

# Scheidingstechnieken voor dunne plaat en buis

Deze publicatie is binnen het project 'nieuwe materialen' ontwikkeld en geeft een overzicht van de scheidingstechnieken voor dunne metaalplaatmaterialen en buizen met diktes van 0,3 t/m ca. 3 mm. Een deel van de informatie is evenwel ook van toepassing voor grotere diktes. De behandelde technieken kunnen ook voor andere materialen (kunststoffen, enz.) worden gebruikt. Hierop wordt in deze publicatie verder niet ingegaan. In het kader van dit project zijn tevens uitgegeven: TI.04.18 'Hoge Sterkte Staal in dunne plaat en buis', TI.04.19 'Roestvast staal in dunne plaat en buis', TI.04.21 'Aluminium in dunne plaat en buis' en TI.04.22 'Ontwerpen van dunne plaat producten en de Eindige Elementen Methode'.

## Inhoud

1	Inleiding	1
2	Mechanische scheidingstechnieken	2
2.1	Ponsen en stansen	2
2.2	Nibbelen	6
2.3	Knippen en slitten	7
2.3.1	Knippen	7
2.3.2	Slitten	8
2.4	Zagen	8
2.5	Waterstraalsnijden	9
3	Thermische scheidingstechnieken	10
3.1	Autogeen snijden	10
3.1.1	Fijnstraalsnijden	13
3.2	Plasmasnijden	13
3.2.1	Plasmasnijden met een enkele gasstroom	14
3.2.2	Het plasma(pers)luchtsnijden	15
3.2.3	Plasmasnijden met een secundaire gasstroom	15
3.2.4	Plasmasnijden met waterinjectie	15
3.2.5	Plasmasnijden met een waterscherm/-douche	16
3.2.6	Plasmasnijden in combinatie met een watertafel (plasma onderwatersnijden)	16
3.2.7	Fijnstraal plasmasnijden	16
3.3	Lasersnijden	16
3.3.1	De CO <sub>2</sub> laser voor het snijden van metalen	17
3.3.2	Nd:YAG laser voor het snijden van metalen	17
3.4	Kwaliteit van de snede	18
4	Vergelijking van de scheidingstechnieken	19
5	Automatiseren en bedrijfseconomische aspecten	20
5.1	Algemeen	20
5.2	Werkvoorbereiding en economische aspecten	20
6	ARBO- en milieuaspecten	21
7	Normen	22
8	Literatuur	23
9	Websites	23

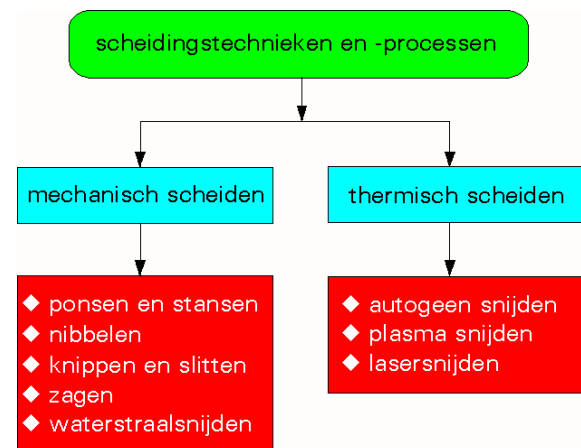
## 1 Inleiding

Dunne metaalplaat wordt voor steeds meer producten toegepast. Het best zichtbaar is dit in de transportindustrie (auto's, treinen) waar lichtere constructies ervoor zorgen dat er minder brandstof wordt verbruikt en/of de nuttige lading kan worden vergroot. Echter ook voor tal van andere toepassingen wordt dunne metaalplaat steeds meer toegepast, zoals in de bouw (gevels en dakplaten), in omkastingen van grote elektronische producten (schakelkasten) en tal van consumentenartikelen (bruin en witgoed).

Het is dan ook niet verwonderlijk dat er op het gebied van dunne plaat veel nieuwe materialen worden ontwikkeld, die vaak heel specifieke eigenschappen hebben. Om tot het vervaardigen van producten te komen, is het vaak noodzakelijk dat de materialen worden gescheiden. Soms is het zo dat scheidingstechnieken die van oudsher werden gebruikt, niet meer kunnen worden ingezet voor de nieuwe generatie materialen. Het gebruik van alternatieve scheidingstechnieken moet dan worden onderzocht. In andere gevallen kunnen de gangbare technieken wel worden gebruikt, maar zullen de snijparameters moeten worden aangepast (bijv. de snijsnelheid en/of de snijspleet). Het is dan van belang te weten welke scheidingstechnieken beschikbaar zijn en wat de mogelijkheden zijn van de verschillende scheidingstechnieken. Vooral de laatste decennia is de ontwikkeling van nieuwe scheidingstechnieken snel gegaan. Niet alleen de komst van nieuwe scheidingstechnieken als het

laser- en waterstraalsnijden hebben hieraan bijgedragen, ook ontwikkelingen op het gebied van numerieke besturingen en de bijbehorende hardware en software hebben hierbij een belangrijke rol gespeeld. Daarnaast speelt de behoefte aan kleinere series, kortere levertijden, hogere nauwkeurigheid en kostenbeheersing eveneens een belangrijke rol in de ontwikkeling.

Kennis van scheidingstechnieken is dan ook voor een grote groep van bedrijven en technici van belang. De inzetbaarheid van de toe te passen scheidingstechnieken is uiteraard afhankelijk de te scheiden type materialen en materiaaldiktes. In grote lijn worden de verschillende scheidingstechnieken in twee groepen onderverdeeld: het mechanisch en het thermisch scheiden (zie figuur 1). Tot het mechanisch scheiden behoren: ponsen, stansen, nibbelen, knippen, zagen en waterstraalsnijden. Tot het thermisch scheiden behoren: autogeen snijden, plasma-snijden en lasersnijden.



figuur 1 Indeling van scheidingstechnieken

Kenmerkend voor het mechanisch scheiden is dat er geen warmte in de materialen wordt gebracht tijdens het scheiden van de materialen. Verder is er bij het mechanisch scheiden, met uitzondering van het waterstraalsnijden, altijd contact tussen het gereedschap en het te scheiden materiaal, dit leidt tot gereedschapsslijtage. Bij het thermisch scheiden wordt altijd warmte in de te scheiden materialen gebracht, waardoor de productdelen kunnen vervormen. Bij het thermisch scheiden is er nooit contact tussen het snijgereedschap en het materiaal. Soms wordt een combinatie van thermisch en mechanisch scheiden toegepast (bijv. ponsen en lasersnijden). We noemen dit ook wel hybride bewerkingen. Het doel hiervan is de voordelen van beide technieken te combineren. Bovendien biedt zo'n systeem vaak een grote flexibiliteit, maar een beperkte nauwkeurigheid. Vooral door dit laatste aspect hebben deze combinatiemachines nooit echt een doorbraak beleefd.

In dit Tech-Info-blad worden zowel het thermisch als het mechanisch scheiden uitgebreid toegelicht.

Vergelijkingen worden gemaakt tussen de verschillende scheidingstechnieken en er wordt aandacht besteed aan het automatiseren en de bedrijfseconomische aspecten van het scheiden. Tevens wordt ingegaan op de ARBO- en Milieuaspecten bij het scheiden.

Daar dunne plaat een relatief begrip is, heeft als uitgangspunt bij het opstellen van dit Tech-Info-blad een plaatdikte van 0,3 tot 3 mm gediend. Vele scheidingsprocessen kunnen echter ook bij grotere materiaaldiktes uitstekend worden toegepast, zodat de verstrekte informatie veelal ook voor grotere plaatdiktes bruikbaar is.

Bij het produceren van voorwerpen uit metaalplaat is het vrijwel altijd nodig om een scheidende bewerking uit te voeren teneinde productdelen uit een grotere plaat te vervaardigen. Deze scheidende bewerking kan met verschillende scheidingstechnieken worden uitgevoerd. Deze scheidingstechnieken hebben alle hun eigen voor- en nadelen. Tevens heeft elke scheidingstechniek vaak een kenmerkend toepassingsgebied.

Tabel 1 en 2 [27] vormen de basis voor deze brochure. Ze geven enkele kenmerkende gegevens van de scheidingstechnieken die in deze brochure worden besproken, zoals snelheid, nauwkeurigheid en toepasbaarheid voor bijvoorbeeld aluminium, RVS en hoge sterkte stalen. In hoofdstuk 2 en 3 worden de scheidingstechnieken verder uitgewerkt; hun principe en aanvullende informatie, zoals kosten en valkuilen. In hoofdstuk 4 worden de besproken scheidingstechnieken onderling vergeleken, hoofdstuk 5 behandelt aspecten van de automatisering van verschillende scheidingstechnieken, samen met enkele bedrijfseconomische aspecten. Hoofdstuk 6, ten slotte, behandelt ARBO- en milieuaspecten.

## 2 Mechanische scheidingstechnieken

Het belangrijkste gemeenschappelijke kenmerk van deze groep scheidingstechnieken is, dat de scheiding van het materiaal plaatsvindt door de uitoefening van een kracht op het plaatmateriaal. Deze kracht kan op diverse wijzen worden aangebracht. Bij ponsen gebeurt dit bijvoorbeeld door een stempel gecontroleerd door het plaatmateriaal te laten bewegen, bij knippen, slitten en zagen wordt de kracht uitgeoefend door een mes of zaag en bij waterstraalsnijden is het de waterstraal met abrasief die de kracht op het plaatmateriaal uitoefent. Het waterstraalsnijden is bij de mechanische scheidingstechnieken enigszins een vreemde eend in de bijt, omdat er bij de andere mechanische scheidingstechnieken steeds sprake is van een of twee bewegende gereedschapsdelen. Het plaatmateriaal dat zich tussen de gereedschapsdelen bevindt, wordt tot lokale afschuiving gedwongen. Dit heeft hoge rekken en uiteindelijk scheuren tot gevolg. Doordat de benodigde krachten soms erg hoog zijn, kan het plaatmateriaal direct naast de scheiding vervormen. Een goede ondersteuning van het plaatmateriaal tijdens het scheidingsproces kan dit voorkomen.

De mechanische scheidingstechnieken die in deze brochure aan de orde komen, zijn: ponsen, stansen, nibbelen, knippen, slitten, zagen en waterstraalsnijden. Deze worden in de hierna volgende paragrafen besproken.

### 2.1 Ponsen en stansen

De termen ponsen en stansen worden vaak door elkaar gebruikt. Er zijn echter wel enkele verschillen tussen beide technieken. Zo wordt er bij het ponsen een neerhouder gebruikt, terwijl dit bij stansen niet het geval is. Bij stansen is het gereedschap productgebonden; met ponsen worden gaten aangebracht met niet-productspecifiek gereedschap [1].

tabel 1 Een aantal kenmerkende gegevens ten aanzien van de verschillende scheidingstechnieken [deels uit 27]

scheidingstechniek	halfafrikaat <sup>1)</sup>			contour <sup>1)</sup>	maatnauwkeurigheid [mm]	dam-breedte (zie blz. 6) (t=plaatdikte)	scherpte hoek	radius [mm]	hulpmiddelen			sneedekwaliteit					toepasbaar voor nieuwe materialen <sup>1)</sup>		
	plaat	profiel	3-D						gereedschap	gassen	overige	sneedebreedte [mm]	braam [µm]	ruwheid R <sub>a</sub> [µm]	haaksheid	wbz <sup>4)</sup> [mm]	Alu-minium	HSS	RVS
knippen	+	+/-	-	recht	0,1	20t	30°	n.v.t.	rechte messen	geen		n.v.t.	> 20	> 20	redelijk	n.v.t.	+	+	+
slitten	+	-	-	recht	0,1	20t	n.v.t.	n.v.t.	ronde messen	geen		n.v.t.	> 20	> 20	redelijk	n.v.t.	+	+	+
ponsen	+	+/-	-	+ <sup>2)</sup>	0,1	2t - 3t	60°	0,5	stempels	geen		n.v.t.	> 20	> 20	redelijk	n.v.t.	+	+	+
nibbelen	+	-	-	+ <sup>3)</sup>	0,1	2t	30°	0,5	stempels	geen		n.v.t.	> 20	> 20	redelijk	n.v.t.	+	+	+
waterstraalsnijden	+	+	+	+	0,1	t	30°	0,5-1	snijkop	geen	abrasief	0,5-2	> 20	2-20	> 80°, geringe inloop	n.v.t.	+	+	+
zagen	+	+	+	+/-	0,3	5t		n.v.t.	zaagblad	geen		breedte zaagblad	> 20	> 20	redelijk	n.v.t.	+	+	+
autogeen snijden	+	+	+	+	1,0	5t	> 90°	1-2	snijkop	Acetyleen O <sub>2</sub>		> 2	> 50	> 10	haaks	> 2	-	(+)	-
plasma-snijden	+	+	+	+	0,6	2t	90°	0,5-1	snijkop	Ar H <sub>2</sub> N <sub>2</sub> , ~lucht		> 0,6	> 20	> 10	haaks, conisch	> 1	+	+	+
fijnstraal plasma-snijden	+	+	+	+	0,4	1t	90°	0,4-0,8	snijkop	Ar H <sub>2</sub> N <sub>2</sub> , ~lucht		> 0,4	> 10	> 10	haaks, conisch	> 1	+	+	+
CO <sub>2</sub> laser-snijden	+	+	(+)	+	0,2	0,5t	15°	0,2-0,4	snijkop	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>		0,2-0,6	geen, zeer gering	5-10	> 85°	> 0,1	(+)	+	+
Nd:YAG laser-snijden	+	+	+	+	0,1	0,5t	15°	0,1-0,2	snijkop	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>		0,1-0,4	geen, zeer gering	2-10	> 85°	> 0,05	+	+	+

1) + mogelijk  
 - niet mogelijk  
 +/- beperkt mogelijk  
 (+) wel mogelijk maar verdient niet de voorkeur  
 2) gelijk aan stempelvorm  
 3) gekarteld  
 4) warmte beïnvloede zone

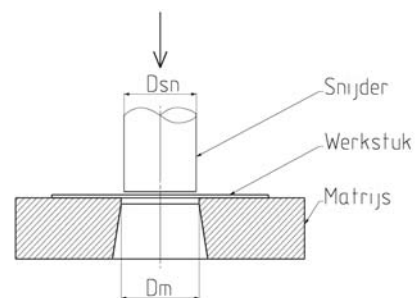
tabel 2 Karakterisering van de belangrijkste scheidingstechnieken [deels uit 27]

scheidings-techniek	scheidings-principe	toepassingsgebied	snelheid	systeem uitvoering	belangrijkste plus- en minpunten	investering Euro (2003)	
knippen	mechanisch: langs elkaar bewegende messen	alle metalen; 0,2-10 mm	plaat	1 kniplengte per slag 1-60 slagen/min	C-frame pers met tafel	+ grote lengten + smalle stroken - bramen	5.000 - 100.000
slitten	mechanisch: langs elkaar draaiende messen	alle metalen; 0,2-3 mm	plaat; vooral van coil	< 200 m/min	ronddraaiende assen met messen	+ zeer grote lengten - niet flexibel - bramen	15.500 - 100.000
ponsen	mechanisch: met ponsstempel	alle metalen; 0,2-10 mm	plaat; beperkt: profielen	< 2000 slagen/min	gereedschap op pers	+ massafabricage + complete contour + kleine producten - niet flexibel - bramen	25.000 - 300.000
ponsnibbelen	mechanisch: overlappend ponsen	alle metalen; 0,2-10 mm	plaat	< 1000 slagen/min; < 5 m/min	pers met gereedschaps-wisselen en plaat-positionering	+ flexibel + enkelstuks/kleine series + contourvrijheid - lawaai - bramen - contour gekarteld	25.000 - 300.000
zagen	verspanen materiaal	alle metalen 1-> 100 mm	plaat buis profiel	tot circa 3 m/min	beugelzaag lintzaag cirkelzaag decoupeerzaag	+ flexibel + enkelstuks/kleine series +/- contourvrijheid - lawaai - bramen - contour gekarteld	200 - 10.000
waterstraal-snijden	mechanisch: hogedruk waterstraal die abrasief bevat	alle metalen; 1-> 100 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,05-5 m/min	portaalsysteem knikarmrobot	+ flexibel + enkelstuks/kleine series + contourvrijheid + geen wbz <sup>1)</sup> - lawaai - mogelijke (geringe) braam	150.000 - 350.000
autogeen snijden	thermisch: acetylenevlam	on- en laaggelegeerd staal; 2 tot zeer dik (1000 mm)	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,1-3 m/min	handmatig; diverse systeem-uitvoeringen	+ grote diktes + flexibel + enkelstuks/kleine series - dunne plaat - wbz <sup>1)</sup> - voorwarmen	5.000 - 50.000
plasma-snijden	thermisch: plasmaboog met gasondersteuning	alle elektrisch geleidende metalen; 1-25 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,1-10 m/min	handmatig; diverse systeem-uitvoeringen	+ flexibel + enkelstuks/kleine series + contourvrijheid - conische snede of één zijde haaks - wbz <sup>1)</sup> - materiaal met niet-geleidende deklaag	12.500 - 150.000
fijnstraal plasma-snijden	thermisch: plasmaboog met gasondersteuning	alle elektrisch geleidende metalen; 1-15 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,1-20 m/min	gemechaniseerd; diverse systeem-uitvoeringen	+ flexibel + enkelstuks/kleine series + contourvrijheid + rechte snede - wbz <sup>1)</sup> - materiaal met niet-geleidende deklaag	30.000 - 100.000
CO <sub>2</sub> lasersnijden	thermisch: gefocusseerde laserbundel met O <sub>2</sub> of inert gas	alle metalen; < 20 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,5-12 m/min	C-frame; Portaalsysteem; (knikarmrobot); hybride systeem	+ zeer flexibel + enkelstuks/kleine series + snel + snedekwaliteit + geen nabewerking + kleine wbz <sup>1)</sup>	75.000 - 500.000
Nd:YAG lasersnijden	thermisch: gefocusseerde laserbundel met O <sub>2</sub> of inert gas	alle metalen; < 8 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,5-10 m/min	C-frame; portaalsysteem; knikarmrobot; hybride systeem	+ zeer flexibel + enkelstuks/kleine series + snel + snedekwaliteit + geen nabewerking + kleine wbz <sup>1)</sup>	150.000 - 500.000

1) warmte beïnvloede zone

Stansen wordt veelal toegepast voor het vormen van complexe contouren in één slag. Ponsen wordt zowel bij grote als bij kleine series gebruikt; stansen wordt bij voorkeur bij grotere series toegepast. Deze paragraaf behandelt voornamelijk het ponsen; de theorie over stansen is hieraan gelijk, afgezien van de hier genoemde verschillen.

Het mechanisme van beide technieken berust op afschuiving. Een gereedschapsdeel (de snijder, zie figuur 2) wordt door het materiaal gedrukt, terwijl het andere gereedschapsdeel (matrijs of snijplaat) het plaatmateriaal ondersteunt. De bewegende snijder veroorzaakt in een kleine strook materiaal grote lokale afschuiving, met

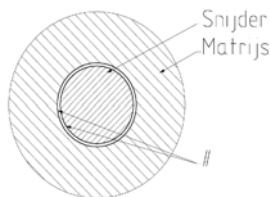


figuur 2 Schematische weergave van het ponsproces

breuk tot gevolg [44, 45]. In de ontstane snede zijn twee zones te onderscheiden; een gladde zone waarin afschuiving plaatsvond en een ruwe zone waarin breuk optrad. In figuur 2 is te zien dat de matrijs "lossend" is; de naar beneden toenemende gatdiameter vereenvoudigt het terugtrekken van het stempel na iedere ponsslag. Bovendien kan het uitgeponste materiaal zo goed uit de matrijs vallen, zonder beschadigingen.

Een bruikbare definitie van ponsen (zie figuur 3) luidt: "Ponsen is het scheiden van materiaal met behulp van een snijder en een matrijs, waarbij de omtrek (gesloten omtrekvorm) van de snijder en de snijplaat evenwijdig aan elkaar zijn".

Voor de snijder en de snijplaat zijn er enkele andere veelgebruikte benamingen in omloop. Zo wordt de snijder ook wel nippel, pons of stempel genoemd, terwijl voor de snijplaat ook termen als snijring of matrijs gebruikelijk zijn.



figuur 3 Omtrek van snijder en matrijs zijn evenwijdig aan elkaar

Binnen het ponsen wordt een aantal uitvoeringsvormen [7] onderscheiden:

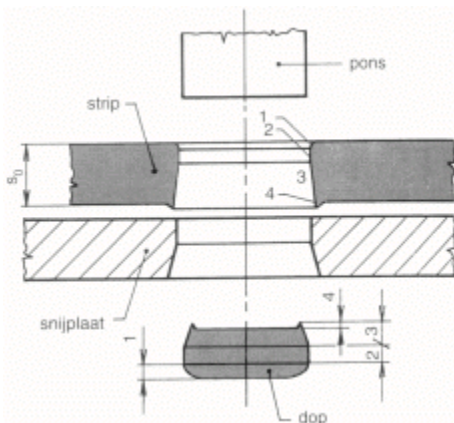
- ▶ Uitponsen: het uitgeponste deel geldt als product; de snijplaat legt de productmaat vast.
- ▶ Gatponsen: het gat geldt als product; de snijder legt de afmetingen van het product vast.
- ▶ Perforeren: bijzondere vorm van het gatponsen; er wordt een groot aantal, meestal dicht bij elkaar gelegen, maar niet overlappende gaten in het basismateriaal geponst.

### Procesbeschrijving

Nadat stempel en snijplaat in de ponsmachine zijn gemonteerd, wordt het plaatmateriaal op de snijplaat gelegd en ingeklemd door de neerhouder. Hierna beweegt het stempel naar beneden [o.a. 46, 49, 50, 51]. Aan het begin van het snijproces ontstaat aan de bovenzijde van het plaatmateriaal, rondom de omtrek van het stempel, een natuurlijke intrekradius; een soort afronding van het plaatmateriaal, zoals weergegeven in figuur 4.

De zones die in figuur 4 zijn aangegeven staan voor:

- ▶ de afronding van plaat en dop (glad, nr. 1 in de figuur);
- ▶ afschuif zone (glad, nr 2 in de figuur);
- ▶ breukzone (ruw, nr 3 in de figuur);
- ▶ braam (onregelmatig, nr 4 in de figuur).



figuur 4 Vervormings- en breukzones bij een geponst product [50]

Hierna wordt het materiaal, dat zich tussen de snijder en de snijplaat bevindt, afgeschoven. In het laatste gedeelte van de plaatdikte treedt uiteindelijk scheuren van het materiaal op. Het deel waarin breuk plaatsvindt, heeft een ruw oppervlak, in tegenstelling tot de gladde snijzone. De laatste fase van de breuk resulteert in een braam, die uitsteekt uit het vlak van de plaat.

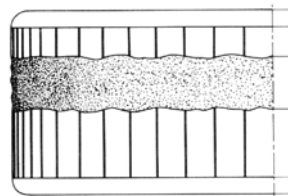
Na het ponsen wordt door terugvering van het plaatmateriaal de gatdiameter kleiner. Om de snijder toch zonder beschadigingen uit het plaatmateriaal naar de beginpositie terug te kunnen trekken, is het toepassen van een neerhouder (ook wel afstroper genoemd) vaak noodzakelijk. Deze houdt het plaatmateriaal tijdens het terugtrekken van de snijder naar beneden gedrukt. De neerhouder gaat het uitbuigen van het materiaal rondom het ponsgat tegen. Spanningen opgebouwd tijdens het ponsen en initiële onvlakheid van het plaatmateriaal, door het walsen en inwendige spanningen, beïnvloeden het kromtrekken van het materiaal. Door het slim aanbrengen van gatenpatronen kan dit beperkt blijven. Dit effect kan ook worden voorspeld met behulp van simulaties.

Bij het ponsen van bekleed plaatmateriaal moet de neerhouderkracht niet zó groot worden gekozen, dat de bekledingslaag wordt beschadigd. Met enkele proefponssingen is de juiste instelling te achterhalen.

Tot nu toe is er geen direct verband bekend tussen het gebruik van een neerhouder en een verandering in slijtage van het gereedschap. Het toepassen van smering in het ponsproces verlaagt de benodigde ponskracht en hiermee de optredende slijtage.

Er zijn in de loop der jaren verschillende procesvarianten ontwikkeld, waarmee de kwaliteit van het snijvlak wordt verbeterd. Zo is er het gladponsen of 'feinstanzen'. Hierbij wordt een hoge neerhouderdruk toegepast, soms in combinatie met een ril in de neerhouder; de stempel is dan stomp. In het scheurgebied wordt op deze wijze een hoge drukspanning aangebracht, waardoor scheurvorming aan de rand van de snijder wordt uitgesteld tot het einde van de ponsslag. Het resultaat is een snijrandgeometrie, waarbij er een grote, gladde afschuifzone en geen breukzone is. Er ontstaat aan het einde van de doorgang van de stempel echter wel een braam, deze is significant groter dan bij conventioneel ponsen. Deze techniek is eigenlijk alleen bruikbaar als het uitgeponste deel het product is.

Een andere techniek is het zogenaamde tegenponsen. In een eerste ponsslag wordt het materiaal van boven af afgeschoven tot net vóór breuk. In een tweede slag, in tegenovergestelde richting uitgevoerd, wordt het product uitgeponst. Hierdoor worden aan de onderzijde van het product ook een natuurlijke intrekradius en een afschuifzone gevormd. Alleen in de middenzone van de plaatdikte bevindt zich nog een breukzone (zie figuur 5).



figuur 5 Snijrandgeometrie bij tegenponsen

Doordat bij deze beide procesvarianten de gereedschapskosten hoger zijn dan voor conventioneel ponsen, zal de toepassing hiervan beperkt blijven tot speciale gevallen.

Bovendien is in beide gevallen een hoge positioneer-nauwkeurigheid noodzakelijk. Deze is op veel ponsper-sen of ponsnibbelmachines niet haalbaar.

Een belangrijke parameter bij het ponsen is de snijspleet. De term "snijspeling" wordt ook regelmatig gebruikt, dit is het absolute verschil in diameter van de matrijs en dia-

meter van de snijder. Helaas komt het regelmatig voor dat de termen door elkaar worden gebruikt, terwijl ze dus niet voor hetzelfde staan. De snijspleet houdt rekening met de plaatdikte en wordt hierom vaker gebruikt. De te gebruiken snijspleet komt voort uit een samenspel tussen verschillende procesparameters; de stempeldiameter  $D_s$ , de matrijsdiameter  $D_m$  en de materiaaldikte.

Voor aanvang van het ponsen wordt de gewenste combinatie van snijgereedschap en snijspleet bepaald. Als men een nauwkeurig buitencontour nodig heeft, kiest men de matrijsdiameter  $D_m$ . Afhankelijk van de materiaalsterkte en -dikte kiest men de procentuele snijspleet (zie verderop). Het te gebruiken stempel en de diameter van dit stempel kunnen dan met behulp van de volgende formule worden bepaald ( $t$  = plaatdikte,  $s$  = procentuele snijspleet):

$$D_s = D_m - \frac{2ts}{100\%}$$

Indien men een nauwkeurige binnencontour nodig heeft, dus het deel dat na ponsen uit de plaat valt moet eenduidig vastgelegd zijn, kiest men de stempeldiameter  $D_s$  volgens de gewenste contour. Ook hier wordt de snijspleet bepaald afhankelijk van de plaatdikte en -sterkte. Als de procentuele snijspleet en de stempeldiameter bekend zijn, kan met onderstaande formule de matrijsdiameter  $D_m$  worden bepaald.

$$D_m = \frac{2ts}{100\%} + D_s$$

De snijspleet waarmee wordt gewerkt, is van grote invloed op de kwaliteit van de verkregen snede en op de gereedschapsslijtage. De te gebruiken snijspleet is afhankelijk van het te ponsen materiaal. Belangrijke materiaaleigenschappen hiervoor zijn de mate van versteving (dus de toename van de rekgrens tijdens het snijden) en de taaiheid (dus de wijze waarop en hoe snel het materiaal tijdens het ponsen van afschuiving over zal gaan op breukvorming). Voor materiaal met een lage treksterkte wordt meestal een kleinere snijspleet (6 à 8%) aangeraden, dan voor materiaal met een hoge treksterkte (14 à 16%). Deze laatste snijspleet is zeker ook aan te bevelen voor materialen zoals hoge sterkte stalen (HSS). Bij een te kleine snijspleet bestaat er kans op het vastlopen van de snijder in het plaatmateriaal, bij een te grote snijspleet is de braam die bij het ponsen ontstaat vaak onacceptabel. Voor het aanpassen van de snijspleet op de plaatdikte is geen vuistregel. Wel is het zo dat in het algemeen bij dik plaatmateriaal een grotere snijspleet wordt gebruikt dan bij dun plaatmateriaal, de te gebruiken waarden worden in de praktijk gebaseerd op eerdere ervaringen.

Zolang de snijspleet niet te klein wordt om terugtrekken van het gereedschap en goed uitvallen van het product uit de matrijs te verhinderen, resulteert een kleinere snijspleet in een kleinere braam, een kleinere deformatiezone, een kleinere intrekradius (zie figuur 4), een kleinere coniciteit van de breukzone en een grotere, gladde snijzone. Als de snijspleet groter wordt, wordt het materiaal in de snijspleet gedrukt en worden zo de randen van de gesneden zone steeds verder afgerond. Waar men aandacht aan moet besteden, is dat hoe kleiner de snijspleet is, des te groter de proceskrachten en de gereedschapsslijtage zijn. Bij een te grote snijspleet wordt het materiaal gebogen, en onderworpen aan een trekspanning in plaats van een afschuifspanning. De grootte van de braam neemt toe bij toenemende snijspleet, bij toenemende ductiliteit van het plaatmateriaal en bij bot gereedschap.

Binnen het ponsproces is er een aantal factoren dat de kwaliteit van de snede beïnvloedt:

- ▶ De geometrie van het gat, de afmetingen hiervan ten opzichte van de plaatdikte en de aanwezigheid van sterke richtingveranderingen (hoeken).
- ▶ De snelheid waarmee wordt geponst.
- ▶ Het te ponsen plaatmateriaal en zijn eigenschappen,

zoals plaatdikte, sterkte, taaiheid, rekgrens, verstevinggedrag en de aanwezigheid van een bekledingslaag, die soms als smering kan gaan fungeren.

- ▶ Het gereedschap en de uitvoering hiervan, dus bijvoorbeeld de aanwezigheid van een afstroker of neerhouder, de gebruikte snijspleet, het materiaal en de afrondingen van snijder en matrijs.
- ▶ De gebruikte pers, zijn aandrijving (mechanisch of hydraulisch) en stijfheid.
- ▶ Het gebruikte smeermiddel, de viscositeit en de verwijderbaarheid hiervan.

Gereedschapsslijtage, zoals het bot worden van de randen van de snijplaat, beïnvloedt de braamvorming. Bij aanvang van een serie ponsbewerkingen is een optimale combinatie van snijplaat en snijder gekozen, rekening houdende met de snijspleet. Als de snijrand van de snijplaat bot wordt, wordt de bovenste laag van de snijplaat weggeslepen. Doordat het gat in de snijplaat normaliter lossend is, wordt de gatdiameter in de matrijs door het slijpen groter. Hierdoor neemt de snijspleet toe. De grotere snijspleet bevordert de braamvorming. Wordt de snijplaat echter niet geslepen, dan zal de botte snijkant een net snijproces verhinderen, waardoor er een ruwe snede zal ontstaan. Bij een niet-lossende matrijs neemt bij naslijpen van de matrijs de snijspleet niet toe. Indien er voor een erg kleine snijspleet wordt gekozen, zijn de benodigde proceskrachten en dus de krachten op de snijplaat relatief groot. Het gereedschap zal hierdoor snel slijten. Bij de keus van de snijspleet moet dus ook met de mate van gereedschapsslijtage rekening worden gehouden.

Bij een aantal nieuwe materialen, zoals hoge sterkte stalen (HSS), is de benodigde ponskracht erg hoog in vergelijking met ander plaatmateriaal. Deze ponskracht [50] wordt als volgt afgeschat:

$$F_{\max} = k \times R_m \times A_s [\text{N}]$$

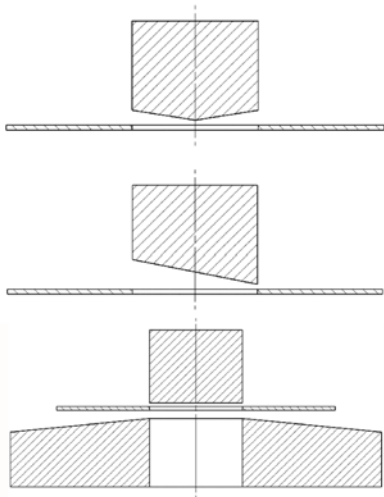
Hierbij is:

- $k$  = ponsfactor, meestal tussen 0,8 en 1 (afhankelijk van de vorm van de stempel)
- $R_m$  = treksterkte [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- $A_s$  = gesneden oppervlak,  $A_s = l_p \times t$  [ $\text{mm}^2$ ]
- $l_p$  = omtrek van de snijder [ $\text{mm}$ ]
- $t$  = plaatdikte [ $\text{mm}$ ]

Deze schatting voor het bepalen van de maximale ponskracht houdt geen rekening met de snelheid waarmee de stempel door het materiaal gaat. Hogere snijnelheden leiden tot meer versteving. Dit leidt weer tot hogere benodigde krachten, die kunnen oplopen tot 20% van de maximale kracht. Er wordt dan echter wel minder geluid geproduceerd.

De maximale ponskracht kan worden gereduceerd door het toepassen van een afgeschuind stempel; hoe schuiner het stempel, hoe kleiner de ponsfactor  $k$  (een maat voor het effectief snijdend gedeelte van de snijder) is. De afschuining kan uit één rechte lijn bestaan, stempels met een dakvorm, zoals weergegeven in figuur 6, worden echter ook veelvuldig gebruikt. Een belangrijk bijkomend voordeel van het gebruik van een dergelijk stempel is de aanzienlijke verlaging van het geluidsniveau bij het ponsen. Een nadeel is dat het uitgeponste materiaal meer zal vervormen. Bij toepassing van een snijplaat met afgeschuinde zijden treden de genoemde voordelen ook op; de vervorming zal hier liggen in de geponste basisplaat. Afhankelijk van welk deel van het plaatmateriaal (het uitgeponste deel, ook wel ponsdop genoemd, of het deel waaruit geponst is) als product geldt, kiest men voor het afschuiven van de snijplaat of de snijder.

Bij beide mogelijkheden zal de gereedschapsslijtage toenemen. Ook zullen de gereedschapskosten hoger zijn, doordat er meer bewerkingen aan het gereedschap moeten worden uitgevoerd. Bovendien neemt de belasting op de gereedschapsgeleiding ook toe. Bij materialen als



figuur 6 Dakvormig stempel, afgeschuind stempel en een afgeschuinde snijplaat

RVS en HSS is de gereedschapsslijtage altijd hoger dan bij bijvoorbeeld aluminium. Bij de keuze van de frequentie van gereedschapscontrole dient men hiermee rekening te houden.

### Productkwaliteit en -nauwkeurigheid

De kwaliteit van geponste producten kan aan de hand van een aantal karakteristieken worden vastgesteld. Deze zijn het snijvlak (intrekzone, snijzone, breukzone en braam, zie figuur 4), de bereikte maattoleranties (de positie van de gaten, de afmetingen van gaten of contouren) en de vlakheid van de plaat. Van deze karakteristieken zijn de braam, de gatnauwkeurigheid en de vlakheid van de plaat het belangrijkste.

Aandachtspunten om een goede kwaliteit van de snijrand te kunnen verkrijgen zijn:

- ▶ gebruik, indien mogelijk, een neerhouder, zodat het materiaal tijdens het ponsen minimaal uitbuigt;
- ▶ gebruik de juiste snijpleet; niet te groot en niet te klein (zie procesbeschrijving);
- ▶ controleer regelmatig op gereedschapsslijtage; versleten gereedschap is een garantie voor een slechte snedekwaliteit;
- ▶ rechte hoeken (90°) zijn moeilijk te realiseren; gebruik gereedschap met licht afgeronde hoeken;
- ▶ smeermiddelen verlagen de benodigde ponskracht; bij hoge ponskrachten zorgt deze krachtverlaging voor een nettere snedegeometrie.

De grootte van de dambreedte (afstand tussen de buitenranden van 2 geponste gaten) is ook van invloed op de productkwaliteit. Bij een te kleine dambreedte zullen de restspanningen voortvloeiend uit het ponsen van het eerste gat, het ponsen van het tweede gat beïnvloeden. Dit uit zich in het plaatselijk uitbuigen van het materiaal. Er is geen bovengrens aan de grootte van deze dambreedte. Voor de minimale dambreedte (db) geldt:

$$db_{\min} = 2,5 \times \sqrt{rt} \quad [\text{mm}]$$

waarin:

r = straal van het pongat [mm]

t = plaatdikte [mm]

In de praktijk houdt men vaak aan dat de dambreedte 2 á 3 maal de plaatdikte moet zijn, dit is afhankelijk van de plaatdikte en van het gebruikte materiaal.

De braamvorming en de hoeveelheid nawerk die nodig zijn om deze braam na het ponsen te verwijderen, beïnvloeden in veel gevallen de productkwaliteit. In het verleden zijn enkele technieken ontwikkeld, waarmee braam-arm zou kunnen worden geponst, deze technieken bestaan echter steeds uit meer dan één processtap. Hier-

door kunnen deze wijzen van ponsen alleen worden toegepast op zeer nauwkeurig werkende machines (denk hierbij met name aan de verplaatsing van het plaatmateriaal op het onderbed). Helaas voldoet de meeste standaardapparatuur, en zeker ponsnibbelmachines, meestal niet aan deze nauwkeurigheidseisen. Daarom is er momenteel een techniek in ontwikkeling, die wel toepasbaar is op o.a. ponsnibbelmachines. De basis hiervan berust op een scherp, uitstekend randje op de snijplaat, die tijdens de ponsgang in het plaatmateriaal drukt en zo een soort kunstmatige intrekradius veroorzaakt. Hoewel deze techniek goed werkt, is het nog moeilijk om steeds een goede vormgeving van het opstaande randje te vinden, aangezien deze afhankelijk is van de plaatdikte en het plaatmateriaal.

### 2.2 Nibbelen

Nibbelen kan gezien worden als een bijzondere vorm van ponsen. Een andere naam voor nibbelen is dan ook ponsnibbelen. Ook de term knabbelen wordt voor deze techniek gebruikt, maar in veel mindere mate. Het gereedschap dat bij nibbelen wordt gebruikt, is normaliter niet productgebonden. De vorm van dit gereedschap is vaak eenvoudig; rond, rechthoekig of een sleufvorm.

Door het ponsen van een serie overlappende gaten wordt een contour gevormd (zie figuur 7). Deze techniek is uitermate geschikt voor het vervaardigen van (kleine) series, bestaande uit relatief grote plaatproducten. Het aantal slagen per seconde is normaal gesproken maximaal 10. Het oppervlak van de te ponsen blenk is vaak minimaal 1 bij 2 meter. Het combineren van een nibbeleenheid met een lasersnijeenheid komt in beperkte mate voor.

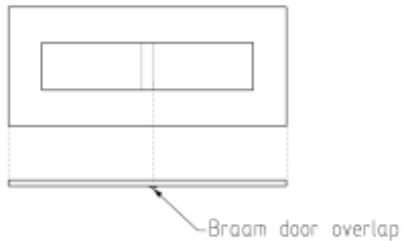


figuur 7 Het vormen van een contour door het laten overlappen van pongaten

Voor ponsen kan al met een relatief kleine pers worden volstaan, voor het ponsnibbelen is een grote pers nodig. Om het verplaatsen van het plaatmateriaal tussen twee slagen door, en het nauwkeurig positioneren van de plaat ten opzichte van het gereedschap te kunnen realiseren, is een relatief stijve pers noodzakelijk.

Aangezien het scheidingsproces van nibbelen groten-deels gelijk is aan dat van ponsen, wordt dit proces hier niet nogmaals uitgebreid beschreven. De snelheid van het scheidingsproces is bij ponsnibbelen vaak beduidend hoger dan bij gewoon ponsen. Hierdoor zijn de krachten op het gereedschap groter en dus de slijtage ook. Hierom is er de afgelopen jaren een aantal ontwikkelingen geweest, zoals het gebruik van bijzondere gereedschapsstalen en hardmetalen, het coaten van gereedschappen en het gebruik van nieuwe smeermiddelen.

Op het punt van overlap van twee gaten ontstaat soms een kleine uitstulping, zeker bij materialen met een hoge sterkte. Deze ongewenste uitstulping, weergegeven in figuur 8, wordt vaak, net als de braam, met een bandschuurmachine of met een trommelproces verwijderd. Dit fenomeen treedt op als de gekozen overlap te klein is. Ook bij het gebruik van rechthoekig gereedschap ziet men dit terugkomen. Een veelgebruikte oplossing hiervoor is het gebruiken van een stempel met een iets andere geometrie dan de matrijsgeometrie. Bij rechthoekig gereedschap zijn de hoeken van de stempel ( $R_i$ ) dan meer afgerond dan de hoeken in de matrijs ( $R_b$ ); dus  $R_i > R_b$ .



figuur 8 Broom t.g.v. overlap van twee ponsgaten

### 2.3 Knippen en slitten

Net als voor de eerder genoemde mechanische scheidingstechnieken berust de werking van knippen en slitten op afschuiving. In tegenstelling tot de eerder genoemde technieken blijft knippen veelal beperkt tot rechte lijnen, soms kunnen hiermee echter ook ronde plaatdelen worden gevormd. Beide technieken worden gebruikt voor het maken van lange sneden in plaatmateriaal [45, 47, 48].

Bij het knippen wordt gebruikgemaakt van twee rechte gereedschapsdelen, die in een voortschrijdend snijproces evenwijdig langs elkaar bewegen. Eén of beide gereedschapsdelen maakt een hoek met de plaat. De lijn waarover het daadwerkelijke scheidingsproces plaatsvindt, wordt de "snijlijn" genoemd.

Een bijzondere vorm van knippen is het knippen met een draaischaar. Hierbij wordt een in zichzelf gesloten contour geknipt, meestal zijn dit cirkelvormige producten. De gebruikte schaar wordt dan rondknipschaar genoemd. De te knippen plaat wordt hierbij geklemd en gecentreerd door een roterende aandrukker. De maximaal te knippen diameter wordt bepaald door de inwendige afmetingen van het C-frame van de schaar.

Bij slitten draaien twee cirkelvormige messen in tegenovergestelde richting langs elkaar. Doordat de messen cirkelvormig zijn, staan ze automatisch onder een hoek met het te snijden plaatmateriaal. Het slitten is een scheidingsproces dat met zeer hoge snij snelheden (tot 200 m/min) kan worden uitgevoerd.

#### 2.3.1 Knippen

Knippen gebeurt momenteel meestal met een guillotine-schaar, zoals afgebeeld in figuur 9. De werking hiervan berust, zoals de naam al aangeeft, op het principe van de guillotine uit de Franse revolutie. Tegenwoordig is er een aantal varianten in omloop. Hierbij is steeds de overeenkomst dat het stilstaande ondermes aan de tafel is bevestigd. Het bovenmes voert de beweging uit, deze kan rechthoekig, cirkelvormig, schommelend of scharnierend worden uitgevoerd. Het bovenmes maakt steeds een kniphoek  $\alpha$  met de plaat. Samen met de snijspleet is de kniphoek een van de invloedrijkste parameters met betrekking tot de snedekwaliteit. De te knippen plaat ligt op een tafel en wordt met de achterzijde tegen een achteraanslag gelegd.

Hiermee wordt de te knippen lengte vastgelegd.

Een belangrijk onderdeel van de guillotineschaar wordt gevormd door een rij neerhouders; deze drukken de plaat op de tafel. Hierdoor kan de plaat niet verschuiven, bovendien blijft de doorbuiging van de plaat zo beperkt. Bij mechanische neerhouders leveren veren de neerhouderkracht, in andere gevallen levert een hydraulisch systeem de benodigde kracht. De neerhouders dienen aan enkele voorwaarden te voldoen:

- ▶ ze moeten onafhankelijk van elkaar kunnen werken;
- ▶ de neerhouderkracht moet instelbaar zijn, om te voorkomen dat zacht, gepolijst of bekleed materiaal bij het knippen wordt beschadigd;
- ▶ ze mogen het zicht op de snijlijn niet belemmeren.

Er wordt echter ook regelmatig geknipt zonder achteraanslag; men werkt dan met een kraslijn (daar waar ge-

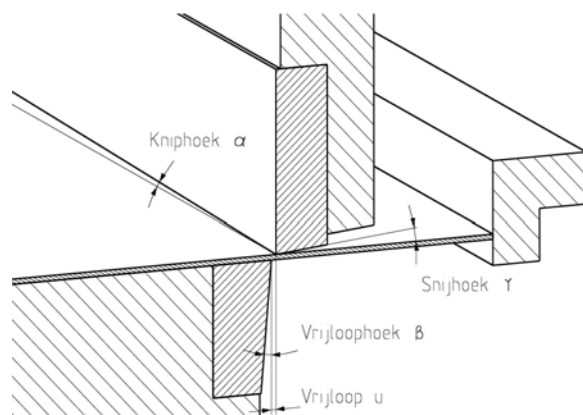
knipt moet gaan worden; ook wel knijlijn genoemd) en een lichtprojectie. Boven de messen is dan een TL balk gemonteerd, daaronder een gespannen staal draad, op een zodanige wijze dat de schaduwlijn van de staal draad precies over de kraslijn valt. Bij het knippen kan de schaduwlijn precies over de aangetekende lijn worden gepositioneerd. Deze wijze van knippen is minder nauwkeurig dan knippen met achteraanslag, bovendien wordt de nauwkeurigheid meer afhankelijk van de mens.

#### Procesbeschrijving

Het snijproces bij knippen lijkt in sterke mate op dat van ponsen. Zo is er gedurende het scheidingsproces eerst sprake van een fase met elastische vervorming, gevolgd door een fase met plastische vervorming en afschuiving.

In de laatste fase scheurt het materiaal. Belangrijke parameters bij het guillotineknippen zijn (zie figuur 9):

- ▶ de vrijloop  $u$ , ook wel snijspeling genoemd (de procentuele snijspleet is hieruit te bepalen);
- ▶ de snijhoek  $\gamma$ ;
- ▶ de vrijloophoek  $\beta$ ;
- ▶ de kniphoek  $\alpha$ .



figuur 9 Schematische weergave van het knippen

De snijspleet wordt hier bepaald aan de hand van de vrijloop  $u$ . De procentuele snijspleet bij knippen is:

$$\text{procentuele snijspleet} = \frac{\text{vrijloop}}{\text{plaatdikte}} \times 100\%$$

Bij knippen is de instelling van de vrijloop afhankelijk van de sterkte van de te knippen materialen. Als richtwaarde wordt gehanteerd dat de procentuele snijspleet 5 - 8% van de materiaaldikte moet bedragen als de rekgrens  $R_m$  kleiner is dan 450 N/mm<sup>2</sup> en 9 - 15% van de materiaaldikte als  $R_m$  groter is dan 450 N/mm<sup>2</sup>.

Bij toepassen van een te grote vrijloop zal het buigend moment op de plaat groot zijn, waardoor de optredende vervormingen van de plaat relatief groot zijn.

De snijhoek  $\gamma$  is de hoek die de onderzijde van het bovenmes met het vlak van de plaat maakt. Er wordt vaak gesneden met een snijhoek van 0°.

Tijdens het knippen treden er verticale krachten op, die door het frame van de schaar moeten worden opgenomen. Door de constructie van het frame van de guillotineschaar ontstaat er een geringe verdraaiing van de bovenbalk. Het bovenmes zal, onder invloed van de verticale krachten en deze verdraaiing, licht kantelen. Om de hierdoor ontstane slijtvlakken van het bovenmes op of tegen de snijkant van het ondermes te beperken, wordt het ondermes vaak voorzien van een vrijloophoek van 2 á 3°.

De kniphoek  $\alpha$  is de hoek die wordt begrensd door de snijkant van het verticaal bewegende bovenmes en het vaste ondermes. Deze hoek is noodzakelijk om te voorkomen dat het plaatmateriaal over de hele lengte tegelijk wordt afgeschoven. Dit is nodig om de knipkracht beperkt te houden. Doordat de knipkracht relatief laag

blijft, kan er met lichte scharen worden volstaan. Voor platen met een dikte van 1 mm gebruikt men een kniphoek van 0,5 tot 0,75°; voor platen van 20 mm is een kniphoek tussen 2,5 en 5° toelaatbaar.

Een kleine kniphoek geeft nagenoeg geen vervorming van de geknipte delen. De vervorming neemt echter toe als de kniphoek toeneemt; de geknipte strook neemt een gebogen vorm aan (uit het vlak van de plaat). De gebruikte kniphoek is een belangrijke parameter voor het bepalen van de maximaal benodigde knipkracht:

$$F_{\max} = R_m \times k \times \frac{t^2}{2 \times \tan(\alpha)} \quad [\text{N}]$$

hierin is:

$R_m$  = treksterkte [N/mm<sup>2</sup>]

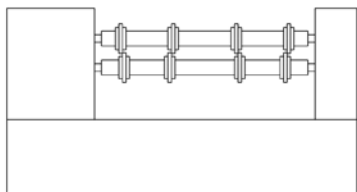
$k$  = knipfactor: 0,8 voor vervormingsstaal, 0,6 voor HSS

$t$  = plaatdikte [mm]

$\alpha$  = kniphoek [°]

### 2.3.2 Slitten

Slitten is een snel scheidingsproces dat veel gebruikt wordt om stroken van coil (rol metaal) te snijden. Ook wordt het veel toegepast bij het verdelen van grote platen in enkele kleinere exemplaren, vooral als dit in een productieomgeving veelvuldig moet gebeuren. Met slitten worden alleen rechte sneden gemaakt, bij dit continue knipproces wordt de te slitten plaat tussen twee cirkelvormige messen door gehaald. De messen zijn gemonteerd op roterende assen, ook hier is sprake van een ondermes en een bovenmes. De messen zijn in horizontale richting ten opzichte van elkaar iets verschoven, waardoor de benodigde knipspleet ontstaat. De knipspleet is instelbaar, net als de verticale overlap tussen de messen. Op beide assen kunnen meerdere messen gemonteerd zijn; de onderlinge afstand tussen de messen op één as bepaalt de breedte van de te slitten strook. De messen draaien in tegenovergestelde richting. Figuur 10 is een schematische weergave van een slitopstelling.



figuur 10 Schematische weergave van een slitopstelling

Er zijn twee wijzen van slitten mogelijk. Bij de eerste wordt de plaat actief langs de messen getrokken. De messen bewegen hierbij passief; ze worden in beweging gebracht door het voortbewegen van de plaat. Een nadeel van deze methode is, dat de trekspanning in de plaat hoog kan zijn, zodat er zeker bij dunne materialen

(<0,25 mm) een grote kans op scheuren is. Bij de tweede wijze van slitten zijn de messen wel aangedreven (actieve mesbeweging), de plaat wordt dan langs de messen geduwd. Hierbij is er geen sprake van hoge trekspanning in het materiaal.

Bij het slitten van smalle stroken treden er vaak grote restspanningen op in het metaal. Hierdoor wijkt de strook af van zijn vlakke vorm en buigt deze uit, uit het vlak van de plaat. Deze kromme of gebogen stroken moeten worden gericht, voordat ze verder in een productieproces kunnen worden toegepast. Dit richten beïnvloedt de interne spanningen in het materiaal, en dus ook de eigenschappen van het plaatmateriaal.

### Productnauwkeurigheid

Slitten is een proces dat voornamelijk in grootschalige toepassingen wordt gebruikt. De snijsnelheid kan oplopen tot zo'n 200 m/min. De breedtetolerantie van ge-

slitte stroken is  $\pm 0,1$  mm; de tolerantie op de rechtheid in langsricting is volgens EN 10131 kleiner dan 0,3% (maximaal 6 mm over 2 m lengte). Afwijkingen op de rechtheid in langsricting worden veroorzaakt door slingeren van de plaat. Goed afrollen van het materiaal van de coil en een goede rechtgeleiding reduceren deze afwijking sterk.

Bij bekleed materiaal is de brosheid van de bekleding vaak een beperking voor het goed kunnen inzetten van het slitproces. Zo breekt de anodiseerlaag bij geanodiseerd aluminium vrij eenvoudig, waardoor aan beide zijden van de geslitte strook een onbruikbare zone zal ontstaan. Er zijn ontwikkelingen gaande om dit probleem te verhelpen; concrete oplossingen zijn er echter nog niet. Het gebruik van een te grote of te kleine knipspleet is, net als bij het knippen met een guillotineschaar, van grote invloed op de gecreëerde snijzone en de nauwkeurigheid van de snede.

### 2.4 Zagen

Zagen is een scheidingstechniek die tot de verspanende mechanische scheidingstechnieken wordt gerekend. Dit betekent dat er bij het maken van een snede kleine metaaldelen (spanen ofwel zaagsel in dit geval) vrijkomen. Het zagen kan zowel handmatig (met bijvoorbeeld een ijzerzaag) als gemechaniseerd (met bijvoorbeeld een lintzaag) worden uitgevoerd.

Het zaagproces kan zowel voor korte als voor lange scheidingslengtes worden ingezet. Lintzaagmachines en bandzaagmachines worden veelal voor lange snedes toegepast, afkortzagen worden normaliter gebruikt voor het afkorten van materiaal. Cirkelzagen kunnen in beide gevallen worden ingezet.

Zagen wordt veelal toegepast in werkplaatsen om profielen pas te maken. Ook in bijvoorbeeld de bouw, voor het maken van grotere gaten in plaatmateriaal, wordt dit proces toegepast.

### Procesbeschrijving

Figuur 11 toont een schematische weergave van de zaageometrie. Hierin is:

$b$  = bandbreedte (bij band- of lintzaag)

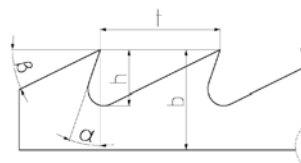
$h$  = tandhoogte

$t$  = tandafstand

$\alpha$  = spaanhoek

$\beta$  = vrijloophoek.

Het aantal tanden per lengte-eenheid wordt altijd gegeven in tanden per inch of tanden per duim (t.p.d.; duim = inch = 25,40 mm). Zo schrijft men voor tanden per inch: 6 t" ofwel 6 t.p.d.



figuur 11 Zaageometrie

Een basisregel bij de keuze van een zaag is dat er minstens twee tandpunten op de dikte van het te zagen materiaal moeten staan.

Er zijn drie tandsoorten die veel worden gebruikt;

- ▶ regulier: relatief volle tanden met een kleine vrijloophoek; algemeen toepasbaar;
- ▶ skip: relatief kleine tanden, met een grote vrijloophoek; voornamelijk toegepast voor de non-ferro, kunststoffen en hout;
- ▶ variabel: wisselend volle en kleine tanden met steeds gelijke tandhoogtes. Deze tandvorm werkt trillingsdempend, geeft minder bramen en een mooiere zaagsnede en laat binnen bepaalde grenzen toe, dat er verschillende materiaaldiktes met hetzelfde zaagblad kunnen worden verwerkt.



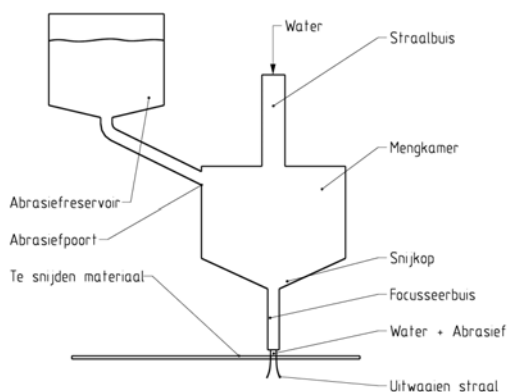
Voor de levensduur van een zaagband is de gebruikte zaagspanning een belangrijke parameter. Bij een te hoge zaagspanning ontstaat er sneller zaagbreuk, bovendien wordt de machine onnodig zwaar belast. Bij een te lage zaagspanning is de zaagsnede niet recht. Als een zaagmachine gedurende langere tijd niet wordt gebruikt, doet men er goed aan de zaagspanning te verminderen, zodat vroegtijdige zaagbreuk kan worden voorkomen. Bij het in gebruik nemen van een nieuwe zaag is het verstandig de eerste sneden met ongeveer de helft van de normaal te gebruiken zaagdruk en met halve aanzetsnelheid te maken. De zaag kan zo inlopen, wat betekent dat de scherpe kantjes aan de tanden iets botter worden, waardoor de tanden minder happen in het materiaal. Dit happen is namelijk meestal de oorzaak van tandbreuk.

## 2.5 Waterstraalsnijden

Waterstraalsnijden kan voor vele materialen toegepast worden. Bij zachte materialen, zoals voedingsmiddelen en kunststoffen en leer, gebruikt men bij het snijden een pure waterstraal. Bij hardere materialen, zoals metalen, is het nodig om abrasief toe te voegen aan de waterstraal. Het werken met abrasief is pas in de 80er jaren bekend geworden. Het abrasief bestaat uit kleine keramische of minerale korrels. Het abrasief voert de snijden- de bewerking uit; het water fungeert als drager. Ook voert het water na het snijden het verwijderde plaatmateriaal en het gebruikte abrasief af. Het gebruik van abrasief vermindert de standtijd van het slijmondstuk. De snijsnelheid is voor waterstraalsnijden in belangrijke mate afhankelijk van de te snijden plaatdikte en de slijndruk [50].

### Procesbeschrijving

Water onder hoge druk wordt via de straalbuis (inwendige diameter 0,08 tot 0,5 mm) toegevoerd aan een mengkamer (zie figuur 12). Momenteel is de waterdruk 4000 tot 6000 bar (400 - 600 MPa); er zijn echter ontwikkelingen bekend om deze druk te verhogen naar 6000 á 8000 bar.



figuur 12 Slijkopprincipe voor het waterstraalsnijden

Via een zogenaamde abrasiefpoort kan het abrasief aan het water worden toegevoegd. De grote watersnelheid - tot zo'n 900 m/s - resulteert in een onderdruk in de mengkamers, waardoor er abrasief (en lucht) aan de waterstraal worden toegevoegd. De waterstraal verlaat de mengkamer en de slijkop door een hardmetalen straalbuis, de zogenaamde focusseerbuis. Deze heeft een inwendige diameter tussen 0,8 en 1,2 mm en een lengte tussen 50 en 100 mm. Om slijtage te beperken moet de focusseerbuis goed zijn uitgelijnd ten opzichte van de straalbuis die het water aan de mengkamer toevoert. Tot een maximum van ongeveer 0,4 kg/min neemt de snijdende werking van de straal toe bij toevoeging van extra abrasief. Ook scherper en harder abrasief doen de snijdende werking toenemen. Dit laatst zorgt echter ook voor een toename van de slijtage van de focusseerbuis.

Hoe kleiner de deeltjesgrootte van het abrasief is, des te hoger zal de snedekwaliteit zijn [64].

Het abrasief bestaat uit minerale of keramische deeltjes. De hardheid hiervan varieert tussen redelijk hard en zeer hard. De deeltjes, vaak olivin, granaat of korund, zijn scherp en hebben een diameter in het gebied tussen 0,1 en 0,8 mm. De diameter van de gebruikte abrasiefdeeltjes moet altijd significant kleiner zijn dan de diameter van de focusseerbuis, om ongehinderd doorstromen van het waterabrasief te garanderen.

Het waterstraalsnijden heeft enkele belangrijke voordelen [64]:

- ▶ Geen thermische beïnvloeding van het snedevlak.
- ▶ Waterstraalsnijden is geschikt voor het verwerken van materialen, die met andere technieken niet of moeilijk te snijden zijn, zoals hoogreflecterende en warmtegeleidende materialen (bijvoorbeeld aluminium, aluminiumlegeringen en koper), titanium, composieten, laminaten en gecoat of gelakt materiaal.
- ▶ De verkregen snede is bijna altijd braamvrij.
- ▶ Waterstraalsnijden maakt het snijden van complexe contouren relatief eenvoudig.
- ▶ Een grote range aan plaatdiktes (0,1 tot 100 mm) kan worden bewerkt.
- ▶ Door de vaste snijkop is er geen omsteltijd nodig.
- ▶ Het gelijktijdig gebruiken van meerdere snijkoppen werkt tijd- en kostenbesparend.

Enkele belangrijke nadelen van het waterstraalsnijden zijn:

- ▶ Het is een relatief traag proces, met name bij grotere metaaldiktes.
- ▶ Het is een luidruchtig proces.
- ▶ Bij het waterstraalsnijden ontstaat veel viezigheid in de vorm van vervuild (en soms verstuvend) water, dat vóór lozing vaak moet worden gereinigd.

### Werkwijze

Bij het waterstraalsnijden bevindt de snijkop zich 1 tot 2 mm boven het plaatoppervlak. In een deel van de situaties is het mogelijk om het plaatmateriaal vanaf de zijkant aan te snijden; er hoeft geen kunstmatig beginpunt te worden gecreëerd. Dit is voornamelijk bij grote contouren het geval. In andere situaties moet er wel actief een beginpunt voor het slijproces worden gemaakt. Dit kan op verschillende manieren. Veel waterstraal machines zijn ook uitgerust met een booreenheid, waarmee het startgat eenvoudig kan worden aangebracht. Ook het ponsen van een startgat behoort tot de mogelijkheden; dit dient wel op een andere machine te gebeuren. Om deze extra bewerking te vermijden, zijn er drie procedures ontwikkeld, waarmee met de waterstraal zelf een startgat wordt gemaakt (insteken):

- ▶ *Cirkelen*: met de snijderkop wordt een cirkelende beweging uitgevoerd, waardoor het materiaal enigszins trechtersvorming wordt doorboord. De druk op het plaatmateriaal, de stuwdruk, is hier relatief laag. De inkomende straal en het snedemateriaal worden zijdelings weggeworpen. Met deze betrekkelijk snelle wijze van insteken is het echter niet mogelijk om een startgat op de te snijden contour zelf te maken; het brengt teveel onnauwkeurigheid met zich mee.
- ▶ *Stilstaande snijkop*: de snijkop bevindt zich op een vaste positie boven het plaatmateriaal. In het te snijden materiaal ontstaat een hoge stuwdruk, waardoor de weerkaatste straal relatief veel energie aan de invallende straal onttrekt. Zeker bij harde materialen is deze wijze van insteken ongebruikelijk; de grote energie-inhoud van de weerkaatste straal heeft een snelle slijtage van de straalbuis ten gevolge. Bij het insteken van laminaatmateriaal treedt delaminatie van het plaatmateriaal al snel op. Voor zachte materialen is dit echter wel een goede en snelle procedure.
- ▶ *Heen en weer bewegen*: de snijkop wordt een aantal malen heen en weer bewogen, waardoor een langwerpige startgat ontstaat. Hierbij treedt weinig stuwdruk op in het plaatmateriaal. Een negatief bijeffect is

echter hevig spatten. Deze procedure wordt zowel in de gewenste contour als in stroken afvalmateriaal toegepast.

Tijdens het snijden van de contour beweegt de snijkop zich zoveel mogelijk met een constante snelheid ten opzichte van het plaatmateriaal. Bij kleine afrondingen en scherpe hoeken wordt de snelheid echter verlaagd, omdat de ontstane snede anders niet aan gestelde kwaliteitseisen zal voldoen.

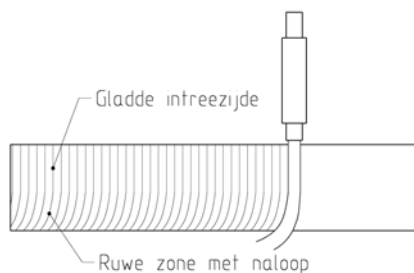
Onder het bed bevindt zich een opvangbak voor het water, abrasief en snedemateriaal. Deze laatste twee vormen samen de zogenaamde "slurry". In de opvangbak bevindt zich vaak een energie-absorptiezone; een soort ballenbak, die meebeweegt met manipulaties van de snijderkop.

Door het absorberen van de nog hoge energie van de waterstraal, wordt voorkomen dat delen van het onderbed of de afvoer worden beschadigd.

### Productkwaliteit

De snijnsnelheid heeft een zeer grote invloed op de uiteindelijke snedekwaliteit. Belangrijk met betrekking tot de kwaliteit van de snede en de snijparameters zijn hierbij de materiaaleigenschappen (hardheid, sterkte, elasticiteitsmodulus) en de plaatdikte. Bij het waterstraalsnijden wordt het water door het plaatmateriaal steeds verder vertraagd; hoe verder men naar beneden gaat in de plaat, hoe langer de straal naijlt op de inkomende straal. Hierdoor ontstaan er kromme lijntjes in het snedeoppervlak. Als er bij het maken van een hoek geen snelheid wordt teruggenomen, zal de naijlende straal in het materiaal als het ware een kortere weg dan de inkomende straal gaan volgen, waardoor het materiaal wordt afgerond.

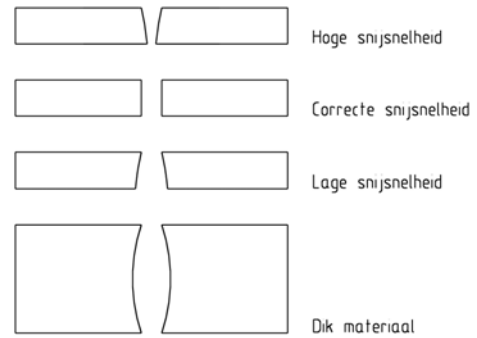
Het snedeoppervlak wordt vaak ingedeeld in twee zones; de gladde zone aan de intreezijde en de ruwere zone daaronder, die de nalooop (zie figuur 13) bevat. De mate van nalooop is in sterke mate afhankelijk van de toegepaste snijnsnelheid. Voor iedere plaat is er een maximale snijnsnelheid te bepalen. Wordt een plaat met de maximale snijnsnelheid gesneden, dan ontstaat een zogenaamde "geslitte snede". Hierbij wordt er niet gekeken naar de kwaliteit van de snede, maar wordt het proces juist geoptimaliseerd naar snelheid. De "kwaliteitssnede" ontstaat als er wordt gesneden op de helft van de maximale snijnsnelheid. De goede snedekwaliteit wordt met economisch rendabele snelheden behaald. Bij de "fijne snede" ligt de snijnsnelheid op een kwart van het maximum. De snedekwaliteit is hierbij erg hoog.



figuur 13 Aanzicht van een snedeoppervlak

De bovenzijde van de snijspleet heeft steeds dezelfde breedte als de diameter van de straalbuis, verder naar beneden in het plaatmateriaal hoeft dit niet langer het geval te zijn. Voorbeelden van gevallen waarin dit niet zo is, zijn weergegeven in figuur 14.

In veel gevallen is het mogelijk om een stapel producten in één snijgang te snijden. Hoe meer hoeken een product bevat, hoe minder hoog deze stapel kan zijn. Vaak geldt een maximum van enkele millimeters hoogte. Tussen de platen mag geen luchtspleet aanwezig zijn; de pakketten moeten daarom heel goed worden aangedrukt.



figuur 14 Verschillende snijspleetgeometrieën

## 3 Thermische scheidingstechnieken

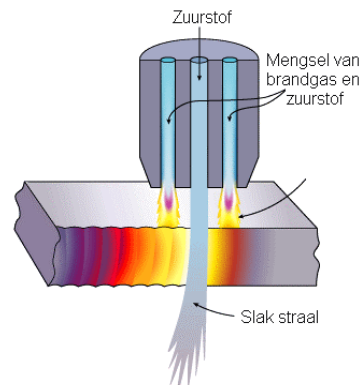
Door de warmte-inbreng bij thermische scheidingstechnieken kunnen ongewenste effecten optreden, zoals structuurumzettingen direct naast de snede, materiaalvervormingen en oxidatie van het snijvlak. Tegenover deze nadelen staan de volgende voordelen:

- ▶ toepasbaar op kleine en grote materiaaldiktes;
- ▶ vormvrijheid;
- ▶ hoge snijnsnelheden;
- ▶ lage kosten per meter snijlengte.

In dit hoofdstuk worden de technische aspecten besproken van het autogeen, plasma- en lasersnijden.

### 3.1 Autogeen snijden

Autogeen snijden is een thermisch scheidingsproces met een lange historie. Het principe van het autogene snijproces wordt in figuur 15 weergegeven. Een mengsel van zuurstof en een verhittingsgas wordt gebruikt om het metaal tot een hoge temperatuur te verhitten.



figuur 15 Schematische weergave van het autogeen snijden

Voor staal ligt dit rond 1100 °C (vlamkleur helderrood), wat ver onder het smeltpunt van het te snijden materiaal ligt. Een zuurstofstraal wordt aansluitend op de verhitte plaats gericht, waarna een sterke exotherme reactie tussen het metaal en de zuurstof wordt gestart, wat uiteindelijk resulteert in de vorming van een oxide of slak. De zuurstofstraal blaast de slak weg, waardoor de straal uiteindelijk door het volle materiaal snijdt. Er is een aantal basisvoorwaarden waaraan een materiaal moet voldoen om succesvol autogeen te kunnen worden gesneden. De belangrijkste zijn [26]:

- ▶ De ontstekingstemperatuur moet voldoende onder de smelttemperatuur liggen. Is dit niet het geval, dan zal het materiaal al smelten voor het gesneden wordt.
- ▶ Het smeltpunt van de ontstane slak moet lager zijn dan van het basismateriaal. Is dit niet het geval, dan kan de slak niet door de zuurstofstraal uit de snede worden geblazen en zal deze zich aan de onderkant hechten. Voorbeelden hiervan zijn roestvast staal en aluminium.

- De exotherme reactie tussen de zuurstofstraal en het basismateriaal moet zoveel warmte genereren, dat de ontstekingstemperatuur gehandhaafd blijft.

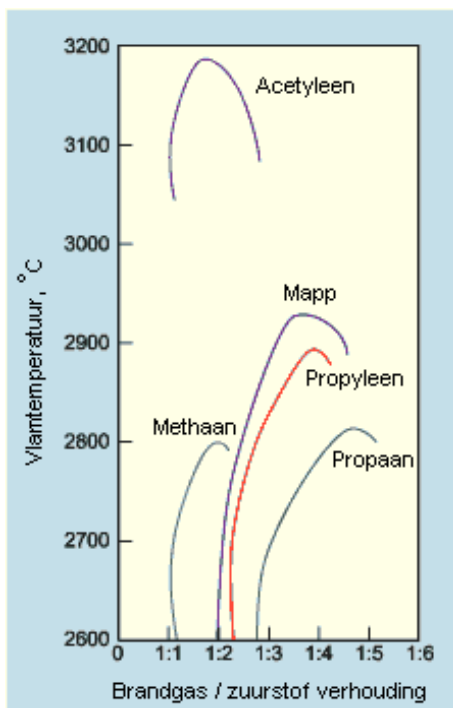
Alleen on- en laaggelegeerd staal voldoen hieraan.

De meest gebruikte verhittingsgassen zijn acetyleen, propyleen, propaan, aardgas en mengsels van vloeibare koolwaterstoffen; vaak aangeduid als Mapp-S® [24, 26]. Een aantal belangrijke eigenschappen van deze verhittingsgassen wordt in tabel 3 weergegeven. Andere karakteristieken, zoals de benodigde voorwarmtijd, snijsnelheid en gatsteeksnelheid, worden bepaald door de vlamtemperatuur, verbrandingswaarde en verbrandingssnelheid [27].

tabel 3 Eigenschappen van de diverse verhittingsgassen [27]

verhittingsgas	maximale vlamtemperatuur °C	gas/zuurstof verhouding
acetyleen	3160	1,5 : 1
propaan	2810	4,3 : 1
propyleen	2872	3,7 : 1
aardgas	2770	1,8 : 1
Mapp-S®	2927	3,3 : 1

De hoge vlamtemperatuur (zie figuur 16) en de gerichte vlam maken acetyleen tot het ideale gas voor het, met een minimum aan vervorming, snijden van dunne plaat. De snijsnelheid en de snedekwaliteit worden voor een groot deel door de zuiverheid van de zuurstof (nodig voor metaalverbranding) bepaald. Via het ontwerp van het snijmondstuk kunnen zodanige condities worden geschapen, dat de zuurstofstraal niet door de omgevingslucht wordt verontreinigd. De scherpere vorm van de acetyleenvlam zorgt ervoor dat zowel de gatsteeksnelheid als de snijsnelheid hoger zijn dan bij alle andere snijgassen. Propaan, dat naast acetyleen voor het autogeen snijden veel wordt toegepast, heeft, zoals te zien is in figuur 16, een lagere vlamtemperatuur. Het zuurstofverbruik bij de maximale vlamtemperatuur ligt bij propaan hoger dan bij acetyleen, zoals blijkt uit figuur 16.

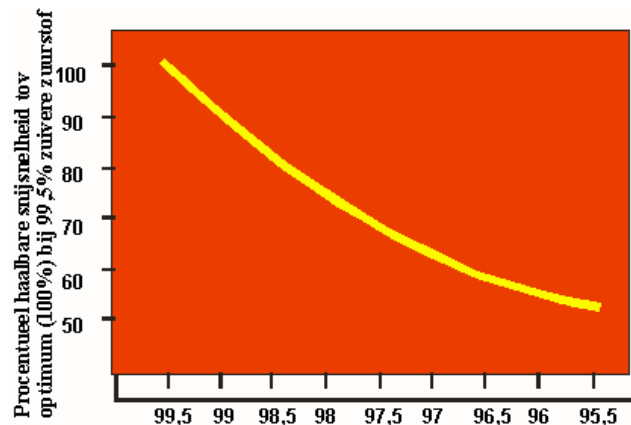


figuur 16 Vlamtemperatuur bij verschillende brandergassen en zuurstof/gasverhoudingen [27, 49]

Propyleen is vergelijkbaar met MAP-S®, terwijl aardgas (methaan) de laagste vlamtemperatuur heeft, alsmede de laagste (primaire) verbrandingswaarde van alle hier genoemde verhittingsgassen. De vlamtemperatuur is vergelijkbaar met die van propaan, maar het is met name de geringe (primaire) verbrandingswaarde die dit gas minder geschikt maakt voor het autogeen snijden. Een voordeel van aardgas is wel, dat dit het goedkoopste gas is dat voor het autogeen snijden kan worden ingezet.

De keuze voor een verhittingsgas is doorgaans gebaseerd op een aantal factoren, waaronder de kostprijs van het betreffende gas, dit is, zij het in geringe mate, terug te vinden in de kostprijs per gesneden meter of gesneden product. Andere factoren die bij de snijgaskeuze een rol spelen zijn het bij het gas behorende verbruik aan zuurstof, hoe makkelijk het gas bij grootverbruik in bulk is aan te voeren en als laatste kan worden genoemd de haalbare snijsnelheden. Dit laatste is het belangrijkste aspect, omdat de snijsnelheid de uiteindelijke kostprijs bepaalt. Het is zelfs mogelijk dat het duurdere acetyleen door zijn hoge snijsnelheid, veel lagere snijkosten tot gevolg heeft.

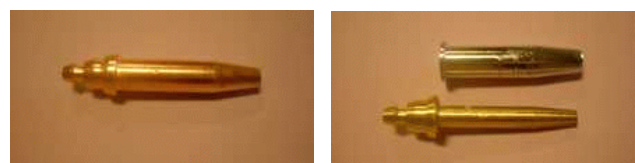
De zuiverheid van de zuurstof voor het autogeen snijden moet minstens 99,5% zijn. Hoe belangrijk dit is, blijkt wel uit het feit, dat een daling van de zuurstofkwaliteit met 1% een daling van de snijsnelheid geeft met gemiddeld 15% (zie figuur 17). Dit vertaalt zich direct in hogere kosten bij het snijden. Hoewel plasmasnijden en lasersnijden voor bepaalde toepassingen steeds meer ingang vinden, blijft het autogeen snijden bij scheiden van laag- en ongelegeerd staal nog steeds een belangrijke plaats innemen.



figuur 17 Invloed van de zuiverheid van de snijzuurstof op de snijsnelheid [29]

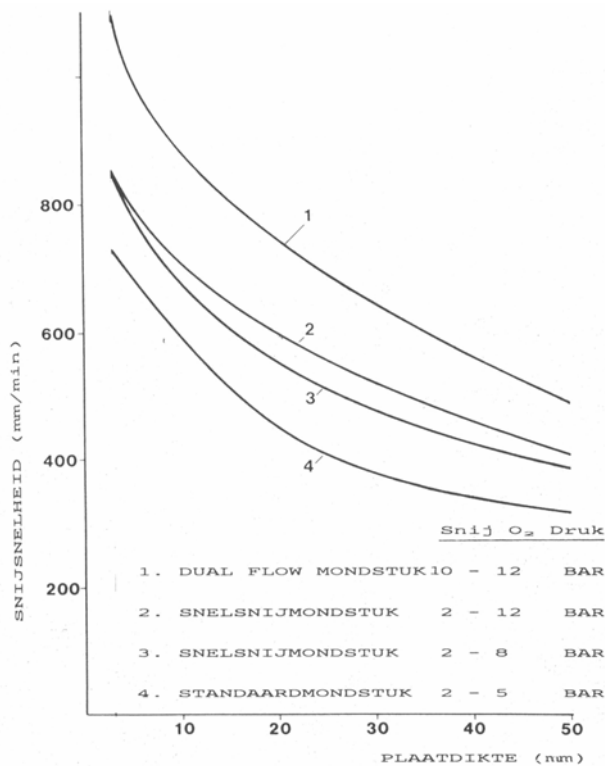
### Snijmondstuk

Het snijmondstuk (snijbek) moet aangepast zijn aan de te snijden materiaaldikte en het snijgas. Het snijmondstuk speelt een belangrijke rol bij de uiteindelijke kwaliteit van de snede. In de loop der jaren zijn er vele snijmondstukken ontwikkeld en is er veel onderzoek uitgevoerd naar de optimalisatie van snijmondstukken voor het autogeen snijden. Figuur 18 toont enkele veel gebruikte snijmondstukken. Moderne snijmondstukken hebben vaak een roestvaststalen binnenwerk, waarmee de standtijd van het mondstuk aanzienlijk kan worden verlengd.



figuur 18 Enkele typen snijmondstukken [46]

Het standaard mondstuk heeft doorgaans een parallelle boring voor de zuurstof met hier omheen een ring van gaatjes voor de voorwarmvlam. Naast de standaard mondstukken zijn er ook zogenaamde snelsnijmondstukken verkrijgbaar (fijnstraalsnijden, zie 3.1.1); hiervoor is aangepaste snijapparatuur noodzakelijk. Figuur 19 geeft een overzicht van de snijnelheden die met de verschillende snijmondstukken kunnen worden bereikt bij het autogeen snijden.



figuur 19 Overzicht van de snijnelheden die met de verschillende snijmondstukken kunnen worden bereikt bij het autogeen snijden [35]

### Snijbranders of -toortsen

Bij de snijbranders is er sprake van twee types, te weten de gelijke druk brander en de injectorbrander. In het eerste geval worden het verhittingsgas en de zuurstof met gelijke druk aangevoerd en vindt de menging in de snijbek plaats. Bij de injectorbrander vindt de menging m.b.v. een injector plaats, die in de brander ingebouwd is. Het voordeel bij de injectorbrander is, dat er met een hogere zuurstofdruk en een lage verhittingsgas druk kan worden gewerkt. Hiernaast kennen we nog speciale snijbranders voor het fijnstraalsnijden, zie § 3.1.1.

### Het autogeen snijden van dunne staalplaat

Eén van de problemen bij het autogeen snijden van plaat van 2 tot 3 mm is de vervorming, die ontstaat door de warmte-inbreng van de voorwarmvlam. De voorwarmvlam is nodig om het materiaal op ontstekings temperatuur te brengen en, tijdens de hoge snijnelheden bij dunne plaat, te houden. Omdat er bij het snijden van dun materiaal maar weinig materiaal wordt verbrand, komt er ook maar weinig warmte vrij. Het gevolg daarvan is, dat de invloed van de voorwarmvlam op het plaatoppervlak juist voldoende is om het snijproces doorgang te laten vinden. Om te voorkomen dat de brander uit de snede loopt (het snijproces stopt dan door het ontbreken van de voorwarmvlam/ontstekings temperatuur) wordt in de praktijk bij het snijden van dunne plaat de voorwarmvlam doorgaans veel te groot afgesteld. Het materiaal zet daardoor meer uit dan wenselijk is, waardoor er veel spanningen in het materiaal worden ingebracht.

Hierdoor ontstaan er vooral bij dunne plaat grote vervormingen. Bij dik materiaal treedt dit verschijnsel in veel mindere mate of geheel niet op. Ook zijn in dun plaatstaal vaak al (eigen)spanningen aanwezig, ontstaan tijdens het walsen van de plaat. Door een te grote warmte-inbreng bij het autogeen snijden kan de plaat bollen en kromtrekken.

Het vrijkomen van deze (eigen)spanningen kan ook vrij plotseling optreden. De plaat springt dan enkele centimeters omhoog. Daarbij kan het snijmondstuk worden geraakt en beschadigd. Wanneer de snede opnieuw wordt voortgezet, resulteert dit altijd in beschadiging van het werkstuk.

Minder extreme vervormingen veroorzaken tenminste maatafwijkingen. Het is dus van groot belang zo min mogelijk warmte in te brengen bij het autogeen snijden van dunne materialen. In de praktijk houdt dit in dat het afstellen van de apparatuur, de selectie van verhittings- en snijgassen, de zuiverheid van de gebruikte gassen, de kwaliteit van de brandermondstukken enz, aanzienlijk kritischer zijn bij het autogeen snijden van dunne plaat, dan bij het snijden van dikke plaat.

### Tegengaan van vervorming tijdens het autogeen snijden

Wanneer er grote aantallen gelijkvormige werkstukken moeten worden gesneden uit dun plaatmateriaal, is het pakketsnijden een economische manier van snijden. De problemen van vervorming doen zich bij deze methode van snijden niet voor. Bij het pakketsnijden worden de te snijden platen zodanig op elkaar geklemd, dat er tussen de platen onderling zo min mogelijk ruimte aanwezig is. Op deze wijze kunnen met succes dunne platen zonder al te veel vervormingen worden gesneden. Het zal duidelijk zijn dat de platen schoon en vrij van roest en coatings moeten zijn.

Vervorming kan ook worden tegengegaan wanneer er tijdens het snijden wordt gekoeld met behulp van een zogenaamde waterdouche, die zich gecentreerd rond het snijmondstuk bevindt. Deze manier van koelen heeft echter ook nadelen. De hoge temperatuur van het snijproces in combinatie met het koelwater heeft een snelle oxidatie tot gevolg. Ook moeten voorzieningen worden getroffen om het gebruikte water op te vangen.

### Kwaliteit van de snede

[9] geeft een aantal richtlijnen ter beoordeling van de snedekwaliteit. Deze kwaliteitsbeoordeling is gebaseerd op de rechtheid van de snede en de ruwheid van de snijkanten. De rechtheid van de snede is in het algemeen bij dunne plaat geen probleem.

Door verkeerde instellingen kunnen tal van snijfouten ontstaan, zoals slakaanhechting of een aangesmolten en afgeronde bovenkant van de snede. Het streven bij het autogeen snijden is een maximale snijnelheid en een goede snedekwaliteit te bereiken.

Het is daarom aan te bevelen, afhankelijk van de te snijden materiaaldikte, met de optimalisatie van de volgende snijparameters rekening te houden:

- ▶ Afstand snijmondstuk tot werkstuk. Zowel een te grote als een te kleine afstand zal de gerichte zuurstofstraal verstoren en tot een slechte snedekwaliteit leiden.
- ▶ De voorwarmvlam. Een te grote voorwarmvlam kan leiden tot een afgeronde bovenkant van de snede en sterke vervormingen van het plaatmateriaal.
- ▶ Druk van de snijzuurstof. Een te lage zuurstofdruk zal tot een slechte verwijdering van de slak uit de snijvoeg leiden, terwijl een te hoge druk een slechte, holle snede tot gevolg zal hebben (dit laatste is overigens alleen het geval bij dikkere plaat (> 5 mm).

### Het toepassingsgebied van het autogeen snijden

Het autogeen snijden wordt alleen toegepast voor ongelegeerd en laaggelegeerd staal en over het algemeen

bij grotere plaatdiktes. Plaatdiktes vanaf 2 mm komen in aanmerking voor het autogeen snijden. Boven 20 mm is het autogeen snijden het meest toegepaste snijproces voor ongelegeerd en laaggelegeerd staal, hoewel het autogeen snijden in dit plaatdiktebereik steeds meer concurrentie krijgt van het plasmasnijden. Producten kunnen met rechte en contoursnedes worden vervaardigd met een maattolerantie van circa 1,0 mm, afhankelijk van de nauwkeurigheid van de branderbeweging (zie tabel 1). De voorwarmvlam en de proceswarmte zijn zodanig groot, dat bij het snijden van dunne plaat altijd met vorming tengevolge van de ingebrachte warmte rekening moet worden gehouden. De hardheid van het snedeoppervlak is bij het conventionele autogeen snijden door de hoge ingebrachte warmte echter laag in vergelijking met andere thermische scheidingsprocessen, hetgeen een voordeel kan zijn. Enkele kenmerkende waarden voor het autogeen snijden van dunne plaat zijn weergegeven in tabel 4.

tabel 4 Enkele karakteristieke instellingen en gegevens voor het autogeen snijden van dunne plaat [27, 43]

plaatdikte (mm)	acetyleneedruk (bar)	voorwamdruk (bar)	snijzuurstofdruk (bar)	snij snelheid (mm/min)	mondstuk-plaatafstand (mm)	snijvoegbreedte (mm)	acetyleen verbruik (m <sup>3</sup> /uur)	voorwarm zuurstof verbruik (m <sup>3</sup> /uur)	snijzuurstof verbruik (m <sup>3</sup> /uur)	totaal zuurstof verbruik (m <sup>3</sup> /uur)
2	0,5	2,5	2	900	3-4	1,0	0,36	0,47	0,35	0,82
3	0,5	2,5	2	850	3-4	1,0	0,36	0,47	0,40	0,87
4	0,5	2,5	2,5	800	3-4	1,0	0,36	0,47	0,46	0,93
5	0,5	2,5	3	750	3-4	1,0	0,36	0,47	0,52	0,99

Een voorwaarde voor de aangegeven snij snelheden is, dat de juiste druk voor het verhittingsgas, de voorwarmvlam en de snijzuurstof wordt ingesteld en dat gebruik wordt gemaakt van een stabiele snijmachine. Een belangrijk aspect van het autogeen snijden is, dat het gemechaniseerd kan worden uitgevoerd door middel van CNC gestuurde portaalsnijmachines. Het gebruik van meerdere snijkoppen op dergelijke apparatuur maakt dat de snijcapaciteit aanzienlijk kan worden verhoogd [27]. Ook kan de autogene snijapparatuur aan knikarmrobots worden gekoppeld, zodat 3D-snijden tot de mogelijkheden behoort (bijvoorbeeld voor het afkorten van stalen balken).

### 3.1.1 Fijnstraalsnijden

De belangrijkste verschillen van het autogeen fijnstraalsnijden ten opzichte van het conventionele autogeen snijden, zijn enerzijds de hoge snijzuurstofdruk en anderzijds de toepassing van een conische boring van het snijzuurstofkanaal in de snijmondstuk in plaats van een cilindrische, zoals bij de meeste conventionele snijmondstukken wordt gebruikt. Door toepassing van het fijnstraalsnijproces is een snij snelheidsverhoging van 20 tot 40% ten opzichte van het conventionele autogeen snijden haalbaar. De snedekwaliteit is zeer goed. De snijgroefbreedte is bij het fijnstraalsnijden, afhankelijk van snedevorm en snijmondstuk, 15 tot 40% kleiner dan bij een conventioneel snijmondstuk [27]. Voor toepassing van het fijnstraalsnijden moet een aantal aanpassingen aan de snijapparatuur worden uitgevoerd. De fijnstraalsnijmondstukken zijn alleen geschikt voor injecteurbranders en passen dus niet op ieder merk brander. Tevens zal er een

aanpassing van het snijzuurstofgedeelte van de snijmachine moeten plaatsvinden. Zuurstofslangen, drukmeters en magneetventiel moeten worden aangepast aan een zuurstofdruk van 20 bar.

Fijnstraalsnijden wordt alleen machinaal toegepast; de snedekwaliteit is sterk afhankelijk van een constante afstand van het snijmondstuk tot het werkstukmateriaal.

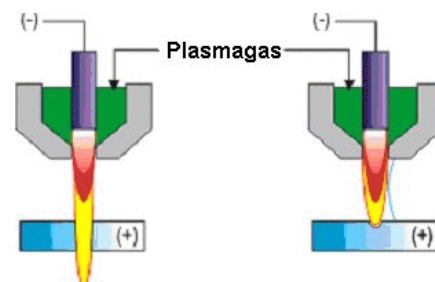
## 3.2 Plasmasnijden

Ruim vijftien jaar geleden vonden de eerste ontwikkelingen plaats op het gebied van het plasmasnijden vanuit de behoefte om metalen die niet of moeilijk autogeen te snijden waren toch te kunnen snijden. Tegenwoordig is het plasmasnijden uitgegroeid tot een volwaardige snijtechniek met een breed toepassingsgebied en veel varianten [25, 28, 35, 38, 39, 41, 42]. In de beginjaren werd het plasmasnijden vooral ingezet voor het snijden van roestvast staal en aluminium, tegenwoordig wordt het plasmasnijden echter ook steeds meer ingezet voor het snijden van ongelegeerd en laaggelegeerd staal. Het lasersnijden is vooral ten aanzien van het snijden van dunne materialen een belangrijke concurrent voor het plasmasnijden, vooral bij het snijden van dunne materialen (< 2 mm). Onder de 1,5 mm materiaaldikte is het lasersnijden zelfs aanzienlijk sneller dan het plasmasnijden. Een voordeel van het plasmasnijden is, dat het met de hand kan worden uitgevoerd, mits de verkregen snedekwaliteit voldoet aan de eisen. Dit wordt bijvoorbeeld veel toegepast voor het maken van gaten in luchtkanalen.

Door de ontwikkeling van nieuwe procesvarianten blijft het plasmasnijden echter een interessant alternatief (zowel technisch als economisch) voor zowel het autogeen snijden (van staal) als het lasersnijden van staal en andere materialen. Afhankelijk van het type materiaal, de materiaaldikte en het vermogen van de plasmasnijinstallatie is in de loop der jaren een aantal varianten ontwikkeld voor uiteenlopende toepassingen. In principe onderscheiden deze varianten zich van elkaar door het ontwerp van de toorts, het materiaal van de kathode, het gebruikte snijgas en eventueel het gebruik van een secundair medium (gas/water). Bij het plasmasnijden van dikkere materialen (> 4 mm) moet altijd rekening worden gehouden dat er een asymmetrische (beide kanten schuin of één kant schuin en de andere zijde recht - afhankelijk van het ontwerp van de snijtoorts) snede wordt verkregen. Het is meestal gebruikelijk de toortsstand, bij het plasmasnijden waarbij één schuine kant wordt verkregen, zodanig te kiezen dat de rechte kant aan de onderdeeltzijde komt te zitten. Voor dunne plaat (≤ 3 mm) is deze asymmetrische snede ook aanwezig, alleen zijn de verschillen door de geringe plaatdikte over het algemeen verwaarloosbaar.

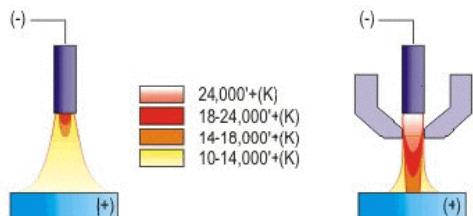
### Principe

Bij het plasmasnijden wordt een elektrische boog getrokken tussen een niet-afsmeltende elektrode en het werkstuk. Deze boog wordt ook wel de overgedragen boog of hoofdboog genoemd (zie figuur 20).



figuur 20 Overgedragen (links) en niet-overgedragen (rechts) plasmaboog [49]

Om deze hoofdboog te kunnen ontsteken en te stabiliseren, wordt gebruikgemaakt van een zogenaamde hulpboog met een laag vermogen. Deze hulpboog wordt tussen de elektrode en het meestal watergekoelde koperen snijmondstuk ontstoken. De hulpboog zelf wordt ontstoken door middel van een hoogfrequente hulpspanning. Het (watergekoelde) koperen snijmondstuk zorgt ervoor, dat de plasmaboog sterk wordt ingesnoerd. Door de sterke booginsnoering gaat enerzijds de temperatuur van de boog sterk omhoog (ca. 24.000 K, zie figuur 21) en anderzijds krijgen de uitstromende gassen een zeer hoge snelheid met een overeenkomstige grote kinetische energie. Het resultaat hiervan is een zeer dunne, energierijke en zeer stabiele plasmaboog.



figuur 21 Verschil (temperaturen en vorm) tussen een TIG lasboog (links) en een plasmaboog (rechts) [49]

Een belangrijk verschil tussen het plasmasnijden en het autogeen snijden is, dat bij het plasmasnijden het materiaal alleen door de boog tot smelten wordt gebracht en aansluitend door de kinetische energie van de plasmagasstroom uit de snede wordt verwijderd. Bij het autogeen snijden wordt het materiaal door de zuurstofstraal verbrand en wordt de dunvloeibare slak uit de snede geblazen. Hierdoor is het plasma snijproces ook te gebruiken voor materialen die voor het autogeen snijden niet geschikt zijn, zoals roestvast staal en aluminium. Bij een conventioneel plasmasnijstelsel wordt in de snijtoorts gebruikgemaakt van een wolframelektrode en wordt als snijgas argon, een argon/waterstof mengsel of stikstof gebruikt. Er kan ook gebruik worden gemaakt van oxiderende gassen of gasmengsels, zoals lucht en zuurstof. In het laatste geval kan geen gebruik worden gemaakt van een wolframelektrode, maar wordt een hafnium inzetstuk gebruikt. De hoeveelheid plasmagas moet in overeen-

stemming zijn met de gebruikte snijstroom en de diameter van de boring in het snijmondstuk. Beiden zijn weer afhankelijk van het te snijden materiaal en de te snijden materiaaldikte.

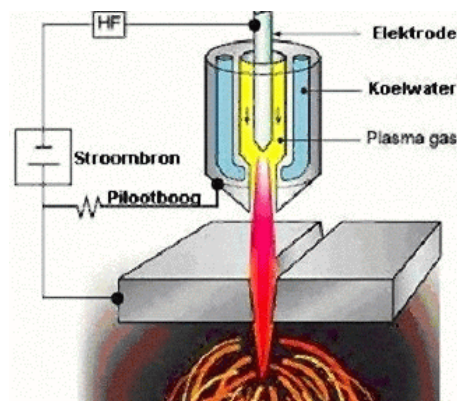
### Procesvarianten

Sinds de invoering van het plasmasnijden zijn er vele procesvarianten ontwikkeld, die elk hun specifieke toepassingsgebied kennen. Aanleiding voor het ontwikkelen van deze nieuwe varianten was vooral het kunnen snijden van dunnere dan wel dikkere metalen, het verbeteren van de snijkwaliteit en het verhogen van de snij-snelheden en een betere beheersing van de bij het snijden vrijkomende snijrook.

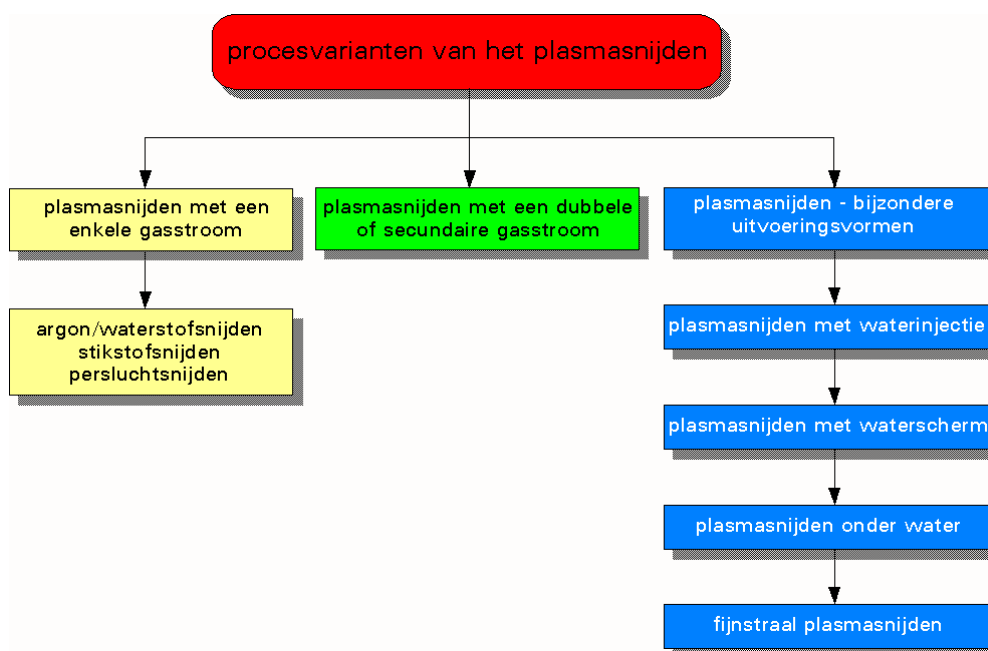
Figuur 22 geeft een overzicht van de belangrijkste varianten die in de loop der jaren ontwikkeld zijn.

#### 3.2.1 Plasmasnijden met een enkele gasstroom

Bij de conventionele methode van het plasmasnijden wordt uitsluitend gebruikgemaakt van snijtoortsen waarin alleen de boog door middel van een goed gekoeld snijmondstuk wordt ingesnoerd. Hierbij zijn twee uitvoeringen mogelijk, namelijk een gasgekoelde en watergekoelde snijtoorts. In figuur 23 is het conventionele plasmasnijden schematisch weergegeven voor een watergekoelde lastoorts.



figuur 23 Principe van het conventionele plasmasnijden met een watergekoelde snijtoorts [49]



figuur 22 Varianten van het plasmasnijden [25, 28, 35, 38, 41, 42]

De bij het conventionele plasmasnijden gebruikte gas-  
sen zijn:

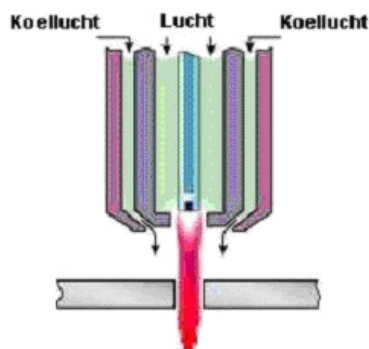
- Argon/waterstof, hierbij zijn diverse mengverhoudin-  
gen mogelijk.
- Stikstof, als extra koeling (insnoering van de boog).
- Perslucht.

Argon/waterstof en stikstof worden vooral gebruikt voor  
het snijden van non-ferro metalen en roestvast staal,  
terwijl het plasma(pers)luchtsnijden wordt gebruikt voor  
het snijden van ongelegeerd staal.

Het conventionele plasmasnijden wordt in de praktijk nog  
steeds het meest toegepast, zowel bij het handmatig  
snijden als het gemechaniseerd snijden.

### 3.2.2 Het plasma(pers)luchtsnijden

In de beginfase werd het plasmasnijproces uitsluitend  
toegepast voor materialen die met conventionele auto-  
gene snijapparatuur niet konden worden gesneden. De  
kostprijs van de inerte snijgassen maakte het plasma-  
snijden te kostbaar voor het snijden van ongelegeerde  
staalsoorten. Met de toepassing van perslucht als snij-  
gas is een aanzienlijk economisch voordeel ontstaan,  
waardoor het ook financiële voordelen biedt om ongele-  
geerde staalsoorten door middel van het plasmasnijden  
te scheiden. Het plasmaluchtsnijden (zie figuur 24) ge-  
bruikt als plasmagas uitsluitend perslucht. Omdat het  
elektrodemateriaal niet of zeer beperkt in zuurstof mag  
verbranden, wordt doorgaans hafnium of zirkonium als  
elektrodemateriaal gebruikt. Deze materialen vormen in  
verbinding met zuurstof aan het oppervlak een hoog-  
smeltende, elektrisch geleidende film, die de elektrode  
beschermt. Voor het plasmasnijden met gasen die geen  
zuurstof bevatten, zijn deze elektroden overigens niet  
geschikt, dan wordt meestal een wolframelektrode ge-  
bruikt. De snedekwaliteit is over het algemeen goed.  
Het plasma(pers)luchtsnijden is zeer geschikt voor het  
snijden van dunne materialen (vanaf 1 mm). Hierbij kun-  
nen zeer hoge snij snelheden worden bereikt (bij dunne  
plaatmaterialen ongeveer 6 m/min), met beperkte warmte-  
inbreng tijdens het snijden. Hierdoor zijn de vervormin-  
gen bij het snijden van plaatdiktes tot 3 mm klein.



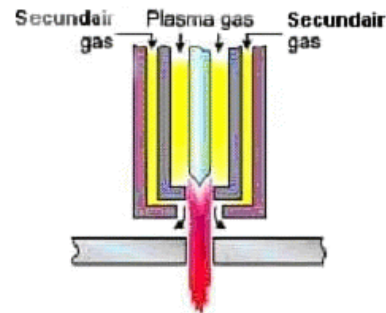
figuur 24 Plasmasnijden met perslucht [49]

Het optredende lawaai bij het plasma(pers)luchtsnijden  
is aanzienlijk en er komen veel stoffen vrij (vooral snij-  
rookdeeltjes) tijdens het snijden [28, 34]. Uit arbeids-  
hygiënisch oogpunt moet om deze reden een krachtige  
afzuiging met filterapparatuur worden geïnstalleerd. Het  
plasmaluchtsnijden is zonder meer in staat met het auto-  
geen snijden in zijn traditionele toepassingsgebied -het  
snijden van koolstofstaal- te concurreren.

### 3.2.3 Plasmasnijden met een secundaire gasstroom

Door gebruik te maken van een extra secundaire gas-  
stroom, die als een mantel om de plasmaboog wordt ge-  
formeerd, wordt de plasmaboog nog verder ingesnoerd.  
Hierdoor lopen de energiedichtheid en de temperatuur  
nog verder op. Schematisch is deze methode in figuur 25  
weergegeven. De voordelen van het plasmasnijden met

een secundaire gasstroom ten opzichte van de conven-  
tionele methode zijn vooral de hogere snij snelheden en  
een vermindering van de afronding aan de bovenkant  
van de snede.



figuur 25 Plasmasnijden met een stroom van secundair  
gas [49]

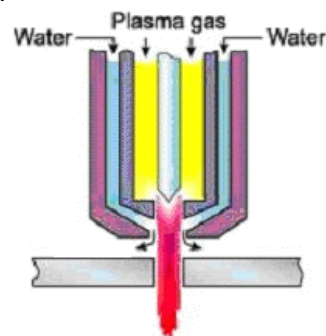
De constructie van de snijtoorts maakt het mogelijk dat  
er een wolframelektrode kan worden gebruikt, zelfs als  
er met actieve gasen, zoals lucht of zuurstof wordt  
gewerkt als secundair gas.

Voorzien van een aangepaste constructie kan dit type  
snijbrander ook voor het onderwatersnijden worden  
toegepast. Het principe van het plasmasnijden met een  
secundaire gasstroom is gelijk aan het conventionele  
plasmasnijden. Het plasmagas is doorgaans argon, een  
argon/waterstof mengsel of stikstof. De samenstelling  
van het tweede gas wordt bepaald door het te snijden  
materiaal:

- ▶ Staal: lucht, zuurstof of stikstof.
- ▶ Roestvast staal: stikstof, argon/waterstof mengsel of CO<sub>2</sub>.
- ▶ Aluminium: argon/waterstof mengsel of stikstof.

### 3.2.4 Plasmasnijden met waterinjectie

Bij het plasmasnijden met waterinjectie wordt in het  
mondstuk tangentieel water geïnjecteerd (zie figuur 26).  
Hierdoor wordt de plasmastraal sterk ingesnoerd, wat  
samen met de dissociatie en recombinatie van een ge-  
deelte van het water leidt tot een zeer energierijke  
plasmaboog met een temperatuur van circa 30.000 °C.  
Het proces leent zich vooral voor het plasmasnijden on-  
der water.



figuur 26 Plasmasnijden met waterinjectie [49]

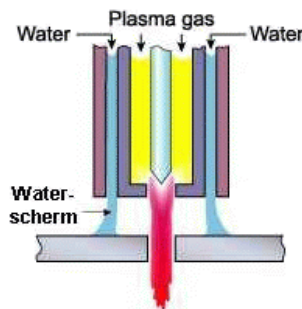
Voordelen van het plasmasnijden met waterinjectie zijn:

- ▶ de standtijd van het mondstuk wordt gunstig beïn-  
vloerd, doordat de hete plasmaboog het snijmondstuk  
niet extra verhit;
- ▶ het werkstuk wordt sterk gekoeld, waardoor minder  
oxiden aan het snedeoppervlak ontstaan;
- ▶ door de koeling van het werkstuk ontstaan minder  
vervormingen.

Het plasmasnijden met waterinjectie wordt veelal uitge-  
voerd met stikstof als plasmagas. De materiaaldikte die  
kan worden gesneden en de snij snelheden hangen af  
van een aantal factoren, zoals het vermogen van de  
installatie en de gekozen snijgassen.

### 3.2.5 Plasmasnijden met een waterscherm/-douche

Het met water omgeven van de plasmastraal (zie figuur 27) is een methode om het geluid, de straling en de snijrook sterk te verminderen. Ook wordt een langere levensduur van het snijmondstuk verkregen. Hoe effectief de toepassing van een watergordijn op de verlaging van de geluidsoverlast is, blijkt uit metingen. Bij het conventionele plasmasnijden met relatief hoge stroomsterkten wordt een geluidsniveau van ca. 115 dB gemeten. Bij het snijden met een waterscherm daalt dit naar ca. 96 dB, hetgeen echter nog wel te hoog is om zonder gehoorbescherming te werken (wettelijke grens  $\leq 80$  dBA).



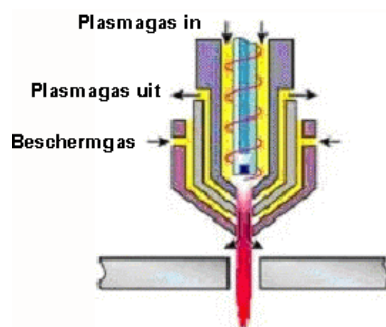
figuur 27 Plasmasnijden met een waterscherm [47]

### 3.2.6 Plasmasnijden in combinatie met een water-tafel (plasma onderwatersnijden)

Bij het plasma onderwatersnijden ligt het werkstuk onder water. Het doel hiervan is de belasting van het milieu door straling, geluidsoverlast en damp te verminderen. Het grootste effect wordt bereikt bij het snijden met een plasmatoorts met een secundaire gasstroom of waterinjectie en het werkstuk op ca. 60-80 mm onder het wateroppervlak. Aangezien het water slechts beperkt stikstofoxides op kan nemen, blijft afzuiging noodzakelijk. Het plasma onderwatersnijden vraagt meer energie dan het snijden boven water zodat hierbij met de aanschaf van de apparatuur rekening mee moet worden gehouden. In de praktijk kunnen on- en laaggelegeerd staal tot 15 mm en hooggelegeerd staal tot 20 mm economisch onder water gesneden worden. Bij het onderwatersnijden van dunne materialen treedt vrijwel geen vervorming op, tevens is de snijkant nagenoeg oxidevrij. Afhankelijk van de materiaalsoort moet rekening worden gehouden met het opharden van het snijoppervlak. Het geluidsniveau ligt bij onderwatersnijden tussen 52 en 85 dB, zodat veelal zonder gehoorbescherming kan worden gewerkt.

### 3.2.7 Fijnstraal plasmasnijden

Het fijnstraal plasmasnijden (ook bekend onder de Engelse namen High Tolerance Plasma en HyDefinition) maakt gebruik van een zeer sterk ingesnoerde plasma boog (zie figuur 28). De sterke booginsnoering zorgt voor een energiedichtheid die twee- tot driemaal groter is ten



figuur 28 Schematische weergave van het fijnstraal plasmasnijden

opzichte van het conventionele plasmasnijden. Deze sterke booginsnoering wordt verkregen door het boogplasma geforceerd te laten roteren. Bovendien wordt kort voordat de plasmaboog uittreedt nog een tweede gasstroom in het mondstuk geïnjecteerd. Bij sommige systemen wordt soms nog een magneetveld om de plasmaboog aangebracht, waardoor de boog wordt gestabiliseerd en het roteren van de gasstroom beter in stand wordt gehouden. Het resultaat is een snede van een kwaliteitsniveau die het lasersnijden dicht benadert en waarbij de kosten ongeveer een kwart lager liggen dan die van lasersnijden.

Voordelen van het fijnstraal plasmasnijden zijn [32]:

- ▶ de snedekwaliteit ligt tussen die van het conventionele plasma snijden en het lasersnijden;
- ▶ er ontstaat steeds een zeer smalle snede;
- ▶ minder vervorming van het werkstuk, doordat de warmte beïnvloede zone veel kleiner is;
- ▶ twee rechte snijkanten.

### Toepassen van het plasmasnijden

De hoge boogtemperatuur maakt het plasmasnijproces uitermate geschikt voor het snijden van materialen die niet autogeen kunnen worden gesneden. Voor het snijden van onder andere aluminium, koper, brons, mangaanstaal, gietijzer en roestvast staal is men binnen de thermische scheidingstechnieken dan ook aangewezen op het plasma- of lasersnijproces.

Het plasmasnijproces is zowel geschikt voor het snijden van rechte naden, als voor het snijden van willekeurige contouren. In de praktijk betekent dit dat aluminium- en roestvast staal verwerkende bedrijven vaak een enorme tijdswinst kunnen behalen door het toepassen van het plasmasnijproces, gekoppeld aan een grote mate van flexibiliteit ten aanzien van de uit te snijden vormen. Het snijden van ongelegeerd staal met plasma op perslucht heeft vooral bij dunne plaat als voordeel, dat de snijsnelheid hoog is en dus de warmte-inbreng laag, met als gevolg nagenoeg geen vervorming van de plaat. Materiaaldiktes tot 3 mm in staal, roestvast staal en aluminium kunnen probleemloos en met een goede kwaliteit met behulp van het plasmasnijden worden gesneden. Het is ook mogelijk onder een hoek te snijden (max  $45^\circ$ ), bijvoorbeeld voor het aanmaken van lasnaadkanten. Dit vraagt echter om grotere investeringen in vergelijking tot autogeen snijden. Door het plasmasnijden onder water of met toepassing van een waterdouche uit te voeren, blijft de vervorming van de producten beperkt en zijn de arbeidsomstandigheden voor de uitvoerder aanzienlijk gunstiger.

### 3.3 Lasersnijden

Ontwikkelingen op het gebied van het lasersnijden hebben de achterliggende jaren een enorme vlucht genomen. Door de ontwikkeling van de lasertechniek werd de mogelijkheid gecreëerd vooral dunne plaat met een thermisch proces efficiënt en nauwkeurig te snijden. Het lasersnijden is een precisieproces met een zeer goede snedekwaliteit dat zich bij uitstek leent voor geautomatiseerde toepassingen. Onderdelen die met een laser zijn gesneden, kunnen doorgaans zonder enige vorm van nabewerking verder worden gebruikt.

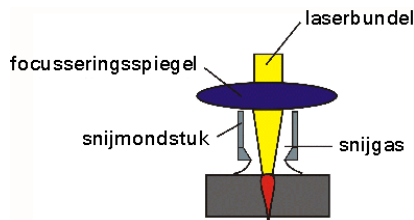
De belangrijkste lasers voor het snijden zijn de CO<sub>2</sub> laser en de Nd:YAG laser; lasers met elk hun eigen kenmerken en toepassingsgebieden. Soms overlappen de toepassingsgebieden elkaar echter gedeeltelijk. De laserbundel kan, afhankelijk van het type laser, worden getransporteerd met behulp van spiegels (CO<sub>2</sub> laser) of een fiber (Nd:YAG laser) [23, 27, 36].

### De laser

Figuur 29 geeft een schematische weergave van het lasersnijden ongeacht het type laser. Er wordt een laserbundel opgewerkt die vervolgens door middel van len-



zen of spiegels wordt gefocuseerd tot een zeer kleine diameter. Hierdoor krijgt de bundel een zeer hoge energiedichtheid, die geschikt is om er metalen en andere materialen mee te snijden. De kwaliteit van de gefocuseerde laserbundel bepaalt, samen met het vermogen, de materiaaldikte die kan worden gesneden in relatie tot de snijsnelheid.



figuur 29 Schematische weergave van een laser voor het snijden [49]

De betere nauwkeurigheid, haaksheid van de snede en geringere warmte-inbreng maken, dat het plasma- en autogeen snijden vaak door lasersnijden wordt vervangen. Lasersnijden kan op drie manieren worden uitgevoerd [23]:

- ▶ Sublimatiesnijden.
- ▶ Smeltsnijden met een niet-actief gas.
- ▶ Brandsnijden met een actief gas (brandsnijden).

### Sublimatiesnijden

Tijdens het sublimatiesnijden wordt het te snijden materiaal verdampt waarna het door de gasstraal uit de snede wordt gedreven. Ten gevolge van de druk van het verdampende gas ontstaat een gaatje die de snede open houdt. Meestal wordt argon of stikstof gebruikt om oxidatie van de snede te voorkomen.

Voor het sublimatiesnijden van metalen wordt meestal een gepulste Nd:YAG laser toegepast (piekvermogens meer dan 2 kW, pulstijden minder dan 1 ms). Een voordeel van sublimatiesnijden is de zeer goede kwaliteit van de snijkant (lage ruwheid), dat wil zeggen dat er nauwelijks snijgroeven zichtbaar zijn. Daarnaast is de warmte beïnvloede zone zeer klein ( $< 0,5$  mm) [23]. Nadelen zijn de hoge benodigde energiedichtheid en een lage snijsnelheid in vergelijking met het smeltsnijden. Daarom wordt sublimatiesnijden voornamelijk toegepast als de eisen aan de snijkant erg hoog zijn, voor het snijden van dunne metalen (folies) en niet metalen, zoals hout, papier, keramiek en kunststoffen. Voor het sublimatiesnijden van niet-metalen worden voornamelijk CO<sub>2</sub> lasers ingezet.

### Smeltsnijden met een niet-actief gas

Bij het lasersmeltsnijden met een niet-actief gas brengt de laser het materiaal tot smelten en zorgt het niet-actieve gas dat het gesmolten metaal uit de snijvoeg wordt geblazen. Meestal wordt stikstof (99,999 %) als niet-actief gas gebruikt of argon (99,996 %). Soms worden bij het stikstofslijden hoge drukken gebruikte (bijvoorbeeld 8 to 20 MPa), waardoor hogere snijsnelheden en een betere snedekwaliteit kunnen worden verkregen. Dit wordt ook wel hoge druk stikstofslijden genoemd. Door het gebruik van een niet-actief gas blijft de snede oxidevrij en braamvrij. De snijsnelheid is afhankelijk van het soort materiaal, de materiaaldikte en het beschikbare laser vermogen. In vergelijking met sublimatiesnijden is smeltsnijden sneller, maar de ruwheid van de snedekant en de warmte beïnvloede zone zijn groter. Een probleem bij het gebruik van een inert snijgas is, dat het gatsteken moeilijker verloopt. Om deze reden wordt voor het gatsteken wel een actief gas (zuurstof) gebruikt, waarna automatisch omgeschakeld wordt op een niet-actief gas voor het snijden.

### Smeltsnijden met een actief gas (brandsnijden)

Het smeltsnijden in combinatie met het gebruik van een actief gas (meestal zuurstof 99,950 % of hoger), wordt het laserbrandsnijden genoemd. Deze techniek wordt zowel bij het laser- als het autogeen (brand)snijden gebruikt. Het materiaal wordt door de laser tot boven de ontstekingstemperatuur verhit, waarna er een exotherme reactie met zuurstof optreedt (verbranding). De hierbij vrijkomende energie kan een veelvoud zijn van de door de laserbundel ingebrachte energie, wat resulteert in snijsnelheden die een factor 2 à 3 hoger liggen dan bij het snijden met een niet-actief gas. Het gesmolten metaal en de metaaldampen worden meegevoerd met de snijgasstroom. Een deel van de oxidatieproducten zet zich echter vast op de snijkant.

Het brandsnijden wordt vrijwel alleen maar toegepast voor het snijden van ongelegeerd en laaggelegeerd staal.

#### 3.3.1 De CO<sub>2</sub> laser voor het snijden van metalen

Het actieve medium bij de CO<sub>2</sub> laser is koolzuurgas (in de laser bevinden zich CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> en He), waarvan de naam van deze laser is afgeleid. Dit maakt dat de CO<sub>2</sub> laser valt in de categorie van de gaslasers. De CO<sub>2</sub> laser genereert een bundel elektromagnetische straling met een golflengte van 10,6  $\mu\text{m}$  (= infrarood), die via een lens in de snijkop op het werkstuk wordt gefocuseerd. De hoge energiedichtheid van de gefocuseerde straal levert de benodigde warmte op om het te snijden materiaal op de ontstekingstemperatuur, smelttemperatuur of verdampingstemperatuur te brengen. De laserbundel kan door middel van spiegels naar het werkstuk worden getransporteerd. In veel gevallen wordt de CO<sub>2</sub> laser gekoppeld aan CNC gestuurde bewegingsapparatuur. Het is mogelijk met dit soort apparatuur in 2D en soms, beperkt 3 D materialen te snijden. Via een speciale buizenconstructie is het mogelijk de CO<sub>2</sub> laser te koppelen aan een robot. Dit blijft echter een veelal dure en kwetsbare oplossing.

Met de CO<sub>2</sub> laser kunnen veel metalen worden gesneden. Metalen die een grote reflectie hebben voor het CO<sub>2</sub> laserlicht (10,6  $\mu\text{m}$ ) zijn echter vaak moeilijk of niet te snijden. Dit zijn bijvoorbeeld aluminium en koper. CO<sub>2</sub> lasers zijn commercieel verkrijgbaar voor de materiaalbewerking tot vermogens van 20 kW. Hiermee is het mogelijk staal tot circa 25 mm dikte te snijden.

#### 3.3.2 Nd:YAG laser voor het snijden van metalen

De Nd:YAG laser is een zogenaamde 'vaste stof' laser. De Nd:YAG laser zendt licht uit met een golflengte van 1,06  $\mu\text{m}$  (dus 10 keer zo kort als dat van de CO<sub>2</sub> laser). Om de laserbundel op te wekken, worden speciale lampen dan wel dioden gebruikt; er wordt dan over diodegepompte of lampen-gepompte lasers gesproken (zie ook [23]). De bundelkwaliteit van een diodegepompte Nd:YAG laser is beter dan van een lampengepompte Nd:YAG laser. Bovendien hebben diodes een langere standtijd (circa 10.000 uur) dan lampen (circa 1.000 uur). Diodes zijn echter duurder dan lampen. Nd:YAG lasers kunnen werken met een continu vermogen of met een pulserend vermogen. Het snijden met een pulserend vermogen biedt vooral voordelen bij het lasersnijden van scherpe contouren. In plaats van het vermogen en de snelheid te regelen bij scherpe contourovergangen (hoeken  $\leq 90^\circ$ ), kan men overgaan op het pulsen van het vermogen.

De voordelen van Nd:YAG lasers ten opzichte van CO<sub>2</sub> lasers zijn o.a. dat het Nd:YAG laserlicht wel door een glasfiber kan worden getransporteerd en dat het beter wordt geabsorbeerd door metalen. Doordat de bundel van de Nd:YAG laser beter wordt geabsorbeerd door metalen, is de efficiency van de Nd:YAG laser groter dan die van de CO<sub>2</sub> laser. Dit houdt in, dat een 3 kW Nd:YAG laser niet rechtstreeks kan worden vergeleken met een 3 kW CO<sub>2</sub> laser. Inmiddels zijn Nd:YAG lasers beschikbaar in

vermogens tot ruim 6 kW. De korte golflengte ten opzichte van de CO<sub>2</sub> laser maken dat de snede bij een Nd:YAG laser smaller en van een betere kwaliteit is. Materialen als aluminium en koper, die moeilijk zijn te snijden met een CO<sub>2</sub> laser, kunnen wel uitstekend worden gesneden met een Nd:YAG laser.

### 3.4 Kwaliteit van de snede

[22] geeft een aantal richtlijnen ter beoordeling van de snedekwaliteit. Deze kwaliteitsbeoordeling is gebaseerd op de rechtheid van de snede en de ruwheid van de snijkanten. De rechtheid van de snede is over het algemeen bij dunne plaat geen probleem. Afhankelijk van de materiaalsoort liggen de ruwheidswaarden bij het lasersnijden gemiddeld tussen de tussen de Rz 5 en Rz 14 µm. Kwaliteitscriteria ten aanzien van de snedekwaliteit zijn opgenomen [2].

#### Snedebreedte

Een bekende snijfout die zich bij de verschillende snijtechnieken (lasersnijden, plasmasnijden) voordoet, is dat de snijkanten niet parallel lopen. Het voordeel bij het snijden van geringe materiaaldiktes (< 3 mm) is, dat deze snijfout meestal niet merkbaar aanwezig is. Wel moet altijd rekening worden gehouden met de zogenaamde spleetbreedte die ontstaat tengevolge van het snijden. Afhankelijk van het gekozen snijproces zijn de verschillen in spleetbreedte aanzienlijk, zoals blijkt uit tabel 5. Hierin is lasersnijden (CO<sub>2</sub> en Nd:YAG) vergeleken met autogeen snijden en plasmasnijden.

tabel 5 Overzicht van de spleetbreedte als functie van de plaatdikte en voor een drietal materialen en snijtechnieken [23, 30, 36]

materiaal-soort	plaatdikte (mm)	spleetbreedte			
		autogeen snijden	plasmasnijden (fijnstraal-plasmasnijden)	CO <sub>2</sub> laser	Nd:YAG laser
onlegeerd en laaggelegeerd staal	1-3	0,9	0,6 - (0,4)	0,2	0,05
	4-6	1,0	0,7 - (0,5)	0,3	0,1 - 0,2
roestvast staal	1-3	n.v.t.	0,6 - (0,4)	0,2	0,05
	4-6	n.v.t.	0,7 - (0,5)	0,3	0,1 - 0,2
aluminium en zijn legeringen	1-3	n.v.t.	0,7 - (0,6)	0,4	0,1
	4-6	n.v.t.	0,8 - (0,7)	0,5	0,2

#### Ruwheid snede

De ruwheid (R<sub>z</sub>) van de gemaakte snede is eveneens een belangrijk criterium voor de kwaliteit van het snijwerk. Tabel 6 geeft een overzicht van de haalbare ruwheid van de snede bij dunne plaat en voor de verschillende materiaalsoorten. Deze waarden gelden voor een 4 kW CO<sub>2</sub> laser.

tabel 6 Overzicht van de haalbare ruwheid van de snede bij dunne plaat en voor de verschillende materiaalsoorten (4 kW CO<sub>2</sub> laser) [23]

plaatdikte in mm	ruwheid (Rz) in µm		
	onlegeerd en laaggelegeerd staal	roestvast staal	aluminium
1	9	6	18
2	15	10	18
3	17	10	20

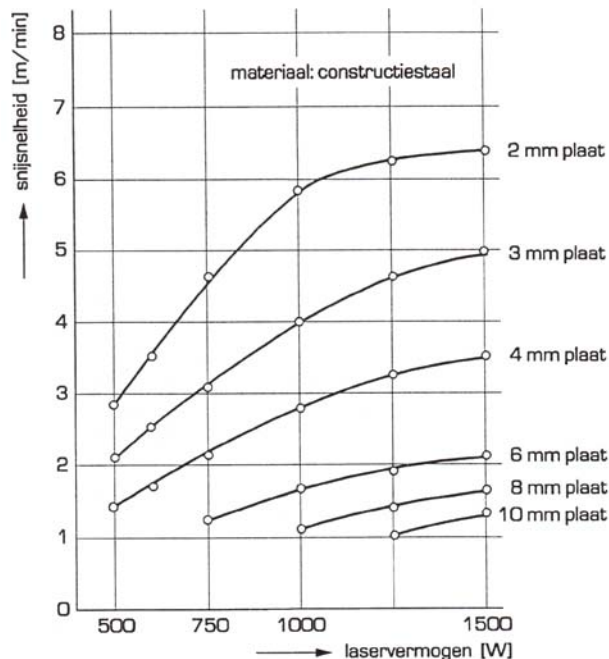
De hoge snijsnelheden en goede snedekwaliteit maken, samen met de lage warmte-inbreng, dat het lasersnijden bij uitstek geschikt is voor het snijden van kleine materiaaldiktes.

Voor het snijden van dunne plaat heeft de laser alleen maar concurrentie van het plasmasnijden. Onder de 1 mm materiaaldikte is lasersnijden de enige thermische scheidingstechniek die nog kan worden toegepast. De snijsnelheden die kunnen worden bereikt bij het lasersnijden zijn van een aantal factoren afhankelijk waaronder [23]:

- ▶ het te snijden materiaal;
- ▶ het type laser;
- ▶ het vermogen van de laser;
- ▶ de bundelkwaliteit van de laser;
- ▶ het snijgas en de snijgasdruk.

Figuur 30 geeft een overzicht van de gemiddelde snijsnelheden die bereikt kunnen worden bij het snijden van on- en laaggelegeerd staal met een CO<sub>2</sub> laser met verschillende vermogens. Bedacht moet worden dat het hierbij gaat om rechte sneden. Zodra er contoursnedes moeten worden gemaakt, kan de toelaatbare snijsnelheid aanzienlijk lager uitvallen. Dit is mede afhankelijk van de kwaliteit van het bewegingsmechanisme en de gewenste nauwkeurigheid van de contour.

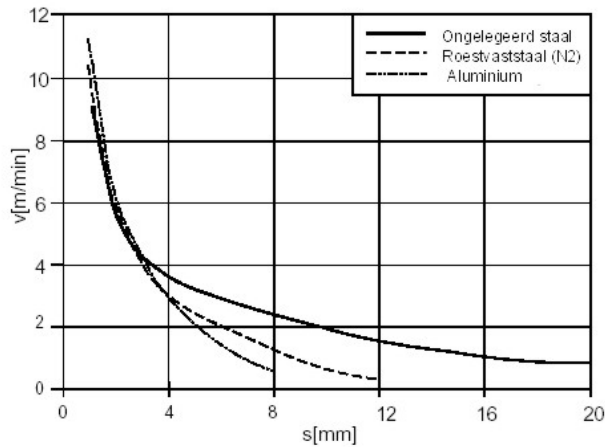
Figuur 30 toont dat bij de hoogste laser vermogens, die hoogste snijsnelheden worden bereikt, zoals te verwachten is. Ook is te zien dat de krommes vooral bij dunne plaat afvlakken. Dit geeft aan dat het niet zinvol is dure lasers met een hoog vermogen aan te schaffen voor het snijden van geringe plaatdiktes.



figuur 30 Snijsnelheden voor het snijden met een CO<sub>2</sub> laser met verschillende vermogens, voor rechte sneden

De te snijden plaatdikte bepaalt voor een gegeven vermogen de uiteindelijke snelheid waarmee kan worden gesneden. Dit wordt geïllustreerd door figuur 31, waar voor een laser vermogen van 4 kW (CO<sub>2</sub> laser) is aangegeven wat de gemiddelde snijsnelheden zijn in relatie tot de te snijden materiaaldikte en het soort materiaal. De hoogste snijsnelheden zijn haalbaar bij het snijden van onlegeerd staal, doordat hier de exotherme reactie van de snijzuurstof voor extra warmte zorgt tijdens het snijden.

Roestvast staal wordt over het algemeen met stikstof gesneden om oxidatie van de snijkanten te voorkomen. Hierdoor blijft de oxidatiebestendigheid gewaarborgd. De druk bij het snijden met stikstof is over het algemeen hoger (10-15 bar) dan bij het snijden met zuurstof.



v [m/min] snijsnelheid                      s [mm] plaatdikte

figuur 31 Snij snelheden voor het snijden van de verschillende materialen met een CO<sub>2</sub> laser met een vermogen van 4 kWatt [65]

Naarmate het materiaal dikker wordt, zal de stikstofdruk eveneens moeten worden opgevoerd om een acceptabele snedekwaliteit en hoge snijsnelheden te waarborgen. De hoge reflectie van aluminium voor het CO<sub>2</sub> laserlicht maakt dat de inkoppeling van de laserbundel in het materiaal minder goed is en er dus minder warmte in het werkstuk wordt gebracht. Het gevolg hiervan is een betrekkelijk lage snijsnelheid en/of hoge snijvermogens. Aluminium kan dan ook veel efficiënter met een Nd:YAG laser worden gesneden.

#### Thermisch snijden van hoge sterkte stalen

Hoge sterkte stalen worden door de fabrikant vaak onder zeer gecontroleerde omstandigheden vervaardigd. Dit wil zeggen dat er naar wordt gestreefd een specifieke, veelal fijnkorrelige, structuur te verkrijgen die voor hoge sterkte en/of taaiheid zorgt. Thermische bewerkingen hebben altijd een negatieve invloed op deze structuur. Thermische snijprocessen die werken met een lage warmte-inbreng verdienen hierdoor de voorkeur. Dit zijn in de eerste plaats het lasersnijden, maar ook het fijnstraalplasma-snijden. Met name het lasersnijden is een uitstekende techniek om hoge sterkte stalen te snijden, waarbij de oorspronkelijke eigenschappen zoveel mogelijk bewaard blijven.

Onderzoek [31] heeft uitgewezen dat de warmte beïnvloede zone bij het CO<sub>2</sub> lasersnijden in de grootte orde ligt van 0,125 mm. Afhankelijk van het gebruikte snijgas (O<sub>2</sub>) kan bij sommige staalsoorten een oxidehuid op de snede worden gevormd. De aanwezigheid van een sterke oxidehuid beïnvloedt de snijsnelheid in ongunstige zin. Voor het bereiken van een maximale snijsnelheid is het om deze reden aan te bevelen de oxidehuid voorafgaande aan het lasersnijden te verwijderen (beitsen). Ook beperkt de oxidehuid het lakken van de lasergesneden producten. Het gebruikte snijgas (actief of niet-actief) is hier eveneens van invloed op.

#### 4 Vergelijking van de scheidingstechnieken

Voor scheidende bewerkingen staan bedrijven vele processen ten dienste, zoals uit het voorgaande is gebleken. Uitgangspunt bij de keuze van de verschillende scheidingstechnieken vormt de productspecificatie met eisen betreffende de toe passen materialen, de vorm- en maatnauwkeurigheden en de kwaliteit van de snijkanten als het om bijvoorbeeld lasnaadvoorbewerkingen gaat. Na de selectie van de mogelijke processen op basis van bovengenoemde kwalitatieve eisen vindt de verdere en veelal definitieve keuze plaats op basis van een economische afweging.

Om te kunnen kiezen, zijn selectiecriteria nodig. De geroutineerde werkvoorbereider kiest een scheidingstechniek op basis van zijn ervaring in combinatie met in het bedrijf beschikbare middelen. Dit houdt het gevaar in dat hij onvoldoende op de hoogte is met andere en misschien betere mogelijkheden bij anderen (uitbesteden) of met de nieuwe ontwikkelingen en/of apparatuur die op de markt aanwezig zijn (investeren).

Een andere, door de historie gegroeide beperking is vaak, dat iemand alles weet van de thermische scheidingstechnieken en weinig van de mechanische scheidingstechnieken of omgekeerd. Dit is meestal afhankelijk van de aard van het bedrijf waarin men werkzaam is (bedrijfsblindheid).

Ondanks dat over het algemeen de behoefte aanwezig is de keuze van het scheidingsproces op een zo volledig mogelijke wijze uit te voeren, zal het hier bij een globale benadering blijven, enerzijds door de vele uitzonderingen, anderzijds door overlappingsen tussen de diverse technieken. Verder neemt een te diep ingaan op details het zicht op de hoofdzaken weg.

De belangrijkste selectiecriteria voor de keuze van een scheidingsproces zijn [29]:

- ▶ de materiaalsoort;
- ▶ de materiaaldikte;
- ▶ de vorm van de snede: zoals gaten, rechte of gebogen lijnen of laskanten;
- ▶ de geëiste nauwkeurigheid;
- ▶ de kosten.

Ten aanzien van de selectieprocedure voor een specifieke scheidingstechniek is, voor een globale selectie, de volgorde waarin de criteria hierboven zijn aangegeven goed bruikbaar.

#### De materiaalsoort

Als we ons beperken tot on- en laaggelegeerd staal, roestvast staal en aluminium zijn alle eerder genoemde scheidingsprocessen inzetbaar, behalve het autogeen snijden dat enkel geschikt is voor het snijden van on- en laaggelegeerd staal.

#### De materiaaldikte en de vorm van de snede

Het autogeen snijden is meer geschikt voor het snijden van grotere materiaaldiktes. De in dit Tech-Info-blad aangehouden bovengrens van 3 mm materiaaldikte is bijna de ondergrens van het autogeen snijden. Het plasma-snijden kan worden ingezet voor kleine (vanaf 1 mm) en grote materiaaldiktes (tot circa 25 mm), terwijl het lasersnijden bij uitstek geschikt is voor het snijden van kleinere materiaaldiktes (≤ 3 mm). Met thermische snijprocessen kunnen willekeurige vormen worden gesneden, terwijl ook laskanten kunnen worden aangebracht.

Voor het aanbrengen van kleine gaten zijn het autogeen en plasmasnijden niet geschikt. Het ponsen en nibbelen zijn eveneens zeer geschikt voor het scheiden van dunne plaat, deze processen worden veel toegepast bij zowel de serie- en massafabricage, als bij de enkelstuks fabricage van producten, hetgeen de flexibiliteit van deze processen weergeeft. Met het ponsen worden in één slag de complete buiten- en/of binnencontouren aangebracht. Voor iedere contour is echter een apart, en veelal duur gereedschap nodig. Met het ponsnibbelen kunnen contouren van willekeurige vorm worden gemaakt zonder extra gereedschap, waardoor dit proces aantrekkelijk is voor kleine series. De snedevorm is vaak schuin aflopend. Het zagen (tot 100 mm, rechte sneden) wordt meestal gebruikt voor het afkappen van materiaal, of om grotere gaten in constructies aan te brengen. Dit kan zowel seriematig als enkelstuks fabricage zijn. Slitten is voornamelijk geschikt voor het seriematig vervaardigen van stroken plaatmateriaal, met diktes uiteenlopend van 0,2 tot zo'n 3 mm. De vorm van de snede is meestal recht. Bij het knippen ontstaat vaak een licht schuine snede.

Dit proces kan worden toegepast voor alle metalen met diktes tussen 0,2 en 10 mm. Het waterstraalsnijden kan kleine en grote plaatdiktes aan (1-100 mm). De vorm van de snede is afhankelijk van de gekozen instellingen, schuin, recht en hol zijn mogelijk.

### De nauwkeurigheid

In het algemeen kan worden gesteld dat bij kleinere plaatdiktes grote nauwkeurigheden kunnen worden gerealiseerd. Het autogeen, plasmasnijden en in mindere mate het lasersnijden belasten de plaat thermisch, waardoor afwijkingen ontstaan. Door een weldoordacht snijplan kan dit nadeel worden beperkt. Bij het lasersnijden wordt zeer weinig warmte ingebracht en het proces geeft een zeer smalle snijvoeg, waardoor met dit proces hoge nauwkeurigheden mogelijk zijn. De mechanische scheidingsprocessen zijn doorgaans nauwkeuriger dan de thermische snijprocessen (met uitzondering van het lasersnijden), één en ander uiteraard afhankelijk van de stabiliteit van de machine en de kwaliteit van het gereedschap. In de praktijk bestaat vaak de behoefte het CO<sub>2</sub> lasersnijden met het fijnstraal plasmasnijden te vergelijken. Een dergelijke vergelijking is niet altijd even eenvoudig, omdat naast de processen zelf ook de eigenschappen van de apparatuur (zelfs binnen één scheidingsproces) onderling sterk kunnen verschillen. De volgende verschillen worden geconstateerd tussen het CO<sub>2</sub> lasersnijden en het fijnstraal plasmasnijden:

- ▶ De kwaliteit van snede van een CO<sub>2</sub> laser is beter dan bij het fijnstraal plasmasnijden, vooral bij plaatdiktes < 3 mm.
- ▶ Vanaf een materiaaldikte van 3 mm is het fijnstraal plasmasnijden goedkoper.
- ▶ Het gatsteken met een CO<sub>2</sub> laser is nauwkeuriger dan bij het fijnstraal plasmasnijden. Bij dit laatste proces moet altijd met een snijfout worden gerekend, ter plaatse van het gestoken gat, van circa 1 mm.
- ▶ Bij snijden van scherpe hoeken is de CO<sub>2</sub> laser in het voordeel ten opzicht van het fijnstraal plasmasnijden. Het fijnstraal plasmasnijden geeft grotere afgeronde hoeken.
- ▶ De investering in fijnstraal plasmasnijapparatuur is aanzienlijk lager dan in lasersnijapparatuur.

In de tabellen 1 en 2 [27], die de basis van deze publicatie vormen, zijn van een aantal scheidingstechnieken de belangrijkste gegevens naast elkaar gezet, waaronder de productvormen en de nauwkeurigheid, evenals sommige proces- en systeemgegevens.

Zoals te zien is kan alleen het lasersnijden zich qua nauwkeurigheid meten met de mechanische scheidingsstechnieken. Verder valt op dat thermische processen alle productvormen kunnen snijden, hetgeen meestal niet het geval is bij de mechanische scheidingsprocessen.

## 5 *Automatiseren en bedrijfseconomische aspecten*

### 5.1 *Algemeen*

Indien er behoefte is aan een beheerst, voorspelbaar en foutloos scheiden van het eindproduct of onderdelen hiervoor, is het automatiseren van drie processen van groot belang: het scheidingsproces (hierover is al uitvoerig informatie verstrekt), de technologische gegevensverwerking rondom het scheidingsproces en het logistieke proces (hardware en software) rond het scheiden. De technologische gegevensverwerking rondom het scheidingsproces kan betrekking hebben op het vastleggen van ontwerpinformatie, de bewerkingsgegevens, de scheidingsmethoden, evenals op het besturen van de scheidingsapparatuur, beladings- en transportinstallaties. Dit houdt in dat alle benodigde attributen precies op het gevraagde tijdstip aanwezig moeten zijn, niet te laat, maar ook niet te vroeg, zodat nodeloos renteverlies op voorraden wordt voorkomen (Just in Time) [29, 40].

### Automatisering van het productieproces en de handeling

Bij automatisering van het productieproces wordt vaak gedacht aan het (numeriek) besturen van bijvoorbeeld snijmachines. De kosten van een product worden echter voor zo'n 70% vastgelegd in het ontwerp. Het is dan ook zinvol bij de automatisering van de productie de ontwerpfase in het automatiseringsproces op te nemen. Het feitelijke scheidingsproces begint dan dus bij het ontwerp en de constructie van het product. Daarna komt de fase van werkvoorbereiding, waarbij de scheidingsprocessen en de te gebruiken apparatuur, gereedschappen en hulpmiddelen worden bepaald, vervolgens de programmering van (scheidings)machines en tenslotte de besturing en uitvoering.

Voor het scheiden van bijvoorbeeld plaatonderdelen zouden CAD-systemen bij voorkeur gebruik moeten maken van standaard vormelementen, die op de beschikbare machines eenvoudig, nauwkeurig en economisch te maken zijn. Dit betekent dat de constructeur een bibliotheek van deze vormelementen in zijn CAD-systeem voorhanden moet hebben. Vormelementen zijn bijvoorbeeld ronde, rechthoekige en afgeronde rechthoekige gaten die op de beschikbare scheidingsmachines eenvoudig kunnen worden gemaakt. Maar ook gatenpatronen die in de onderdelen regelmatig voorkomen, kunnen als standaard-element worden vastgelegd.

Een eenvoudige vorm van handelingsautomatisering is die, waarbij tussen twee machines, die aan hetzelfde onderdeel opeenvolgende bewerkingen uitvoeren, een robot wordt geplaatst die het tussenproduct uit de eerste machine (bijv. een ponsnibbelmachine) pakt en het vervolgens in de tweede machine (bijv. een kantbank) inlegt. Ook kunnen machines gebruikmaken van automatische plaatwisselsystemen. Met de juiste keuze van het plaatwisselsysteem kan de productiviteit zeer fors toenemen.

### 5.2 *Werkvoorbereiding en economische aspecten*

De werkvoorbereiding is de schakel tussen de ontwerpafdeling en de productie en maakt op basis van het tekeningenpakket van de ontwerpafdeling een bewerkingsblad of bestand, waarop de gang van en de benodigheden voor de productie zijn beschreven. Deze bewerkingsbladen of bestanden gaan met de tekeningen en eventuele specificaties naar de productie, vaak via het bedrijfsbureau, waar dan de planning voor de productie wordt gemaakt.

Modules die de werkvoorbereider ondersteunen bij het scheiden zijn bijvoorbeeld 'nestingprogramma's', die het mogelijk maken de te scheiden producten zo op de materiaalstrook te plaatsen, dat er met een minimum aan materiaalverlies wordt gewerkt. Bij moderne 'nestingprogramma's' is het zelfs mogelijk rekening te houden met de walsrichting van de plaat. Tegenwoordig kan dit soort apparatuur aan de hand van gekozen vormdelen zelf bepalen wat de meest gunstige indeling is, waarbij een minimum aan afvalmateriaal wordt verkregen.

Tenslotte zijn er de programma's die het eigenlijke productieproces ondersteunen. Dit zijn bijvoorbeeld modules waarmee de NC-programma's voor de gereedschapswerktuigen, de beladingsinstallaties en de transportinstallaties kunnen worden gemaakt. Bij bedrijven die met robots werken kunnen dit de programma's zijn die worden gebruikt om de robot het juiste bewegingspatroon te laten maken en de randapparatuur (bijvoorbeeld snijtoorts) in te schakelen en af te stellen.

### Economische aspecten

De economische haalbaarheid wordt bepaald aan de hand van het machine-uurtarief maal de bewerkingstijd. Het machine-uurtarief is opgebouwd uit vaste en ope-

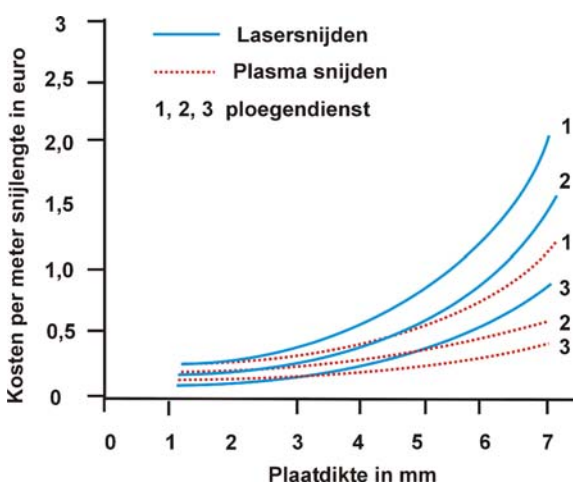
rationele kosten. Als de bewerkingstijd bekend is, kan hiermee de kostprijs per te snijden meter worden bepaald [32]. Belangrijk hierbij is, niet uit het oog te verliezen, dat de totale bewerkingstijd begint op het moment van materiaalaflevering aan de machine en eindigt op het moment van materiaalafvoer vanaf de bewerkingsmachine. Doordat men hiermee te weinig rekening houdt, is er vaak sprake van onnodig grote verliezen.

Het zal duidelijk zijn dat in het kader van dit Tech-Infoblad geen volledige berekening van het rendement op het geïnvesteerde vermogen (ROI) kan worden uitgevoerd voor de verschillende snijprocessen. De apparatuur is te divers, terwijl aspecten als bijvoorbeeld seriegrootte, productafmetingen en complexiteit niet bekend zijn. Ten aanzien van de investering moet rekening worden gehouden met de apparatuur zelf (snijapparaat), het bewegingsmechanisme (bewegingstafel, robot), software, veiligheidsvoorzieningen, de gewenste nauwkeurigheid van de apparatuur, enz. Alle kosten die met de aanschaf van middelen te maken hebben om het snijproces goed uit te kunnen voeren, vallen onder de investeringen. Deze kosten behoren tot de vaste kosten van de apparatuur en staan los van het feit of het apparaat al dan niet wordt gebruikt.

De variabele of operationele kosten variëren wel als er meer of minder met de apparatuur gesneden wordt. Belangrijk is dus het aantal inzetbare uren van de apparatuur per etmaal te weten. Tot de variabele kosten bij het snijden worden onder andere gerekend het stroomverbruik, gasverbruik, toevoegmaterialen, gereedschapskosten en de loonkosten van de operator.

Hoewel de hierboven genoemde kosten afhankelijk van de gekozen scheidingsprocessen en machineconfiguratie in absolute zin hoog kunnen zijn, is dit niet maatgevend voor de aanschaf van een systeem. Bepalend is de terugverdientijd van het systeem. Hiervoor moet worden doorerekend wat de kosten en baten zijn. Veel fabrikanten maar ook gebruikers hebben eigen programma's om kapitaalsintensieve investeringen te kunnen doorrekenen. Een goed overzicht van de kosten die een rol spelen bij de aanschaf van lasers wordt gegeven in de praktijk-aanbeveling: PA.02.11 - 'Snijden van metalen met hoogvermogen lasers' [23].

Een veel gehoorde uitlating is dat lasers zo duur zijn. Dit is waar. De investering bepaalt echter niet of er rendabel met een laser kan worden gesneden. Om de terugverdientijd te kunnen berekenen zijn veel gegevens nodig die vaak productspecifiek zijn. Vergelijken we bijvoorbeeld het lasersnijden met het plasmasnijden (figuur 32), dan blijkt dat de kosten per meter snijlengte bij het snijden



figuur 32 Vergelijking van de kosten per meter snijlengte tussen het laser- en het plasmasnijden bij het werken in verschillende ploegendiensten [35]

van dunne plaat niet erg veel verschillen. Dit wordt veroorzaakt doordat bij het snijden van kleine materiaaldiktes betrekkelijk goedkope lasers kunnen worden gebruikt (laag vermogen). Bij grotere plaatdiktes moet er fors worden geïnvesteerd in lasers met een hoog vermogen en is de investering aanzienlijk groter dan bij het plasmasnijden. Hier onderscheidt het plasmasnijden zich dus in gunstige zin van het lasersnijden. Dit is echter een deel van de afweging. Bijkomende aspecten zoals snedekwaliteit of in te brengen warmte kunnen ervoor zorgen, dat ondanks een hogere investering, toch voor lasertechnologie wordt gekozen.

## 6 ARBO- en milieuaspecten

Bij mechanische scheidingstechnieken zijn de ARBO- en milieuaspecten voor de gebruiker over het algemeen beperkt tot de aanwezigheid van snijoliën en geluidsbelasting. Hiervoor zijn vaak simpele oplossingen voorhanden. Uit oogpunt van ARBO en milieu verdienen deze technieken dan ook de voorkeur.

De belasting voor de gebruiker en zijn omgeving is bij thermische scheidingstechnieken vele malen complexer (straling, rook, gassen, geluid) en verdient veel meer aandacht.

Bij het ontstaan van gezondheidsschade spelen twee factoren een rol, namelijk de mate van schadelijkheid en de factor tijd. De schadelijkheid van een groot aantal stoffen is onderzocht en wordt aangegeven met een zogenaamde grenswaarde, ook wel MAC-waarde (Maximaal Aanvaarde Concentratie) genoemd. De MAC-waarden van stoffen worden op centraal niveau, in overleg tussen werkgevers, werknemers en overheid, vastgesteld. Bij de vaststelling is het uitgangspunt dat een bepaalde blootstelling gedurende 8 uren per dag over een langere periode geen schade aan de gezondheid van werknemers mag veroorzaken. De MAC-waarden worden regelmatig bijgesteld. MAC-waarden worden in een tweetal eenheden aangegeven namelijk in  $\text{mg}/\text{m}^3$  of in ppm (= parts per million). Voor een uitgebreid overzicht ten aanzien van deze aspecten wordt verwezen naar [45].

### Emissie

Emissie is een verzamelbegrip voor de schadelijke uitstoot die zich voordoet bij thermische snijprocessen. Er zijn vier soorten emissies: van straling, van gassen, van snijrook en van geluid. Vaak blijkt de invloed van het langdurig blootstaan aan emissies pas na langere tijd (dus een sluipend gevaar). Emissies ontstaan als gevolg van natuurlijke processen, zoals die optreden bij thermische snijprocessen en zijn daarom niet te vermijden. Emissies zijn niet constant. De hoeveelheid en/of samenstelling hangt af van het snijproces en met name van de hoeveelheid ontwikkelde energie door het proces. Zo veroorzaakt een lange snijvlam/-boog meer emissie dan een korte. Men moet zich tevens realiseren dat eventuele vervuilingen op het plaatmateriaal zullen verbranden en zodoende bijdragen aan de hoeveelheid emissie.

### Straling

Tijdens het plasma- en lasersnijden ontstaat elektromagnetische straling, die voor een deel uit zichtbaar licht bestaat, maar voor een deel ook uit onzichtbare straling zoals ultraviolet (UV) en infrarood (IR). UV straling veroorzaakt al na zeer korte tijd hoornvliesontsteking. De welbekende lasogen zijn hiervan het gevolg. De verschijnselen zijn pijnlijk en uiten zich door rood ontstoken ogen met het gevoel of er zand in zit. De verschijnselen gaan meestal van zelf over bij voldoende rust. UV straling heeft ook effect op de huid en wel in de vorm van verbranding.

IR straling wordt door zowel het snijproces als het werkstuk uitgezonden en heeft een langere inwerkingsduur. Dit stralingstype tast het vocht in de oogleden aan en kan onder bepaalde omstandigheden blijvend staar (ooglenstertroebeling) veroorzaken.

Bij plasmasnijden is het mogelijk dat de vrijkomende UV-straling chloorhoudende ontvettingsmiddelen, zoals trichloorethyleen, ontleedt. Daarbij ontstaat het giftige fosgeen. Houd daarom dampontvettingsbaden altijd door muren gescheiden van het plasmasnijden. De operator en zijn omgeving moeten op adequate wijze worden beschermd tegen straling. Het gaat hierbij om het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen door de mens, het gebruik van afscheidingsgordijnen, evenals UV-absorberende verf voor de werkruimte.

### Gassen

Bij het plasma-, laser- en autogeen snijden ontstaat een aantal schadelijke gassen. De voornaamste hiervan zijn ozon en nitreuze gassen.

Nitreuze gassen ontstaan doordat bij de hoge temperatuur van de plasmasnijboog, de laserbundel of de autogene snijvlam de zuurstof- en stikstofmoleculen nieuwe verbindingen aangaan tot een mengsel van stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>). Omdat nitreuze gassen vooral aan de rand van de snijvlam/-boog ontstaan, wordt de hoeveelheid gas bepaald door de lengte van de snijvlam/-boog. Een vrij brandende autogene vlam veroorzaakt 10 maal meer nitreuze gassen dan dezelfde vlam gedurende het snijden. Het is dus belangrijk bij het autogeen snijden de vlam na gebruik zo snel mogelijk te doven. Nitreuze gassen veroorzaken bij lage concentraties irritaties van de ogen en slijmvliezen. Bij hoge concentraties kan het longweefsel worden aangetast.

Ozon ontstaat bij het plasmasnijden, doordat het zuurstofmolecuul uit de omgevingslucht, dat normaal uit twee gebonden zuurstofatomen bestaat, onder invloed van de UV-straling een binding met een derde zuurstofatoom aangaat. Ozon veroorzaakt bij lage concentraties irritatie van de slijmvliezen. Een hoge concentratie kan longoedeem veroorzaken. Verder veroorzaakt ozon hoofdpijn, pijn in de borst en een droog gevoel bij het ademen. De bescherming tegen ozon bij het plasmasnijden kan plaatsvinden door de bron af te schermen (plasmasnijden met een watergordijn, of onder plasma onderwatersnijden). De omgeving kan worden afgeschermd met lasgordijnen.

Bij het autogeen en plasmasnijden kan acute vergiftiging optreden wanneer er aan bestaande installaties, waarin bepaalde stoffen hebben gezeten, snijwerkzaamheden (bijv. ter reparatie) moeten worden uitgevoerd. De uitvoerder kan dan in aanraking komen met allerlei vloeistoffen, gassen en vaste stoffen, die giftig kunnen zijn of waarvan de verbrandingsproducten giftige eigenschappen hebben. Het is van groot belang om eerst na te gaan welke van die stoffen aanwezig zijn geweest, voordat er gesneden gaat worden.

### Stof en rook

Bij het thermisch snijden smelt en verdampt er metaal. De kleine deeltjes die hierbij ontstaan, bestaan hoofdzakelijk uit metaaloxiden. Deze gesmolten, verdampende en vervolgens weer gestolde metaaldeeltjes vormen de opstijgende snijrook. Deze deeltjes blijven enige tijd zweven en vormen de bekende 'snijrookdeken'. Bij het snijden van staal bestaan de zwevende deeltjes voor een groot gedeelte uit ijzeroxide; ze kunnen bij langdurige blootstelling z.g. stoflongen veroorzaken. Een kenmerk van deze stoflongen is kortademigheid. Maar deze zwevende deeltjes kunnen ook schadelijker metaaloxiden als zeswaardig chroom bevatten. Ook deklagen op het metaaloppervlak, zoals beklede (zink, aluminium) of van primer voorziene staalplaat, kunnen (extra) schadelijke deeltjes geven. De grootte van de deeltjes die bij snijprocessen ontstaan, varieert van 0,00001 mm tot enkele tienden van millimeters. De deeltjes met een grootte van 0,0001 tot 0,01 mm zijn het gevaarlijkst, omdat deze tot diep in de longen kunnen doordringen [45]. Zij verstoppen als het ware de longblaasjes, die een belangrijke

rol in de zuurstof/koolzuuruitwisseling in ons lichaam spelen. Stof en rook hebben een irriterende werking op de ademhaling. Rook die een overmaat aan koper, magnesium of zink bevat, kan de zogenoemde metaaldampkoorts veroorzaken. Dit verschijnsel gaat gepaard met klachten over vermoeidheid, hoofd- en spierpijn, droge keel, hoesten en beklemmingsgevoel op de borst. Herstel treedt tussen 24 en 48 uur op.

Zowel gassen als stof en rook moeten op een adequate manier worden afgezogen. Vaak wordt hiervoor een achtergrondafzuiging gecombineerd met plaatselijke of puntafzuiging gebruikt. De mens zelf kan nog eens extra worden beschermd met een zogenaamde overdrukhelm. Afzuigapparatuur is altijd voorzien van filters, waaraan specifieke eisen worden gesteld, die afhankelijk zijn van het soort metaal dat wordt gesneden.

### Geluid

Het menselijke oor neemt het geluid waar, waarbij twee kenmerken worden onderscheiden, namelijk de geluidsdruk (sterkte van het geluid) en de toonhoogte (de frequentie van de geluidsgolf).

De geluidsbelasting bij de in dit Tech-Info-blad behandelde mechanische scheidingstechnieken is over het algemeen beperkt. Dit wil echter niet zeggen dat onder specifieke omstandigheden geen gehoorbescherming noodzakelijk is. Een uitzondering vormt het waterstraal-snijden. De onder hoge druk uitstromende waterstraal geeft een zo grote geluidsbelasting, dat gehoorbescherming altijd noodzakelijk is.

Bij elektrische en autogene snijprocessen ontstaat geluid door respectievelijk de elektrische ontlading in de boog en de uitstromende gassen. Lawaai dat bestaat uit een te hoge geluidsdruk (uitgedrukt in dB(A)) is schadelijk voor de gezondheid. Niet alleen wordt op den duur het gehoorvermogen aangetast, maar ook ontstaan er bij te hard geluid allerlei ongewenste bijverschijnselen, zoals vermoeidheid, nervositeit en een verhoogde bloeddruk. De wettelijke grenswaarde voor geluid is vastgesteld op maximaal 80 dB(A). Het geluid dat bij snijprocessen vrijkomt, blijkt vrijwel altijd boven deze grenswaarde van 80 dB(A) te liggen.

Om lawaai bij autogeen en plasmasnijden te beperken, wordt aangeraden om bij het snijden van een honingraatsnijtafel gebruik te maken. Hierbij zijn de raten van de tafel gesloten tot op de bodem. Bij het plasmasnijden kan bovendien een belangrijke reductie van het geluid worden verkregen door onder water te snijden. Verder moet de plaats waar lawaai makende activiteiten worden verricht, worden afgescheiden van de werkplek van anderen. Gehoordoppen, proppen en geluidskappen moeten de gebruiker beschermen tegen het ontstaan van gehoorschade.

## 7 Normen

### Mechanische scheidingsprocessen

- [1] NEN-EN-10131: 1991 nl  
Koudgewalste, niet-beklede platte producten van laag koolstofstaal en staal met een hoge vloeigrens voor koud dieptrekken of zetwerk, toleranties op vorm en afmetingen.
- [2] NEN-ISO 3002-2:1997 en  
Basisgrootheden voor verspanen en slijpen; Deel 2: Geometrie van het werkzame deel van snijgereedschap; Algemene formules voor berekening van het verband tussen gereedschap- en snijhoeken.
- [3] NEN-ISO 3002-3:1997 en  
Basisgrootheden voor verspanen en slijpen; Deel 3: Geometrische en kinematische grootheden voor verspanen.
- [4] ISO 8020:2002 en  
Persgereedschap; Centerponen met cilindrische kop en rechte of gereduceerde schacht.
- [5] NEN-ISO 8695:1997 en; fr  
Persgereedschap; Centerponen; Benamingen en terminologie.

- [6] NEN 5454:1961/C1:1968 nl
- [7] NEN 5454-III, IV en V  
Benaming van spaanloze metaalbewerkingen.
- [8] NEN 5455:1967 nl  
Benamingen van machinale scharen.

### Thermische scheidingsprocessen

- [9] NEN-EN 12584:1999 en;fr;de  
Onvolkomenheden bij brandsnijvlakken, lasersnijvlakken en plasmasnijvlakken; Terminologie.
- [10] NEN-EN 13918:2003 en  
Apparatuur voor autogeen lassen; Geïntegreerde drukregelaars voor gebruik bij gascilinders voor lassen, snijden en verwante processen; Classificatie, specificatie en beproevingen.
- [11] NEN-EN-ISO 15615:2002 en  
Apparatuur voor autogeen lassen; Verdeelsystemen voor acetyleen voor lassen, snijden en verwante processen; Veiligheidseisen voor hogedruktoestellen.
- [12] ISO 15616-1:2003 en  
Afnamebeproevingen voor CO<sub>2</sub>-laserbundelmachines voor lassen en snijden; Deel 1: Algemene principes, afnamevoorwaarden.
- [13] NEN-EN 1256:1996 en  
Apparatuur voor autogeen lassen; Specificatie voor slangsamenstellingen voor apparatuur voor lassen, snijden en aanverwante processen.
- [14] NEN-EN 50192:1996 en  
Boogglasapparatuur; Systemen voor plasmasnijden met de hand.
- [15] NEN-EN-ISO 5172:1996 en  
Handbranders voor lassen, snijden en verwarmen; Eisen en beproevingen.
- [16] NEN-ISO 6848:1991 en  
Wolfraamelektroden voor booglassen onder bescherming van inert gas en voor plasmasnijden en -lassen; Aanduidingen.
- [17] NEN-EN-ISO 6848:2002 Ontwerp en  
Booglassen en snijden; Niet-afsmeltende wolfraam-elektroden; Indeling.
- [18] NEN-EN-ISO 7287:2002 en  
Grafische symbolen voor apparatuur voor thermisch snijden.
- [19] NEN-EN-ISO 7291:2001 en  
Apparatuur voor autogeen lassen; Drukregelaars voor systemen met cilinders gebruikt bij lassen, snijden en verwante processen tot 300 bar.
- [20] NEN-EN 874:1995 en  
Apparatuur voor autogeen lassen; Machinesnijbranders met cilindrische schacht voor gas/zuurstof; Constructie, algemene eisen, beproevingsmethoden.
- [21] De NEN-EN-ISO 9013:2002  
"Thermisch snijden; Classificatie van thermische doorsnijdingen; Geometrische productspecificatie en kwaliteitstoleranties".
- [22] NEN-EN-ISO 9013:2002 en  
Thermisch snijden; Classificatie van thermische doorsnijdingen; Geometrische productspecificatie en kwaliteitstoleranties.

## 8 Literatuur

- [23] Snijden van metalen met hoog vermogen lasers. Praktijkaanbeveling PA.02.11, september 2002. Dr. G.R.B.E. Römer. Uitgave FME-CWM, 13 blz.
- [24] Las en snijgassengids. Informatie brochure van Hoekloos. 2002.
- [25] Snijprocessen - plasmasnijden (het proces en de apparatuur). Ing. D.R.J. Lafèbre. Lastechniek februari 2002. Blz 4 t/m 6.
- [26] Autogeen snijden. Het proces de gassen. Lastechniek december 2001. Ing. D.R.J. Lafèbre. Blz 6 t/m 8.
- [27] Scheidingstechnieken voor metalen (VM 114). Dr.Ir. P.J. Bolt; Ir. W. Huslage; Ing. M. Stemvers. 51 blz. Uitgave FME-CWM, 1998.
- [28] Plasmaschneiden mit Wasser und mit Luft-Erlauterung mit Praxixbeispielen. Gunter Aichele. Technica 4/1998. Blz 73 t/m 76.
- [29] Lassen, lijmen en plaatbewerking. Teleac cursus. 1994. Hoofdstuk 2: Scheiden van metalen. Blz. 53 t/m 89.
- [30] Lasertechnieken (3); Lasersnijden, snijsnelheid en kwaliteitsaspecten. Lastechniek nr 59. Juli/augustus 1993. Blz 230 t/m 235.

- [31] Hochgeschwindigkeitsschneiden von Feinblechen mit laser. K.U. Preissig. J. Albrecht.e.a.Bänder Belche und Rohre 10 -1992. Blz 79-88.
- [32] Plasmasnijden of laserlassen een moeilijke beslissing. Dipl. Ing. G. Aichele. Metaal & Kunststof 5 09-03-92. Blz 101 t/m 107.
- [33] Lasersnijden, nibbelen of combinatie. Ing. J. Aalbers. Metaal en kunststof 20, 22-10-1990. Blz. 39 t/m 41.
- [34] Plasmasnijden met perslucht van ongelegeerde staalsoorten. M.J. Krey, Ir. F. van den Branden. Metaal & Kunststof. 04-09-1989. Blz 132 t/m135.
- [35] Thermische snijprocessen. Autogeen snijden; Plasmasnijden: lasersnijden: een vergelijking op technische en economische gronden. Lastechniek 54. Oktober 1988. Ing. (grad) H. Mair bewerkt door Ing. D.R.J. Lafèbre. Blz 231 t/m 247.
- [36] Laserbewerkingen FME-CWM publicatie VM 80. 1988. 78 bladzijden.
- [37] Mogelijkheden en grenzen van het autogeen-, plasma- en het lasersnijden van dunne plaat. Lastechniek jaargang 53, juli/augustus 1987. K. Dijkdrent, K.Herbert, H.J. Kaufhold. Blz 161 t/m164.
- [38] Plasma en Waterinjectiesnijden. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987.Bruno P. Langer. Blz 155 t/m156.
- [39] Principe en varianten van de plasma-snijtechniek. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987. H. Liebisch.. Blz 144 t/m 148.
- [40] Belangrijke criteria bij de aanschaf van een lasersysteem. Ir. W. Huslage. Ing. A.H. van Krieken.. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987. Blz 157 t/m160.
- [41] Plasma waterinjectiesnijden. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987. Bruno P. Langer.. Blz 155 t/m156.
- [42] Plasmasnijden in vergelijking tot andere snijprocessen. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987. Ing. P. Bruinsma. Blz 165 t/m 170.
- [43] Autogeen door dik en dun. Lastechniek jaargang 53 juli/augustus 1987. H. Liebisch. Blz 135 t/m 139.
- [44] The Fascinating World of Sheet Metal, TRUMPF GmbH + Co.
- [45] Sheet Steel Forming Handbook, Size shearing and plastic forming, SSAB Tunnpå AB, 1998
- [46] Plaatbewerking, Stand van de techniek, W. Serruys, LVD Company, 2002
- [47] Omvormen van metalen, J.A.H. Ramaekers, P.B.G. Peeters, Academic Service, 1998
- [48] Scheidingstechnieken voor metalen (VM 114), uitgave FME-CWM.
- [49] Spaanloos snijden; stempels en matrijzen (VM 73), uitgave FME-CWM.
- [50] Industriële productie, het voortbrengen van mechanische producten, H.J.J. Kals, C. Buiting-Csikós, C.A. van Luttervelt, K.A. Mouljn, 3e druk, 2003
- [51] Manufacturing Engineering and Technology, 1995, S. Kalpakjian, Addison-Wesley Publishing Company.

## 9 Websites

Hierna volgen een aantal interessante websites waar ten aanzien van de verschillende onderwerpen aanvullende informatie te verkrijgen is.

- [52] [www.dunneplaat-online.nl](http://www.dunneplaat-online.nl)
- [53] [www.lasrook-online.nl](http://www.lasrook-online.nl)
- [54] [www.maropa.nl/nederlands/snijmondstukken.htm](http://www.maropa.nl/nederlands/snijmondstukken.htm)
- [55] [www.ind.tno.nl](http://www.ind.tno.nl)
- [56] [www.fme.nl](http://www.fme.nl)
- [57] [www.fdp.nl](http://www.fdp.nl)
- [58] [www.nil.nl](http://www.nil.nl)
- [59] [www.corusgroup.com](http://www.corusgroup.com)
- [60] [www.nimr.nl/](http://www.nimr.nl/)
- [61] [www.syntens.nl](http://www.syntens.nl)
- [62] [www.tudelft.nl](http://www.tudelft.nl)
- [63] [www.hoekloos.nl](http://www.hoekloos.nl)
- [64] <http://waterjets.org>
- [65] [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)

## Auteurs

Dit Tech-Info-blad is samengesteld door A. Gales (TNO Industrie) en M. de Nooij (TNO Industrie). De samenstellers werden ondersteund door een klankbordgroep bestaande uit: P. Marchal (Corus), J. van de Put (Syntens), H.L.M. Raaijmakers (Federatie Dunne Plaat), G. Vaessen (NIMR), G. Huiskes (Ahrend Productiebedrijf Sint-Oedenrode), D. Lafèbre en K. Scheffer (Hoek Loos).

## Technische informatie

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de Federatie Dunne Plaat, de firma Hoek Loos en TNO Industrie.

De adressen zijn:

### Federatie Dunne Plaat

Einsteinbaan 1  
Postbus 2600  
3430 GA Nieuwegein  
tel.: 030 - 600 00 05

### Hoek Loos B.V.

Havenstraat 1  
Postbus 78  
3100 AB Schiedam  
tel.: 010 - 246 12 68

### TNO Industrie

De Rondom 1  
Postbus 6235  
5600 HE Eindhoven  
tel.: 040 - 265 00 00

## Informatie over, en bestelling van VM-publicaties

### Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,  
2713 HX ZOETERMEER  
Correspondentie-adres: Postbus 190,  
2700 AD ZOETERMEER  
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41  
Fax: (079) 353 13 65  
E-mail: pbo@fme.nl  
Internet: <http://www.fme-cwm.nl>

### Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Adres: Krimkade 20,  
2251 KA VOORSCHOTEN  
Telefoon: (071) 560 10 70  
Fax: (071) 561 14 26  
E-mail: [info@nil.nl](mailto:info@nil.nl)  
Internet: <http://www.nil.nl>

© Vereniging FME-CWM/februari 2004

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM  
afdeling Technische Bedrijfskunde  
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer  
telefoon 079 - 353 11 00  
telefax 079 - 353 13 65  
e-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
internet: <http://www.fme-cwm.nl>



Federatie  
dunne plaat



Netherlands Institute  
for Metals Research

