,1	143,5	94,7	21,2	14,8	11,6
60	228,1	142,7	94,9	20,4	14,7	11,8
61	227,6	142,3	96,5	20,7	14,8	12,1
62	226,7	142,1	97,3	21,9	15,1	12,2
63	225,6	141,3	96,8	22,7	15,2	12,0
64	223,0	140,1	96,0	22,7	15,1	11,6
65	218,6	138,4	96,0	22,3	15,1	11,2
66	215,3	136,8	96,6	21,7	15,1	11,2
67	212,0	135,5	96,7	21,5	15,1	11,2
68	206,9	134,3	95,1	22,1	15,1	11,2
69	204,0	133,0	95,0	23,1	15,5	11,3
70	203,6	131,6	96,3	23,5	15,6	11,3
71	200,4	129,8	96,5	23,4	15,6	11,2
72	196,8	128,3	94,7	23,3	15,7	11,1
73	195,7	127,3	93,6	23,1	15,5	10,8

Tabelle 11 (fortgesetzt)

Zyklus- monat	$F_{10,7}$			A_p		
	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert
74	194,8	126,5	93,5	22,2	15,7	10,9
75	191,5	125,1	91,9	22,1	15,6	11,1
76	187,4	123,5	88,7	22,2	15,6	11,7
77	182,9	122,3	86,6	22,5	15,8	11,6
78	178,6	121,5	87,8	22,6	15,9	11,5
79	176,3	120,5	86,5	22,5	15,8	11,3
80	174,9	119,5	85,9	21,6	15,7	11,3
81	171,1	117,9	85,0	21,0	15,4	11,3
82	164,5	116,3	83,6	21,1	15,2	11,2
83	158,1	114,6	82,3	21,6	15,2	11,2
84	154,4	112,9	81,6	22,2	15,4	11,4
85	150,8	109,5	81,9	22,0	15,2	11,4
86	148,1	108,0	81,6	22,2	15,0	11,3
87	148,1	108,0	81,6	22,2	15,0	11,3
88	145,0	106,4	81,4	22,5	14,9	11,3
89	141,1	104,9	80,2	22,8	14,7	11,2
90	137,0	103,4	80,3	23,5	14,7	11,1
91	132,4	101,9	80,0	24,2	14,7	11,0
92	125,4	100,3	78,9	24,7	14,8	11,3
93	119,5	98,9	77,6	25,0	14,8	11,3
94	118,4	97,7	76,6	24,9	14,8	11,2
95	118,7	96,6	74,8	24,5	14,8	11,4
96	119,4	95,6	74,0	23,6	14,7	11,6
97	119,8	94,8	73,4	22,8	14,7	11,3
98	119,0	93,9	73,2	22,1	14,7	11,1
99	117,7	92,8	73,1	21,8	14,8	11,1
100	116,4	91,8	72,7	21,4	14,8	11,2
101	114,6	90,6	71,7	21,1	14,8	11,2
102	110,8	89,6	71,1	20,5	14,7	10,5
103	105,4	88,4	70,6	19,7	14,4	9,9
104	103,2	87,3	70,1	19,7	14,3	9,5
105	102,0	86,5	69,9	19,8	14,1	9,2
106	100,0	85,7	70,0	19,5	14,0	9,0
107	98,2	84,8	69,9	19,1	13,8	8,9
108	96,6	83,6	69,7	18,6	13,8	8,8
109	94,6	82,5	69,5	17,9	13,8	8,7
110	93,8	81,8	69,4	17,0	13,7	8,7
111	92,7	81,1	69,3	16,5	13,6	8,8
112	92,0	80,3	69,0	16,7	13,5	8,9
113	91,8	79,6	68,8	16,9	13,4	9,0
114	91,4	78,9	68,5	17,1	13,3	9,0
115	90,8	78,2	68,2	17,4	13,3	9,0
116	90,1	77,5	68,2	17,4	13,1	9,0
117	89,1	76,9	68,2	17,6	12,9	9,2
118	88,2	76,4	68,2	17,4	12,7	9,3
119	87,0	75,9	68,3	16,9	12,5	9,2

Tabelle 11 (fortgesetzt)

Zyklus- monat	$F_{10,7}$			A_p		
	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert	Höchstwert	Mittelwert	Mindestwert
120	85,4	75,3	68,3	16,1	12,2	9,1
121	83,2	74,8	68,3	14,7	11,8	9,1
122	80,5	74,2	68,3	13,6	11,5	9,1
123	78,5	73,5	67,9	13,7	11,2	8,9
124	77,6	72,9	67,6	13,4	10,9	8,5
125	77,1	72,3	67,4	13,0	10,6	8,1
126	76,9	72,0	67,4	12,7	10,5	8,0
127	76,7	71,6	67,2	12,4	10,3	8,0
128	76,2	70,9	67,0	11,2	9,9	8,0
129	75,2	70,6	67,0	11,0	9,8	7,9
130	74,2	70,3	67,0	10,9	9,1	7,2
131	74,0	70,1	67,0	11,1	9,2	7,4
132	73,5	69,9	67,0	11,4	9,4	7,6

6.4.4 Referenzindexwerte

Für geringe, mittlere und hohe Sonnen- und geomagnetische Aktivitäten sind die in Tabelle 12 aufgeführten Referenzindexwerte zu verwenden. Die Langzeitwerte gelten für monatliche Mittelwerte oder Mittelwerte über einen längeren Zeitraum. Sie sind auch für Zeiträume von einem Tag bis zu einem Monat zu verwenden.

Die hohen Werte kurzer Dauer gelten für Zeiträume von einem Tag oder weniger. Sie sind zur Bewertung der kurzzeitigen Höchstschwankungen von Eigenschaften der Umgebung (z. B. Schwankungen der Luftdichte) zu verwenden. In Anhang D sind einige im Aufzeichnungszeitraum gesammelte Daten über die Variabilität dieser Indizes aufgeführt.

Tabelle 12 — Referenzindexwerte

	Langzeitwerte			Kurzzeitwerte
	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch
$F_{10,7}$	70	140	250	380
A_p	0	15	25	300

6.4.5 Anpassungsrichtlinien

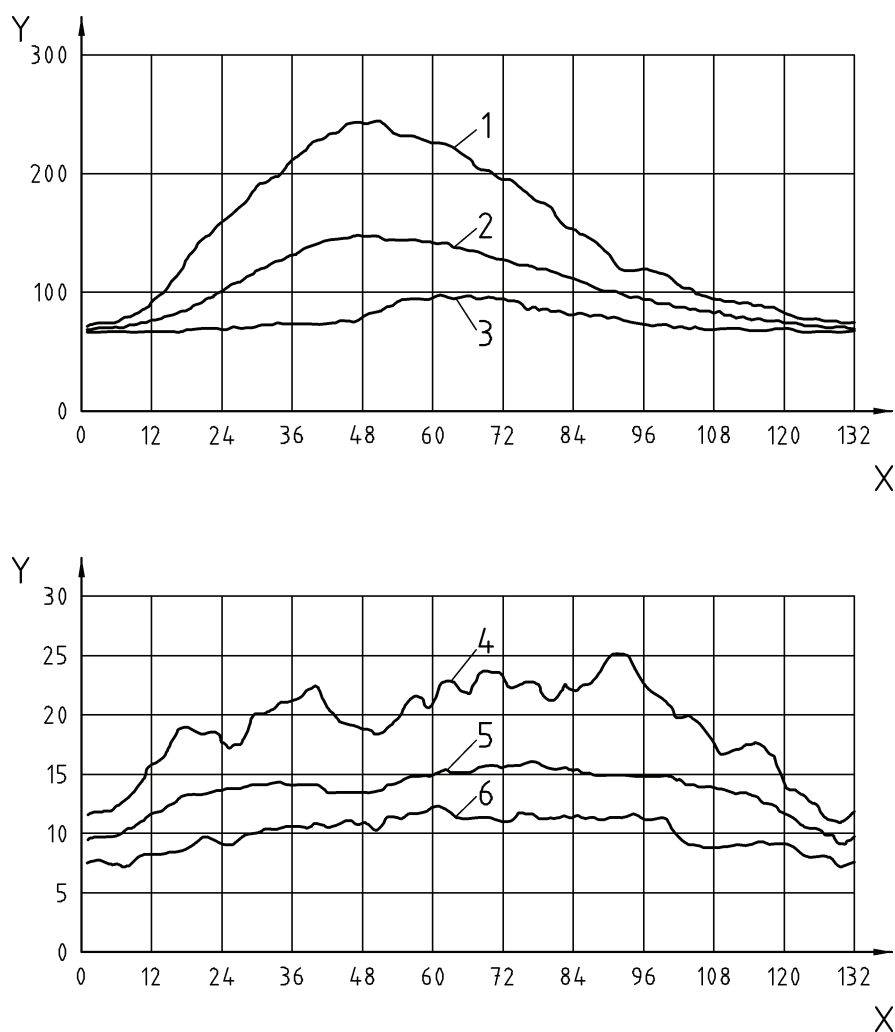
Für Entwurfszwecke sind die Worst-Case-Aktivitätswerte zu verwenden. Dies können je nach untersuchtem Effekt die hohen oder niedrigen Werte sein.

In Abhängigkeit von dem zu analysierenden Fall sind entweder die konstanten Referenzdaten in 6.4.4 (für einen typischen oder Höchstwert) oder die Sonnenzyklendaten in 6.4.3 (zur Analyse einer längeren Mission oder zur Ermittlung der Aktivitätsvorhersage für ein spezielles zukünftiges Datum) zu verwenden.

Durch Wiederholung des 11-Jahre-Zyklus kann die Sonnenzyklusaktivität in Tabelle 11 erweitert werden.

Als Start von Zyklus 23 ist August 1996 zu nehmen (Monat 1 von Tabelle 11).

6.5 Bilder



Siehe Beschreibung im Text

Legende

Y Sonnen- und geomagnetische Aktivität
X Zyklenmonat
1 Höchstwert von $F_{10,7}$
2 Mittelwert von $F_{10,7}$
3 Mindestwert von $F_{10,7}$

4 Höchstwert von A_p
5 Mittelwert von A_p
6 Mindestwert von A_p

Bild 4 — Standardvorhersagen der Sonnen- und geomagnetischen Aktivität während eines Zyklus

6.6 Verweisungen

RD6.1, ECSS-E-30, Teil 1, Space engineering — Mechanical — Part 1 : Thermal control.

RD6.2, „Natural Orbital Environment Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development“, B.J. Anderson, editor and R.E. Smith, compiler; NASA TM 4527, chapters 6 und 9, June 1994.

RD6.3, Willson R.C. and H.S. Hudson, „The Sun's luminosity over a complete solar cycle“, Nature, Vol. 351, pp 42-44, May 1991.

RD6.4, Menvielle M. and A. Berthelier, „The K-derived Planetary Indices: Description and Availability“, Rev. Geophys. 29, 3, pp 415-432, August 1991.

RD6.5, „SESC Glossary of Solar-Terrestrial Terms“, NOAA-USAF Space Environment Services Center, Boulder, 1988 (revised 1992).

7 Die neutrale Erdatmosphäre

7.1 Einleitung

Eine gute Kenntnis von Temperatur, Gesamtdichte, Konzentrationen von Gasen und Druck kann für viele Weltraummissionen in der erdnahen Umlaufbahn (LEO) unterhalb von 1 000 km wichtig sein. Es wird die Kenntnis der aerodynamischen Kräfte infolge der Orbitalbewegung eines Satelliten durch ein verdünntes Gas mit überlagerten Winden für die Planung der Wartung im Orbit, für die Bemessung des Antriebssystems, für die Bemessung einer Fluglageregeleinrichtung und für die Einschätzung der Beschleunigungen, die auf empfindliche Nutzlasten wirken, gefordert.

Weiterhin muss die Oberflächenkorrosion infolge Aufpralls von atomarem Sauerstoff eingeschätzt werden, um die Verschlechterung der empfindlichen Überzüge vorhersagen zu können. Reaktionen mit atomarem Sauerstoff rund um das Raumfahrzeug kann auch zu einem „Shuttle Glow“ führen.

7.2 Empfohlenes Referenzmodell

Die MSISE-90-Atmosphäre [RD7.1] ist wegen des vorliegenden umfangreichen Satzes von Messdaten, deren große zeitliche und räumliche Verteilung und hohe Güte und der flexiblen mathematischen Formulierung des Modells als Bezugsatmosphäre zu wählen (entspricht CIRA-86, der COSPAR Internationalen Bezugsatmosphäre, beschrieben in RD7.2 für Höhen über 120 km).

MSISE-90 bestimmt Temperatur, Dichte und Teilchenkonzentrationen für die hauptsächlichen Bestandteile von der Erdoberfläche bis zu Höhen der Exosphäre als Funktion der sieben atmosphärischen Zustandsparameter. Andere Strom- und historische Atmosphärenmodelle sind im informativen Anhang aufgeführt. Für horizontale Winde ist das Modell HWM-93 zu wählen (Horizontalwindmodell 1993, basiert auf RD7.3). Es liefert Nord- und Ostwindkomponenten als Funktion derselben Parameter, die bei MSISE-90 verwendet werden.

Anhang E enthält Informationen über weitere Modelle.

7.3 Struktur der Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre kann allgemein in drei unterschiedliche Regime unterteilt werden:

- die Homosphäre, die die Troposphäre (0 km bis 12 km Höhe), die Stratosphäre (12 km bis 50 km Höhe) und die Mesosphäre (50 km bis 90 km) umfasst;
- die Thermosphäre, die sich von etwa 90 km Höhe bis 250 km oder 400 km Höhe erstreckt (abhängig von Sonnen- und geomagnetischen Aktivitätspegeln);
- die Exosphäre, die oberhalb der Thermosphäre beginnt und sich in den Weltraum erstreckt.

Die Homosphäre, hat infolge vertikaler Winde und turbulenter Durchmischung eine nahezu gleichmäßige Zusammensetzung von etwa 78,1 % N₂, 20,9 % O₂ und 0,9 % Ar. Ihr Temperaturprofil weist wechselnde Gradienten mit einem lokalen Minimum in der Tropopause (218 K), einem lokalen Maximum in der Stratopause (280 K) und einem weiteren lokalen Minimum in der Mesopause (≈150 K) auf.

In der Thermosphäre, beginnend in der Turbopause nahe 105 km, werden vertikale Durchmischungsvorgänge weniger bedeutsam, und es bestimmt Diffusion unter dem Einfluss von Gravitation und Temperaturgradienten die Konzentrationsprofile mit der Höhe der hauptsächlichen Bestandteile N₂, N, O₂, O, He, H und Ar. Die thermosphärischen Temperaturprofile weisen in der Turbopause anfangs einen nahezu konstanten Wert auf und erreichen in der Thermopause (zwischen 250 km und 400 km) einen asymptotischen Grenzwert T_{∞} . Sowohl die Thermopausenhöhe als auch die thermosphärische Temperatur T_{∞} hängen von der Eingangsenergie in die Heterosphäre ab. Diese Eingangsenergien ergeben sich hauptsächlich infolge der EUV-Strahlung von der Sonne und ihrer Absorption durch atomaren Sauerstoff, infolge Joule-Erwärmung durch geladene Teilchen, die in Polarlichtzonen in die Atmosphäre stürzen, infolge Photodissoziation und infolge von Rekombinationsprozessen. Örtlich kann T_{∞} für extrem niedrige und extrem hohe Sonnenaktivitätspegel Werte zwischen 600 K und 2 000 K erreichen. Von 400 km an aufwärts kann die mittlere freie Weglänge von Molekülen so zunehmen, dass der leichte Bestandteil H (der in diesen Höhen hauptsächlich vorhanden ist) die Fluchtgeschwindigkeit der Erde überschreitet und das System verlassen kann (daher „Exosphäre“).

7.4 Atmosphärische Zustandsparameter

Widerstandsdaten von Satelliten aus Orbitbestimmungen, Massenspektrometern im Orbit, Beschleunigungsmessern, Raketensonden und Bodenradar für inkohärente Rückstreuung liefern eine Fülle von Informationen über Zusammensetzung, Temperatur und Variabilität der Heterosphäre, insbesondere zwischen 150 km und 700 km Höhe. Messdaten weisen aus, dass sich Temperatur, Zusammensetzung, Druck und Gesamtdichte der Erdatmosphäre mit folgenden Parametern ändern:

- h , geodätische Höhe in km;
- ϕ , geodätische Breite in ° oder rad;
- t_{ls} , solare Ortszeit in h;
- t_{ut} , Weltzeit in h oder alternativ θ , geographische Länge, in ° oder rad;
- t_d , Tag des gegenwärtigen Jahrs (gezählt vom 1. Januar) in Tagen;
- $F_{10,7}$, der tägliche solare 10,7-cm-Flussdichteindex (meistens vom vorhergehenden Tag) in $10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ($= 10^4$ Jansky);
- $(F_{10,7})_{avg}$, ein mittlerer solarer Flussdichteindex (meistens ein laufender Mittelwert über die vorangegangenen drei Rotationen der Sonne, was 81 Tagen entspricht) in $10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$;
- $A_p \in [0, 400]$, der tägliche mittlere geomagnetische Index oder alternativ $K_p \in [0, 10]$, der quasilogarithmische tägliche mittlere geomagnetische Index oder alternativ $k_p \in [0, 10]$, 3-stündliche quasilogarithmische geomagnetische Indizes für einen Tag.

Die Parameter t_{ls} , t_{ut} und θ hängen untereinander zusammen. Damit sie miteinander vereinbar sind, müssen sie die Beziehung erfüllen:

$$\theta (^{\circ}) = 15 \times [t_{ls}(h) - t_{ut}(h)]$$

Die Sonnenaktivität der 10,7-cm-Radiofrequenz-Flussdichte $F_{10,7}$ und die entsprechende Fleckenrelativzahl (R) folgen einem langdauernden 11-Jahres-Sonnenzyklus mit einem überlagerten 27-Tagezyklus infolge der Sonnenrotation. Der Datenverlauf der Sonnen- und geomagnetischen Aktivitäten sind in den Abschnitten 6 und Anhang D angegeben. Die Vorhersage des aktuellen Pegels des täglichen $F_{10,7}$ - und geomagnetischen A_p -Index ist schwierig und mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden.

Wenn die atmosphärischen Zustandsparameter gut bekannt sind, können die Gesamtluftdichte, die aktivitätsabhängige Veränderungen (mit $(F_{10,7})_{\text{avg}}$, $F_{10,7}$ und A_p oder k_p), Tagesschwankungen (mit t_{ls} und ϕ), Längen-Breiten-Schwankungen (mit t_{ut} und ϕ) und jahreszeitliche Breitenschwankungen (mit t_d und ϕ) der Heterosphäre mit einer effektiven Genauigkeit von $\pm 10\%$ bis $\pm 15\%$ für das Atmosphärenmodell MSISE-90 [RD7.1] nachgebildet werden, das dann der gewählte Weltraumstandard sowohl für homosphärische als auch heterosphärische Höhen sein muss.

7.5 Temperatur-, Zusammensetzungs- und Dichtemodell der Erdatmosphäre

In der Heterosphäre, weit über 90 km, kann man annehmen, dass sich die Bestandteile im Diffusionsgleichgewicht befinden und keine vertikale Durchmischung vorhanden ist, und dass sich unter dem Einfluss der Erdschwere und thermischen Diffusion für jeden Bestandteil unabhängig Konzentrationsprofile entwickeln.

$$\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dh} + \frac{1}{H_i} + \frac{1+\alpha_i}{T} \frac{dT}{dh} = 0 \quad (7.1)$$

Dabei ist

- i = 1, ..., 7, bezieht sich auf N₂, O₂, Ar, O, He, H und N;
- h die geodätische Höhe in km;
- T die örtliche Atmosphärentemperatur in K;
- n_i die Teilchenkonzentration (Teilchenanzahldichte) der Spezies i in 1/m³;
- H_i die Konzentrationsskalenhöhe der Spezies i in km;
- α_i der Wärmediffusionskoeffizient für Species i ($\alpha_i = -0,4$ für H und He und 0,0 anderweitig).

Das Höhenprofil der Temperatur $T(h)$, das in Gleichung (7.1) gefordert ist, kann durch eine Exponentialfunktion gut angenähert werden, die einen asymptotischen Grenzwert T_∞ (Exosphären-Temperatur) in der Thermopause erreicht.

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_{120}) \exp[-s(h - h_{120})] \quad (7.2)$$

Dabei ist

- $()_\infty$ die Bedingungen in der Thermopause (Beginn der Exosphäre);
- $()_{120}$ die Bedingungen in der geodätischen Höhe 120 km;
- s der Temperaturgradientparameter, 1/km.

Bei Entwicklung des Parameters c können die Gleichungen (7.1) und (7.2) als explizite, analytische Näherungen der Höhenprofile wie folgt formuliert werden:

$$n_i = n_{i,120} \exp(-\sigma \gamma_i z) \left[\frac{(1-c)}{(1-c \exp(-\sigma z))} \right]^{1+\alpha_i+\gamma_i} \quad (7.3)$$

$$T = T_\infty [1 - c \exp(-\sigma z)] \quad (7.4)$$

Dabei ist

$z = (h - h_{120}) (R_E + h_{120}) / (R_E + h)$ Parameter der Geopotentialhöhe in km;

$c = 1 - T_{120}/T$;

$T_\infty = T_\infty (h, \phi, t_{ls}, t_{ub}, t_d, (F_{10,7})_{avg}, F_{10,7}, A_p)$;

$T_{120} = T_{120} (h, \phi, t_{ls}, t_{ub}, t_d, (F_{10,7})_{avg}, F_{10,7}, A_p)$;

$n_{i,120} = n_{i,120} (h, \phi, t_{ls}, t_{ub}, t_d, (F_{10,7})_{avg}, F_{10,7}, A_p)$;

$\sigma = s + (R_E + h_{120})^{-1}$ Parameter des Temperaturgradienten in 1/km;

$s = s (h, \phi, t_{ls}, t_{ub}, t_d, (F_{10,7})_{avg}, F_{10,7}, A_p)$;

$\gamma_i = 1/(H_i \sigma)$ dimensionsloser Diffusionsparameter;

$H_i = RT/(M_i g)$ die Konzentrationsskalenhöhe von Spezies i in m;

$M_i = 28, 32, 40, 16, 4, 1$ und 14 für N_2, O_2, Ar, O, He, H und N bzw. molare Massen in kg/kmol;

$R_E = 6\,357$ km normierter Erdradius;

$g = 9,806$ m/s² Konstante der Referenzerdbeschleunigung;

$R = 8\,314$ J·kmol⁻¹·K⁻¹ die universelle Gaskonstante.

Die Luftdichte wird dann aus dem massebewerteten, normierten Konzentrationen bestimmt, und der Gesamtdruck kann als Summe der Teildrücke der Bestandteile angegeben werden.

$$\rho = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^7 n_i M_i \quad (7.5)$$

$$p = \sum_{i=1}^7 p_i = k T \sum_{i=1}^7 n_i \quad (7.6)$$

Dabei ist

ρ die Gesamtdichte in kg/m³;

p der Druck in N/m²;

$k \approx 1,380\,7 \times 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante;

$N_A \approx 6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹ die Loschmidtsche Zahl.

Für aerodynamische Berechnungen in einem verdünnten Gas, insbesondere in Höhen unter 200 km, sind die mittlere freie Weglänge, die Schallgeschwindigkeit und die dynamische Viskosität bedeutsam. Sie können mit guter Genauigkeit genähert werden durch:

$$\frac{1}{L} = \sqrt{2} \pi d_{avg}^2 \frac{p}{kT} \quad (7.7)$$