

Energieoverdracht tussen elektronen en ionen in een stationair plasma met hoge ionisatiegraad

Citation for published version (APA):

Sijde, van der, B., Dielis, J. W. H., Pots, B. F. M., & Schram, D. C. (1975). Energieoverdracht tussen elektronen en ionen in een stationair plasma met hoge ionisatiegraad. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 41(9), 106-108.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1975

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Energieoverdracht tussen elektronen en ionen in een stationair plasma met hoge ionisatiegraad

In een stationair plasma met hoge ionisatiegraad ($> 50\%$) en lage elektronentemperatuur (3 eV) is de energieoverdracht tussen elektronen en ionen experimenteel bepaald en binnen een faktor 2 in overeenstemming met de theorie bevonden. Tevens werd voor bepaalde omstandigheden verhoogde energieoverdracht tussen elektronen en ionen waargenomen.

B. van der Sijde, J. Dielis, B. Pots en D. C. Schram*.

1. Inleiding

In de plasmafysika staat de energieoverdracht tussen elektronen (e) en ionen (i) in de belangstelling, o.a. in verband met de noodzakelijke verhitting van ionen in thermonucleaire plasma's. Bij gaslasers daarentegen kan het van belang zijn juist te vermijden, dat een belangrijke energieoverdracht tussen elektronen en ionen plaats vindt teneinde de energie optimaal voor excitatie te kunnen benutten. Met het oog hierop is het zinvol de bestaande ideeën omtrent de e-i overdracht experimenteel te toetsen. Het plasma krijgt veelal zijn energie door Ohmse verhitting, m.a.w. door een stroom door het plasma te sturen. Dit leidt in eerste instantie tot verhitting van de elektronen die dan deze energie d.m.v. Coulombbotsingen gedeeltelijk afstaan aan de ionen; dit gebeurt langzaam tengevolge van de ongunstige massaverhouding m_e/m_i . Deze toevoer van energie kan in veel gevallen te klein zijn om de energieverliezen van de ionen door botsingen met neutrale deeltjes, diffusie en warmtegeleiding te compenseren. Een groot verschil tussen elektronen- en ionentemperatuur $T_e - T_i$ is dan het gevolg. Een vergroting van de energieoverdracht middels bijv. ionen-akoestische turbulentie is dan ook vaak gesuggereerd als mogelijkheid de energieoverdracht 'anomaal' te verhogen¹⁾. Daarbij dient uiteraard anomale diffusie niet op te treden. Een kleine dichtheid van neutrale deeltjes daarentegen is bevorderlijk om het energieverlies van ionen te beperken.

Het is daarom van belang de in een bekende situatie experimenteel bepaalde energieoverdracht te vergelijken met voorspellingen op grond van de klassieke theorie, zoals die door diverse auteurs berekend zijn (zie o.a.²⁾, d.w.z. een berekening gebaseerd op de energieoverdracht tengevolge van Coulomb-interacties tussen elektronen en ionen in een plasma met

Maxwellse energieverdelingen voor de deeltjes. Deze overdracht kan dan tevens dienen als referentie voor omstandigheden met anomale overdracht t.g.v. ionen-akoestische turbulentie. Een dergelijke vergelijking voor 'klassieke' overdracht is slechts gedaan door Dougal en Goldstein³⁾ die aantoonde dat binnen een grote spreiding (een faktor 3 meer tot een faktor 3 minder) overeenstemming bestaat met de waarden die Spitzer aangeeft²⁾.

In deze studie wordt de energieoverdracht bepaald door het uitwerken van de lokale ionen-energiebalans in een stationaire toestand. Daarbij kunnen in onze omstandigheden enkele termen verwaarloosd worden, o.a. ionenwarmtegeleiding, zodat tenslotte de energietoevoer gelijk moet zijn aan het energieverlies tengevolge van energieoverdracht van ionen aan neutralen (n), waaronder ladingsomwisseling, en dat tengevolge van deeltjes-transport. Voor een dergelijke bepaling moet de ionisatiegraad zo hoog zijn, ($\geq 50\%$) dat het temperatuurverschil tussen ionen en neutralen $T_i - T_n$ meetbaar is. De elektronendichtheid n_e dient groot genoeg te zijn om er zeker van te zijn dat elektronen en ionen een Maxwellse snelheidsverdeling hebben, maar weer niet zo groot dat het temperatuurverschil $T_e - T_i$ te klein zou kunnen worden voor een enigszins nauwkeurige bepaling. De temperaturen zijn tevens zo laag, dat alle karakteristieke lengtes klein zijn t.o.v. de afmetingen van het plasma (meer precies de gradiënt lengtes).

2. Methode

Bij deze studie is gebruik gemaakt van een argon plasma in een magneetveld met als gemiddelde kondities $T_e = 30 \cdot 10^3 \text{ K}$, $T_i = 10 \cdot 10^3 \text{ K}$, $n_e = n_i = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ⁴⁾. De Maxwellisatietijden zijn dan voor elektronen $\tau_{ee} = 6 \cdot 10^{-9}$ sec en voor ionen $\tau_{ii} = 4 \cdot 10^{-7}$ sec. Deze zijn kort t.o.v. de karakteristieke tijden voor energieoverdracht $\tau_{e \text{ ei}}$ en $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ sec $\tau_{e \text{ in}} = 4 \cdot 10^{-5}$ sec. De energieverdeling van elektronen en ionen zal dus dichtbij een Max-

well-verdeling zijn en gekarakteriseerd worden door respectievelijk T_e en T_i . De 'klassieke' energieoverdracht van elektronen naar ionen is dan²⁾

$$W_{ei} = \frac{3}{2} k (T_e - T_i) \cdot n_e \cdot v_{e \text{ ei}}, \quad (1.a)$$

waarbij

$$v_{e \text{ ei}} = \frac{8\sqrt{2\pi} \cdot n_i \cdot q^4 \ln \Lambda \cdot m_e^{1/2}}{3 \cdot (4\pi\epsilon_0)^2 \cdot (kT_e)^{3/2} \cdot m_i} \quad (1.b)$$

Hierbij is q het symbool voor de elementaire lading en $\ln \Lambda$ is de zogenaamde Coulomblogarithme.

Voor het bepalen van het verlies van energie van de ionen kunnen we ons beperken tot het berekenen van de energieoverdracht van botsingen met neutrale deeltjes en van diffusie. De gemeten gradiënten van T_i zijn zo klein dat verwaarlozing van de ionenwarmtegeleiding is toegestaan, zowel radiaal als axiaal. De belangrijkste verliesterm is de interactie van ionen met neutrale deeltjes door elastische botsingen en ladingsomwisseling. De werkzame doorsnede voor ladingsomwisseling σ_{ex} is goed bekend en een goede representatie van de resultaten uit een vijftal experimentele bijdragen is⁵⁾:

$$\sigma_{ex} = (6.83 - 0.78 \log E_{rel})^2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2,$$

waar E_{rel} de relatieve energie in eV is tussen de botsingspartners. De uitdrukking is dus genormeerd op 1 eV. Cramer⁶⁾ geeft ook waarden voor de werkzame doorsnede σ_{ei} voor elastische botsingen, die ongeveer gelijk zijn aan σ_{ex} . Rekening houdend met de slechts gedeeltelijke energieoverdracht bij elastische botsingen, vindt men na integratie over de snelheidsverdelingen van ionen en neutralen^{5,7)}:

$$W_{in} = \frac{3}{2} k (T_i - T_n) \cdot n_i \cdot v_{e \text{ in}}(n_n, T_i, T_n) \quad (3)$$

waarin $v_{e \text{ in}}(n_n, T_i, T_n)$ een bekende functie is, waarin ook de waarde van σ_{ex} en σ_{ei} verwerkt is.

De tweede verliesterm, die beschouwd dient te worden is energieverlies door transport. Deze verliezen kunnen we bepalen door het meten van de bronterm, de ionisatie. We

* Technische Hogeschool Eindhoven, afdeling Technische Natuurkunde.

nemen daarbij aan, dat de zo gevormde ionen aanvankelijk een gemiddelde energie $\frac{3}{2} kT_n$ hebben, zodat deze verliesterm luidt:

$$W_{tr} = \frac{3}{2} k(T_i - T_n) \cdot n_n \cdot \nu_{ion} \quad (4.a)$$

met

$$\nu_{ion} = n_e \langle \sigma V_e \rangle_{i,d} + n_e \langle \sigma V_e \rangle_{i,s} \quad (4.b)$$

Hierbij is ν_{ion} de ionisatiefrekwentie en $\langle \sigma V_e \rangle$ het over de snelheidsverdeling geïntegreerde produkt van de werkzame doorsnede en elektronensnelheid; i.d. duidt op direkte en i.s. op stapsgewijze ionisatie. De direkte ionisatie is goed bekend⁸⁾. Van stapsgewijze ionisatie via de metastabiele argon niveaus 3P_0 en 3P_2 is bekend dat de werkzame doorsnede voor excitatie $\sigma_{exc} \approx 0.2 \cdot 10^{-20} m^2$ bij ongeveer 25 eV^{9,10)} en die voor ionisatie vanuit deze niveaus $\sigma_{i,s} \approx 8 \cdot 10^{-20} m^2$ bij ongeveer 12 eV^{11,12)}. Met behulp van deze gegevens kan men de stapsgewijze ionisatie berekenen onder de voorwaarde dat de koppeling van de metastabiele waarde dat de koppeling van de metastabiele niveaus met het resonante niveau 3p , niet zo sterk is dat er belangrijke stralingsverliezen zijn¹³⁾. Een mogelijke verdergaande excitatie vanuit de metastabiele niveaus naar hoger gelegen niveaus¹²⁾ welke kunnen terugvallen naar de resonante niveaus kan deze koppeling nog versterken. We hebben daarom een schatting gemaakt van de stapsgewijze ionisatie, welke in de toekomst verder gepreciseerd dient te worden. Doordat deze energieverliesterm voor een groot temperatuursgebied niet de dominante term is, is de onzekerheid tengevolge van de schatting beperkt tot ca. 20%.

De mate van overeenstemming tussen de zo experimenteel bepaalde energieoverdracht en die volgens uitdrukking (1) wordt aangegeven door een faktor f , zodanig dat

$$f = \frac{W_{in} + W_{tr}}{W_{ei}} \quad (5)$$

Een $f < 1$ geeft dan aan dat de gemeten energieoverdracht van elektronen naar ionen kleiner is dan de theoretisch voorspelde.

3. Experimentele uitvoering

Het plasma wordt gevormd in een axiaal magneetveld door een ontleding tussen een holle hete kathode, waardoor het gas wordt toegevoerd en een op ca. 1.5 m afstand gelegen anode⁴⁾. Een aantal karakteristieke grootheden van de holle kathode boogontlading, zoals die bij dit exper-

TABEL 1

stroom I_D	20-125 A	elektronentemp. T_e	$(25-55)10^3 K$
spanning V_D	65-100 V	ionentemp. T_i	$(1.5-15)10^3 K$
magneetveld B	0.06-0.15 T	neutrale deeltjestemp. T_n	$(1.0-3.5)10^3 K$
gasdruk P	1.5-2.5 mtorr	elektronendichtheid n_e	$(2.5-7)10^{19} m^{-3}$

riment voorkwamen, zijn aangegeven in tabel 1.

De ionen- en neutrale deeltjestemperatuur zijn met behulp van een Fabry-Perot interferometer bepaald uit de Dopplerverbreiding van lijnen uit het argon II en argon I spektrum. De uit de totale lijnbreedte door deconvolutie bepaalde Dopplerverbreiding varieerde van 15-60 mÅ, terwijl de apparaatbreedte van de interferometer in het golflengtegebied van 4200 Å ca. 33 mÅ bedroeg. In het gebruikte golflengteinterval van 100 Å is de reflektiecoëfficiënt van de spiegels nauwkeurig bepaald teneinde het Lorentz- en Gaussgedeelte van het profiel nauwkeurig te kunnen berekenen. Door het gebruik van een Polaroidfilter is de invloed van Zeemansplitsing vermeden.

De elektronendichtheid is bepaald met behulp van Thomson verstrooiing¹⁴⁾. Het totaal aantal verstrooide fotonen is een maat voor de elektronendichtheid. Het Gaussisch profiel geeft informatie over de elektronentemperatuur. De elektronendichtheid is door ijking met Rayleigh verstrooiing bepaald met een nauw-

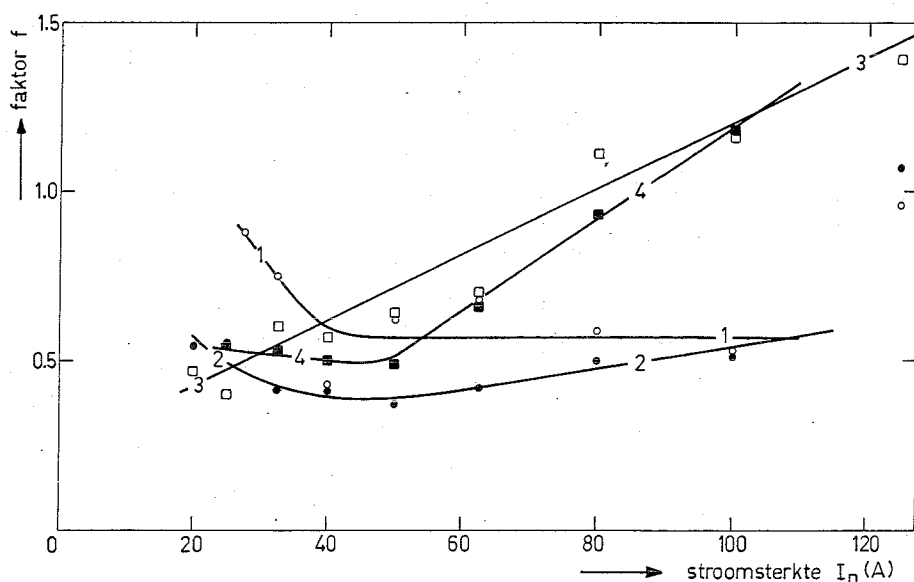
keurigheid van ca. 20%. De bepaling van de elektronentemperatuur was bij grote stromen te onnauwkeurig tengevolge van lijnstraling uit het plasma. Na ijking met de Thomson verstrooiing bij kleine stromen is T_e verder bepaald uit de intensiteit van de argon II, 740 Å lijn.

De dichtheid van de neutrale deeltjes is bepaald m.b.v. de intensiteit van twee neutrale lijnen, $\lambda = 6965 \text{ Å}$ en $\lambda = 7634 \text{ Å}$. Deze lijnen zijn geijkt onder omstandigheden dat de temperatuur T_n 300-400 K is en de dichtheid correspondeert met de gemeten vuldruk.

4. Resultaten en conclusies

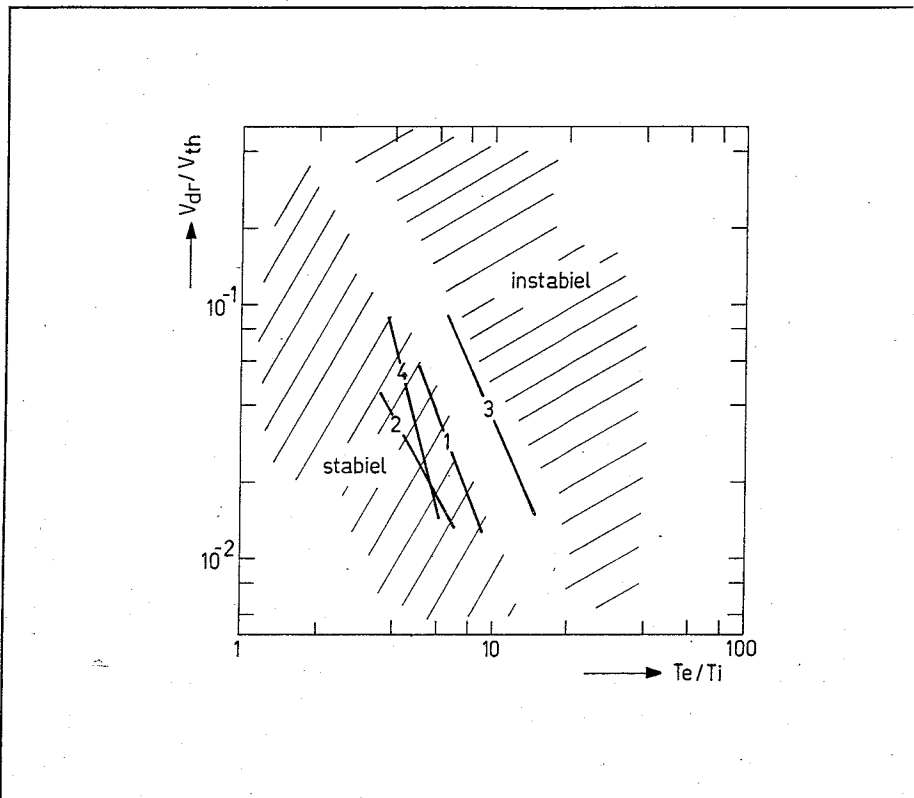
De verhouding f van gemeten en berekende waarden voor de energieoverdracht tussen elektronen en ionen is bepaald voor een viertal stroomreeksen ($I_D = 20-125 \text{ A}$) bij een aantal magneetvelden en gasdrukken. In figuur 1. zijn de resultaten weergegeven.

Bij twee van de vier reeksen varieert f weinig met de stroom; bij de twee andere is er een systematische stijging waar te nemen voor grote stromen,



figuur 1. De waarde van de faktor f , de verhouding van gemeten energieoverdracht en theoretisch bepaalde energieoverdracht voor klassieke overdracht, als functie van de ontladingsstroom voor een viertal reeksen.

- : reeks 1, $B = 1,05 \cdot 10^{-1} T$; $p = 2.50 \text{ mtorr}$
- : reeks 2, $B = 1,5 \cdot 10^{-1} T$; $p = 2.50 \text{ mtorr}$
- : reeks 3, $B = 0,6 \cdot 10^{-1} T$; $p = 2.50 \text{ mtorr}$
- : reeks 4, $B = 1,5 \cdot 10^{-1} T$; $p = 1.50 \text{ mtorr}$



figuur 2. Het stabiliteitskriterium voor ionen-akoestische turbulentie met V_{dr}/V_{th} als functie van T_e/T_i . Tevens zijn de waarden van deze quotiënten voor de vier meetreeksen aangegeven.

welke beduidend groter is dan de geschatte nauwkeurigheid van ca. 25%. Bij kleine stromen wordt dit percentage grotendeels bepaald door de nauwkeurigheid in T_i , T_n . Bij grote waarden van de stroom neemt het belang hiervan af, maar kunnen systematische afwijkingen optreden door toedoen van de niet volledig bekende bijdrage voor stapsgewijze ionisatie, zodat ook daar de schatting van 25% gehandhaafd blijft. De f -waarden van de twee eerste reeksen en de lage waarden van de stroom bij de andere reeksen vertonen in het licht van genoemde nauwkeurigheid geen significante verschillen en de gemiddelde waarde van f kan worden gesteld op 0.55 ± 0.15 . Dit zou wijzen op een gemeten energieoverdracht die kleiner is dan de theoretisch voorspelde. Gezien de mogelijkheid van systematische fouten die alle meetpunten betreffen, b.v. in de bepaling van de dichtheid der neutrale deeltjes en de elektronentemperatuur, kan men dit resultaat beschouwen als een redelijke overeenstemming tussen experiment en theorie. De systematische stijging van de waarden van f bij toenemende stroomsterkte voor twee reeksen kan

een aanwijzing zijn voor anomale energieoverdracht tengevolge van ionen-akoestische turbulentie. Om dit verder te toetsen is in figuur 2 voor de vier reeksen het quotiënt van de driftsnelheid en de thermische snelheid V_{dr}/V_{th} uitgezet tegen T_e/T_i . In dezelfde figuur is het stabiliteitskriterium weergegeven voor ionen-akoestische turbulentie¹⁵⁾ volgens de lineaire Vlasov theorie. De waarde van V_{dr} is berekend met behulp van een effectieve oppervlakte, afkomstig van gemeten argon II lichtprofielen. De nauwkeurigheid ervan is een faktor 2 of beter. Het is opvallend dat de kromme voor reeks 3 gedeeltelijk vrijwel met het stabiliteitskriterium samenvalt, terwijl de krommen voor de reeksen 1 en 2 er duidelijk van verwijderd blijven. Reeks 4 lijkt minder goed in dit beeld te passen. Er zijn echter aanwijzingen op grond van grote boogspanningen, die er op duiden dat de stroomdichtheid en daarmee V_{dr} wellicht een faktor 2 groter is dan die welke volgt uit de berekening met het dichtheidsprofiel. Voor meer duidelijke resultaten dienen de stroomreeksen te worden voortgezet voor grotere waarden bij de voor turbulentie gunstige omstandigheden van lage druk (V_{dr} groot) en niet te

groot magneetveld (T_e/T_i gunstig). Een beeld dat niet door de metingen tegengesproken wordt en verder onderzocht dient te worden is het volgende: Bij een bepaalde driftsnelheid stelt de verhouding T_e/T_i zich middels een wat vergrote energieoverdracht door aanwezigheid van een eindig turbulentieniveau zo in, dat de V_{dr}/V_{th} verhouding dicht bij het stabiliteitskriterium voor ionen-akoestische turbulentie blijft. Nu zijn in de literatuur¹⁶⁾ computerberekeningen bekend die aanwijzingen bevatten, dat stationaire ionen-akoestische turbulentie boven het thermisch niveau niet mogelijk zou zijn. Daar wordt dan de turbulentie beëindigd doordat vooral de ionenenergieverdeling grote afwijkingen van de Maxwell verdeling gaat vertonen. In ons geval is echter de in de computerberekening verwaarloosde relaxatie zo snel, dat deze afwijkingen onwaarschijnlijk zijn en de konklusie betreffende de turbulentie niet zonder meer van toepassing zijn.

- 1) H. Schrijver, N.T.v.N., dit nummer.
- 2) L. Spitzer, Jr, Physics of fully ionized Gases, Interscience Publishers, Inc., New York (1956)
- 3) A. A. Dougal en L. Goldstein, Phys. Rev. **109** (1958) 615
- 4) B. van der Sijde, N.T.v.N. **39** (1973) 19
- 5) B. van der Sijde, rapport THE nr. NT 73-4
- 6) W. H. Cramer, J. Chem. Phys. **30** (1959) 641
- 7) P. Banks, Planet. Space Sc. **14** (1966) 1105
- 8) P. Laborie, J. M. Rocard en J. A. Rees, Electronic cross-sections and macroscopic coefficients, Dunod, Paris (1968)
- 9) J. W. McConkey and F. G. Donaldson, Can. J. Phys. **51** (1973) 914
- 10) W. L. Borst, Bull. Am. Phys. Soc., **19** (1974) 158
- 11) A. J. Dixon, M. F. A. Harrison en A. C. H. Smith, Abstracts VIIth ICPEAC Beograd, 1973, p. 405
- 12) A. R. Martin, J. Phys. B. **7** (1974) 1161
- 13) A. V. Phelps, Phys. Rev. **114** (1959) 1011
- 14) W. Kohsiek, preprint, wordt gepubliceerd
- 15) B. D. Fried en R. W. Gould, Physics Fluids, **4** (1961) 139
- 16) C. T. Dum, R. C. Lodura en D. Biskamp, Phys. Rev. Lett **32** (1974) 1231