

Productietechnologie — Samenvatting

Ruben Ryckaert

21 december 2025

Inhoudsopgave

1 Inleiding	4
1.0.1 Keuzes bij productie	5
1.1 Passing	5
1.2 Tolerantie	6
1.3 Oppervlaktekwaliteit	6
2 Materialen	7
2.0.1 Vervorming	8
3 Verspanen: Algemeen	8
3.1 bijtelbewerkingen	9
3.1.1 Secundaire afschuifvlak(shear zone)	10
3.2 Beweging, snelheden en voedingen, temperaturen, slijtage	11
3.2.1 Krachten	12
3.3 Factoren bij bijtelbewerking	13
3.4 Snijmaterialen	15
3.4.1 Classificatie van snijmaterialen	16
3.5 Optimale snijsnelheid	17
4 Verspanen: Draaien	18
4.1 Het Draaiproces	19
4.2 Krachten bij Draaien	19
4.3 Invloeden voeding f en snedediepte a op de kracht en snijsnelheid	22
4.4 Spaanvorming bij Draaien	23
4.5 Oppervlakteruwhed bij Draaien	24
4.6 De Draaioperatie	25
5 Verspanen: Boren, Fabricage en ronde gaten	26
5.1 Inleiding Boren	26
5.1.1 Boorgeometrie	27
5.2 Optredende krachten	27
5.2.1 gevolgen van onevenwichtige krachten	28
5.3 Keuze van voeding	29

5.3.1	Torsie bij Boren	29
5.4	Boormachines en booroperaties in de industrie.	31
5.4.1	NC-gestuurde boormachines	31
5.4.2	Boren	31
5.4.3	Kotteren	32
5.4.4	Draadtappen	32
5.4.5	Ruimen	33
6	Verspanen: Frezen	33
6.0.1	Soorten frezen	33
6.0.2	Geometrie van de frees	34
6.1	krachtwerking bij frezen	34
6.2	Richting van frezen	36
6.2.1	Wanneer kiezen: meelopend vs tegenlopend	37
6.3	Soorten frezen	38
6.4	De Freesmachine	38
7	Verspanen:Hybridetechnieken	38
7.1	Honen	38
7.1.1	Lange-slag Honen	39
7.1.2	Korte-slag Honen	39
7.2	Leppen	40
7.2.1	Met vloeistof	40
7.2.2	Finisheren met pasta	40
7.3	Geadvaseerde verspaningstechnieken en hybride technieken	40
7.3.1	hoge snelheid verspanen	40
7.3.2	Hardverspanen	41
7.4	Hybrideprocessen	41
7.4.1	Laserondersteuning bij verspanen	42
7.4.2	Draadvonken en slijpen	42
7.4.3	ECM (Electro Chemical Machining) en slijpen	42
7.4.4	Combinatie van ECM en frezen	42
8	Verspanen:Slijpen	43
8.0.1	Frezen met onbepaalde snijkanten	43
8.0.2	Eigenschappen van slijpen	44
8.0.3	Parameters slijpsteen	44

8.1	temperaturen bij slijpen	46
8.2	Slijptechnieken	47
8.3	De slijpmachine	47
8.3.1	Centerloos slijpen	47
8.3.2	Profiefslijpen	48
9	Fysische en Chemische afnemende bewerkingen	48
9.1	Vonkerosie	48
10	Scheiden	48
11	Automatiseren & machinekeuze	48
12	Productie werkvoorbereiding	48
13	Productiegericht ontwerpen	48

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

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

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.

- 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.

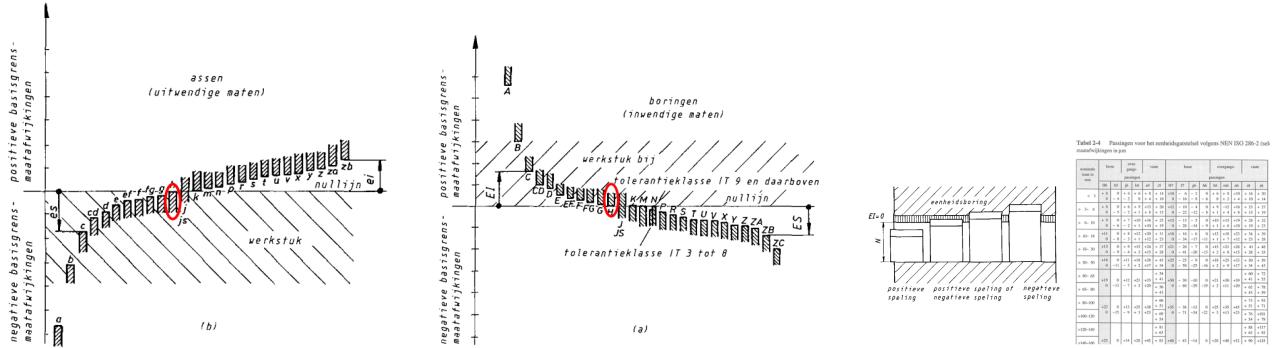
- Losse Passing: Er is nog speling tussen de twee oppervlakken.

- 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

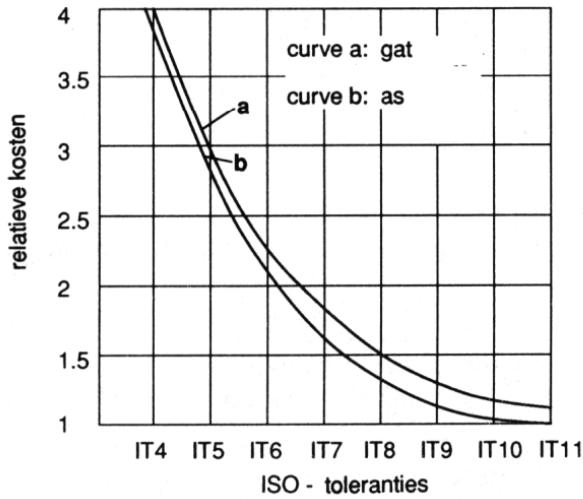
Toleranties worden geklassificeerd via diagrammen

- 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

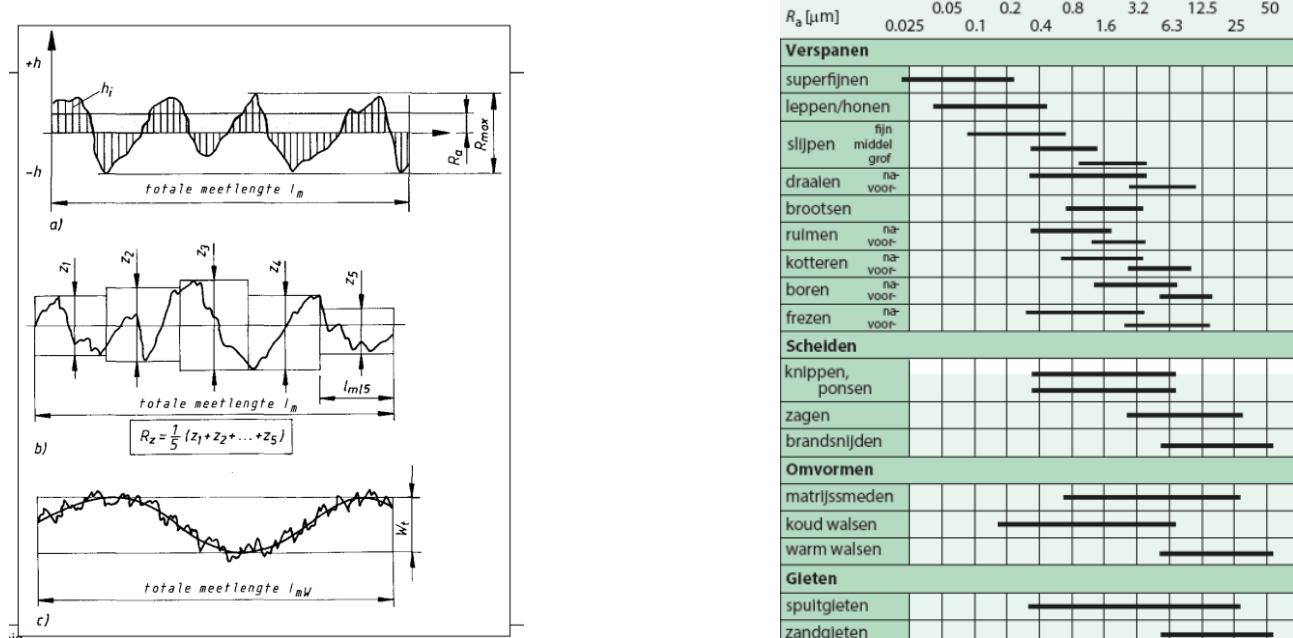
1.3 Oppervlaktekwaliteit

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



Figuur 1.4: Voorbeelden van oppervlaktekwaliteiten

verschillende productietechnieken hebben verschillende 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 thermische processen 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:

$$\text{Hooke's law: } \sigma = E \cdot \varepsilon$$

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

3 Verspanen: Algemeen

Dit hoofdstuk is de basis van verspannen 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)

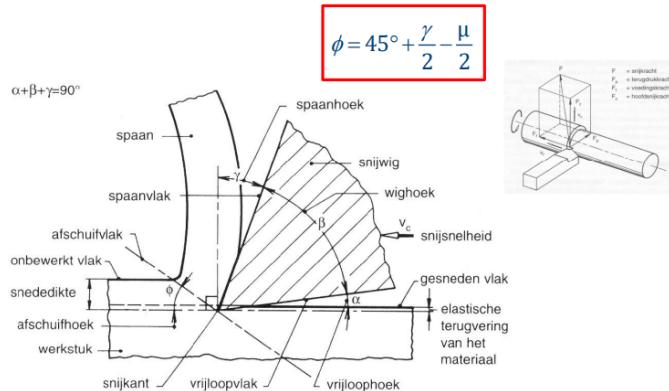
Bij verspannen kunnen verschillende tools gebruikt worden. Deze tools hebben verschillende snijvlakken en geometrieën die geschikt zijn voor verschillende materialen en bewerkingen.

- bijtel
- frees

- boor
- slijpschijf

3.1 bijtelbewerkingen

Bij bijtelbewerkingen wordt materiaal verwijderd door een scherpe bijtel over het werkstuk te bewegen.

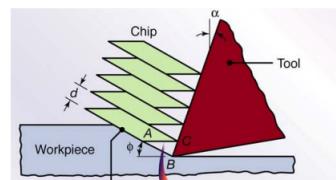


Figuur 3.1: Verwijdering van materiaal door een bijtel → creëert spanen

Bij het verspannen met een bijtel ontstaan er spanen. Spanen zijn kleine stukjes materiaal die worden verwijderd van het werkstuk. De grootte van de spanen wordt bepaald door de snedediepte, 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 oppervlaktefouten zoals ruwheid, hardheid, ...

- μ = wrijvingscoëfficient
- h = snededikte
- b = snedebreedte (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

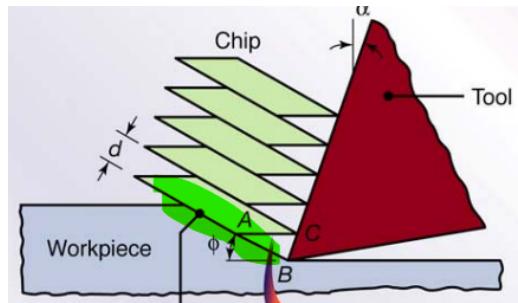
Afschuifhoek: $\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2}$

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.

Grottere spaanhoek γ → kleiner afschuifvlak → minder kracht nodig om spaan te vormen.

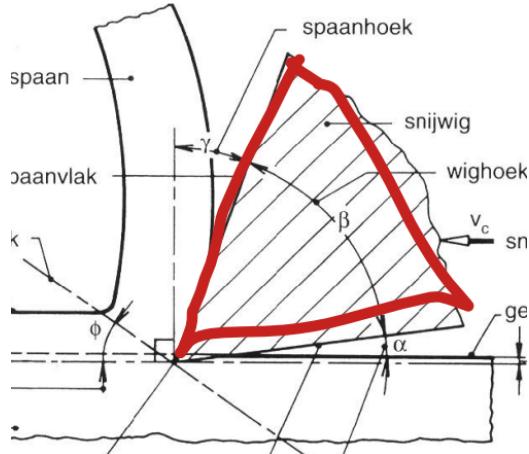
3.1.1 Secundaire afschuifvlak(shear zone)

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

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

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

Wighoek moet zo groot mogelijk zijn

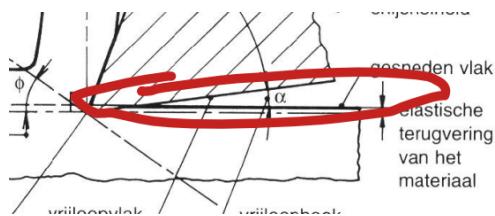


Figuur 3.4: Wighoek

- Vrijloophoek α → groter → minder wrijving tussen werkstuk en bijtel. Tussen 6° en 10°

Vrijloophoek moet er zijn zodat je bijtel niet begint te wrijven over het oppervlakte van

je materiaal. Zelfs rond 0° kan al zorgen voor veel wrijving.



Figuur 3.5: Vrijloophoek

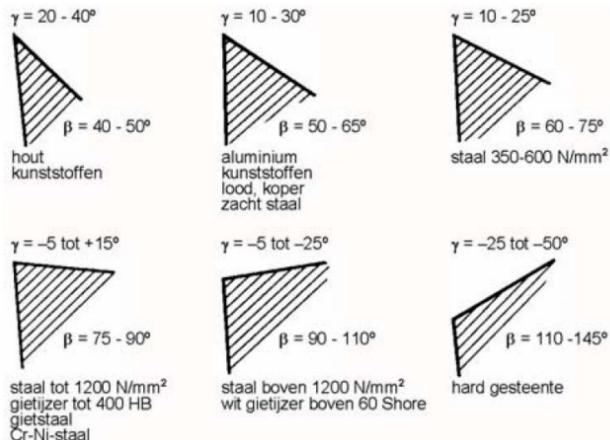
- Snedediepte → groter → meer kracht nodig
- Voeding → groter → meer kracht nodig

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.

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

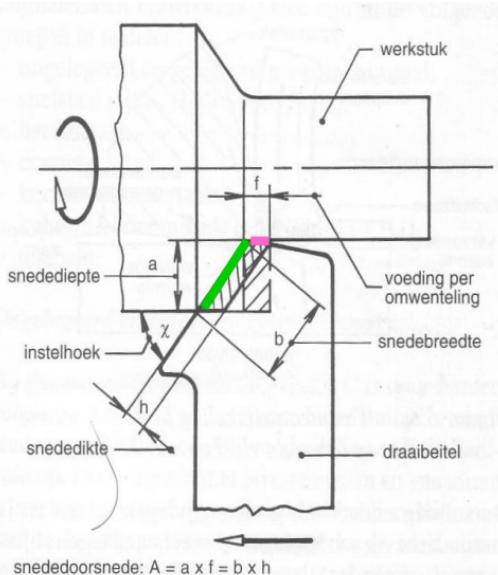
Er zijn verschillende factoren die de kracht op je werkstuk bepalen

- 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 bijtelbewerking

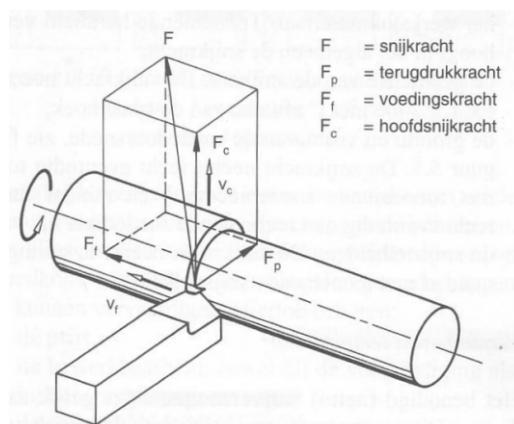
Snededoorsnede: $A_d = a \cdot b$

waarbij a de snededepte is en b de snedebreedte.

3.2.1 Krachten

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

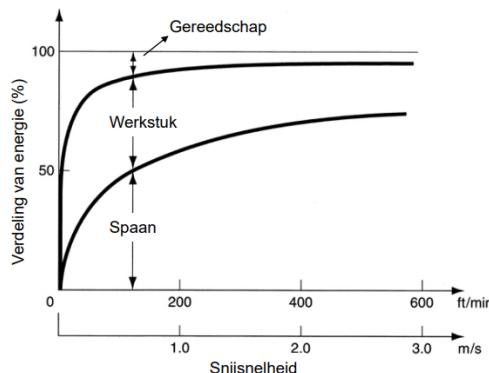
- Snijkracht (F_c): Kracht die nodig is om de spaan te vormen.
- Voedingskracht (F_f): Kracht die in de voedingsrichting werkt.
- Terugdrukkracht (F_p): Kracht die nodig is om de bijtel in het werkstuk te duwen.



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 bittelbewerking

• 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 bittel. 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.

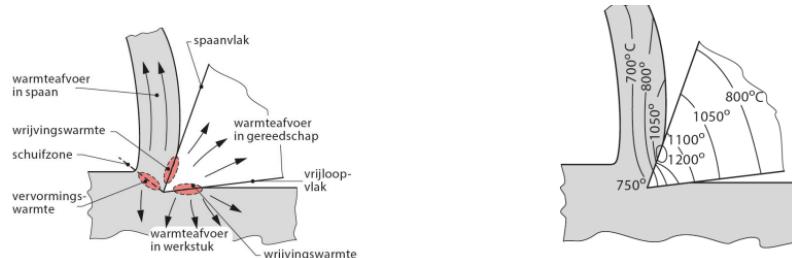
• Warmte

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 snijsnelheid 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 gecreeerd: 1. Afschuifvlak (shear zone): 2. Secundaire afschuifvlak (tussen spaan en bijtel): 3. Vrijloopvlak (tussen werkstuk en bijtel):



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

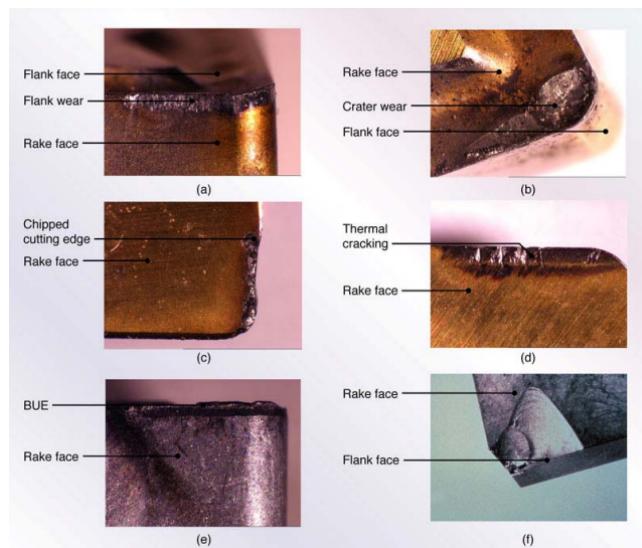
• Slijtage

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:

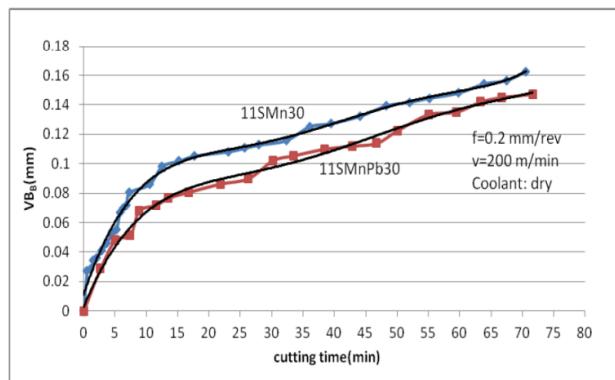
- Vrijloopslijtage: door wrijving tussen gereedschap en werkstuk.
- Thermische slijtage: door hoge temperaturen die het gereedschap verzwakken
- Kerfslijtage: door herhaalde spanningsconcentraties bij het vrijloopvlak.
- Breuk: Afbreken van een stuk
- Werkstukssljtgae: Vrijloopvlak slijtage verhoogd met verbruik van de bijtel.
- Neusslijtage: slijtage aan de punt van de bijtel door hoge krachten en temperaturen.

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 eigenschappen heeft -> minder wrijving.



Figuur 3.11

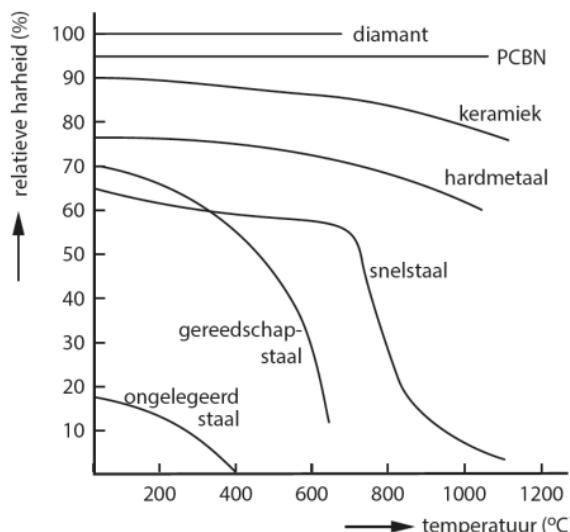


Figuur 3.12

3.4 Snijmaterialen

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

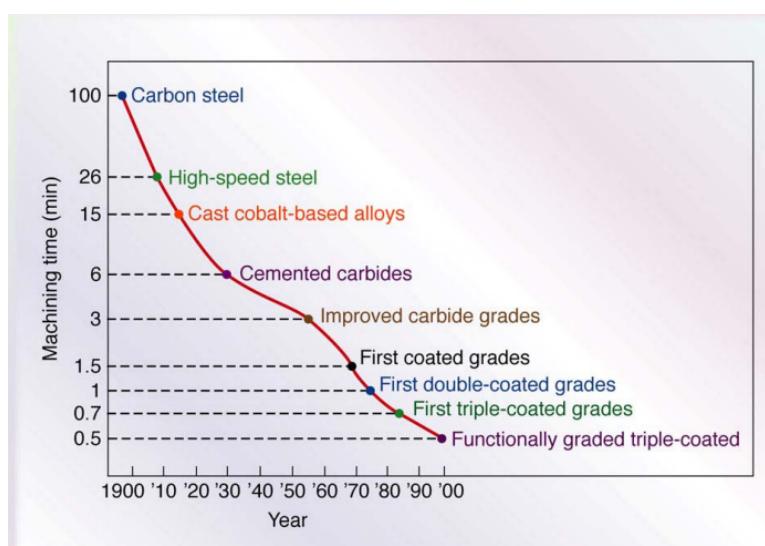
1. **Snelstaal (HSS)** (v_c 6–12 m/min). gehard staal; geschikt voor algemene toepassingen bij lage tot matige snijsnelheden. Goedkoop om te maken.
2. **Hardmetaal (wolframcarbide, WC + Co)** hittebestendig; geschikt voor hogere snijsnelheden en hardere materialen dan HSS.
3. **Gecoate hardmetaal (v_c 60–600 m/min)** Dunne coatings (bv. TiN, AlTiN) verbeteren slijtvastheid en hittebestendigheid; de bovenste laag moet slijtage weerstaan terwijl binnenste 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 snijsnelheden 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



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

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.



Figuur 3.14: Overzicht van snijmaterialen en hun toepassingsgebieden

Al deze snijmaterialen zijn gecreeerd 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!

- 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

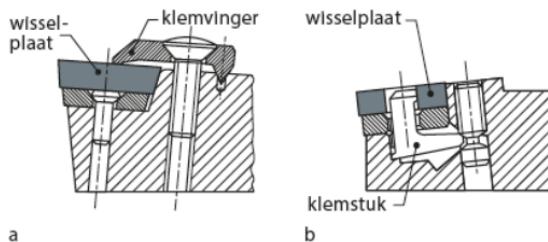
- klein getal → bros, hard, hittebestendig → finisseren, hoge snisnelheid
- Groot getal → taai → grote snijkrachten en dynamische belastingen

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 snisnelheid

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



Figuur 3.16: Klemming van Inserts in een houder

Bij grotere snisnelheden 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 gereedschapslevenstuur in minuten en v_c de snisnelheid in m/min.

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

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

Voorbeeld:

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

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

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

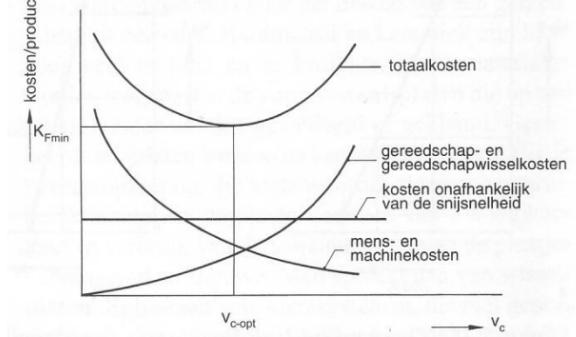
en dus

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

Dus als je de snijsnelheid met 50% verhoogt, wordt de gereedschaplevensduur 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 bijtel 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.

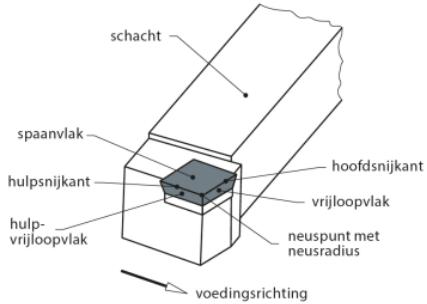
Profiel draaien: Een specifiek profiel van het werkstuk maken die dan gedraaid kan worden. Dit is specifiek en dus duur, maar als je veel van dit stuk moet maken kan dit het waard zijn.

In de industrie: Vandaag de dag wordt er veel gebruikgemaakt van computergestuurde machines. CNC-draaien is een geautomatiseerd proces waarbij computergestuurde machines

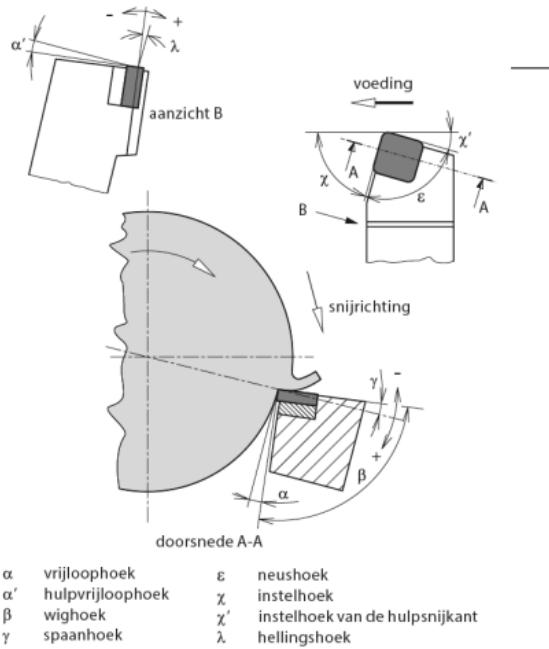
precies draaien volgens digitale ontwerpen. Veel conventionele machines en profieldraaien zijn vervangen door CNC-draaien.

4.1 Het Draaiproces

- Geometrie van de draaibeitel



Figuur 5.30 Snijkanten en delen van het draaigereedschap

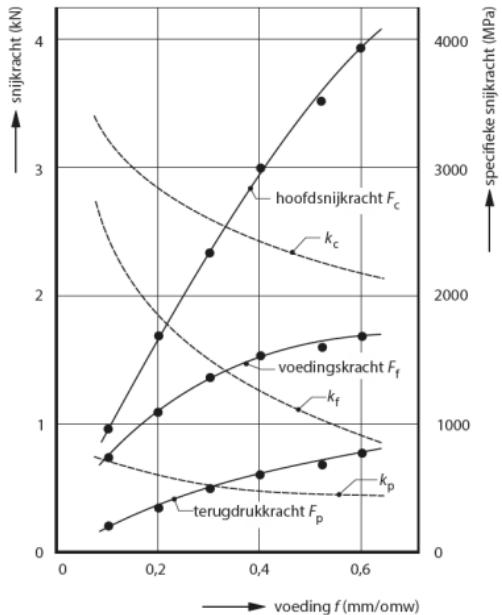


Figuur 4.1: Draaiproces

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 berekent met de formule van Kienzle:

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 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.

1. De Hoofdsnijkracht (F_c)
2. De Voedingskracht (F_f)
3. De Terugdrukkracht (F_p)

Afhankelijk van de voeding gaan die krachten anders verdeeld zijn. De figuur toont een steekproef van metingen van de krachten bij verschillende voedingen.

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]) = $\pi \frac{d \text{ [mm]}}{1000} n$ [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 $mm/rev \times rev/min = mm/min$.
- $Q = a f v_f$: materiaalafname (volume/tijd) is snedediepte \times voeding per omwenteling \times voedsnelheid; zorgt voor mm^3/min bij consequente eenheden.
- $M_c = F_c(d/2)$: koppel is kracht maal arm (halve diameter als hefboom) $\rightarrow N \cdot m$.

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

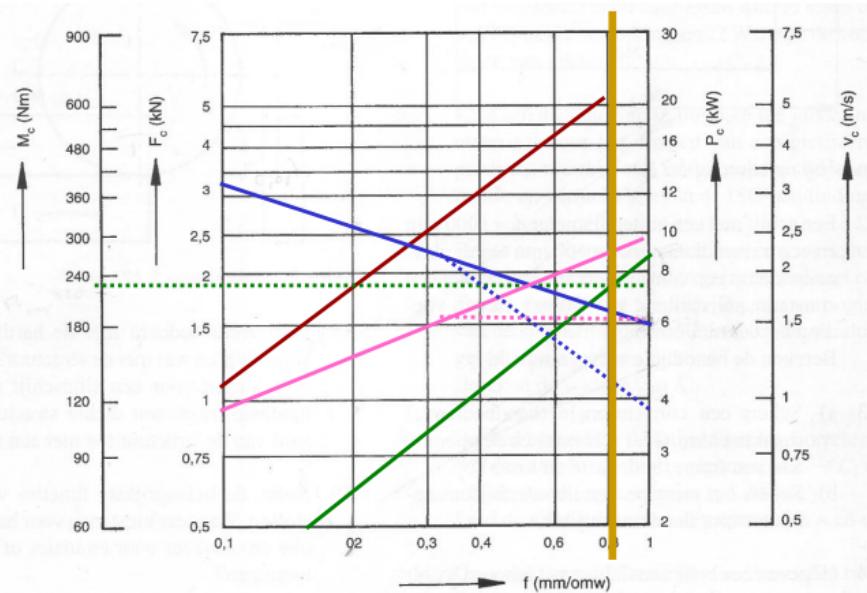
Zie dat alle formules in verband staan met de voeding.

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

$$M_c = F_c d/2$$

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

$$P_c = F_c \times v_c$$



Figuur 4.3: Bepaling krachten, voeding of moment op werkstuk

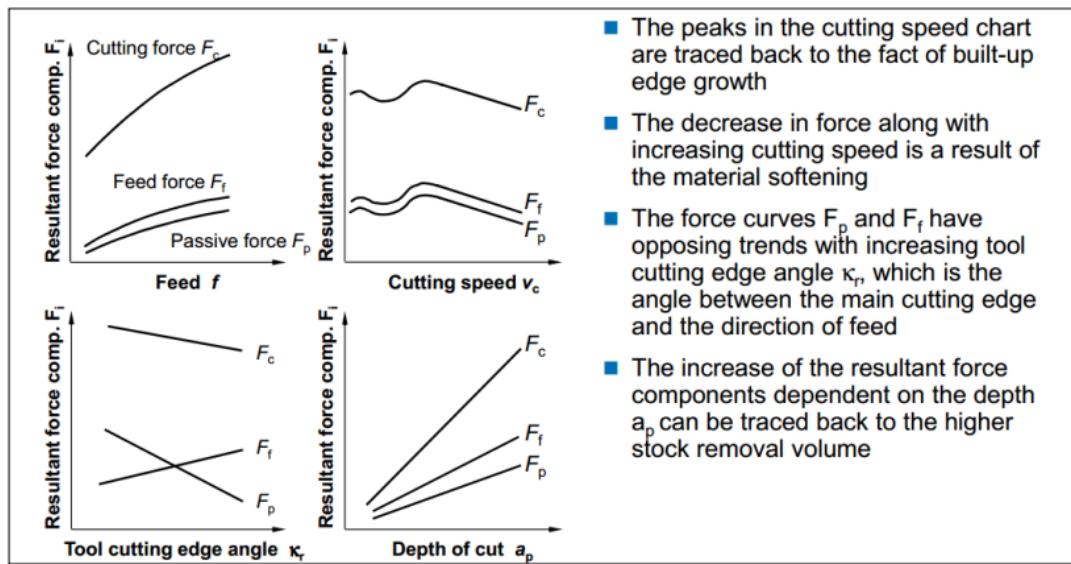
Zo zie je hoe instelparameters zoals voeding, snijsnelheid en snedediepte in de industrie, bepaald worden.

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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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 snedebreedte en h de snededikte).
- **Hellingshoek λ :** Een grotere hellingshoek kan de effectieve snedebreedte 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.

$$\text{Spaanslankheid bij Draaien: } \frac{b}{h} = \frac{a}{f \cdot \sin \kappa_r}$$

waarbij b de snedebreedte is, h de snededikte, a de snedediepte, f de voeding en κ_r de instelhoek.

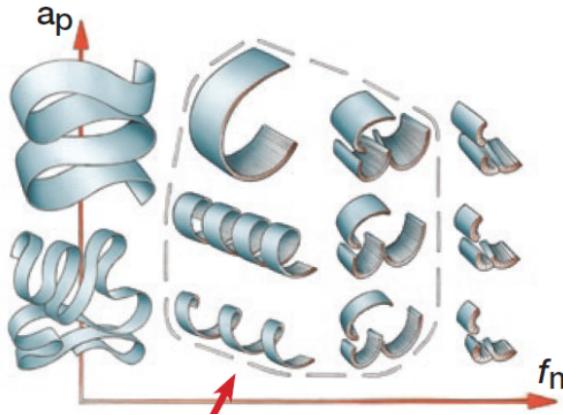
$$h = f \cdot \sin \kappa_r$$

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.

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

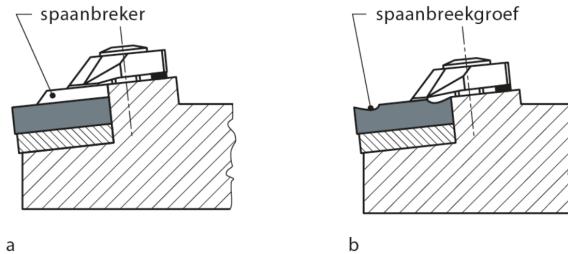
De snedebreedte b bij draaien wordt bepaald door de snedediepte a en de instelhoek κ_r . Een grotere snedediepte of een grotere instelhoek resulteert in een bredere spaan, wat de spaanvorming beïnvloedt.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ribbon chips	tangled chips	corkscrew chips	helical chips	long tubular chips	short tubular chips	spiral tubular chips	spiral chips	long comma chips	short comma chips
unfavourable				good			acceptable		



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

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



Figuur 4.6: Spaanbrekers in bijtels

4.5 Oppervlakteruwhheid bij Draaien

De oppervlakteruwhheid wordt gecreerd door de bijtel. De bijtel 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.

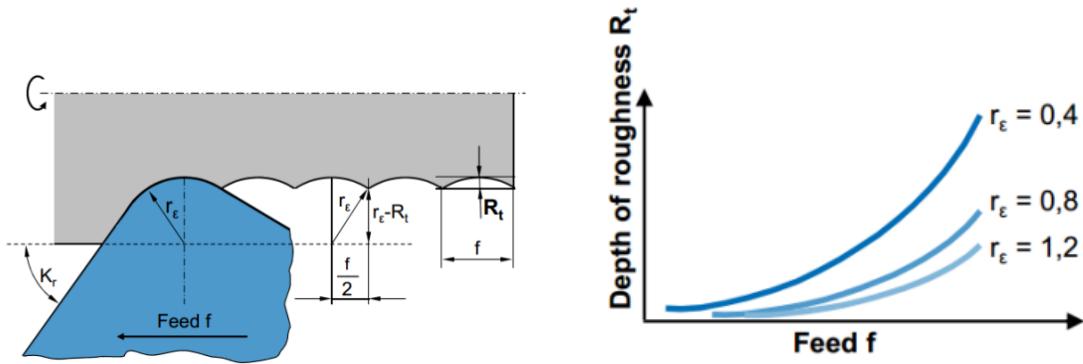
- R_t is de totale hoogte van de ruwheid
- R_a is de gemiddelde hoogte van de ruwheid

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



Figuur 4.7

Totale ruwheid

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

$$\text{gemiddelde ruwheid bij Draaien: } R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r_\epsilon}$$

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

$$\text{totale ruwheid bij Draaien: } R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon}$$

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

Afleiding (oppervlakteruwheid). Stel dat de neus van de bijtel 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 $R_a \approx \frac{f^2}{32 r_\epsilon}$.

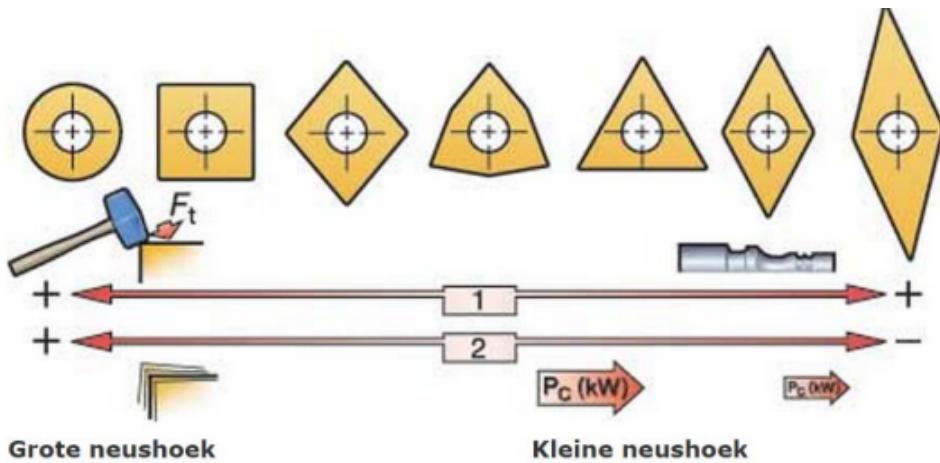
Eenheden en geldigheid: als f en r_ϵ in mm zijn, dan zijn R_t en R_a ook in mm. De benaderingen zijn geldig wanneer $f \ll r_\epsilon$.

4.6 De Draaioperatie

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

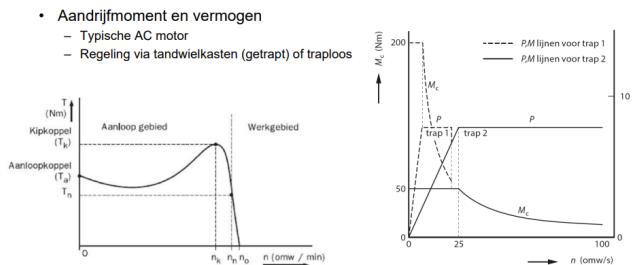
De componenten worden in een draaimachine gestoken die deze beitels kan bewegen langs verschillende assen en het werkstuk kan laten roteren. Ze kunnen bewegen door AC (asynchrone) motoren of servomotoren die de bewegingen zeer precies kunnen uitvoeren. De snelheid van de motoren wordt gecontroleerd door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

Motoren gaan vooral werken rond de stijle curve. Dit is interessant omdat je met verschillende



- Sterkere snijkant
- Hogere voedingen
- Verhoogde snijkrachten
- Verhoogde trilling
- Zwakkere snijkant
- Verhoogde toegankelijkheid
- Verlaagde snijkrachten
- Verlaagde trilling

Figuur 4.8



Figuur 4.9: Tandwielkast voor draaimachine

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.

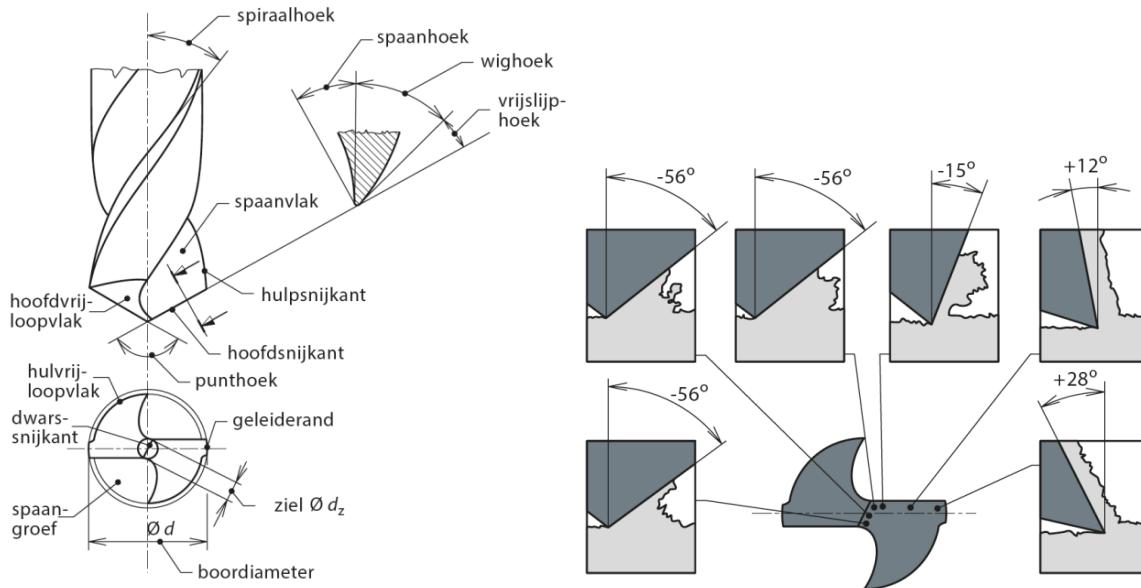
Belangrijke booroperaties zijn:

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

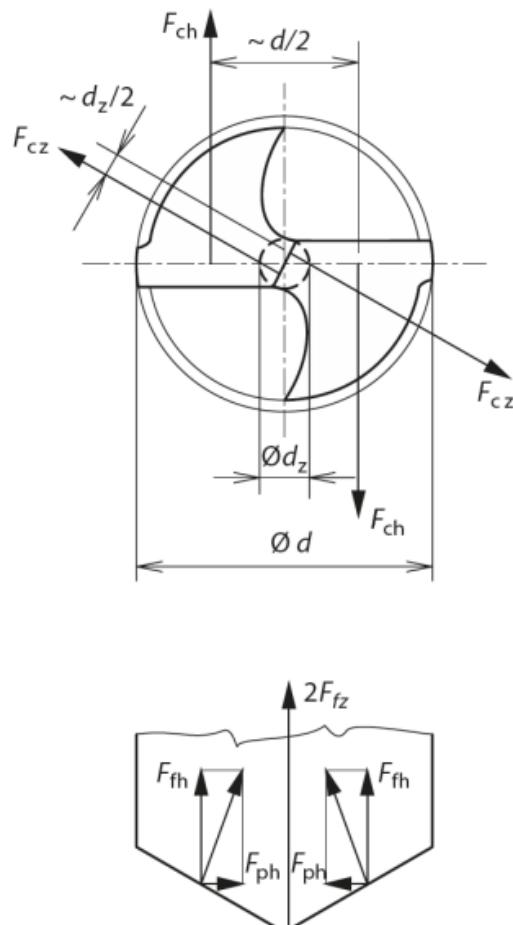
- **Hoofdsnijvlak:** het primaire snijvlak dat het materiaal losmaakt; draagt de meeste snijkracht en beïnvloedt oppervlaktekwaliteit en snijvermogen.
- **Hulpsnijvlak:** een secundair snijvlak nabij de punt dat afwerking en stabiliteit verbetert; draagt bij aan de lokale lastverdeling.
- **Spaanvlak:** het vlak waarlangs de spaan stroomt; bepaalt spaanvorming, spaanaafvoer 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

Boren hebben een grote voedingskracht en een relatief klein snijmoment. De axiale voeding is



Figuur 5.2: Krachten op een boor

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 voedingskrachtcoefficiënt 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. Het verspanningsmoment is en ω de hoeksnelheid.

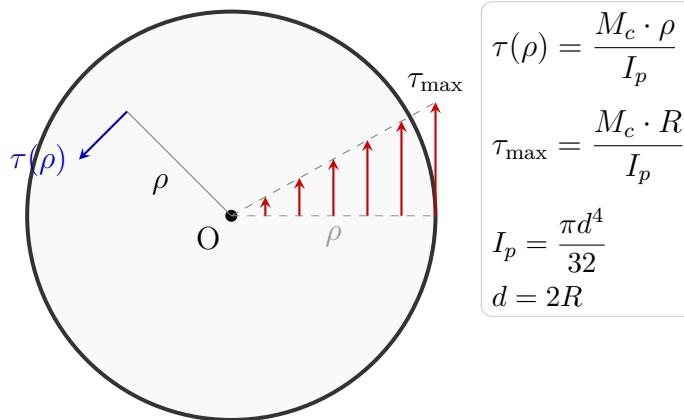
5.3 Keuze van voeding

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):

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

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

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

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

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

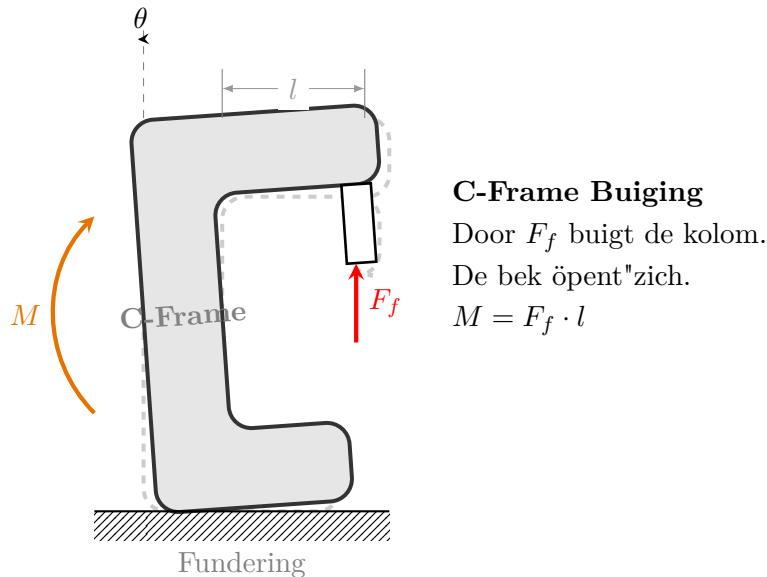
Maximale voeding bij boren: $f_{\max} = C \cdot d$

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 voedingskrachtcoëfficiënt is, d de diameter, f de voeding en X_f en y_f de voedingskrachtsexponenten.

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

**C-Frame Buiging**Door F_f buigt de kolom.

De bek öpert "zich".

$$M = F_f \cdot l$$

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

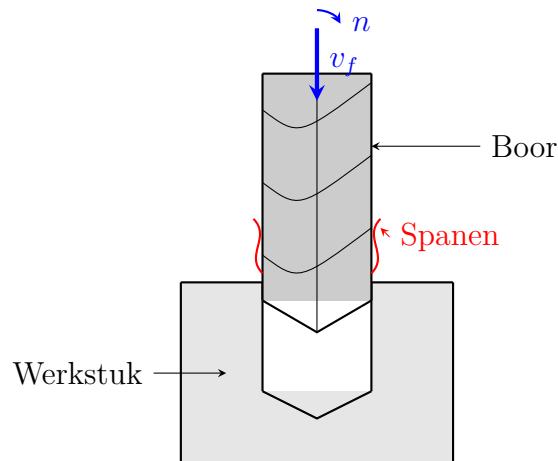
NC-gestuurde boormachines (Numerical Control) zijn computergestuurde machines die worden gebruikt voor het boren van gaten in materialen met hoge precisie en herhaalbaarheid. Deze machines maken gebruik van vooraf geprogrammeerde instructies om de bewegingen van de boor en het werkstuk te regelen.

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:** snijsneldheid 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 spiraal-type 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

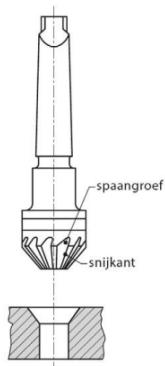
start.



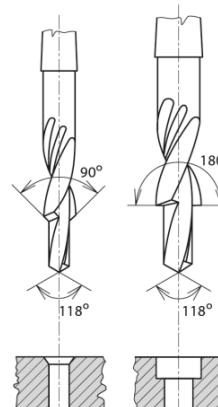
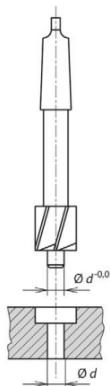
Figuur 5.5: Schematische weergave van een boorprocess: een spiraalboor dringt het materiaal binnen, vormt een gat en voert spanen af.

Type boren

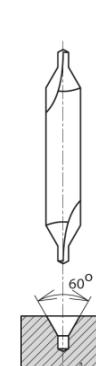
- **Verzinkingsboor:** Wordt gebruikt om een conische uitsparing te maken aan het begin van een gat, zodat schroefkoppen gelijk met het oppervlak kunnen liggen.
- **Centerboor:** Wordt gebruikt om een startpunt te creëren.
- **Steekboor:** Wordt gebruikt voor het boren van algemene gaten.
 - Bijzondere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



Figuur 5.6 Verzinkboren



Figuur 5.7 Getrapte boren



Figuur 5.8 Centerboor

Figuur 5.6: Verschillende soorten boren

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 verspannen.

5.4.4 Draadtappen

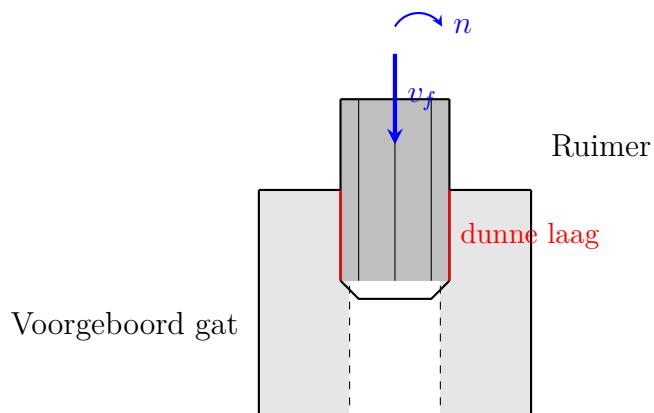
Draadtappen is het snijden van interne schroefdraad in een voorgeboord gat.

Schroefdraad	Pitch (mm)	Aanbevolen 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**.

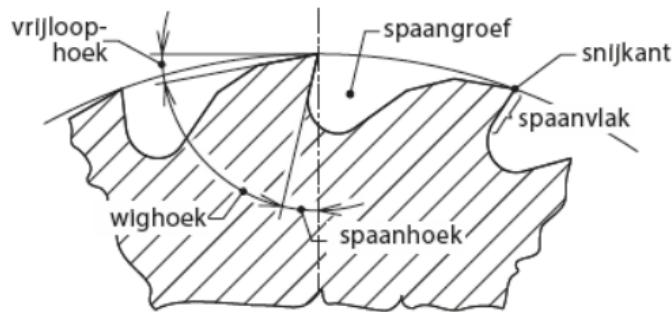
Als je met de punt van de frees gaat frezen noem je dit **kopfrezen**.

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

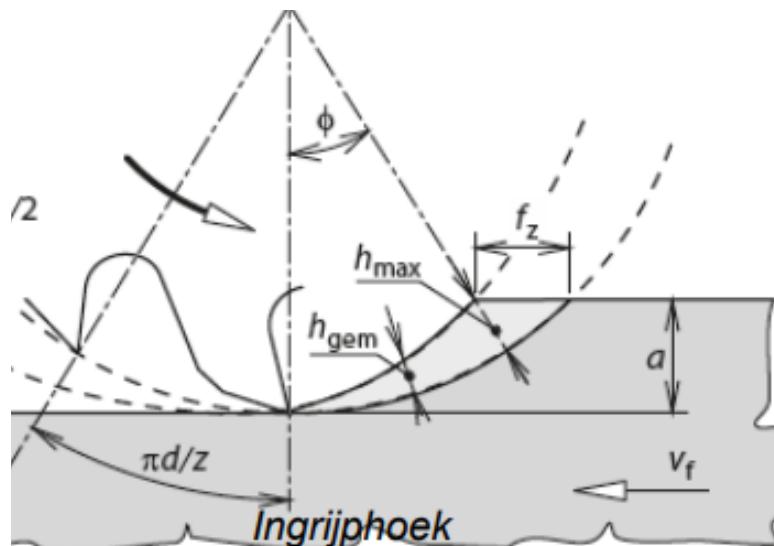
Deze hebben dezelfde eigenschappen als bij boren en draaien. Je kunt meer info vinden bij Algemeen verspannen 3.



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 rond draait. 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.

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

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.

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

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

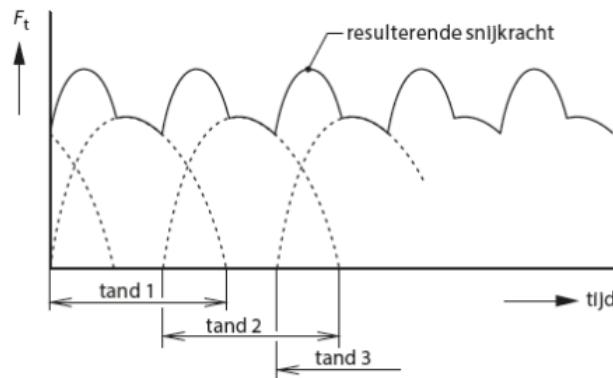
$$\text{Snijmoment bij Frezen: } M_c = C_m \cdot d^{x_M} \cdot f_z^{y_M} \cdot z_i$$

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

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

waarbij k_f de voedingskrachtkoefficiënt is, b de snede breedte, 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 tant per draaing is parabolisch en als je de invloed van alle tanden samentelt krijg je een heuvelachtige krachtcurve.



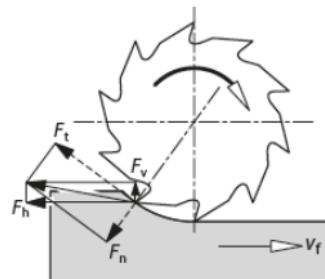
Figuur 6.3: Krachtcurve bij frezen

6.2 Richting van frezen

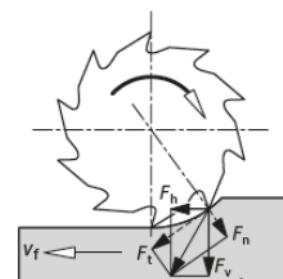
Er zijn twee richtingen van frezen:

- **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 frezen	Meelopend frezen
Aandrijving / voeding	F_h drukt werkstuk weg van frees.	F_h trekt werkstuk naar frees toe.
Spelingscompensatie	Geen compensatie nodig; veiliger bij backlash.	Spelingcompensatie onmisbaar (gevoelig voor backlash).
Spaanvorming	Dun → dik (chip groeit tijdens snede).	Dik → dun (chip neemt af richting einde).
Snijkracht	Stijgt geleidelijk tijdens ingreep.	Stijgt sneller; hogere piekbelasting bij ingang.
Snijgedrag	Eerst wrijving, later snijden (meer smearing).	Meteen snijden (scherpere insnijding).
Oppervlaktekwaliteit	Meestal matig.	Meestal beter (glad).
Opspanning / stabiliteit	Neiging tot beurtelende krachten → klapperen / chatter.	Werkstuk wordt 'in klem' getrokken; minder klapperen maar vereist stevige klemmen.
Nauwkeurigheid	Kan leiden tot teveel materiaal verwijderd / minder voorspelbaar.	Neiging tot kleinere snij-inhouden (kan preciezer zijn bij goede controle).

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 → 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 → 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

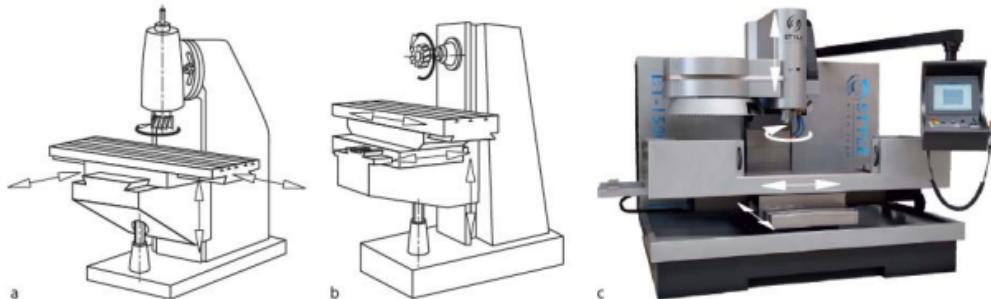
- **Oppervlaktekwaliteit:** Meelopend geeft doorgaans een gladdere afwerking; tegenlopend geeft meer wrijving bij instap en vaak een ruwere afwerking.
- **Snedediepte/productiviteit:** In een stijve opstelling maakt meelopend vaak hogere snededieptes en hogere voedingen mogelijk zonder kwaliteitsverlies; 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 maken.
- **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: Hybridtechnieken

7.1 Honen

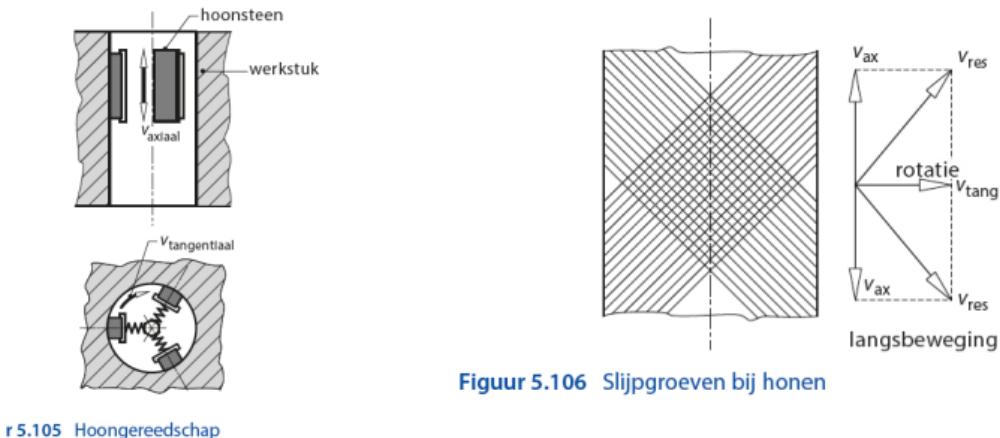
Honen is een slijpoperatie met twee componenten en een heen een weergaande bewegingen.

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 slijpopervlakte te verkrijgen. Honen helpt met het oppervalktekwaliteit tot en met (IT3)

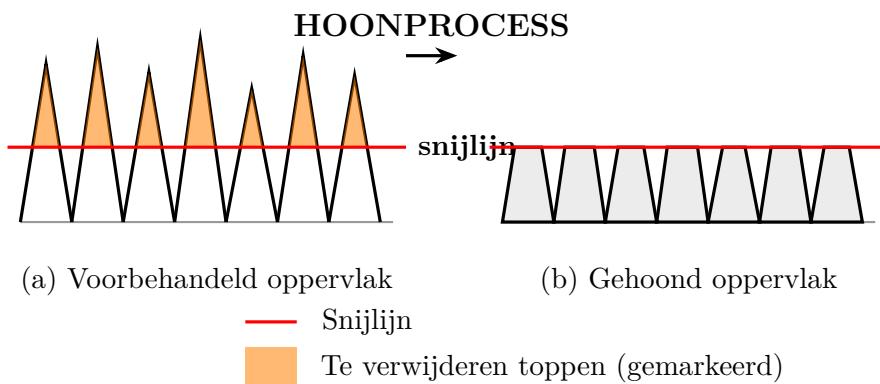
7.1.1 Lange-slag Honen



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.

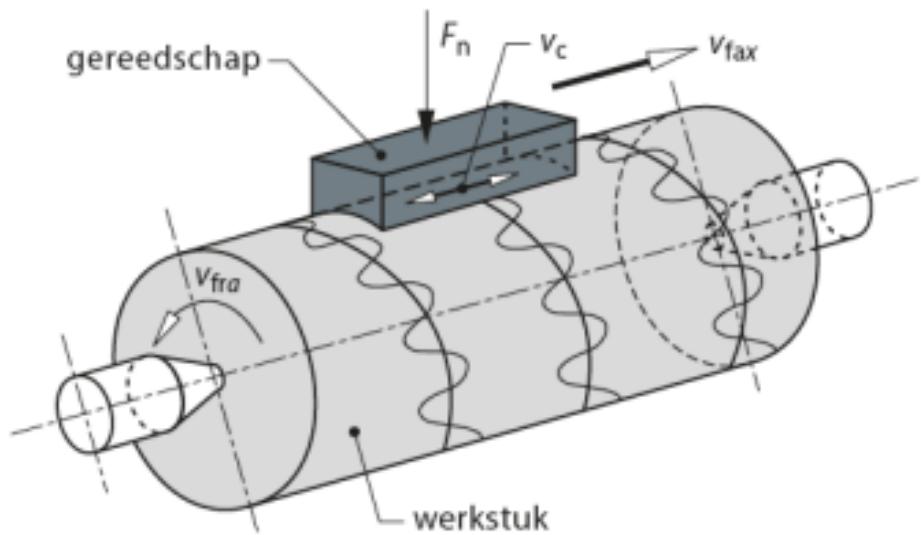
Bij het honen ga je de toppen van de oppervlakteruwheid verwijderen. Dit is anders bij het slijpen omdat die ook een licht oneven oppervlakte kan achterlaten.



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

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 7.3: Kortslag honen van een werkstuk

7.2 Leppen

Bij het leppen heb je enorm fijne korrels die in een paste, olie of gelei 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 process beter te begrijpen

7.2.2 Finisheren met pasta

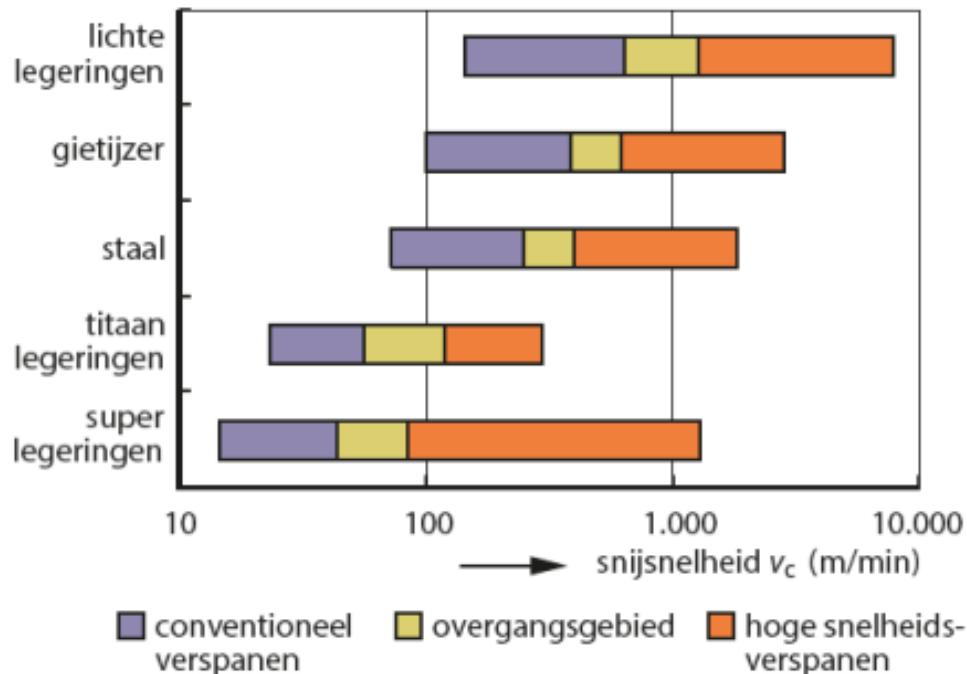
Je drukt het werkstuk samen en pompt dan de geleï in het werkstuk om het oppervlakte te verbeteren.

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 conventioneel verspanen.

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



Figuur 7.4: Hoge snelheid verspanen in vergelijking met conventioneel verspanen

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 stevigeren 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 bittels en stevige machines die de hevige drukken aankan zorgt ervoor dat hardverspannen niet eeuwig duurt.

7.4 Hybrideprocessen

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

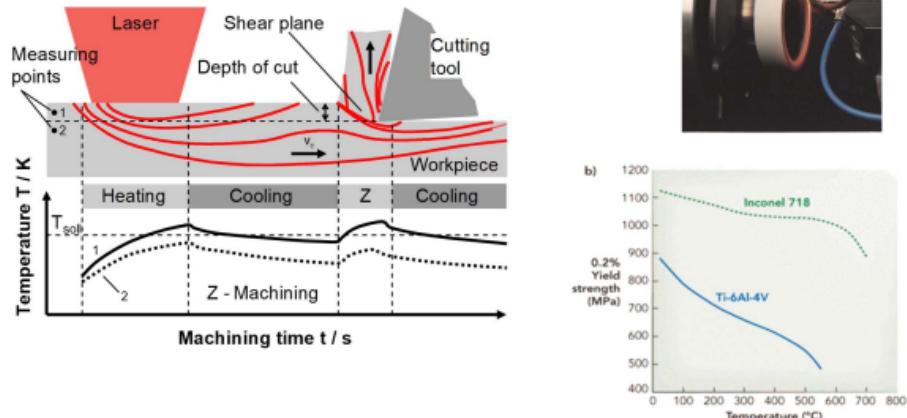
Dit zijn vooral experimentele technieken die nog in ontwikkeling zijn.

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.

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

7.4.2 Draadvonken en slijpen

(je ziet meer over draadvonken in een ander hoofdstuk) Het vonkprocess is een termische process. 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 oxidelaag. 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 process kunt oplossen met een ander process)

8 Verspanen:Slijpen

Slijpen is een verspaningstechniek waarbij een roterend schijfiformig 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.

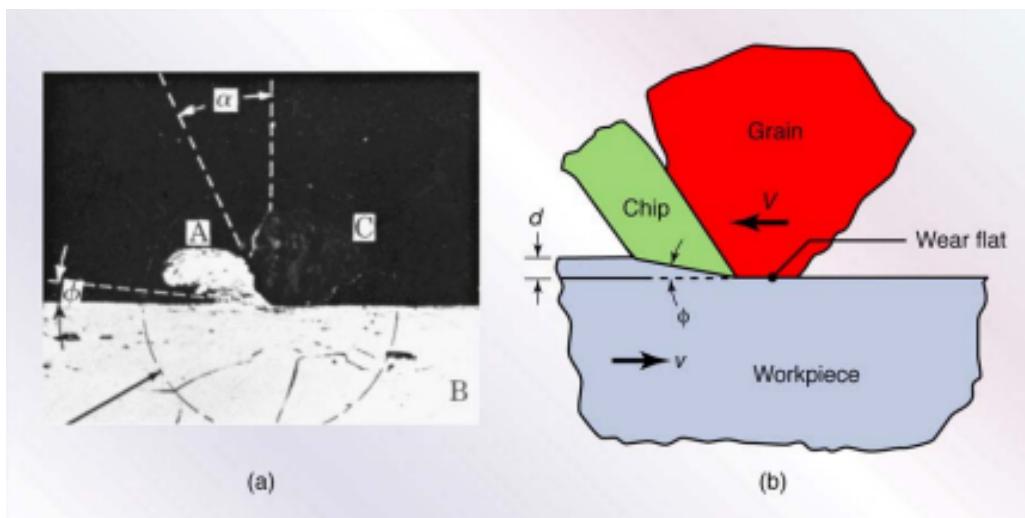
Gebonden snijkorrels: korrels die vastzitten in een matrixmateriaal. Voorbeelden:

- **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 verspannen. De krachtwerking is dus veel hoger. Maar je **Snedediepte** is veel kleiner dus die combineren elkaar.

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



Figuur 8.1: Spaanvorming bij slijpen

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 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.

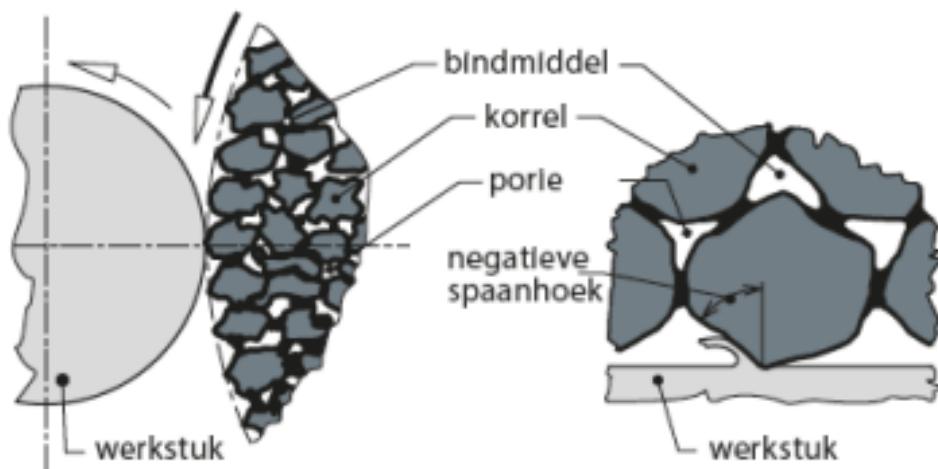
8.0.3 Parameters slijpsteen

- **Korrelgrootte**: Grote 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 slijpstenen zijn duurzamer maar kunnen ook sneller de korrels verliezen.
- Structuur

Korrelmateriaal

Natuurlijke korrels zijn kwarts, korundum en diamant.

Kunstmatige korrels zijn siliciumcarbide en aluminiumoxide.



Figuur 8.2: Doorsnede van een slijpschijf

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

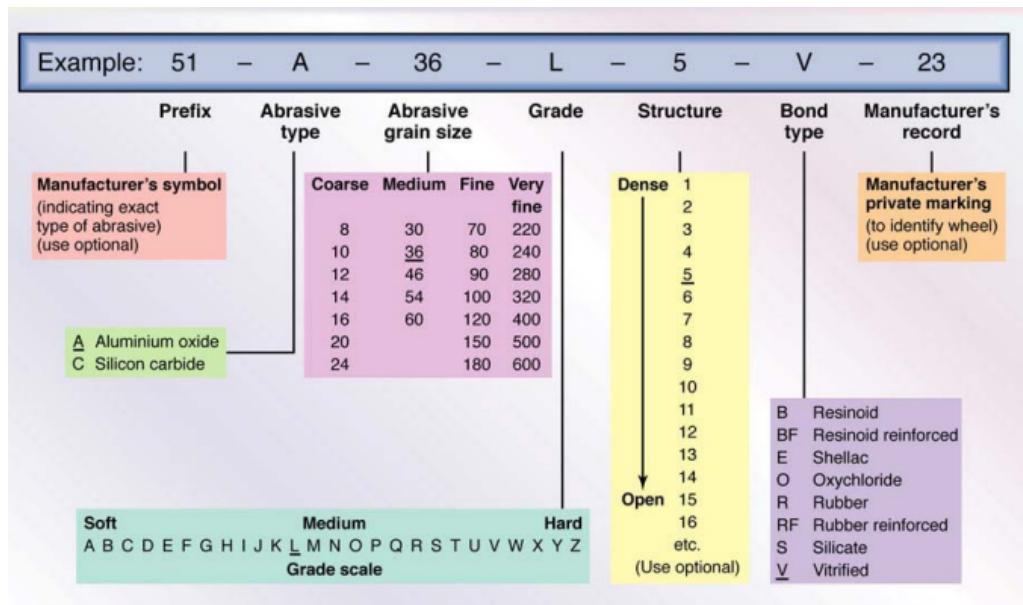
Structuur

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



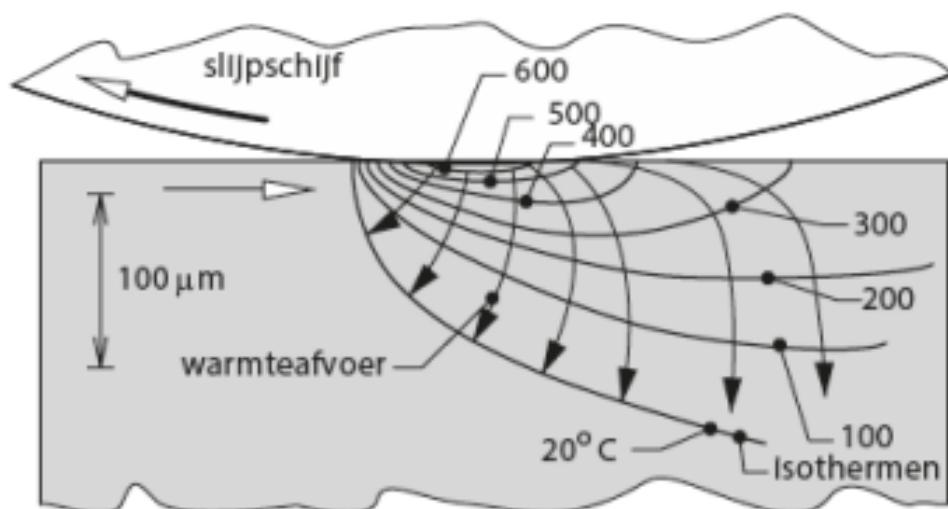
Figuur 8.3

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

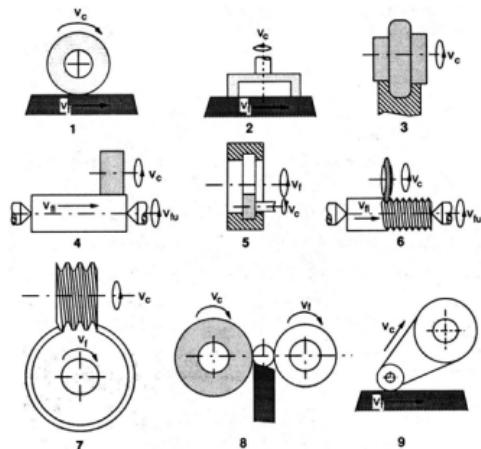
Je moet dus voldoende koelen of nog een laatste warmtebehandeling doen na het slijpen.



Figuur 8.4: Warmte bij Slijpen

8.2 Slijptechnieken

1. Omtrek-vlakslijpen
2. Kops-vlakslijpen
3. Profielslijpen
4. Uitwendig langs-slijpen
5. Inwendig insteek-rondslijpen
6. Schroefdraadlijpen met schijf met enkelvoudig profiel
7. Afwikkelingslijpen met slijpworm
8. Centerloos slijpen
9. Bandslijpen



Figuur 8.5: Alle soorten slijptechnieken

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

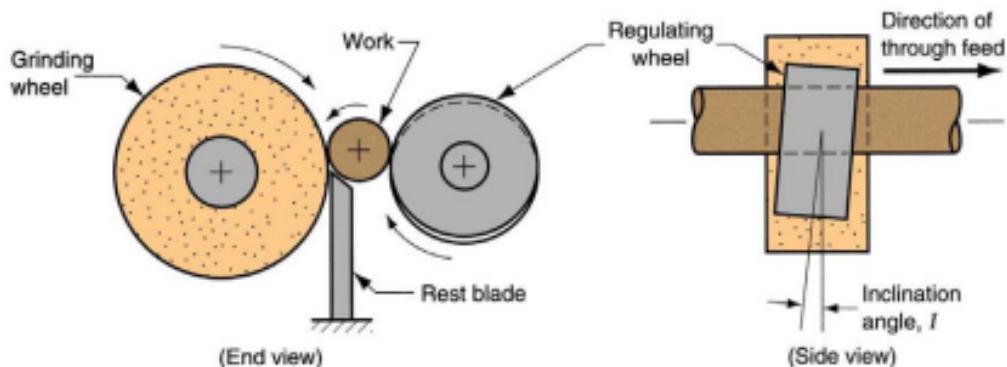
Tip, is hij niet veel op ingegaan.

8.3 De slijpmachine

Slijpmachines zijn enorm stijve machines omdat je enorm je snediediepte enorm klein is kan kleiner 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.



Figuur 8.6: Centerloos slijpen

8.3.2 Profielslijpen

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

9 Fysische en Chemische afnemende bewerkingen

9.1 Vonkerosie

10 Scheiden

11 Automatiseren & machinekeuze

12 Productie werkvoorbereiding

13 Productiegericht ontwerpen

Formularium

Hooke's law $\sigma = E \cdot \varepsilon$ — waarbij σ de spanning is, E de elasticiteitsmodulus en ε de rek. (p. 8)

Afschuifhoek $\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2}$ — waarbij γ de spaanhoek is en μ de wrijvingshoek tussen spaan en snijvlak. (p. 9)

afschuifvlak (shear zone) A $A = \frac{b * h}{\sin(\phi)}$ — waarbij b de breedte, h de hoogte en ϕ de afschuifhoek. (p. 10)

afschuifkracht $F = A * \tau$ — waarbij A het afschuifvlak is en τ de schuifspanning van het materiaal. (p. 10)

Snijsnelheid $v = \pi \cdot d \cdot n$ — waarbij d de diameter is en n het toerental in omwentelingen per minuut. (p. 12)

Snededoorsnede $A_d = a \cdot b$ — waarbij a de snedodiepte is en b de snedebreedte. (p. 12)

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. 17)

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. 20)

b: snedebreedte bij draaien $b = \frac{a}{\sin x}$ — met a de snedodiepte en x de instelhoek (zie figuur). (p. 20)

h: snededikte bij draaien $h = f \cdot \sin x$ — met f de voeding en x de instelhoek (zie figuur). (p. 20)

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. 20)

Spaanslankheid bij Draaien $\frac{b}{h} = \frac{a}{f \cdot \sin \kappa_r}$ — waarbij b de snedebreedte is, h de snededikte, a de snedodiepte, f de voeding en κ_r de instelhoek. (p. 23)

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 bijtel. (p. 25)

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 bijtel. (p. 25)

Voedingskracht $F_f = k_f \cdot a \cdot f^{(1-e)}$ — waarbij k_f de voedingskrachtcoëfficiënt is, a de snedodiepte, f de voeding en e de voedingskrachtexponent. (p. 28)

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. 29)

Vermogen bij boren $P_c = M_c \omega = M_c \cdot 2\pi n$ — waarbij M_c het verspanningsmoment is en ω de hoeksnelheid. het verspanningsmoment is en ω de hoeksnelheid. (p. 29)

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. 29)

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. 29)

Maximale verspanningsmoment $M_c = a \cdot M_b$ — waarbij M_c het verspanningsmoment is en M_b het maximale verspanningsmoment. (p. 29)

Maximale voeding bij boren $f_{max} = C \cdot d$ — waarbij C een constante is, d de diameter en f_{max} de maximale voeding. (p. 30)

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. 30)

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. 35)

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. 35)

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. 35)