

Productietechnologie — Samenvatting

Ruben Ryckaert

22 december 2025

Inhoudsopgave

1 Inleiding	8
1.0.1 Keuzes bij productie	8
1.1 Passing	9
1.2 Tolerantie	9
1.3 Oppervlaktekwaliteit	10
2 Materialen	11
2.0.1 Vervorming	12
3 Verspanen: Algemeen	12
3.1 beitelbewerkingen	13
3.1.1 Secundaire afschuifvlak(shear zone)	14
3.2 Beweging, snelheden en voedingen, temperaturen, slijtage	16
3.2.1 Krachten	16
3.3 Factoren bij beitelbewerking	17
3.4 Snijmaterialen	19
3.4.1 Classificatie van snijmaterialen	20
3.5 Optimale snijsnelheid	21
4 Verspanen: Draaien	22
4.1 Het Draaiproces	23
4.2 Krachten bij Draaien	23
4.3 Invloeden voeding f en snedediepte a op de kracht en snijsnelheid	26
4.4 Spaanvorming bij Draaien	27
4.5 Oppervlakteruwhed bij Draaien	28
4.6 De Draaioperatie	29
5 Verspanen: Boren, Fabricage en ronde gaten	30
5.1 Inleiding Boren	30
5.1.1 Boorgeometrie	31
5.2 Optredende krachten	32
5.2.1 gevolgen van onevenwichtige krachten	32
5.3 Keuze van voeding	33

5.3.1	Torsie bij Boren	33
5.4	Boormachines en booroperaties in de industrie.	35
5.4.1	NC-gestuurde boormachines	35
5.4.2	Boren	35
5.4.3	Kotteren	36
5.4.4	Draadtappen	37
5.4.5	Ruimen	37
6	Verspanen: Frezen	38
6.0.1	Soorten frezen	38
6.0.2	Geometrie van de frees	38
6.1	krachtwerking bij frezen	39
6.2	Richting van frezen	40
6.2.1	Wanneer kiezen: meelopend vs tegenlopend	41
6.3	Soorten frezen	42
6.4	De Freesmachine	42
7	Verspanen:Hybridetechnieken	43
7.1	Honen	43
7.1.1	Lange-slag Honen	43
7.1.2	Korte-slag Honen	43
7.2	Leppen	44
7.2.1	Met vloeistof	44
7.2.2	Finisheren met pasta	44
7.3	Geadvaseerde verspaningstechnieken en hybride technieken	45
7.3.1	hoge snelheid verspanen	45
7.3.2	Hardverspanen	45
7.4	Hybrideprocessen	46
7.4.1	Laserondersteuning bij verspanen	46
7.4.2	Draadvonken en slijpen	46
7.4.3	ECM (Electro Chemical Machining) en slijpen	46
7.4.4	Combinatie van ECM en frezen	47
8	Verspanen:Slijpen	47
8.0.1	Frezen met onbepaalde snijkanten	47
8.0.2	Eigenschappen van slijpen	47
8.0.3	Parameters slijpsteen	48

8.1	temperaturen bij slijpen	50
8.2	Slijptechnieken	50
8.3	De slijpmachine	51
8.3.1	Centerloos slijpen	51
8.3.2	Profielslijpen	51
9	Fysische, Chemische afnemende bewerkingen	52
9.1	Vonkerosie	52
9.1.1	Componenten van een EDM-systeem	52
9.2	Performance van EDM	55
9.3	Spleetregeling	56
9.3.1	Electodemateriaal	56
9.4	Effecten van pulsduur en stroomsterkte	56
9.4.1	Toepassingen	57
9.4.2	Types	57
9.5	Elektrochemische bewerkingen	59
9.5.1	Eigenschappen van elektrochemisch bewerken	61
9.5.2	Afnamen bij ECM	61
9.5.3	Toepassingen van ECM	62
9.6	Ultrasoon bewerken (Ultrasonic Machining)	62
9.7	Straalbewerkingen	64
9.7.1	Shotpeening	64
9.7.2	abrasief stralen	65
9.7.3	Waterstraalsnijden	65
9.7.4	Laserstraalbewerking (LBM)	65
10	Scheiden	72
10.1	Ponsen en knippen	72
10.1.1	Algemeen Knippen en Ponsen	72
10.1.2	Knippen	73
10.1.3	Ponsen	74
10.1.4	Fijnstancen	76
10.1.5	Volgsnijstempel	76
10.1.6	Revolvermachine	77
10.1.7	Knabbelen	77
10.2	Mechanisch Scheiden, verspannen	77

10.3 Fysische scheiding	78
11 Oervormen (Gieten van metalen)	79
11.1 Inleiding	79
12 Automatiseren & machinekeuze	79
13 Productie werkvoorbereiding	79
14 Productiegericht ontwerpen	80

Formularium

Overzicht van formules per hoofdstuk.

Hoofdstuk 2: Materialen

Hooke's law $\sigma = E \cdot \varepsilon$ — waarbij σ de spanning is, E de elasticiteitsmodulus en ε de rek. (p. 12)

Hoofdstuk 3: Verspanen: Algemeen

Afschuifhoek $\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2}$ — waarbij γ de spaanhoek is en μ de wrijvingshoek tussen spaan en snijvlak. (p. 13)

afschuifvlak (shear zone) A $A = \frac{b * h}{\sin(\phi)}$ — waarbij b de breedte, h de hoogte en ϕ de afschuifhoek. (p. 14)

afschuifkracht $F = A * \tau$ — waarbij A het afschuifvlak is en τ de schuifspanning van het materiaal. (p. 14)

Snijsnelheid $v = \pi \cdot d \cdot n$ — waarbij d de diameter is en n het toerental in omwentelingen per minuut. (p. 16)

Snededoorsnede $A_d = a \cdot b$ — waarbij a de snedodiepte is en b de snedebreedte. (p. 16)

formule van Taylor $v_c T^n = C$ — waarbij C een constante is en n een materiaalconstante, T de gereedschaplevensduur in minuten en v_c de snijsnelheid in m/min. (p. 21)

Hoofdstuk 4: Verspanen: Draaien

Kienzle vergelijking Hoofdsnijkracht $F_c = k_c \cdot a \cdot f^{(1-e)}$ — waarbij k_c (N/mm² of Pa) de snijkrachtcoëfficiënt is, a de snedodiepte, f de voeding en e de snijkrachtexponent. (p. 24)

b: snedebreedte bij draaien $b = \frac{a}{\sin x}$ — waarbij a de snedediepte en x de instelhoek (zie figuur). (p. 24)

h: snededikte bij draaien $h = f \cdot \sin x$ — waarbij f de voeding en x de instelhoek (zie figuur). (p. 24)

Optimale snijsnelheid bij draaien $v_{c,\text{opt}} = v_c(k_c) \cdot f^{-u}$ — waarbij d de diameter is in mm en n het toerental in omwentelingen per minuut. (p. 25)

Spaanslankheid bij Draaien $\frac{b}{h} = \frac{a}{f \cdot \sin \kappa_r}$ — waarbij b de snedebreedte is, h de snededikte, a de snedediepte, f de voeding en κ_r de instelhoek. (p. 27)

gemiddelde ruwheid bij Draaien $R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r_\epsilon}$ — waarbij f de voeding is en r_ϵ de neusradius van de beitel. (p. 29)

totale ruwheid bij Draaien $R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon}$ — waarbij f de voeding is en r_ϵ de neusradius van de beitel. (p. 29)

Hoofdstuk 5: Verspanen: Boren, Fabricage en ronde gaten

Voedingskracht $F_f = k_f \cdot a \cdot f^{(1-e)}$ — waarbij k_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, a de snedediepte, f de voeding en e de voedingskrachtsexponent. (p. 33)

Verspanningsmoment $M_c = C_m \cdot d^{x_M} \cdot f^{y_M}$ — waarbij C_m de momentcoëfficiënt is, d de diameter, f de voeding en x_M, y_M de momentexponenten. (p. 33)

Vermogen bij boren $P_c = M_c \omega = M_c \cdot 2\pi n$ — waarbij M_c het verspanningsmoment is en ω de hoeksnelheid. (p. 33)

Torsie bij Boren $\tau = \frac{M_c \rho}{I_p}$ — waarbij M_c het verspanningsmoment is, ρ de afstand van het centrum tot het beschouwde punt en I_p het polair traagheidsmoment. (p. 33)

Maximale schuifspanning bij Draaien $M_d = C_b \cdot d^{x_w}$ — waarbij C_b de schuifspanningcoëfficiënt is, d de diameter, x_w de schuifspanningsexponent. (p. 34)

Maximale verspanningsmoment $M_c = a \cdot M_b$ — waarbij M_c het verspanningsmoment is en M_b het maximale verspanningsmoment. (p. 34)

Maximale voeding bij boren $f_{max} = C \cdot d$ — waarbij C een constante is, d de diameter en f_{max} de maximale voeding. (p. 35)

Kracht F_f is de kracht recht naar boven bij een boormachine $F_f = C_f \cdot d^{X_f} \cdot f^{y_f}$ — waarbij C_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, d de diameter, f de voeding en X_f en y_f de voedingskrachtsexponenten. (p. 35)

Hoofdstuk 6: Verspanen: Frezen

Snijkracht bij Frezen $F_c = k_c \cdot b \cdot h_{gem}^{(1-e)} \cdot z_i$ — waarbij k_c de snijkrachtcoëfficiënt is, b de snedebreedte, h_{gem} de gemiddelde snededikte, z_i het aantal tanden en e de snijkrachtsexponent. (p. 40)

Snijmoment bij Frezen $M_c = C_m \cdot d^{x_M} \cdot f_z^{y_M} \cdot z_i$ — waarbij C_m de momentcoëfficiënt is, d de diameter, f_z de voeding per tand, z_i het aantal tanden en x_M, y_M de momentexponenten. (p. 40)

Voedingskracht bij Frezen $F_f = k_f \cdot b \cdot h_{gem}^{(1-e)} \cdot z_i$ — waarbij k_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, b de snedebreedte, h_{gem} de gemiddelde snededikte, z_i het aantal tanden en e de voedingskrachtsexponent. (p. 40)

Hoofdstuk 9: Fysische, Chemische afnemende bewerkingen

Pulsenergie tijdens vonkfrezen $W_e = \int_0^{t_e} U_e I_e dt$ — waarbij U_e de doorslagspanning is, I_e de stroom en t_e de pulstijd. (p. 54)

Gereedschapslijtage bij EDM $v = \frac{\text{Volume gereedschap versleten}}{\text{Volume werkstuk verspaand}}$ — Deze is typisch tussen 1% en 5%. (p. 55)

Erosievastheid van elektrode (schematische benadering) $E = \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot T_m$ — waarbij λ de warmtegeleidingscoëfficiënt is, ρ de massadichtheid, c de soortelijke warmte en T_m de smelttemperatuur. (p. 56)

Afnamesnelheid bij ECM $M_{ECM} = \frac{I \cdot A}{F \cdot V} \cdot \eta$ — waarbij MMR(Material Removal Rate) is de snelheid van afname, I de stroomsterkte (A), A de atoommassa van het materiaal (g/mol), V de valentie (aantal elektronen), F de Faraday-constante (96485 C/mol) en η de efficiëntie. (p. 61)

Laser *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — is een apparaat dat licht versterkt door gestimuleerde emissie van straling. (p. 66)

BBP = Beam Parameter Product $BBP = \omega_0 \cdot \frac{\theta}{2}$ — waarbij ω_0 de halve diameter van het focuspunt is en θ de divergerende hoek van de straal. (p. 68)

Hoofdstuk 10: Scheiden

Afschuifkracht bij ponsen $F = \tau \cdot L \cdot s_0$ — Waarbij F de afschuifkracht is, τ de schuifspanning van het materiaal, L de omtrek van het profiel en s_0 de plaatdikte. (p. 72)

Schuifkracht bij knippen $F = 0.5 \cdot \frac{s^2}{\tan \varepsilon} \cdot \tau$ — waarbij F de afschuifkracht is, s de plaatdikte, ε de snijhoek en τ de schuifspanning van het materiaal. (p. 74)

Eerste formule Schuifkracht bij ponsen $F = s_0 \cdot l \cdot \tau$ — waarbij F de afschuifkracht is, s_0 de plaatdikte, l de omtrek van het profiel en τ de schuifspanning van het materiaal. (p. 75)

Tweede formule Schuifkracht bij ponsen $F = 1, \cdot y_s \cdot s_0 \cdot l \cdot \tau \cdot k_s$ — waarbij F de afschuifkracht is, y_s een correctiefactor voor het ponsproces, τ de schuifspanning van het materiaal, s_0 de plaatdikte, l de omtrek van het profiel en k_s de specifieke snijkracht. (p. 75)

1 Inleiding

Wat is Productietechnologie?

Productietechnologie gaat over het produceren van goederen. Hier komt veel bij te pas: niet alleen verschillende technieken en machines, maar ook kosten, snelheid en kwaliteit spelen een rol.

Deze samenvatting geeft een overzicht van de belangrijkste begrippen en technieken.

Hieronder verschillende productietechnieken,

- Gieten
 - Zandgieten
 - Spuitgieten
- Frezen
- Lassen
 - CO2-lassen
 - MIG/MAG, TIG, ...
- Vonkerosie
- Waterstraalsnijden
- Chemisch bewerken
- 3D-printen
- Draaien
- Snijden
- Ponsen
- Stralen

1.0.1 Keuzes bij productie

Bij produceren moet je afhankelijk van al deze technieken keuzes maken over welke technieken het beste is. Hoeveel producten moet ik produceren en wat kost dat? Het is allemaal afhankelijk van de eisen die aan het product worden gesteld.

Energiedrager	Bewerking
vaste stof:	
kogeltjes van glas of metaal	kogelstralen
korrels van metaal	staalstralen
abrasief materiaal	abrasief stralen
vloeistof (water)	waterstralen
vaste stoffen in vloeistof	abrasief waterstralen
vaste stoffen in gas	abrasief luchtstralen
ionen	ionenstralen of ionenbundel
elektronen	elektronenstralen
fotonen	laserstralen
geïoniseerde gassen	plasmastralen

Figuur 6.19 Overzicht van bewerkingen met stralen,
gebruikmakend van verschillende energiedragers

Figuur 1.1: Overzicht van bewerkingen met stralen, gebruikmakend van verschillende energiedragers

- Kosten
- snelheid
- kwaliteit
- milieu
- veiligheid
- functionaliteit
- materiaal
- tolerantie
- oppervlaktekwaliteit
- aantal
- onderhoud

al deze factoren zijn belangrijk bij het kiezen van een productietechniek.

1.1 Passing

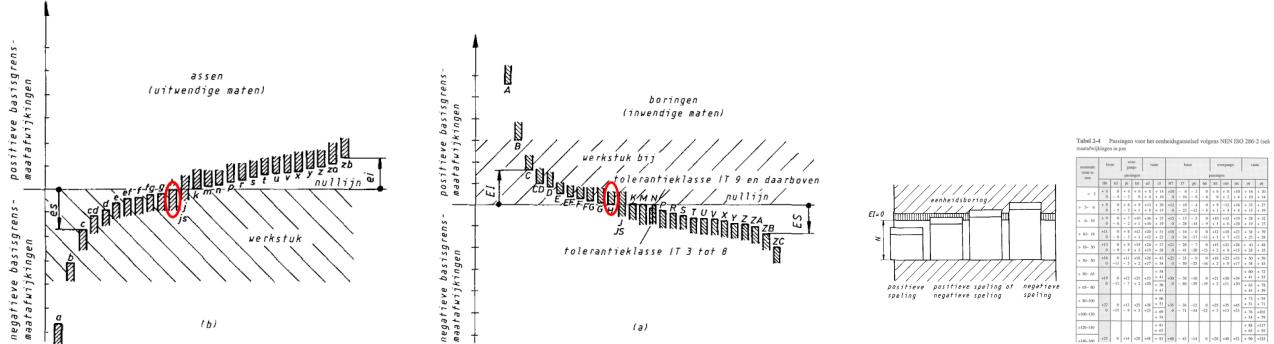
Passing is een maat voor hoe goed twee oppervlakken op elkaar aansluiten.

- Losse Passing: Er is nog speling tussen de twee oppervlakken.
- Nauw Passing: De twee oppervlakken sluiten goed op elkaar aan, er is bijna geen speling meer.
- PersPassing: De twee oppervlakken worden in elkaar gedrukt.

1.2 Tolerantie

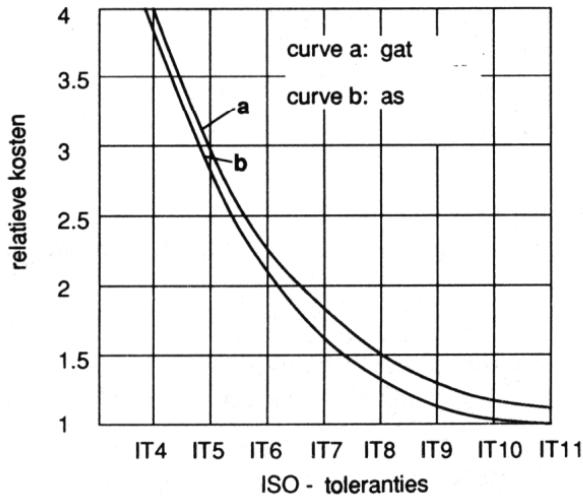
Toleranties worden geklassificeerd via diagrammen

- inwendige
 - uitwendige
 - passing



Figuur 1.2: Tolerantie diagrammen voor inwendige, uitwendige en passing

Je moet kiezen welke tolerantie nodig is voor een product. Precieze toleranties zijn duurder om te produceren.



Figuur 1.3: Kosten vs Tolerantie

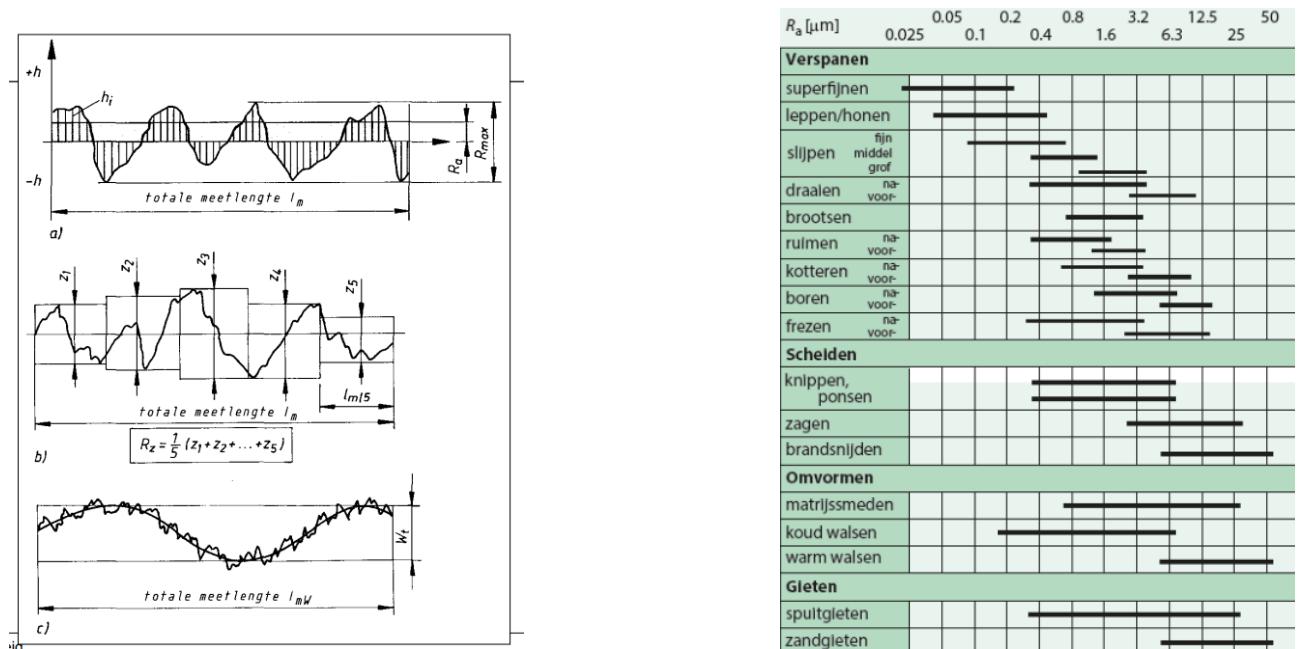
1.3 Oppervlaktekwaliteit

Oppervlaktekwaliteit moet ook gekozen worden bij het produceren van een product.

- Een ruw oppervlak is goedkoper om te produceren.
 - Een glad oppervlak is duurder om te produceren.
 - Soms is een glad oppervlak nodig voor de functionaliteit van het product.
 - Textuur kan ook functioneel zijn (antislip, esthetisch, ...). bv: een handvat, keyboard, tafels, pennen, ...

Oppervlaktekwaliteit wordt uitgedrukt in ruwheid. Ra, Rz, Rmax

verschillende productietechnieken hebben verschillende oppervlaktekwaliteiten.



Figuur 1.4: Voorbeelden van oppervlaktekwaliteiten

2 Materialen

Dit hoofdstuk gaat over de effecten van verschillende materialen op productietechnieken en over het effect van de gekozen productietechniek op het materiaal.



Figuur 2.1: Effect van thermisch proces op materialen

Er zijn verschillende soorten materialen die je kunt kiezen. Allemaal hebben ze verschillende materiaaleigenschappen.

- Metalen
- Kunststoffen
- Keramiek
- Composieten

2.0.1 Vervorming

Je hebt elastische en plastische vervormingen in een materiaal die gebeuren tijdens het bewerken van een materiaal.

- Elastische vervorming: Het materiaal keert terug naar zijn originele vorm nadat de kracht is weggenomen.
- Plastische vervorming: Het materiaal blijft vervormd nadat de kracht is weggenomen.

Elastische vervorming gegeven door Hooke's law:

Hooke's law:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

waarbij σ de spanning is, E de elasticiteitsmodulus en ε de rek.

3 Verspanen: Algemeen

Dit hoofdstuk is de basis van verspanen en is relevant voor alle verspaningstechnieken.

Verspannen is het verwijderen van materiaal van een werkstuk. Dit kan door boren, frezen, draaien of slijpen, ... Je begint met een ruw werkstuk en verwijdert materiaal totdat je de gewenste vorm en afmetingen hebt.

Voordelen

- Hoge precisie
- Goede tolerantie
- Goede oppervlaktekwaliteit
- Flexibiliteit in ontwerp

Nadelen

- Materiaalverlies
- Hogere kosten bij grote aantallen
- Langere productietijd
- energieintensies
- Vervuilend (spanen, koelvloeistof)

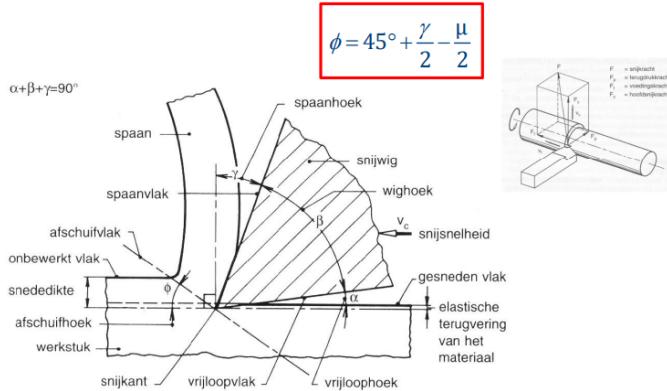
Bij verspanen kunnen verschillende tools gebruikt worden. Deze tools hebben verschillende snijvlakken en geometrieën die geschikt zijn voor verschillende materialen en bewerkingen.

- beitel
- frees

- boor
- slijpschijf

3.1 beitelbewerkingen

Bij beitelbewerkingen wordt materiaal verwijderd door een scherpe beitel over het werkstuk te bewegen.

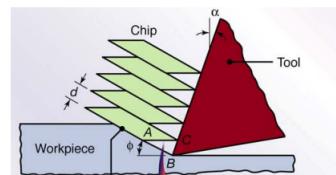


Figuur 3.1: Verwijdering van materiaal door een beitel → creëert spanen

Bij het verspanen met een beitel ontstaan er spanen. Spanen zijn kleine stukjes materiaal die worden verwijderd van het werkstuk. De grootte van de spanen wordt bepaald door de sneudediepte, de voeding, de spaanhoek en de wrijvingscoëfficiënt.... Zometeen meer in detail hierover

Spanen is een plastische vervorming van de spanen maar het oppervlak van het werkstuk ondergaat ook een elastische vervorming. Dit kan leiden tot oppervlaktfouten zoals ruwheid, hardheid, ...

- μ = wrijvingscoëfficient
- h = sneudedikte
- b = sneebreedte (loodrecht op figuur)
- Grootte afschuifvlak $A = b \cdot h / \sin(\Phi)$
- Benodigde afschuifkracht (als deel van snijkrachten) $\rightarrow F = A \cdot \tau_{\max}$
- Formule toont belangrijke invloed spaanhoek en wrijving op snijkrachten!



$$\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2}$$

Figuur 3.2

Afschuifhoek:

$$\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2}$$

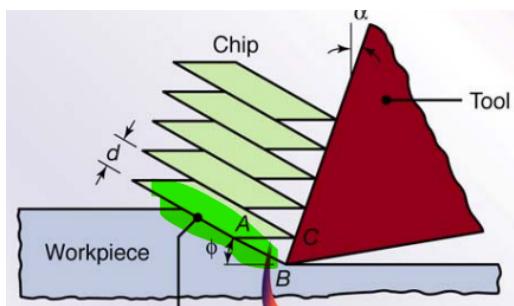
waarbij γ de spaanhoek is en μ de wrijvingshoek tussen spaan en snijvlak.

De afschuifhoek bepaalt de richting waarin de spaan wordt afgesneden. Een grotere afschuifhoek leidt tot een betere spaanvorming en minder kracht

afschuifvlak (shear zone) A:

$$A = \frac{b * h}{\sin(\phi)}$$

waarbij b de breedte, h de hoogte en ϕ de afschuifhoek.



Figuur 3.3

afschuifkracht:

$$F = A * \tau$$

waarbij A het afschuifvlak is en τ de schuifspanning van het materiaal.

Grotere spaanhoek γ \rightarrow kleiner afschuifvlak \rightarrow minder kracht nodig om spaan te vormen.

3.1.1 Secundaire afschuifvlak(shear zone)

Spanen gaan verwijderd worden en daarbij treedt wrijving op tussen spaan en beitel; dit is het secundaire afschuifvlak. Als je negatieve spaanhoeken γ meet, dan is er veel meer wrijving tussen de spaan en de beitel.

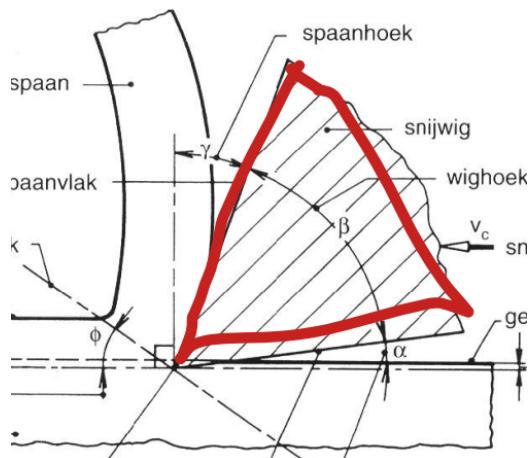
- Spaanhoek γ \rightarrow groter \rightarrow minder kracht nodig. Tussen -10° en 30°
- Wighoek β \rightarrow zo groot mogelijk maken.

Wighoeken bepalen de sterkte van de beitel en de warmteafvoer. Grote wighoeken brengen de warmte sneller weg en dus kun je grotere voedingsnelheden gebruiken.

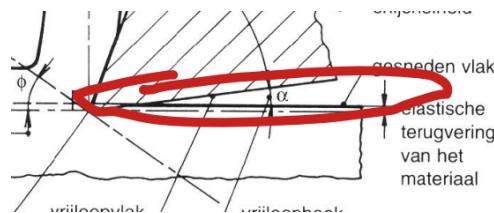
Wighoek moet zo groot mogelijk zijn

- Vrijloophoek α \rightarrow groter \rightarrow minder wrijving tussen werkstuk en beitel. Tussen 6° en 10° Vrijloophoek moet er zijn zodat je beitel niet begint te wrijven over het oppervlakte van je materiaal. Zelfs rond 0° kan al zorgen voor veel wrijving.
- Snedediepte \rightarrow groter \rightarrow meer kracht nodig
- Voeding \rightarrow groter \rightarrow meer kracht nodig

Deze verschillende hoeken hebben effect op elkaar. Dit is dus een optimalisatieprobleem. Je moet afwegen wat de beste hoeken zijn voor jouw materiaal en bewerking.



Figuur 3.4: Wighoek

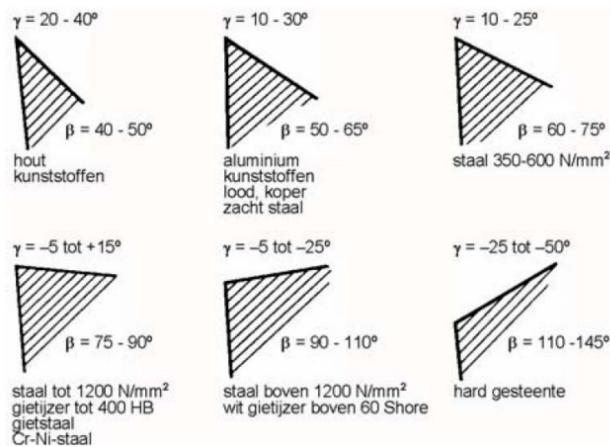


Figuur 3.5: Vrijloophoek

De spaanhoek is enorm belangrijk. Een grote spaanhoek snijdt makkelijk materialen zoals aluminium, koper, kunststof. Voor hardere materialen zoals staal is een kleinere spaanhoek nodig omdat het materiaal anders te hard is om te snijden en je moet veel te veel kracht zetten. Negatieve spaanhoeken worden gebruikt voor zeer harde materialen.

Extra info

Deze bewerkingen zijn allemaal met ductiele materialen. Brosse materialen gaan snel afbrokkelen en hebben dus niet veel elastische vervorming. Je kunt druk uitoefenen op brosse materialen tijdens bewerking; het materiaal gaat zich dan meer ductiel gedragen. Hoe oefen je druk uit op materialen? Door een grote spaanhoek te gebruiken, die veel spanning creëert.



Figuur 3.6: Verschillende spaanhoeken voor verschillende materialen

3.2 Beweging, snelheden en voedingen, temperaturen, slijtage

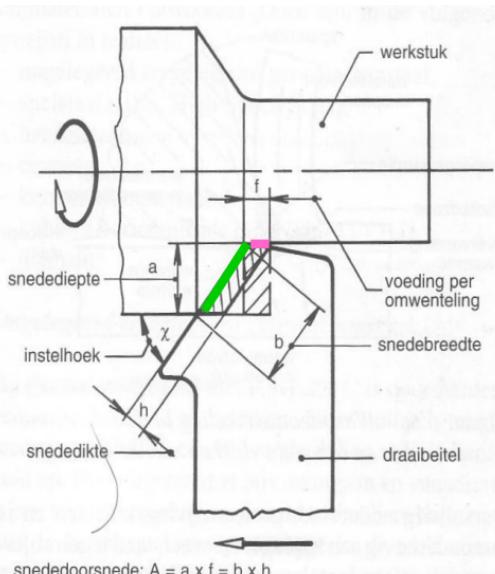
Er zijn verschillende factoren die de kracht op je werkstuk bepalen

- Snijsnelheid (v)
- Voeding (f)
- Snedediepte (a)
- Snedebreedte (b)
- Snededikte (h)

Snijsnelheid:

$$v = \pi \cdot d \cdot n$$

waarbij d de diameter is en n het toerental in omwentelingen per minuut.



Figuur 3.7: Snededoorsnede bij beitelbewerking

Snededoorsnede:

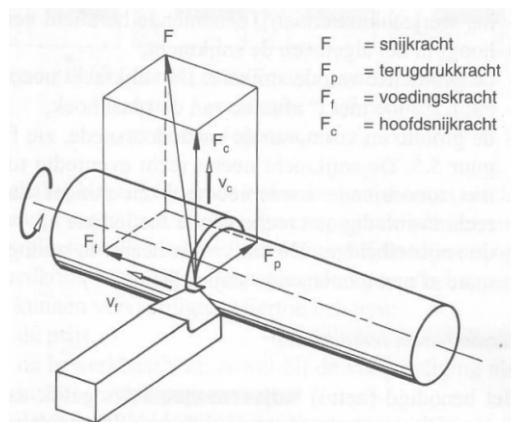
$$A_d = a \cdot b$$

waarbij a de snedediepte is en b de snedebreedte.

3.2.1 Krachten

Tijdens het bewerken van materialen met een beitel komen er verschillende krachten op het werkstuk en de beitel te staan.

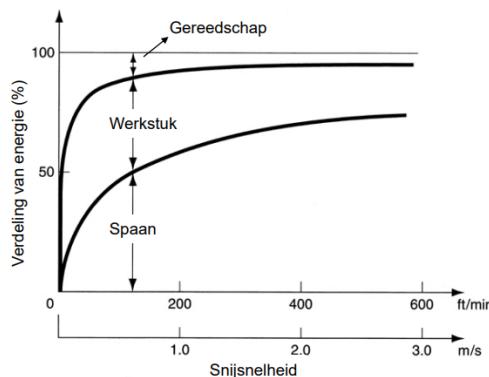
- Snijkracht (Fc): Kracht die nodig is om de spaan te vormen.
- Voedingskracht (Ff): Kracht die in de voedingsrichting werkt.
- Terugdrukkracht (Fp): Kracht die nodig is om de beitel in het werkstuk te duwen.



Figuur 3.8

Wat neem voeding op?

- Warmteontwikkeling
- Werkstuk
- Gereedschap
- Spaanvorming Afhankelijk van de snijsnelheid v_c en de voeding f . is er een andere verdeling van de energie.



Figuur 3.9: Voeding of snijsnelheid in functie van energieverdeling

3.3 Factoren bij beitelbewerking

• Opbouwlaag (build-up edge/BUE)

Een dunne, hard geworden laag metaal die zich bij lage snijsnelheden aan het snijgereedschap opbouwt aan de punt van de beitel. Zie video toledo. Deze stukken trekken mee aan het oppervlak van het werkstuk en nemen dus meer af dan nodig is. Je krijgt dan een stappige oppervlakte.

Verbeteren / voorkomen:

- Verhoog de snijsnelheid: bij hogere snelheden herstelt het materiaal sneller, waardoor BUE minder snel vormt.
- Gebruik koeling of smering: verminderd hechten en verlaagt gereedschapstemperatuur.

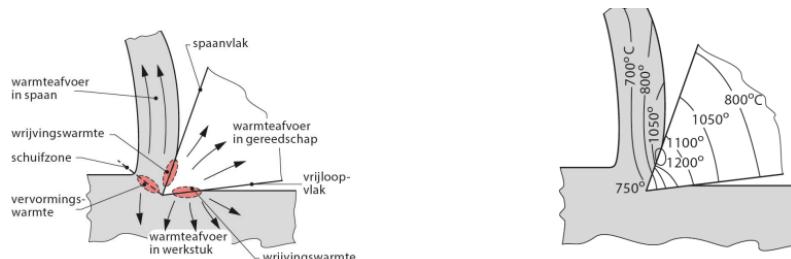
- Kies geschikte gereedschapsmaterialen en coatings (bv. TiN/AlTiN) en houd de snijkant scherp.
- Pas voeding en snedediepte aan of gebruik onderbroken snedes (pecking) om opbouw te vermijden.
- Controleer en vervang gereedschap regelmatig; verwijder opbouwranden veilig indien nodig.

• Warmte

Deze processen genereren veel warmte. Dit kan het materiaal aan de oppervlakte vervormen, leiden tot veranderde hardheid en ruwheid en verhoogde slijtage. Er zijn verschillende manieren om de warmte te verminderen:

- Koelen met koelvloeistof -> hoge nauwkeurigheid en lage ruwheid.
- Smeren met olie -> hogere snijsnelsheid mogelijk, hogere voeding.
- Spaanafvoer optimaliseren -> vermijd ophoping van spanen die warmte vasthouden.
- Werkstuk emulseren in water, koelvloeistof of olie.

Warmte wordt op het werkstuk op drie plaatsen gecreëerd: 1. Afschuifvlak (shear zone): 2. Secundaire afschuifvlak (tussen spaan en beitel): 3. Vrijloopvlak (tussen werkstuk en beitel):



Figuur 3.10

• Spaanvorming

Spanen kunnen het werkstuk beschadigen als ze niet goed worden afgevoerd. Dit kan leiden tot krassen en ruwheid.

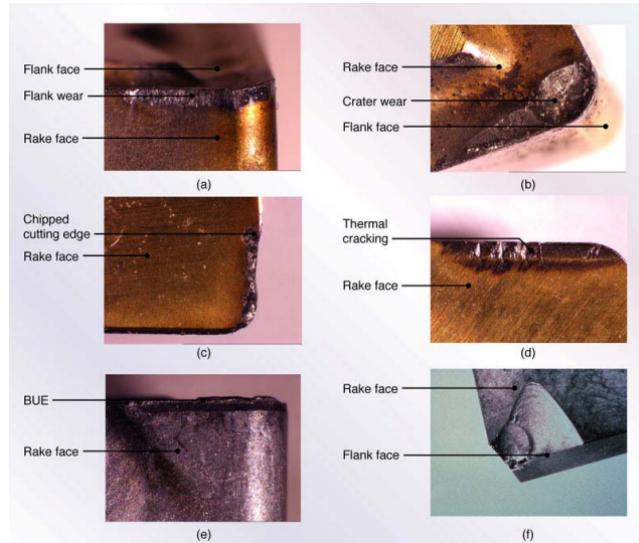
- Continue spaanvorming
- Lamelsspaan
- brokspaan

• Slijtage

Tijdens het bewerken van materialen slijt het gereedschap. Dit kan leiden tot een slechtere oppervlaktekwaliteit, hogere krachten, hogere temperaturen, enz. Slijtage kan veroorzaakt worden door:

- Vrijloopslijtage: door wrijving tussen gereedschap en werkstuk.
- Thermische slijtage: door hoge temperaturen die het gereedschap verzwakken
- Kerfslijtage: door herhaalde spanningsconcentraties bij het vrijloopvlak.

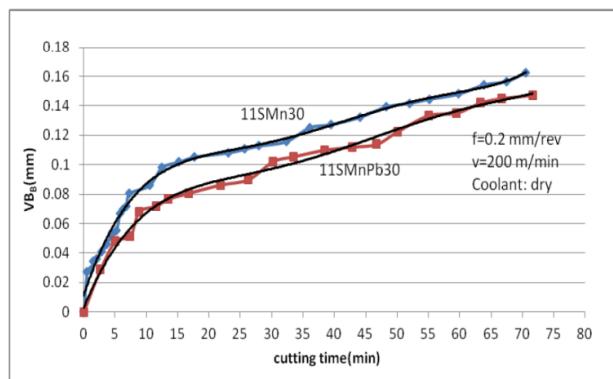
- Breuk: Afbreken van een stuk
- Werkstukslijtage: Vlijloopvlak slijtage verhoogd met verbruik van de beitel.
- Neusslijtage: slijtage aan de punt van de beitel door hoge krachten en temperaturen.



Figuur 3.11

Je kunt slijtage verminderen door:

- Gebruik van coatings op gereedschap (bv. TiN, AlTiN) om wrijving en hitte te verminderen.
- Optimaliseren van snijsnelheid, voeding en snedediepte om overmatige hitte en krachten te vermijden.
- Toepassen van koeling en smering om hitte af te voeren en wrijving te verminderen.
- Tool met lood PB gebruiken lood geeft minder slijtage omdat het smerende

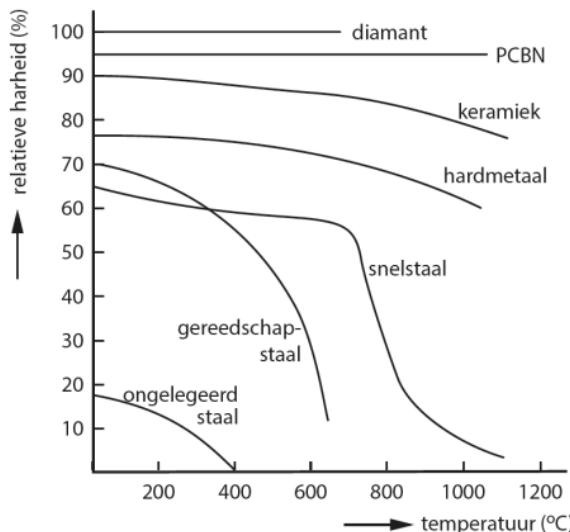


Figuur 3.12

eigenschappen heeft -> minder wrijving.

3.4 Snijmaterialen

Met welk materiaal ga je je beitel maken? Je beitel moet ductiel zijn en taai. Het perfecte gereedschap is goedkoop, ductiel en taai.



Figuur 3.13: Relatieve hardheid in functie van temperatuur voor verschillende snijmaterialen

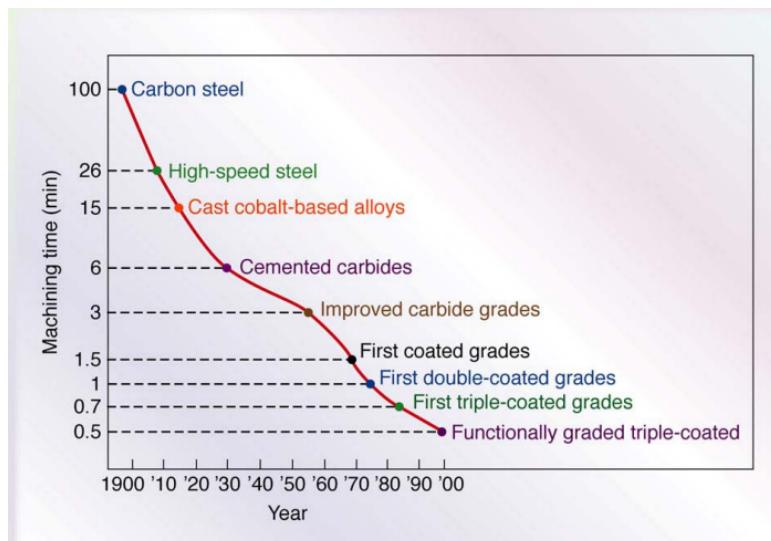
1. **Snelstaal (HSS)** (v_c 6-12 m/min). gehard staal; geschikt voor algemene toepassingen bij lage tot matige snijsnellheden. Goedkoop om te maken.
2. **Hardmetaal (wolframcarbide, WC + Co)** hittebestendig; geschikt voor hogere snijsnellheden en hardere materialen dan HSS.
3. **Gecoate hardmetaal (v_c 60–600 m/min)** Dunne coatings (bv. TiN, AlTiN) verbeteren slijtvastheid en hittebestendigheid; de bovenste laag moet slijtage weerstaan terwijl binnenvaste lagen warmte afvoeren. **Productie:** PVD (Physical Vapor Deposition) of CVD (Chemical Vapor Deposition).
4. **Keramiek in metaalmatrix (hoge v_c)** Zeer hard en hittebestendig; geschikt voor hoge snijsnellheden bij harde materialen. Keramische deeltjes zijn ingebed in een metaalmatrix (nitriden, oxiden of carbiden). Vermijd onderbroken sneden omdat keramiek brok is; houd de snijdedoorsnede klein.
5. **Diamant** — zeer hard; beperkt toepasbaar bij bewerking van staal omdat diamant bij hoge temperaturen en in aanwezigheid van ijzer kan reageren en degraderen.

Snelstaal is goedkoop, maar het wordt duurder naarmate je betere materialen gebruikt. Je moet dus bepalen hoe goed je gereedschap moet zijn voor jouw toepassing.

Al deze snijmaterialen zijn gecreëerd door de jaren heen. Er wordt nog steeds onderzoek gedaan aan betere, goedkopere en duurzamere materialen.

3.4.1 Classificatie van snijmaterialen

belangrijk voor tijdens het examen. Hij kan een klasse gegeven zoals in de figuur en jij moet weten waar dat voor staat!



Figuur 3.14: Overzicht van snijmaterialen en hun toepassingsgebieden

- Aanduiding (ISO-norm 513) - bv. HC-K15

HC gecoat hardmetaal
HW onbekleed hardmetaal op wolframbasis
HT cermets
CA keramiek op aluminium basis
CM keramiek op siliciumnitride basis
CC gecoat keramiek
CN keramiek op siliciumnitride basis
BN polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN)
DP polykristallijn diamant (PKD)

2 cijfers: toepassingsbereik/mechanische belastbaarheid

- Klein getal → bros, hard, hittebestendig → finisseren, hoge snijsnelheid
- Groot getal → taaig → grote snijkrachten en dynamische belastingen

P	staal (afgezien van de apart genoemde groepen staalsoorten)
M	corrosievast staal, austenitisch staal
K	gietijzer, ferrometalen, legeringen op Ni-, Ti- en Co-basis, geharde materialen
N	non-ferrometalen, niet-metallische materialen, keramiek, kunststoffen en composieten
S	hittebestendige legeringen op basis van Ni en Co, titanium en Ti-legeringen
H	geharde materialen, RVS-series 300 en 400, gesinterde carbiden

Figuur 3.15: Classificatie van snijmaterialen

3.5 Optimale snijsnelheid

Bij alle machines worden inserts gebruikt voor beitels. Als beitels kapot gaan door slijtage, kan je die vervangen. Je moet dus de optimale snijsnelheid kiezen zodat je zo lang mogelijk met een insert kan werken

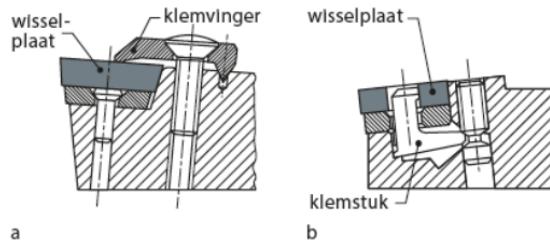
Bij grotere snijsnelheden is er meer slijtage.

Je kunt de levensduur van een gereedschap voorspellen met de formule van Taylor:

formule van Taylor:

$$v_c T^n = C$$

waarbij C een constante is en n een materiaalconstante, T de gereedschalevensduur in minuten en v_c de snijsnelheid in m/min.



Figuur 3.16: Klemming van Inserts in een houder

Je kunt deze formule gebruiken om de optimale snijsnelheid te bepalen.

Hier zijn C en n materiaalconstanten. Deze formule laat zien hoe veranderingen in snijsnelheid de levensduur beïnvloeden.

Voorbeeld:

Gegeven: $n = 0.125$. Verhoog de snijsnelheid met 50%: $v_2 = 1.5 v_1$.

Volgens Taylor: $v_1 T_1^n = C$ en $v_2 T_2^n = C$. Daarom

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^n$$

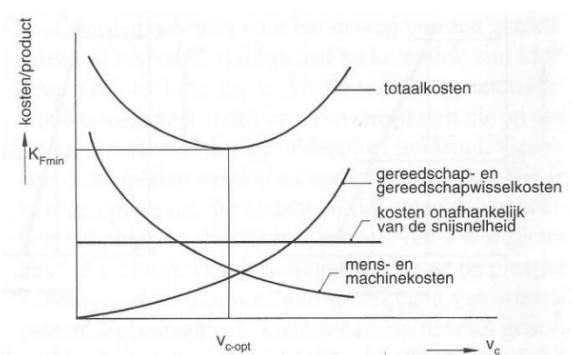
en dus

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{-1/n} = (1.5)^{-1/0.125} = (1.5)^{-8} \approx 0.039.$$

Dus als je de snijsnelheid met 50% verhoogt, wordt de gereedschapslevensduur ongeveer 0.039 keer zo groot — oftewel ongeveer 25 keer korter.

De vraag is wat de optimale snijsnelheid is?

- Optimale snijsnelheid



- Vuistregels (draaien $T=10$ à 20 [minuten] – frozen $T=60$ [minuten])
- Noot: optimaliseren naar productietijd

Figuur 3.17

4 Verspanen: Draaien

Draaien is een veelgebruikte verspaningstechniek waarbij een roterend werkstuk wordt bewerkt met een beitel om materiaal te verwijderen en de gewenste vorm te creëren.

Je kunt hier verschillende bewerkingen mee uitvoeren:

1. **Langsdraaien:** Het verwijderen van materiaal langs de lengteas van het werkstuk om de diameter te verkleinen.
2. **Vlakdraaien:** Het creëren van een vlak oppervlak aan het uiteinde van het werkstuk.
3. **Insteekdraaien:** Het snijden van een groef of het afkappen van een deel van het werkstuk.
4. **Schroefdraad Snijden:** Het creëren van schroefdraad op het oppervlak van het werkstuk.

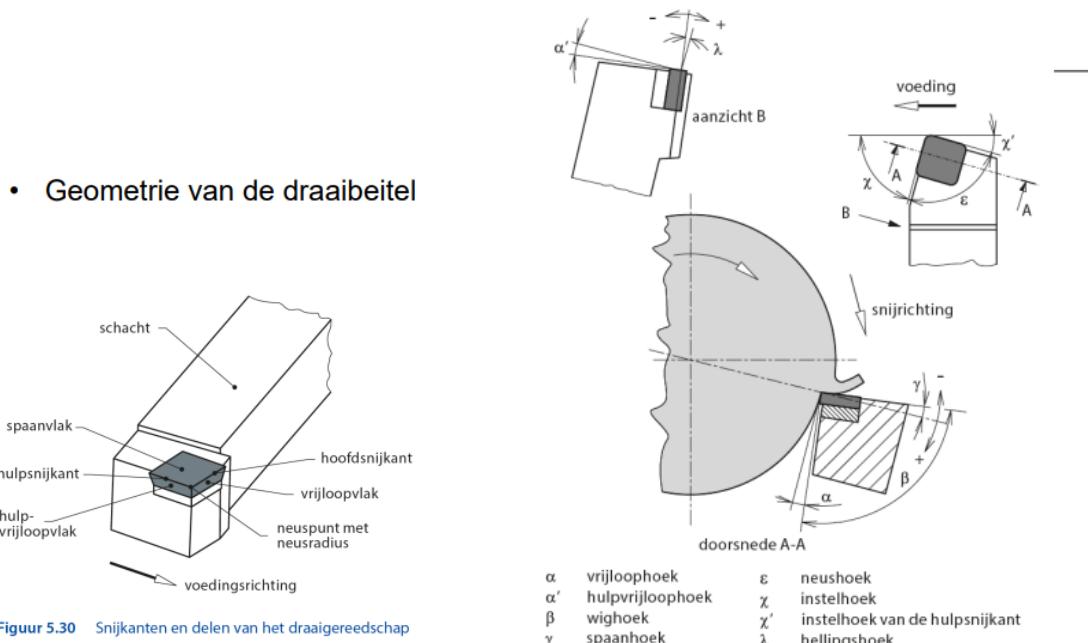
Extra's:

Kopsteken: Het werkstuk wordt in de lengte doorgesneden.

Profiel draaien: Een specifiek profiel van het werkstuk maken die dan gedraaid kan worden. Dit is specifiek en dus duur, maar als je veel van dit stuk moet maken kan dit het waard zijn.

In de industrie: Vandaag de dag wordt er veel gebruiktgemaakt van computergestuurde machines. CNC-draaien is een geautomatiseerd proces waarbij computergestuurde machines precies draaien volgens digitale ontwerpen. Veel conventionele machines en profieldraaien zijn vervangen door CNC-draaien.

4.1 Het Draaiproces

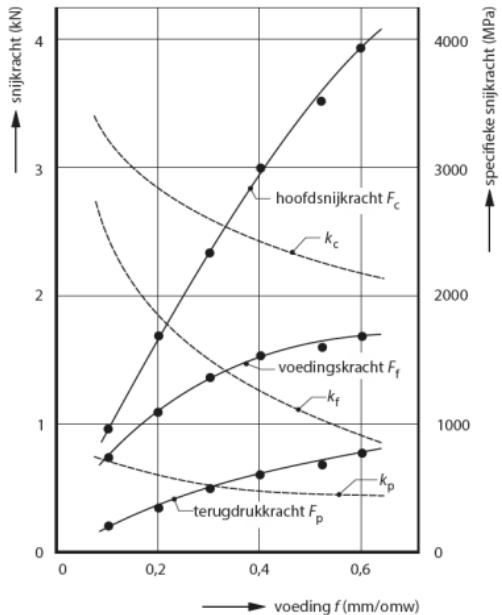


Figuur 4.1: Draaiproces

Hellingshoek Een hellingshoek is de extra hoek die gecreëerd wordt door het dat je ronde dingen aan het verspanen bent. Je vrijloophoek α wordt kleiner hierdoor. Je moet dus hiervoor compenseren door een grotere vrijloophoek te gebruiken.

4.2 Krachten bij Draaien

Zoals vermeld in het algemeen Verspannen heb je drie krachten op je werkstuk



Figuur 4.2: Krachten bij Draaien

Zorg dat je de volgende formules kent en kunt uitleggen:

De hoofdsnijkracht wordt berekend met de formule van Kienzle:

Kienzle vergelijking Hoofdsnijkracht:

$$F_c = k_c \cdot a \cdot f^{(1-e)}$$

waarbij k_c (N/mm^2 of Pa) de snijkrachtcoëfficiënt is, a de snedediepte, f de voeding en e de snijkrachtexponent.

k_c zijn materiaalconstanten die dan ook nog je optimale snijsnelheid gaan bepalen.

b: snedebreedte bij draaien:

$$b = \frac{a}{\sin x}$$

met a de snedediepte en x de instelhoek (zie figuur).

h: snededikte bij draaien:

$$h = f \cdot \sin x$$

met f de voeding en x de instelhoek (zie figuur).

De optimale snijsnelheid bij draaien is afhankelijk van k_c

Optimale snijsnelheid bij draaien:

$$v_{c,\text{opt}} = v_c(k_c) \cdot f^{-u}$$

waarbij d de diameter is in mm en n het toerental in omwentelingen per minuut.

Aanvullende formules (zonder frm):

$$P_c = F_c v_c$$

$$P_m = \frac{P_c}{\eta}$$

$$v_c = \pi d n$$

$$v_f = f n$$

$$Q = a f v_f$$

$$M_c = F_c \frac{d}{2}$$

Als n in rev/min en d in mm: v_c ([m/min]) = $\pi \frac{d \text{ [mm]}}{1000} n \text{ [rev/min]}$.

Korte uitleg en eenheden:

- $P_c = F_c v_c$: vermogen is kracht maal snelheid ($N \cdot m/s = W$). Als v_c in m/min gegeven is, deel door 60 om naar m/s te gaan.
- $P_m = P_c/\eta$: rekening houden met mechanische/elektrische efficiëntie η (dimensieloos); motorvermogen is altijd groter dan of gelijk aan het snijvermogen.
- $v_c = \pi d n$: op één omwenteling legt een punt op de omtrek een afstand πd af; keer het aantal omwentelingen per tijd geeft lineaire snelheid. Let op eenheden (mm vs m, rev/min vs rev/s).
- $v_f = f n$: voedingssnelheid is voeding per omwenteling maal het aantal omwentelingen per tijd; gebruik mm/rev × rev/min = mm/min.
- $Q = a f v_f$: materiaalafname (volume/tijd) is snedediepte × voeding per omwenteling × voedsnelheid; zorgt voor mm^3/min bij consequente eenheden.
- $M_c = F_c(d/2)$: koppel is kracht maal arm (halve diameter als hefboom) → $N \cdot m$.

Al deze formules zijn belangrijk om te begrijpen hoe de verschillende parameters bij draaien met elkaar in verband staan. Als hij vraag op het examen. Met deze parameters en deze voeding. Wat is de maximale snijsnelheid die ik kan gebruiken? Je kunt deze logarithmisch plotten zoals de figuur hieronder om te zien welke snijsnelheid je maximaal kunt gebruiken

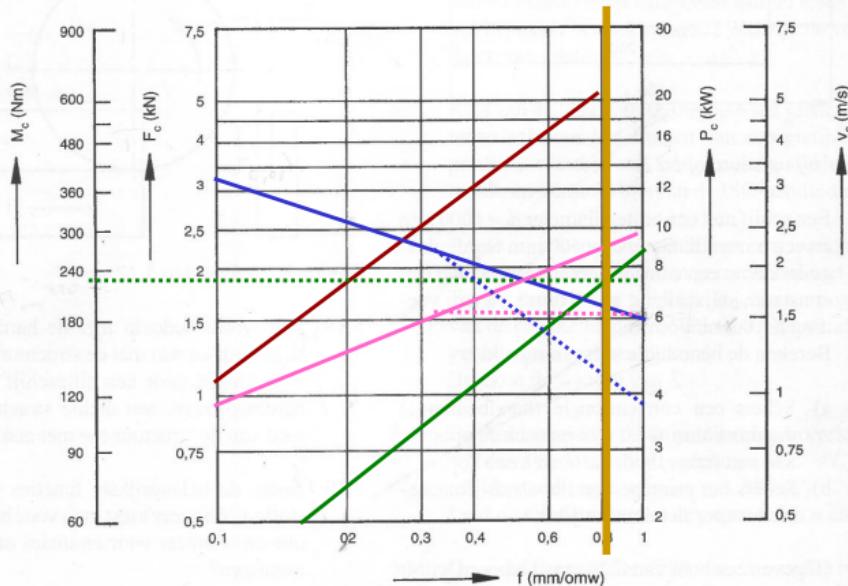
Zie dat alle formules in verband staan met de voeding.

$$F_c = k_{c1.1} \times a \times f^{(1-\varepsilon)}$$

$$M_c = F_c d/2$$

$$v_{c-opt} = v_{c1.1} \times f^{-u}$$

$$P_c = F_c \times v_c$$



Figuur 4.3: Bepaling krachten, voeding of moment op werkstuk

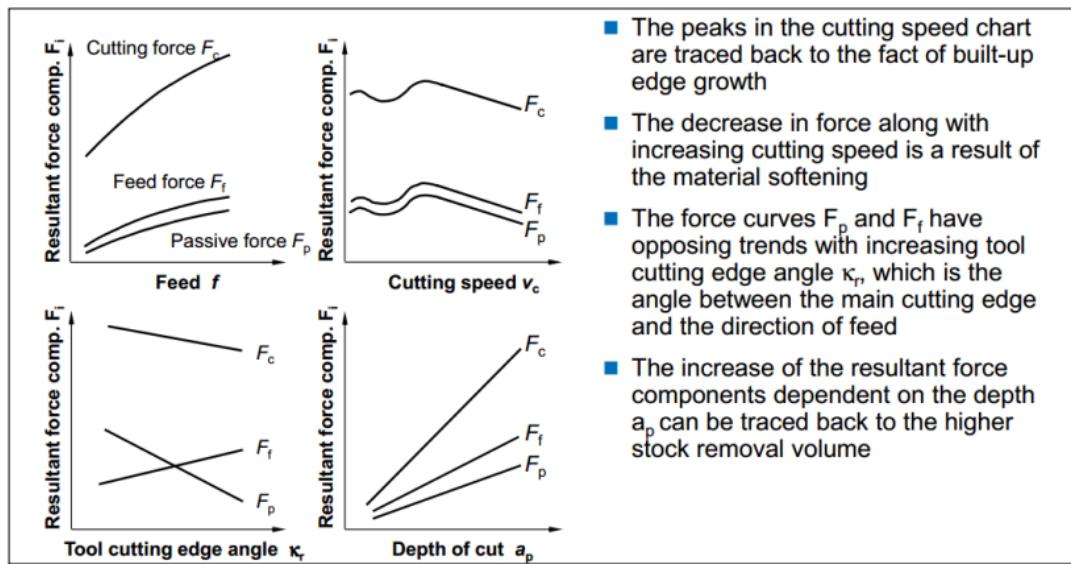
Zo zie je hoe instelparameters zoals voeding, snijsnelheid en snedediepte in de industrie, bepaald worden.

4.3 Invloeden voeding f en snedediepte a op de kracht en snijsnelheid

BELANGRIJK, HIJ KAN LEGE FIGUREN GEVEN OP HET EXAMEN EN JIJ MOET EFFECTEN KUNNEN UITLEGGEN

1. **Softening effect (verzachting)**: Bij hogere voeding ontstaat meer warmte in het snijgebied. Die warmte maakt het oppervlak lokaal zachter, waardoor voor dezelfde snijsnelheid de snijkracht en voedingskracht doorgaans afnemen.
2. **Build-up edge (BUE)**: Bij lage snijsnelheden en bepaalde voedingen kan materiaal aan de snijkant aanhechten (BUE). Dit veroorzaakt tijdelijke pieken in de krachten en kan de oppervlaktekwaliteit verslechtern; bij hogere voeding of snelheid neemt dit effect vaak af.
3. **Snijkanthoek κ_r** : Het veranderen van de hoek van het snijvlak verschuift de richting en verdeling van de krachten; sommige componenten (bijv. F_c) kunnen toenemen terwijl andere (bijv. F_f of F_p) afnemen, waardoor de krachten anders verdeeld zijn.
4. **Snedediepte a_p** : Een grotere snedediepte vergroot het verwijderde volume per omwenteling en verhoogt daardoor alle resulterende krachtcomponenten (snijkracht, voedingskracht, terugdrukkracht).

– Invloed f, ap, vc, Xr



Figuur 4.4

4.4 Spaanvorming bij Draaien

Er zijn verschillende parameters die spaanvorming beïnvloeden

- **Instelhoek κ_r :** De spaanslankheid $\frac{b}{h}$ hangt mede af van de instelhoek (met b de snede-breedte en h de snededikte).
- **Hellingshoek λ :** Een grotere hellingshoek kan de effectieve snede-breedte b vergroten en daarmee de spaanslankheid beïnvloeden.
- **Snedediepte a :** Een grotere snedediepte vergroot doorgaans b en verhoogt de spaanslankheid.
- **Voeding f :** Grottere voeding verhoogt de snededikte h , wat resulteert in dikkere spanen die moeilijker breken.
- **Materiaal:** Ductiele materialen veroorzaken vaak lange, samenhangende spanen; brosse materialen geven korte, brokkelige spanen.
- **Spaanhoek γ :** Een grotere afschuifhoek maakt spaanvorming gemakkelijker en vermindert de kans op gebroken spanen.

Spaanslankheid bij Draaien:

$$\frac{b}{h} = \frac{a}{f \cdot \sin \kappa_r}$$

waarbij b de snede-breedte is, h de snededikte, a de snedediepte, f de voeding en κ_r de instelhoek.

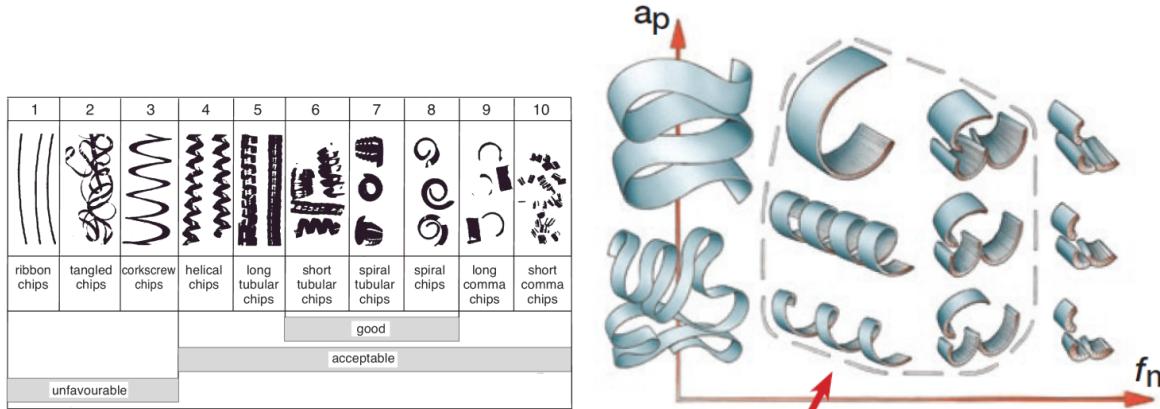
$$h = f \cdot \sin \kappa_r$$

De snededikte h bij draaien wordt bepaald door de voeding f en de instelhoek κ_r . Een grotere voeding of een kleinere instelhoek resulteert in een dikkere spaan, wat de spaanvorming

beïnvloedt.

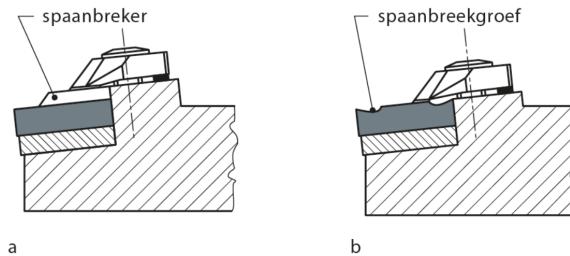
$$b = \frac{a}{\sin \kappa_r}$$

De snedebreedte b bij draaien wordt bepaald door de snedediepte a en de instelhoek κ_r . Een grotere snedediepte of een grotere instelhoek resulteert in een bredere spaan, wat de spaanvorming beïnvloedt.



Figuur 4.5: Verschillende types spaanvorming bij draaien en welke goed zijn en welke parameters invloeden.

Om grote spannen te worden spaanbrekers gebruikt. Spaanbrekers zijn inkepingen in de beitel die de spaan breken in kleinere stukken.



Figuur 4.6: Spaanbrekers in beitels

4.5 Oppervlakteruwhed bij Draaien

De oppervlakteruwhed wordt gecreerd door de beitel. De beitel is niet perfect scherp en is dus licht bol, dit is de neusradius $*r_\epsilon$. Deze bol zal kleine inkepingen maken in het oppervlakte. De ruwheid wordt dus bepaald door de neusradius en de voeding.

De oppervlakte ruwheid wordt bepaalde door de voeding en de neusradius.

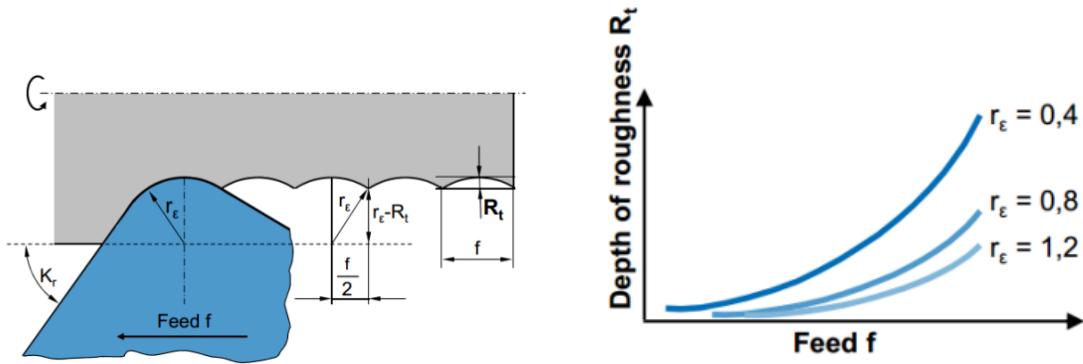
- R_t is de totale hoogte van de ruwheid
- R_a is de gemiddelde hoogte van de ruwheid

Kinematische ruwheid of drawsruwhheid bij draaien:

Kinematische ruwheid is puur door de geometrie van het systeem.

De processruwheid

De processruwheid is de ruwheid die ontstaat door trillingen en andere onvolkomenheden in het



Figuur 4.7

systeem. Het is de ruwheid door de opbouwsnijkant (Build-up edge BUE) en andere factoren.

Totale ruwheid

De totale ruwheid wordt bepaald door de kinematische ruwheid en de processruwheid

gemiddelde ruwheid bij Draaien:

$$R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r_\epsilon}$$

waarbij f de voeding is en r_ϵ de neusradius van de beitel.

totale ruwheid bij Draaien:

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon}$$

waarbij f de voeding is en r_ϵ de neusradius van de beitel.

Afleiding (oppervlakteruwheid). Stel dat de neus van de beitel lokaal een cirkelboog met straal r_ϵ vormt en dat de voeding per omwenteling f de koorde van die boog is. De booghoogte (sagitta) is

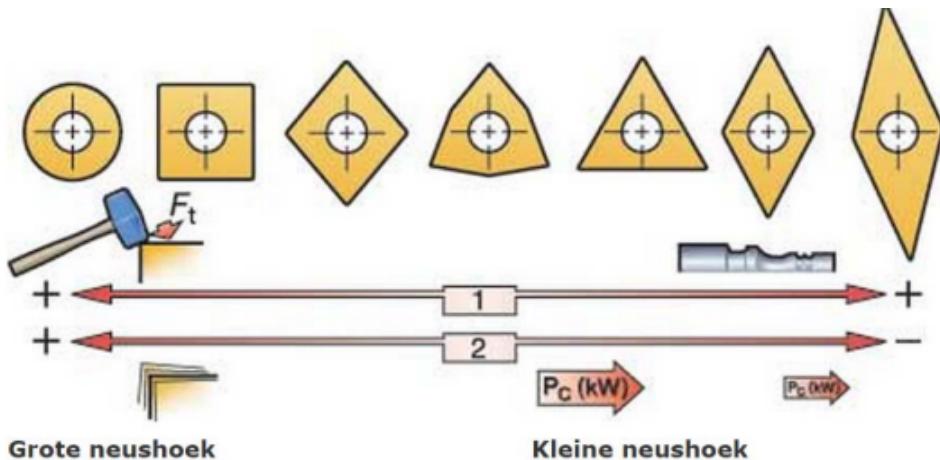
$$s = r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2} \approx \frac{f^2}{8 r_\epsilon},$$

waarbij in de laatste stap de binomiale benadering wordt gebruikt (geldt voor $f \ll r_\epsilon$). Dit geeft de peak-to-valley ruwheid $R_t \approx s = \frac{f^2}{8 r_\epsilon}$. Voor een periodieke boogvorm is de gemiddelde ruwheid ongeveer $R_a \approx R_t/4$, dus $R_a \approx \frac{f^2}{32 r_\epsilon}$.

Eenheden en geldigheid: als f en r_ϵ in mm zijn, dan zijn R_t en R_a ook in mm. De benaderingen zijn geldig wanneer $f \ll r_\epsilon$.

4.6 De Draaioperatie

Draaien wordt met **verschillende beitels** gedaan die verschillende bewerkingen kunnen uitvoeren. De punten van de beitels noemen we **inserts**.



Grote neushoek

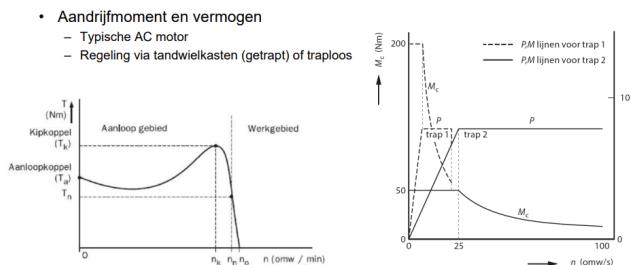
- Sterkere snijkant
- Hogere voedingen
- Verhoogde snijkrachten
- Verhoogde trilling

Kleine neushoek

- Zwakkere snijkant
- Verhoogde toegankelijkheid
- Verlaagde snijkrachten
- Verlaagde trilling

Figuur 4.8

De componenten worden in een draaimachine gestoken die deze beitels kan bewegen langs verschillende assen en het werkstuk kan laten roteren. Ze kunnen bewegen door AC (asynchrone) motoren of servomotoren die de bewegingen zeer precies kunnen uitvoeren. De snelheid van de motoren wordt gecontroleerd door een tandwielenkast.



Figuur 4.9: Tandwielenkast voor draaimachine

Motoren gaan vooral werken rond de stijle curve. Dit is interessant omdat je met verschillende lasten dezelfde toerental kunt behouden.

5 Verspanen: Boren, Fabricage en ronde gaten

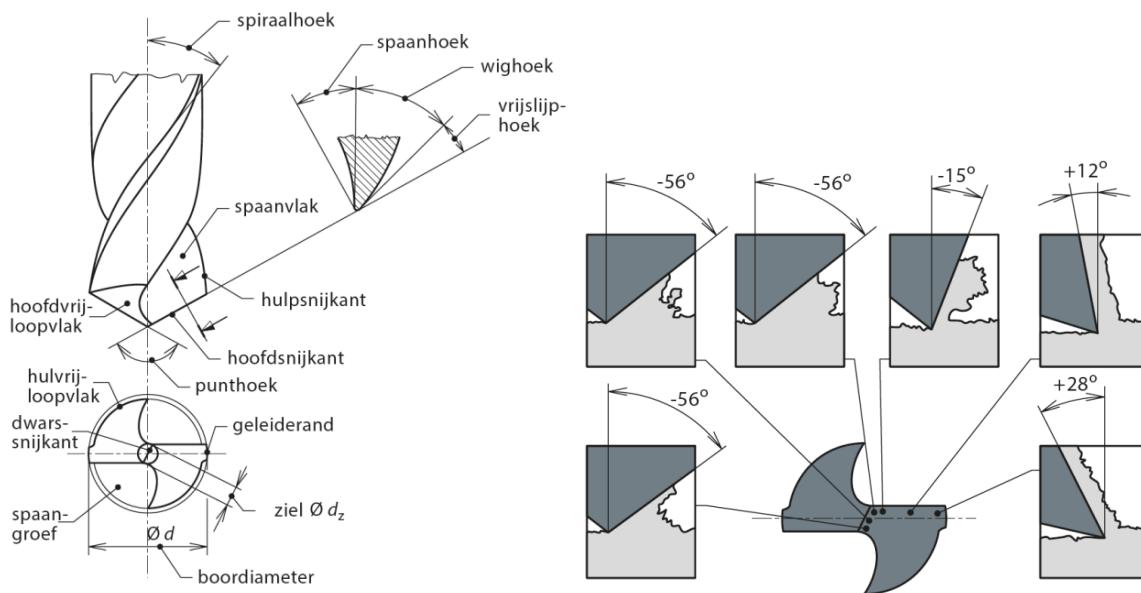
5.1 Inleiding Boren

Boren is een verspaningstechniek die wordt gebruikt om ronde gaten in materialen te maken. Het proces omvat het gebruik van een roterend boorgereedschap, meestal een boor, dat in het materiaal wordt gedrukt om materiaal te verwijderen en een gat te creëren.

Belangrijke booroperaties zijn:

1. **Boren:** Het primaire proces waarbij een boor wordt gebruikt om een rond gat te maken in het materiaal.
2. **Kotteren:** Een nabewerkingsproces waarbij een kotter wordt gebruikt om de diameter van een bestaand gat te vergroten en de oppervlakteafwerking te verbeteren.
3. **Ruimen:** Een proces waarbij een ruimer wordt gebruikt om de diameter van een bestaand gat te vergroten en de nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit te verbeteren. Je kunt niet met normaal boren een accuraatheid van H7 bereiken. Hiervoor moet je ruimen gebruiken.
4. **Tappen:** Het proces van het snijden van interne schroefdraad in een gat met behulp van een tap.

5.1.1 Boorgeometrie



Figuur 5.1: Hoe de geometrie van een boor het werkstuk snijdt

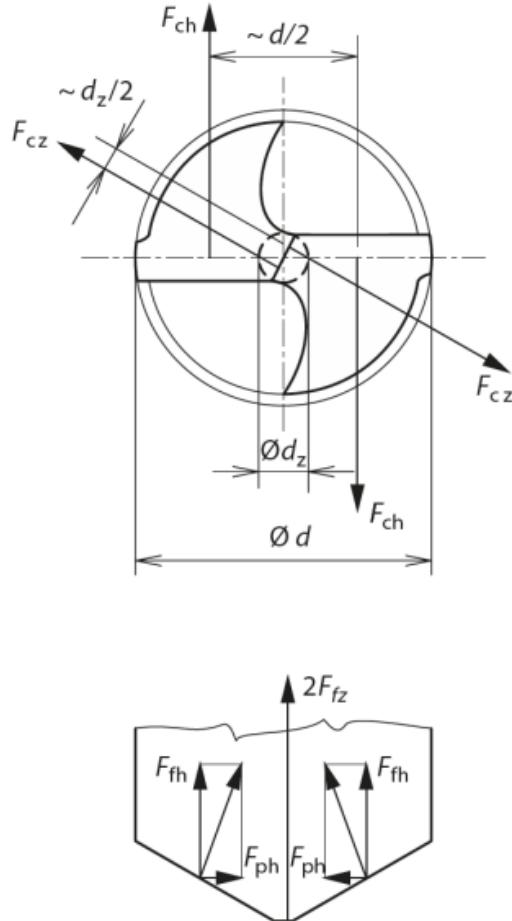
Negatieve spaanhoeken geeft enorm veel krachten en is moeilijker te bewerken omdat de afschuifhoek kleiner is. Op een boor heb je belangrijke geometrie die andere functies hebben:

- **Hoofdsnijvlak:** het primaire snijvlak dat het materiaal losmaakt; draagt de meeste snijkracht en beïnvloedt oppervlaktekwaliteit en snijvermogen.
- **Hulpsnijvlak:** een secundair snijvlak nabij de punt dat afwerking en stabiliteit verbetert; draagt bij aan de lokale lastverdeling.
- **Spaanvlak:** het vlak waارlangs de spaan stroomt; bepaalt spaanvorming, spaanafvoer en warmteontwikkeling (kolkslijtage kan optreden).
- **Vrijloopvlak:** het vlak dat niet in contact mag komen met het bewerkte oppervlak; met voldoende vrijloophoek voorkomt het wrijving en slijtage en behoudt maatnauwkeurigheid.

De boor beweegt naar beneden en maakt een spiraal. De vrijloophoek maakt een spiraal naar beneden. Hoe sneller je beweegt hoe schuiner dat je spiraal ligt. De vrijloophoek is dus kleiner dan de vrijslijphoek. De voeding gaat ook afhankelijk zijn van deze hoek.

5.2 Optredende krachten

Net zoals bij draaien zijn er verschillende krachten die op het werkstuk en de boor werken tijdens het boren. Deze worden met de theorie van Kienzle berekend. 4.2



Figuur 5.2: Krachten op een boor

Boren hebben een grote voedingskracht en een relatief klein snijmoment. De axiale voeding is groot omdat de boor in het materiaal moet doordringen, terwijl het snijmoment klein is door de geringe diameter. Als de krachten niet in evenwicht zijn, ontstaat excentriciteit en scheef boren, wat leidt tot slechte oppervlaktekwaliteit en onnauwkeurige gaten.

- Grote axiale (voedings) kracht nodig om te penetreren.
- Klein snijmoment door kleine snijcirkel.
- Onevenwicht → scheef boren, variërende diameter en slechte afwerking.

5.2.1 gevolgen van onevenwichtige krachten

Als de krachten niet in evenwicht zijn, gaan de gaten van je boorn groter zijn en niet gelijk over heel het gat.

Net zoals bij draaien worden de krachten, vermogens en momenten berekent met het theorema van Kienzle 4.2.

Belangrijke krachten, vermogens en momenten bij boren:

Voedingskracht:

$$F_f = k_f \cdot a \cdot f^{(1-e)}$$

waarbij k_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, a de snedediepte, f de voeding en e de voedingskrachtsexponent.

Verspanningsmoment:

$$M_c = C_m \cdot d^{x_M} \cdot f^{y_M}$$

waarbij C_m de momentcoëfficiënt is, d de diameter, f de voeding en x_M , y_M de momentexponenten.

Vermogen bij boren:

$$P_c = M_c \omega = M_c \cdot 2\pi n$$

waarbij M_c het verspanningsmoment is en ω de hoeksnelheid.

5.3 Keuze van voeding

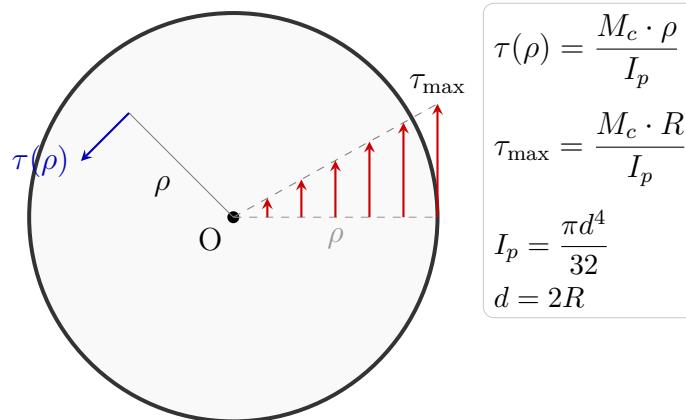
Het belangrijkste van de keuze van de voeding is de sterkte van de boor. De Torsie kant berekent worden en hieruit de maximale voeding bepaald worden.

5.3.1 Torsie bij Boren

Torsie bij Boren:

$$\tau = \frac{M_c \rho}{I_p}$$

waarbij M_c het verspanningsmoment is, ρ de afstand van het centrum tot het beschouwde punt en I_p het polair traagheidsmoment.



Spanningsverloop τ is lineair afhankelijk van de afstand ρ tot het centrum.

Figuur 5.3: Torsiediagram: schuifspanning τ neemt lineair toe met de straal ρ ; relevante formule staat buiten de doorsnede.

Met het traagheidsmoment berekent als volgt (zie statica):

$$\text{Polair traagheidsmoment voor een cirkelvormige doorsnede: } I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

De combinatie van deze formules:

Maximale schuifspanning bij Draaien:

$$M_d = C_b \cdot d^{x_w}$$

waarbij C_b de schuifspanningcoëfficiënt is, d de diameter, x_w de schuifspanningsexponent.

Maximale verspanningsmoment:

$$M_c = a \cdot M_b$$

waarbij M_c het verspanningsmoment is en M_b het maximale verspanningsmoment.

Samen met het verspanningsmoment:

Afleiding van de maximale voeding f_{\max} (twee methodes)

1) Via het schuifspanningscriterium De maximale schuifspanning in de buitenvezel van een ronde doorsnede is

$$\tau_{\max} = \frac{16 M_c}{\pi d^3}.$$

Eis $\tau_{\max} \leq \tau_{\allow}$:

$$M_c \leq \frac{\tau_{\allow} \pi d^3}{16}.$$

Met $M_c = C_m d^{x_M} f^{y_M}$ volgt

$$f_{\max} = \left(\frac{\tau_{\allow} \pi}{16 C_m} \right)^{1/y_M} d^{(3-x_M)/y_M}.$$

2) Via een momentlimiet Als $M_c \leq M_d = C_b d^{x_w}$ dan volgt

$$f_{\max} = \left(\frac{C_b}{C_m} \right)^{1/y_M} d^{(x_w-x_M)/y_M}.$$

Speciale geval – lineair

Wanneer $y_M = 1$ en $x_w - x_M = 1$ volgt

$$f_{\max} = \frac{C_b}{C_m} d,$$

wat overeenkomt met de eenvoudige vorm $f_{\max} = C \cdot d$.

Maximale voeding bij boren:

$$f_{max} = C \cdot d$$

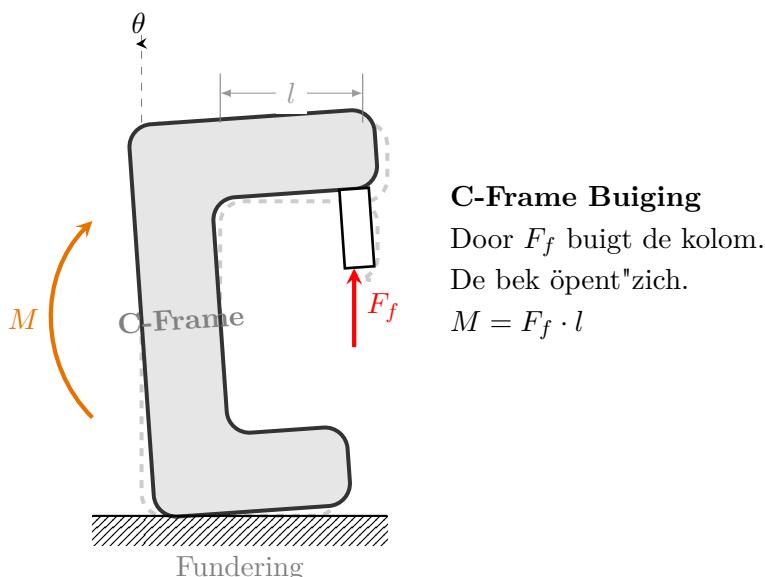
waarbij C een constante is, d de diameter en f_{max} de maximale voeding.

Kracht F_f is de kracht recht naar boven bij een boormachine:

$$F_f = C_f \cdot d^{X_f} \cdot f^{y_f}$$

waarbij C_f de voedingskrachtkoefficiënt is, d de diameter, f de voeding en X_f en y_f de voedingskrachtexponenten.

Deze kracht zal een moment creeëren op de machine die hem kan buigen. Dit is vooral bij C vormige structuren.



Figuur 5.4: Cvormig frame: axiale voedingskracht F_f op het werkstuk (pivot) veroorzaakt een lichte kanteling (θ) rond het werkstuk; de gestippelde lijn toont de gedraaide positie van het frame.

5.4 Boormachines en booroperaties in de industrie.

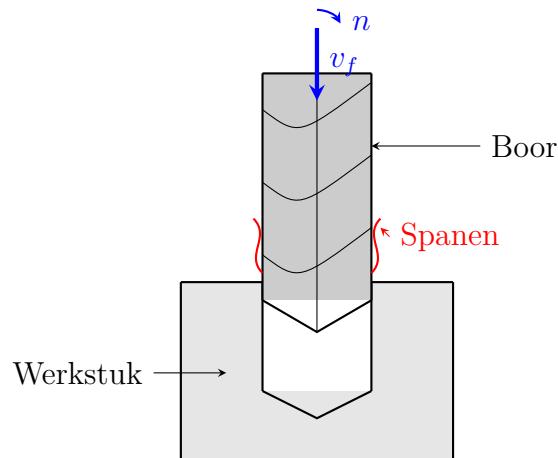
5.4.1 NC-gestuurde boormachines

NC-gestuurde boormachines (Numerical Control) zijn computergestuurde machines die worden gebruikt voor het boren van gaten in materialen met hoge precisie en herhaalbaarheid. Deze machines maken gebruik van vooraf geprogrammeerde instructies om de bewegingen van de boor en het werkstuk te regelen.

5.4.2 Boren

Hier zijn nog relevante type boren en hun toepassingen:

- **Toepassingen:** verspanen van gaten voor bevestigingsmiddelen, passingen en nabewerkingen (ruimen, kotteren); wordt ook gebruikt als pilot voor grotere bewerkingen.
- **Belangrijke parameters:** snijsnelheid v_c , voeding f , snedediepte a , koelmiddel en spanenvorm.
- **Veelvoorkomende borentypes:**
 - **Centerboor / positioneerboor:** korte, stijve boor om een startpunt te maken (voorkomt uitlopen van de boor).
 - **Steekboor (jobber / stub):** standaard boor voor algemene gaten; lengte en spiraaltype kiezen afhankelijk van diepte en spanenaafvoer.
 - **Verzinkingsboor (countersink):** maakt een conische uitsparing voor schroefkoppen of voor ontbraamwerk.
 - **Split-point / conische punt boren:** verbetert centrering en vermindert wander bij start.



Figuur 5.5: Schematische weergave van een boorproces: een spiraalboor dringt het materiaal binnen, vormt een gat en voert spanen af.

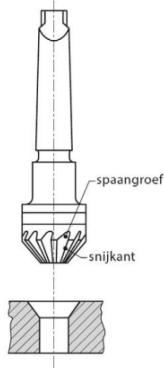
Type boren

- **Verzinkingsboor:** Wordt gebruikt om een conische uitsparing te maken aan het begin van een gat, zodat schroefkoppen gelijk met het oppervlak kunnen liggen.
- **Centerboor:** Wordt gebruikt om een startpunt te creëren.
- **Steekboor:** Wordt gebruikt voor het boren van algemene gaten.

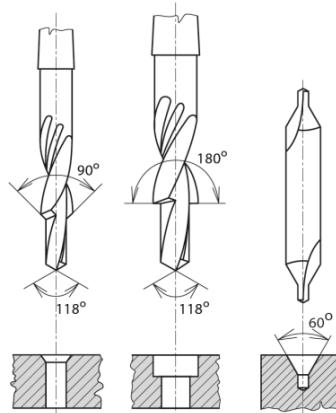
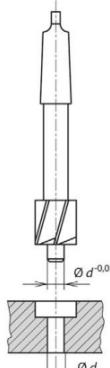
5.4.3 Kotteren

Als je een groot gat hebt en je kunt niet met een boor zo'n groot gat maken, dan kun je kotteren gebruiken. Je kunt ook eventueel frezen maar dat zie je in het volgende hoofdstuk 6. Bij kotteren ga je de boor ook nog laten draaien waardoor je een groter oppervlak gaat verspanen.

- Bijzondere types boren



Figuur 5.56 Verzinkboren



Figuur 5.57 Getrapte boren

Figuur 5.58 Centerboor

Figuur 5.6: Verschillende soorten boren

5.4.4 Draadtappen

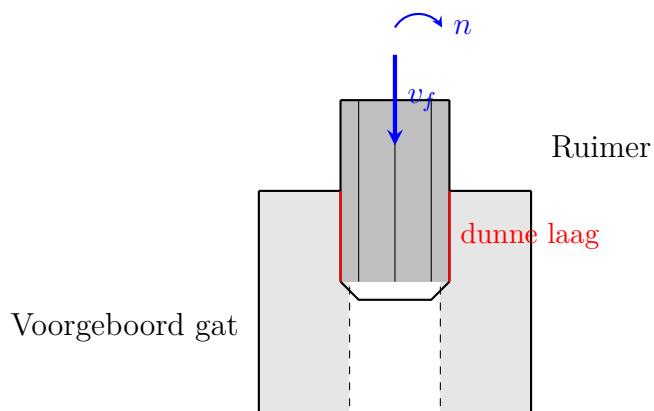
Draadtappen is het snijden van interne schroefdraad in een voorgeboord gat.

Schroefdraad	Pitch (mm)	Tap-boring (mm)
M5 × 0.8	0.8	4.2
M6 × 1.0	1.0	5.0
M8 × 1.25	1.25	6.75
M10 × 1.5	1.5	8.5

Tabel 5.1: Veelvoorkomende metrische tap-boringen

5.4.5 Ruimen

Ruimen is een afwerkingsbewerking om een bestaand gat op nauwkeurige maat en met goede oppervlaktekwaliteit te brengen. Het zorgt ervoor dat je heel precies gaten kunt maken met een goede oppervlaktekwaliteit.



Figuur 5.7: Schematische weergave van ruimen: een ruimer verwijdert een dunne laag materiaal uit een voorgeboord gat voor hoge precisie en gladheid.

6 Verspanen: Frezen

Frezen is een verspaningstechniek waarbij een roterend snijgereedschap, de frees, wordt gebruikt om materiaal van een werkstuk te verwijderen. Het proces omvat het bewegen van de frees langs het oppervlak van het werkstuk om de gewenste vorm of maat te bereiken.

- hoofdbeweging

Je gereedschap de **frees** gaat roteren en het werkstuk kan ook roteren.

- voedingsbeweging

Het gereedschap of het werkstuk gaat bewegen om materiaal te verwijderen.

6.0.1 Soorten frezen

Als je gaat frezen via met de as-richting van de frees in de lengteas van de frees, noem je dit **mantelfrezen**.

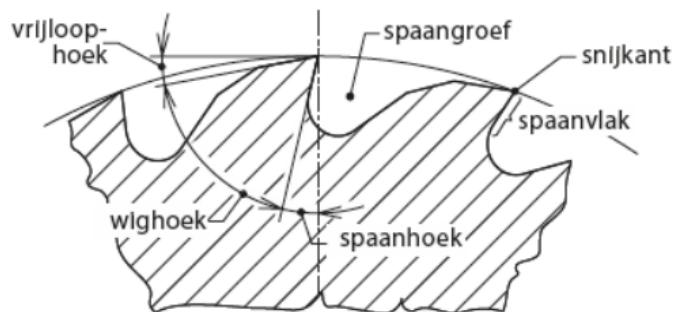
Als je met de punt van de frees gaat frezen noem je dit **kopfrezen**.

6.0.2 Geometrie van de frees

Net zoals bij draaien en boren zijn er verschillende vlakken op de frees die verschillende functies hebben.

- Spaangroef
- Vrijloophoek
- Snijkant
- Snijvlak
- wighoek

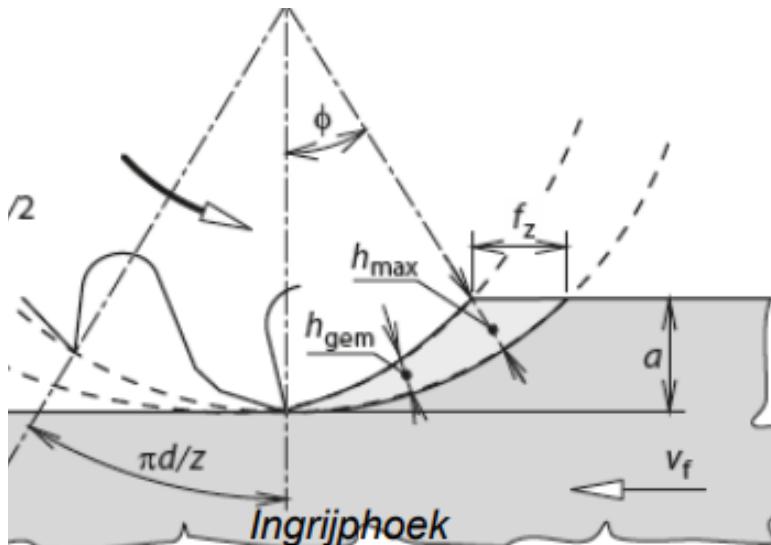
Deze hebben dezelfde eigenschappen als bij boren en draaien. Je kunt meer info vinden bij [Algemeen verspanen 3](#).



Figuur 6.1: Geometrie van een mantelfrees

6.1 krachtwerking bij frezen

Net zoals bij draaien en boren zijn er verschillende krachten die op het werkstuk en de frees werken tijdens het frezen. Ze worden met de theorie van Kienzle berekend.



Figuur 6.2: Krachten op een frees

De krachten op de frees zijn voornamelijk de snijkracht F_c en de voedingskracht F_f ; de terugdrukkracht F_p is meestal kleiner en minder kritisch. Een goed begrip van deze krachten is essentieel voor het optimaliseren van snijparameters en het waarborgen van gereedschapslevensduur.

- Snijkracht F_c : hoofdkracht die het snijproces aandrijft.
- Voedingskracht F_f : kracht die de voeding van de frees aandrijft.
- Terugdrukkracht F_p : kracht loodrecht op F_c en F_f , meestal kleiner.

De snededikte is niet constant omdat je frees ronddraait. Voor berekeningen wordt de gemiddelde snededikte gebruikt.

BELANGRIJK VOOR EXAMEN

Je krachten op je frees zijn dus niet constant; zorg dat je dit weet voor het examen. Daarom nemen we het gemiddelde snededikte h_{gem} zodat we toch een berekening hebben voor de kracht.

$$\text{Gemiddelde snededikte bij Frezen: } h_{gem} = f_z \cdot \sqrt{\frac{a}{d}}$$

waarbij f_z de voeding per tand is, a de snedediepte en d de diameter van de frees.

$$\text{Voeding per tand bij Frezen: } f_z = \frac{f}{z_i}$$

waarbij f de voeding is en z_i het aantal tanden van de frees.

$$\text{Snijsnelheid bij Frezen: } v_c = \pi \cdot d \cdot n$$

waarbij d de diameter van de frees is en n het toerental.

$$\text{Ingrijpingshoek bij Frezen: } \phi = \arccos\left(1 - \frac{2a}{d}\right) \Rightarrow \cos \phi = 1 - \frac{2a}{d}.$$

waarbij a de snedediepte is en d de diameter van de frees.

$$\text{Tanden per ingrijping} z_i = \frac{Q}{360} \cdot z$$

waarbij z_i het aantal tanden per ingrijping is, Q de ingrijpingshoek in graden en z het totaal aantal tanden van de frees.

Snijkracht bij Frezen:

$$F_c = k_c \cdot b \cdot h_{\text{gem}}^{(1-e)} \cdot z_i$$

waarbij k_c de snijkrachtcoëfficiënt is, b de snedebreedte, h_{gem} de gemiddelde snededikte, z_i het aantal tanden en e de snijkrachtsexponent.

Snijmoment bij Frezen:

$$M_c = C_m \cdot d^{x_M} \cdot f_z^{y_M} \cdot z_i$$

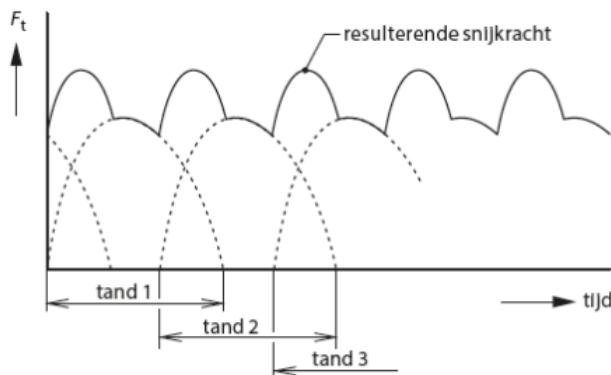
waarbij C_m de momentcoëfficiënt is, d de diameter, f_z de voeding per tand, z_i het aantal tanden en x_M , y_M de momentexponenten.

Voedingskracht bij Frezen:

$$F_f = k_f \cdot b \cdot h_{\text{gem}}^{(1-e)} \cdot z_i$$

waarbij k_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, b de snedebreedte, h_{gem} de gemiddelde snededikte, z_i het aantal tanden en e de voedingskrachtsexponent.

Bij frezen zijn de krachten op je freez niet constant. De kracht op één tand per draaing is parabolisch en als je de invloed van alle tanden samentelt krijg je een heuvelachtige krachtcurve.



Figuur 6.3: Krachtcurve bij frezen

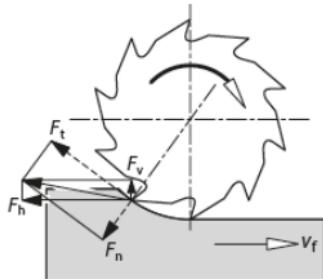
6.2 Richting van frezen

Er zijn twee richtingen van frezen:

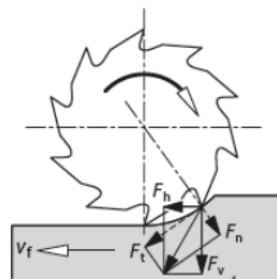
- **Meelopend frezen:** De frees draait in dezelfde richting als de voeding. Dit zorgt voor een betere oppervlaktekwaliteit en minder gereedschapsbelasting.

- Tegenlopend frezen:** De frees draait in de tegenovergestelde richting van de voeding. Dit kan leiden tot een ruwer oppervlak en hogere gereedschapsbelasting.

Tegenlopend frezen



Meelopend frezen



Figuur 6.4: Tegenlopend en meelopend frezen en de krachten die ze creeëren

Tabel 6.1: Vergelijking: Tegenlopend vs Meelopend frezen

Kenmerk	Tegenlopend	Meelopend
Aandrijving	F_h drukt werkstuk weg van frees.	F_h trekt werkstuk naar frees toe.
Speling	Geen compensatie nodig; veiliger bij backlash.	Spelingcompensatie onmisbaar.
Spaanvorming	Dun \rightarrow dik (chip groeit tijdens snede).	Dik \rightarrow dun (chip neemt af richting einde).
Snijkracht	Stijgt geleidelijk tijdens ingreep.	Stijgt sneller; hogere piekbelasting.
Snijgedrag	Eerst wrijving, later snijden (meer smearing).	Met een snijden (scherpere insnijding).
Oppervlakte	Meestal matig.	Meestal beter (glad).
Stabiliteit	Neiging tot klapperen / chatter.	Werkstuk wordt 'in klem' getrokken.
Precisie	Minder voorspelbaar.	Kan preciezer zijn.

6.2.1 Wanneer kiezen: meelopend vs tegenlopend

Praktische richtlijnen:

- Meelopend (climb milling)** – kies dit bij een stijve machine en goede opspanning, vooral voor afwerking. De chipdikte neemt af tijdens de ingreep (dik \rightarrow dun), er is minder wrijving bij de instap en doorgaans een betere oppervlaktekwaliteit en langere gereedschapslevensduur; vereist minimale backlash in de aandrijving.
- Tegenlopend (conventional milling)** – kies dit bij oudere of minder stijve machines, bij ruwe bewerkingen of wanneer er speling is. De chipdikte neemt toe tijdens de ingreep (dun \rightarrow dik); bij de instap is er meer wrijving en kans op BUE, maar de methode is vaak veiliger voor onstabiele opstellingen of dunwandige onderdelen.

Effecten op oppervlakte en snedediepte

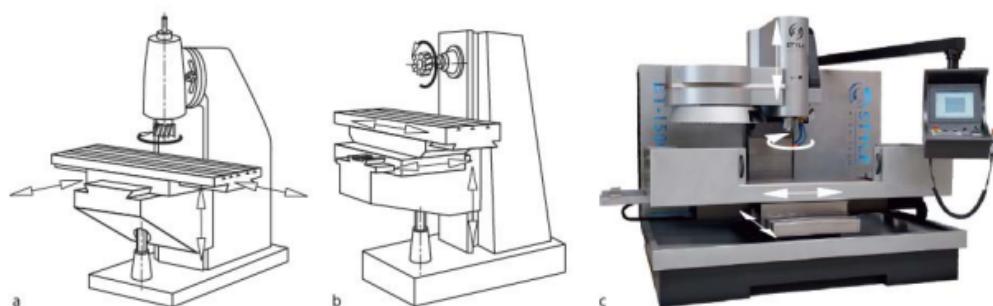
- **Oppervlaktekwaliteit:** Meelopend geeft doorgaans een gladdere afwerking; tegenlopend geeft meer wrijving bij instap en vaak een ruwere afwerking.
- **Snedediepte/productiviteit:** In een stijve opstelling maakt meelopend vaak hogere snededieptes en hogere voedingen mogelijk zonder kwaliteitsverlies; tegenlopend wordt vaak gebruikt voor grove, hoge-volume snedes of wanneer de machine/opstelling de voorkeur geeft aan een voorzichtige instap.

6.3 Soorten frezen

- **Mantelfrezen:** Hierbij wordt de zijkant van de frees gebruikt om materiaal te verwijderen. Dit is geschikt voor het maken van vlakke oppervlakken en contouren.
- **Kopfrezen:** Hierbij wordt de bovenkant van de frees gebruikt om materiaal te verwijderen. Dit is geschikt voor het maken van gaten, sleuven en andere complexe vormen.
- **Bolfrezen:** Hierbij wordt een frees met een bolvormige snijkant gebruikt, geschikt voor het maken van gebogen oppervlakken en complexe 3D-vormen.
- **Vormfrezen:** Hierbij wordt een frees met een specifieke vorm gebruikt om profielen en vormen in het materiaal te frezen.
- **Circulair frezen:** Hierbij wordt een cirkelvormige beweging gebruikt om gaten of cirkelvormige uitsparingen te maken.
- **Trekfrezen of Brootsen:** Hierbij wordt een speciaal gereedschap gebruikt om nauwkeurige vormen en profielen te maken door het materiaal te trekken.

6.4 De Freesmachine

Een freezemachine heeft een bank waar je werkstuk wordt op geklemd. Hierop steek je de mantel of kopfreez. De freez gaat roteren en de bank gaat bewegen in de x,y en z-richting.



Figuur 6.5: Weergave van een freesmachine

7 Verspanen: Hybridetechnieken

7.1 Honen

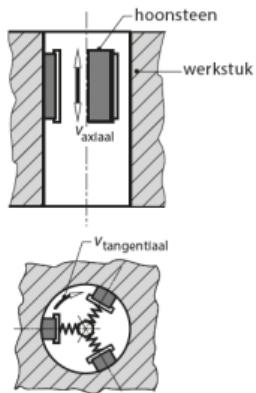
Honen is een slijpoperatie met twee componenten en een heen en weergaande bewegingen.

Hoofdbeweging: Bij honen is de hoofdbeweging een roterende beweging.

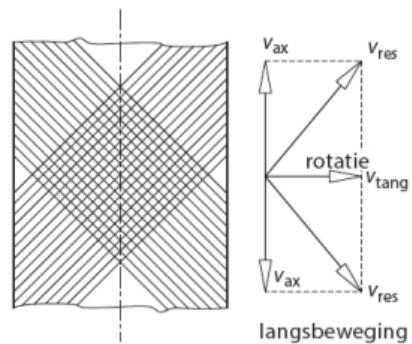
Voedingsbeweging: Dit is de beweging waarmee het gereedschap of het werkstuk langzaam wordt verplaatst om het slijpproces voort te zetten.

Kasterpatronen: Bij honen worden vaak specifieke kasterpatronen gebruikt om een gelijkmatige slijpoppervlakte te verkrijgen. Honen helpt met het oppervalktekwaliteit tot en met (IT3)

7.1.1 Lange-slag Honen



Figuur 5.105 Hoongereedschap



Figuur 5.106 Slijpgroeven bij honen

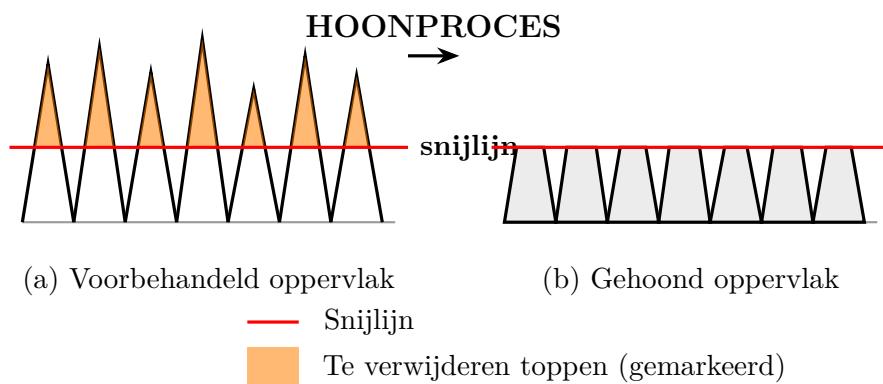
Figuur 7.1: Lange-slag honen

Een hoonsteen wordt gebruikt om het oppervlakte van een cilinder te verbeteren. De hoonsteen heeft een lange slag en beweegt heen en weer in de lengte van de cilinder. Dit zorgt voor een betere oppervlaktekwaliteit en nauwkeurigheid van de cilinder.

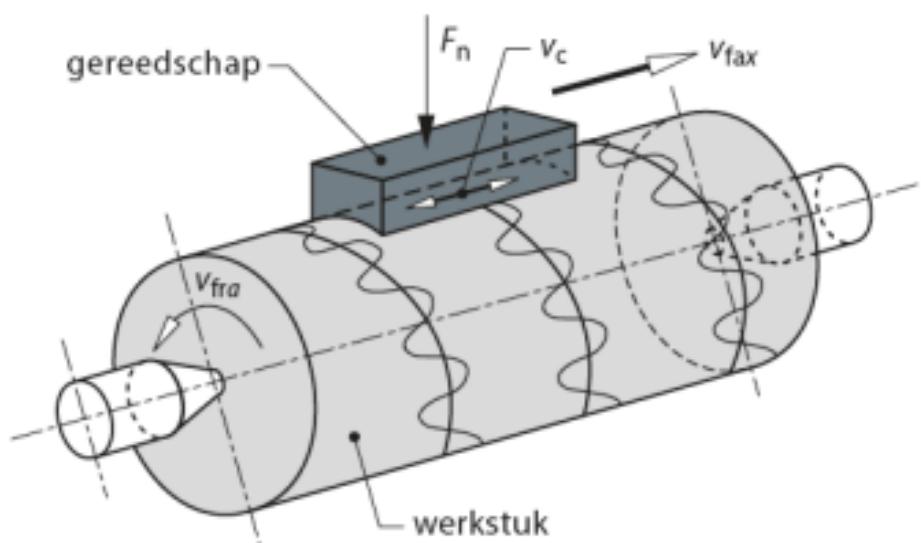
Bij het honen ga je de toppen van de oppervalkteruwheid verwijderen. Dit is anders bij het slijpen omdat die ook een licht oneven oppervlakte kan achterlaten.

7.1.2 Korte-slag Honen

Het enige verschil met lange-slag honen is de kinematica van het systeem. Je werkstuk is opgespannen tussen twee tegenpunten die roteren. Deze tegenpunten worden daan aangedreven met de hoonsteen op het oppervlakte. Je gaat hier de hoonsteen op een cilindrisch oppervlakte toepassen zoals bij het nabewerkgen van zuigerstangen. Je gaat sinusoïdale bewegingen maken met een korte slag. De oppervlakte kwaliteit is enorm fijn.



Figuur 7.2: (a) Voorbehandeld, ruw oppervlak met scherpe toppen; (b) resultaat na honen waarbij de bovenste delen van de toppen zijn verwijderd.



Figuur 7.3: Kortslag honen van een werkstuk

7.2 Leppen

Bij het leppen heb je enorm fijne korrels die in een pasta, olie of geleï zitten. De werstukken zitten in een cilinder of vat waarbij de stukken bewogen worden.

7.2.1 Met vloeistof

Het lepvloeistof beweegt tussen de stukken die het oppervlakte enorm fijn maken. Tot en met **R_a = 0,1 µm, IT1** is mogelijk.

Toepassingen:

Bepaalde stukken hebben dit nodig zoals kogellagers of klepzittingen

Kijk zeker de video's op toledo om dit proces beter te begrijpen

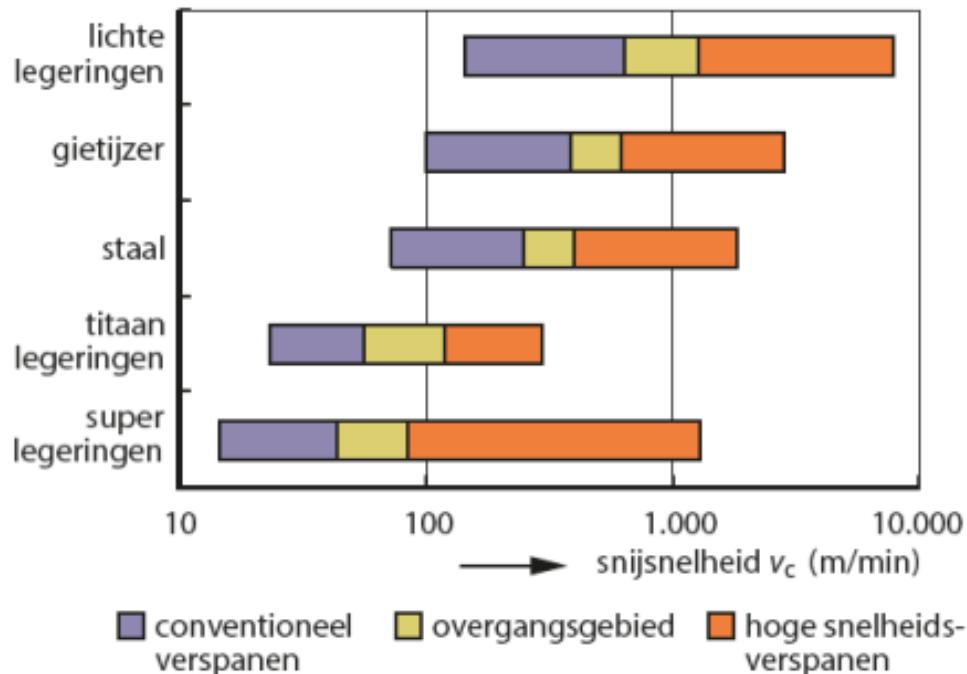
7.2.2 Finisheren met pasta

Je drukt het werkstuk samen en pompt dan de geleï in het werkstuk om het oppervlakte te verbeteren.

7.3 Geadvaseerde verspaningstechnieken en hybride technieken

7.3.1 hoge snelheid verspanen

Bij hoge snelheid verspanen ga je enorm hoge snijsnelheden gebruiken in vergelijking met conventionele verspanen.



Figuur 7.4: Hoge snelheid verspanen in vergelijking met conventioneel verspanen

Deze spindles gaan tot 20,000 tot 30,000 RPM afhankelijk van het materiaal dat je verspaand.

Extra

Herinner je bij algemeen verspanen 3 dat bij heel hoge snijsnelheden je een **Softening effect** had die het makkelijker maakte om te verspanen. Bij hoge snelheid verspanen zie je dit effect ook terugkomen. Alle warmte die ook gegenerateerd wordt gaan ook in de spanen en gaan dus niet in het werkstuk defunderen en het oppervlakte aantasten.

Toepassingen

Je wilt enorm snel verspanningen doen. Je moet dus je voeding f en snijsnelheid v_c enorm hoog zetten. Deze techniek wordt vooral gebruikt bij aluminium en lichte metalen.

De tools zijn van hardmetaal gemaakt die ductiel genoeg zijn om de krachten te weerstaan.

7.3.2 Hardverspanen

Hardverspanen is het verspanen van harde materialen zoals gehard staal, keramiek en andere harde legeringen. De ontwikkeling van hoge snelheidsfrezen en veel stevigere machines maakte dit mogelijk.

Je moet een negatieve spaanhoek gebruiken die meer kracht vraagt omdat de afschuifhoek kleiner

wordt. Als compensatie gebruik je kleine snededieptes om de krachten te beperken.

Nieuwe harde beitels en stevige machines die de hevige drukken aankan zorgt ervoor dat hardverspanen niet eeuwig duurt.

7.4 Hybrideprocessen

hybride processen is een ruim domein waarbij je verschillende technieken toepast om werkstukken te verspanen. Je gaat dus twee technieken toepassen om bijvoorbeeld dingen makkelijker te verspanen of om betere oppervlaktekwaliteit te krijgen.

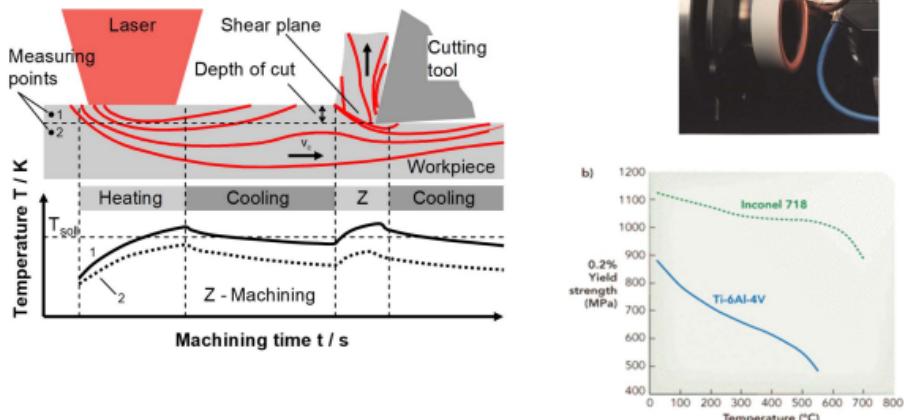
Dit zijn vooral experimentele technieken die nog in ontwikkeling zijn.

7.4.1 Laserondersteuning bij verspanen

Je warmt het materiaal op met een laser. Het oppervlakte wordt warmer en dus makkelijker om te verspanen.

Het is energie efficient omdat het warmere materiaal minder kracht kost om te verspanen.

- Verlagen van de snijcoefficient
- Belang van absorptie !!!



Figuur 7.5: Laserondersteuning bij verspanen

Het bepaal materiaal dat je moet gebruiken moet licht absorberen. Je wilt geen of zo weinig mogelijk reflectie of transmissie.

frmWat er gebeurt met licht die schijnt op een materiaal $1 = A + R + T$ waarbij A = absorptie, R = reflectie en T = transmissie

7.4.2 Draadvonken en slijpen

(je ziet meer over draadvonken in een ander hoofdstuk) Het vonkproces is een thermisch proces. Je gaat eerst een stukje thermisch wegnemen. Bij normaal draadvonken blijft een stuk gesmolten materiaal achter op het oppervlakte maar door het slijpen ga je dit stuk wegnemen.

7.4.3 ECM (Electro Chemical Machining) en slijpen

Bij ECM ga je materiaal wegnemen door elektrochemische reacties. Je hebt een anode en kathode die in een elektrolyt zitten. Dit chemisch proces laat een ruw oppervlakte achter en oxidelagen. Door het slijpen ga je dit ruw oppervlakte verbeteren en die laag verwijderen.

7.4.4 Combinatie van ECM en frezen

Je gaat frezen combineren met ECM. De chemische bewerkingen laten een oxidelaag achter die je met frezen gaat verwijderen.

(*Deze technieken zijn niet super belangrijk om van buiten te kennen maar je moet zien dat je nadelen van een proces kunt oplossen met een ander proces*)

8 Verspanen:Slijpen

Slijpen is een verspaningstechniek waarbij een roterend schijfsvormig gereedschap, de slijpschijf, wordt gebruikt om materiaal van een werkstuk te verwijderen. Verspannen gebeurt door een slijpsteen die kleine deeltjes materiaal **Snijkorrels** van het werkstuk afneemt. Dit oppervlakte is onbepaald en dus is de geometrie niet gekent.

De snijkorrels kunnen oftewel vrij liggen of gebonden zijn in een matrix.

Vrije snijkorrels: losse korrels die losjes op het werkstuk inwerken of in suspensie of pasta. Voorbeelden:

- **Leppen:** korrels in een pasta om zeer nauwkeurige oppervlakken te verkrijgen.
- **Stralen:** korrels in een straal om vuil of roest te verwijderen.

Je kunt dus korrels door het werkstuk sturen om het oppervlaktekwaliteit te verbeteren.

Korrel kunnen ook gebonden zijn in een matrix.

Gebonden snijkorrels: korrels die vastzitten in een matrixmateriaal. Voorbeelden:

- **Slijpschijven:** korrels gebonden in een harde matrix voor het slijpen van metalen.
- **Schuurpapier:** korrels gebonden op papier of stof voor handmatig schuren.
- **Honen:** korrels gebonden in een zachte matrix voor het verbeteren van de oppervlakteafwerking en nauwkeurigheid van gaten.

8.0.1 Frezen met onbepaalde snijkanten

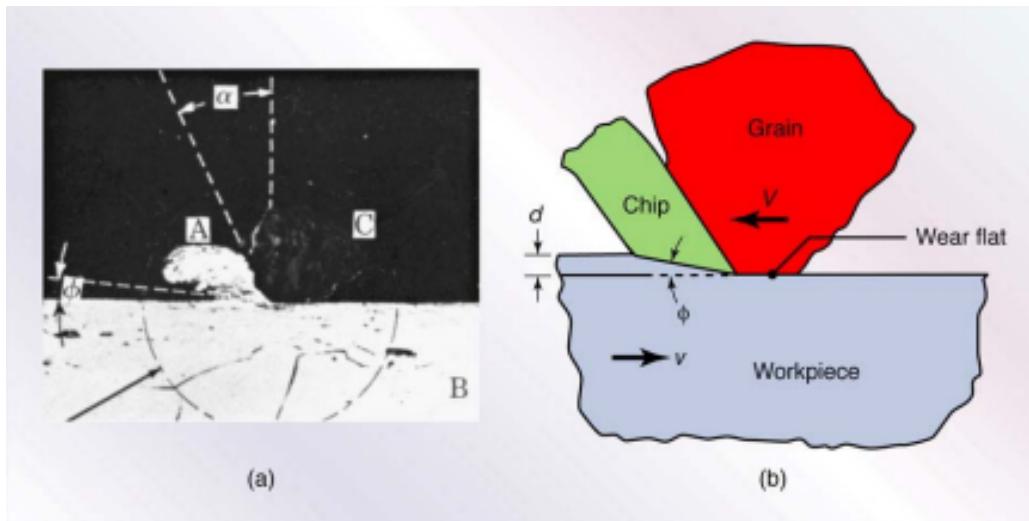
Bij slijpen heb je een grote negatieve **Spaanhoek** wat het moeilijker maakt om te verspanen. De krachtwerking is dus veel hoger. Maar je **Snedediepte** is veel kleiner dus die compenseren elkaar.

Een slijpsteen kun je definieren als een frees met onbepaalde snijkanten.

De korrel hier heeft een enorm negatieve spaanhoek. De spaanvorming is enorm klein maar omdat de korrels zo klein en hard zijn kun je zelfs heel harde materialen slijpen.

8.0.2 Eigenschappen van slijpen

1. **Snijsnelheid** v_c : De snelheid is ongeveer 25 tot 60 m/s, Heel hoge snelheden.
2. **Krachten** F_c : De krachten zijn hoog door de negatieve spaanhoek en omdat je harde



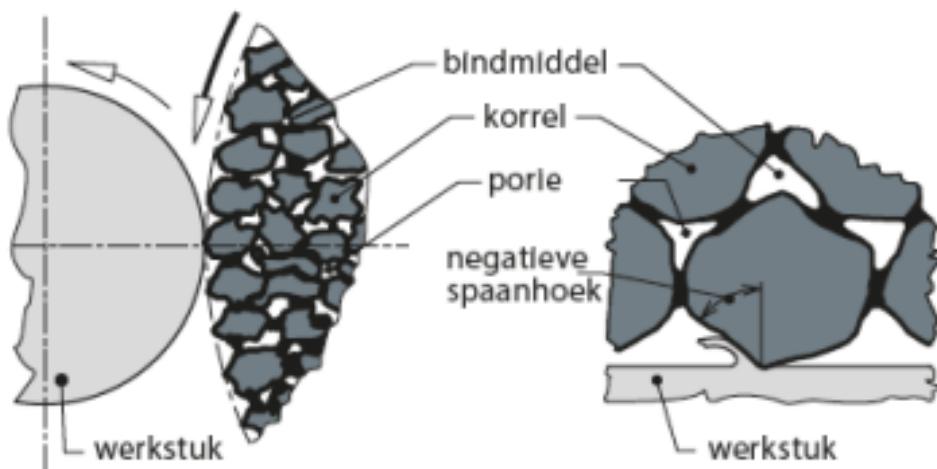
Figuur 8.1: Spaanvorming bij slijpen

materialen kunt slijpen.

3. **Warmteontwikkeling:** Veel energie gaat verloren als warmte, slijpen kan aan het oppervlakte een temperatuur van **800 tot 900°C** veroorzaken. Dit kan leiden tot thermische beschadiging van het werkstuk. Je hebt dus materiaalveranderingen aan het oppervlakte. Intensieve koeling is dus nodig.
4. **Snedediepte a :** Zeer kleine snededieptes, typisch in de orde van micrometers.
5. **Slijtage van de slijpkorrel:** Slijpkorrels worden bot en vallen er dan af. Je moet de slijpschijf dus regelmatig vernieuwen of terug op maat brengen. Je neemt dan een stuk van het oppervlakte af. Dit noemt(dressing).
6. **Oppervlaktekwaliteit:** Slijpen kan zeer fijne oppervlakteafwerkingen bereiken, vaak in de orde van enkele micrometers R_a .
7. **Nauwkeurigheid:** Slijpen gaat op machine die enorm stevig zijn en dus niet veel bewegen tijdens het slijpen. Hierdoor kun je zeer nauwkeurige afmetingen bereiken.
8. **Toepassingen:** Slijpen kan toegapast worden op zelfs zeer harde materialen zoals gehard staal, keramiek en zelfs diamant.

8.0.3 Parameters slijpsteen

- **Korrelgrootte:** Grottere korrels verwijderen materiaal sneller maar geven een ruwere afwerking; kleinere korrels geven een fijnere afwerking.
- korrelgrote
- **Bindmiddel:** Het materiaal dat de korrels bij elkaar houdt, beïnvloedt de slijpsteen's hardheid en duurzaamheid.
- Hardheid van de slijpsteen: Hardere slijpstalen zijn duurzamer maar kunnen ook sneller de korrels verliezen.
- Structuur



Figuur 8.2: Doorsnede van een slijpschijf

Korrelmateriaal

Natuurlijke korrels zijn kwarts, korundum en diamant.

Kunstmatige korrels zijn siliciumcarbide en aluminiumoxide.

Korrelgroot

De korrelgrootte bepaald hoeveel je kunt afnemen. Grote korrels -> meer afnemen maar je oppervlaktekwaliteit is slechter. Kleine korrels -> minder afnemen maar je oppervlaktekwaliteit is beter.

Korrelgrootte wordt aangegeven door mazen per inch².

Hardheid van de slijpsteen

De hardheid is de sterkte van de korrels. De slijpverhouding $G = \frac{\text{volume verspaand materiaal}}{\text{volume slijpschijf per tijdseenheid}}$. Een grote G kan je veel materiaal afnemen tegenover hoeveel slijpschijf je verliest.

een kleine G betekent dat je veel slijpschijf verliest tegenover hoeveel materiaal je afneemt.

Je kunt geen hard materiaal slijpen met een zachte slijpsteen omdat de korrels dan te snel bot worden.

Bindmiddel

Het bindmiddel houdt de korrels bij elkaar. een paar voorbeelden zijn keramisch klei, mineralen, metaal en elastische materialen.

Bijvoorbeeld bij pasta slijpen word een elastisch bindmiddel zodat de korrels overal op het werkstuk k

Structuur

De grote van de porien in verhouding tot het volumeaandeel bindmiddel en korrels.

Die porien zijn belangrijk. Die zijn kleine openingen tussen de korrels. Stukjes spaan gaan in die porien. De poriegrootte moet je aanpassen afhankelijk van de operatie en het contacttijd van de slijpschijf op het werkstuk.

Met al deze dingen kunnne een slijpsteen karakteriseren.

WETEN DAT AL DEZE DIINGEN EEN SLIJPSTEEN KARATERISEREN

Example: 51 - A - 36 - L - 5 - V - 23							
Prefix	Abrasive type	Abrasive grain size	Grade	Structure	Bond type	Manufacturer's record	
Manufacturer's symbol (indicating exact type of abrasive) (use optional)	Coarse	Medium	Fine	Very fine	Dense	1	Manufacturer's private marking (to identify wheel) (use optional)
	8	30	70	220		2	
	10	<u>36</u>	80	240		3	
	12	46	90	280		4	
	14	54	100	320		5	
	16	60	120	400		6	
	20		150	500		7	
	24		180	600		8	
A Aluminium oxide C Silicon carbide						9	
						10	
						11	
						12	
						13	
						14	
						Open	
						15	
						etc.	
						(Use optional)	
Soft	Medium	Hard					
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z							
Grade scale							
B Resinoid BF Resinoid reinforced E Shellac O Oxychloride R Rubber RF Rubber reinforced S Silicate V Vitrified							

Figuur 8.3

8.1 temperaturen bij slijpen

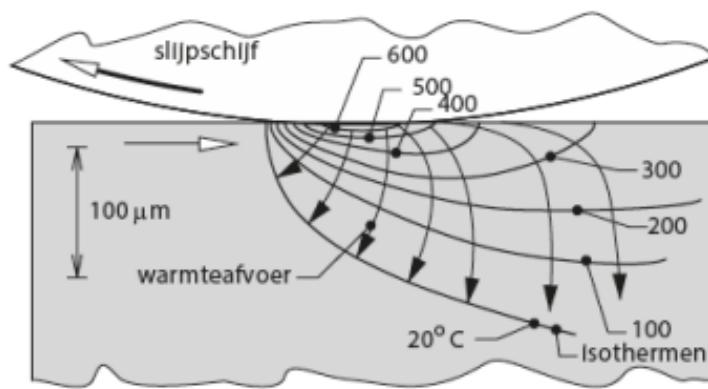
70% van de energie die je inbrengt bij het slijpen gaat verloren als warmte. dit kan leiden tot thermische beschadiging van het werkstuk. Je moet oppassen voor

- Vonken
- Structuurveranderingen
- Verbranding
- Scheurtjes
- Residuële spanningen

Je moet dus voldoende koelen of nog een laatste warmtebehandeling doen na het slijpen.

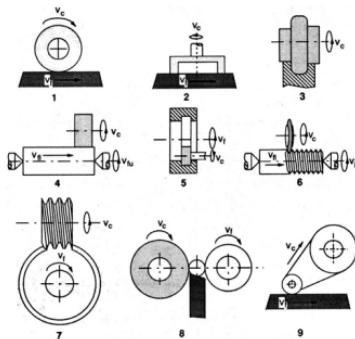
8.2 Slijptechnieken

Profiefslijpen is slijpen van een bepaald profiel. Je slijpsteen heeft dus een gewenste vorm, waar je het werkstuk mee slijpt.



Figuur 8.4: Warmte bij Slijpen

1. Omtrek-vlakslippen
2. Kops-vlakslippen
3. Profielslijpen
4. Uitwendig langs-slijpen
5. Inwendig insteek-rondsslippen
6. Schroefdraadsslippen met schijf met enkelvoudig profiel
7. Afwikkellingslijpen met slijpworm
8. Centerloos slijpen
9. Bandslijpen



Figuur 8.5: Alle soorten slijptechnieken

Tip, is hij niet veel op ingegaan.

8.3 De slijpmachine

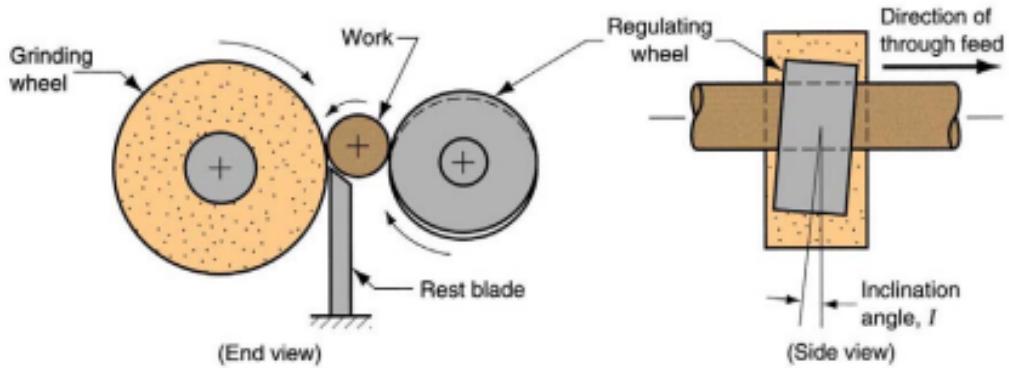
Slijpmachines zijn enorm stijve machines omdat je enorm je snediediepte enorm klein is kan kleine bewegingen ervoor zorgen dat je ineens niet meer slijpt. Je moet dus in orde van micrometer werken.

8.3.1 Centerloos slijpen

Centerloos slijpen is een slijptechniek waarbij het werkstuk niet wordt vastgehouden door een as of klem, maar in plaats daarvan wordt ondersteund door twee rollen en aangedreven door een derde rol.

8.3.2 Profielslijpen

Zoals hiervoor gezegd. Je slijpt een bepaald profiel met een slijpsteen die dat profiel heeft.

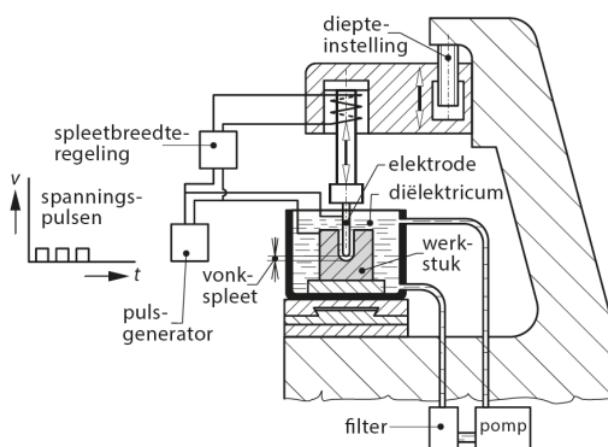


Figuur 8.6: Centerloos slijpen

9 Fysische, Chemische afnemende bewerkingen

9.1 Vonkerosie

EDM (Electro Discharge Machining) of vonkerosie is een verspaningstechniek waarbij materiaal wordt verwijderd door middel van elektrische vonken. Je hebt een **elektrode** en een **werkstuk** die in een **vloeistof** (die als **isolator** fungeert zoals bijvoorbeeld gedestilleerd water) zitten. Wanneer er een **hoge spanning** wordt aangelegd tussen de elektrode en het werkstuk, ontstaat een elektrische vonk die het materiaal op het werkstuk smelt en wegneemt. Je kunt geen normaal water gebruiken omdat er mineralen in zitten die wel geleiden.

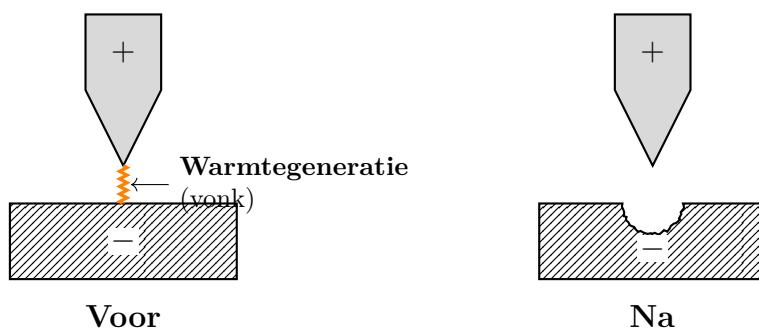


Figuur 9.1: Vonkerosie proces

9.1.1 Componenten van een EDM-systeem

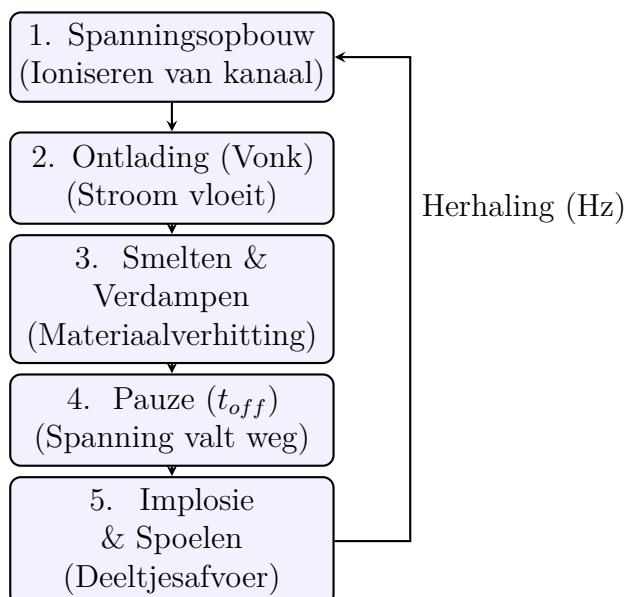
Bij een vonkerosie-opstelling (zoals in figuur 9.1) zijn de volgende componenten cruciaal:

- **Pulsgenerator:** De energiebron die hoogfrequente DC-pulsen levert. Hij regelt de aan-tijd (t_{on}) en uit-tijd (t_{off}), wat de ruwheid en snelheid bepaalt.



Figuur 9.2: Principe van vonkerosie: warmtegeneratie door elektrische ontlading zorgt voor materiaalafname (ruw oppervlak).

- **Diëlektricum:** De isolerende vloeistof. Het zorgt voor isolatie tot de doorslagspanning wordt bereikt, koelt het proces en spoelt de deeltjes weg.
- **Pomp & Filtersysteem:** De vloeistof wordt rondgepompt. Het filter is essentieel om de verwijderde metaaldeeltjes (swarf) uit het diëlektricum te halen. Vervuiled diëlektricum leidt tot instabiele vonken of kortsluiting (arc-ing).
- **Servosysteem:** Handhaaft een constante, zeer kleine afstand (gap) tussen elektrode en werkstuk.



Figuur 9.3: Cyclus van één EDM-puls: van spanningsopbouw tot spoelen.

Je benedenplaat wordt **negatief geladen** en de elektrode **positief**. Er is dan een puls van **discharge** die een stukje materiaal wegneemt. **Pulsen** hebben een **frequentie** tussen de 100khz tot 1Mhz. Je genereert dan veel discharges die opbouwen zodat je lijnen stap per stap kunt wegnemen.

De afstand tussen de elektrode en het werkstuk is enorm klein maar enorm belangrijk. Moest de elektrode op het werkstuk komen, dan zou er een **kortsluiting** zijn.

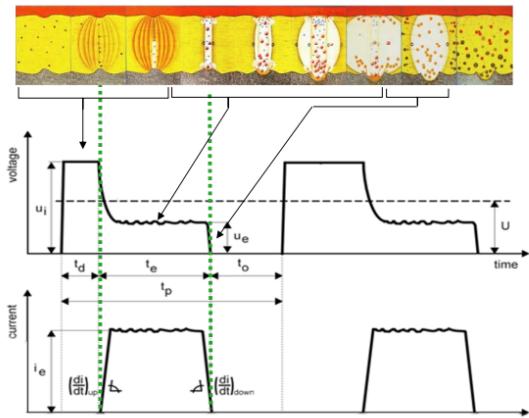
De **spaanvorming** is bolvormig.

De pulsenergie wordt gegeven door de formule

Pulsenergie tijdens vonkfrezen:

$$W_e = \int_0^{t_e} U_e I_e dt$$

waarbij U_e de doorslagspanning is, I_e de stroom en t_e de pulstijd.

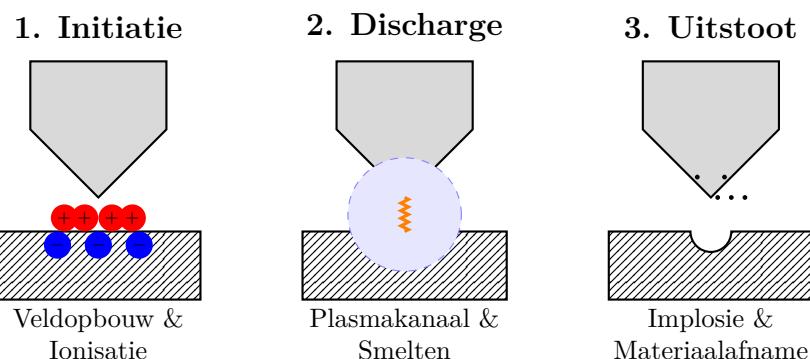


Pulsparameters

u_i	Open generatorspanning
t_d	Ontstekingsvertragingstijd
t_e	Effectieve pulsduur
t_0	Pulsinterval
t_p	Pulseperiode
i_e	Momentane pulsstroom
u_e	Momentane pulsspanning
U	Gemiddelde werkspanning

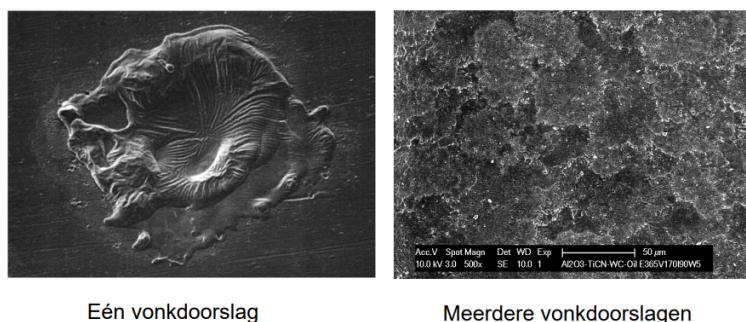
Figuur 9.4: Stapsgewijs een puls en de bijbehorende spannings- en stroomcurves en tabel van alle parameters.

Het vonkproces verloopt in drie cyclische fases die zich duizenden keren per seconde herhalen:



Figuur 9.5: De drie fases van een EDM-puls.

- 1. De initiatiefase (Ontsteking):** Er wordt een spanning aangelegd tussen elektrode en werkstuk. Het elektrisch veld zorgt ervoor dat vrije elektronen en ionen in het diëlektricum versnellen en botsen. Dit creëert een *sneeuwbaleffect* (lawine-ionisatie), waardoor er een geleidend ionisatiekanaal ontstaat.
- 2. De dischargefase (Ontlading):** Zodra het kanaal geleidend is, volgt de hoofdontlading (de vonk). De stroomsterkte piekt en er ontstaat een **gasbel** van plasma rondom de vonk. De ionen botsen met hoge kinetische energie op het werkstuk, wat wordt omgezet in extreme hitte ($8000\text{--}12000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Hierdoor smelt en verdampst een klein deel van het werkstuk (en in mindere mate de elektrode).
- 3. De uitstootfase (Implosie):** De stroom wordt plotseling onderbroken (shutdown). De temperatuur daalt en de gasbel implodeert krachtig. Door deze implosie wordt het gesmolten materiaal uit de krater weggeschoten in het diëlektricum, waar het stolt tot kleine bolletjes (swarf). Het diëlektricum spoelt de opening schoon voor de volgende puls.



Figuur 9.6: Een vonk in vergelijking met meerdere vonken

9.2 Performance van EDM

De materiaal afnamen (material removal rate) gaat over quibice centermeter per minuut. Deze materiaalafname is veel lager dan bij spanen.

Gereedsschap slijtage is ook een probleem bij EDM. Ratio

Gereedschapslijtage bij EDM:

$$v = \frac{\text{Volume gereedschap versleten}}{\text{Volume werkstuk verspaand}}$$

Deze is typisch tussen 1% en 5%.

De oppervlaktekwaliteit R_a is afhankelijk van je settings. Je kunt afhankelijk van de stroom die je gebruikt andere oppervlaktekwaliteit krijgen.

Hoge energie -> hoge materiaalafname maar slechte oppervlaktekwaliteit. Lage energie -> lage materiaalafname maar goede oppervlaktekwaliteit.

Je kunt ook een **harde warmte aangetaste zone** krijgen aan het oppervlakte. Dit is een zone die thermisch veranderd is door de hitte van de vonk.



Figuur 9.7: TAZ, thermisch aangetaste zone bij EDM

-> deze zone warmt op en stolt dan terug. Het oppervlakte krijgt hierdoor microscheuren. Dit is enorm slecht voor het oppervlakte. Deze moeten weggewerkt worden door te slijpen of frezen. Zie hybrideprocessen.

9.3 Spleetregeling

De grootte van de spleet hangt af van de tijd van de opbouw td. Hoe langer hoe groter de spleet. Als deze te lang is en je gasbel blijft groeien betekent dat je afstand te groot is. Als deze te klein is krijg je kortsluiting. Je moet dus een goede regeling hebben die de afstand tussen elektrode en werkstuk regelt.

Door t_d te meten kun je de afstand regelen.

Vroeger werd dat handmatig gedaan maar nu gebeurt dat automatisch met computers.

9.3.1 Electodemateriaal

Elektodemateriaal	Werkstukmateriaal				
	staal	hardmetaal	aluminium	messing	grafiet
elektrolytisch koper	++	+	++	++	+
grafiet (voorbewerking)	+	-	+	+	-
grafiet (nabewerking)	++	+	++	++	-
wolframkoper	++	++	++	++	+

++ zeer geschikt, + geschikt, - ongeschikt

Figuur 9.8: Elektrode materialen voor EDM

Je wilt een materiaal die erosievast is zodat je elektrode minder snel slijt. Gegeven met deze formule:

Erosievastheid van elektrode (schematische benadering):

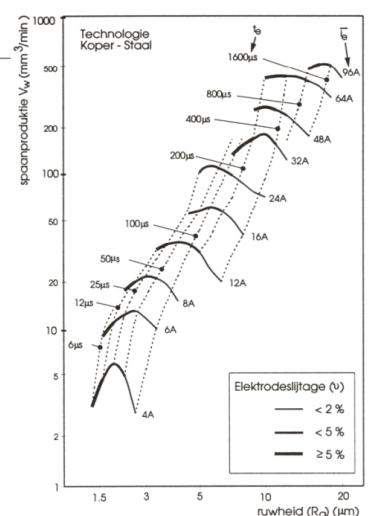
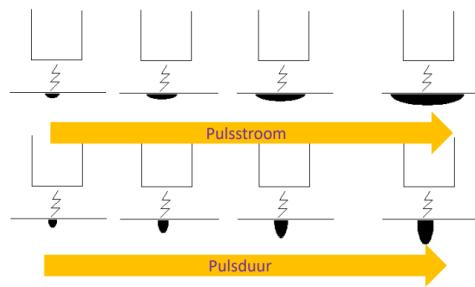
$$E = \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot T_m$$

waarbij λ de warmtegeleidingscoëfficiënt is, ρ de massadichtheid, c de soortelijke warmte en T_m de smelttemperatuur.

9.4 Effecten van pulsduur en stroomsterkte

Effect of pulsparameters

- Effect van pulsenergie, stroom en pulsduur
- Strategie
 - Afwerken in verschillende stappen
Ruwen en # verschillende afwerkingsstappen



Figuur 9.9: Effecten van pulsduur en stroomsterkte bij EDM

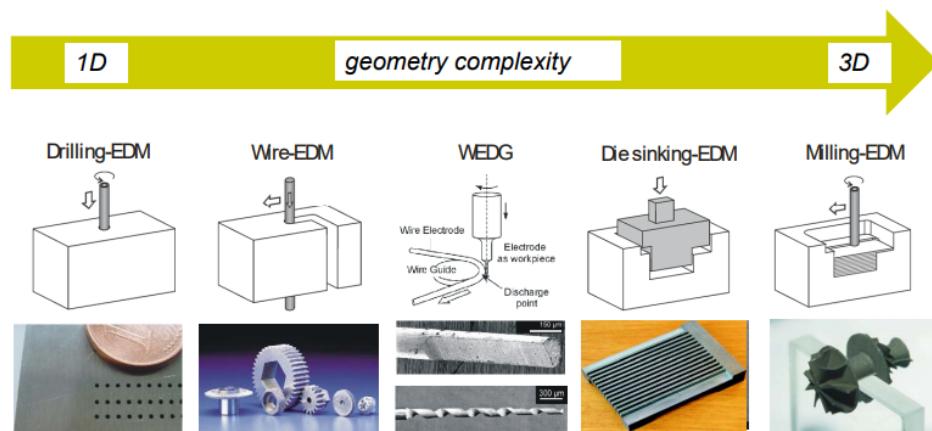
Dikkere lijnen zijn grotere elektrodeslijtage. Bij kortere pulsen heb je grotere slijtage. Dit komt

omdat je de elektronen nog in het diëlektricum zitten terwijl de vonk gebeurt. Er zijn dus meer negatieve ionen die op de elektrode botsen en materiaal wegnemen.

9.4.1 Toepassingen

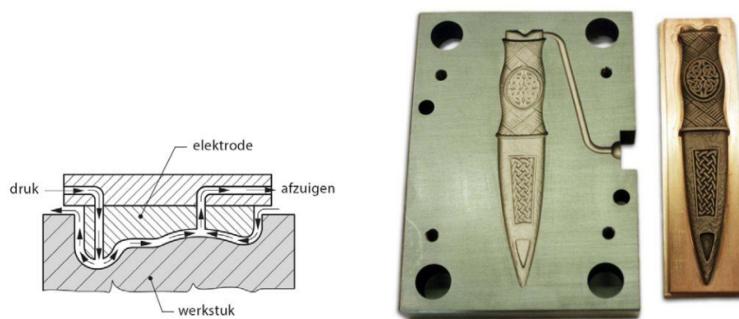
- Vonkerosie laat bewerken van harde materialen toe.
- Je kunt complexe vormen maken die met andere processen moeilijk te maken zijn. Je kunt profielen maken met hoge nauwkeurigheid die dan caviteiten maken.
- Slanke gereedschappen en dunne wanden zijn mogelijk omdat er geen mechanische krachten optreden tijdens het bewerken.

9.4.2 Types



Figuur 9.10: Verschillende types vonkerosie

Zinkvonkerosie



Figuur 9.11: Zinkvonkerosie proces

Zinkvonken gebeurt een geleidend profiel die in het werkstuk verzonken wordt. Je moet de spanen uit het diëlektricum spoelen zodat het diëlektricum niet begint te geleiden. Je kunt dus het inverse profiel maken van de elektrode in het werkstuk.

Je kunt ook enorm kleine delen maken rond de 6 micrometer. Zolang dat de elektrode ook die grote heeft kan je dat maken.

Zinkvonken is

Draadvonkerosie

Je moet eerst via een gat maken in het werkstuk via zinkvonken of een ander process. Je kunt dan je draad door dat gat steken. Je kunt dan op het oppervlakte zagen met die draad.

Draadvonken mag geen lange pulsen hebben omdat de draad zo klein is, anders zou je elektrode smelten. Dus je moet werken met korte pulsen in de megahertz range. Maar kortere pulsen eroderen de elektrode sneller, zie de figuur hierboven. Wat je kunt doen is de polariteit omdraaien zodat je alleen met elektronen erodeert en niet met ionen. Zo beschadig je de draad minder.

Vonkerosie Milling

Je hebt een ronde elektrode die ronddraait en zo materiaal weghaalt.

WEDG

Wire Electro Discharge Grinding is een proces waarbij een draad als elektrode wordt gebruikt om zeer nauwkeurige en fijne bewerkingen uit te voeren op harde materialen.

Die sinking EDM

Je hebt een elektrode die de vorm heeft van wat je wilt maken.

Je laat die elektrode naar beneden zakken en zo maak je een caviteit in het werkstuk.

Milling EDM

Je hebt een ronde elektrode die ronddraait en zo materiaal weghaalt.

Planteair Vonken

Je gaat je elektrode laten ronddraaien en zo grotere caviteiten maken als de elektrode zelf is.

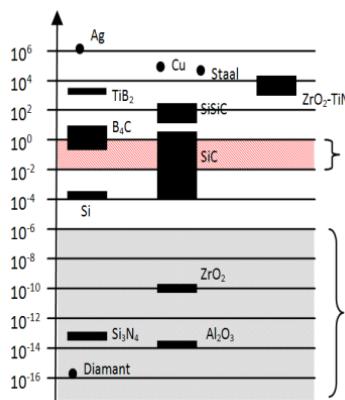
Contour Vonken

Via NC sturing kan je heel kleine dingen maken zoals matrijzen voor kleine tandwielen. Enorm veel microbewerkignen kunnen zo gemaakt worden.

Belangrijk

Vonkerosie zet geen enkele kracht op het werkstuk. De materialen waar je mee moet werken moeten wel elektrisch geleidend zijn. Lager dan $<100\Omega\text{cm}$.

Keramieken zijn van nature isolerend en kunnen daarom normaal niet met EDM worden bewerkt. Om ze toch bewerkbaar te maken, worden ze geleidend gemaakt door toevoeging



Figuur 9.12

van geleidende deeltjes (zoals siliconiumcarbide of titaannitride). Tijdens het **sinteren** wordt dit mengsel van poeders onder hoge temperatuur en druk samengeperst tot een solide massa. Door dit proces ontstaat een intern netwerk van geleidende paden, waardoor de elektrische weerstand voldoende daalt (typisch $< 100 \Omega \cdot \text{cm}$) om het vonkproces mogelijk te maken.

Wat kan gebeuren als je dit gaat vonkfrezen is dat je scheuren gaan krijgen in het oppervlakte van het keramiek. Keramieken zijn bros en dus die hitte kan ervoor zorgen dat er scheuren ontstaan. Als er nog eens op gevonden wordt kunnen er stukken afbreken. We noemen dit **Speling**.

In de industrie zagen ze dat als ze probeerde keramieken accurater te maken met EDM dat ze enorm veel spoiling hadden. Je oppervlakte bij het proberen om het nauwkeuriger te maken werd alleen maar slechter.

9.5 Elektrochemische bewerkingen

Je neemt een werkstuk en een elektrode. Je gaat dat dompelen in een elektrolytische vloeistof. Je laat het werkstuk en de elektrode contact hebben en laat dan een stroom lopen. Deze stromen zijn in orde $50\text{--}1000 \text{ A/cm}^2$. Het werkstuk is de anode en de elektrode is de kathode. Je beweegt het werkstuk stap voor stap naar beneden om materiaal chemisch te verwijderen.

-> Je krijgt een **Electrolyse** reactie tussen de twee.

De anode (het werkstuk) lost op in de elektrolyt door oxidatie. De kathode (de elektrode) blijft intact door reductie.

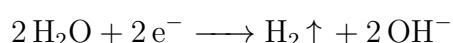
Voorbeeld bij anode van ijzer in een zoutoplossing NaCl, H₂O als elektrolyt:

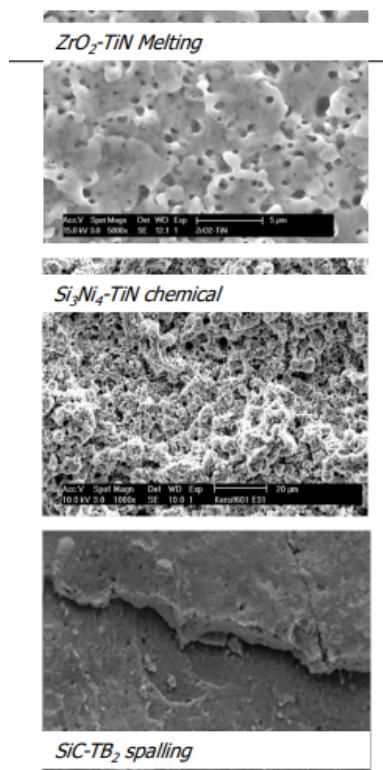
- **Anode (Werkstuk) - Oxidatie:**



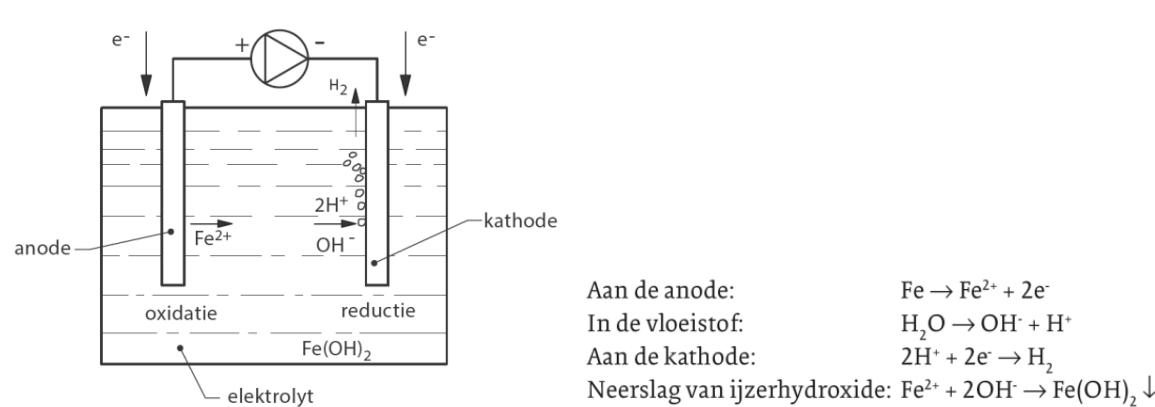
Het ijzer gaat in oplossing als positieve ionen.

- **Kathode (Gereedschap) - Reductie:**



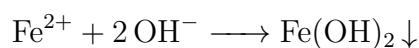


Figuur 9.13: Ruw oppervlak met scheuren door spoiling bij keramieken



Waterstofgas ontsnapt en hydroxylionen worden gevormd.

- **Totaalreactie in elektrolyt:**



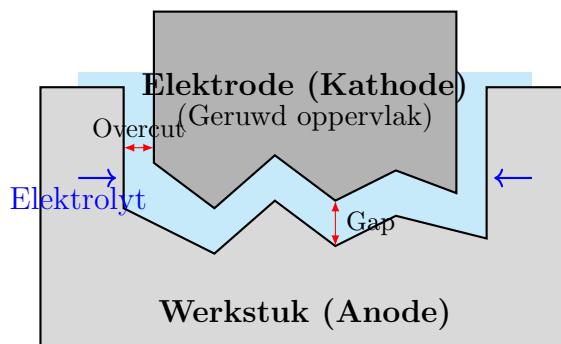
Je krijgt een neerslag van ijzerhydroxide, deze moet worden weggepompt.

Het verschil met vonkerosie is dat je bij vonkerosie een isolerend diëlektricum hebt en bij elektrochemisch bewerken een geleidend elektrolyt. Je hebt dus geen slijtage van de elektrode bij elektrochemisch bewerken.

9.5.1 Eigenschappen van elektrochemisch bewerken

- Heel goede oppervlaktekwaliteit (laag R_a)
- Geen gereedschapslijtage
- geen beïnvloede zone (geen TAZ), je oppervlakte is niet aangetast door iets
- Niet super nauwkeurig door dat het elektrode meer afneemt dan de vorm van de elektrode (typisch rond $\pm(1.0 - 0.1)mm$)
- Niet goed voor het milieu

Het naadeel is dat je meer materiaal gaat afnemen dan je de vorm van je werkstuk.



Figuur 9.14: Schematische weergave van elektrochemisch bewerken (ECM) met een ruwe elektrode. De ontstane caviteit in het werkstuk is groter dan de elektrode door de övercutten de chemische werking.

Dit kan dus wel handig zijn bij zinkvonken. Het oppervlakte van vonkeroderen is een geharde laag door de opwarming en dan afkoeling van het materiaal. EMC kan dit wegnemen en een goede oppervlaktekwaliteit geven. Typische overcut-waarden bij ECM liggen tussen ongeveer 0,13 en 1,0 mm; bij micro-ECM zijn waardes rond 0,02 mm mogelijk.

9.5.2 Afnamen bij ECM

Afnamesnelheid bij ECM:

$$M_{\text{ECM}} = \frac{I \cdot A}{F \cdot V} \cdot \eta$$

waarbij *MMR*(Material Removal Rate) is de snelheid van afname, *I* de stroomsterkte (*A*), *A* de atoommassa van het materiaal (*g/mol*), *V* de valentie (aantal elektronen), *F* de Faraday-constante (96485 C/mol) en η de efficiëntie.

Voorbeeld bij Titaan: $A = 48\text{A}$, $V = 3$, $I = 2000\text{A}$ en $\eta = 0.9$

$$M_{\text{ECM}} = \frac{2000 \cdot 48}{96485 \cdot 3} \cdot 0.9 = 0.297\text{g/s}$$

Omrekenen naar cm^3/min :

$$\text{Dichtheid Titaan} = 4.51\text{g/cm}^3$$

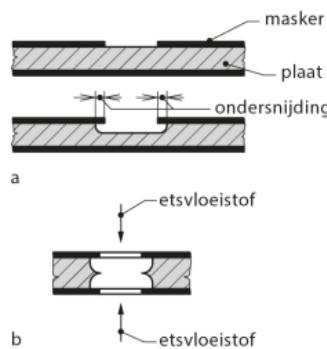
$$M_{ECM} = \frac{0.297g/s}{4.51g/cm^3} \cdot 60s/min = 3.95cm^3/min$$

9.5.3 Toepassingen van ECM

Je kunt ECM gebruiken voor:

- Het bewerken van harde materialen zoals titanium en superlegeringen.
- Het maken van complexe vormen en fijne details die moeilijk te bereiken zijn met conventionele methoden.
- Het produceren van onderdelen met hoge oppervlaktekwaliteit zonder thermische of mechanische schade.
- Is gebruikt voor het maken van turbinebladen, raketonderdelen, medische implantaten, en micro-elektronische componenten.

Afname zonder Stroom Je zet een masker op het werkstuk zodat alleen de delen die je wilt bewerken blootgesteld zijn aan de elektrolyt. Met je **Etsvloeistof** ga je de delen die dan geen masker hebben worden weggeërodeerd. Je gaat iets meer wegnemen dan wat je wilt langs de binnenkant. Dit noemt **ondersnijding**.



Figuur 9.15: Wegeroderen van materiaal zonder stroom met etsvloeistof

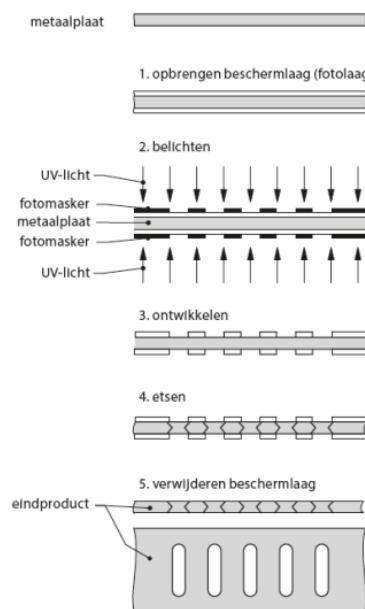
De etstijd gaat bepalen hoeveel materiaal je wegneemt en de grote van de ondersnijding.

Fotoetsen is een gelijkaardig proces. Dit wordt vooral toegepast op hele kleine delen. Je maskeert ook de oppervlakte met een laklaag. Je legt dan nog een deel van transparante en niet transparante laag op. UV-licht zal door de transparante laag gaan en de lak verwijderen. Je kunt deze patronen dan etsen met een etsvloeistof. Deze patronen kunnen enorm klein zijn, rond de micrometer. Dit wordt toepast in micro-elektronica.

Net zoals bij normaal etsen krijg je ook ondersnijding waar je rekening mee moet houden.

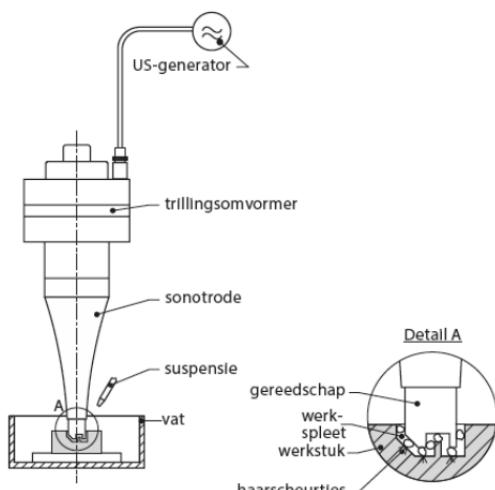
9.6 Ultrasoon bewerken (Ultrasonic Machining)

Ultrasoon bewerken is een bewerkingsproces waarbij hoge-frequentie trillingen worden gebruikt om materiaal van een werkstuk te verwijderen. Het proces maakt gebruik van een sonotrode die ultrasone trillingen (typisch tussen 20 kHz en 40 kHz) met een heel kleine amplitude genereert. De trillingen creeëren kleine scheurtjes op het materiaaloppervlak en dan wordt dat materiaal



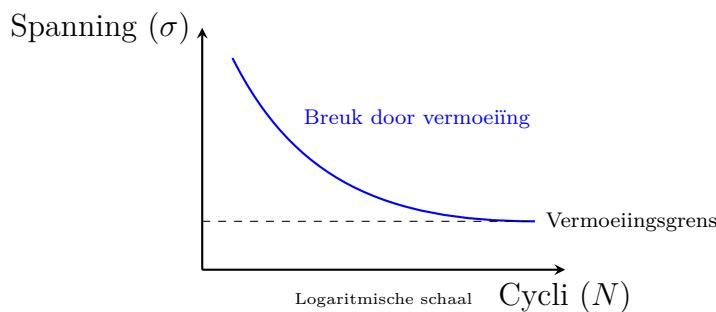
Figuur 9.16: Fotoetsen van een complex onderdeel met ECM

uitgebroken. Deze techniek werkt goed voor harde en brok materialen zoals keramiek, glas, en harde metalen omdat die niet goed tegen scheurtjes kunnen. Je hamert dus als het ware op het materiaal met die ultrasone trillingen.



Figuur 9.17: Principe van ultrasoon bewerken

Ductiele materialen zoals metalen zijn ook bewerkbaar: Door de enorm grote trillingen krijg je een **vermoeiingsproces** in het materiaal waardoor je ook materiaal kunt wegnemen.



Figuur 9.18: S-N curve (Wöhler-curve) die het vermoeiingsproces bij metalen weergeeft.

Het gereedschap is gemaakt van harde materialen zodat het niet snel slijt.

Het wordt vooral toegepast op harde materialen die moeilijk te bewerken zijn met conventionele methoden.

Je kunt ook een profiel maken van het gereedschap en dan dat profiel in het werkstuk maken.

9.7 Straalbewerkingen

Straalbewerkingen zijn processen waarbij een geconcentreerde straal van energie of materiaal wordt gebruikt om materiaal van een werkstuk te verwijderen of te bewerken.

Tabel 9.1: Overzicht van verschillende straalbewerkingen.

Energiedrager	Bewerkingen	Toepassingen
Vloeistof (Water)	Waterstraalsnijden (WJM)	Snijden van zachte materialen (plastic, textiel, voedsel).
Vloeistof + Abrasief	Abrasief waterstraalsnijden (AWJM)	Snijden van harde materialen (metaal, glas, steen).
Licht (Fotonen)	Laserstraalbewerking (LBM)	Snijden, lassen en boren van bijna alle materialen.
Elektronen	Elektronenstraalbewerking (EBM)	Zeer nauwkeurig boren en snijden (in vacuüm).
Ionen	Ionenstraalbewerking (IBM)	Etsen op nanoschaal en oppervlaktebewerking.
Gas / Plasma	Plasmastralen (PAM)	Ruw snijden van dikke metaalplaten.

9.7.1 Shotpeening

Korrels worden met hoge snelheid op het oppervlak van een werkstuk geschoten. Dit veroorzaakt plastische vervorming aan het oppervlak, wat leidt tot een verhoogde vermoeiingssterkte door de inwendige spanningen die worden geïnduceerd.

9.7.2 abrasief stralen

Je gebruikt een straal van abrasieve deeltjes (zoals zand) die met hoge snelheid op het oppervlak van een werkstuk worden gespoten. Dit wordt vaak gebruikt voor het **reinigen, ontroesten of matten** van oppervlakken. Het process werkt door de wet van bernoulli. (zie stromingen)

Wet van Bernoulli In een stromend fluïdum is de som van de drukenergie, kinetische energie en potentiële energie per eenheid volume constant langs een stroomlijn:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$$

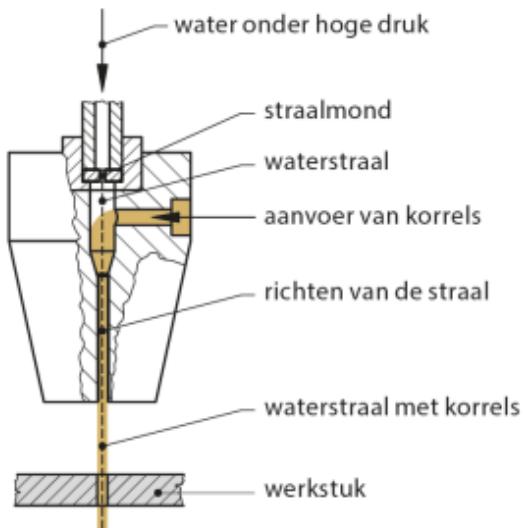
waarbij P de druk is, ρ de dichtheid van het fluïdum, v de stroomsnelheid, g de zwaartekrachtver-
snelling en h de hoogte boven een referentieniveau.

Je deeltjes moeten hun kinetische energie kwijt kunnen op het oppervlakte. Ze nemen dus materiaal weg.

9.7.3 Waterstraalsnijden

water wordt bij **4000 bar** door een kleine opening gepompt. Deze kracht is om materiaal te snijden. Je kunt hier dikke stukken materiaal mee wegsnijden.

Je hebt geen beïnvloede zone, geen hitte dus geen TAZ. Het is ook bruikbaar op andere industrieën zoals voedselindustrie.



Figuur 9.19: Waterstraal snijden proces

Een extra mogelijk is het gebruik van ijsbolletjes om opervlakte te reinigen in plaats van zand. Het ijs smelt gewoon weg en je moet geen zand opruimen.

9.7.4 Laserstraalbewerking (LBM)

Hoe werk een laser?

Een Laser is een geconcentreerde lichtbron die op één specifieke golflengte licht uitzendt met hoge intensiteit en coherentie.

Laser:

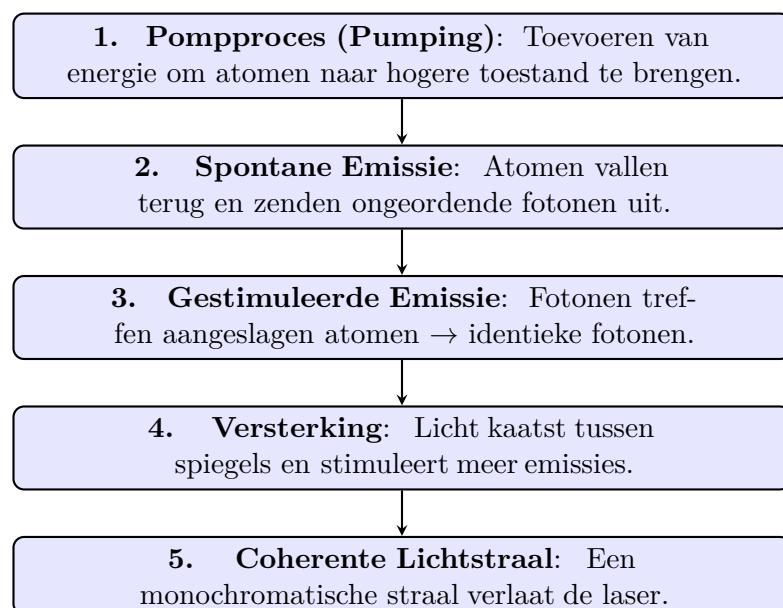
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

is een apparaat dat licht versterkt door gestimuleerde emissie van straling.

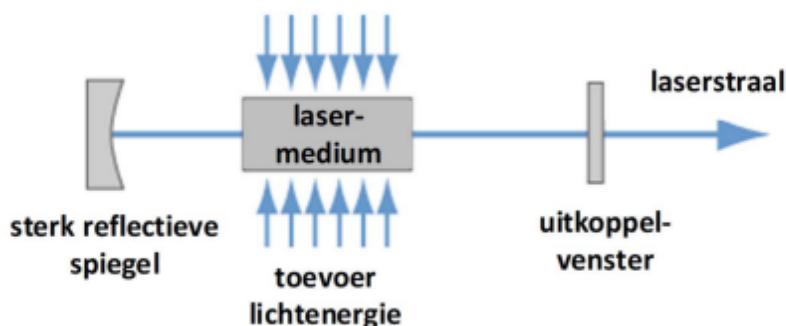
Voor een laser te maken wordt materiaal hun atomen naar een hogere energietoestand gebracht door energie toe te voeren (pompproces). Wanneer deze atomen terugvallen naar hun lagere energietoestand, zenden ze fotonen uit. Dit process noemt **spontane emissie**.

Als deze fotonen andere aangeslagen atomen treffen, kunnen ze deze atomen stimuleren om ook fotonen uit te zenden die identiek zijn aan de oorspronkelijke fotonen (zelfde frequentie, fase en richting). Dit process noemt **gestimuleerde emissie**.

Het resultaat is een coherente en monochromatische lichtstraal met hoge intensiteit.

Workflow: Hoe een laser wordt gecreëerd

Figuur 9.20: Stapsgewijze workflow van de werking van een laser.



Figuur 9.21: Creeren van een laserstraal door gestimuleerde emissie.

De laserstraal heeft een paar problemen

Er wordt veel energie omgezet in warmte en de lichtkwaliteit moet je in rekening houden.

Classificatie van lasers:

- **Lasermedium:** gas, vast, vloeistof, halfgeleider
- **Golfomgte:** infrarood, zichtbaar, ultraviolet
- **Aard van uitgaande straal:** continue, gepulst
- **Het vermogen:** van lasers in miliwat tot multi-kilowatt
- **Vorm lasercaviteit:** langwerpig, rond, ringvormig, fiber en disklasers
- **De pompmethode:** elektrisch, optisch

Lasers kunnen getransporteerd worden via lucht, glasvezel of spiegels. Glasvezels kunnen ook lasers exiteren in de kabel. Wanneer men spreekt over een fibrelaser betekent dat gewoon het medium die de laser doorbrengt.

De **golfomgte** λ gaat je laser bepalen. Kleinere golfomgtes zijn preciezer maar zijn ook duurder te maken. Vele lasertechnologie zijn recente ontwikkelingen (het jaar 2000). Een yag laser is recent en door de korte golfomgte kan je preciezer werken.

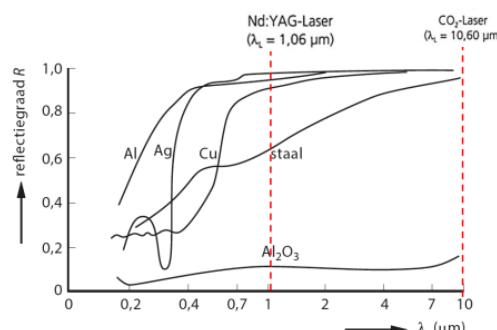
Hieronder zijn alle relevante type lasers voor het bewerken van materialen:

Type	Categorie	Golfomgte	Pompsysteem
CO₂ laser	gaslaser	10,64 μm	elektrische ontlasting
Ytterbium gedopeerde glas laser: Fiber laser	vaste stof laser	1070 nm	laserdiodes
Neodimium Yttrium Aluminium Garnet: Nd-YAG	vaste stof laser	1064 nm	laserdiodes
Idem: met frequentieverdubbeling: ' Groene laser '	vaste stof laser	532 nm	laserdiodes
Diodelaser	vaste stof: halfgeleider-laser	400-1500 nm (... tot 20 μm)	elektrische stroom

Figuur 9.22

absorptie van laserlicht

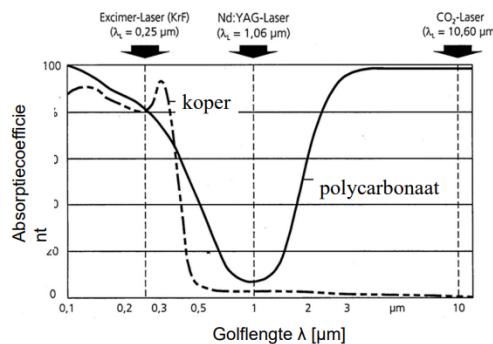
Je wilt zoveel mogelijk van de laserenergie laten absorberen door het werkstuk. $R + T + A = 1$ met R = reflectie, T = transmissie en A = absorptie. Je wilt dus een hoge A hebben.



Figuur 9.23

In de figuur zie je dat bij staal dat 90 % van de CO₂ laser wordt gereflecteerd. Niet zoals een YAG laser die maar 50 % reflecteert. Hoe ze dit vroeger oploste was de CO₂ laser met enorm grote vermogens gebruiken zodat er toch genoeg energie werd geabsorbeerd.

Deze verschillen in absorptie komt door de kristalstructuur/moleculaire structuur van het materiaal.



Figuur 9.24

Bij kunststoffen is zoals polycarbonaat zie je dat bij een CO₂ laser bijna alles wordt geabsorbeerd maar enorm veel gereflecteerd bij een YAG laser. Bij deze toepassing wil je dus liever een CO₂ laser gebruiken.

kwaliteit van de laserstraal

De BBP (Beam Parameter Product) is een maat voor de kwaliteit van een laserstraal.

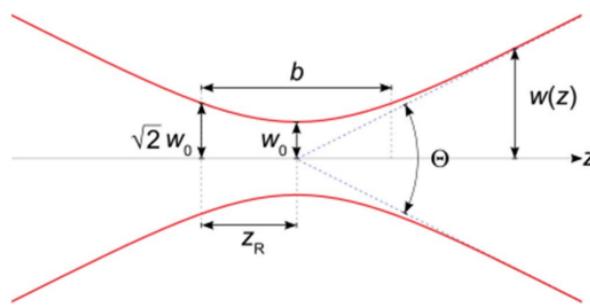
BBP = Beam Parameter Product:

$$BBP = \omega_0 \cdot \frac{\theta}{2}$$

waarbij ω_0 de halve diameter van het focuspunt is en θ de divergerende hoek van de straal.

Hoe kleiner θ is, hoe beter de kwaliteit van de laserstraal.

Je moet dus je laser focussen als je materiaal wilt bewerken. Deze afstand moet precies zijn of je krijgt een groter focuspunt en dus minder intensiteit.



Figuur 9.25

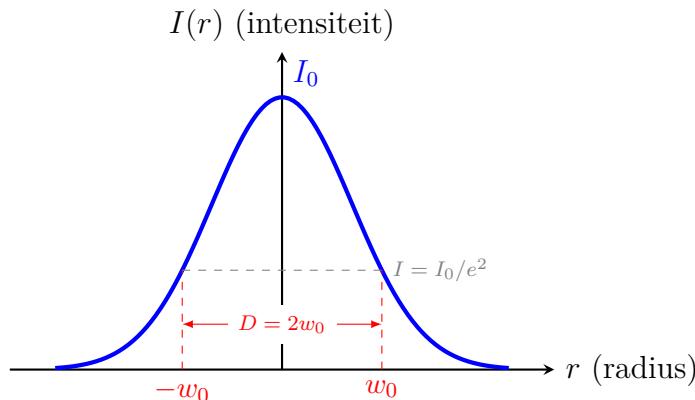
Het intensiteitsprofiel van een laserstraal Een perfecte laser zou een perfecte cilinder zijn. In de praktijk is dat niet zo. De laserintensiteit gaat een gaussiaans profiel hebben. -> Je

intensiteitprofiel ziet er als volgt uit:

de intensiteit wordt gegeven door:

$$I = \frac{I_0}{e^2}$$

met I_0 de maximale intensiteit in het midden van de bundel.



Figuur 9.26: Parabolische/Gaussiaanse intensiteitsverdeling van een laserbundel op het focuspunt.

voor een guassiaans profiel is het BBP:

$$BBP = \frac{\lambda}{\pi}$$

met λ de golflengte van de laser.

Een kleinere golflengte λ geeft dus een betere bundelkwaliteit van de laserstraal.

Om de bundel te focussen gebruik je een lens met een focuslengte f . De straal wordt dan gefocusseerd tot een straal met een straal w_0 gegeven door:

$$w_0 = \frac{4\lambda f}{\pi D}$$

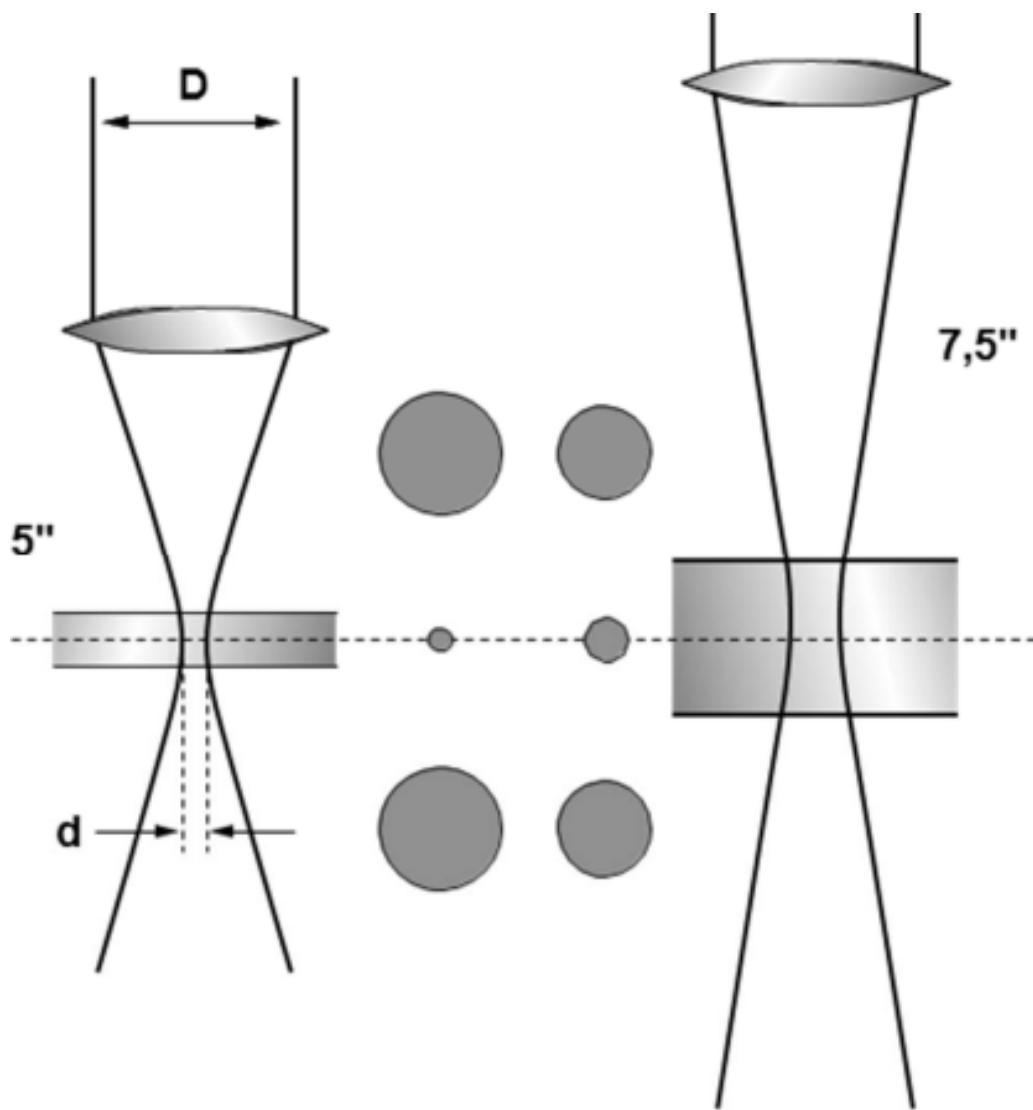
Kleine verschillen in hoogte kan dus een groot verschil maken in de grootte van het focuspunt.

7

De w_0 kun je meten met warmtecamera's die de warmte van de laser opneemt. Hieruit kan je dan de BBP berekenen.

Toepassingen

- **Snijden:** Het materiaal wordt lokaal gesmolten of verdampst door de hoge energiedichtheid, vaak ondersteund door een snijgas om de smelt te verwijderen.
- **Lassen:** Het verbinden van twee delen door ze op het contactvlak te smelten, wat resulteert in een smalle, diepe lasnaad met minimale thermische vervorming.
- **Boren:** Gebruik van korte laserpulsen met zeer hoge intensiteit om materiaal te verdampen en zo nauwkeurige gaten te creëren.



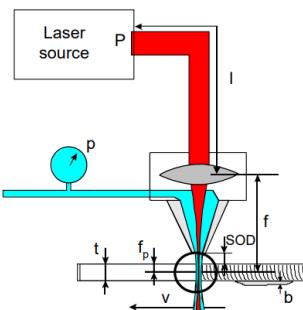
Figuur 9.27: Laserfocussen met verschillende focusafstanden f .

- **Oppervlaktebehandeling:** Aanpassen van de textuur of chemie van de toplaag, zoals het reinigen van oppervlakken of het creëren van specifieke ruwheidspatronen.
- **Harden:** Het lokaal verhitten van staal boven de kritische temperatuur, gevolgd door zelf-afschrifking door de omringende koude massa, om de slijtvastheid te verhogen. Je kunt de randen van tandwielen harden zodat de punten sterker zijn. Harden met een laser kreeg je minder deformatie als het harden in een oven.
- **Cladding:** Een laag van een ander materiaal (poeder of draad) op het werkstuk smelten om eigenschappen zoals corrosiebestendigheid of hardheid te verbeteren.
- **Solderen:** Het smelten van een toevoegmateriaal met de laser om een verbinding te maken, waarbij het basismateriaal zelf niet smelt (soldeerverbinding).

Afhankelijk van de toepassing moet je de BBP en het vermogen aanpassen.

machine gestuurde Lasers, NC lasers

- NC parameters:
 - vermogen (P), snelheid (v), locatie focuspunt (f), afstand tussen nozzle en werkstuk (stand-off distance: SOD), gasdruk (p), ...
- Andere aanpassbare parameters:
 - materiaaldikte, coating, nozzletype, focuslengte van de lens, ...
- Niet aanpassbare parameters:
 - laserkwaliteitskenmerken: diameter en divergentie, ...



Figuur 9.28: NC laser snijmachine

Belangrijke parameters bij laser snijden

Lasersmeltsnijden: Snijgas (stikstof, argon) wordt tijdens het lasersnijden zodat de bewerking sneller afkloelt en dat er geen oxidatie optreedt en kans op brand verminderd. De laser in een interte atmosfeer brengen zoals argon of stikstof kan ervoor zorgen dat je geen enkele oxidatie hebt.

Laserbrandsnijden: Je kunt ook het omgekeerde doen en zuurstof toevoegen om het snijproces te versnellen.

In beide gevallen is het belangrijk om het verwijderde materiaal (smelt) weg te blazen met het snijgas.

Toepassingen

Lasersnijden is snel en nauwkeurig en kan enorm kleine dingen maken.



Figuur 9.29: Toepassingen van lasersnijden in verschillende industrieën

grote platen kun je ook snijden met lasers.

Nadelen

- **Dross:** Tijdens het snijden kan er een ophoping van gesmolten materiaal aan de onderkant van het snijvlak ontstaan, wat resulteert in een ruwe afwerking die vaak nabewerking vereist.
- **burning defecten:** Bij het snijden van bepaalde materialen bij een te lage snijsnelheid, zoals bij kunststoffen, kan overmatige hitte leiden tot verbranding of verkoking langs de snijranden, wat de kwaliteit van het eindproduct vermindert.
- **Loss of full penetration:** Bij het snijden van dikkere materialen kan het voorkomen dat de laserstraal niet volledig door het materiaal heen dringt, wat resulteert in onvolledige sneden die opnieuw bewerkt moeten worden.
- **Aanhechting van gesmolten materiaal:** Bij brandsnijden aan hoge snijsnelheden kan gesmolten materiaal aan de snijkant blijven plakken, wat leidt tot onregelmatige randen en mogelijke structurele zwaktes in het gesneden onderdeel.

10 Scheiden

Bij Scheiden ga je knippen of ponsen. Hierbij heb je geen spanen. Je kunt alle vorige technieken gebruiken om te scheiden. Het afgenome materiaal is dus nog steeds bruikbaar.

10.1 Ponsen en knippen

Bij Ponsen ga je met een gesloten profiel een gat maken in een plaat.

Bij knippen ga je met een rechte snede je materiaal scheiden.

10.1.1 Algemeen Knippen en Ponsen

: Je gaat pas vervorming krijgen als je plastisch gaat vervormen. Om het te vervormen heb je een afschuifkracht.

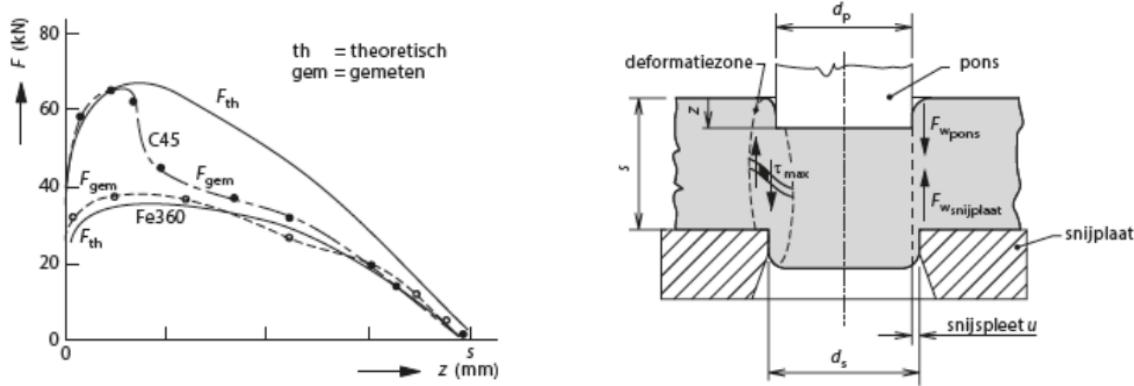
Afschuifkracht bij ponsen:

$$F = \tau \cdot L \cdot s_0$$

Waarbij F de afschuifkracht is, τ de schuifspanning van het materiaal, L de omtrek van het profiel en s_0 de plaatdikte.

Je materiaal gaat afschuiven tot dat het doorbreekt en dan het je je materiaal verwijderd.

$$F_{th} = \tau_{max} \cdot l \cdot s_0$$



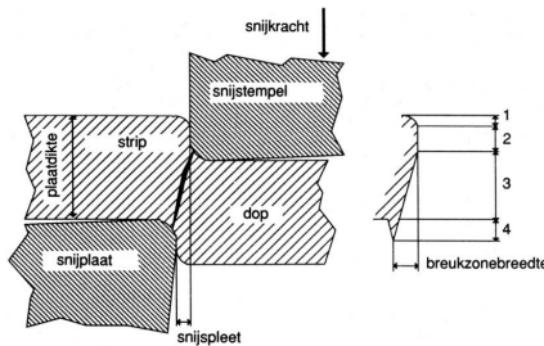
Figuur 10.1

Je ziet bij de grafiek dus eerst verhogingen van de kracht. Dit is de schuifkracht, het bereikt dan een piekbelasting. Daarna gaat de kracht dalen omdat het materiaal begint te breken. De Z-waarde is hier de afstand dat het stuk beweegt tot dat het doorbreekt.

Bij knippen en ponsen heb je drie fases:

1. **Elastische vervorming:** Het materiaal ondergaat een tijdelijke vervorming die verdwijnt wanneer de kracht wordt verwijderd.
2. **Plastische vervorming:** Het materiaal begint permanent te vervormen zodra de vloeigrens is overschreden.
3. **De scheidingsfase:** Uiteindelijk bereikt het materiaal zijn breekpunt, wat resulteert in het scheiden van het materiaal.

De vorm en kwaliteit van de snede hangt af van de breedte van de snijspleet.



Figuur 10.2: Afschuiving door knippen

10.1.2 Knippen

Knippen is een spaanloze bewerking. Je hebt in plaats van een spaanhoek een snijhoek γ en een vrijloophoek α . Een voorbeeld van een knipmachine is een guillotineschaar.

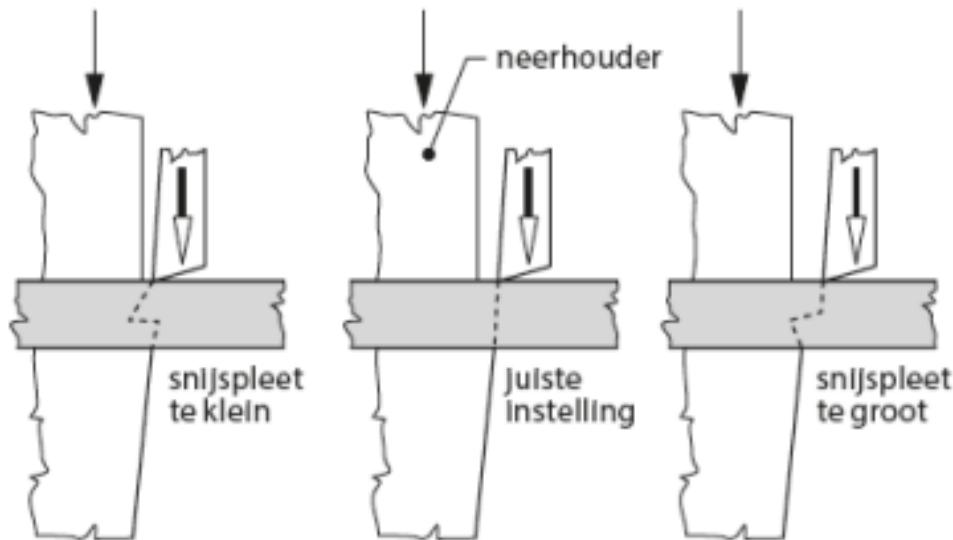
Schuifkracht bij knippen:

$$F = 0.5 \cdot \frac{s^2}{\tan \varepsilon} \cdot \tau$$

waarbij F de afschuifkracht is, s de plaatdikte, ε de snijhoek en τ de schuifspanning van het materiaal.

De **snijspeelt** is de afstand tussen het mes en het tegenmes. Als deze niet goed is ingesteld krijg je slechte sneden.

Dit is de rede waarom versleten scharen slechte sneden geven.



Figuur 10.3: Het belang van de juiste snijspleet bij knippen

Nog voorbeelden van knipmachines zijn:

- **strokenschaar** - Een knipmachine speciaal ontworpen voor het verwerken van langwerpige stroken metaal. Deze machines zijn ideaal voor het afkorten van platen tot breedte en maken lange, rechte sneden met hoge precisie.
- **rolschaar** - Een knipmachine die werkt met twee tegenover elkaar geplaatste, ronddraaiende messen. Hierdoor wordt een continue knipvorming gecreëerd wat bijzonder geschikt is voor het produceren van lange rechte sneden en het verwerken van dikke platen met minder krachtinspanning.
- **figuurschaar** - Een geavanceerde knipmachine in staat om complexe vormen en contouren te snijden. Deze machines worden vaak CNC-gestuurd en kunnen zowel rechte als gebogen sneden maken, ideaal voor het produceren van op maat gemaakte onderdelen en profielen.

10.1.3 Ponsen

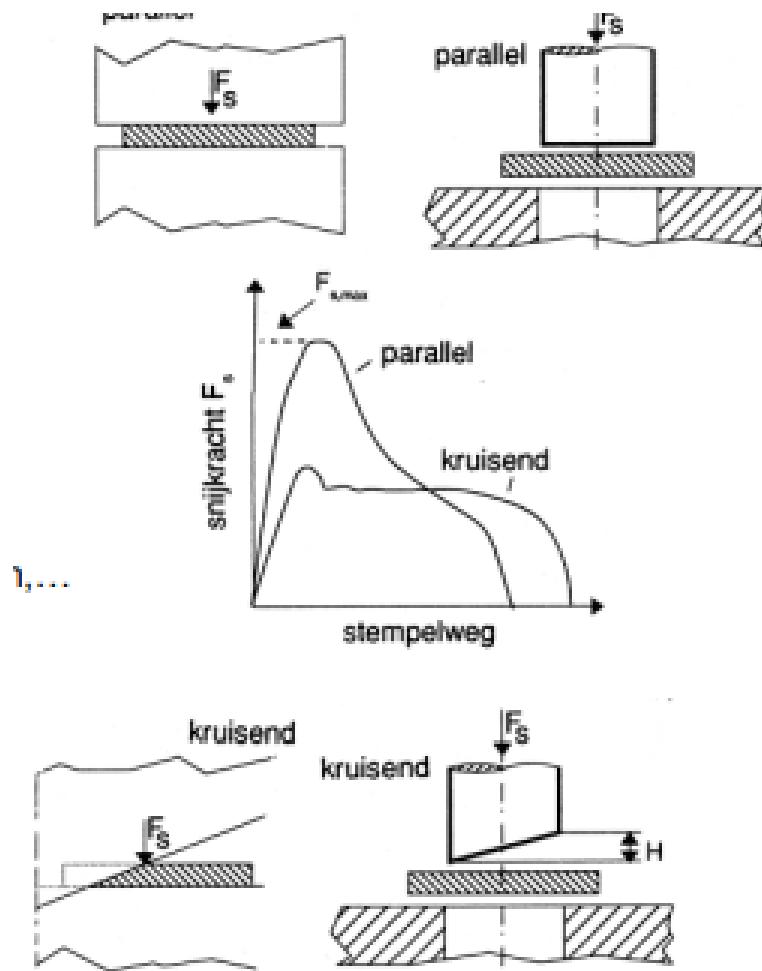
Ponsen is ook een spaanloze bewerking. Een simpel voorbeeld is een perforator.

Eerste formule Schuifkracht bij ponsen:

$$F = s_0 \cdot l \cdot \tau$$

waarbij F de afschuifkracht is, s_0 de plaatdikte, l de omtrek van het profiel en τ de schuifspanning van het materiaal.

Bij ponsen is er geen enkele opbouw. Je hebt direct een indrukking en dus snel een vergroting van de schuifspanningen.



Figuur 10.4: Ponsen proces met de verschillende fases

De eerste formule is een benadering. Een betere formule is:

Tweede formule Schuifkracht bij ponsen:

$$F = 1, \cdot y_s \cdot s_0 \cdot l \cdot \tau \cdot k_s$$

waarbij F de afschuifkracht is, y_s een correctiefactor voor het ponsproces, τ de schuifspanning van het materiaal, s_0 de plaatdikte, l de omtrek van het profiel en k_s de specifieke snijkracht.

 k_s de specifieke snijkracht

De specifieke snijkracht k_s is een maat voor de kracht die nodig is om een eenheid van materiaal te snijden. Het wordt uitgedrukt in N/mm² en hangt af van het materiaaltype en de dikte van

het werkstuk.

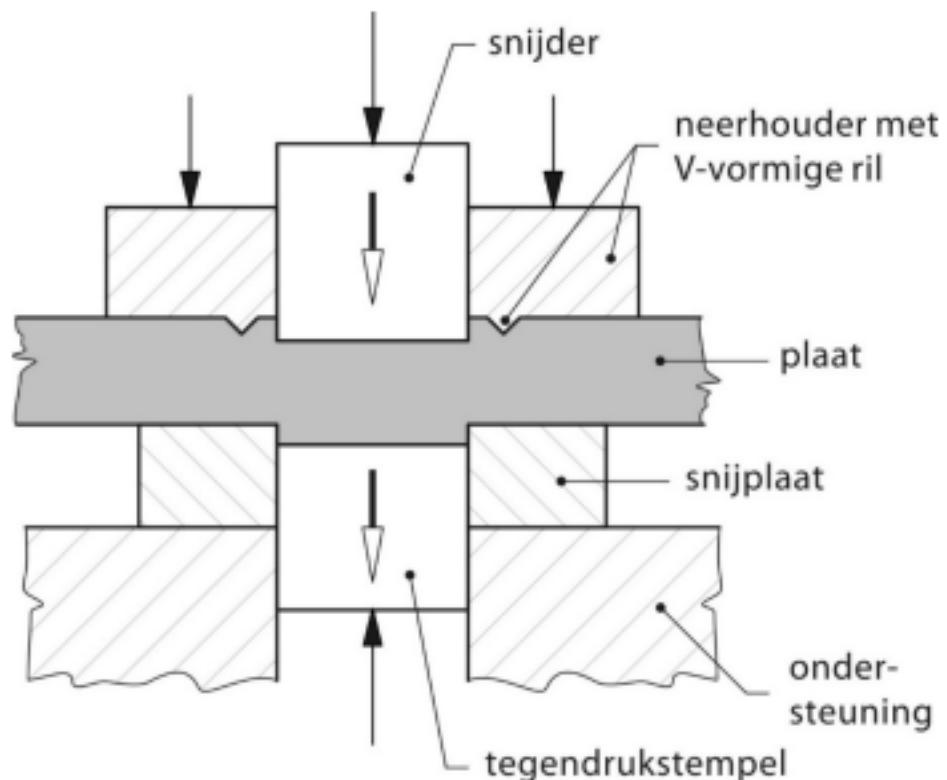
$$k_s = X_f \cdot R_m$$

met X_f de snijfactor en R_m de treksterkte van het materiaal.

10.1.4 Fijnstancen

Fijnstancen is snijden en ponsen met een heel kleine snijspleet. rond de 1-0.01mm. Bij normaal ponsen en knippen heb je ruimte rond je snede langs boven. De tool zijn hoek werd op dezelfde hoek gelegd als de onderplaat en zo werd er gesneden of geponst.

Bij fijnstancen heb je geen ruimte meer. De plaat wordt dus volledig vastgeklemd tussen de boven en onderplaat en de pons wordt dan heel precies geleid. e snijspleet is klein maar is ook constant.



Figuur 10.5

Het is duurder om te zien maar je oppervlaktekwaliteit van je afbreukzone is veel beter. Beter dan lasersnijden en normaalponsen.

10.1.5 Volgsnijstempel

Bij volgsnijstempel heb je een soort lopende band van ponsen. Stel je wilt een sleutelgat maken. Je gaat stap per stap vier gaten maken op een lange plaat aluminium sheet. en dan het sleutelgat. De plaat kan blijven bewegen zodat je snel velle producten kunt maken. Je verdeeld

verschillende operaties over verschillende stempels. Deze stempels zijn niet alleen voor door te ponsen maar kunnen ook het product een bepaald oppervlakte geven.

Deze techniek wordt gebruikt wanneer je grote aantallen van een product moet maken. De stempels (gemaakt uit hard staal met wolframcarbide) zijn duur maar je kunt er wel enorm snel mee werken.

Examenvraag

Hoe zou je de geleiders maken voor een volgsnijstempel?

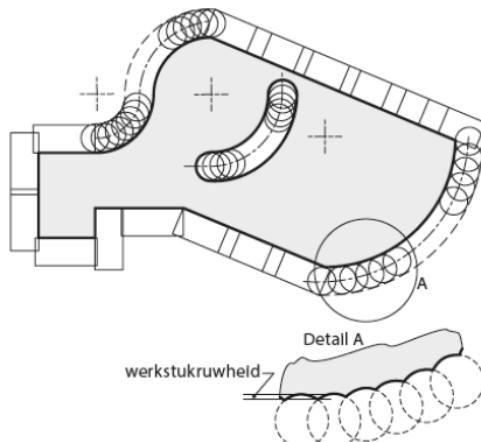
Met draadvonken kun je heel precies openingen uit hardmetaal maken in dezelfde vorm als de stempel. Je maakt de toppen van de geleiders uit keramiek zodat ze niet slijten.

10.1.6 Revolvermachine

Je kunt computergestuurd ponsen op een grote aluminium plaat. Je plaat kan rondbewegen langs de x-en y-as en de pons kan operaties doen. Dit gaan enorm snel. Het is sneller dan een lasersnijmachine dus als je grote aantallen moet maken is dit ideaal.

10.1.7 Knabbeln

Bij knabbeln ga je rond een contour ponsen om iets uit te knippen. Afhankelijk van de stapgrootte tussen de ponsen krijg je een grovere of fijnere rand. Dit is enorm snel, rond 10 slagen per seconde.



Figuur 10.6

De pons kun je combineren met verschillende vormen: cirkel, vierkant, driehoek enz.

10.2 Mechanisch Scheiden, verspannen

Bij mechanisch scheiden ga je materiaal wegnemen door te verspannen. Je gaat niet de structuur van je materiaal veranderen. Je hebt verschillende technieken:

- **Zagen:** Gebruik van een zaagblad met tanden om materiaal te verwijderen door middel van een snijbeweging.
- **Schuren:** Verwijderen van materiaal met schuurpapier of schuurbanden door wrijving.

- **Slijpen:** Gebruik van een slijpschijf om materiaal te verwijderen en een glad oppervlak te creëren.
- **Polijsten:** Fijnere afwerking van oppervlakken door gebruik van polijstmiddelen en doeken.
- **Boren:** Creëren van ronde gaten in materialen met behulp van een boor.

10.3 Fysische scheiding

Bij fysische scheiding ga je materiaal wegnemen door fysische processen. Je hebt opnieuw verschillende technieken:

- **Brandnsijden:** Metaal snijden door verbranding met behulp van een zuurstofstraal. Het materiaal wordt verhit tot boven de ontbrandingstemperatuur en vervolgens wordt zuurstof toegevoegd om het metaal te oxideren en weg te blazen. Als je te weinig zuurstof gebruikt krijg je aanhechting van gesmolten materiaal. Als je te veel zuurstof gebruikt krijg je een ruwe rand en een te grote snijholte.
- **Draadvonken:** Gebruik van elektrische vonken tussen een elektrode en het werkstuk om materiaal te verwijderen.
- **Stralen:** Gebruik van abrasieve deeltjes om materiaal te verwijderen of oppervlakken te reinigen.
- **Laser snijden:** Gebruik van een geconcentreerde laserstraal om materiaal te smelten of te verdampen.
- **Waterstraalsnijden:** Gebruik van een hogedruk waterstraal om materiaal te snijden zonder thermische effecten.
- **Plasmasnijden:** Gebruik van een plasmaboog om metaal te snijden door het te verhitten en te smelten. Plasma creert een vlam van geïoniseerd gas die extreem heet is.

Deze tabel is enorm belangrijk want hij kan vragen. Welke van deze technieken zijn het snelste, goedkoopste, meest precieze enz.

Je ziet dat enorm veel technieken die we al gezien hebben terugkomen bij dit hoofdstuk. Niet echt super handig maar het is een goede herhaling.

Tabel 10.1: Vergelijking van scheidingsprocessen

Processen	Toepassing	Snelheid	Voor- en nadelen	Nauwk. (mm)	WBZ (mm)
Knippen	Plaat 0,2–10mm	lengte/knip	+ grote lengten – bramen	> 0,1	–
Ponsen	Plaat 0,2–10mm	≤ 30 sl/s	+ massa – bramen	> 0,1	–
Knabbelen	Plaat 0,2–10mm	$\leq 0,1$ m/s	+ massa/kl. prod. + contouren – bramen/ruw	0,1	–
Uitsnijden	Plaat 0,2–3mm	≤ 30 sl/s	+ massa + kleine prod.	0,05	–
Zagen	Plaat/buis/staf > 1mm	$\leq 0,05$ m/s	+ enk. st./massa – bramen	> 0,3	–
Doorslijpen	Harde mat. (tot 90mm)	?	+ enk. st./massa – bramen	0,05	< 0,1
Omtrekfrezen	Platen (tot 12mm)	?	+ glad contour – enk. stuks	0,05	–
Waterstraal-	Plaat/buis/staf > 1mm	$\leq 0,08$ m/s	+ flexibel/geen WBZ + enk. st./series – lawaai	0,1	–
snijden					
Brandsnijden	Staal > 500mm, buis	$\leq 0,05$ m/s	+ flexibel + enk. st./series – lawaai/WBZ	> 0,5	> 2
Plasmasnijden	Geleidende mat. > 10mm	$\leq 0,2$ m/s	+ flexibel + enk. st./series – WBZ	0,5	> 1
Lasersnijden	Plaat/buis/prof. ≤ 5 mm	$\leq 0,2$ m/s	+ flexibel/kwaliteit + enk. st./series + kleine WBZ	0,2	> 0,1
Draadvonken	Harde geleidende mat.	$\leq 0,7 \text{ mm}^2/\text{s}$	+ flexibel + enk. st./series + kwaliteit	0,05	< 0,1

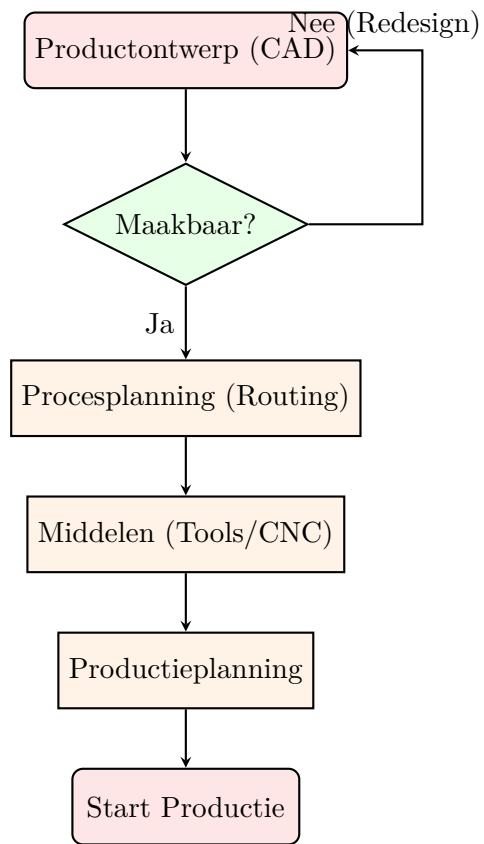
11 Oervormen (Gieten van metalen)

11.1 Inleiding

12 Automatiseren & machinekeuze

13 Productie werkvoorbereiding

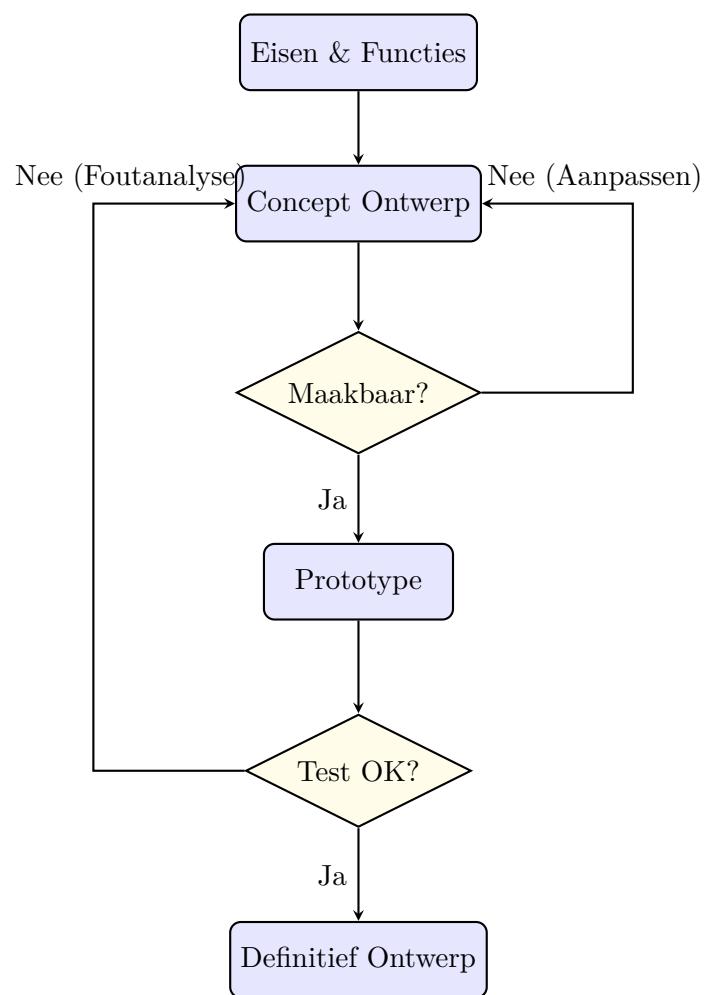
Werkvoorbereiding is de brug tussen ontwerp en productie. Het zorgt ervoor dat het juiste product, op het juiste moment, met de juiste kwaliteit en tegen de laagste kosten wordt gemaakt.



Figuur 13.1: Flowchart van het werkvoorbereidingsproces.

14 Productiegericht ontwerpen

Productiegericht ontwerpen (Design for Manufacturing) betekent dat je al in de ontwerp fase rekening houdt met de beperkingen en mogelijkheden van het productieproces.



Figuur 14.1: Iteratief ontwerpproces met terugkoppeling voor maakbaarheid (DFM).