

Lasttechnologie

Lasttechnologie

G. den Ouden

© VSSD

Eerste druk 1987

Derde druk **1993-2006**

Uitgegeven door:

VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. + 31 15 2782124, telefax +31 15 2787585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/m006.htm>

Aan docenten die dit boek in cursusverband gebruiken, kunnen de illustraties in dit boek desgewenst in digitale vorm beschikbaar gesteld worden. Er is voor docenten tevens een bestand met antwoorden op de studievragen beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij emailadres hlf@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Gedrukte editie

ISBN-10 90-407-1285-9

ISBN-13 978-90-407-1285-2

NUR 971

Tefwoord: lassen

Elektronische versie

ISBN-10 90-6562-137-7

ISBN-13 978-90-6562-137-5

Voorwoord

Dit boek handelt over lastechnologie in de brede zin van het woord. Het is in eerste instantie bedoeld voor studenten aan technische universiteiten en gelijkwaardige opleidingsinstituten als handleiding bij de studie. Daarnaast kan het ook van nut zijn voor degenen die in het kader van hun werk direct of indirect met het onderwerp te maken hebben.

De inhoud van het boek is gebaseerd op notities ten behoeve van colleges gegeven in de periode sedert 1980 aan studenten van de Technische Universiteit Delft.

De eerste druk (1987). Deze druk moet worden gezien als 'eerste benadering'. De bedoeling is om in volgende drukken de stof uit te breiden en waar nodig te verdiepen.

De tweede druk (1990). Ten behoeve van deze druk zijn de volgende paragrafen geheel of gedeeltelijk herschreven: paragraaf 1.10 (De neersmeltsnelheid), paragraaf 2.10 (Laser lassen), paragraaf 5.1 (De temperatuercyclus) en paragraaf 5.5 (De structuur van de lasverbinding).

Voorts is de tekst op een aantal plaatsen uitgebreid en aangepast en zijn enkele figuren toegevoegd.

De derde druk (1993). In deze druk is de tekst op een aantal plaatsen verder uitgebreid. Voorts zijn opgaven aan de hoofdstukken toegevoegd.

Suggesties met betrekking tot de inhoud zullen door de schrijver zeer op prijs worden gesteld.

Delft, juni 1993

G.d.O.

Inhoud

Algemene inleiding	11
I PROCESSEN	
1. Booglassen	15
1.1. Inleiding	15
1.2. Algemene beschrijving van de boog	16
1.3. De boogzuil	18
1.4. Het kathodevalgebied	32
1.5. Het anodevalgebied	34
1.6. Het ontsteken van de boog	34
1.7. Het booglasproces	38
1.8. Warmtetransport bij het booglassen	47
1.9. Materiaaltransport bij het booglassen	50
1.10. De neersmeltsnelheid	57
1.11. Spatverliezen	59
1.12. Magnetische effecten	61
1.13. Stroombronnen	64
1.14. Robotisering van het booglasproces	65
Opgaven	69
Literatuur	72
2. Andere lasprocessen	73
2.1. Inleiding	73
2.2. Weerstandlassen	73
2.3. Hoog-frequent lassen	76
2.4. Elektroslak lassen	77
2.5. Autogeen lassen	78
2.6. Thermiet lassen	80
2.7. Wrijvingslassen	81
2.8. Ultrasoon lassen	82
2.9. Explosielassen	83
2.10. Laser lassen	84
2.11. Elektronenbundel lassen	88
2.12. Diffusielassen	89

Opgaven	91
Literatuur	92
3. Solderen	93
3.1. Inleiding	93
3.2. Oppervlaktegesteldheid	94
3.3. Bevochtigingseigenschappen van soldeer	94
3.4. De vloeibaarheid van soldeer	95
3.5. Zachtsolderen en hardsolderen	96
3.6. De sterkte van de soldeerverbinding	98
Opgaven	99
Literatuur	99
4. Thermisch snijden	100
4.1. Inleiding	100
4.2. Autogeen snijden	100
4.3. Boogsnijden	103
4.4. Laser snijden	104
Opgave 104	
Literatuur	104
II METAALKUNDIGE ASPECTEN	
5. Metaalkundige aspecten van het booglassen	107
5.1. De temperatuurcyclus	107
5.2. Het lasbad	113
5.3. Slak-bad reacties	117
5.4. De opname van di-atomaire gassen	117
5.5. De structuur van de lasverbinding	120
5.6. Restspanningen	128
5.7. Lasdefecten	131
5.8. Lasbaarheid	133
Opgaven	134
Literatuur	136
III TOEPASSINGEN	
6. Lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal	139
6.1. Ongelegeerd en laaggelegeerd staal – soorten en kenmerken	139
6.2. Lasprocessen en lasprocedures	140
6.3. Beklede elektroden voor het lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal	142

6.4.	De structuur van de lasverbinding	151
6.5.	Lasproblemen	159
	Opgaven	170
	Literatuur	171
7.	Lassen van roestvast staal	173
7.1.	Eigenschappen van roestvast staal	173
7.2.	Lasbaarheid van roestvast staal	177
7.3.	Vermindering van de corrosiebestendigheid ten gevolge van het lassen	182
7.4.	Lasverbindingen tussen staalsoorten van verschillende samenstelling (zwart-wit verbindingen)	186
	Opgaven	188
	Literatuur	188
8.	Lassen van aluminium	190
8.1.	Eigenschappen van aluminium	190
8.2.	Lasbaarheid van aluminium	191
	Opgave 194	
	Literatuur	194
Appendices		
A.	Lastypen	196
B.	Naadvormen	196
C.	Lasposities	197
D.	Normen op lasgebied	198
E.	Organisaties op lasgebied	199
F.	Afkortingen	199
Index		201

Algemene inleiding

Voor het duurzaam verbinden van materialen is in loop der tijd een groot aantal methodes en technieken ontwikkeld.

Solderen, lijmen en lassen zijn bekende voorbeelden, die elk een zeer belangrijke rol spelen in de huidige metaalverwerkende industrie. Vooral lassen wordt op grote schaal toegepast.

Bij het lassen worden metalen delen met elkaar verbonden door gebruik te maken van warmte, al of niet in combinatie met druk. Essentieel daarbij is dat

- er volledige continuïteit ontstaat tussen de delen;
- de verbinding globaal dezelfde materiaaleigenschappen heeft als de verbonden delen.

De warmte die voor het lassen nodig is kan door verschillende bronnen worden geleverd. Er kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van chemische reactiewarmte, van wrijvingswarmte en van warmte die ontstaat bij elektrische stroomdoorgang.

De verschillende lasprocessen kunnen worden ingedeeld in smeltlassen en druklassen, waarbij het criterium is het al dan niet toepassen van druk tijdens het lassen. Duidelijker is echter een indeling naar de aard van de benodigde warmtebron. Een dergelijke indeling is voor de belangrijkste lasprocessen weergegeven in onderstaande tabel.

Warmtebron	Lasproces
elektrisch	booglassen
	weerstandlassen
	hoog-frequent lassen
	elektroslak lassen
thermo-chemisch	autogeen lassen
	thermiet lassen
mechanisch	wrijvingslassen
	ultrasoon lassen
	explosie lassen
straling	laser lassen
	elektronenstraal lassen

Opgemerkt moet worden dat sommige lasprocessen niet zonder meer in dit schema zijn in te passen. Dit houdt verband met het feit dat de benodigde warmtebron in die gevallen van samengestelde aard is. Deze situatie doet zich voor bij diffusielassen, waar zowel warmte van thermo-chemische als van mechanische oorsprong een rol speelt.

Tijdens het lassen doorloopt het metaal een temperatuurcyclus, bestaande uit een zeer snelle opwarming gevolgd door een betrekkelijk snelle afkoeling. Gedurende deze cyclus vinden er in de vloeibare en vaste fase verschillende fysische en chemische veranderingen plaats, die bepalend zijn voor de eigenschappen van de uiteindelijke verbinding. Aan deze eigenschappen worden in het algemeen hoge eisen gesteld, vooral wanneer de verbinding deel uitmaakt van een hoogwaardig produkt of van een hoogwaardige constructie.

In dit boek worden de belangrijkste aspecten die bij het lassen een rol spelen aan de orde gesteld.

Deel I (hoofdstuk 1 tot en met 4) handelt over processen, dat wil zeggen over de mogelijkheden die er zijn om een lasverbinding tot stand te brengen. Van de verschillende lasprocessen die in de praktijk worden toegepast is booglassen verreweg de belangrijkste, vandaar dat aan dit proces de meeste aandacht wordt besteed (hoofdstuk 1). Van de andere lasprocessen die in hoofdstuk 2 worden besproken krijgen weerstandlassen, autogeen lassen en laser lassen de meeste aandacht. Naast lasprocessen komen ook solderen (hoofdstuk 3) en thermisch snijden (hoofdstuk 4) kort aan de orde.

In deel II (hoofdstuk 5) worden de metaalkundige aspecten van het lassen behandeld. Het gaat daarbij vooral om de eigenschappen van de lasverbinding en om de manier waarop die eigenschappen door het lasproces worden beïnvloed.

Tenslotte wordt in deel III (hoofdstuk 6 tot en met 8) het lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal, roestvast staal en aluminium besproken.

I Processen

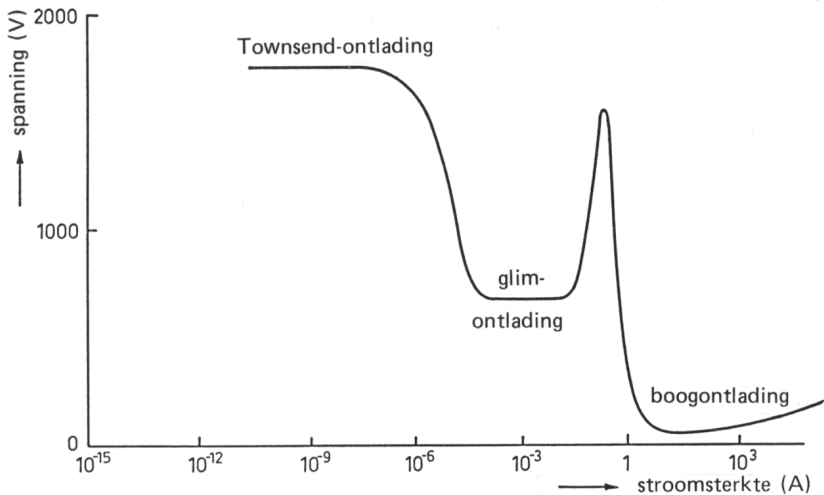
1

Booglassen

1.1. Inleiding

Het verschijnsel van elektriciteitsgeleiding door gassen is al heel lang bekend. Het manifesteert zich in een aantal van elkaar verschillende vormen, die met de nogal misleidende naam gasontladingen worden aangeduid. Voorbeelden van gasontladingen zijn: vonk, bliksem, Townsend-ontlading, glimontlading en boogontlading. Vonk en bliksem zijn kortstondige, niet-stationaire ontlastingstypen; hun maximale levensduur ligt in de buurt van 10^{-2} s.

De Townsend-ontlading, glimontlading en boogontlading zijn stationaire ontlastingstypen die voor onbepaalde tijd kunnen voortduren. Zij kunnen onder bepaalde omstandigheden in elkaar overgaan en kunnen worden beschreven aan de hand van een zogenaamde stroom-spanning karakteristiek, waarvan een voorbeeld is gegeven in figuur 1.1.



Figuur 1.1. Stroom-spanning karakteristiek van de verschillende typen gasontlading.

De Townsend-ontlading wordt gekenmerkt door een hoge spanning (kilovolts) en een zeer lage stroom (micro-ampères). Een hoge weerstand in de stroomkring is noodzakelijk om deze ontladingsvorm te handhaven.

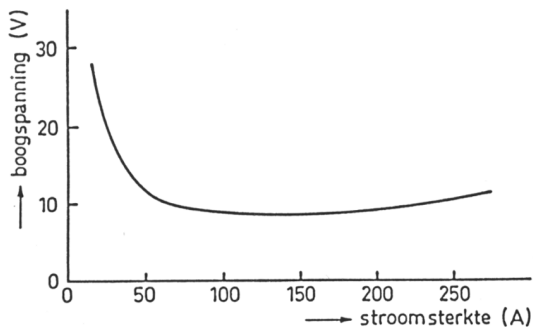
De glimontlading wordt gekenmerkt door een lagere spanning (enkele honderden volts) en een hogere stroom (milli-ampères). Bij deze ontlading treedt een positieve ruimtelading op vlak voor de kathode, die het elektrisch veld ter plaatse sterk vervormt.

Bij de boogontlading spelen ruimteladingen eveneens een essentiële rol. De spanning is nog veel lager dan bij de glimontlading (enkele tientallen volts) en de stroom is veel hoger (ampères).

In dit hoofdstuk zal aandacht worden besteed aan de boogontlading. Allereerst zullen de belangrijkste eigenschappen ervan worden besproken. Vervolgens komt aan de orde op welke wijze de boogontlading kan worden toegepast als warmtebron bij het booglassen.

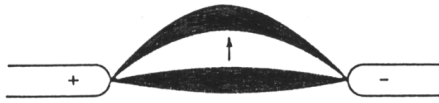
1.2. Algemene beschrijving van de boog

Zoals reeds werd opgemerkt, wordt de boogontlading (voortaan kortweg boog genoemd) gekenmerkt door een relatief lage spanning (tientallen volts) en een relatief hoge stroom (ampères). Een typische stroom-spanning karakteristiek is gegeven in figuur 1.2. Per tijdseenheid zal in de boog elektrische energie worden ontwikkeld. Deze energie is gelijk aan $V \times I$, waarbij V de boogspanning en I de stroomsterkte voorstelt. In stationaire toestand zal deze energie gelijk zijn aan de energie die per tijdseenheid uit de boog verdwijnt door middel van warmtegeleiding, convectie en straling.



Figuur 1.2. Stroom-spanning karakteristiek van de boogontlading.

De boog ontleent zijn naam aan de vorm die door het hete gas wordt aangenomen bij horizontale stroomdoorgang, dat wil zeggen wanneer de elektroden horizontaal tegenover elkaar zijn geplaatst (figuur 1.3): door de kleinere dichtheid zal het hete gas de neiging hebben op te stijgen en dat resulteert dan in het aannemen van de boogvorm. Dit effect is vooral goed waar te nemen wanneer dunne, staafvormige elektroden worden gebruikt die op betrekkelijk grote afstand van elkaar zijn geplaatst. In de praktijk van het booglassen is deze afstand echter meestal klein (maximaal enkele centimeters) en is slechts één van de twee elektroden (de elektrode) staafvormig. In dat geval blijft er weinig van de boogvorm over en is er bijna altijd sprake van een klokvorm (figuur 1.4).



Figuur 1.3. Ontstaan van de boogvorm (staafvormige elektroden, horizontale stroomdoorgang).

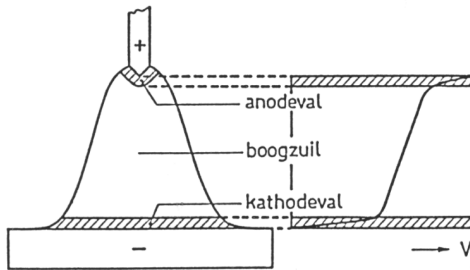


Figuur 1.4. Klokvormige boog.

Uit metingen blijkt dat de elektrische spanning over de boog niet lineair verloopt, maar heel dicht bij de elektroden sprongen vertoont. Dit verschijnsel houdt, zoals later zal blijken, verband met de aanwezigheid van elektrische ruimtelading. Het spanningsverloop is schematisch weergegeven in figuur 1.5.

Het is gebruikelijk de boog te verdelen in drie gebieden, elk met eigen fysische eigenschappen. Verreweg het grootste deel van de boog wordt in beslag genomen door de boogzuil, die wordt gekenmerkt door een klein maar constant spanningsverloop. Grenzend aan de elektroden bevinden zich de zogenaamde valgebieden, waarbinnen zich de genoemde spanningssprongen bevinden: het kathodevalgebied vóór de kathode (negatieve elektrode), het anodevalgebied vóór de anode (positieve elektrode).

In de volgende paragrafen zullen de drie genoemde booggebieden afzonderlijk worden besproken.



Figuur 1.5. Verloop van de boogspanning.

1.3. De boogzuil

De boogzuil bestaat uit neutrale deeltjes, zoals atomen en moleculen (al dan niet in aangeslagen toestand) en elektrisch geladen deeltjes, zoals elektronen en ionen. De elektronen bewegen zich onder invloed van de heersende elektrische veldsterkte in de richting van de anode, de positieve ionen bewegen zich in de richting van de kathode.

Een belangrijke eigenschap van de boogzuil is de elektrische neutraliteit. Dit wil zeggen dat zich in een volume-eenheid van de zuil ten naaste bij evenveel positieve als negatieve elektrische ladingen bevinden. Men spreekt in dit verband dan ook van een plasma. Een gevolg van de elektrische neutraliteit en dus van de afwezigheid van ruimtelading is dat er in de zuil een constante elektrische veldsterkte moet heersen. Dit volgt direct uit de wet van Poisson

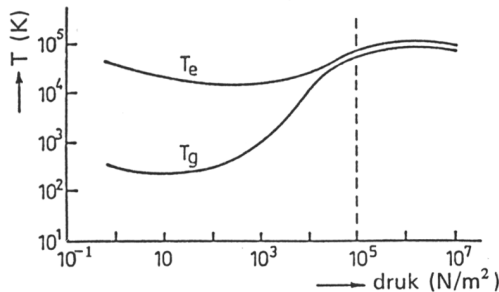
$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = -4\pi\rho \quad (1.1)$$

waarin V de spanning, x de axiale coördinaat tussen anode en kathode, E de elektrische veldsterkte en ρ de ruimtelading per volume-eenheid voorstelt. De elektrische veldsterkte in de zuil heeft meestal een waarde in de orde van 10 V/cm. Een andere belangrijke eigenschap van de boogzuil is dat er lokaal thermisch evenwicht heerst. Men spreekt van thermisch evenwicht wanneer door middel van onderlinge botsingen volledige energie-uitwisseling tussen de verschillende deeltjes plaatsvindt. In dat geval heeft dus elk deeltjestype dezelfde gemiddelde kinetische energie, dat wil zeggen

$$\frac{1}{2} m_1 \overline{v_1^2} = \frac{1}{2} m_2 \overline{v_2^2} = \dots = \frac{1}{2} m_j \overline{v_j^2} = \frac{3}{2} kT \quad (1.2)$$

waarbij m_j en v_j respectievelijk de massa en de snelheid van het deeltjestype j , k de constante van Boltzmann, en T de absolute temperatuur voorstelt.

Vaak wordt onderscheid gemaakt tussen de elektronentemperatuur T_e , en de gastemperatuur (ionen/atomen/moleculen-temperatuur) T_g . In het geval van thermisch evenwicht zijn beide temperaturen uiteraard aan elkaar gelijk. In de boogzuil is T_e echter altijd iets hoger dan T_g , omdat in het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende botsingen de elektronen vanwege hun relatief grote vrije weglengte gemiddeld meer energie uit het elektrisch veld opnemen dan de ionen. Vandaar dat er in de boogzuil in thermisch opzicht eigenlijk van een quasi-evenwicht gesproken moet worden. Bij verlaging van de gasdruk wordt de afwijking van thermisch evenwicht geleidelijk groter en neemt het verschil tussen T_e en T_g toe, zoals wordt geïllustreerd in figuur 1.6.



Figuur 1.6. Elektronentemperatuur (T_e) en gastemperatuur (T_g) als functie van de druk.

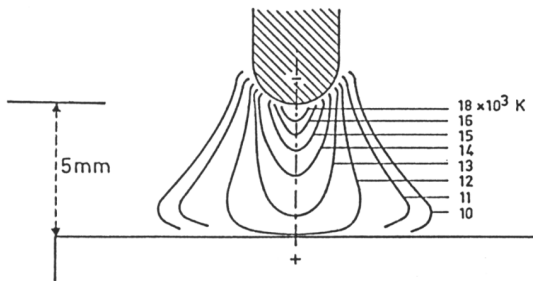
Uit het voorgaande volgt dat de boogzuil bij atmosferische (of hogere) druk gekarakteriseerd kan worden door één temperatuur T ($\sim T_e, \sim T_g$). Deze temperatuur is uiteraard plaatsafhankelijk en wordt bepaald door de energiebalans: in stationaire toestand is de in een bepaalde volume-eenheid per tijdseenheid geproduceerde elektrische energie U_{el} gelijk aan de energie die uit diezelfde volume-eenheid per tijdseenheid wordt afgevoerd door middel van warmtegeleiding (U_w), straling (U_s) en convectie (U_c), in formulevorm

$$U_{el} = U_w + U_s + U_c \quad (1.3)$$

Berekening van de temperatuurverdeling uit vergelijking (1.3) is in principe mogelijk maar in de praktijk uiterst gecompliceerd, omdat U_{el} , U_w , U_s en U_c zeer ingewikkelde functies van T zijn. Wel kan met behulp van vergelijking (1.3) globaal inzicht worden verkregen in de temperatuurverdeling.

Uit metingen blijkt dat T maximaal is in de as van de zuil en naar buiten toe snel afneemt. Ook langs de as treedt er een temperatuurverloop op: in het nauwste gedeelte van de zuil is T maximaal, bij toenemende doorsnede neemt hij af. Ter illustratie wordt in figuur 1.7 de temperatuurverdeling weergegeven in de zuil van een 200 A boog in argon tussen een staafvormige wolfraamelektrode en een plaatvormige, watergekoelde koperanode. Zoals uit de figuur is af te lezen, varieert T langs de as van ongeveer 12 000 tot ongeveer 18 000 K. In het geval van de lasboog ligt de zuiltemperatuur in het algemeen veel lager (maximale waarde tussen 5 000 K en 10 000 K). Dit houdt verband met de aanwezigheid van metaaldamp in de boog (zie ook bij ionisatie en elektrische geleiding).

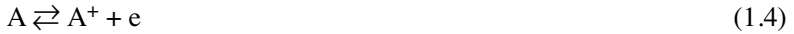
Binnen de boogzuil spelen een aantal fysische verschijnselen een rol. De belangrijkste zullen hieronder kort worden besproken.



Figuur 1.7. Temperatuurverdeling in een 200 A boog in argon tussen een staafvormige wolfraamelektrode en een plaatvormige watergekoelde koperanode.

Ionisatie

In de boogzuil zal een deel van de atomen of moleculen onder invloed van de relatief hoge temperatuur T geïoniseerd zijn volgens de vergelijking

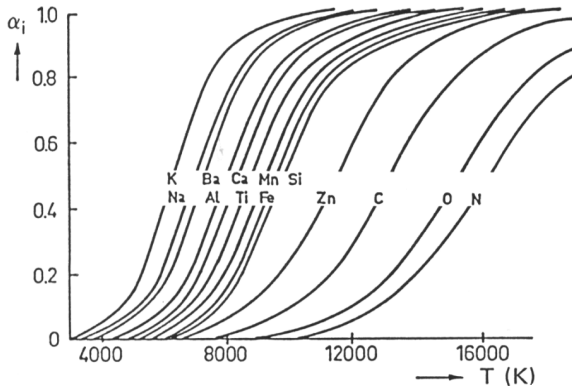


De ionisatiegraad α_i is gedefinieerd als de fractie van het gas dat zich in geïoniseerde toestand bevindt. Voor het verband tussen α_i en T geldt de Eggert-Saha vergelijking

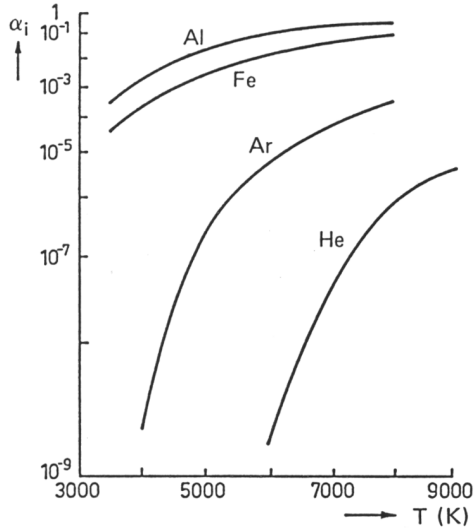
$$\frac{\alpha_i^2}{1 - \alpha_i^2} = C_1 \frac{T^{5/2}}{p} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (1.5)$$

waarin C_1 een grootte is die bij benadering constant mag worden verondersteld, p de gasdruk, E_i de ionisatie-energie van het atoom of molecuul, en k de constante van Boltzmann voorstelt.

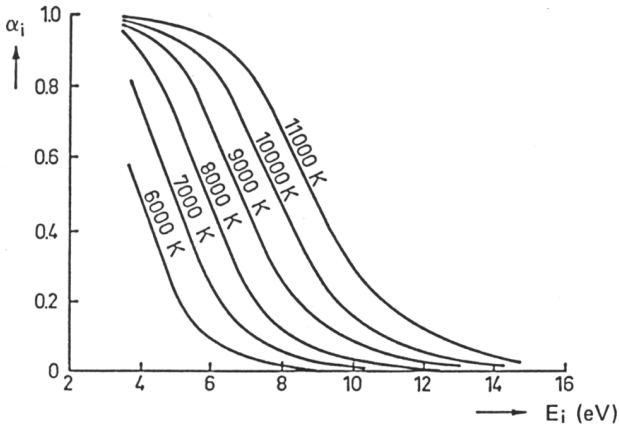
De ionisatiegraad is in figuur 1.8 en figuur 1.9 uitgezet als functie van de temperatuur voor enkele metaaldampen en gassen, en in figuur 1.10 als functie van de ionisatie-energie voor enkele temperaturen. In tabel 1.1 zijn de waarden van de ionisatie-energie van een aantal atomen en moleculen gegeven.



Figuur 1.8. De ionisatiegraad van enkele metaaldampen en gassen als functie van de temperatuur.



Figuur 1.9. De ionisatiegraad van Al, Fe, Ar en He als functie van de temperatuur.



Figuur 1.10. De ionisatiegraad als functie van de ionisatie-energie voor enkele temperaturen.

Tabel 1.1. De ionisatie-energie E_i van enkele atomen en moleculen.

Element	E_i (eV)	Element	E_i (eV)
H	13,6	P	10,5
H ₂	15,6	S	10,4
He	24,6	Ar	15,8
B	8,3	K	4,3
C	11,3	Ca	6,1
CO	14,1	Ti	6,8
CO ₂	14,4	Mn	7,4
N	14,5	Fe	7,9
N ₂	15,5	Ni	7,6
O	13,6	Cu	7,7
O ₂	12,5	Zn	9,4
F	17,4	Zr	6,8
Na	5,1	Mo	7,1
Mg	7,6	Sn	7,3
Al	6,0	W	7,9
Si	8,1	Pb	7,4

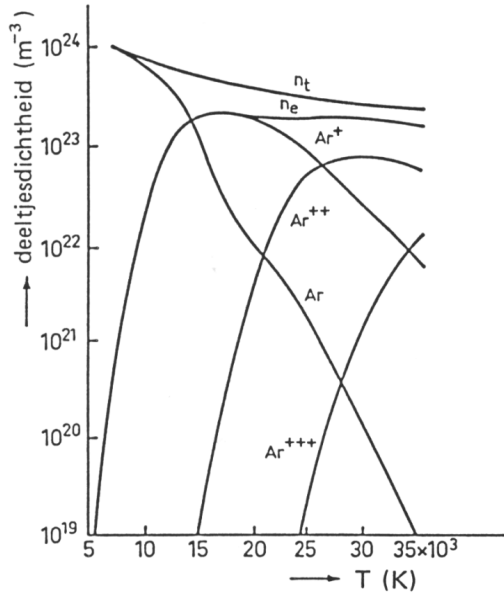
Uit het voorgaande blijkt dat, vanwege het verschil in ionisatie-energie, metalen in veel sterkere mate zijn geïoniseerd dan niet-metalen. IJzerdamp bijvoorbeeld zal bij een temperatuur van 10 000 K voor het grootste gedeelte geïoniseerd zijn, terwijl de ionisatiegraad van argon bij die temperatuur nauwelijks van nul verschilt.

Eén en ander impliceert dat in het geval van de lasboog de effectieve α_i en daarmee de elektrische geleidbaarheid bijna geheel wordt bepaald door de aanwezige metaaldamp (zie ook bij *elektrische geleiding*).

Opgemerkt moet worden dat ionisatie in het algemeen een meervoudig proces is. Dat wil zeggen dat bij toenemende temperatuur steeds nieuwe elektronen van de kern worden losgemaakt, totdat tenslotte alleen een gestripte kern overblijft. Ter illustratie van het meervoudige karakter van het ionisatieproces is in figuur 1.11 de deeltjesdichtheid van argon gegeven als functie van de temperatuur.

Dissociatie

In het geval van een moleculair gas zal onder invloed van de temperatuur een deel van de moleculen gedissocieerd zijn. Voorbeelden van een moleculair gas zijn de di-atomaire gassen H₂, O₂ en N₂. Deze gassen dissociëren volgens de vergelijking



Figuur 1.11. De ionisatie van argon als functie van de temperatuur (n_e stelt het aantal elektronen voor, n_t het totaal aantal deeltjes).



De dissociatiegraad α_d is gedefinieerd als de fractie van het gas dat zich in gedissocieerde toestand bevindt. Voor het verband tussen α_d en T geldt

$$\frac{4\alpha_d^2}{1 - \alpha_d^2} = C_2 \frac{T^{5/2}}{p} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \tag{1.7}$$

waarin C_2 een nagenoeg constante factor en E_d de dissociatie-energie van het molecuul voorstelt.

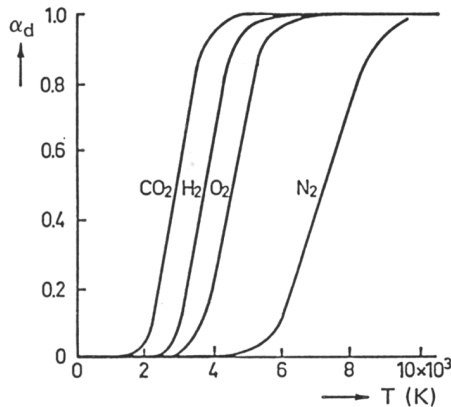
In figuur 1.12 wordt het verband tussen α_d en T grafisch weergegeven voor CO_2 (in evenwicht met $\text{CO} + \text{O}_2$), H_2 , O_2 en N_2 . De corresponderende E_d -waarden van deze gassen zijn vermeld in tabel 1.2.

Tabel 1.2. De dissociatie-energie E_d van enkele gassen.

Gas	H_2	N_2	O_2	CO_2
E_d (eV)	4,48	9,76	5,08	4,3

Gegeven het feit dat de temperatuur in de as van de zuil in het algemeen hoger is dan 4000 K, mag uit figuur 1.12 geconcludeerd worden dat in het geval van genoemde gassen dissociatie een belangrijke rol speelt. Bij 6000 K bijvoorbeeld zal nagenoeg alle aanwezige O_2 en ongeveer 10% van de aanwezige N_2 gedissocieerd zijn.

Overigens zal duidelijk zijn dat dissociatie altijd in combinatie met ionisatie zal optreden. Dit wordt voor N_2 geïllustreerd in figuur 1.13.



Figuur 1.12. De dissociatiegraad van enkele gassen als functie van de temperatuur.

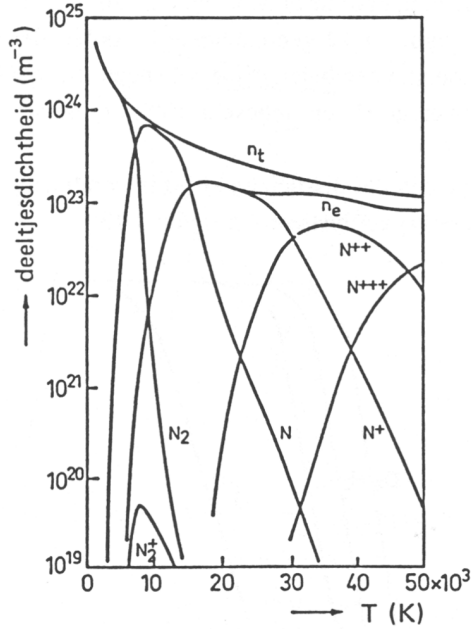
Elektrische geleiding

De elektrische stroom in de boogzuil is te beschouwen als de som van de elektronenstroom (van de kathode naar de anode) en de ionenstroom (van de anode naar de kathode). Voor de elektronenstroombichtheid j_e (elektronenstroom per oppervlakte-eenheid) geldt

$$j_e = en_e \bar{u}_e \quad (1.8)$$

waarbij e , n_e en \bar{u}_e respectievelijk de elektrische lading, de dichtheid en de gemiddelde driftsnelheid (de snelheid van de kathode naar de anode onder invloed van het elektrisch veld) van de elektronen voorstellen.

De gemiddelde driftsnelheid kan berekend worden door de versnelling die de elektronen in het elektrisch veld krijgen te vermenigvuldigen met de gemiddelde tijd \bar{t}_e tussen twee opeenvolgende botsingen, dus



Figuur 1.13. De dissociatie en ionisatie van stikstof als functie van de temperatuur (n_e stelt het aantal elektronen voor, n_t het totaal aantal deeltjes).

$$\bar{u}_e = \frac{eE}{m_e} \bar{t}_e \tag{1.9}$$

Aangezien \bar{t}_e gelijk is aan het quotiënt van de gemiddelde vrije weglengte \bar{l}_e en de gemiddelde thermische snelheid \bar{v}_e kan vergelijking (1.9) geschreven worden als

$$\bar{u}_e = \frac{eE \bar{l}_e}{m_e \bar{v}_e} \tag{1.10}$$

Combinatie van de vergelijkingen (1.2), (1.8) en (1.10) en een numerieke correctie verband houdende met Coulomb wisselwerking tussen de geladen deeltjes leveren de volgende uitdrukking voor de elektronenstroomdichtheid in de zuil op:

$$j_e = \frac{e^2 E n_e \bar{l}_e}{\sqrt{8 m_e k T / \pi}} \tag{1.11}$$

Voor de ionenstroomdichtheid kan op analoge wijze worden afgeleid

$$j_i = \frac{e^2 E n_i \bar{l}}{\sqrt{8 m_i k T / \pi}} \tag{1.12}$$

De verhouding tussen de elektronenstroomdichtheid en de ionenstroomdichtheid kan worden berekend uit de vergelijkingen (1.11) en (1.12). Bij benadering geldt

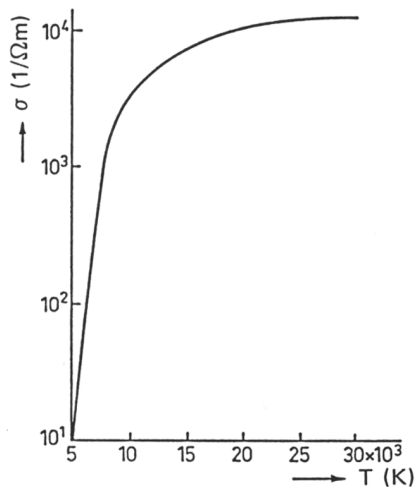
$$\frac{j_e}{j_i} \approx \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \quad (1.13)$$

Aangezien $m_i \gg m_e$, volgt dat $j_e \gg j_i$. Blijkbaar levert de elektronenstroom verreweg de grootste bijdrage tot de totale boogstroom en is de ionenstroom verwaarloosbaar klein.

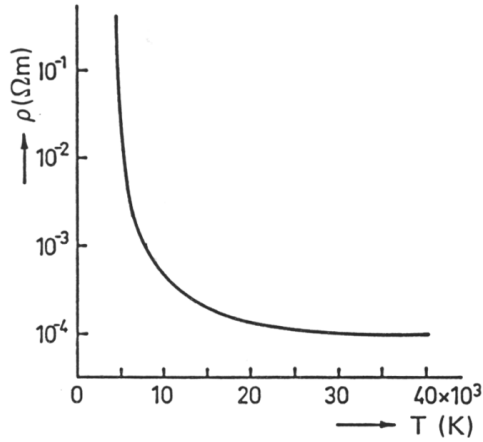
Voor het elektrisch geleidingsvermogen σ , gedefinieerd als het quotiënt van stroomdichtheid en elektrische veldsterkte kan nu worden geschreven

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{e^2 n_e \bar{l}_e}{\sqrt{8 m_e k T / \pi}} \quad (1.14)$$

Aangezien n_e (te berekenen uit α_i) en \bar{l}_e beide eenduidige functies van de temperatuur zijn, wordt σ geheel door T bepaald. In figuur 1.14 wordt het berekende verband tussen σ en T gegeven voor argon. Uit deze figuur blijkt dat σ snel toeneemt bij toenemende T en dat verzadiging optreedt bij volledige ionisatie van het gas. In figuur 1.15 wordt het verband tussen de soortelijke weerstand ρ (gedefinieerd als $1/\sigma$) en T voor argon gegeven.



Figuur 1.14. De elektrische geleidbaarheid van argon als functie van de temperatuur.



Figuur 1.15. De soortelijke weerstand van argon als functie van de temperatuur.

Warmtegeleiding

De warmtegeleiding wordt gekwantificeerd door de warmtegeleidingscoëfficiënt κ , gedefinieerd als de verhouding tussen de warmtestroom ΔQ door een oppervlakte-eenheid en de temperatuurgradiënt dT/dx , in formulevorm

$$\Delta Q = \kappa \frac{dT}{dx} \quad (1.15)$$

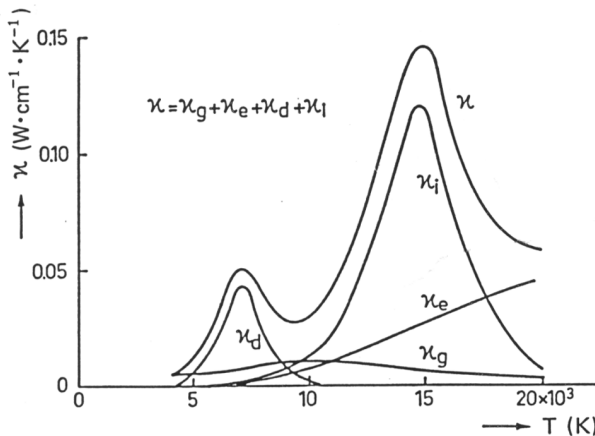
Bij de warmtegeleiding van een plasma spelen verschillende mechanismen een rol. In de eerste plaats wordt warmte getransporteerd door middel van onderlinge botsingen tussen zware gasdeeltjes (atomen, moleculen en ionen). Met dit warmtetransport correspondeert de (klassieke) warmtegeleidingscoëfficiënt κ_g die met behulp van de kinetische gastheorie kan worden berekend.

Daarnaast wordt warmte getransporteerd door middel van botsingen tussen elektronen en zware deeltjes (κ_e); deze bijdrage wordt belangrijker bij toenemende temperatuur.

Ook vindt warmtetransport plaats door diffusie van geïoniseerde paren (elektronen en positieve ionen). Hierbij wordt ionisatie-energie getransporteerd van de plaats waar het atoom/molecuul wordt geïoniseerd naar de plaats waar recombinatie optreedt (κ_i).

Op analoge wijze kan in het geval van een moleculair gas de diffusie van gedissocieerde paren een bijdrage leveren aan de warmtegeleiding (κ_d).

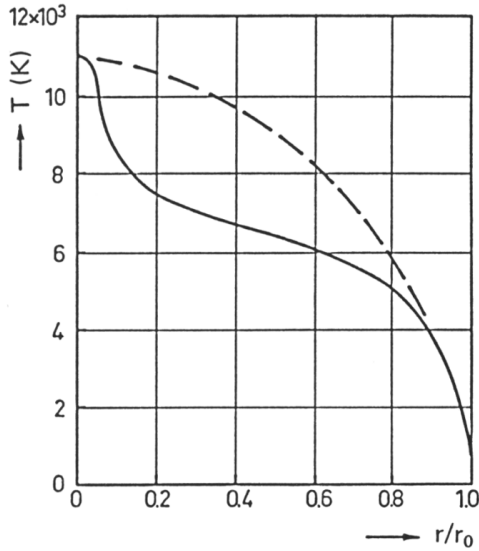
De verschillende bijdragen leveren tezamen de totale warmtegeleidingscoëfficiënt. Als voorbeeld worden in figuur 1.16 de diverse bijdragen tot de warmtegeleidingscoëfficiënt van stikstof gegeven als functie van de temperatuur. In de κ versus T kromme blijken twee pieken op te treden: een (dissociatie-)piek rond 7000 K en een (ionisatie-)piek rond 15 000 K. Het is duidelijk dat deze pieken een belangrijke invloed hebben op het temperatuurprofiel van de boog. Ter illustratie is in figuur 1.17 het berekende temperatuurprofiel gegeven van een boog in stikstof. Bij de berekening is warmtetransport door middel van convectie en straling verwaarloosd. Opvallend is de schouder die in het temperatuurprofiel optreedt. Deze schouder correspondeert met de dissociatiepiek in de warmtegeleiding. Bij mono-atomaire gassen ontbreekt deze schouder en is het temperatuurprofiel min of meer parabolisch zoals aangegeven door de stippellijn in figuur 1.17. Ook de ionisatiepiek kan aanleiding geven tot schoudervorming in het temperatuurprofiel. Uiteraard is dit slechts van belang wanneer de maximale temperatuur voldoende hoog is (hoger dan de temperatuur waarbij ionisatie optreedt).



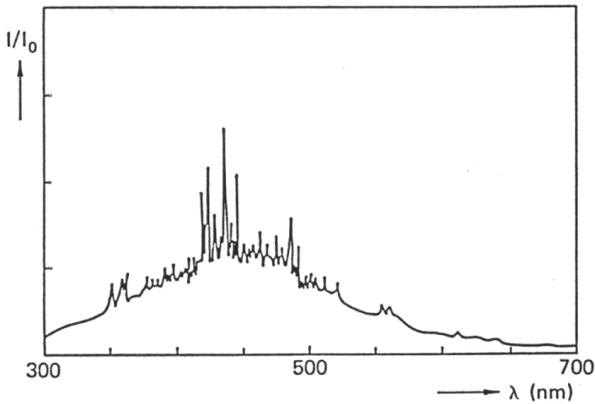
Figuur 1.16. De warmtegeleidingscoëfficiënt van stikstof als functie van de temperatuur.

Straling

De straling die door de boogzuil wordt uitgezonden ligt voor een deel in het zichtbare gebied en bestaat in het algemeen uit een lijnspectrum en een achtergrondcontinuüm. Bij lage temperatuur domineert het lijnspectrum, bij toenemende temperatuur gaat het lijnspectrum geleidelijk over in continuümstraling. In figuur 1.18 is ter illustratie het spectrum gegeven van een 200 A boog in argon.



Figuur 1.17. De boogtemperatuur T als functie van de relatieve afstand r/r_0 tot de as van de boog voor stikstof (getrokken lijn) en voor een mono-atomair gas (stippellijn).



Figuur 1.18. De relatieve stralingsintensiteit I/I_0 als functie van de golflengte λ van een 200 A boog in argon.

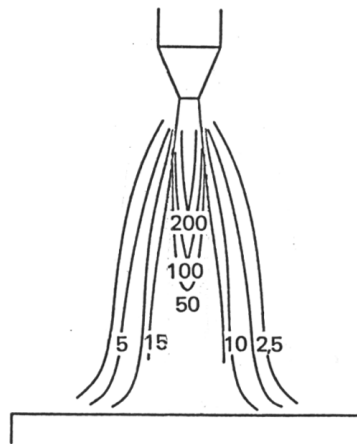
Berekening van de stralingsenergie is in het algemeen een zeer gecompliceerde aangelegenheid. Bij voldoende hoge temperatuur mag echter het lijnspectrum ten opzichte van het continuüm worden verwaarloosd en mag de boogzuil bij benadering worden opgevat als een ‘zwart lichaam’. In dat geval wordt de totale energie die per tijdseenheid per oppervlakte-eenheid wordt uitgestraald, gegeven door de wet van Stefan-Boltzmann:

$$S(T) = cT^4 \quad (1.16)$$

waarin c een constante voorstelt die gelijk is aan $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Uit het voorgaande blijkt dat het aandeel van de stralingsenergie in de energiebalans van de boogzuil in sterke mate afhangt van de temperatuur. In het geval van de lasboog kan dit aandeel oplopen tot waarden in de buurt van 20 à 30%.

Plasmastromingen

Als gevolg van de plaatselijke verschillen in temperatuur en de daarmee samenhangende verschillen in dichtheid zullen in de boogzuil plasmastromingen ontstaan. Daarnaast treedt ook stroming op die wordt veroorzaakt door elektromagnetische krachten; deze stroming wordt meestal als plasmajet aangeduid. De plasmajet is axiaal gericht en vindt zijn oorsprong in het meest gecontraheerde deel van de boogzuil. In het geval van de lasboog is dat het gedeelte van de boogzuil dat zich het dichtst bij de elektrode bevindt. In de plasmajet kunnen stromingssnelheden van meer dan 200 m/s voorkomen (ter vergelijking: windkracht 7 op de schaal van Beaufort komt overeen met 15,5 m/s). De stromingssnelheid heeft een maximale waarde dicht bij de elektrode en neemt snel af bij groter wordende afstand tot de elektrode. Ter illustratie wordt in figuur 1.19 het stromingspatroon gegeven van een 200 A boog in lucht.



Figuur 1.19. Plasmastroming in een 200 A boog in lucht. Aangegeven zijn lijnen met gelijke stromingssnelheid (m/s).

Het verschijnsel van de plasmajet kan worden verklaard met behulp van elektromagnetische (Lorentz-)krachten die in de boogzuil optreden. Dit kan het best

worden toegelicht door de totale elektrische stroom op te vatten als een bundel van elementaire stroompjes. Deze elementaire stroompjes zullen elkaar volgens de wet van Lorentz onderling aantrekken en aldus aanleiding geven tot een drukverhoging. Aangezien de aantrekkende kracht tussen twee elementaire stroompjes omgekeerd evenredig is met hun onderlinge afstand zal de drukverhoging het grootste zijn in het meest gecontraheerde deel van de boog en afnemen met toenemende boogdoorsnede. Het zal duidelijk zijn dat ten gevolge van het aldus veroorzaakte drukverloop plasmastroming kan optreden. Hoewel daarover geen kwantitatieve gegevens beschikbaar zijn, mag worden aangenomen dat de plasmajet (zeker in het geval van de lasboog) een belangrijke rol speelt in de energiebalans van de boogzuil.

1.4. Het kathodevalgebied

Het kathodevalgebied is een zeer dunne laag ($\sim 10^{-8}$ m) die de verbinding vormt tussen de relatief koude kathode en de relatief hete boogzuil.

Het gebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van positieve ruimtelading (een overschot aan positieve ionen), gepaard gaande met een sprongsgewijs verloop van de spanning (zie vergelijking (1.1) en figuur 1.5).

De grootte van de spanningsval ligt in het algemeen tussen 10 en 20 V, de elektrische veldsterkte ter plaatse heeft dus een waarde in de buurt van 10^9 V/m. Een ander belangrijk kenmerk van het kathodevalgebied is de afwezigheid van thermisch evenwicht: vanwege het betrekkelijk gering aantal botsingen is de energie-uitwisseling tussen de diverse deeltjes onvolledig, hetgeen tot gevolg heeft dat

$$T_e \ll T_g \quad (1.17)$$

De belangrijkste taak van de kathode is de emissie van elektronen. Deze elektronen zullen, eenmaal geëmitteerd, onder invloed van het elektrisch veld in de richting van de anode worden getransporteerd.

Een belangrijk mechanisme om elektronen uit de kathode vrij te maken is thermische emissie. Dit mechanisme speelt een dominerende rol bij hoge kathodetemperatuur, bijvoorbeeld in het geval van hoogsmeltende materialen (zoals wolfram) bij hoge stroomsterkte. Voor thermische emissie geldt de formule van Richardson:

$$j_e = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (1.18)$$

waarin j_e de elektronenstroomdichtheid, A een constante (die voor metalen een waarde heeft in de buurt van $6 \times 10^5 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$), T de absolute temperatuur van het materiaal, e de elektrische lading van een elektron, ϕ de uittreepotentiaal, en k de constante van Boltzmann voorstelt. Onder de uittreepotentiaal wordt verstaan de spanningsbarrière die een elektron moet overwinnen om het materiaal te kunnen verlaten. Gebruikelijker is het te spreken in termen van de uittree-arbeid $e\phi$, de arbeid nodig om een elektron uit het materiaal los te maken. In tabel 1.3 is de uittree-arbeid gegeven van enkele metalen.

Tabel 1.3. De uittree-arbeid van enkele metalen.

Metaal	Uittree-arbeid (eV)
Al	4,0
Cu	4,3
Fe	4,4
Ni	5,0
W	4,6

Uit de tabel blijkt dat de uittree-arbeid van metalen in de buurt ligt van 4 à 5 eV. De uittree-arbeid van oxyden ligt in het algemeen aanzienlijk lager (~ 2 eV). Het is om deze reden dat aan wolfram, dat als kathodemateriaal dienst moet doen, vaak een kleine hoeveelheid thoriumoxyde of zirkoonoxyde wordt toegevoegd.

Bij relatief lage kathodetemperatuur, zoals in het geval van laagsmeltende materialen (waaronder staal) en in het geval van hoogsmeltende materialen bij lage stroomsterkte, zullen de vereiste elektronen niet meer (alleen) door thermische emissie kunnen worden geleverd en gaat veldemissie een rol spelen. De theoretische achtergrond van veldemissie is zeer complex en zal hier niet aan de orde komen. Wel moet worden vermeld dat voor veldemissie niet alleen een hoge elektrische veldsterkte, maar ook een hoge stroomdichtheid ($> 10^{10} \text{ Am}^{-2}$) vereist is. Een dergelijke hoge stroomdichtheid kan alleen worden verkregen door contractie van de boog, waardoor het contactvlak tussen boog en kathode zich vernauwt tot de zogenaamde kathodevlek. Deze is in het algemeen zeer instabiel en beweegt zich met grote snelheid over het oppervlak van de kathode. De kathodevlek heeft een sterke voorkeur voor dié plaatsen van het oppervlak waarop zich oxyde bevindt. Hoewel een afdoende verklaring voor dit verschijnsel ontbreekt, is wel duidelijk dat het oxyde een essentiële rol speelt bij de opbouw van de vereiste hoge elektrisch veldsterkte.

Naast thermische emissie en veldemissie kunnen er in het kathodevalgebied ook elektronen (en tegelijk daarmee positieve ionen) worden geproduceerd door ionisatie. De door ionisatie geproduceerde elektronen worden afgegeven in de richting van de zuil, de geproduceerde positieve ionen in de richting van de kathode. Dit mechanisme is van belang in verband met de eis van stroomcontinuïteit tussen het kathodevalgebied en de boogzuil omdat de verhouding elektronenstroom/ionenstroom in beide gebieden in het algemeen ongelijk is.

1.5. Het anodevalgebied

Het anodevalgebied is een zeer dunne laag (10^{-7} m) die de overgang vormt tussen de relatief koude anode en de relatief hete boogzuil.

Het gebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van negatieve ruimtelading (een tekort aan positieve ionen), gepaard gaande met een sprongsgewijs verloop van de spanning (zie vergelijking (1.1) en figuur 1.5). De grootte van de spanningsval ligt in het algemeen tussen 1 en 10 V.

Ook in het anodevalgebied heerst geen thermisch evenwicht. In dit gebied geldt

$$T_e \gg T_g \quad (1.19)$$

Voorts treedt bij relatief lage stroomsterkte (< 40 A) boogcontractie vóór de anode op. De hierdoor gevormde anodevlek verspringt van punt tot punt en draagt bij tot instabiel gedrag van de boog.

De enige taak van de anode is het ontvangen van elektronen. Terwijl de stroom in de boogzuil voor het overgrote deel door elektronen en voor een klein deel door positieve ionen wordt gedragen (zie vergelijking (1.13)) is de stroom vlak voor de anode een pure elektronenstroom, daar de anode niet in staat is positieve ionen te produceren. In het anodevalgebied moet deze schijnbare discontinuïteit dus worden overbrugd. Deze overbrugging kan plaats vinden door ionisatie. De geproduceerde ionen worden daarbij afgegeven in de richting van de boogzuil, de geproduceerde elektronen in de richting van de anode.

1.6. Het ontsteken van de boog

Er zijn verschillende manieren om de boog (vanuit de niet-geleidende toestand bij kamertemperatuur) tot ontsteking te brengen. Essentieel bij al deze manieren is dat de kathode plaatselijk sterk wordt verhit en aldus tot zelfstandige elektronenemissie wordt gebracht. Hieronder worden drie manieren van ontsteken nader toegelicht.

Ontsteking via doorslag

Beschouw twee elektroden die op een afstand d van elkaar zijn geplaatst in een gas van druk p , terwijl tussen de elektroden een elektrische spanning V wordt aangelegd. Zolang zich in de ruimte tussen de elektroden geen ladingsdragers bevinden is en blijft het gas elektrisch niet-geleidend. Deze situatie doet zich echter in werkelijkheid niet voor: er zal altijd wel een elektron, als produkt van de kosmische straling of van het foto-elektrisch effect, aanwezig zijn. Dit elektron zal zich onder invloed van de drijvende kracht, de elektrische veldsterkte $E = V/d$, voortbewegen in de richting van de anode en daarbij botsen met neutrale gasatomen of gasmoleculen. Tussen twee opeenvolgende botsingen zal het elektron uit het veld gemiddeld een energie eEl opnemen, waarbij e de elektrische lading van het elektron en l de vrije weglengte van het elektron in het beschouwde gas voorstelt. Als nu deze energie groter of gelijk is aan de ionisatie-energie E_i van het gas, dan zal het elektron in staat zijn een gasatoom te ioniseren waarbij een extra elektron (en natuurlijk tevens een positief ion) wordt gevormd. Dit proces kan zich nu als een kettingreactie voortzetten en het resultaat is een lawine van elektronen (en positieve ionen). Het aantal elektronen dn dat per volt doorlopen spanning door ionisatie wordt gevormd is evenredig met het aantal aanwezige elektronen n , in formulevorm

$$\frac{dn}{dV} = \alpha n \quad (1.20)$$

waarin α het aantal ionisaties per elektron per volt doorlopen spanning voorstelt. De oplossing van differentiaalvergelijking (1.20) kan geschreven worden als

$$n = e^{\alpha V} \quad (1.21)$$

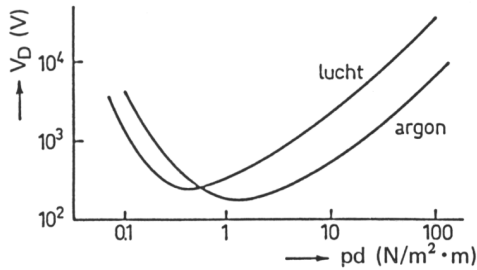
De grootheid $e^{\alpha V}$ is gelijk aan het aantal elektronen per lawine, terwijl het aantal positieve ionen per lawine $e^{\alpha V} - 1$ bedraagt. Deze ionen bewegen zich naar de kathode, worden daar geneutraliseerd en kunnen uit de kathode secundaire elektronen vrij maken, welke laatste op hun beurt weer nieuwe lawines veroorzaken. Naast ionen kunnen ook fotonen secundaire elektronen uit de kathode vrij maken. Als nu γ de totale kans is dat een elektron uit de kathode losgemaakt wordt per ion of foton, dan worden totaal $\gamma(e^{\alpha V} - 1)$ secundaire elektronen gecreëerd. Het is gemakkelijk in te zien dat slechts dán doorslag (exponentiële toename van de stroom) optreedt wanneer

$$\gamma(e^{\alpha V} - 1) \geq 1 \quad (1.22)$$

Wanneer 1 ten opzichte van $e^{\alpha V}$ wordt verwaarloosd kan de spanning V_D waarbij doorslag optreedt worden geschreven als

$$V_D = -\frac{1}{\alpha} \ln \gamma \quad (1.23)$$

De grootheid α is een functie van het product pd en hangt verder natuurlijk van de gassoort af; de waarde van γ hangt af van het kathodemateriaal. Het verband tussen V_D en pd wordt gegeven door de zogenaamde Paschen-kromme. Ter illustratie zijn in figuur 1.20 de Paschen-krommen gegeven voor lucht en voor argon.



Figuur 1.20. Paschenkrommen voor lucht en argon.

Kenmerkend voor de Paschen-kromme is het optreden van een minimum voor een bepaalde waarde van pd . Dit minimum is verklaarbaar door te bedenken dat α relatief klein en dus V_D relatief groot moet worden voor:

- grote waarden van pd , vanwege de relatief kleine vrije weglengte;
- kleine waarden van pd , vanwege het gering aantal mogelijke botsingen.

Bij een tussenwaarde van pd moet dan ergens een minimum liggen. Doorslag gebaseerd op de voorgaande beschouwing wordt naleveringsdoorslag genoemd. Dit ter onderscheiding van ruimteladingsdoorslag, die de inleiding vormt tot vonk en bliksem en hier niet zal worden besproken.

Naleveringsdoorslag leidt tot een Townsend-ontlading. Deze wordt gehandhaafd als er een grote voorschakelweerstand in de elektrische kring is opgenomen. Is dit niet het geval dan kan de Townsend-ontlading zich via de glimontlading tot een boog ontwikkelen. In een dergelijke situatie worden echter wel speciale eisen gesteld aan de voedingsbron: enerzijds is voor de ontsteking een hoge spanning vereist (een spanning die in elk geval hoger is dan de minimale V_D -waarde van de Paschen-kromme en tevens hoger is dan het hoogste punt van de stroom-spanning karakteristiek; zie figuur 1.1), anderzijds moet direct na de ontsteking continu een hoge stroom bij lage spanning worden geleverd. Aan deze eisen kan worden

voldaan door over de spanning van een ‘normale lasstroombron’ (lage spanning, hoge stroom) ten behoeve van de ontsteking een spanningspiek te superponeren. Bij gebruik van gelijkstroom is één piek aan het begin voldoende, bij gebruik van wisselstroom is een piekfrequentie van 100 Hz (afwisselend positief en negatief) vereist om de boog in stand te houden.

Ontsteking door directe kathodeverhitting

Een andere manier om de boog te ontsteken is directe verhitting van de kathode. In dit geval zullen de elektronen die nodig zijn in de beginfase van de ontsteking, geproduceerd worden door thermische emissie van de kathode. Deze elektronen zullen door de boogspanning worden versneld, neutrale atomen of moleculen ioniseren en aldus een stationaire boog tot stand brengen. Een heel praktische manier om de kathode te verhitten is de werkwijze, waarbij de elektroden met elkaar in contact worden gebracht en vervolgens weer worden teruggetrokken. Tijdens de kortsluitperiode zal er door de elektroden een hoge stroom gaan lopen, die vooral het contactvlak vanwege de grote overgangsweerstand sterk zal verhitten. Hierdoor zal het metaal plaatselijk smelten en zal er een brug van vloeibaar metaal tussen de elektroden ontstaan. Bij het terugtrekken van de elektrode(n) zal de vloeistofbrug zich vernauwen waardoor de verhitting zich op een steeds kleiner wordend gebied zal concentreren. Tenslotte wordt het contact verbroken, resulterend in een kathode (en anode) van plaatselijk zeer hoge temperatuur.

Een nadeel van ontsteken door middel van kortsluiten is contaminatie (en mogelijke beschadiging) van de elektrode(n). De methode kan echter zonder bezwaar worden toegepast bij het booglassen met afsmeltende elektrode.

Hoogfrequent-ontsteking

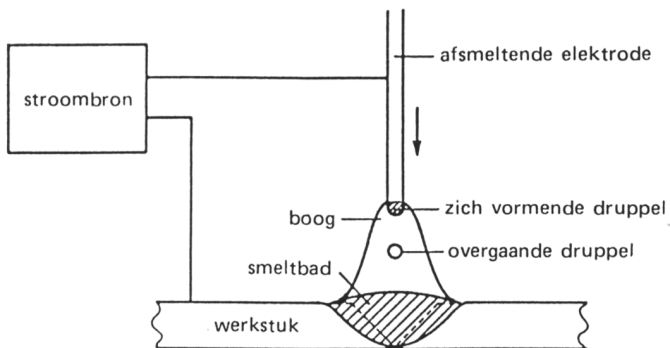
Bij deze methode wordt een hoogfrequente spanning (enkele MHz, enkele kV) over de boogspanning gesuperponeerd. Vanwege de zeer hoge frequentie zullen de aanwezige elektronen heen en weer worden geslingerd zonder de elektroden te bereiken. Als gevolg hiervan zullen door ionisatie in korte tijd zeer veel ladingsdragers worden gevormd. Onder invloed van de boogspanning zullen de elektronen naar de anode en de positieve ionen naar de kathode worden getransporteerd. Door het botsen van de positieve ionen tegen de kathode zal deze zeer sterk worden verhit en zal thermische emissie een rol gaan spelen, waardoor tenslotte een stationaire boog kan ontstaan.

1.7. Het booglasproces

De boog is op grond van zijn eigenschappen uitermate geschikt om te worden toegepast als warmtebron bij het booglassen.

Het principe van booglassen is schematisch weergegeven in figuur 1.21. Tussen een metalen elektrode, die afsmeltend (zoals in figuur 1.21) of niet-afsmeltend kan zijn, en het te lassen werkstuk (bijvoorbeeld twee platen die met elkaar verbonden moeten worden) wordt een elektrische boog (de lasboog) ontstoken. De afstand tussen de elektrode en het werkstuk (de booglengte) ligt meestal tussen 0,1 en 1 cm. De elektrische stroom kan worden geleverd door een transformator (in geval van lassen met wisselstroom) of een gelijkrichter (in geval van lassen met gelijkstroom).

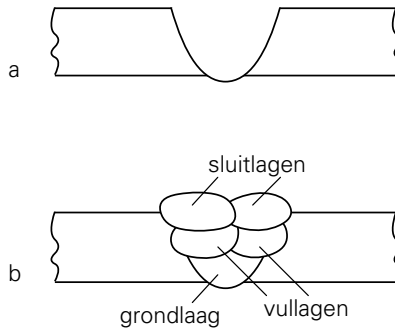
Door de in de lasboog geproduceerde elektrische energie zal het werkstuk worden opgewarmd en gedeeltelijk smelten, waardoor een smeltbad (lasbad) ontstaat. Bij gebruik van een afsmeltende elektrode zal ook gesmolten elektrodemateriaal via druppels in het smeltbad terechtkomen. Door nu de elektrode langs de lasnaad te bewegen (en in het geval van de afsmeltende elektrode tevens naar beneden om het afsmelten te compenseren) wordt de lasnaad met vloeibaar materiaal gevuld. Het vloeibare metaal zal vervolgens afkoelen en stollen. Aldus ontstaat tenslotte de gewenste lasverbinding.



Figuur 1.21. Principe van het booglassen.

Bij het booglassen kunnen verschillende lastypen worden onderscheiden. De meest voorkomende lastypen zijn schematisch weergegeven in Appendix A.

Wat de opbouw van de las betreft moet onderscheid gemaakt worden tussen een éénlagenlas en een meerlagenlas, waarbij in gedachte moet worden gehouden dat een laslaag in het algemeen een maximale dikte heeft van 3 à 4 mm. Een voorbeeld van een éénlagenlas en van een meerlagenlas is gegeven in figuur 1.22.



Figuur 1.22. Schematische weergave van a) een éénlagenlas en b) een meerlagenlas.

Voorts moet worden opgemerkt dat bij het realiseren van een lasverbinding de voorbereiding van het werkstuk (de naadvorm) een belangrijke rol speelt, terwijl ook de laspositie, in verband met de werking van de zwaartekracht, een grote invloed kan hebben. Voor een overzicht van de belangrijkste naadvormen en lasposities (met hun codering) wordt verwezen naar respectievelijk Appendix B en Appendix C.

Van het booglasproces worden in de praktijk vooral de volgende varianten toegepast:

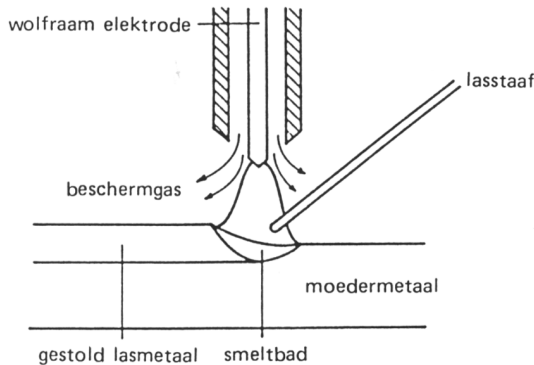
- TIG-lassen;
- Plasma-lassen;
- Lassen met beklede elektrode (handlassen);
- MIG/MAG-lassen;
- Onder poeder lassen.

TIG-lassen

TIG is de afkorting van Tungsten Inert Gas.

Bij het TIG-lassen (figuur 1.23) wordt een wolfram-elektrode als niet-afsmeltende elektrode gebruikt. Meestal is aan het wolfram 1–2% thoriumoxyde (ThO_2) of zirconiumoxyde (ZrO_2) toegevoegd om de elektronenemissie te bevorderen. Verhoogde elektronenemissie leidt tot stabilisering van de boog, verbetering van de ontsteking en vermindering van elektrode-erosie. Om de elektrode en het vloeibare metaal van de omringende lucht af te schermen, wordt gebruik gemaakt van inert gas (meestal argon, soms ook helium of een argon-helium mengsel). Dit gas wordt via een mondstuk, dat concentrisch om de elektrode is geplaatst, langs de boog en het vloeibare metaal gevoerd. Indien gewenst kan met de hand of automatisch

toevoegmateriaal in de vorm van een draad of staaf worden toegevoerd. Omdat contact tussen elektrode en werkstuk bij het TIG-lassen moet worden vermeden, wordt voor het (her-)ontsteken gebruik gemaakt van een hoogfrequentvoorziening.



Figuur 1.23. TIG-lassen.

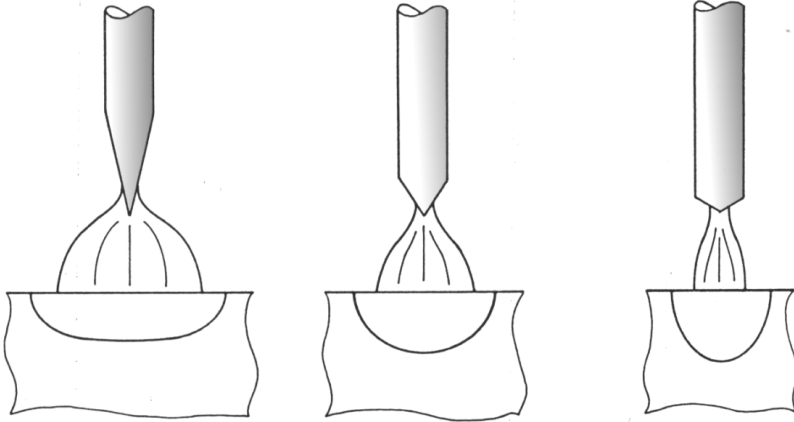
TIG-lassen is in principe mogelijk voor alle metalen. Het proces is vooral geschikt voor dun plaatmateriaal en metalen onderdelen van kleine afmetingen. (precisiewerk). Ook wordt TIG-lassen veelvuldig toegepast voor het leggen van de grondlaag in geval van een meergelasma.

Bij het TIG-lassen wordt meestal gebruik gemaakt van gelijkstroom (elektrode negatief; bij elektrode positief zou de elektrode te heet worden – zie paragraaf 1.8). Wanneer aluminium wordt gelast met zuiver argon als beschermgas moet wisselstroom worden gebruikt in verband met de aanwezigheid van een ondoordringbare oxydehuid op het vloeibare metaal; bij gebruik van helium of een heliumrijk argon-helium mengsel is lassen met gelijkstroom (elektrode negatief) echter wel weer mogelijk.

Soms wordt bij het TIG-lassen gebruik gemaakt van pulserende (gelijk)stroom met een puls frequentie in de buurt van 1–10 Hz. Het voordeel van pulserende lasstroom is dat de boog wordt gestabiliseerd, terwijl daarnaast een grotere penetratiediepte van de las wordt verkregen.

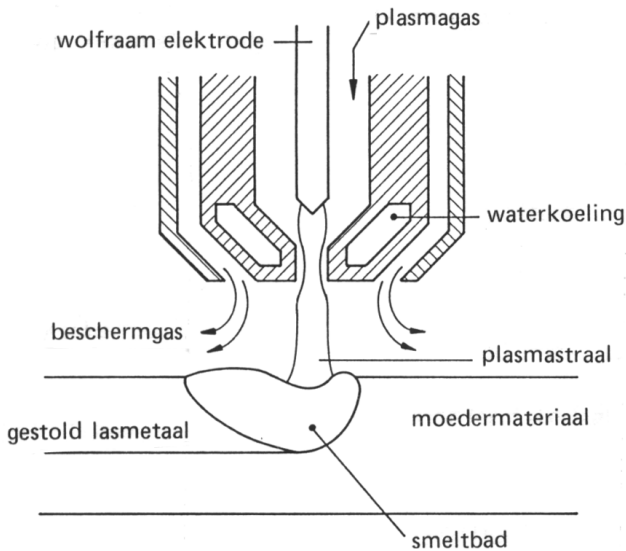
De vorm van de boog en (in directe relatie daarmee) de vorm van het smeltbad worden in sterke mate bepaald door de tophoek van de elektrode.

Algemeen geldt: hoe kleiner de tophoek, hoe wijder de boog en hoe breder en ondieper het smeltbad. Dit wordt geïllustreerd in figuur 1.24.



Figuur 1.24. De invloed van de tophoek van de elektrode op de vorm van de boog en het smeltbad.

Plasma-lassen

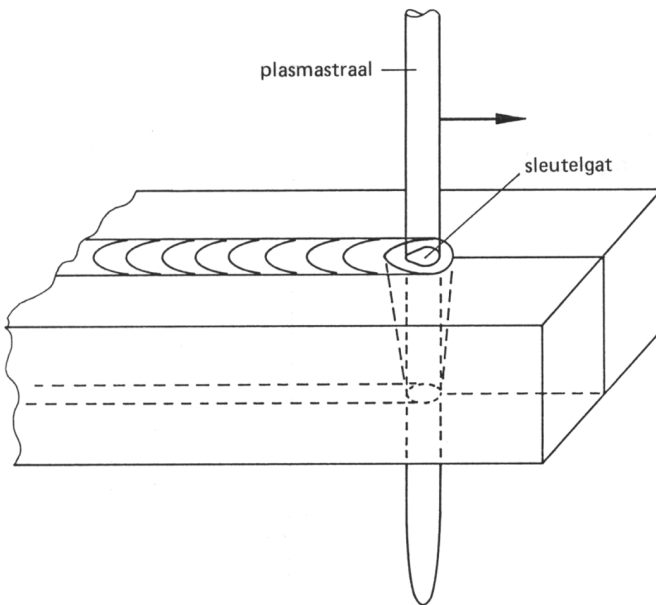


Figuur 1.25. Plasma-lassen.

Plasma-lassen (figuur 1.25) is te beschouwen als een verfijning van het TIG-lassen. Ook hier bestaat de elektrode uit wolfram (met thoriumoxyde of zirconiumoxyde) en wordt een inert gas (argon, helium of een argon-helium mengsel) om de elektrode geleid. Bij het plasma-lassen wordt echter de boog die tussen de elektrode

en het werkstuk ontstaat door een watergekoeld mondstuk vernauwd. Hierdoor ontstaat een zeer energiedichte plasmastraal. Om de plasmastraal en het smeltbad tegen atmosferische invloed te beschermen wordt gebruik gemaakt van een extra gasstroom (argon, helium, argon-helium of argon-waterstof). Vanwege de hoge temperatuur van de plasmastraal (tot 25 000 K) kunnen materialen met een zeer hoog smeltpunt tot smelten worden gebracht.

Een speciale werkwijze die bij het plasma-lassen kan worden toegepast is de sleutelgat-methode (keyhole technique), zie figuur 1.26. Met deze methode kan in dikkere platen een goede doorlassing worden verkregen. De plasmastraal smelt een gat in de tegen elkaar geplaatste platen en bij het voortlopen blijft dit gat ten gevolge van de oppervlaktespanning van het vloeibare metaal gehandhaafd (het vloeibare metaal stroomt rondom het gat van voren naar achteren). De situatie is vergelijkbaar met het trekken van een draad door een ijsblok.



Figuur 1.26. De sleutelgat-methode.

Wanneer de boogstroom loopt van elektrode naar werkstuk (zoals hier beschreven) spreekt men van een overdragende boog. Het is ook mogelijk de boogstroom te laten lopen tussen elektrode en mondstuk. Er ontstaat dan een 'vrije' plasmastraal en men spreekt in dit geval van een niet-overdragende boog. Een voordeel van de

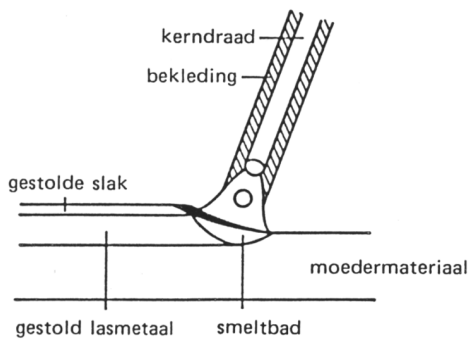
niet-overdragende boog is dat er ook elektrisch niet-geleidende materialen mee kunnen worden gelast of gesmolten.

Lassen met beklede elektrode

Bij deze variant van het booglasproces (figuur 1.27) wordt een afsmeltende elektrode gebruikt, bestaande uit een metalen kerndraad (lengte 350 mm of 450 mm, diameter tussen 1,6 mm en 7 mm) waaromheen een bekleding is aangebracht. Deze bekleding bevat een aantal stoffen die elk een specifieke functie hebben. De belangrijkste functies van de bekleding zijn:

- het richten van boog en druppels op het lasbad (door middel van kelkvorming);
- het leveren van een beschermend gas (bijvoorbeeld CO₂ uit carbonaten);
- het produceren van slak ter bescherming van het vloeibare metaal;
- het stabiliseren van de boog;
- het legeren van het lasmetaal;
- het verhogen van het neersmeltrendement (door toevoeging van metaalpoeder).

Extra gasbescherming is bij het lassen met beklede elektrode niet nodig omdat bescherming van het vloeibare metaal al wordt verzorgd vanuit de bekleding (gas en slak).



Figuur 1.27. Lassen met beklede elektrode.

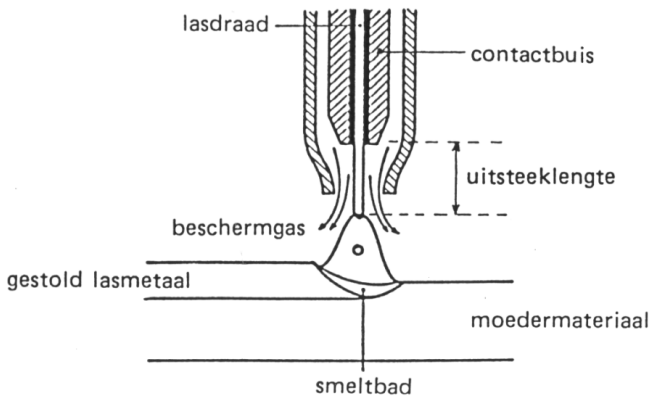
Een probleem bij het lassen met beklede elektrode is de mogelijke opname van relatief grote hoeveelheden waterstof door het lasmetaal. Deze waterstof is afkomstig van water dat gemakkelijk door de hygroscopische elektrodebekleding kan worden geabsorbeerd en bij het lassen vrijkomt in de boog. Drooghouden (of opnieuw drogen voor gebruik) van beklede laselektroden is dus in het algemeen een vereiste.

Afhankelijk van het elektrodetype wordt bij het lassen met beklede elektrode gebruik gemaakt van wisselstroom of van gelijkstroom (elektrode positief of elektrode negatief). Lassen met beklede elektrode is de oudste variant van het booglasproces en wordt nog steeds op zeer grote schaal toegepast bij staal en in (veel) mindere mate bij nikkel- en koperlegeringen. Het is een flexibel proces en er bestaat een grote verscheidenheid aan elektroden voor verschillende legeringen, materiaaldikten en lasposities. Daartegenover staat echter het nadeel dat het proces nauwelijks is te mechaniseren en te automatiseren, hoewel het zwaartekrachtlassen een poging in deze richting is te noemen.

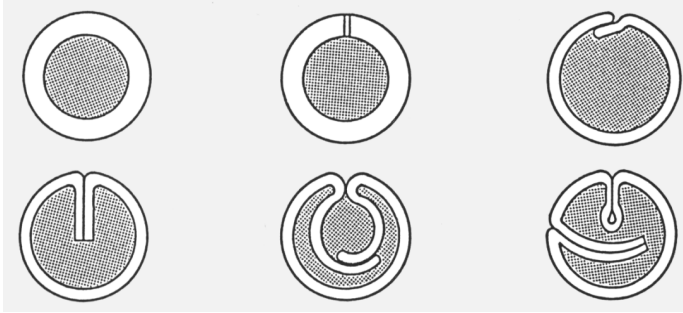
MIG/MAG-lassen

MIG en MAG zijn afkortingen van Metal Inert Gas en Metal Active Gas. Bij het MIG/MAG-lassen (figuur 1.28) wordt gebruik gemaakt van een afsmeltende elektrode in de vorm van een continu toegevoerde draad. Dit kan een massieve draad zijn of een gevulde draad bestaande uit een metalen omhulsel en een poedervormige vulling. Enkele voorbeelden van de gevulde draad in doorsnede zijn gegeven in figuur 1.29. De gevulde draad heeft als voordeel dat de chemische samenstelling via de poedervormige vulling gemakkelijk gevarieerd kan worden.

De stroomoverdracht naar de elektrode vindt plaats via de contactbuis. Het stroomvoerende gedeelte van de draad (uitsteeklengte) is daardoor relatief kort, zodat ondanks de kleine diameter van de draad toch met hoge stroomsterkte kan worden gelast (bijvoorbeeld tot 300 A bij een draad van 1,2 mm diameter).



Figuur 1.28. MIG/MAG-lassen.



Figuur 1.29. Voorbeelden van de gevulde draad in doorsnede.

Op basis van het gebruikte beschermgas wordt onderscheid gemaakt tussen MIG-lassen en MAG-lassen. Bij het MIG-lassen wordt een inert gas (argon, helium of een argon-helium mengsel) als beschermgas gebruikt, terwijl bij het MAG-lassen een inert gas (meestal argon) wordt toegepast waaraan een kleine hoeveelheid zuurstof en/of CO_2 is toegevoegd. Door de toevoeging van zuurstof of CO_2 wordt de boog gestabiliseerd en krijgt het gesmolten lasmetaal betere vloeieigenschappen.

Een bijzondere vorm van MAG-lassen is het CO_2 -lassen, waarbij zuivere CO_2 als beschermgas wordt gebruikt. In verband met de oxyderende werking van zuurstof en CO_2 worden bij het MAG-lassen meestal bepaalde des-oxyderende stoffen aan de lasdraad toegevoegd.

In het algemeen geldt dat het MIG-proces wordt toegepast voor het lassen van non-ferro metalen en het MAG-proces voor het lassen van staal. In tabel 1.4 zijn de meest toegepaste beschermgassen vermeld.

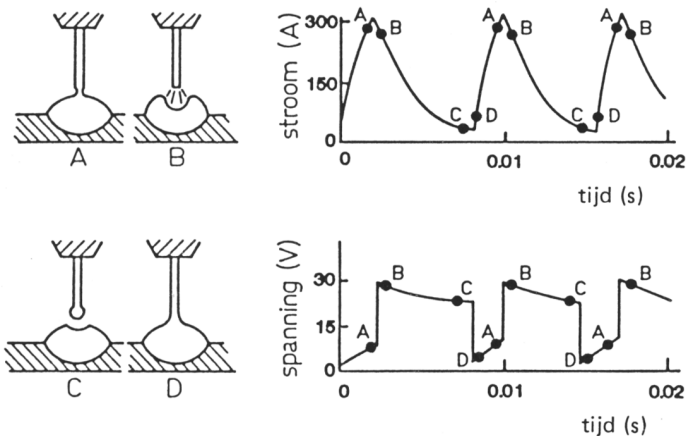
In dit kader moet melding worden gemaakt van de zogenaamde luchtlasdraad. Dit is een gevulde draad waarvan de vulling onder meer stoffen bevat die bij hoge temperatuur ontleden. Bij deze ontleding ontstaan beschermende gassen, bijvoorbeeld CO_2 . Met een luchtlasdraad kan dus zonder (extern) beschermgas worden gelast.

Bij het MIG/MAG-lassen moet onderscheid worden gemaakt tussen het normale open-boog lassen en het kortsluitbooglassen. In het geval van open-boog lassen brandt de boog continu en treden er geen kortsluitingen op tussen elektrode en werkstuk. Bij het kortsluitbooglassen vindt het materiaaltransport via kortsluitingen plaats en wordt de boog periodiek gedoofd. Kortsluitbooglassen is slechts mogelijk bij relatief lage waarden van stroom en spanning. In figuur 1.30 wordt het verloop van stroom en spanning bij het kortsluitbooglassen schematisch weergegeven.

Vanwege het relatief kleine lasbad wordt kortsluitbooglassen vooral toegepast bij het lassen van dun (plaat-) materiaal; ook kan gelast worden in alle posities. Als nadeel moet genoemd worden het gevaar voor bindingsfouten ten gevolge van de geringe warmte-inbreng in het werkstuk (zie paragraaf 5.7) en het optreden van spatten.

Tabel 1.4. Toegepaste beschermgassen bij het MIG/MAG-lassen.

beschermgas	materiaal	opmerkingen
Ar	non-ferro metalen	stabiele boog
He	non-ferro metalen	minder stabiele, hetere boog; geschikt voor grotere materiaaldikte
Ar + 1 à 2% O ₂	hittebestendig en roestvast staal	dun vloeibaar smeltbad
Ar + 2 à 3% CO ₂	hittebestendig en roestvast staal	dik vloeibaar smeltbad
Ar + 5-20% CO ₂	ongelegeerd en laaggelegeerd staal	relatief stabiele boog; hoe meer CO ₂ , hoe dieper de inbranding
CO ₂	ongelegeerd en laaggelegeerd staal	instabiele boog; spatten



Figuur 1.30. Het verloop van stroom en spanning bij kortsluitbooglassen.

Het MIG/MAG-lassen heeft een groot (zich ten koste van het lassen met beklede elektrode uitbreidend) toepassingsgebied. Een groot voordeel is dat het proces is te mechaniseren en te automatiseren.

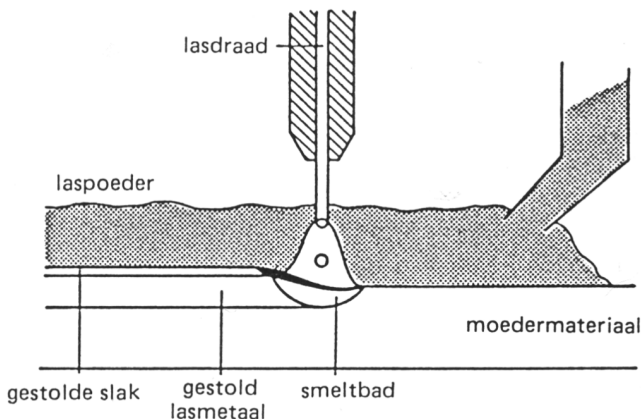
Bij het MIG/MAG-lassen wordt altijd gebruik gemaakt van gelijkstroom (elektrode positief). Dit houdt direct verband met de wijze waarop het materiaaltransport plaats vindt (zie paragraaf 1.9).

Onder poeder lassen

Bij het onder poeder lassen (figuur 1.31) wordt gebruik gemaakt van een afsmeltende elektrode in de vorm van een draad (massief of gevuld) of een strip. De boog wordt geheel omgeven door een poeder (flux), waarvan de functie vergelijkbaar is met die van de bekleding van een handlaselektrode. Een voordeel van dit proces is dat zeer hoge stroomsterkten kunnen worden toegepast. Een nadeel is dat alleen in een horizontaal vlak (onder de hand) kan worden gelast.

Het onder poeder lassen wordt vooral toegepast voor het lassen van dikke plaat, voor het lassen van langsnaden bij de pijpenfabricage en voor het aanbrengen van metalen deklagen (cladding).

Gebruik kan worden gemaakt van wisselstroom of van gelijkstroom (elektrode positief of elektrode negatief).



Figuur 1.31. Onder poeder lassen.

1.8. Warmtetransport bij het booglassen

Eén van de belangrijkste eigenschappen van de boog is het niet-lineaire spanningsverloop (zie paragraaf 1.2). Hierdoor komt een onevenredig groot gedeelte van de

totale boogenergie ten goede aan de kathode en de anode. Het is met name deze eigenschap die de boog zo geschikt maakt als warmtebron bij het lassen.

De hoeveelheid warmte die bij het lassen per tijdseenheid in de kathode en de anode wordt geproduceerd kan worden berekend met behulp van de energiebalans. Voor de kathode en onmiddellijke omgeving (kathodevalgebied) geldt de energiebalans

$$V_k I + c_k V_z I = \phi_k I + \frac{3}{2} \frac{k(T_z - T_k)}{e} I + Q_k \quad (1.24)$$

waarbij links van het gelijkteken de per tijdseenheid geproduceerde energie en rechts van het gelijkteken de per tijdseenheid afgevoerde energie staat aangegeven.

De term $V_k I$ stelt de energie voor die in het kathodevalgebied wordt geproduceerd, $c_k V_z I$ is de fractie van de in de boogzuil geproduceerde energie die (via warmtegeleiding, convection en straling) ten goede komt aan de kathode, $\phi_k I$ is de energie die nodig is om de elektronen uit de kathode los te maken (ϕ_k is de uittree-potentiaal), de term $\frac{3}{2} k(T_z - T_k)I/e$ is de energie die nodig is om de elektronen van kathodetemperatuur T_k op zuiltemperatuur T_z te brengen ($\frac{3}{2} k\Delta T$ per elektron) en Q_k is de energie die per saldo voor verwarming van de kathode beschikbaar blijft.

Voor de anode en onmiddellijke omgeving (anodevalgebied) geldt de energiebalans

$$V_a I + c_a V_z I + \phi_a I + \frac{3}{2} \frac{k(T_z - T_a)}{e} I = Q_a \quad (1.25)$$

waarin de diverse termen een overeenkomstige betekenis hebben als hierboven aangegeven.

Het verschil met vergelijking (1.24) is dat nu de uittree-energie en de thermische energie van de elektronen als positieve termen (links van het gelijkteken) voorkomen. Op basis van de vergelijkingen (1.24) en (1.25) kan worden geconcludeerd dat Q_k en Q_a evenredig zijn met de stroomsterkte en slechts in geringe mate (namelijk alleen via de term $c_k V_z I$ respectievelijk $c_a V_z I$) van de totale boogspanning afhangen. Voorts blijkt uit deze vergelijkingen dat in het algemeen zal gelden dat $Q_a > Q_k$, dat wil zeggen aan de anode wordt meer warmte afgegeven dan aan de kathode. De situatie $Q_a < Q_k$ kan zich echter ook voordoen. Daarvoor is vereist dat V_k relatief groot en/of V_a relatief klein is. Meer specifiek geldt dat, aangezien de som van de uittree-energie en de thermische energie van de elektronen van de orde van 5 V is, $Q_a < Q_k$ als $V_k - V_a > 10$ V.

Een belangrijke grootheid bij het booglassen is het procesrendement η_p . Hieronder wordt verstaan het gedeelte van de totale boogenergie dat ten goede komt aan het werkstuk (direct of via de afsmeltende elektrode).

Er geldt:

- voor het lassen met een niet-afsmeltende elektrode (gelijkstroom, elektrode positief)

$$\eta_p = \frac{Q_k}{VI} \times 100\% \quad (1.26)$$

- voor het lassen met een niet-afsmeltende elektrode (gelijkstroom, elektrode negatief)

$$\eta_p = \frac{Q_a}{VI} \times 100\% \quad (1.27)$$

- voor het lassen met een niet-afsmeltende elektrode (wisselstroom)

$$\eta_p = \frac{Q_k + Q_a}{2VI} \times 100\% \quad (1.28)$$

- voor het lassen met een afsmeltende elektrode (gelijkstroom en wisselstroom)

$$\eta_p = \frac{Q_k + Q_a}{VI} \times 100\% \quad (1.29)$$

Typische waarden van η_p voor de belangrijkste varianten van het booglasproces zijn in tabel 1.5 weergegeven.

Tabel 1.5. Het procesrendement η_p voor enkele varianten van het booglasproces.

Booglasproces	η_p (%)
TIG-lassen (elektrode negatief)	50–80
TIG-lassen (elektrode positief)	40–70
Plasma-lassen	50–80
Lassen met beklede elektrode	70–90
MIG/MAG-lassen	60–90
Onder poeder lassen	90–100

Onder het smeltrendement η_s wordt verstaan het gedeelte van de totale boogenergie dat minimaal vereist is voor het opwarmen en smelten van het metaal. Het smeltrendement kan worden benaderd met behulp van de vergelijking

$$\eta_s = \frac{qAv}{VI} \quad (1.30)$$

waarin q de hoeveelheid warmte voorstelt die nodig is om een volume-eenheid van

het metaal vanaf kamertemperatuur op te warmen en te smelten, A het oppervlak van de lasdoorsnede en v de voortloopsnelheid (dat wil zeggen de snelheid van de lasboog ten opzichte van het werkstuk).

Het blijkt dat het smeltrendement toeneemt met de energiedichtheid van de boog. Hoe groter namelijk de energiedichtheid des te sneller vindt verwarming plaats en des te minder warmte zal, zonder eerst voor smelten gebruikt te zijn, door warmtegeleiding verdwijnen.

In tabel 1.6 zijn het smeltrendement en de energiedichtheid gegeven voor het booglasproces en enkele andere lasprocessen.

Een andere belangrijke grootheid bij het booglassen is de warmte-inbreng. Deze bepaalt de piektemperatuur en de afkoelsnelheid in en rondom de las en beïnvloedt aldus de structuur en de eigenschappen van de lasverbinding (zie paragraaf 5.1).

De warmte-inbreng W wordt gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die per lengte-eenheid van de las aan het werkstuk wordt overgedragen en kan worden geschreven als

$$W = \frac{\eta_p VI}{v} \quad (1.31)$$

De waarde van W ligt meestal in de buurt van enkele kJ/mm.

Tabel 1.6. Het smeltrendement η_s en de energiedichtheid van enkele lasprocessen.

Lasproces	η_s (%)	Energiedichtheid (MW/m ²)
Autogeen lassen	2–10	$10 - 10^2$
Booglassen met afsmeltende elektrode	30–50	$10^2 - 10^3$
TIG-lassen	20–40	$10^2 - 10^3$
Plasma-lassen	40–60	$10^3 - 10^4$
Laser lassen	90–100	$10^4 - 10^5$
Elektronenstraal lassen	90–100	$10^6 - 10^7$

Opgemerkt moet worden dat in deze paragraaf geen rekening is gehouden met Joule-verwarming van de kathode en de anode. Dit effect komt bij de bespreking van de neersmeltsnelheid aan de orde (zie paragraaf 1.10).

1.9. Materiaaltransport bij het booglassen

Bij het booglassen met afsmeltende elektrode (beklede elektrode, massieve draad, gevulde draad) zal het elektrodemateriaal door de overgedragen warmte tot smelten

worden gebracht. Aan het einde van de elektrode zal zich ten gevolge hiervan een druppel vormen die onder invloed van verschillende krachten zal worden afgesplitst en naar het smeltbad zal worden getransporteerd.

Bij dit proces spelen de volgende krachten een rol:

– *Zwaartekracht*

De zwaartekracht zal afsplitsing van de druppel bevorderen dan wel tegengaan, afhankelijk van de stand van de elektrode.

– *Oppervlaktespanning*

De oppervlaktespanning zal, in verband met het streven naar minimale oppervlakte-energie, druppelafplitsing onder alle omstandigheden tegengaan.

– *Explosieve krachten*

Explosieve krachten zijn het gevolg van gasontwikkeling in de druppel en kunnen leiden tot afsplitsing van vloeibare metaaldeeltjes in allerlei richtingen. Een voorbeeld van gasontwikkeling in het vloeibare metaal is de vorming van CO in ongelegeerd staal ten gevolge van de opname van zuurstof.

– *Zuigkracht ten gevolge van plasmastroming*

Zoals uit paragraaf 1.3 bleek, treedt er in de lasboog plasmastroming op. Deze plasmastroming zal een aanzuigende werking op de druppel uitoefenen en aldus druppelafplitsing bevorderen.

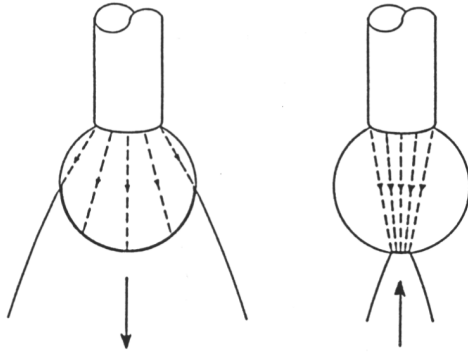
– *Lorentzkracht*

Ten gevolge van het verloop van de stroomdichtheid in de druppel zal er op de druppel een elektromagnetische kracht (Lorentzkracht) werken. Deze kracht heeft dezelfde oorsprong als de kracht die de plasmajet veroorzaakt (zie paragraaf 1.3) en kan geschreven worden als

$$F_L = C \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \quad (1.32)$$

waarin C een factor voorstelt die bepaald wordt door het stroomdichtheidsverloop. Bij divergentie van de stroom (als het aanrakingsvlak tussen boog en druppel groter is dan de doorsnede van de elektrode) is C positief en zal druppelafplitsing worden bevorderd. Bij convergentie van de stroom (als het aanrakingsvlak tussen boog en druppel kleiner is dan de doorsnede van de elektrode) is C negatief en zal druppelafplitsing worden tegengewerkt. De situatie is in vereenvoudigde vorm weergegeven in figuur 1.32.

De bovengenoemde krachten hangen voor wat betreft grootte en richting af van de lasomstandigheden. Ze bepalen in combinatie het materiaaltransport, dat wil zeggen de grootte en vorm van de druppels en de regelmaat van de druppelovergang.



Figuur 1.32. De Lorentzkracht werkend op een metaaldruppel. Links: stroomdivergentie; rechts: stroomconvergentie.

Uit onderzoek is gebleken dat er onderscheid kan worden gemaakt tussen verschillende typen druppelovergang. Deze zijn door het International Institute of Welding (IIW) geassocieerd als gegeven in tabel 1.7 en figuur 1.33.

In het nu volgende zal een overzicht worden gegeven van de wijze waarop het materiaaltransport plaats vindt bij het MIG/MAG-lassen, het lassen met beklede elektrode en het onder poeder lassen.

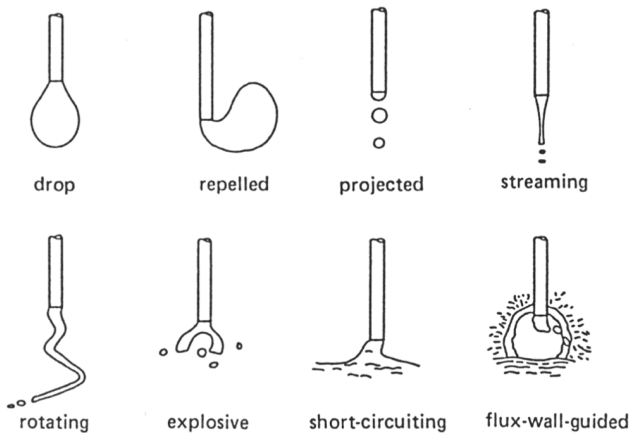
MIG/MAG-lassen

Het materiaaltransport bij het MIG/MAG-lassen is sterk afhankelijk van het beschermgas, de polariteit en de stroomsterkte.

Wanneer gelast wordt in een argonrijk beschermgas met de elektrode als positieve pool en relatief lage stroomsterkte, vindt druppelovergang van de elektrode naar het smeltbad plaats in de vorm van 'drop transfer' (grote druppels met een diameter enkele malen groter dan de diameter van de elektrode, druppelfrequentie: enkele per seconde). Bij verhoging van de stroomsterkte vindt bij een bepaalde grenswaarde (de kritische stroomsterkte) een tamelijk abrupte verandering van het materiaaltransport plaats. Boven deze kritische stroomsterkte gaan de druppels over in de vorm van 'projected transfer' (een regelmatige stroom van gerichte druppels met een diameter ongeveer gelijk aan de diameter van de elektrode, druppelfrequentie: enkele honderden per seconde).

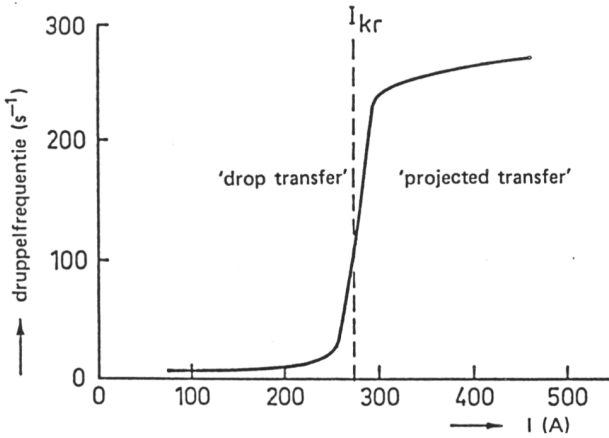
Tabel 1.7. IIW-classificatie van materiaaltransport^{*)}.

Designation of transfer type	Welding processes (examples)
1. Free flight transfer	
1.1. Globular	
1.1.1. Drop	Low-current GMA
1.1.2. Repelled	CO ₂ shielded GMA
1.2. Spray	
1.2.1. Projected	Intermediate-current GMA
1.2.2. Streaming	Medium-current GMA
1.2.3. Rotating	High-current GMA
1.3. Explosive	SMA (coated electrodes)
2. Bridging transfer	
2.1. Short-circuiting	Short-arc GMA, SMA
2.2. Bridging without interruption	Welding with filler wire addition
3. Slag-protected transfer	
3.1. Flux-wall guided	SAW
3.2. Other modes	SMA, cored wire, electroslag



Figuur 1.33. De verschillende typen druppelovergang volgens de classificatie van het International Institute of Welding.

^{*)} Om verwarring te voorkomen is de classificatie in onvertaalde vorm overgenomen.
 – GMA (Gas Metal Arc) is de Engelse term voor MIG/MAG lassen.
 – SMA (Shielded Metal Arc) is de Engelse term voor lassen met beklede elektrode,
 – SAW (Submerged Arc Welding) is de Engelse term voor onder poeder lassen.



Figuur 1.34. De druppelfrequentie als functie van de stroomsterkte bij het MIG-lassen in argon met 1,6 mm staaldraad als elektrode.

De kritische stroomsterkte is afhankelijk van het elektrodemateriaal en van de diameter van de elektrode en heeft bijvoorbeeld voor 1,6 mm staaldraad een waarde van ongeveer 275 A (zie figuur 1.34).

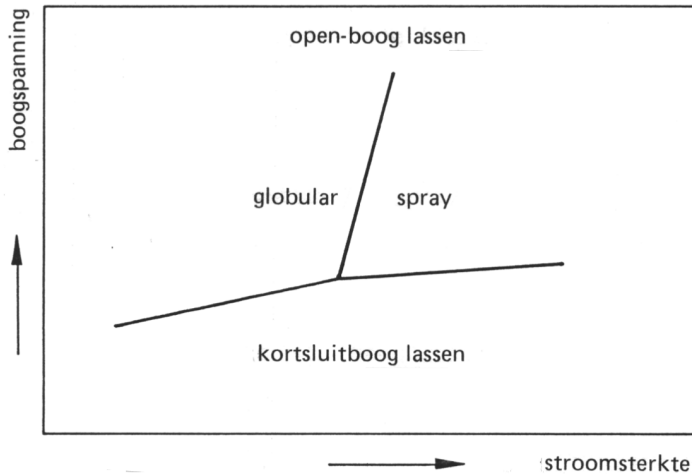
Bij verder verhogen van de stroomsterkte gaat 'projected transfer' over in 'streaming transfer' (een gerichte sproeiregen van zeer fijne druppeltjes), terwijl bij nog hogere stroomsterkte 'streaming transfer' weer overgaat in 'rotating transfer' (een spiraal van vloeibaar metaal).

In figuur 1.35 is globaal aangegeven onder welke lasomstandigheden (boogspanning, stroomsterkte) de verschillende vormen van materiaaltransport optreden. De drie gebieden die in deze figuur te onderscheiden zijn worden vaak aangeduid als MIG/MAG werkgebieden.

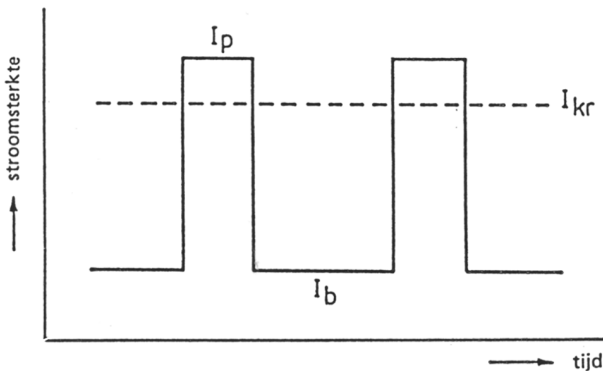
Om bij relatief lage stroomsterkte (beneden de kritische waarde) toch materiaaltransport in de vorm van 'projected transfer' (in plaats van 'drop transfer') te laten plaatsvinden, kan gebruik worden gemaakt van stroompulsen. Het principe van pulserend lassen is in figuur 1.36 schematisch weergegeven en berust op het feit dat de stroom periodiek gedurende een korte tijd boven de kritische stroomsterkte wordt gebracht. De frequentie en pulsduur worden in het algemeen zodanig gekozen dat per puls één druppel wordt afgesplitst.

Bij het lassen in een argonrijk beschermgas met de elektrode als negatieve pool is de boog onder alle omstandigheden instabiel, terwijl de druppelovergang zeer onregelmatig is met grove druppels en veel spatten ('repelled transfer'). De oorzaak van dit gedrag houdt verband met het optreden van stroomconvergentie in

de druppel als gevolg van het kleine aanrakingsvlak tussen boog en druppel (kathodevlek). Door de stroomconvergentie ontstaat een Lorentzkracht waarvan de richting afhangt van de plaats van de kathodevlek (zie figuur 1.32). Het is duidelijk dat deze Lorentzkracht de druppelafsplitsing tegenwerkt en het optreden van spatten bevordert.



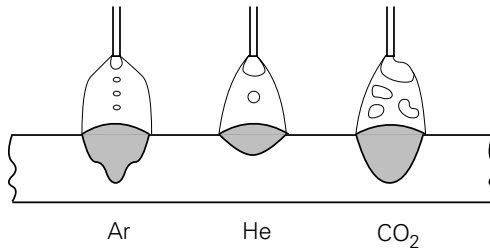
Figuur 1.35. MIG/MAG werkgebieden.



Figuur 1.36. Het principe van pulserend MIG/MAG-lassen.

Enige verbetering in het materiaaltransport treedt op wanneer een kleine hoeveelheid zuurstof aan het beschermgas wordt toegevoegd of wanneer een alkalihoudende laag op het elektrode-oppervlak wordt aangebracht. Deze verbetering is een direct gevolg van de vergroting van de kathodevlek.

Het bovenbeschreven gedrag geldt specifiek voor het geval dat een argonrijk beschermgas wordt gebruikt. Bij helium treedt onder alle omstandigheden ‘globular transfer’ op: ‘drop transfer’ bij het lassen met de elektrode als positieve pool, ‘repelled transfer’ bij het lassen met de elektrode als negatieve pool. Dat in bepaalde gevallen toch helium (of een helium-argon-mengsel) als beschermgas wordt gebruikt, vindt zijn oorzaak in het feit dat bij gebruik van helium in het algemeen een betere lasvorm wordt verkregen (zie figuur 1.37).



Figuur 1.37. Dwaarsdoorsneden van de las bij het MIG/MAG-lassen in verschillende beschermgassen.

Wanneer CO₂ als beschermgas wordt toegepast, vindt zowel bij positieve als bij negatieve polariteit instabiel materiaaltransport plaats in de vorm van grove druppels en veel spatten (‘repelled transfer’). Hoewel bij negatieve polariteit duidelijke verbeteringen optreden wanneer op de elektrode een dunne alkalihoudende laag wordt aangebracht, worden in het algemeen toch de beste resultaten verkregen wanneer gelast wordt met de elektrode als positieve pool.

Bij het MIG/MAG-kortsluitbooglassen (zowel in argon als in helium) vindt materiaaltransport plaats in de vorm van ‘short-circuiting transfer’ (zie figuur 1.30). Hierbij wordt het vloeibare metaal van de elektrode naar het smeltbad getransporteerd via kortsluitingen (honderden per seconde). Het optreden van spatten kan worden tegengegaan door het beperken van de snelheid van stroomtoeneming tijdens de kortsluitperiode.

Lassen met beklede elektrode

Het materiaaltransport bij het lassen met beklede elektrode is een zeer complex verschijnsel. Het blijkt dat verschillende typen druppelovergang kunnen optreden, al of niet in combinatie. Welk type druppelovergang in een bepaalde situatie domineert, hangt af van de chemische samenstelling van de bekleding, de polariteit en de stroomsterkte.

Onder poeder lassen

Ook bij het onder poeder lassen kunnen verschillende typen druppelovergang optreden. Uit snelle röntgenopnamen blijkt echter dat vooral ‘flux-wall guided transfer’ een belangrijke rol speelt. Hierbij worden druppels vloeibaar metaal van het uiteinde van de elektrode via het oppervlak van het omringende gesmolten poeder naar het smeltbad getransporteerd.

1.10. De neersmeltsnelheid

Bij het booglassen met afsmeltende elektrode speelt de neersmeltsnelheid van de elektrode een belangrijke rol.

De neersmeltsnelheid, gedefinieerd als de gewichtshoeveelheid elektrodemateriaal die per tijdseenheid wordt gesmolten en vervolgens van de elektrode naar het werkstuk wordt getransporteerd, wordt enerzijds bepaald door de energie die per tijdseenheid aan de elektrode wordt afgegeven, anderzijds door de energie die nodig is om een gewichtseenheid elektrodemateriaal tot smelten te brengen en vervolgens te verwarmen tot de temperatuur die de druppel heeft als hij de elektrode verlaat.

Zoals blijkt uit paragraaf 1.8 wordt vanuit de boog per tijdseenheid aan de elektrode een energiebijdrage geleverd, die evenredig is met de stroomsterkte I .

In het geval de elektrode fungeert als anode, is deze bijdrage gelijk aan:

$$Q_a = \left[V_a + c_a V_z + \phi_a + \frac{3k(T_z - T_a)}{2e} \right] I \quad (1.33)$$

waarin V_a de spanning over het anodevalgebied, c_a een constante met een waarde tussen 0 en 1, V_z de spanning over de boogzuil, ϕ_a de uitreepotentiaal van het anodemateriaal, k de constante van Boltzmann, T_z de zuiltemperatuur, T_a de anodetemperatuur en e de lading van het elektron voorstelt.

Daarnaast is er nog een bijdrage, die verband houdt met de Joule-verhitting van het stroomvoerende gedeelte van de elektrode. Deze bijdrage is gelijk aan:

$$Q_j = \frac{4L\rho}{\pi d^2} I^2 \quad (1.34)$$

waarin L de lengte van het stroomvoerende gedeelte van de elektrode (vaak uitsteeklengte genoemd), ρ de soortelijke elektrische weerstand van het elektrodemateriaal en d de elektrodediameter voorstelt.

De energie die nodig is om een gewichtseenheid elektrodemateriaal tot smelten te brengen en verder te verwarmen tot de temperatuur die de druppel heeft als hij de elektrode verlaat, is gelijk aan:

$$q = H + (T_d - T_s)C_p \quad (1.35)$$

waarin H de hoeveelheid energie voorstelt die nodig is om een gewichtseenheid elektrodemateriaal tot smelten te brengen, T_d de temperatuur van de druppel, T_s het smeltpunt en C_p de soortelijke warmte van het vloeibare metaal.

Combinatie van de vergelijkingen (1.33), (1.34) en (1.35) levert voor de neersmeltsnelheid S de volgende uitdrukking:

$$S = aI + bI^2 \quad (1.36)$$

met

$$a = \frac{V_a + c_a V_z + \phi_a + 3k(T_z - T_a)/2e}{H + (T_d - T_s)C_p} \quad (1.37)$$

en

$$b = \frac{4L\rho}{\pi d^2 [H + (T_d - T_s)C_p]} \quad (1.38)$$

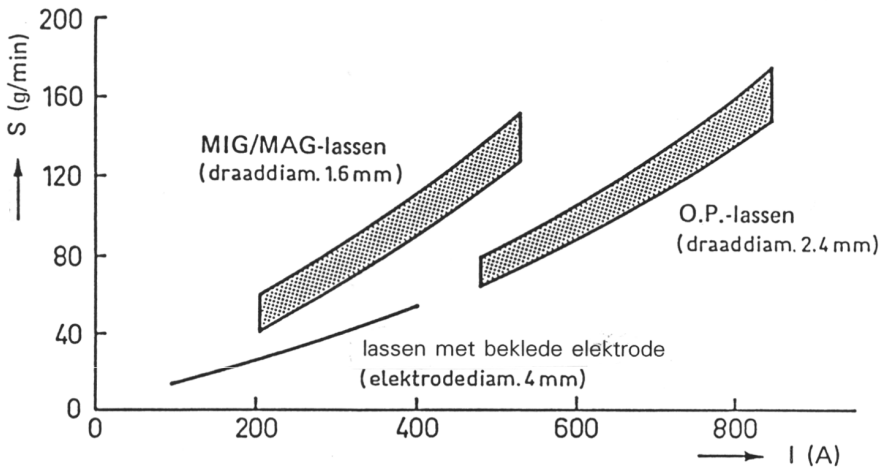
Vergelijking (1.36) geldt voor het (meest voorkomende) geval, dat de elektrode fungeert als anode. Een soortgelijke uitdrukking kan worden afgeleid voor het geval de elektrode als kathode dienst doet.

Bij het lassen met beklede elektrode moet vergelijking (1.36) worden gecorrigeerd in verband met:

- warmte die nodig is voor het smelten van de elektrodebekleding (negatieve correctie);
- het ‘gratis meesmelten’ van metaalpoeder, wanneer met een hoogrendements-elektrode wordt gelast (positieve correctie).

Soortgelijke correcties zijn nodig bij het MIG/MAG-lassen met gevulde draad.

In figuur 1.38 wordt voor lassen met beklede elektrode, MIG/MAG-lassen en onder poeder lassen de experimenteel bepaalde neersmeltsnelheid gegeven als functie van de stroomsterkte. Rekening houdend met bovengenoemde correcties blijkt er een goede overeenkomst te bestaan tussen de experimentele resultaten en vergelijking (1.36). Afwijkingen kunnen voor het grootste deel worden toegeschreven aan spatverliezen (zie volgende paragraaf).



Figuur 1.38. De neersmeltsnelheid als functie van de stroomsterkte voor verschillende varianten van het booglasproces.

1.11. Spatverliezen

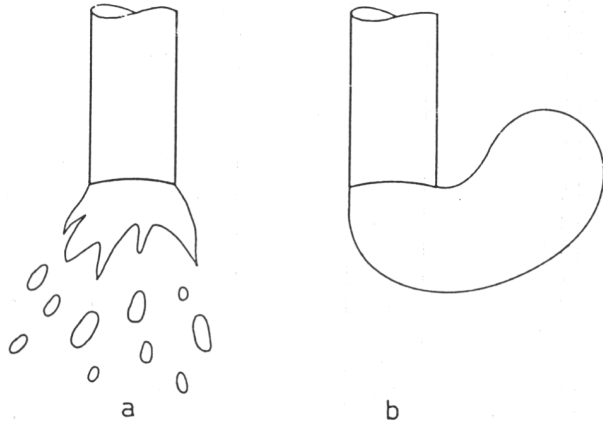
Tijdens het booglassen kan materiaalverlies optreden in de vorm van spatten. Deze spatten kunnen zich, als hun temperatuur hoog genoeg is, hechten aan het werkstuk of aan het mondstuk van de toorts, hetgeen aanleiding kan geven tot problemen. De aanwezigheid van spatten op het werkstuk maakt bijvoorbeeld in veel gevallen nabewerking van het werkstuk noodzakelijk, terwijl spatten op het mondstuk de gasbescherming kan verstoren en de draadaanvoer kan hinderen.

De mate waarin spatvorming voorkomt, hangt af van verschillende factoren, onder meer van de samenstelling van het beschermgas, de lasparameters en de samenstelling van werkstuk- en toevoegmateriaal.

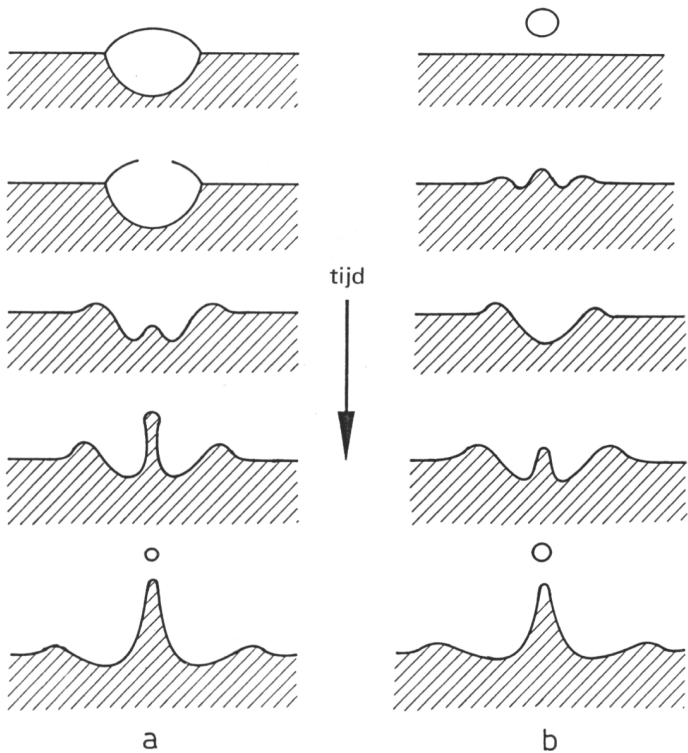
Uit snelle-film opnamen is gebleken, dat spatten afkomstig kunnen zijn van zowel de elektrode als van het smeltbad.

In het geval van de elektrode kan spatvorming plaatsvinden door explosieve gasvorming in het vloeibare metaal aan het uiteinde van de elektrode, of doordat de resultante van de op de druppel werkende krachten niet naar het smeltbad is gericht. Beide situaties zijn schematisch weergegeven in figuur 1.39.

In het geval van het smeltbad kan spatvorming eveneens worden veroorzaakt door gasexplosies. Daarnaast spelen echter twee andere verschijnselen een rol: breuk van gasbellen aan het oppervlak en inslag van druppels afkomstig van de elektrode. Beide verschijnselen leiden op analoge wijze tot spatvorming, hetgeen wordt geïllustreerd in figuur 1.40.



Figuur 1.39. Spatvorming aan de elektrode door (a) explosieve gasvorming en (b) zijwaarts gerichte krachtwerking.



Figuur 1.40. Spatvorming aan het oppervlak van het smeltbad (a) door breuk van gasbellen en (b) inslag van druppels.

Een speciale situatie doet zich voor bij het kortsluitbooglassen. In dit geval wordt spatvorming veroorzaakt door explosie van de vloeistofbrug tussen elektrode en werkstuk. Deze explosie is het gevolg van de exponentiële temperatuurverhoging in het nauwste gedeelte van de vloeistofbrug, gepaard gaande met een abrupte overgang van de vloeistoffase naar de gasfase.

1.12. Magnetische effecten

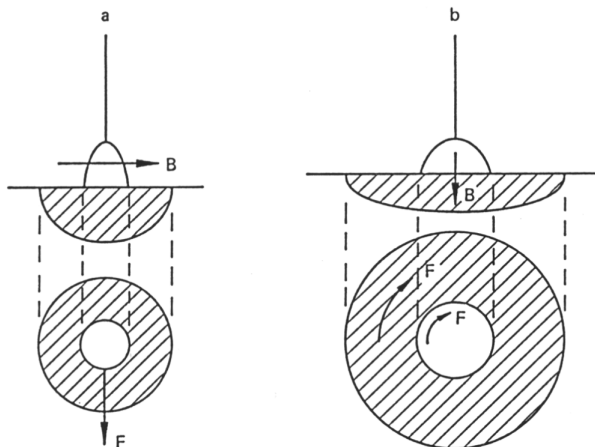
Aangezien zowel de boog als het smeltbad te beschouwen zijn als stroomgeleiders, is te verwachten dat de aanwezigheid van magneetvelden hun gedrag zal beïnvloeden.

De optredende magnetische effecten kunnen beschreven worden met behulp van de wet van Lorentz

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1.39)$$

waarin \vec{F} de kracht voorstelt die op een bepaald volume-element van de boog of het smeltbad werkt, \vec{j} de stroomdichtheid in dat volume-element en \vec{B} de magnetische inductie ter plaatse.

Externe magneetvelden



Figuur 1.41. Magnetische beïnvloeding van de boog en het smeltbad. a) transversaal magneetveld; b) axiaal magneetveld.

Voor wat betreft externe magneetvelden kan onderscheid worden gemaakt tussen transversale magneetvelden en axiale magneetvelden. Bij een transversaal magneet-

veld (figuur 1.41a) maakt de magnetische inductie een hoek (meestal een hoek van 90°) met de as van de boog. Dit resulteert in een zijdelingse afwijking van de boog. Wanneer een wisselend transversaal magneetveld wordt aangelegd zal de boog gaan 'pendelen'. Dit kan worden toegepast bij het oplassen of om het optreden van randinkarteling (zie paragraaf 5.7) tegen te gaan.

Wanneer een axiaal magneetveld wordt aangelegd, waarbij de magnetische inductie evenwijdig is met de as van de boog (figuur 1.41b), zullen zowel de boog als het smeltbad gaan roteren. Dit verschijnsel, dat vaak wordt aangeduid met de term magnetisch roeren is een gevolg van de stroomdivergentie (en dus van de aanwezigheid van een radiale component van de stroom) in de boog en in het smeltbad. De rotatie resulteert in verwijding van de boog en in een breder en ondieper smeltbad. Daarnaast treedt er een niet-symmetrisch effect op in de vorm van zijwaartse stuwing van het vloeibare lasmetaal. Dit effect kan worden teniet gedaan door het toepassen van een wisselend axiaal magneetveld. Voorts leidt de rotatie van het smeltbad in sommige gevallen tot een fijnere structuur van het gestolde lasmetaal. Deze structuurverfijning wordt onder meer toegeschreven aan de aanwezigheid van meer kiemen bij het stollen door het afbreken van dendrieten.

Magnetische blaaswerking

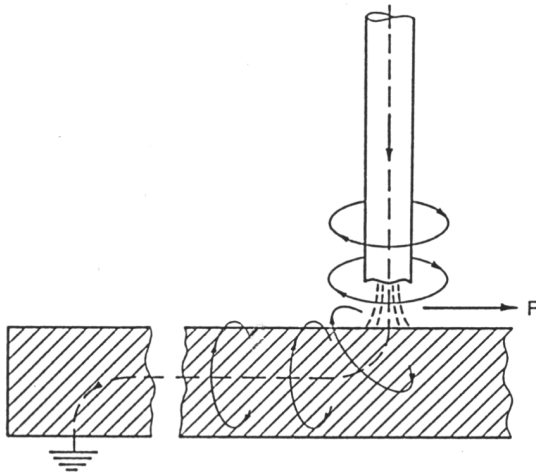
Ook het eigen magneetveld kan onder bepaalde omstandigheden het gedrag van de boog beïnvloeden. Deze beïnvloeding wordt magnetische blaaswerking genoemd en manifesteert zich als het scheeffrekken van de boog ten gevolge van op de boog werkende Lorentzkrachten. Aangezien het scheeffrekken van de boog op onregelmatige wijze plaatsvindt, zal de boog steeds van stand veranderen (flakkeren), hetgeen kan leiden tot een onregelmatig uitzijnde las. Magnetische blaaswerking is het gevolg van een niet-symmetrische verdeling van het eigen magneetveld rondom de boog (plaatselijke concentratie van het eigen magneetveld). Het verschijnsel treedt op:

- bij éézijdige aarding van het werkstuk (figuur 1.42);
- aan de rand van het werkstuk bij ferromagnetische materialen (figuur 1.43).

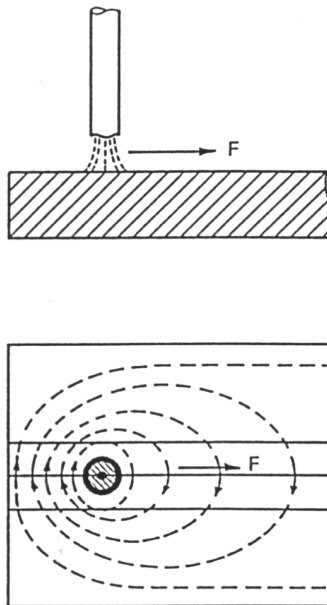
Magnetische blaaswerking speelt vooral een rol bij gebruik van gelijkstroom, waarbij moet worden opgemerkt dat de richting van de blaaswerking onafhankelijk is van de polariteit (bij omkeren van de stroomrichting keert ook de richting van de magnetische inductie om).

Bij gebruik van wisselstroom treedt het verschijnsel van magnetische blaaswerking slechts in beperkte mate op. Dit houdt verband met wervelstromen die door de

wisselstroom in het werkstuk worden geïnduceerd en het magneetveld ter plaatse ten dele neutraliseren.



Figuur 1.42. Magnetische blaaswerking ten gevolge van eenzijdige aarding van het werkstuk.



Figuur 1.43. Magnetische blaaswerking aan de rand van een ferromagnetisch werkstuk.

1.13. Stroombronnen

Voor het booglassen zijn stroombronnen vereist die in staat zijn een relatief hoge stroomsterkte (1 – 1000 A) te leveren bij een relatief lage spanning (10 – 50 V). Afhankelijk van de toepassing kan gebruik worden gemaakt van gelijkstroom of van wisselstroom.

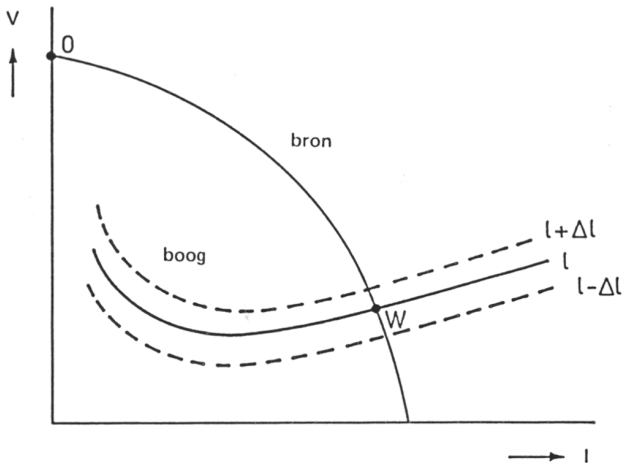
Als stroombron komen in aanmerking:

- transformatoren (wisselstroom);
- gelijkrichters (gelijkstroom);
- motor-generatoren (wisselstroom of gelijkstroom).

De ontwikkeling op het gebied van stroombronnen voor het booglassen heeft de laatste jaren een grote vlucht genomen, voornamelijk als gevolg van het beschikbaar komen van geavanceerde micro-elektronische schakelingen. Op deze ontwikkeling zal hier niet worden ingegaan. Verwezen wordt naar de literatuur.

De belangrijkste technische eigenschap van een stroombron is de stroom-spanning karakteristiek, waarvan in figuur 1.44 een voorbeeld wordt gegeven.

Naast de karakteristiek van de stroombron is in figuur 1.45 ook de stroom-spanning karakteristiek van een boog met booglengte l weergegeven. Het snijpunt van de twee karakteristieken (het werkpunt W) geeft de stroom en de spanning waarbij de boog onder de gegeven omstandigheden brandt. Bij verandering van de booglengte zal de karakteristiek van de boog en daarmee het werkpunt verschuiven. Dit is in figuur 1.44 weergegeven voor zowel vergroting ($l + \Delta l$) als voor verkleining ($l - \Delta l$) van de booglengte.



Figuur 1.44. De stroom-spanning karakteristiek van de stroombron en van de boog O = open spanning, W = werkpunt, l = booglengte.

Uit het bovenstaande volgt dat bij gebruik van een stroombron met verticale karakteristiek de stroomsterkte tijdens het lassen nagenoeg constant zal blijven, terwijl bij gebruik van een stroombron met horizontale karakteristiek de spanning tijdens het lassen constant zal blijven.

Voor het lassen met beklede elektrode, het TIG-lassen en het plasma-lassen wordt in het algemeen een stroombron met relatief steile karakteristiek aanbevolen. Variaties in booglenkte hebben dan weinig invloed op de stroomsterkte en daarmee op het lasresultaat.

Voor het MIG/MAG-lassen is een stroombron met horizontale karakteristiek het meest geschikt. Variaties in booglenkte worden in dit geval door het proces zelf gecorrigeerd. Dit kan als volgt worden verduidelijkt. Een optredende vergroting van de booglenkte zal leiden tot een verlaging van de stroomsterkte. Hierdoor zal per tijdseenheid minder warmte aan de elektrode worden afgegeven en zal de neersmeltsnelheid worden verlaagd. Als gevolg hiervan zal de booglenkte afnemen totdat de oorspronkelijke waarde weer is bereikt. Een optredende verkleining van de booglenkte zal op overeenkomstige wijze worden tegengegaan.

Bij het onder poeder lassen verloopt deze automatische correctie bij gebruik van een stroombron met horizontale karakteristiek te langzaam in verband met de relatief grote dikte van de elektrode. Om die reden wordt bij het onder poeder lassen vrijwel altijd een stroombron met dalende karakteristiek gebruikt, in combinatie met een terugkoppelsysteem. Met dit systeem kan de booglenkte, via terugkoppeling van de boogspanning, binnen nauwe grenzen worden gehouden.

1.14. Robotisering van het booglasproces

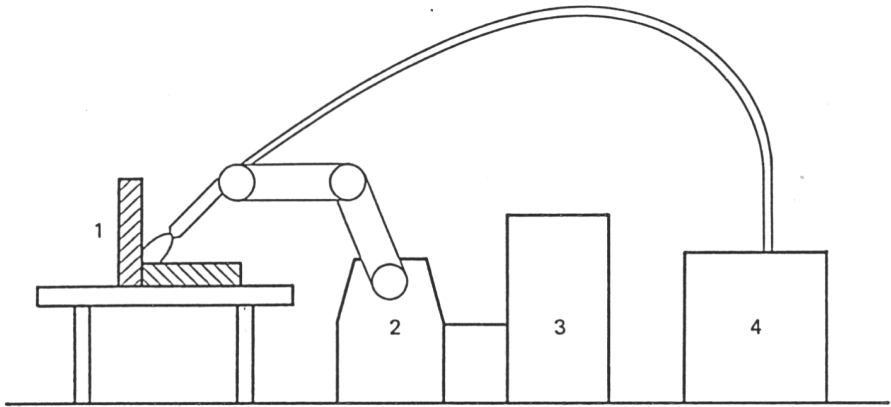
Robotisering van het booglasproces is van groot belang in verband met

- productiviteitsverhoging;
- kwaliteitsverbetering.

Productiviteitsverhoging wordt door robotisering bereikt via vermindering van arbeidskosten en via verhoging van de bezettingsgraad van de productie-apparatuur, kwaliteitsverbetering komt tot stand omdat variaties in de lasparameters, die bij handlassen onvermijdelijk zijn, bij robotisering binnen nauwere grenzen kunnen worden gehouden.

Een robotinstallatie voor booglassen (MIG/MAG) bestaat in het algemeen uit een robot voor positionering van de lastoorts, een besturingssysteem voor de robot, een werkstukmanipulator en lasapparatuur. De robot(arm) heeft bij voorkeur zes vrijheidsgraden: drie voor het positioneren en drie voor het oriënteren van de lastoorts. De situatie is in vereenvoudigde vorm weergegeven in figuur 1.45. De

mogelijkheden van een dergelijk robotsysteem zijn beperkt tot het volgen van een voorgeprogrammeerde baan.



Figuur 1.45. Schematische voorstelling van een robotsysteem voor booglassen (MIG/MAG). 1 – werkstuk, 2 – robot; 3 – besturing; 4 – stroombron met draadaanvoereenheid.

Voor meer geavanceerde robotsystemen is een sensor vereist, waarmee de terugkoppeling wordt verzorgd tussen de zich vormende lasverbinding en de robotbesturing. Sensoren voor lasrobots kunnen ruwweg worden ingedeeld in sensoren voor positionering en sensoren voor procesbeheersing.

Bij sensoren voor positionering is naadzoeken en naadvolgen het belangrijkste doel. Daarnaast zijn ook van belang de controle van de afstand tussen werkstuk en elektrode en het herkennen van hechtlassen en van het einde van de lasnaad.

Bij sensoren voor procesbeheersing gaat het in principe om de karakterisering en terugkoppeling van de lasbadgeometrie. Deze kan dan door continue aanpassing van de lasparameters binnen van te voren vastgestelde grenzen worden gehouden. In het volgende zullen de belangrijkste sensoren die op dit moment in de praktijk worden toegepast of in ontwikkeling zijn kort worden besproken.

Mechanische sensoren

Mechanische tasters behoren tot de eerste groep sensoren die voor lasrobots ter beschikking kwamen. De mechanische sensor bestaat uit een naald, dan wel een ander tastlichaam, die via de lasnaad wordt voortbewogen. Bij afwijkingen van de lasnaad ten opzichte van het voorgeprogrammeerde pad komt de naald in een andere stand te staan. De naaldbeweging wordt vervolgens in een elektrisch signaal omgezet en dit signaal wordt teruggekoppeld naar de robotbesturing. Het zal

duidelijk zijn dat mechanische sensoren uitsluitend geschikt zijn voor naadzoeken en/of naadvolgen.

Pneumatische sensoren

Bij pneumatische sensoren bestaat het uitgangssignaal uit een statische gasdruk, die een maat is voor de afstand tussen sensor en werkstuk. Omdat alleen de afstand wordt gemeten is voor het volgen van lasnaden een combinatie van twee of meer sensoren vereist. In de praktijk dient er bij deze sensoren op gelet te worden dat de gasbescherming boven het lasbad niet wordt aangetast.

Ultrasoon-sensoren

Voor de meting van de afstand tot het werkstuk kunnen ook ultrasoon-sensoren met gecombineerde zend- en ontvangkop worden toegepast. De tijd tussen uitzending en ontvangst van een geluidspuls is een maat voor de afstand. Een andere benadering is een ultrasoon-sensor op het werkstuk te plaatsen en via uitzending en ontvangst van geluidsgolven in het materiaal de positie van het smeltbad te bepalen. Een belangrijk voordeel van deze benadering is, dat in principe ook informatie over de geometrie van het smeltbad kan worden verkregen.

Inductieve sensoren

Bij inductieve sensoren wordt door een wisselend magneetveld in het werkstuk een magnetische inductie opgewekt, die met behulp van een meespoel kan worden gedetecteerd. Het gemeten signaal is dan een maat voor de afstand tot het werkstuk. Onderscheid kan worden gemaakt tussen sensorsystemen met lage en met hoge frequentie, waarbij de grens ligt bij enkele kHz. Sensorsystemen met lage frequentie zijn uitsluitend geschikt voor ferromagnetische werkstukken. Bij sensorsystemen met hoge frequentie wordt gebruik gemaakt van het effect van wervelstromen. Deze systemen zijn derhalve in principe geschikt voor alle metalen.

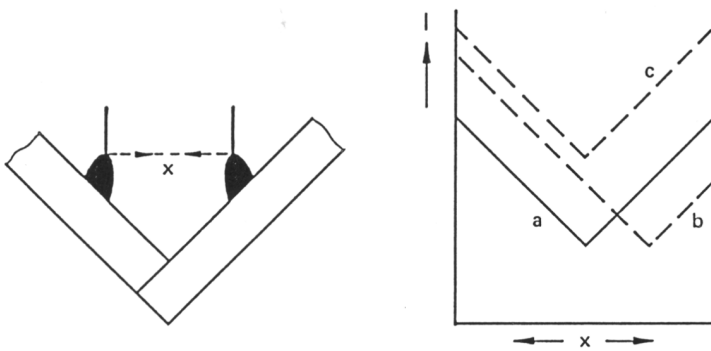
Boogsensoren

Bij het booglassen kan de boog zelf ook als sensor worden gebruikt. Het principe van de boogsensor berust op het gegeven dat er een eenvoudig (nagenoeg lineair) verband bestaat tussen de booglangte en de stroomsterkte in het geval van een horizontale stroombronkarakteristiek en tussen de booglangte en de boogspanning in het geval van een verticale stroombronkarakteristiek. Meting van de stroomsterkte respectievelijk boogspanning geeft dus informatie over de booglangte en daarmee over de positie van de lastoorts ten opzichte van het werkstuk. In de praktijk wordt de boog meestal op mechanische of magnetische wijze over de lasnaad

heen en weer bewogen en wordt de positie van de lastoorts via meting van de stroomsterkte respectievelijk boogspanning continu gevolgd en zonodig gecorrigeerd. Een voorbeeld van een dergelijke werkwijze wordt in figuur 1.46 gegeven.

Bij een ander type boogsensor wordt gebruik gemaakt van het verband dat bestaat tussen de geometrie en het oscillatiegedrag van het smeltbad. Door het smeltbad in trilling te brengen en de oscillatiefrequentie te meten kan dus informatie worden verkregen over de vorm en grootte van het smeltbad en deze informatie kan vervolgens worden teruggekoppeld naar het besturingssysteem.

De frequentie kan op eenvoudige manier via stroom of spanning worden gemeten omdat de golfbeweging van het smeltbad aanleiding geeft tot periodieke verandering van de booglengte en dus van stroomsterkte of boogspanning.



Figuur 1.46. Schematische voorstelling van de werkwijze van een boogsensor a) correcte positie; b) horizontale afwijking; c) verticale afwijking.

Optische sensoren

Bij optische sensoren wordt een beeld gevormd van de lasnaad en/of van het lasbad. In de meeste gevallen wordt een externe lichtbron gebruikt, waarmee de te detecteren plaats egaal wordt verlicht of waarmee een gestructureerd lichtpatroon op de te detecteren plaats wordt geprojecteerd. Soms wordt in plaats van de externe lichtbron gebruik gemaakt van de straling van de boog of van het lasbad. De detectie kan variëren van het meten van de reflectie van enkele punten tot het registreren van een totaalbeeld. Van de verschillende sensoren staan de optische sensoren het sterkst in de belangstelling. Diverse typen worden al in de praktijk toegepast.

Temperatuursensoren

Door middel van meting van de temperatuurverdeling in het werkstuk is het in principe mogelijk informatie te verkrijgen over de positie en de geometrie van het lasbad. Hiervan wordt bij temperatuursensoren (meestal via infrarood-detectie) gebruik gemaakt. Door vlak voor het lasbad een temperatuurscan te maken worden gegevens verkregen, waaruit het midden van de lasnaad kan worden bepaald. In de praktijk kan worden volstaan met het meten van de temperatuur op twee plaatsen aan weerszijden van de lasnaad. Een systeem volgens dit model is uitsluitend geschikt voor naadvolgen. Door het aftasten van de temperatuur over het lasbad kan de geometrie van het lasbad worden gekarakteriseerd, hetgeen on-line procescontrole mogelijk maakt.

Opgaven

- 1.1. Geef een korte beschrijving van de belangrijkste kenmerken van:
 - het kathodevalgebied;
 - het anodevalgebied;
 - de boogzuil.

- 1.2.
 - a) In de boogzuil heerst elektrische neutraliteit. Wat wordt daar onder verstaan en wat betekent dit voor de elektrische veldsterkte in de boogzuil?
 - b) In de boogzuil heerst eveneens thermisch evenwicht. Wat wordt daar onder verstaan?
 - c) Gelden genoemde eigenschappen (elektrische neutraliteit en thermisch evenwicht) ook voor het kathodevalgebied en voor het anodevalgebied?

Licht uw antwoorden toe.

- 1.3. *Gegeven:* een lasboog met een boogspanning van 30 V en een lasstroom van 100 A.
Gevraagd: onderstaande tabel in te vullen.

		kathode- valgebied	anode- valgebied	boogzuil
thermisch evenwicht	(ja of nee)			
elektronentemperatuur	(schatting)			
gastemperatuur	(schatting)			
ruimtelading	(+ of – of 0)			
spanningsval	(schatting)			
elektrische veldsterkte	(schatting)			
elektronenstroom	(schatting)			
ionenstroom	(schatting)			

- 1.4. a) Wat wordt verstaan onder de ionisatiegraad α_i van een gas?
 b) Welke relatie bestaat er tussen α_i en de temperatuur? (wiskundig verband + schets).
 c) Op welke wijze beïnvloedt ionisatie de warmtegeleiding van gassen?
- 1.5. a) Wat wordt verstaan onder de dissociatiegraad α_d van een di-atomair gas?
 b) Welke relatie bestaat er tussen α_d en de temperatuur? (wiskundig verband + schets)
 c) Op welke wijze beïnvloedt dissociatie de warmtegeleiding van di-atomaire gassen?
- 1.6. Schets het verloop van de boogtemperatuur als functie van de afstand tot de as van de boog voor een boog in argon, voor een boog in helium en voor een boog in stikstof. Verklaar het geschetste verloop in termen van de warmtegeleiding van het gas.
- 1.7. a) Geef een definitie van:
 – de warmtegeleidingscoëfficiënt,
 – het elektrisch geleidingsvermogen,
 – de ionisatiegraad en
 – de dissociatiegraad
 van een gas.
 b) Geef met behulp van een schets aan hoe deze grootheden afhangen van de temperatuur.
- 1.8. Op welke verschillende manieren kan een lasboog worden ontstoken?

- 1.9. Geef aan de hand van een schets een korte beschrijving van het booglasproces.
- 1.10. Geef een korte beschrijving van de vijf belangrijkste varianten van het booglasproces.
- 1.11. Wat wordt bij het lassen verstaan onder de sleutelgattechniek?
Bij welke lasprocessen is deze techniek toe te passen en waarom?
- 1.12. a) Schets het verloop van de stroom en de spanning als functie van de tijd voor het open-booglassen en voor het kortsluitbooglassen.
b) Wat zijn de specifieke voor- en nadelen van het kortsluitbooglassen ten opzichte van het open-booglassen?
- 1.13. Waarop berust het principe van het pulserend MIG/MAG-lassen en wat zijn de voordelen van het proces?
- 1.14. Geef met behulp van de energiebalans aan, welke hoeveelheid warmte bij het booglassen aan de kathode, en welke hoeveelheid aan de anode wordt afgegeven.
- 1.15. Bereken met behulp van onderstaande gegevens de hoeveelheid warmte, die bij het TIG-lassen en bij het MIG-lassen per seconde wordt afgegeven aan de elektrode, aan het werkstuk en aan de omgeving.
- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| – lasstroom | = 100 A |
| – boogspanning | = 30 V |
| – spanning over kathodeval | = 15 V |
| – spanning over anodeval | = 5 V |
| – lading van elektron | = $1,6 \times 10^{-19}$ J/V |
| – constante van Boltzmann | = $1,4 \times 10^{-23}$ J/K |
- (schat de ontbrekende gegevens)
- 1.16. a) Wat wordt verstaan onder het procesrendement van het booglasproces?
b) Maak een schatting van het procesrendement voor het TIG-lassen, het MIG-lassen en het OP-lassen.
c) Wat wordt verstaan onder het smeltrendement van het booglasproces?
d) Hoe kan het smeltrendement worden bepaald?
- 1.17. a) Hoe worden boog en lasbad beïnvloed door een extern transversaal magneetveld (loodrecht op de as van de boog) en door een axiaal mag-

neetveld (evenwijdig aan de as van de boog? Licht uw antwoord toe.

b) Op welke manieren kan van deze beïnvloeding in de praktijk gebruik worden gemaakt?

1.18. Wat wordt verstaan onder magnetische blaaswerking bij het booglassen?

In welke twee situaties kan dit verschijnsel optreden?

Hoe kan het verschijnsel worden tegengegaan?

1.19. Welke stroombronkarakteristiek wordt gebruikt bij het lassen met beklede elektrode en welke bij het MIG/MAG-lassen? Licht Uw antwoord toe.

Literatuur

- Boumans, P.W.J.M., *Theory of Spectrochemical Excitation*, Hilger & Watts Ltd, London, 1966.
- Cambel, A.B., *Plasma physics and magnetofluidmechanics*, McGraw-Hill, New York, 1963.
- Davies, A.C., *The science and practice of welding*, 8th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- Finkelburg, W. en Maecker, H., *Elektrische Bogen und thermische Plasma, Handbuch der Physik*, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1956.
- Gourd, L.M., *Principles of welding technology*, Edward Arnold Publishers Ltd., London, 1986.
- Gross, B., Grycz, B. en Miklóssy, K., *Plasma Technology*, Iliffe Books, London, 1968.
- Houldcroft, P.T., *Welding Process Technology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1977.
- Hoyaux, M.F., *Arc Physics*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1968.
- Lancaster, J.F. (Ed.), *The physics of welding*, 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford, 1986.
- Norrish, J., *Advanced welding processes*, IOP Publishing Ltd., London, 1992.
- Schellhase, M., *Der Schweisslichtbogen – ein technologisches Werkzeug*, Deutscher Verlag für Schweisstechnik GmbH, Düsseldorf, 1985.
- Welding Handbook, 8th Edition, Vol. 1 *Welding Technology*. American Welding Society, Miami, 1987.
- Welding Handbook, 8th Edition, Vol. 2 *Welding processes*, American Welding Society, Miami, 1991.