INHALTSVERZEICHNIS

Spektroskopische Methoden der Plasmadiagnostik

von W. NEUMANN

Kapitel 1. Einleitung, Zielsetzung 3

Kapitel 2. Verfahren zur Bestimmung von Volumenstrahldichten und Linienprofilen 5

2.1. Spektralgeräte 5
2.1.1. Prismenspektrographen 5
2.1.2. Gitterspektrographen 8
2.1.3. Interferenzgeräte 11
2.1.4. Kristallspektrometer 14

2.2. Wellenlängeneichung der Spektralgeräte 15

2.3. Strahlungsempfänger 17
2.3.1. Photoplatten bzw. Filme 17
2.3.2. Elektrische Strahlungsempfänger 18
2.3.3. Chemische Strahlungsempfänger 19

2.4. Normalstrahler 19
2.4.1. Schwarzer Strahler 20
2.4.2 Oberflächenstrahler 23
2.4.3. Gasentladungen als Normalstrahler 27

2.5. Spezielle Geräte oder Anordnungen für die Kurzzeitspektroskopie 31
2.5.1. Momentaufnahme von Spektren 31
2.5.2. Kontinuierlich zeitaufgelöste Spektren 37
2.5.3. Spektralkinematographische Geräte 40
2.5.4. Spezielle Registriermethoden für spektrale Untersuchungen 41
2.5.5. Polychromatoren 43
2.5.6. Schnellregistrierung von Linienprofilen mittels FABRY-PEROT-Interferometern 44

2.6. Strahldichtemessungen mit Photoplatten 46
2.6.1. Prinzipielles zur Ermittlung von Flächenstrahldichten aus photographischen Schwärzungen 46
2.6.2. Entwicklung des Photomaterials 47
2.6.3. Einstellung der Spaltbreiten 49
2.6.4. Streckung der Schwärzungskurve 50
2.6.5. Der SCHWARZSCHILD-Effekt 51
2.6.6. Maßnahmen zur meßbaren Lichtschwächung 53
2.6.6.1. Rotierende Sektorenblenden 53
2.6.6.2. Lichtschwächung durch Blenden 54
2.6.6.2. Drahtnetze als Mittel zur Lichtschwächung 56
2.6.6.4. Lichtschwächung durch Filter 56
2.6.7. Photographische Linienbreite 56

2.7. Strahldichtemessungen mit photoelektrischen Empfängern 56

2.8. Bestimmung von integralen Linienintensitäten 57
2.9. Richtige Wiedergabe von apparativ verzerrten Linienprofilen 61
2.9.1. Allgemeine Methoden 61
2.9.2. Die Entzerrung von Linienprofilen mittels VOIGT-Funktionen . . . 64
2.10. Umrechnung der Flächenstrahldichteverteilung $I(x)$ quer zur Achse in die radiale Volumenstrahldichteverteilung $\varepsilon(r)$ für rotationssymmetrische Strahler (Inversion) 68
2.10.1. Inversion ohne Berücksichtigung der Plasmaabsorption 68
2.10.2. Inversion mit Berücksichtigung der Plasmaabsorption. Bestimmung des Plasmaabsorptionskoeffizienten 70
2.10.2.1. Inversion nach H. N. OLSEN 70
2.10.2.2. Verfahren von FREEMAN und KATZ 72
2.11. Prüfung des emittierenden Plasmas hinsichtlich Selbstabsorptionsarmut. . 75
2.11.1. Näherungsformeln für das Absorptionsvermögen A_ν 75
2.11.2. Experimentelle Überprüfung auf geringe Selbstabsorption 76

Kapitel 3. Klassifizierung von Spektren. 82

3.1. Atomspektren 82
3.2. Klassifizierung von Molekülspektren 84
3.2.1. Elektronen-Quantenzustände 84
3.2.2. Schwingungszustände 86
3.2.3. Rotationszustände 86

Kapitel 4. Berechnung der Zusammensetzung eines thermischen Plasmas mit BOLTZMANN-Verteilung der Elektronenterme 89

4.1. Berechnung der Komponentenzusammensetzung eines atomaren Plasmas . 89
4.1.1. Berechnung der effektiven Ionisierungsenergie $U_{z,\,\mathrm{eff}}^A$ und des Anteils Q_z^A der inneren Freiheitsgrade zur Zustandssumme 90
4.1.2. Anwendungsbeispiele, Vereinfachungen 93
4.2. Berechnung der Komponentenzusammensetzung eines chemisch reagierenden Plasmas als Funktion von Temperatur und Druck 95
4.2.1. Berechnung der inneren Zustandssummen von Molekülen 103
4.2.2. Berechnung von chemischen Gleichgewichten aus tabellierten thermodynamischen Funktionen 104
4.3. Wichtige Literaturangaben über Daten, die zur Berechnung von Plasmazusammensetzungen benötigt werden 106

Kapitel 5. Plasmaparameterbestimmung über die Intensität von Spektrallinien, die von Atomen und Ionen in optisch dünner Schicht ausgestrahlt werden. Plasma im thermischen Gleichgewicht . . . 111

5.1. Plasmaparameterbestimmung über die absolute Volumenstrahldichte von Spektrallinien 111
5.1.1. Bestimmung der Plasmatemperatur bei bekanntem Druck und bekannter stofflicher Zusammensetzung 112
5.1.2. Bestimmung der Plasmatemperatur und des Plasmadrucks aus der absoluten Intensität zweier Spektrallinien bei bekannter stofflicher Zusammensetzung 114
5.1.3. Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung eines Mehrstoffplasmas, wenn absolute Übergangswahrscheinlichkeiten geeigneter Spektrallinien bekannt sind 117
5.2. Plasmaparameterbestimmung über relative Intensitäten von Spektrallinien 119

5.2.1. Bestimmung der Teilchendichte im Mehrstoffplasma mit bekannten Werten für Druck und Elektronendichte aus relativen Linienintensitäten (s. G. BOLDT [5.45.]) 119
5.2.2. Temperaturbestimmung aus dem Intensitätsverhältnis zweier Spektrallinien, die von Partikeln des gleichen Elements A und der gleichen Ladungszahl z ausgestrahlt werden (2-Linien-Methode) 120
5.2.3. Temperaturbestimmung aus den relativen Intensitäten mehrerer Spektrallinien des gleichen Elements und der gleichen Ladungszahl z 122
5.2.4. Temperaturbestimmung aus relativen Intensitäten von Spektrallinien nach der Vergleichsmethode 126
5.2.5. Temperaturbestimmung aus relativen Intensitäten von Spektrallinien, die von verschieden geladenen Ionen des gleichen Elements emittiert werden 127
5.2.6. Normtemperaturverfahren 130
5.3. Bestimmung von absoluten Übergangswahrscheinlichkeiten bzw. Oszillatorenstärken 136
5.3.1. Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten aus der Emission von Spektrallinien in optisch dünner Schicht unter Anwendung von Strahlungsquellen, bei denen der Plasmadruck und die Plasmazusammensetzung bekannt sind 136
5.3.2. Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten aus der Emission von Spektrallinien in optisch dünner Schicht bei vorher nicht bekannter Konzentration des emittierenden Elements 141
5.3.3. Bestimmung von absoluten Übergangswahrscheinlichkeiten aus relativen unter Verwendung des f-Summensatzes 147
5.3.4. Bestimmung von absoluten Übergangswahrscheinlichkeiten aus relativen, wenn die absolute Übergangswahrscheinlichkeit mindestens einer Spektrallinie des betreffenden Elements bekannt ist 149
5.3.5. Bestimmung von Oszillatorenstärken durch Absorptionsmessungen an im Ofen befindlichen Atomen 151
5.3.6. Bestimmung von Oszillatorenstärken von Resonanzlinien durch Absorptionsmessungen an Atomstrahlen 153
5.3.7. Bestimmung von Oszillatorenstärken aus der Dispersion in Liniennähe 154
5.3.8. Bestimmung der Oszillatorenstärke aus der Verbreiterung von Resonanzniveaus 158
5.3.9. Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten aus der Lebensdauer von angeregten Niveaus 159
5.3.10. Weitere Methoden zur experimentellen Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten 161
5.3.11. Verhalten der Oszillatorenstärke bei hohen Gasdrücken 162
5.3.12. Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten 162
5.3.13. Literaturangaben über Übergangswahrscheinlichkeiten 170

Kapitel 6. Bestimmung von Temperaturen und Teilchendichten von merklich absorbierenden Plasmen 177
6.1. Temperaturbestimmung nach dem KIRCHHOFFschen Gesetz bei homogenen Plasmen (Linienumkehrmethode) 177
6.1.1. Grundlagen des Verfahrens 177
6.1.2. Anfärben des Plasmas 180
6.1.3. Linienumkehrverfahren 180
6.1.4. Für die Temperaturbestimmung nach dem KIRCHHOFFschen Gesetz in der Form Gl. (6.1) geeignete Plasmen 181
6.1.5. Bichromatische Meßmethoden 183
6.1.6. Zwei-Wege-Methode 186

6.1.7. Anwendungsbeispiele des Linienumkehrverfahrens zur Temperaturbestimmung 188
6.2. Temperaturbestimmung nach dem KIRCHHOFFschen Gesetz bei inhomogenen Plasmen 188
6.2.1. Temperaturbestimmung mittels monochromatisch zerlegter Strahlung 188
6.2.2. Temperaturbestimmung mit spektral über eine Spektrallinie integrierter Strahlung 191
6.2.2.1. Schwache Selbstabsorption 192
6.2.2.2. Starke Selbstabsorption 193
6.3. Temperaturbestimmung aus der Kuppenstrahldichte selbstumgekehrter Spektrallinien und Profilentzerrung selbstumgekehrter Spektrallinien . . . 194
6.3.1. Temperaturbestimmung 194
6.3.2. Profilentzerrung selbstumgekehrter Spektrallinien 201
6.4. Teilchendichtebestimmung aus dem Gesamtabsorptionskoeffizienten von Resonanzlinien und aus dem Absorptionskoeffizienten für kontinuierliche Absorption aus dem Grundzustand 203
6.4.1. Bestimmung des Gesamtabsorptionskoeffizienten $\int \varkappa_\nu \, d\nu$ im Falle des homogenen Plasmas, spektral auflösbare Linie 204
6.4.2. Bestimmung des Gesamtabsorptionskoeffizienten im Falle des homogenen Plasmas, spektral nicht zerlegte Linie, schwache Absorption 204
6.4.3. Bestimmung von $\int \varkappa_\nu(r) \, d\nu$ im rotationssymmetrischen Plasma für eine spektral auflösbare Linie 205
6.4.4. Bestimmung von $\int \varkappa_\nu(r) \, d\nu$ im inhomogenen rotationssymmetrischen Plasma für eine spektral nicht auflösbare schwach absorbierende Linie 205
6.4.5. Anwendungsmöglichkeiten 205

Kapitel 7. Plasmaparameterbestimmung aus dem Bandenspektrum von zweiatomigen Molekülen 209

7.1. Allgemeine Formulierungen für die Intensitäten im Spektrum von zweiatomigen Molekülen 209
7.2. Bestimmung von Plasmadaten aus absoluten Bandenintensitäten 212
7.2.1. Bestimmung der Teilchendichte n_0 einer Molekülart aus der absoluten Intensität bzw. der Gesamtabsorption einer Molekülbande bei bekannter absoluter Oszillatorenstärke und bekannter Temperatur 212
7.2.2. Bestimmung der Temperatur T aus der absoluten Intensität bzw. der Gesamtabsorption einer Molekülbande bei bekanntem Druck, bekannter stofflicher Zusammensetzung und bekannter absoluter Oszillatorenstärke $f_{v'v''}$ 212
7.3. Bestimmung der Rotationstemperatur 213
7.4. Bestimmung der Schwingungstemperatur 215
7.5. Temperaturbestimmung über Molekülspektren bei nicht aufgelöster Rotationsstruktur 218
7.5.1. Bestimmung der Rotationstemperatur bei nicht aufgelöster Rotationsstruktur 218
7.5.2. Bestimmung der Schwingungstemperatur im Fall nicht aufgelöster und sich teilweise überlappender Banden 219
7.5.3. Bestimmung der Elektronentemperatur bei sich teilweise überdeckenden Banden 222
7.6. Plasmaparameterbestimmung über Absorptionsmessungen im Molekülspektrum 224

7.7. Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten, Oszillatorenstärken bzw. Bandenstärken $p_{v''v'}$ 225

Kapitel 8. Teilchendichtebestimmung in Plasmen über den Brechungsindex. Laser-Diagnostik 228

8.1. Grundlagen der Meßverfahren 228
8.2. Interferometerverfahren zur Bestimmung des Brechungsindexes n 230
8.2.1. Interferenzstreifenerzeugung 230
8.2.2. Anwendung des monochromatischen Interferometerverfahrens auf rotationssymmetrische inhomogene Plasmen 231
8.2.3. Anwendung des Interferometerverfahrens zur Dichtebestimmung in homogenen Plasmen unter Ausnutzung eines größeren Wellenlängenbereichs 233
8.2.3.1. Verschiebung der Interferenzstreifen um den Bruchteil eines Streifenabstandes 233
8.2.3.2. Interferenzstreifenverschiebung um mehrere Streifenabstände 235
8.2.3.3. Interferenzstreifenverschiebung um einen kleinen Bruchteil einer Interferenzstreifenbreite [8.22] 237
8.2.4. Kurzzeitinterferometrie 238
8.2.5. Andere Interferometerarten 239
8.2.6. Anwendungsmöglichkeiten des Interferometers 239
8.3. Schlieren- und Schattenverfahren zur Ermittlung des Brechungsindexes und zur Teilchendichtebestimmung im Plasma 240
8.4. Teilchendichtebestimmung mit optischen Lasern 246
8.4.1. Durchstrahlung eines plasmagefüllten FABRY-PEROT-Interferometers 248
8.4.2. FARADAY-Rotation von polarisierten Laserstrahlen beim Durchgang durch ein mit Plasma gefülltes Rohr, das sich in einem Magnetfeld befindet 248
8.4.3. Streuung eines Laserstrahls an Plasmaelektronen 249

Kapitel 9. Plasmaparameterbestimmung über die kontinuierliche Strahlung 252

9.1. Die verschiedenen Arten kontinuierlicher Strahlung 252
9.2. Elektronen-Ionen-Kontinuum 254
9.2.1. Frei-frei-Strahlung 254
9.2.2. Frei-gebunden-Strahlung 258
9.2.3. Isolierte Grenzkontinua 260
9.2.4. Einfluß der Erniedrigung der Ionisationsenergie auf den Frequenzverlauf der kontinuierlichen Strahlung. Vergleich von berechneten mit gemessenen spektralen Strahldichteverteilungen 260
9.3. Elektronen-Atom-Kontinuum 263
9.4. Trennung des Anteils des Elektronen-Atom-Kontinuums vom Anteil des Elektronen-Ionen-Kontinuums am Gesamtkontinuum 265
9.5. Plasmadiagnostik mittels kontinuierlicher Strahlung 268
9.5.1. Plasmaparameterbestimmung über die absolute und relative Intensität der kontinuierlichen Strahlung 268
9.5.2. Temperaturbestimmung aus dem Intensitätsabfall der kontinuierlichen Strahlung nach kurzen Wellenlängen 272
9.5.3. Tabellenanhang zur Plasmaparameterbestimmung über die kontinuierliche Strahlung 273

Kapitel 10. Plasmaparameterbestimmung aus Linienprofilen. Verschwinden von Spektrallinien an der Seriengrenze und das Problem der Erniedrigung der Ionisationsenergie 277

10.1. DOPPLER-Verbreiterung 278
10.2. DOPPLER-Verschiebung 281
10.3. Bestimmung von magnetischen Feldstärken über den ZEEMAN-Effekt . . 289
10.4. Natürliche Linienverbreiterung 295
10.5. Linienverbreiterung durch Teilchenwechselwirkung 297
10.5.1. Klassische Stoßdämpfungstheorie 298
10.5.1.1. Theorie von LORENTZ 298
10.5.1.2. Theorie von LENZ und WEISSKOPF 299
10.5.1.3. LINDHOLMsche Theorie der Stoßverbreiterung 300
10.5.1.4. Anwendungsbereich der Stoßtheorie der Linienverbreiterung 302
10.5.2. Statistische Theorie der Linienverbreiterung 303
10.5.2.1. Einteilchennäherung 303
10.5.2.2. Mehrteilchentheorie, HOLTSMARK-Verteilung 303
10.5.2.3. Ladungsträgerwechselwirkung der Störteilchen untereinander 306
10.5.2.4. Anwendungsbereich der statistischen Theorie des Linienprofils 307
10.5.3. Ermittlung von STARK-Konstanten C_p 307
10.5.3.1. Linearer STARK-Effekt, $p = 2$ 308
10.5.3.2. Quadratischer STARK-Effekt, $p = 4$ 308
10.5.3.3. Eigendruckverbreiterung, $p = 3$ 309
10.5.3.4. Verbreiterung durch VAN DER WAALS-Kräfte (Fremddruckverbreiterung, $p = 6$) 310
10.5.4. Quantenmechanische Theorie der Stoßverbreiterung 310
10.5.5. Nichtadiabatische Theorie der Linienverbreiterung durch quadratischen STARK-Effekt nach WAINSCHTEIN und SOBELMAN 312
10.5.6. Zusammenwirken der Verbreiterung durch Elektronen und Ionen 315
10.5.7. Bestimmung von Plasmaparametern aus der Linienverbreiterung durch Teilchenwechselwirkung 316
10.5.7.1. Trennung verschiedener Verbreiterungsursachen 316
10.5.7.2. Abgrenzung der Anwendbarkeit der statistischen Theorie, der Stoßtheorie, der adiabatischen und nichtadiabatischen Theorie an Beispielen 317
a) Linearer STARK-Effekt 317
b) Quadratischer STARK-Effekt 321
c) Übergang vom quadratischen zum linearen STARK-Effekt 322
10.5.7.3. Verschiedene Methoden der Bestimmung von Plasmaparametern aus Linienprofilen 324
10.5.8. Tabellenanhang 325
10.6. Abgrenzungen des Bereichs der dopplerbestimmten und der durch Ladungsträgerwechselwirkung bestimmten Linienverbreiterung 328
10.7. Zusammenfließen der Linien an der Seriengrenze und das Problem der Erniedrigung der Ionisationsenergie 330
10.7.1. Zusammenfließen der Linien an der Seriengrenze nach INGLIS und TELLER 330
10.7.2. Erniedrigung der Ionisationsenergie 332
10.8. Bestimmung von makroskopischen elektrischen Feldstärken über den STARK-Effekt 335

Kapitel 11. Gültigkeitsgrenzen der in den Kapiteln 5 bis 10 dargelegten Methoden der thermischen Spektroskopie. Einige spezielle Methoden der nichtthermischen Spektroskopie 337

11.1. Gültigkeitsgrenzen der in den Kapiteln 5 bis 10 dargelegten spektroskopischen Methoden . . . 337
11.1.1. Voraussetzung a): Die Elektronen sollen eine MAXWELLsche Geschwindigkeitsverteilung haben . . . 340
11.1.2. Voraussetzung b): Die Atome, Moleküle und Ionen sollen eine MAXWELL-Verteilung haben . . . 341
11.1.3. Voraussetzung c): Die Elektronentermbesetzung soll bis zur Grenzquantenzahl n_g durch die BOLTZMANN-Verteilung beschrieben werden können. Voraussetzung d): Für den Ionisationsgrad soll die SAHA-Gleichung gelten . . . 342
11.1.3.1. Bedingung für partielle BOLTZMANN-Verteilung . . . 343
11.1.3.2. Bedingung für vollständige BOLTZMANN-Verteilung und für die Gültigkeit der SAHA-Gleichung . . . 345
11.1.4. Voraussetzung e): Die Rotations- und Schwingungsniveaus von Molekülen haben eine BOLTZMANN-Verteilung . . . 348
11.1.5. Voraussetzung f): Die Translationstemperaturen der Elektronen, Ionen und Neutralgasatome bzw. Moleküle sind einander gleich 348
11.1.6. Gültigkeit des KIRCHHOFFschen Gesetzes . . . 353
11.1.7. Bedingung der Quasistationarität bei zeitlich veränderlichen Plasmen . . . 353
11.1.7.1. Einstellzeit der Translations- und Rotationsfreiheitsgrade . . . 354
11.1.7.2. Einstellzeit der Schwingungsfreiheitsgrade . . . 354
11.1.7.3. Einstellzeit des Dissoziationsgleichgewichts . . . 355
11.1.7.4. Einstellzeit der BOLTZMANN-Verteilung und des Ionisationsgleichgewichts . . . 355
11.1.8. Bedingung für lokales BOLTZMANN-Gleichgewicht in inhomogenen Plasmen . . . 356
11.1.9. Zusammenstellung der für die Anwendung der in den Kapiteln 5 bis 10 beschriebenen spektroskopischen plasmadiagnostischen Verfahren notwendigen Voraussetzungen . . . 357
11.2. Spezielle Meßverfahren der nichtthermischen Spektroskopie . . . 357
11.2.1. Direkte Anregung von relativ niedrig liegenden Niveaus . . . 359
11.2.2. Elektronentemperaturbestimmung aus der Emission heliumähnlicher Ionen im verdünnten Hochtemperaturplasma . . . 362
11.2.3. Bestimmung der Ionisationstemperatur bei kleinen Teilchendichten 364
Literatur . . . 367

Magnetohydrodynamische Wellen

(Wellen in idealen Medien)

von K. BAUMGÄRTEL und G. WALLIS

Kapitel 1. Einleitung . . . 399
Kapitel 2. Ausbreitung ebener Wellen in homogenen Medien . . . 402
2.1. MHD-Grundgleichungen für ideale Medien . . . 402
2.2. Linearisierung und Ansatz für ebene Wellen . . . 405
2.3. Diskussion der Dispersionsgleichung . . . 410
2.4. Polarisationsverhältnisse . . . 413
2.5. Gruppengeschwindigkeit und Energietransport . . . 417

Kapitel 3. Wechselwirkung von MHD-Wellen mit Unstetigkeitsflächen. Ausbreitung in in homogenen Medien 428
3.1. Grenzbedingungen an Unstetigkeitsflächen 429
3.2. Reflexion und Brechung 434
3.2.1. Reflexions- und Brechungsgesetze 434
3.2.2. Geometrische Konstruktion der Reflexions- und Brechungswinkel . . 438
3.2.3. Bedeutung der Gruppengeschwindigkeit bei Reflexion und Brechung 442
3.3. Beziehungen zwischen den Amplituden. Stabilität von Unstetigkeitsfronten (Evolutionsbedingungen) 444

Kapitel 4. Ausbreitung in inhomogenen Medien 450
4.1. Aufspaltung der linearisierten Gleichungen im homogenen Fall, Kopplung im inhomogenen Fall 450
4.2. Charakteristiken der linearisierten MHD-Gleichungen 452
4.3. Konstruktion der charakteristischen Flächen mit Hilfe der Strahlen . . . 456
4.4. Beispiele 461
4.4.1. Ausbreitung von ALFVÉNschen Fronten in einem Dipolfeld . . . 461
4.4.2. Ausbreitung der f-Wellen in der Magnetosphäre der Erde 463
4.5. Variation der Intensitäten längs der Strahlen 466

Kapitel 5. Anhang 470

Literatur 477

Sachverzeichnisse 479