

von kerosie

vm 120

VWM

FME  CWM

vonkerosie

vm 120



een uitgave van de

Vereniging FME-CWM

vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

Telefoon: (079) 353 11 00

Telefax: (079) 353 13 65

E-mail: alg@fme.nl

Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME/december 2007

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technologie en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: pbo@fme.nl
internet: <http://www.fme.nl>

ISBN 90-71306-xx-x

vonkerosie

toelichting:

Deze publicatie is samengesteld door de werkgroep "Vonkerosie" van de vereniging FME-CWM en geeft gerichte theoretische en praktische informatie ten behoeve van respectievelijk de gebruikers van vonkerosiemachines, geïnteresseerden in vonkerosietechnieken, alsmede voor technische cursussen en opleidingen. Er bestaat een intensieve samenwerking met de "Contactgroep Fysisch Chemisch Bewerken (CFC)" van de Vereniging voor Produktietechniek - VPT.

De inhoud van deze publicatie behandelt met name alle aspecten welke voor het vonkeroderen van belang zijn. Deze publicatie vervangt de voorlichtingspublicaties VM 76 "Zinkvonkerosie", VM 77 "Draadvonkerosie" en VM 79 "Numeriek bestuurd zinkvonken".

samenstelling werkgroep:

ing. J.L.C. Wijers (voorzitter)	(v/h Ned. Philips Bedrijven, Research, Eindhoven)
ir. P. Boers	Vereniging FME-CWM, Zoetermeer
ing. N.M.J.P. Kooijmans	TNO Industrie, Eindhoven
prof.dr.ir. B. Lauwers	Katholieke Universiteit Leuven, Leuven
F. van der Pol	SMS STT B.V., Tilburg
C.A. de Ruyter	Nekofa B.V., Vianen
ing. C. Rijnveld	SGM B.V., Woerden
F.M.G. van Tuijl	(v/h Tyco Electronics B.V., 's-Hertogenbosch)
P. Wolf	Eldim B.V., Lomm

informatie over en bestelling van VM-publicaties:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 13 41
- telefax	079 - 353 13 65
- e-mail	pbo@fme.nl
- internet	http://www.fme.nl

Inhoudsopgave

1 Vonkerosie - algemeen	5	3 Draadvonken	61
1.1 Ontwikkeling van vonkerosie in verleden, heden en toekomst	5	3.1 Inleiding	61
1.2 Materiaalverwijdering bij vonkerosie: principe	8	3.2 De machine	61
1.3 Werkstukmaterialen	11	3.2.1 Assen en bewegingsnomenclatuur	62
1.4 Uitvoeringsvormen	12	3.2.2 Vlaknomenclatuur	62
1.5 Procesgrootheden	14	3.2.3 Bewerkingsgrootheden	63
1.5.1 Vonkspleetgrootheden	14	3.2.4 Mechanisch deel	63
1.5.2 Bewerkingsgrootheden	15	3.2.5 Diëlektricum systeem	64
1.5.3 Grootheden gerelateerd naar oppervlaktekwaliteit	16	3.2.6 De generator	64
1.6 De vonkerosiemachine	17	3.2.7 CNC besturing/programmeringsaspecten	64
1.6.1 De generator	18	3.3 Draadelektroden	64
1.6.2 Het servosysteem	19	3.4 Diëlektricum	67
1.6.3 Het diëlektricumstelsel	21	3.5 Technologie en strategie	67
1.6.4 De numerieke besturing	22	3.6 Onisch snijden	69
1.6.5 Beveiligingen	25	3.7 Microdraadvonken	70
1.7 Technologie - procesinstelling	25	3.8 Draadvonken van hardmetaal en exoten	70
2 Zinkvonken	26	3.9 Werkvoorbereiding en set-up	71
2.1 Inleiding	26	3.9.1 Ontwerpen	71
2.2 De zinkvonkmachine	27	3.9.2 Programmeren	73
2.2.1 De mechanische opbouw	27	3.9.3 Bewerkingsvolgorde	73
2.2.2 De generator	28	3.9.4 Aspecten rond startgat	73
2.2.3 Servosysteem	29	3.9.5 Opspannen en uitrichten	74
2.2.4 CNC besturing	29	3.9.6 'Stops' en uitvalstukken	74
2.3 Gereedschapslektroden	29	3.9.7 Voor- en nabehandelen	74
2.3.1 Algemeen	29	3.9.8 Profielfouten	75
2.3.2 Materiaalsoorten en -keuze	29	3.10 Fabricagevoorbeelden	76
2.3.2.1 Elektrolytisch koper	31	4 Automatisering en organisatie	82
2.3.2.2 Grafiet	31	4.1 Inleiding	82
2.3.2.3 Wolframkoper	32	4.2 Werkvoorbereiding	83
2.3.3 Opbouw van de elektrode	33	4.3 Afleiden elektrodevorm/vonkcyclus	85
2.3.3.1 Afmetingen van de elektrode	33	4.4 Programmering	85
2.3.3.2 Vorm van de elektrode	33	4.4.1 CAM programmering	85
2.3.4 Elektrode-ontwerp en -fabricage	34	4.4.1.1 Communicatie	85
2.3.4.1 Verspanende bewerkingen	34	4.4.1.2 Programmeringsaspecten	85
2.3.4.2 Vonkerosief bewerken	35	4.5 Communicatie-/netwerkaspecten	86
2.3.4.3 Generatief bewerken	35	4.6 Opmeten van werkstukken en elektroden	86
2.3.4.4 Niet-verspanende bewerkingen	36	4.6.1 On line/Off line meten	86
2.3.4.5 Chemische bewerkingen	36	4.6.2 Meten met de machine	87
2.3.4.6 Vormschuren	37	4.6.2.1 Werkstuk opmeten	87
2.3.5 Opspannen van elektroden	37	4.6.2.2 Opmeten van elektroden (zinkvonken)	87
2.4 Diëlektricum	37	4.6.3 Meten buiten de machine	87
2.5 Technologie en strategie	39	4.6.4 Vastleggen van correcties	87
2.5.1 Algemeen	39	4.7 Opspannen	88
2.5.2 Invloed pulsform	40	4.7.1 Inleiding	88
2.5.3 Invloed spoeling	40	4.7.2 Opspannen van de elektrode	88
2.5.4 Bewerkingsstrategie	42	4.7.3 Opspannen werkstuk (zinkvonken)	89
2.6 Klassiek zinkvonken	42	4.7.4 Opspannen werkstuk (draadvonken)	89
2.7 CNC zinkvonken	43	4.8 Wisselsystemen	89
2.8 Planetair vonken	44	4.8.1 Elektrode wisselen met de machine	89
2.8.1 Begripsbepaling	44	4.8.2 Robotwisselaar	90
2.8.2 Algemeen	44	4.8.3 Palletwisselaar	90
2.8.3 Positieve/negatieve aspecten	45	4.9 Productie vonken	90
2.8.4 Planetaire uitvoeringsvormen	45	5 Machineselectie, -afname en veiligheid	93
2.8.4.1 Inleiding	45	5.1 Inleiding	93
2.8.4.2 Planetaire bewegingsmogelijkheden	46	5.2 Stappenplan aankoopprocedure	93
2.8.5 Specifieke aspecten in verband met planetaire bewerkingsstrategie	48	5.3 Machinekarakteristieken	93
2.9 Contourvonken	50	5.4 De zinkvonkmachine	94
2.9.1 Begripsbepaling	50	5.4.1 Algemene omschrijving van de machine	94
2.9.2 Positieve/negatieve aspecten	50	5.4.2 Installatie- en opstellingsgegevens	94
2.9.3 Vonktechnologie	50	5.4.3 Het mechanische systeem	94
2.9.4 Uitvoeringsvormen	51	5.4.4 Generator	96
2.9.4.1 Profielvonken	51	5.4.5 CNC-besturing	96
2.9.4.2 Uitkamers	51	5.4.6 Het diëlektricumstelsel	97
2.9.5 Programmeringsaspecten	51	5.5 De draadvonkmachine	97
2.10 Speciale vonkbewerkingen	52	5.5.1 Algemene omschrijving van de machine	97
2.10.1 Vonkboren	52	5.5.2 Installatie- en opstellingsgegevens	97
2.10.2 Vonkfrezen	53	5.5.3 Het mechanische systeem	98
2.10.2.1 Begripsbepaling	53	5.5.4 Pulsgenerator	99
2.10.2.2 Specifiek aspecten i.v.m. technologie	54	5.5.5 CNC-besturing	99
2.10.2.3 Fabricagevoorbeelden	56	5.5.6 Het diëlektricumstelsel	100
2.10.3 Vonkslijpen	56	5.6 Machineafname	101
2.10.4 Microzinkvonken	56	5.6.1 Opmeten van de machinenauwkeurigheid	101
2.10.5 Polijstvonken	57	5.6.2 Verspaningsproeven (aanmaak van teststukken)	101
2.10.5.1 Begripsbepaling	57	5.6.2.1 Verspaningsproeven	101
2.10.5.2 Technologie	57	5.6.2.2 Voorbeeld van een teststuk (draadvonken)	104
2.10.5.3 Toepassingsgebied	58	5.7 Veiligheid, milieu en onderhoud	104
2.10.6 Textureren (ED Texturing)	58	5.7.1 Algemeen	104
2.11 Praktijkvoorbeelden	58	5.7.2 Meest belangrijke eisen voor de installatie	105
		5.7.3 Werkplaatsaanbevelingen	105
		5.7.4 Bedrijfsaanbevelingen	105
		5.7.5 Onderhoud	105
		Symbolen en indices	107
		Vaktermen	108
		Literatuuroverzicht/bron figuren	111
		Trefwoordenlijst	113

Hoofdstuk 1

Vonkerosie - algemeen

1.1 Ontwikkeling van vonkerosie in verleden, heden en toekomst

Algemeen

Vanaf de allereerste toepassing van vonkeroderen voor een gecontroleerde materiaalafname ('verspaning'), heeft het proces een snelle ontwikkeling doorgemaakt. De werking van vonkerosie, ook wel EDM (Electrical Discharge Machining), elektro-erosie of 'vonkverspanen' genoemd, is het gevolg van gestuurde elektrische ontladingen tussen twee elektroden, te weten het werkstuk en het gereedschap. De materiaalafname berust op het contactloos verwijderen van in principe elektrisch geleidend materiaal in een diëlektrische vloeistof via een combinatie van smelten, verdampen en de daarmee gepaard gaande mechanische uitstoot.

De oudste berichtgeving over elektrisch vonken stamt uit het jaar 1694 van Robert Boyle, die de ontlading bestudeerde die ontstaat bij het wrijven over een diamant (statische ontlading). Materiaalverwijdering werd het eerst geconstateerd in 1751 door Benjamin Franklin. Een betere beschrijving van de erosie van metalen met ontladingen van een 'Leidse fles' gaf Sir Jozef Priestley in 1766 met de beschrijving van de 'Priestleyse Ringen' (figuur 1.1).



figuur 1.1 Ringen van Priestley

De door G.Ch. Lichtenberg omstreeks 1777 vermelde lichtenbergfiguren, die zich na een bundelontlading op een glasplaat verdiept afbeelden en ook zichtbaar worden op een fotoplaat, behoren mede tot de eerste rapporteringen over elektro-erosie.

Technisch heeft Meritens (1881) als eerste elektro-erosie gebruikt, toen hij de metaaloverdracht met een vlamboog voor het lassen toepaste.

Rond het jaar 1900 trachtten enige onderzoekers met elektrische ontladingen colloïdale metalen te vervaardigen. Hierbij viel het V. Kohlschutter op, dat de elektrode aan de pluspool (anode) meer materiaal verloor. De publicaties uit die tijd melden onderzoeken die gericht waren op het verkrijgen van een bruikbaar vonkerosieproces.

De eerste proef om een vlamboog zo te sturen dat er een gewenste vorm mee vervaardigd kon worden, werd door Holslag in 1936 uitgevoerd. In 1937 werd onderzocht of een vlamboog die van de tanden van een zaagblad uitging, metalen sneller kon 'verspanen'. Holfelder en Harding verkregen in 1942 in de USA een patent op een methode, waarmee metalen konden worden 'verspaand' met de onderbreker-lichtboog. De apparaten werden uit de reeds lang bekende elektro-schrijvers ontwikkeld. Verbeterde vlamboog-'verspanings'apparaten (disintegrators) zijn nu nog in gebruik om afgebroken boren of tappen te verwijderen.

Omdat elektro-erosie de levensduur van de elektroden van bougies bekort en schakelcontacten beschadigt, werd van de zijde van de metaalkundigen onderzocht of men erosievaste, minder aan slijtage onderhevige, metalen kon vinden.

Bij de werkzaamheden voor een dissertatie over deze probleemstelling, kwam bij B.R. Lazarenko de gedachte op de verwoestende werking van de elektrische ontladingen zo te sturen, dat hiermee een materiaalverwijdering kon worden bewerkstelligd.

De Russische onderzoeker onderkende bij zijn proefopstelling met condensatorontladingen zonder twijfel als eerste dat vonkontladingen doelmatiger zijn dan een onderbroken lichtboog. Samen met zijn vrouw N.I. Lazarenko (zie figuur 1.2) heeft hij in 1943 het succesvolle gebruik van vonken voor de materiaalverwijdering bewezen.



figuur 1.2 De heer en mevrouw Lazarenko met in hun midden de heer Jean Pfau (voormalig directeur van Charmilles Technologies SA)

Fundamenteel onderzoek door het echtpaar Lazarenko resulteerde in een serie wetmatigheden, die hebben geleid tot de constructie van de eerste vonkerosiemachine in 1944. Aanvankelijk werd het proces, vanwege het gebrek aan industriediamant in Rusland tijdens de Tweede Wereldoorlog, uitsluitend toegepast op hardmetaal. Nadat de kinderziekten van het systeem waren overwonnen en de machines aangepast aan de gewenste nauwkeurigheid, werd het proces meer en meer ingezet bij het verwerken van geharde of moeilijk te bewerken staalsoorten.

De oorspronkelijke vorm van het elektro-thermische proces is het servo gestuurde zinkvonken, waarin een voorgevormde elektrode, verticaal bewegend, vonkerosief wordt afgebeeld in het werkstuk.

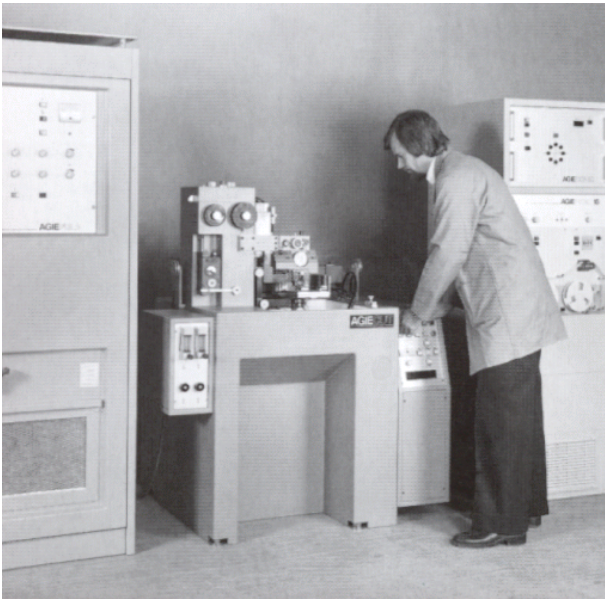
De eerste vonkerosiemachines geschikt voor het vonkerosief zinken waren uitgerust met een relaxatiegenerator (zie figuur 1.3). Een belangrijke verbetering trad op in het begin van de jaren '60 met de invoering van de gestuurde pulsgeneratoren. Deze generatoren maakten het gebruik van grafiet als elektrodemateriaal mogelijk en gaven een beduidend lagere elektrodeslijtage te zien.



figuur 1.3 Een van de eerste industriële zinkvonkmachines

Rechtstreeks ervan afgeleid is het numeriek bestuurd draadvonken (zie figuur 1.4), waarbij de gestuurde beweging van een dunne meestal verticaal opgestelde draad, overeenkomstig het opgestelde programma, de werkstukvorm uitsnijdt. Draadvonken op zich is zonder besturing ondenkbaar.

Rond 1970 werden de eerste numeriek bestuurd draadvonkerosiemachines geïntroduceerd, die vooral geschikt bleken in de gereedschapmakerijen voor het maken van pons- en extrusie-gereedschappen. Even daarna kreeg draadvonken een extra dimensie door een aparte voorziening die conisch snijden mogelijk maakte (bijvoorbeeld een lossingsschuinde van de snijplaat van een stempel).



figuur 1.4 Een van de eerste numeriek bestuurd draadvonkmachines

Daarnaast ontstond het idee om de elektrode tijdens het zinkvonken een extra planetaire beweging of translatie te laten uitvoeren. Door de snelle ontwikkeling van de elektronica zijn in de jaren '80 het numeriek bestuurd zinkvonken met het planetair eroderen en andere technieken zoals het polijstvonken verschenen.

Door het introduceren van integrale CNC besturing op de vonkmaschine (CNC = Computer Numerical Control) ontstonden nieuwe mogelijkheden. Numerieke besturing bracht positieve aspecten, waaronder verhoging van de machineproductiviteit, kortere doorlooptijd, verbeterd kwaliteitsniveau en toegenomen flexibiliteit. Hierdoor kan bij het vonken een optimaal verlopende bewerkingscyclus worden gegarandeerd en worden technologie-instellingen, afzonderlijke of simultane asbewegingen, alsmede alle machinefuncties eenduidig en goed gecontroleerd door de vonkmaschine uitgevoerd. Bij het zinkvonken bestaat nog de mogelijkheid om te kiezen tussen het gebruiken van één enkele complexe elektrode of een reeks eenvoudiger gevormde deelelektroden.

De moderne sturing bij vonkerosie biedt tal van extra mogelijkheden, zoals uitgebreide baangestuurde bewegingscycli, technologie-opslag in het machinegeheugen, diverse meetcycli, automatische draadvoer, wisselen van elektrode en werkstukken, netwerkfuncties, zelfs proces- en voortgangscontrole (onder andere per webcamera), bijsturen op afstand, telediagnose, enz.. Genoemde ontwikkelingen verlenen de CNC vonkmaschine een aanzienlijk verhoogde autonomie.

Kennis van het vonkproces en van de belangrijkste grootheden die het eindresultaat van het CNC vonken bepalen, blijft belangrijk. Procesparameters en ervaringsgegevens over onder andere elektrode- en materiaalkeuze, generatorinstellingen, spoeling, enz. vormen hierbij de basis.

Plaats binnen de bewerkingstechnieken

Sterker dan tevoren tellen vandaag de dag de positieve aspecten van het vonkeroderen mee in de beslissing welke techniek voor materiaalafname wordt gebruikt. In de praktijk worden, al naar gelang de toepassing, onder andere als belangrijke weegfactoren beschouwd: de maakbaarheid, de kwaliteit, de prijs, de doorlooptijd en de beschikbare capaciteit.

Voorop staat bij vonkerosie de ongevoeligheid voor de uitgangshardheid van het te bewerken materiaal. Van groot belang is verder het contactloos verlopende karakter van een vonkbewerking en de driedimensionale kopieermogelijkheid met een grote vormvrijheid. Door de hoge kwaliteit, wat vorm en maat aangaat, en de gelijkmatige oppervlaktestructuur is een gevonkt oppervlak, indien nodig, relatief gemakkelijk te polijsten. Puur gelet op de snelheid van materiaalafname verdienen verspaningstechnieken zoals frezen, draaien en boren de voorkeur, zeker de hogesnelheidsvariant (HSC = High Speed Cutting). Alleen het moderne, snelle vonkboren kan daar, hoofdzakelijk als fabricagemethode voor startgaten, enigszins mee concurreren. Is de gewenste vorm of structuur met deze verspaningstechnieken niet of moeilijk aan te brengen, dan is vonkeroderen een uitstekend, zij het langzamer, alternatief. Bij bepaalde complexe vormelementen, zoals bijvoorbeeld bij onderbroken, terugliggende kamers, blinde holtes met onderin de bodem nagenoeg scherpe overgangen, holtes in ongedeelde hardmetalen werkstukken, kleine holtes met een grote L/D-verhouding (lengte over diameter), enz. is nauwelijks een andere keuze dan zink- en draadvonken mogelijk. Laserfrezen biedt in bepaalde toepassingen een alternatief, maar het spaandebiet is nog beperkt. In het algemeen geldt dat een buitenvorm makkelijker te fabriceren is dan een blinde of doorlopende binnencontour. Bij doorlopende profielen levert draadvonken winst op ten opzichte van zinkvonken, omdat alleen een smalle contourparallelle snede als baan wordt gevonkt en niet het gehele volume van het te verwijderen profiel.

Bij het vonkeroderen is het van essentieel belang dat er een voldoende hoeveelheid betrouwbare technologie ter beschikking staat. In principe worden deze instellingen plus eindresultaten door de machinefabrikant geleverd. Technologiehulp bij de werkvoorbereiding van vonkopdrachten is te vinden in de bijgeleverde handleidingen (boeken, CD-ROM, DVD, enz.), alsmede in deze publicatie (bijv. selectie van elektrodemateriaal; keuze technologiegrootheden; spoelmogelijkheden; resulterende waarden). Strategie-overwegingen (hoe een vonkbewerking aan te pakken) betreffen daarbij onder meer: wel of niet voorfrezen; volledig zinkvonken; contourvonken; één complexe elektrode of een serie deelelektroden; wanneer elektroden wisselen; de bewerkingsvolgorde; draadvonken versus slijpen.

Een vonkmaschine heeft een vergaande autonomie, onder meer op grond van de standaard procesregeling. De grote zelfstandigheid wordt nog versterkt door de koppeling met een besturing, waardoor een verlengde bedrijfstijd bij het vonkeroderen eenvoudiger haalbaar is, dan bij andere technieken. Moderne communicatietechnieken zoals telediagnose en ingrijpen op afstand maken onbemand werken gedurende lange tijd mogelijk.

De industrie eist in toenemende mate fabricagetechnieken die een snelle, efficiënte productie van pro-

ducten en gereedschappen mogelijk maakt met hoge kwaliteit uit een grote verscheidenheid van soms moeilijk verspaanbare materialen. Middels een aangepaste organisatie met aandacht voor (hulp-)gereedschap- en elektrodebeheer, alsmede de bijbehorende automatisering is de tegenwoordig vereiste doorlooptijdverkorting haalbaar. Door gedeeltelijk onbemand een hoge machinebezetting te realiseren (>4000 uur/jaar), ontstaat een concurrerende positie, ook wat kostprijs betreft.

Toekomstperspectief

De geschiedschrijving toont, dat de te eroderen materialen door de jaren heen veranderen. Onder invloed van de voortdurende menselijke drang tot kennisverhoging en de nooit ophoudende concurrentieslag zoeken onderzoeksinstituten en bedrijven over de wereld continu naar betere oplossingen in gereedschappen en materialen. Machinebouwers volgen deze ontwikkelingen in gelijke tred (zie figuur 1.5). Bij het bewerken van gemodificeerde of nieuwe materialen -met eigenschappen die productie verhogend en tevens productiekostprijs verlagend dienen te zijn- wordt samenwerking tussen alle betrokkenen steeds belangrijker om mondiaal de concurrentie aan te kunnen.



figuur 1.5 Kijkje in de assemblagehal van een vonk-machinefabriek

Aanvankelijk richtte de ontwikkeling zich voornamelijk op meer en betere staalsoorten, door legering en veredeling. Eind jaren 70 begonnen gereedschapmakers voor het eerst snijdende delen te vervaardigen van hardmetaal (zie § 3.9). De daaruit volgende productieverhoging (bijvoorbeeld bij het ponsen) was zo spectaculair, dat aanvankelijk weinigen interesse hadden in hoe de vervaardiging van de onderdelen verliep. Bewerken van hardmetaal (HM) was uitsluitend mogelijk door middel van vonkerosie en/of slijpen met diamant slijpschijven.

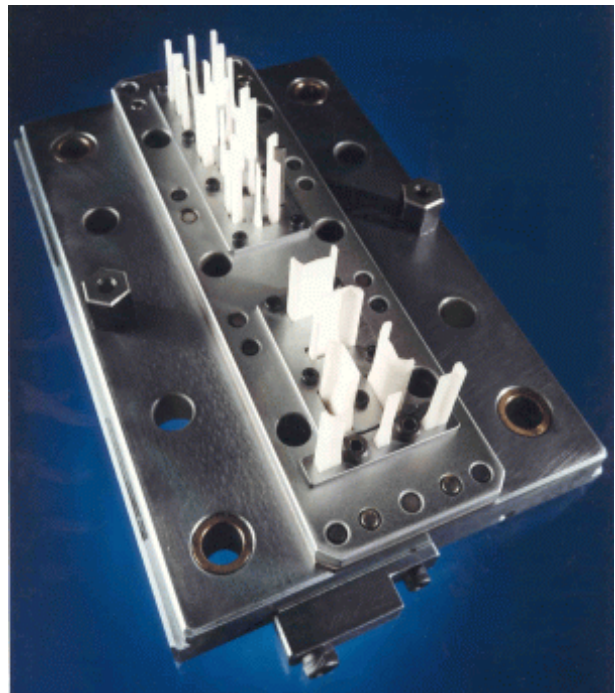
Bij voorkeur werd draadvonken gekozen -vanwege de relatief eenvoudige CNC baanbesturing met ingebouwde technologie en standaard gereedschap- tegenover het -veel gecompliceerdere, sterk manafhankelijke- slijpen inclusief het profileren van diamant slijpschijven. Toen later bleek dat bij vonken de combinatie van elektrische pulsen en demiwater verwoestend uitwerkten op HM-oppervlakken (beïnvloede zone, pitting), ontstond er een strijd tussen enerzijds bouwers van vonkmachines (met toegespitste en verbeterde generatoren) en anderzijds de bouwers van slijpmachines, die aanvankelijk bij gebruikers het voordeel van de twijfel genoten. Enkele jaren geleden zetten machinebouwers een grote stap vooruit, door zowel voor olie als voor demiwater generatoren te ontwikkelen die grote verbetering brachten. Metingen en duurtesten tonen aan dat nu geen praktische verschillen meer bestaan in de prestaties van HM onderdelen of deze nu geslepen of gedraadvonkt zijn [ref. 1].

Tevens blijft er ook een strijd gaande tussen vonk-machinebouwers om de snelst snijdende (mm^2/min) en zinkvonkende machine (mm^3/min). Daarbij gaat het

erom wie de meeste effectieve (niet beschadigende) vonkoverslagen teweeg kan brengen (meten en regelen met bijpassende snelheden) en wie het best en het snelst het gevonkte materiaal uit de vonkspleet krijgt (hoge drukspoeling).

Het uiterlijk van een vonkmaschine zal (afgezien van een wat meer eigentijds en ergonomisch design) niet veel veranderen. Op hard- en softwarematig gebied zullen in de toekomst echter wel grote veranderingen plaatsvinden. Voor het bereiken van een snellere bewerking met verbeterde oppervlaktegesteldheid worden krachtigere besturingen met snellere processors gebruikt en verbeterde motoraansturingen. Meten, regelen en bewaken van het vonkproces kan sneller en storingvrij gebeuren door communicatie via de glasvezel. Ontstekings tijden worden korter met snellere en veel krachtigere pulsen. De gestegen vonkcapaciteit stelt wel als voorwaarde dat de gehele machine sneller en nauwkeuriger kan reageren en bewegen. Een vergaande thermische stabilisatie is voortaan niet alleen nodig voor de nauwkeurigheid, maar vooral voor het op de juiste manier op gang houden van een optimaal vonkproces. Kortom de EDM machine verandert volledig, wat inmiddels duidelijk blijkt uit het feit dat de haalbare productiesnelheden en oppervlaktekwaliteiten zijn verbeterd.

Gelijktijdig met al deze technische ontwikkelingen dienen zich natuurlijk ook nieuwere materialen aan; eigenlijk geen enkel probleem meer voor vonkmaschinebouwers (zou je denken) gelet op het voorgaande. Gereedschapmakers vervangen hardmetalen delen gedeeltelijk door keramische (zie figuur 1.6). Echter 'steen' is niet geleidend, waardoor deze niet kan worden gevonkt.



figuur 1.6 Gebruik van keramiek in matrijzen

Daarmee hebben de slijpers niet gewonnen: het hele verhaal begint gewoon weer opnieuw. Slimme chemici zagen namelijk aan het eind van de vorige eeuw kans om keramieken deels geleidend te maken door toevoeging van bijvoorbeeld TiN (Titaannitride). Vanaf dat moment is het toepassen van vonkerosie op keramisch materiaal al niet zo vreemd meer. Wel zal het nog geruime tijd duren voordat de toepassing en de ontwikkeling van het materiaal zelf op hetzelfde niveau komt als bij hardmetaal het geval is. Hoewel keramiek niet

de treksterkte van HM heeft, en wellicht ook niet zal krijgen, heeft het, boven op een nog hogere standtijd (door de betere slijtvastheid en een beduidend lagere wrijvingsweerstand) nog een belangrijk voordeel ten opzichte van HM. Zoals bekend heeft hardmetaal een bindmiddel nodig om de wolframkorreltjes bij elkaar te houden. Hoewel men het zogenaamde uitwassen van de kobaltbinder tijdens het draadvonken grotendeels onder de knie heeft gekregen, doet zich een dergelijk verschijnsel bij keramische materialen niet voor. Wel zijn er, zoals bij HM, de beïnvloede zone en de micro-cracks die voorkomen dienen te worden.

Ondanks felle concurrentie wordt verwacht dat vonkerosie in de toekomst steeds een belangrijke techniek zal blijven, ook al ondervindt het voortdurend concurrentie van slijpen en lasertechnieken. De afgelopen vijf jaren kwam daar het hoge snelheidsfrezen (HSC) bij, wat grotendeels het grof voorvonken heeft geëlimineerd, en meer recent het ultrasoon- en het laserfrezen. Miniaturisatie (het verkleinen van gebruiksvoorwerpen en onderdelen) biedt samen met microsysteemtechnologie kansen voor het vonkproces, waardoor zaken veranderen en zich verbeteringen voordoen. Technici zullen wel altijd nieuwe openingen blijven vinden om bestaande processen met bijbehorende machines te verbeteren, wat tevens de garantie vormt voor een blijvend interesse in deze technieken.

1.2 *Materiaalverwijdering bij vonkerosie: principe*

Bij vonkerosie wordt materiaal verwijderd op basis van een elektro-thermisch principe, via omzetting van elektrische energie in thermische, zodat het metaal smelt en verdamp.

Voordeel van thermo-elektrische bewerkingsmethoden, waartoe de vonkerosieve methode behoort, ten opzichte van de mechanische bewerking is, dat mechanische krachten bijna niet voorkomen en dat zeer harde metalen zonder problemen kunnen worden bewerkt. Een nadeel is evenwel, dat de bewerkingssnelheid lager is, zodat toepassing van de vonkerosieve methode alleen in specifieke gevallen in de massafabricage economisch is. Daarnaast zijn in principe alleen elektrisch geleidende materialen te vonken.

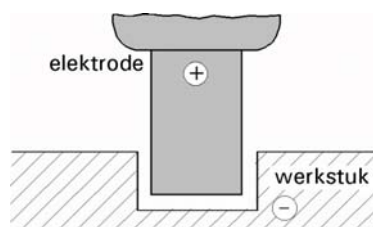
Fysica van één enkele vonkdoorslag

De momenteel meest aanvaarde theorie betreffende het erosiemechanisme is het eroderen door middel van een elektro-thermisch proces. Indien tussen twee elektroden (gereedschapselektrode en werkstukelektrode), die in een diëlektrisch medium zijn geplaatst, een elektrische spanningpuls wordt aangelegd, zal onder bepaalde condities een vonk overslaan. Wanneer de toegevoerde energie tijdens de ontlading groot genoeg is, zal ter plaatse van de vonkoverslag een kratertje ontstaan.

Dit verschijnsel kan aan de hand van de huidige inzichten als volgt worden verklaard. Zodra er elektrische spanning over de vonkspleet wordt aangelegd, kunnen een viertal stadia worden onderscheiden. Voor de bespreking van het erosiemechanisme wordt verondersteld, dat met normale polariteit wordt gevonkt, dat wil zeggen dat de gereedschapselektrode positief geladen is (anode: + polariteit) en het werkstuk negatief (kathode: -), zie figuur 1.7.

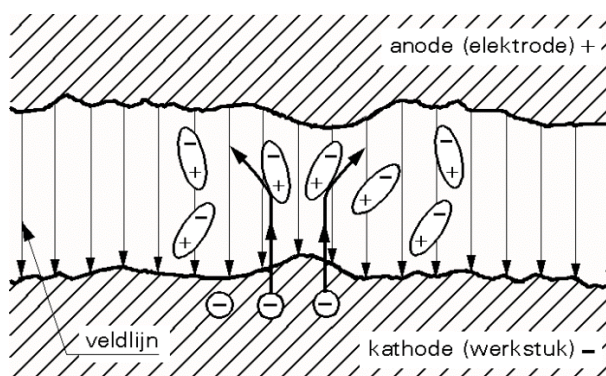
1. *De ontsteekfase:*

Door de aangelegde spanning tussen de gereedschapselektrode en het werkstuk ontstaat een elektrisch veld (wordt voorgesteld door de verticale lijnen in figuur 1.8). De sterkte van het elektrische veld is evenredig met de spanning gedeeld door de afstand tussen de elektrode en het werkstuk. Op de plaats waar een hoge veldsterkte heerst, worden



figuur 1.7 Polariteit werkstuk en elektrode

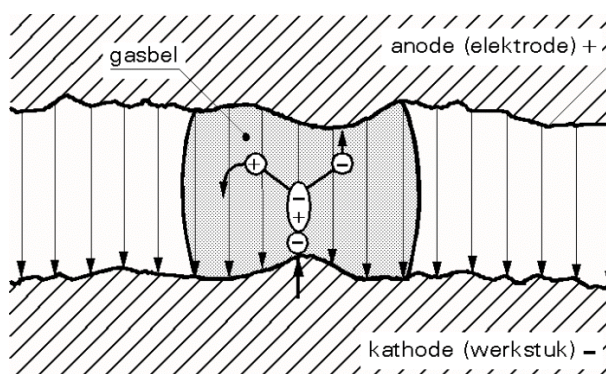
door de kathode elektronen (-) geëmitteert. Deze primäre elektronen die naar die anode (hier elektrode) toe bewegen, botsen onderweg op die neutrale atomen in dem diëlektricum. Het diëlektricumatom splitst in een positieve kern (ion) und viele elektronen. Diese laatste elektronen werden sekundäre elektronen genoemd.



figuur 1.8 Ontsteekfase (beweging van primäre elektronen naar anode)

2. *De vorming van het vonkkanaal:*

Het ontstaan van sekundäre elektronen und ionen wordt stootionisatie genoemd (figuur 1.9). Die ionen (+) werden angezogen durch die kathode (hier werkstuk) und machen daar opnieuw elektronen vrij (sekundäre emission). Diese zullen op hun beurt weer neutrale atomen splitsen, waardoor er ein lawine-effect (sneeuwbal-effect) entsteht. Dit lawine-effect vergrößert den stroom (= schnelle beweging von ionen und elektronen) aanzienlijk (figuur 1.10), waardoor het diëlektricum lokal geht aufwärmen. Als gevolg hiervan verläßt die elektrische weerstand van het vonkkanaal und geht er noch mehr stroom vloeien. Het diëlektricum wärmt verder op und verdampft, waardoor ein dampfbel oder gasbel entsteht.

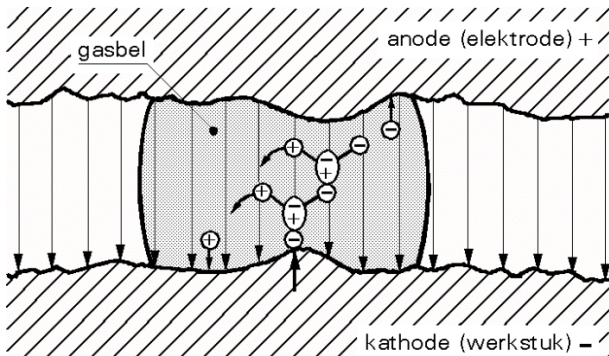


figuur 1.9 Stootionisatie

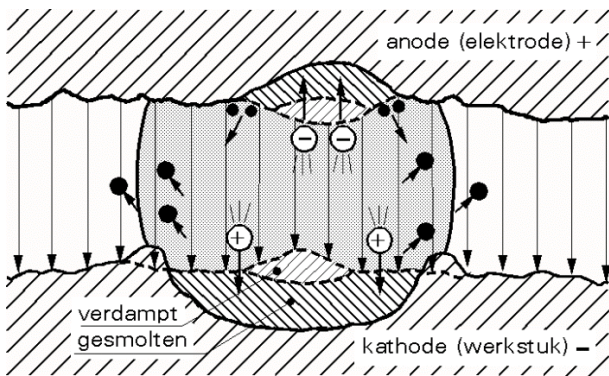
3. *Lokaal smelten und verdampen van materiaal*

Het elektrode- und werkstukoppervlak werden bombardiert durch elektronen und ionen. Ionen slaan in op het negatief geladen oppervlak (werkstuk) und

elektronen op het positief geladen oppervlak (elektrode). Bij het botsen van de elektronen en de ionen wordt hun kinetische energie omgezet in warmte. Deze warmte heeft een smelten en verdampen van het werkstuk- en elektrodemateriaal tot gevolg (figuur 1.11).



figuur 1.10 Vergroting van de stroom door lawine-effect



figuur 1.11 Smelten, verdampen en uitstoot van het materiaal

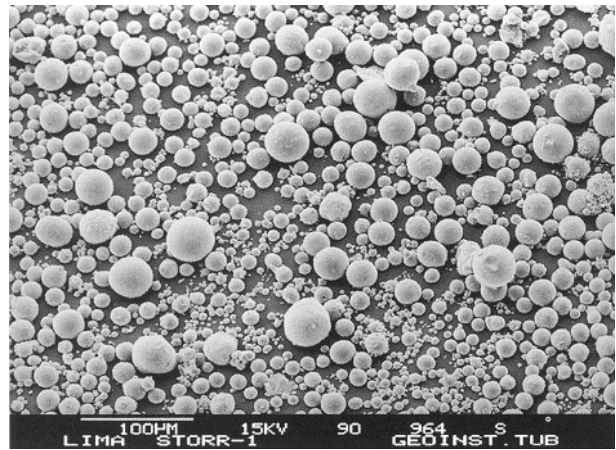
Hoeveel materiaal wordt gesmolten, hangt af van de hoeveelheid deeltjes en de soort (elektronen of ionen) die op het oppervlak inslaan. Het aantal deeltjes dat per vonkontlading op het materiaal inslaat, hangt af van de ingestelde stroom en de tijdsduur dat deze stroom aanhoudt. Het smeltbad heeft een diameter van ongeveer 100 tot 300 μm . De hoeveelheid materiaal die bij genoemde polariteit smelt op de elektrode is kleiner dan de hoeveelheid gesmolten werkstukmateriaal. Dit is te verklaren, doordat de elektronenmassa vele malen kleiner is dan de massa van de ionen.

4. Einde elektrische energietoevoer

Bij het beëindigen van de stroomtoevoer klappt de gasbel (dampbel) ineen en doet zich een recombinitie (hereniging) voor van de ionen en de elektronen in het diëlektricum. Door het instorten van de gasbel ontstaat er een onderdruk en wordt gesmolten materiaal zowel van het werkstuk- als van het elektrode-oppervlak uitgestoten en verder afgevoerd met het diëlektricum (zie figuur 1.12). Er vormt zich een krater in het werkstukoppervlak, die rechtstreeks de ontstane oppervlakteruwigheid bepaalt. Figuur 1.13 toont het effect van één enkele krater.

Functie van het diëlektricum

Als diëlektricum worden overwegend vloeistoffen toegepast, alhoewel theoretisch ook gasvormige stoffen kunnen worden toegepast [ref. 2]. Onder invloed van een sterk elektrisch veld dient zo'n vonkvloeistof, ondanks een hoge isolatiewaarde, onder bepaalde condities toch een snelle ontsteking toe te laten. Tevens



figuur 1.12 Het 'verspaande' materiaal stolt meestal in bolvorm



figuur 1.13 Krater gevormd in het werkstukoppervlak veroorzaakt door één enkele vonkdoorslag

moet de ontstane warmte en het weggevonkte materiaal door dit medium snel worden afgevoerd.

De functie van het diëlektricum is bijgevolg drieledig:

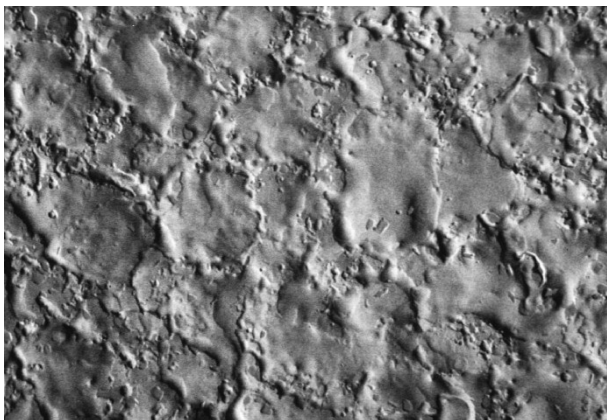
- Beïnvloeding van het vonkproces, onder andere via concentratie van de energie in het plasmakanaal en een snelle doorslag. Door de aanwezigheid van de vonkvloeistof kan in het plasmakanaal een hoge druk worden opgebouwd. Tijdens de doorslag houdt het diëlektricum ook de dampbel bijeen;
- Verwijdering van gevonkte deeltjes en afbraakproducten: door de aanwezige vonkvloeistof en de spontane of geforceerde beweging ervan worden de geërodeerde deeltjes verwijderd uit de vonkzone;
- Afkoeling van het werkstuk en de elektrode.

Het diëlektricum heeft een belangrijke invloed op het erosiemechanisme met het oog op de fysische aspecten. Ontstekungsvertragingen zijn sterk afhankelijk van de toestand - de vervuilingsgraad - van het diëlektricum. Een minieme vervuiling kan zelfs een positief effect hebben op de processtabiliteit.

De meest gebruikte diëlektrica zijn koolwaterstoffen (speciaal ontwikkelde vonkvloeistoffen) en gedemineeraliseerd/gedeïoniseerd water (demiwater). Poedergesuspendeerde diëlektrica kunnen worden gebruikt om het proces en/of de oppervlaktekwaliteit te verbeteren.

Vonkerosie: een proces van vele vonkdoorslagen

Materiaalverwijdering zoals voorkomt bij vonkerosie is een gevolg van hele series vonkontladingen (figuur 1.14). Repeterend worden snel na elkaar, gecontroleerde spanningspulsen aangelegd tussen elektrode en werkstuk door een elektrische pulsgenerator. Het aantal gegenereerde pulsen kan variëren tot duizenden per



figuur 1.14 Werkstukoppervlak ontstaan door het effect van meerdere vonken

seconde (kHz), terwijl dit bij draadvonken kan oplopen tot enkele miljoenen per seconde (MHz).

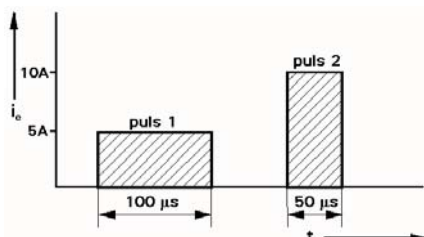
De vonkontladingen treden statistisch verspreid op over de oppervlakken van het werkstuk en de elektrode, en wel op die plaats waar de voorwaarden voor vonkdoor-

slag het meest gunstig zijn. De afstand tussen gereedschapselektrode en werkstuk wordt vonkspleet genoemd. Deze is noodzakelijk om de volgende redenen:

- Indien de elektrode het werkstuk zou raken, kan de spanning ertussen nooit oplopen. Er bestaat dan in principe kortsluiting, waarbij van vonkvorming (lees materiaalverwijdering) geen sprake kan zijn;
- Om de gevonkte deeltjes af te kunnen voeren is vrije ruimte nodig.

Tijdens het vonkeroderen krijgt de gereedschapselektrode geen vaste voedingsbeweging opgelegd, zoals bij het draaien of het frezen. De beweging van de elektrode (voedingssnelheid) hangt af van hoe vlug materiaal-deeltjes worden verwijderd. Het servomechanisme (voedingsmechanisme) van de machine probeert de vonkspleetafstand constant te houden. Dit gebeurt meestal door het meten van de gemiddelde spanning tussen elektrode en werkstuk. De gemiddelde spanning is hoog bij een te grote vonkspleet en nul indien er geen vonkspleet is (kortsluiting). De waarde van de vonkspleet varieert tussen 20 en 250 μm afhankelijk van de instelling van de pulsgenerator, werkstuk- en elektrodemateriaal, vervuilingsgraad, enz..

Tijdens het vonkeroderen wordt zowel werkstukmateriaal als elektrodemateriaal verwijderd (zie hiervoor). Bij het zinkvonken is het goed de slijtage van de dure, specifiek vorgefabriceerde gereedschapselektrodes (vonkdoorsn) zo laag mogelijk te houden, wat mogelijk is via de juiste technologiekeuze en -instellingen. In verband met de gewenste lage elektrodeslijtage worden bij voorkeur vrij lange pulsen (50–500 μs) met een kleinere stroomsterkte (5–50 A) toegepast (figuur 1.15). Het omkeren van de polariteit gebeurt soms bij het zinkvonken van moeilijk bewerkbare materialen, bij het op elkaar passend vonken van matrijshelften, bij een gelijke materiaalparing (Cu-Cu, Staal-Staal) en bij bepaalde navonkbewerkingen.

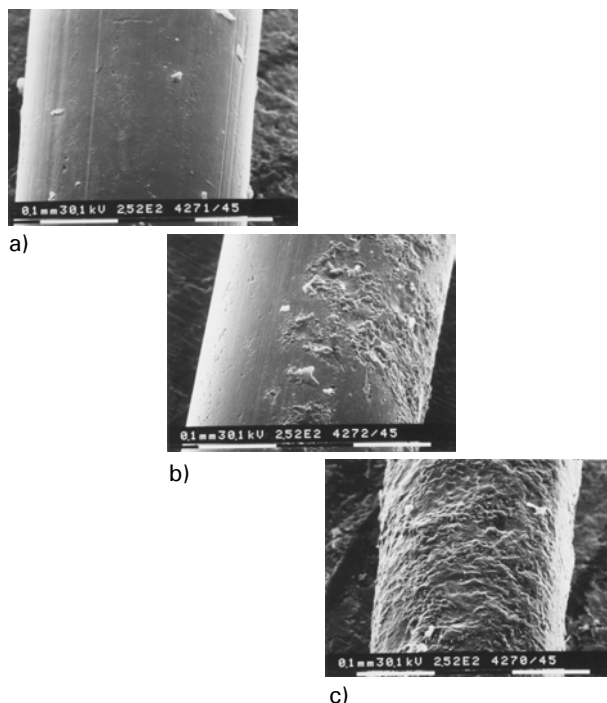


figuur 1.15 Pulsen van verschillende vorm met gelijke energie, waarbij puls 1 minder relatieve elektrodeslijtage oplevert dan puls 2

Hier wordt de pulsduur kort gehouden, omdat bij het nabewerken (finishen) de ingebrachte energie beperkt moet blijven om een voldoende lage oppervlakteruwigheid (kleine kraters) te realiseren.

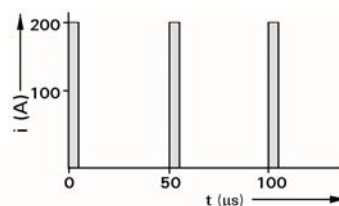
Voor zinkvonkbewerkingen worden meestal massieve koper-, grafiet- of wolframkoper-elektroden gebruikt (van standaard uitgangsmateriaal of als voorbereikt en opgespannen halfproduct). Een verdere indeling kan worden gemaakt naar de fabricagemethode (bijv. verspanen, smeden, sinteren, vonken, etsen, galvanisch vervaardigen), de constructieve opbouw (bijv. samengestelde elektroden, stiftelektroden, meerkanaalselektroden of getrapte elektroden) of naar de geometrie (bijv. vorm- of profielelektroden, zoals pijp- of schijf-vormige elektroden).

Bij draadvonkerosie speelt de elektrodeslijtage een andere rol dan bij het zinkvonken. Tijdens het draadvonken wordt gebruikgemaakt van een continue aflopende standaarddraad als elektrode, zodat de slijtage van de draadelektrode slechts een ondergeschikte, economische rol speelt (zie figuur 1.16).



figuur 1.16 SEM opname ter vergelijking van respectievelijk draad in uitgangstoestand (a), na 'toucheren' (b) en in versleten toestand (c)

De gemiddelde stroomsterkte mag bij draadvonkerosie niet te groot zijn, omdat anders de draad eenvoudigweg smelt en dus breekt. De pauzetijd tussen twee pulsen moet bijgevolg groot zijn, in tegenstelling met zinkvonkerosie, waar de pulsen elkaar snel opvolgen. Daarom worden bij draadvonkerosie kortdurende pulsen (0,5–2 μs) met relatief lange pauzetijd en een grote stroomamplitude (100–1000 A piekstroom) gebruikt (zie figuur 1.17).



figuur 1.17 Korte, 'harde' stroompulsen met lange pauzetijd bij het draadvonken

Het toepassen van korte spannings- en stroompulsen bij draadvonken vereist dat de polariteit wordt omgekeerd: werkstuk positief geladen (anode, hoogste materiaalafname) en draadelektrode negatief (kathode). Deze omgekeerde polariteit kan als volgt worden verklaard. Bij korte pulsen zorgen uitsluitend de elektronen voor de materiaalafname. De positieve ionen zijn veel trager en bereiken het oppervlak nog niet op het moment dat de stroompuls wordt afgebroken. Om de elektronen de kans te geven materiaal van het werkstuk af te nemen, moet dus de polariteit worden omgekeerd.

De bij draadvonken gebruikte dunne draadelektroden zijn in te delen volgens materiaalsoort (koper, messing, molybdeen, beklede draad), materiaaleigenschappen (vooral elektrische geleiding en sterkte) en draaddiameter (30 - 360 μm). Vroeger werd overwegend koperdraad gebruikt. Omwille van de grotere treksterktes schakelde men (ter verhoging van de precisie) over naar messingdraad. In het begin van de jaren '80 werden voor het eerst (vooral met zink) beklede draadsoorten op de markt gebracht, waarmee hogere snij snelheden werden bereikt.

Gedurende de verschillende vonkdoorslagen wordt niet alleen materiaal verwijderd, maar ook het werkstuk thermisch beïnvloed. Figuur 1.18 geeft een doorsnede van een werkstuk, gevonkt door middel van hoog energetische pulsen. De thermisch beïnvloede zone bestaat uit volgende lagen:

► **De witte laag:**

In principe wordt bij het instorten van de dampbel (zie hiervoor) het gesmolten materiaal door de ontstane onderdruk uitgestoten en dient het via het diëlektricum te worden afgevoerd. Tijdens het vonkproces wordt echter niet alle gesmolten materiaal verwijderd. Een deel van het gesmolten materiaal zal weer stollen, wat resulteert in de witte laag (wit als gevolg van verkleuring na aanetsen voor het maken van een 'schlie' of metaalpreparaat). Deze laag is zeer hard, maar vertoont veelal haarscheurtjes en moet om deze reden worden verwijderd. De dikte van de witte laag kan tijdens het vonkerosieproces aanzienlijk worden beperkt door kwalitatief hoogwaardig navonken. Het volledig verwijderen van de witte laag kan door mechanisch nabewerken, zoals bijvoorbeeld polijsten.

- **Thermisch beïnvloede (maar niet gesmolten) laag:**
Onder de witte laag bevindt zich nog een thermisch beïnvloede laag. Deze zone van het werkstukmateriaal werd door de verschillende vonkontladings opgewarmd en afgekoeld, wat resulteert in martensitische (harde) en ontlaten structuren.



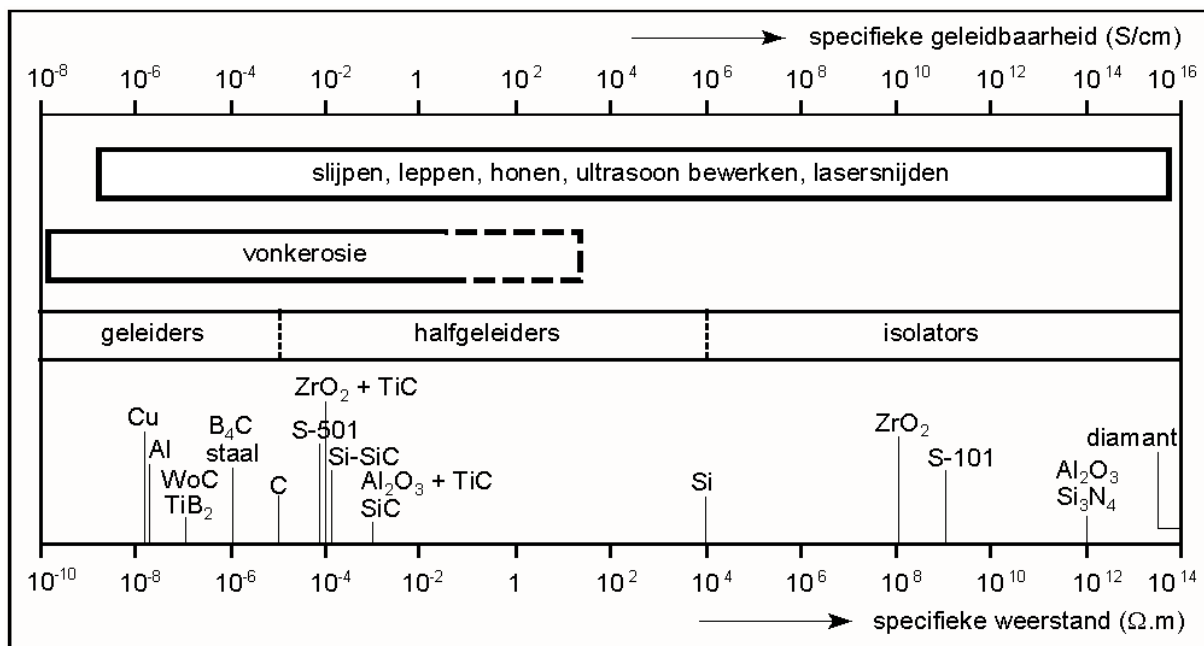
figuur 1.18 Thermisch beïnvloede zone

1.3 Werkstukmaterialen

Zoals in de voorgaande paragraaf beschreven, zijn alleen elektrisch geleidende materialen te vonken. Algemeen wordt aangenomen dat de elektrische weerstand niet groter mag zijn dan 100 Ωcm om het werkstukmateriaal te kunnen vonken. Materialen die hieraan voldoen zijn bijvoorbeeld ijzerlegeringen (o.m. staal), koper, aluminium en hardmetaal (WC-Co).

Figuur 1.19 geeft het toepassingsdomein van vonkerosie aan als functie van de elektrische geleidbaarheid van verschillende materiaalgroepen. Keramische materialen zoals Si_3Ni_4 , ZrO_2 , enz. zijn gezien hun hoge isolatiewaarde niet vonkbaar. Door het toevoegen van elektrisch geleidende fasen (TiN, TiB_2 , TiCN, enz.) verkrijgt men keramische composieten, die wel vonkbaar zijn. Een nadeel is echter dat de mechanische eigenschappen, zoals onder meer de hardheid, verminderen.

Het mechanisme en het debiet van materiaalafname, alsmede de verkregen oppervlaktekwaliteit worden eveneens beïnvloed door het werkstukmateriaal. Zo



figuur 1.19 Overzicht van de specifieke geleidbaarheid en weerstand voor materialen en materiaalgroepen

hebben bijvoorbeeld de samenstelling en structuur van een hardmetaal (grootte van de WC-korrel, hoeveelheid Co, enz.) een belangrijke invloed op het verkregen debiet bij draadvonken. Het draadvonken van hardmetaal wordt nog verder in detail behandeld in § 3.8. Ook de samenstelling van een staalsoort heeft invloed op de minimum te verkrijgen ruwheid (zie tabel 1.1).

tabel 1.1 Invloed van het werkstukmateriaal (wordt eveneens aangegeven met de ook bij ons bekende duitse 'Werkstoff'nummers) op de minimaal te verkrijgen ruwheid. De opgegeven ruwheidswaarden zijn opgemeten voor een bepaalde machine

Aanduiding	Werkstoff-nummer	Samenstelling (%)	Minimale oppervlakteruwheid (Ra, μm)
X210Cr12	1.2080	C = 2, Cr = 11.5	0,40
X165CrMoV12	1.2601	C = 1.6, Cr = 11.5, Mo = 0.6, V = 0.2, W = 0.5	0,28
85NiV4	1.2770	C = 0.52, Cr = 1, Mo = 0.2, Ni = 3	0,08
X5CrNi18-9	1.4301	C = 0.07, Cr = 18, Ni = 9	0,06
40CrMnMoS86	1.2312	C = 0.33, Cr = 1.6, Si = 0.6, Mn = 0.8, Mo = 0.4	0,13
X38CrMoV51	1.2343	C = 0.36, Cr = 5.0, Si = 1.1, Mo = 1.1, V = 0.4	0,08
X40Cr13	1.2083	C = 0.4, Cr = 13	0,09
90CrSi5	1.2108	C = 0.92, Cr = 1.2, Si = 1.2, Mn = 0.7	0,09
50NiCr13	1.2721	C = 0.5, Cr = 1.0, Mo = 0.2, Ni = 30	0,08
100MnCrV4	1.2510	C = 0.95, Cr = 0.5, Mn = 1.1, V = 0.1, W = 0.5	0,1
90MnCrV8	1.2842	C = 0.9, Cr = 0.3, Mn = 2.0, V = 0.1	0,1

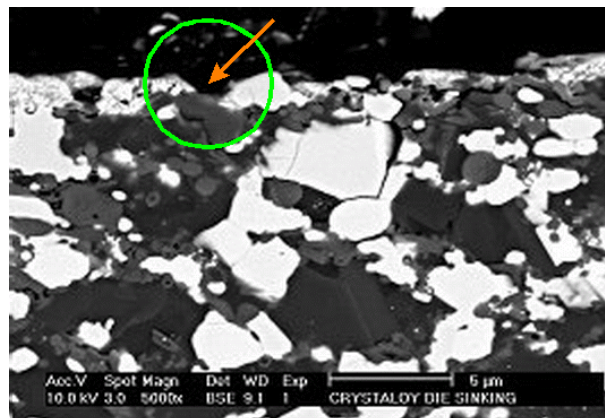
De vermelde ruwheidswaarden zijn opgemeten onder dezelfde condities (machine, beste generatorinstelling, spoeling en materiaal). De evolutie van generatoren en/of technologie kunnen lagere ruwheidswaarden geven, maar de onderlinge verschillen blijven bestaan.

Bij staalsoorten en hardmetalen (zie ook § 3.8) is het principe van materiaalafname vooral gebaseerd op smelten en verdampen van het materiaal (door actie van de vonk). Bij keramische materialen kan naast smelten en verdampen ook andere materiaalafname-mechanismen voorkomen zoals 'spalling' (schilferen/uitbrokkelen) en 'oxidatie/decompositie'. 'Spalling' doet zich vooral voor indien het materiaal gevoelig is voor scheurvorming en bovendien een slechte taaiheid heeft. Op plaatsen waar scheuren door vroegere vonkpulsen werden geïnitieerd, kunnen door de actie van volgende vonkpulsen stukken materiaal losbreken. Soms spreekt men in dit geval ook van materiaalafname door 'thermo shock' (figuur 1.20). Decompositie van het werkstukmateriaal komt bijvoorbeeld voor bij de bewerking van $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Door de hoge temperaturen (veroorzaakt door de vonkenergie) treden er bijkomende chemische reacties op, waardoor het materiaal gaat oxideren (door de aanwezige zuurstof in het water) en/of uiteenvallen (decompositie). Deze materiaalafname heeft een ruw oppervlak tot gevolg (zie figuur 1.21).

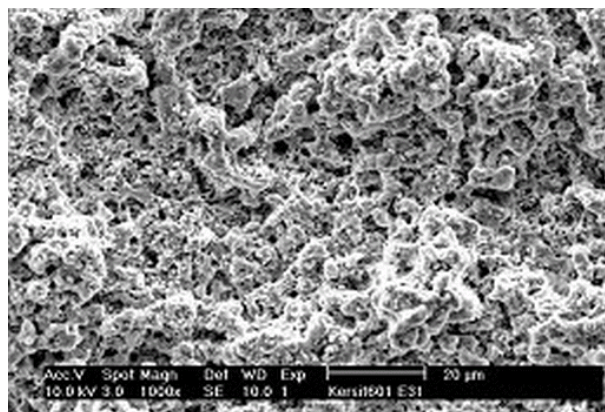
1.4 Uitvoeringsvormen

Figuur 1.22 geeft verschillende mogelijkheden van vonkerosie. De vorm van het werkstuk kan op een drietal manieren ontstaan (tabel 1.2). Bijvoorbeeld

doordat het gereedschap -dat een eenvoudige vorm kan hebben t.a.v. het te bewerken materiaal- een zekere voorgeschreven relatieve beweging uitvoert (zoals bijv. de beitelpunten bij draaien of frezen). De gewenste vorm van het werkstuk kan ook worden overgenomen van het gereedschap, zoals bij boren of stansen. Een combinatie van beiden (bijv. vonkerosief slijpen (zie figuren 1.23 en 1.24) is eveneens mogelijk bijvoorbeeld identiek aan profielslijpen.



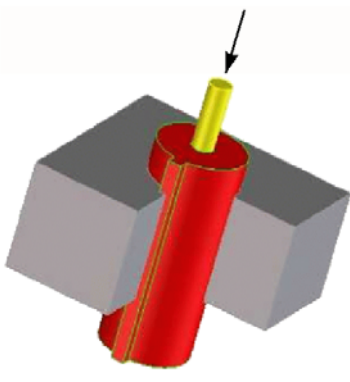
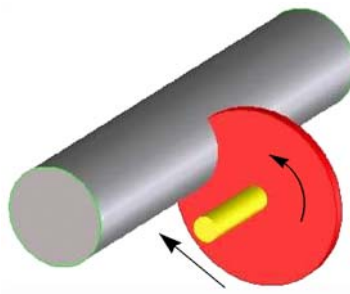
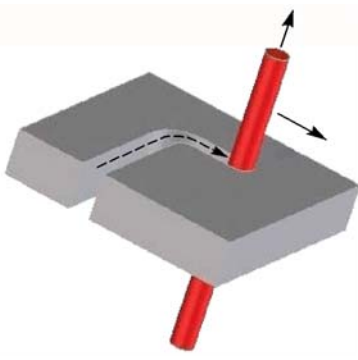
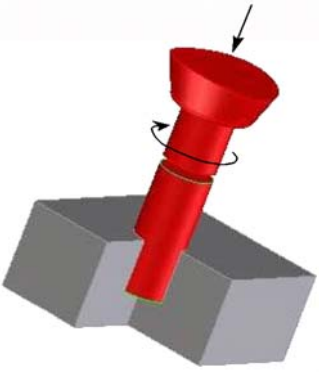
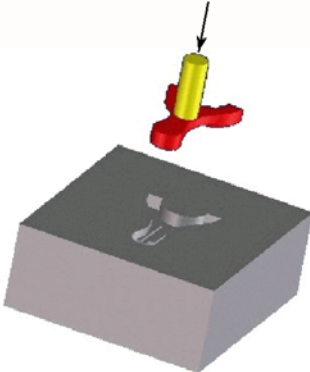
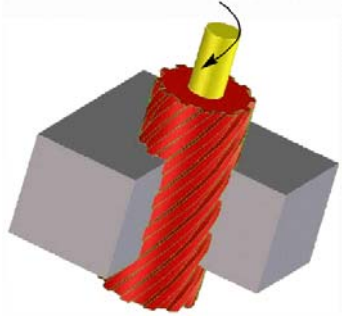
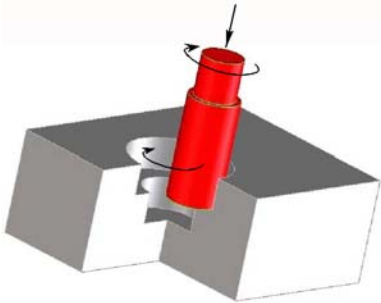
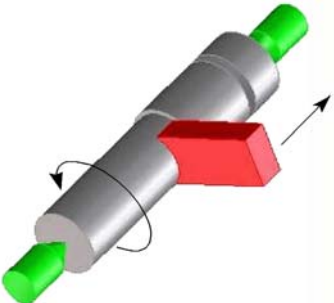
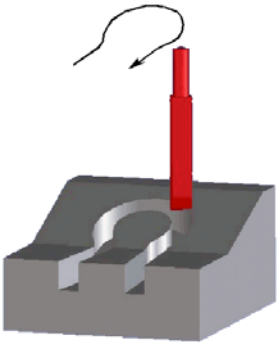
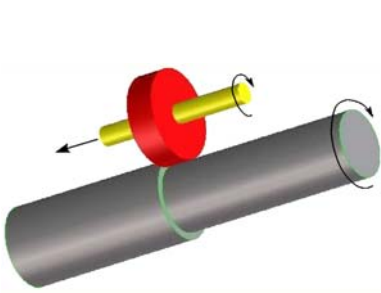
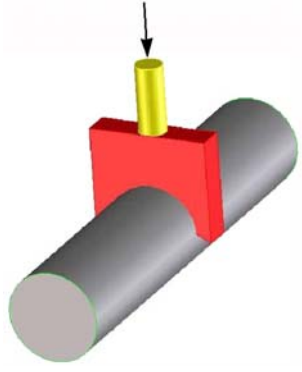
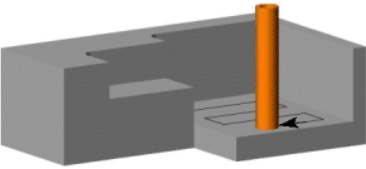
figuur 1.20 Voorbeeld van spalling bij het zinkvonken van $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiCw-TiC}$, Afzuurcondities: $U_e = 250\text{V}$; $i_e = 72\text{ A}$; $t_e = 7,5\text{ ms}$; $t_0 = 18\text{ ms}$. De pijl geeft aan waar een stuk van het materiaal is uitgebroken



figuur 1.21 Draadvonken van $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ → door oxidatie/decompositie krijgt men een grotere materiaalafname maar een ruwer oppervlak

Bij vonkerosief bewerken zijn alle drie methodes om de werkstukvorm te genereren mogelijk. Het overnemen (kopiëren) van de gereedschapsvorm in het werkstuk komt in de gereedschapsmakerij vaak voor. Bijvoorbeeld past men het basisprincipe, vonkerosief zinken, nog veel voor matrijzen toe, door de vorm van een voorgefabriceerde elektrode of vonkdoorn in gereedschapsstaal te kopiëren. Zinkvonken gebeurt niet alleen verticaal. Afhankelijk van de vonkmachine is in principe elke willekeurige richting mogelijk. Ook vonkboren (al of niet roterend) levert in het werkstuk de vorm op die de gebruikte boorelektrode heeft. Bij planetair, translerend of orbitaal vonken, contourvonken of baangestuurd vonken en vonkerosief profielslijpen ondergaat de elektrodevorm extra bewegingen door het continu aansturen van twee of meerdere machine-assen.

Daarnaast zijn het draadvonken (doorlopende gaten met complexe contour, bijvoorbeeld in snijstempels met willekeurige doorsneden) en vonkfrezen bewerkingstechnieken, die door continue beweging van een cilindrische elektrode over een baan tijdens het vonkproces de gewenste eindvorm tot stand brengen.

		
zinkvonken	vonkslijpen	draadvonken
		
vonkboren	zinkvonken (blind)	helicoïdaal vonken
		
planetair vonken	vonkdraaien	contourvonken
		
vonkslijpen (rond)	snijden	vonkfrezen

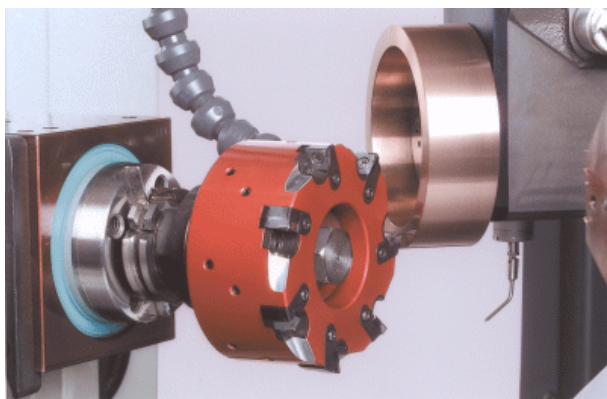
figuur 1.22 Principe-schetsen van vonkerosie-mogelijkheden

tabel 1.2 Metaalverwijderingstechnieken

metaalverwijderingsprincipe	vorm van het werkstuk		
	voorgeschreven door relatieve gereedschapsbeweging	verkregen door aanwezige gereedschapsvorm plus gereedschapsbeweging	aanwezig in de gereedschapsgeometrie
mechanisch verspanen	draaien, frezen, slijpen, zagen	profiel draaien, profielslijpen, (laser)honen	boren, stansen
chemisch (zonder stroomdoorgang)	chemisch frezen		etsen met masker
elektro-chemisch	elektro-chemisch draaien en slijpen	elektro-chemisch profiel-slijpen, honen en polijsten	elektro-chemisch zinken, boren en ontbramen
thermisch	smeltzagen, brandsnijden, plasmasnijden		
elektro-thermisch	vonkerosief snijden, draadvonken, vonkfrezen	planetair vonken, contourvonken, vonkerosief profiel-slijpen, vonkpolijsten,	zinkvonken, vonkboren
opto-thermisch (met licht of elektrisch geladen deeltjes)	laserstraalbewerken (L-snijden, -frezen/-ableren, -polijsten), elektronenstraalbewerken, ionenstraalbewerken		lasermarkeren (met masker), laserperforeren



figuur 1.23 Gecombineerde CNC-vonkslijpmachine



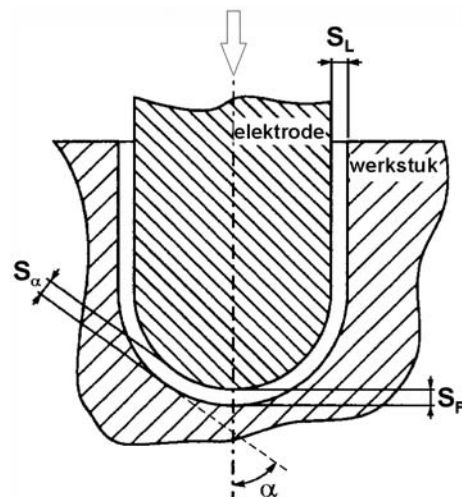
figuur 1.24 Detailopname van de komvormige elektrode tijdens aanmaak van een speciale meskopfrees

1.5 Proces-grootheden

1.5.1 Vonkspleetgrootheden

De vonkspleet is de zone tussen elektrode en werkstuk waarin de vonkontladingen plaatsvinden. De grootte van de vonkspleet "s" is afhankelijk van het proces. De spleet kan men verder onderscheiden in frontale spleet s_F (gemeten in de voedingsrichting) en zij- of laterale spleet s_L (gemeten loodrecht op de voedingsrichting).

Ook kan men uitgaan van de algemene aanduiding s_α , dit is de spleet gemeten onder een hoek α ten opzichte van de voedingsrichting (figuur 1.25).



figuur 1.25 Schets met aanduidingen van de vonkspleetgrootheden

Door de aanwezigheid van de vonkspleet moet, om een vorm (gat of matrijs) met de vereiste maten te kunnen eroderen, de geprogrammeerde baan van de elektrode en/of de afmetingen van de elektrode worden gecorrigeerd. Bij draadvonken en vonkfrezen kan de vonkspleet volledig worden gecompenseerd door een correctie op de geprogrammeerde baan door te voeren (analoog aan CNC freesmachines).

Indien de vorm van het werkstuk ontstaat door een vormgevende elektrode (bijv. klassiek zinkvonken), dan dienen de elektrodeafmetingen te worden aange-

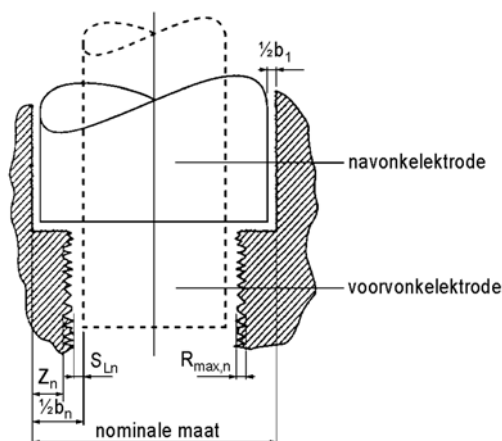
past. Het verschil in maat wordt de ondermaat "b" genoemd. De ondermaat "b" is bij een cirkelvormig gat het noodzakelijke maatverschil tussen gatdoorsnede en elektrodediameter.

De waarde van de vonkspleet verschilt al naargelang de instelling van de generator. Bij het voorvonken (pulsen met hoge energie) is de vonkspleet groter dan bij het navonken of finishen (pulsen met kleine energie). Dit heeft als gevolg, dat, indien de bewerking in meerdere trappen gebeurt (bijvoorbeeld voorvonken en navonken), een onderscheid dient te worden gemaakt tussen de voorberekingsondermaat b_n (n = aantal bewerkingstrappen) en de eindbewerkingsondermaat b_1 (nabewerkingsondermaat).

De voorberekingsondermaat b_n (figuur 1.26) is te berekenen met de formule:

$$b_n = 2s_{Ln} + 2R_{\max,n} + 2Z_n$$

s_{Ln} = zij spleet van de n-de voorberekingsstrap.
 $R_{\max,n}$ = grootste oppervlakteruwheid in de zij spleet van de n-de voorberekingsstrap.
 Z_n = bewerkingstoegift (in zijdelingse richting).



figuur 1.26 Schematische weergave van de ondermaat

De bewerkingstoegift Z_n hangt mede af van de dikte van de thermisch beïnvloede zone van het geërodeerde oppervlak. De gekozen grootte van Z_n berust op ervaring en hangt verder af van de fabricage- en plaats-tolerantie van de elektrode, de thermische uitzetting van de elektrode en de machinenauwkeurigheid. Voor de thermisch beïnvloede zone moet men rekenen met minstens $2R_{\max,n}$.

De eindbewerkingsondermaat b_1 (figuur 1.26) is te berekenen met de formule:

$$b_1 = 2s_{L1}$$

s_{L1} = zij spleet van de eindbewerkingstrap.

1.5.2 Bewerkingsgrootheden

- De **polariteit** is de wijze waarop elektrode en werkstuk zijn aangesloten op de generatorvoeding. Bij zinkvonken is meestal de elektrode + (anode) en het werkstuk - (kathode; normale polariteit); bij draadvonken is de draad - en het werkstuk + (omgekeerde polariteit).
- Het **actieve oppervlak** is het in de aanzetrichting op het werkstuk geprojecteerde elektrodeoppervlak dat actief betrokken is bij de vonkerosieve materiaalverwijdering.
- De **materiaalafname per puls** V_{we} is het per puls verwijderd werkstukvolume.
- De **elektrodeslijtage per puls** V_{Ee} is het volume elektrodemateriaal dat per puls wordt verwijderd.

- De **materiaalafname** V_w is het volume per tijdseenheid verwijderd werkstukmateriaal.
- De **volumetrische elektrodeslijtage** V_E is het volume elektrodemateriaal dat ten gevolge van erosie per tijdseenheid wordt afgenomen.

- De **relatieve volumetrische elektrodeslijtage** v is de verhouding tussen de volumetrische elektrodeslijtage V_E en de materiaalafname V_w .

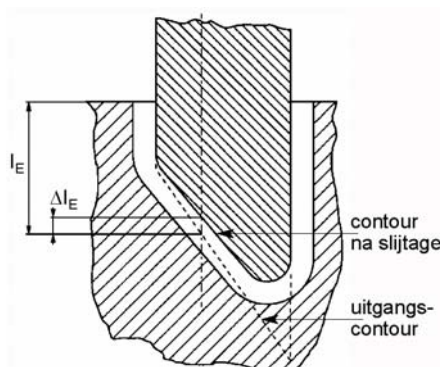
$$v = \frac{V_E}{V_w}$$

- De **relatieve lineaire elektrodeslijtage** v_l , (zie figuur 1.27) is de verhouding tussen de elektrodeslijtage in lengterichting Δl_E en de geërodeerde diepte $l_E - \Delta l_E$ (beide lengten gemeten evenwijdig aan de voedingsrichting).

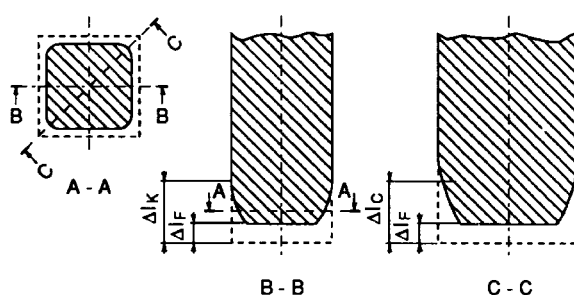
$$v_l = \frac{\Delta l_E}{l_E - \Delta l_E}$$

Afhankelijk van de meetplaatsen kan men de relatieve lengteslijtage (zie figuur 1.28) nog onderverdelen in:

- relatieve frontale slijtage v_{lf} .
- relatieve kantslijtage v_{lk} .
- relatieve hoekslijtage v_{lc} .



figuur 1.27 Lineaire elektrodeslijtage bij neergaande vonkbewerking



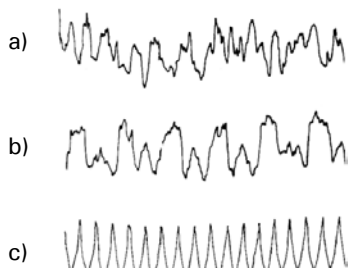
figuur 1.28 Aanduiding van de relatieve lengteslijtages bij neergaande vonkbewerking

Opmerking:

Sommige van deze begrippen zijn minder gebruikelijk in het draadvonken. Niettegenstaande zijn bovenstaande bewerkingsgrootheden binnen het vonken algemeen toepasbaar. Zo spreekt men bij het draadvonken over verschillende begrippen ten aanzien van materiaalverwijdering: zuiver lineair in mm/min, oppervlaktegebonden: meestal uitgedrukt als de hoeveelheid oppervlak gevonkt per tijdseenheid (mm²/min) of tegenwoordig ook wel volumetrisch: aantal mm³/min. Elektrodeslijtageparameters worden niet gegeven.

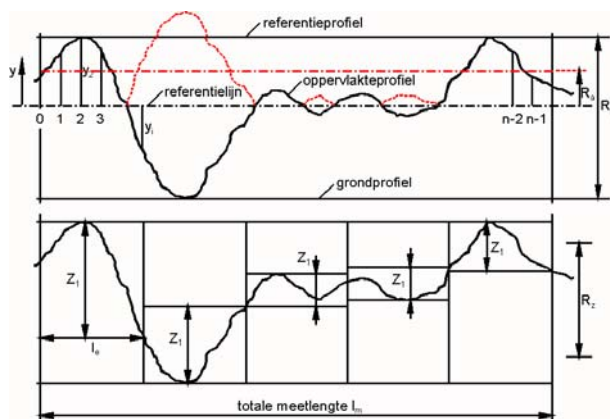
1.5.3 Grootheden gerelateerd naar oppervlaktekwaliteit

Elke vonkbewerking levert een werkstuk op dat bewerkingssporen vertoont met een bepaalde oppervlaktegesteldheid (ook wel oppervlaktekwaliteit genoemd). De definitie daarvan omvat over een beperkt gebied zowel ruwheid, golving, patroon als andere onvolkomenheden in en op het oppervlak, naast geometrische of vormafwijkingen. Geometrietoleranties worden bekend verondersteld en niet verder uitgewerkt, aangezien die bij vonken niet verschillen van andere 'verspanings' technieken. Het werkelijke oppervlak, bestaande uit golving, patroon en ruwheid is karakteristiek voor het vonkeroderen (zie figuur 1.29).



figuur 1.29 Karakteristiek ruwheidspatroon van resp. vonken (a), frezen (b) en draaien (c)

Een deel van de optredende, bewerkingsafhankelijke en niet te beïnvloeden golving wordt in de ruwheidsmeting meegenomen. Oppervlakteruwheid is een essentiële factor voor de functie van een werkstuk. Om de uit de bewerking resulterende onregelmatigheden van het oppervlak in een algemeen geaccepteerd getal aan te te geven, wordt gebruikgemaakt van verschillende genormeerde meetmethodes, meetwaarden en bijbehorende terminologie (DIN 4762 en ISO 4287). Meest voorkomend zijn de grootheden R_a , R_t en R_z (zie figuur 1.30).



figuur 1.30 Schematische aanduiding van de verschillende ruwheidswaarden

Om de verschillende waarden te bepalen wordt door het ruwheidsprofiel een referentielijn getrokken en worden parallelle lijnen getrokken door het diepste punt (grondprofiel) en het hoogste punt (referentieprofiel). De referentielijn deelt het profiel zodanig, dat de som van de materiaalgevulde oppervlakken boven de referentielijn gelijk is aan de som van de materiaalvrije vlakken onder de referentielijn.

Meest toegepast in de praktijk is de ruwheid R_a in μm (ook wel AA genoemd (USA) ofwel Arithmetic Average): het rekenkundige gemiddelde van de absolute waarden van de afstanden ($y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$) van punten van het oppervlakprofiel tot de referentielijn.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i|$$

De maximale ruwheidshoogte R_t (respectievelijk R_{max}) is de grootste ruwheidshoogte die binnen de meetlengte l_m voorkomt.

De gemiddelde ruwheidshoogte R_z (waarbij ten opzichte van R_t afzonderlijke extreme meetwaarden minder sterk meetellen) is gelijk aan het rekenkundig gemiddelde van vijf afzonderlijke waarden Z_i ($= R_{ti}$) die worden gemeten op vijf opeenvolgende basislengten l_i van gelijke lengte binnen de totale lengte l_m .

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

In de praktijk wordt soms ook gebruik gemaakt van de normering volgens VDI. De relatie tussen R_a en VDI normering is gelijk aan:

$$\text{VDI-nummer} = 20 \cdot \log(10 \cdot R_a)$$

Tabel 1.3 geeft de relatie weer tussen R_a , R_t en de VDI nummers.

Gevonkte oppervlakken hebben een typische textuur, die echter niet in een norm is vastgelegd. Alleen bovenstaande ruwheidswaarden zijn niet voldoende om deze texturen volledig eenduidig te karakteriseren. Meestal gaat men in onderling overleg uit van een bepaalde textuur weergegeven op ruwheidslinialen, die in de handel verkrijgbaar zijn (zie figuur 1.31).

tabel 1.3 Vergelijkingstabel van ruwheidswaarden

VDI 3400	Klasse ISO 1302	R_a μm	R_t μm	VDI 3400	Klasse ISO 1302	R_a μm	R_t μm
0	N3	0,10		23		1,40	
1		0,11		24		1,62	
2		0,12		25	N7	1,80	
3		0,14		26		2,00	10-16
4		0,16		27		2,2	
5	N4	0,18		28		2,5	
6		0,20	1-1,6	29		2,8	
7		0,22		30	N8	3,2	16-25
8		0,25		31		3,5	
9		0,28		32		4,0	
10		0,32	1,6-2,5	33		4,5	
11	N5	0,35		34		5,0	25-40
12		0,40		35		5,6	
13		0,45		36	N9	6,3	
14		0,50	2,5-4,0	37		7	
15		0,56		38		8	40-63
16		0,63		39		9	
17		0,70		40		10	
18	N6	0,80	4,0-6,3	41		11,2	
19		0,90		42	N10	12,6	63-100
20		1,00		43		14	
21		1,12		44		16	
22		1,26	6,3-10	45		18	



figuur 1.31 Voorbeeld van een ruwheidnormaal met voor zinkvonken gangbare ruwheden

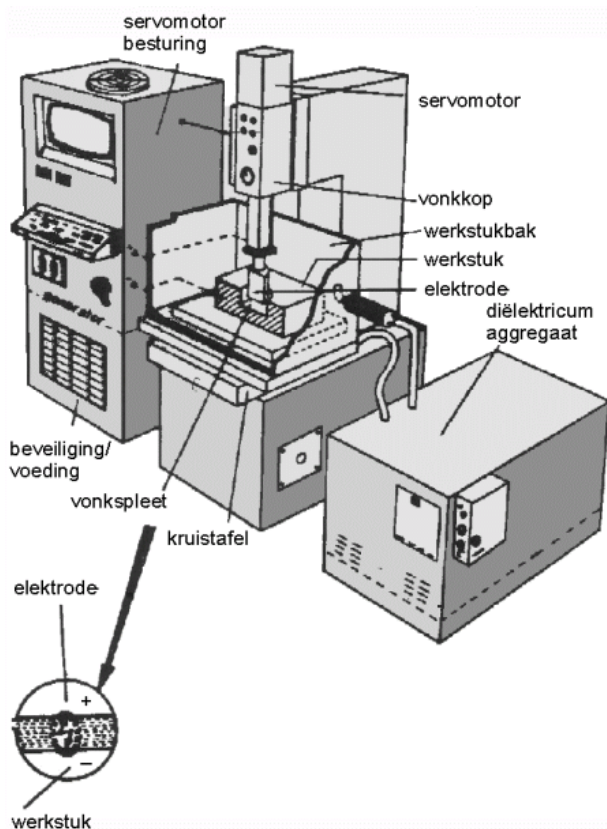
Visueel, of via aftasten met een nagel van de verlangde ruwheid op de ruwheidsliniaal, wordt vergelijkenderwijs de ruwheid van het werkstuk vastgesteld.

In het oppervlak kunnen zich verschillende afwijkingen voordoen, zoals bijvoorbeeld een kras, scheur, porie of insluitsel. NEN-EN-ISO 8785 (aug.'99) geeft een overzicht van overige oppervlakte-onvolkomenheden (exclusief ruwheid en golving) met de erbij gebruikte termen, definities en parameters.

1.6 De vonkerosiemachine

Manueel bediende of numeriek bestuurd vonkerosiemachines kenmerken zich door een aantal EDM-specifieke onderdelen (zie figuur 1.32):

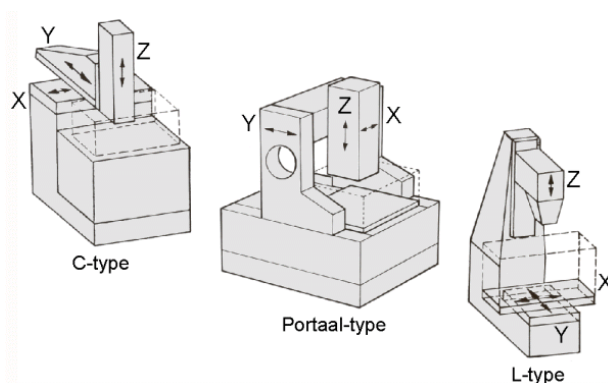
- **De mechanische opbouw**
Deze vertoont sterke gelijkenis met andere bewerkingsmachines. Alleen is de bewerkings- of vonkzone steeds afgeschermd door een vloeistofdichte werkbak.
- **De generator**
De generator levert de energiepulsen voor het erosieproces.
- **Het servosysteem**
Het servosysteem zorgt voor de relatieve voeding van de elektrode t.o.v. het werkstuk.
- **Het diëlektricumstelsel**
Het diëlektricumstelsel zorgt voor de spoeling in de spleet. Het bestaat uit een reservoir, een filtereenheid om de geërodeerde metaaldeeltjes op te vangen, een pomp die de vloeistof rond pompt, eventueel een koelunit, de werkbak en bijbehorende leidingen en slangen.
- **Een aangepaste numerieke besturing**
- **Beveiligingen**



figuur 1.32 Opbouw van een CNC vonkerosie-installatie

Naar mechanische opbouw kunnen vonkerosiemachines worden ingedeeld in 2 groepen of types:

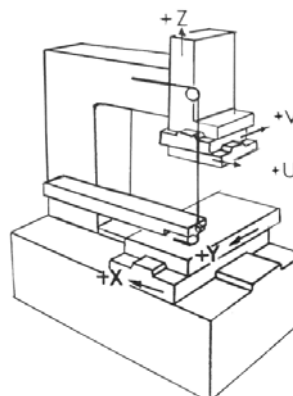
- Een eerste type vonkmachine (§ 2.2), uitgevoerd met een C-, L- of portaalframe (zie figuur 1.33), wordt gebruikt voor verschillende bewerkingen, zoals het zinkvonken, planetair vonken (§ 2.8), vonkfren (§ 2.10.2), baangestuurd vonken (§ 2.9), enz. Deze machines lijken sterk op verticale freesmachines,



figuur 1.33 Schematische weergave van verschillende types vonkerosiemachines

waarbij het gereedschap, met behulp van een gereedschapshouder, in een machinekop wordt opgenomen. Hierbij is in hoofdzaak sprake van drie hoofdasrichtingen namelijk: langs, dwars en verticaal. Deze worden op de machine uitgevoerd door respectievelijk de X-, de Y- en de Z-as.

- Het tweede type is de draadvonkmachine (zie figuur 1.34 en § 3.2), voorzien van een mechanisch systeem voor het geleiden, controleren en toevoeren van de pulsen aan de draadelektrode. Draadvonkmachines zijn steeds numeriek bestuurd en bij 5-assige machines (X,Y,Z + U en V) kan de draad schuin worden gesteld, zodat complexe geometrieën ook conisch kunnen worden uitgesneden.



figuur 1.34 Schematische weergave van een draadvonkmachine

Afmetingen, werkbereik en gewicht van het machinegestel worden bepaald door de eisen die worden gesteld aan de bewegingsmogelijkheden van het werkstuk, dat is geplaatst op de opspantafel, en aan de statische stijfheid in verband met de positioneer- en repeteernauwkeurigheid. Dynamische stabiliteitsproblemen als gevolg van het materiaalverwijderingsproces doen zich, in vergelijking met de conventionele bewerkingstechnieken, in principe bij vonkerosiemachines niet voor, door de relatief lage processnelheden en de contactloze (krachtenvrije) materiaalverwijdering. Spoeling kan wel stationaire en dynamische krachten veroorzaken op de elektrode en het werkstuk. In sommige gevallen beïnvloeden deze de stabiliteit van de elektrode.

In verband met temperatuur- en trillingsbeïnvloeding zijn bij goed ontworpen vonkmachines de aandrijvingen geïsoleerd, essentiële machinedelen gekoeld en is het complete diëlektricumstelsel meestal in een afzonderlijk unit ondergebracht.

De opspanmogelijkheden voor het werkstuk, de opspanning van de elektrode en de verschillende assen die zorgen voor de nodige bewegingen, vormen een

belangrijk onderdeel van de vonkerosiemachine in verband met het nauwkeurig positioneren van het werkstuk ten opzichte van de elektrode. De eisen die aan dit systeem worden gesteld, betreffen voornamelijk:

- de stijfheid van de constructie in verband met de totale belasting;
- de vlakheid van het opspanvlak;
- de evenwijdigheid en haaksheid van het opspanvlak;
- de nauwkeurigheid en de reproduceerbaarheid van de x- en y-assen.

Meest voorkomende drie meetsystemen zijn de indirect metende standaard stappenmotoren of een resolver op de aandrijfas en op de nauwkeurigste machines direct metende lineaire glazen meetlatten.

Over het algemeen vallen daardoor de meetwaarden binnen de gestelde normen, zodat bij zorgvuldig instellen positioneernauwkeurigheden van ongeveer $5\text{ }\mu\text{m}$ bereikbaar zijn.

1.6.1 De generator

De generatoren voor vonkerosie worden onderscheiden naar de wijze van de spanningsomvorming, de pulssturing en de vonkontlading.

De vereiste elektrische energie wordt verkregen uit een gelijkspanningsbron. De ontladingen kunnen ongesteurd plaatsvinden door zelfontlading en relaxatie, indien een voedingseenheid (inductiviteit, capaciteit of een combinatie van beide) beschikbaar is. De ontladingen kunnen ook gestuurd plaatsvinden, indien een bestuurd schakelelement aanwezig is (bijv. buis, thyristor, transistor). Voor bepaalde toepassingen is de polariteit van de ontlading om te wisselen (omgekeerde polariteit). Bij moderne generatoren, vooral voor het bewerken van hardmetalen, wordt de polariteit constant omgewisseld.

Generatortypen

De pulsform is afhankelijk van de opbouw van de generator. Vroeger werd de relaxatiegenerator (RLC-generator, waarbij R = weerstand; L = inductiespoel; C = condensator) veel gebruikt. Relaxatiegeneratoren hebben als kenmerk:

- dat de ontlading automatisch plaatsvindt vanuit een energiebuffer;
- dat het eind van de ontlading wordt bereikt als de bufferenergie is verbruikt (relaxatie);
- en dat de duur en opeenvolging van de ontladingen, behalve van de samenstelling der bouwelementen, essentieel afhankelijk is van de pulsform.

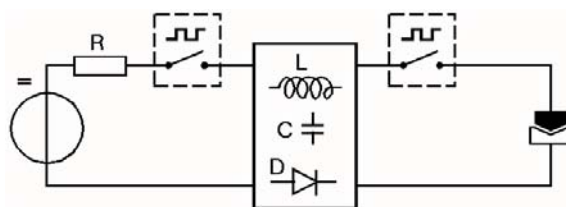
Bufferelementen kunnen zijn capaciteiten, inducties of combinaties van beide (RC-, RLC-, RLCD- of LC-typen); zie figuren 1.35 en 1.36.

Extra schakelelementen kunnen voor besturen van bepaalde pulsformen worden toegepast (gestuurde relaxatiegeneratoren).

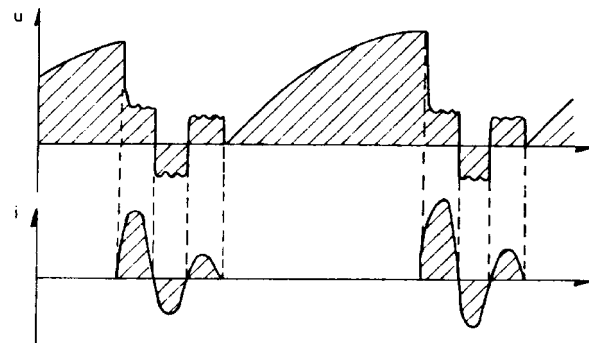
Alhoewel de relaxatiegenerator in sommige machines nog wordt gebruikt (voor 'finishen'), is deze niet ideaal omdat:

- de pulsenergie niet constant is;
- opladen tijd kost;
- de materiaalafname V_w gering is door de relatief lange pauzetijd t_0 ;
- de relatieve volumetrische elektrodeslijtage ν groot is door de ongunstige pulsform.

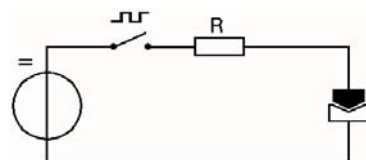
Een ander type generator is de statische pulsgenerator. Statische pulsgeneratoren hebben als kenmerk dat de spanningsbron over schakelelementen verbonden is met de vonkspleet en dat de duur en de frequentie van de ontladingen in wezen afhangen van de sturende schakeling (zie figuren 1.37 en 1.38).



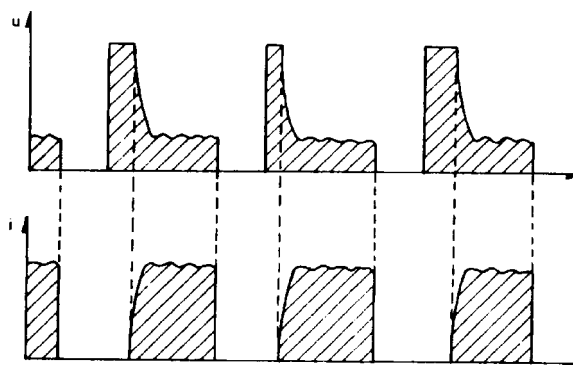
figuur 1.35 Relaxatiegenerator, gestuurd of niet gestuurd (principeschema)



figuur 1.36 Relaxatiegenerator, spannings- en stroomverloop (schematisch)



figuur 1.37 Statische pulsgenerator (principeschema)



figuur 1.38 Statische pulsgenerator, spannings- en stroomverloop (schematisch)

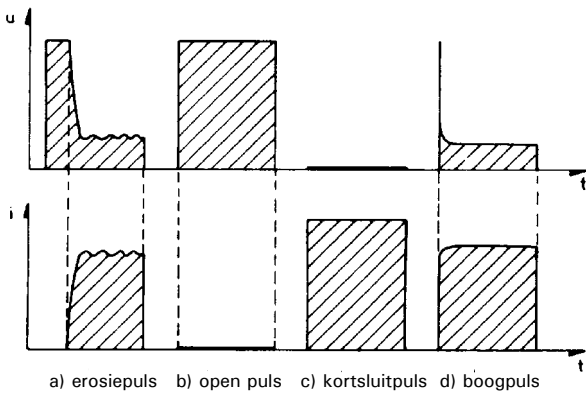
Elektrische grootheden

Het elektrisch verloop van de ontladingen wordt gekenmerkt door het verloop van pulsspanning $u(t)$ en pulsstroom $i(t)$.

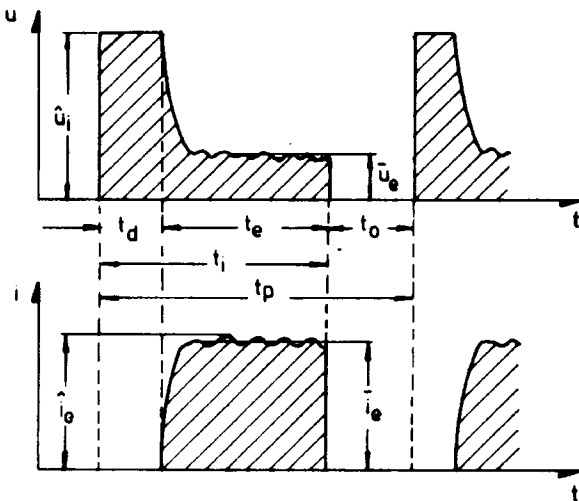
Voor de meest gebruikte generatortypen tonen de figuren 1.36 en 1.38 schematisch het verloop van spanning en stroom. Voor de belangrijke groep van de statische pulsgeneratoren zijn in figuur 1.39 naast de normale erosiepuls (a), de eveneens voorkomende bijzondere pulsformen weergegeven (open puls (b), kortsluitpuls (c) en vlamboogpuls (d)). Bij correcte procesinstellingen treden zulke spannings- en stroompulsen in het algemeen zelden op.

In figuur 1.40 zijn de hierna nog te definiëren elektrische grootheden getoond als voorbeeld van de statische pulsgenerator en wel het spannings- en stroomverloop van twee op elkaar volgende pulsen.

- De **effectieve pulsduur** t_e is het tijdsverloop gedurende welke de puls de materialen werkelijk effectief erodeert.



figuur 1.39 Karakteristiek spannings- en stroomverloop van voorkomende pulsen bij een statische pulsgenerator



figuur 1.40 Schets van de elektrische grootheden als voorbeeld voor een statische pulsgenerator

- De **ontstekingsvertragingstijd** t_d is de tijdsduur die verstrijkt na het aanbrengen van de elektrische puls tot de doorslag.
- De **generatorpulsduur** t_i is de tijdsduur van de elektrische puls, geleverd door de generator. Deze is gelijk aan de som van de pulsduur en de ontstekingsvertragingstijd.
 $t_i = t_e + t_d$
- De **pulsintervaltijd** t_o is de pauzetijd tussen twee opeenvolgende pulsen.
- De **pulsperiodesduur** t_p is de tijdsduur tussen inschakeling van de ene puls en het inschakelen van de volgende puls. Deze is gelijk aan de som van de generatorpulsduur t_i en de pulsintervaltijd t_o .
 $t_p = t_i + t_o$
- De **pulsfrequentie** f_p is het totaal aantal pulsen door de generator geleverd per tijdseenheid.
 $f_p = \frac{1}{t_p}$
- De **effectieve puls-frequentie** f_e is het totaal aantal pulsen dat per tijdseenheid in de spleet optreedt en dat effectief erodeert.
- De **relatieve frequentie** λ is de verhouding tussen de effectieve puls-frequentie f_e en de puls-frequentie f_p .
 $\lambda = \frac{f_e}{f_p}$

- De **relatieve pulsduur** φ is de verhouding tussen de effectieve pulsduur t_e en de generatorpulsduur t_i .
 $\varphi = \frac{t_e}{t_i}$

- De **relatieve generatorpulsduur** τ is de verhouding tussen de generatorpulsduur t_i en de pulsperiode t_p .
 $\tau = \frac{t_i}{t_p}$

- De **open generatorspanning** $\hat{u}_i$ is de amplitude van de pulsen die de generator aan de vonkspleet levert in open toestand, dus zonder erosie of kortsluiting te veroorzaken.

- De **momentane pulsspanning** u_e is de actuele spanning over de vonkspleet gedurende de ontlading.

- De **momentane pulsstroom** i_e is de actuele elektrische stroom door de vonkspleet gedurende de ontlading.

- De **pulsenergie** W_e is de elektrische energie van de puls die aan de vonkspleet wordt toegevoerd.

$$W_e = \int_0^{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt = \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$$

- Het **momentaan pulsvermogen** P_e is het actuele vermogen van de puls toegevoerd aan de vonkspleet.
 $P_e(t) = u_e(t) \cdot i_e(t)$

- De **gemiddelde pulsspanning** $\bar{u}_e$ is de rekenkundig gemiddelde waarde van de pulsspanning tijdens erosie (gedurende t_e).

- De **gemiddelde pulsstroom** $\bar{i}_e$ is de rekenkundig gemiddelde waarde van de pulsstroom tijdens erosie (gedurende t_e).

- De **gemiddelde werkspanning** U is de rekenkundig gemiddelde waarde van de pulsspanning gedurende een reeks pulsen tijdens het vonken (servoregel-grootheid).

- De **gemiddelde werkstroom** I is de rekenkundig gemiddelde waarde van de pulsstroom gedurende een reeks pulsen tijdens het vonken (servoregel-grootheid).

- De **maximale stroomdichtheid** A/cm^2 is de hoogst toelaatbare stroom per vierkante centimeter actief elektrodeoppervlak.

1.6.2 Het servosysteem

Een servosysteem is in wezen een volgsysteem. Voor een vonkerosiemachine betekent dit dat de elektrode de gevonkte vorm in het werkstuk volgt. De belangrijkste functie van het systeem is dan ook het realiseren van een constante frontale spleet.

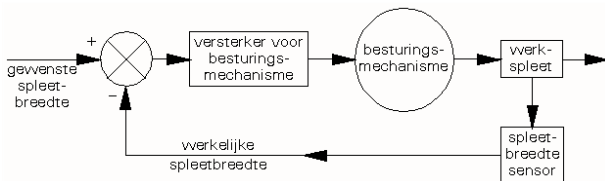
Door materiaalverwijdering uit het werkstuk zal de afstand tussen de elektrode en het werkstuk steeds groter worden. Handhaven van een constante spleet zal alleen mogelijk zijn, indien de spleetverandering wordt gedetecteerd en het servomechanisme zorgt voor een relatieve voeding. Om dit te bereiken moet men aan de regelnauwkeurigheid en de regelsnelheid van het servomechanisme een aantal eisen stellen. De meetregelnauwkeurigheid mag slechts een deel van de spleetbreedte bedragen. Bij spleten in de orde van grootte van enkele tientallen micrometers dient de regelnauwkeurigheid daarom beter dan een enkele μm te zijn.

Verder moet het systeem voldoende snel reageren op veranderingen in de spleet, zoals kortsluitingen en 'open pulsen'. Kortsluitingen duiden op een te kleine

spleet (servoreactie: elektrode terugtrekken), terwijl 'open pulsen' worden veroorzaakt door een te grote spleet (reactie elektrode: dichter naar werkstuk).

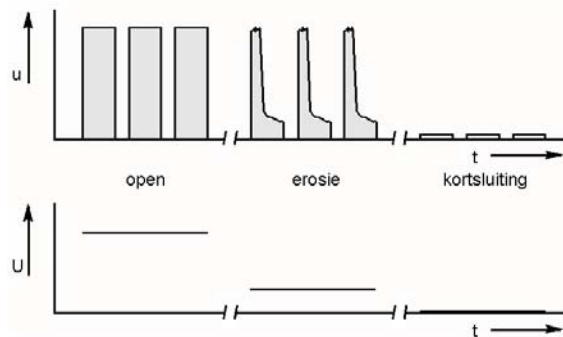
Elektrische opbouw van het servosysteem

Aangezien het vonkerosieproces zich in de ruimte tussen de elektrode en het werkstuk afspeelt, is het duidelijk dat de informatie over het al of niet goed verlopen van het erosieproces 'uit de spleet' moet worden verkregen. Figuur 1.42 toont schematisch zo'n spleetbreedteregeling door middel van een servomechanisme. Dat vergelijkt bijvoorbeeld een over de vonkspleet gemeten spanning met de ingestelde waarde. Het verschil wordt elektrisch versterkt en als stuurcommando toegevoerd aan de servomotor(en) in actie. Directe spleetmeting met behulp van mechanische meetmethoden (bijv. meetklok in 0,01 mm) is uit praktische overwegingen onmogelijk. Indirecte meting van de spleet is echter wel uitvoerbaar en wel door de elektrische procesgrootheden.



figuur 1.42 Schema van een spleetbreedteregeling door middel van een servomechanisme

De gemakkelijkst te bepalen grootte en meest toegepaste 'maat' voor de spleet (spleetsensor) is de gemiddelde spanning over de vonkspleet. Voor de mogelijke pulsvormen toont figuur 1.43 de bijbehorende gemiddelde pulsspanningen over de vonkspleet.



figuur 1.43 Verloop van de pulsspanning over de vonkspleet (boven) en de bijbehorende gemiddelde spanning (onder)

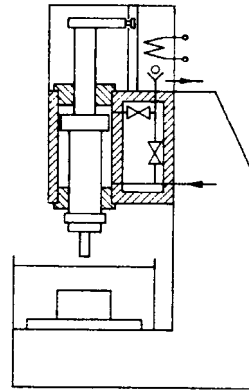
1. **Open pulsen**
Hierbij vindt geen doorslag plaats en zal de gemiddelde spanning een relatief grote waarde bezitten.
2. **Erosiepulsen**
Bij erosiepulsen vindt doorslag in de vonkspleet plaats en dus een effectieve materiaalafname.
3. **Kortsluitingen**
Deze hebben een relatief lage waarde van de gemiddelde spanning tot gevolg.

De gemiddelde spanning over de vonkspleet is dus een maat voor de spleetgrootte.

Een nadeel van deze sensor is, dat deze afhankelijk is van de verhouding tussen generatorpulsduur en pulsperiodes. Wijziging van één van beide leidt tot wijziging van de instelgevoeligheid van het regelsysteem. Door bijzondere schakelingen toe te passen, kan dit bezwaar worden ondervangen.

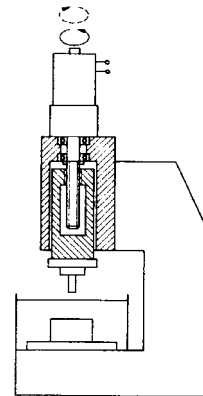
Bij servosystemen komen verschillende uitvoeringen voor, die getypeerd worden naar het principe van de

aandrijving. Het oudst is (bij zinkvonken) het elektrohydraulische servosysteem (figuur 1.44) waarbij middels een aantal kleppen hydraulische vloeistof onder druk zodanig wordt gestuurd, dat de gewenste beweging van de servokop (omhoog of omlaag) plaatsvindt. Dit bood als voordeel de mogelijkheid te werken met wisselende belasting (lees variërend elektrodegewicht), waarvoor kon worden gecompenseerd. Groot nadeel vormde de aanwezigheid van olie met kans op lekkage en noodzaak tot periodiek verversen (en ontluchten).



figuur 1.44 Elektrohydraulisch servosysteem met hydrostatische geleiding van de werkkop

Het bekendst zijn in het zink- en draadvonken elektro-mechanische systemen (figuur 1.45) die meestal zijn uitgerust met een (schroef- of) kogelomloopspil, al of niet direct gekoppeld aan een gelijkstroom- of stappenmotor. Het gaat hierbij om een aanzienlijk simpelere en minder onderhoudsgevoelige constructie op basis van industrieel bewezen componenten.

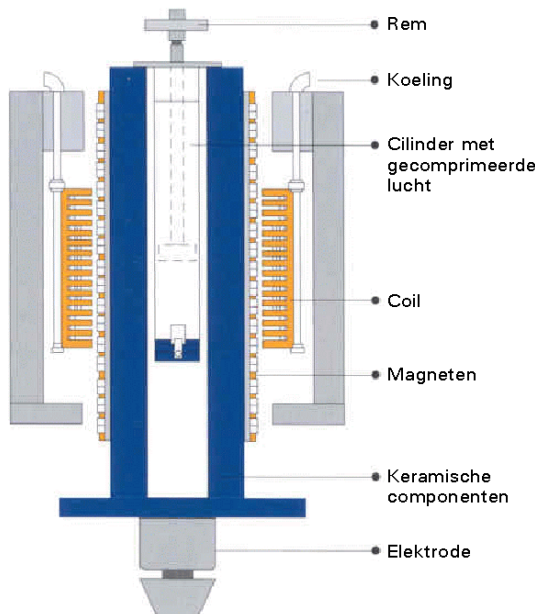


figuur 1.45 Elektromechanisch servosysteem met schroefspil (met gelijkstroom- of stappenmotor)

Naast genoemde varianten zijn inmiddels zowel zink- als draadvonkmachines op de markt waarbij alle servosassen direct worden aangestuurd met lineaire motoren. Dit zijn als het ware vlak uitgerolde elektromotoren. Hiermee zijn stootvrij hoge versnellingen haalbaar, waarbij de nauwkeurigheid gewaarborgd blijft. Dit heeft een gunstig effect op de tijd welke normaal verloren gaat met de pulserende bewegingen van de bewerkingsas, vooral bij lange slagen.

In antwoord op de prestaties van lineaire motoren zijn intussen geavanceerde types kogelomloopspillen, wat snelheid en nauwkeurigheid aangaat, aanzienlijk verbeterd.

Positioneringsassen kunnen zeer snel (50 m/min) en nauwkeurig in positie worden gebracht. Lokale slijtage-effecten, die ontstaan omdat machines vaak lang op eenzelfde klein gebied van de as bewegen, behoren tot het verleden (zie figuur 1.46).



figuur 1.46 Schematisch overzicht van een spindel met lineairmotor

Het snel en nauwkeurig kunnen positioneren van een dergelijke hoofdas, draagt ook positief bij aan het optimaal en accuraat aansturen/afregelen van de vonkspleet.

De snelle bewegingen hebben ook hun effect op de spoeling. In korte tijd is bij zinkvonken de vonkdoorn desnoods geheel uit het werkstuk terug te trekken. In combinatie met digitale elektronische regelingen ontstaat de mogelijkheid adequaat te anticiperen op gegenereerde vonkpulsen.

Als nadeel kan de vooralsnog hogere aanschafprijs, de aan de kop en onder de diëlektricumbak optredende warmteontwikkeling en het aanwezige magneetveld worden aangemerkt. Vanwege de verticale kop van zinkvonkmachines moet goed rekening worden gehouden met de pomp- en zuigeffecten van elektroden met in verhouding grotere frontale oppervlakken.

De wisselende druk- en trekkrachten die hierbij optreden moeten niet worden onderschat, omdat deze het gedrag in bedrijf nadelig kunnen beïnvloeden. Constructief kan in de opbouw van de machine worden volstaan met minder losse onderdelen per aangedreven as, mede omdat sprake is van een ingebouwde geleiding. Daarnaast zijn nog enkele servosystemen ontwikkeld voor min of meer speciale vonkerosiegebieden.

De lineaire geleiding van de bewerkingsassen wijkt nauwelijks af van de in de huidige gereedschapswerktuigen gebruikelijke constructie en kan uitgevoerd zijn met glij-, kogel-, rol- of naaldlagers, dan wel met een hydrostatische lagering. Positiemeting verloopt hetzij direct via glaslinialen, of indirect door middel van encoders, of gecombineerd.

Bij CNC machines zijn de overwegend elektro-mechanische aandrijvingen van het servosysteem geïntegreerd in de numerieke besturing (zie § 2.2.3 en figuur 1.47).

Belangrijke eisen gesteld aan dergelijke systemen zijn:

- ▶ de beweging van de werkkop moet reproduceerbaar zijn binnen 0,01 mm;
- ▶ de beweging van de werkkop moet haaks zijn op het vlak van de kruistafel (afwijking max. 0,01/100 mm);
- ▶ de reactietijd van het systeem moet korter zijn dan 0,1 s.

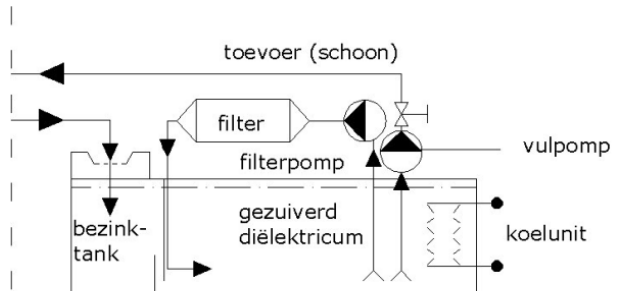


figuur 1.47 Vonkmaschine uitgerust met een modern elektromechanisch servosysteem

1.6.3 Het diëlektricumstelsel

Om invloed op het proces uit te oefenen dient het diëlektricum (zie ook § 1.2 - "functie van het diëlektricum") op de gewenste plaats te worden gebracht. Hierbij worden met het oog op het proces eisen gesteld aan dit diëlektricum ten aanzien van de temperatuur en de zuiverheidsgraad.

Het diëlektricumstelsel (figuur 1.48) bestaat uit enkele reservoirs voor opslag, pers- en zuigpompen voor aan- en afvoer, filters voor de reiniging en koelers voor handhaving van de gewenste temperatuur van het diëlektricum, aan elkaar gekoppeld door slangen en leidingen.



figuur 1.48 Schematisch overzicht van een diëlektricumstelsel voor zinkvonken

In verband met temperatuur- en trillingsbeïnvloeding zijn bij goed ontworpen vonkmachines de aandrijvingen geïsoleerd, essentiële machinedelen gekoeld en is het

complete diëlektricumstelsel meestal in een afzonderlijke unit ondergebracht. Ook bevinden zich hierin voorzieningen voor het constant houden van de diëlektricumtemperatuur in bedrijf. Deze temperatuurstabilisatie wordt ook gebruikt voor een verbeterd thermisch gedrag van de essentiële machinedelen (zie ook § 2.4). De specifieke spoelmethode voor zowel zinkvonken als voor draadvonken, worden respectievelijk verder behandeld in de paragrafen 2.5.3 en 3.4. Drukmeters of doorstroom(flow-)meters zijn als regelapparatuur noodzakelijk voor het instellen van de optimale spoeling.

Praktisch toegepaste filtersystemen zijn:

- het papier-patroonfilter;
- het kiezelgoerfilter;
- het schijvenfilter.

Het koelen kan plaatsvinden via waterkoeling of met behulp van een condensorsysteem.

Meestal is een spoelinjector ingebouwd die nuttig kan zijn bij diepe vonkerosieve zinkbewerkingen. Een spoelpuls wordt gegeven indien de elektrode (automatisch) volgens een ingestelde cyclus of adaptief geregeld wordt geheven. Beveiligingen, zoals thermostaat en diëlektricumniveauregelaar, zijn tevens in de diëlektricumbak ingebouwd.

Naast de invloed die het diëlektricum heeft op het proces is de keuze ervan ook bepaald door:

- *het kookpunt en kooktraject*. Een gunstig kooktraject is nodig in verband met dampvorming; een laag kookpunt en steil kooktraject in verband met de ontsteking;
- *de giftigheid*, vooral in verband met dampontwikkeling;
- *de viscositeit*. In verband met de spoeling is bij kleine spleten een lage viscositeit noodzakelijk. Bij grotere spleten, wat samengaat met grotere stromen, is een hogere viscositeit gewenst;
- *het vlampunt* (brandgevaar);
- *de agressiviteit*. Olie is alleen agressief bij oxidatie (zuur worden). Daarom zwavelgehalte max. 0,03%.

De in koolwaterstoffen aanwezige aromaten kunnen leiden tot huid aantasting en aantasting van synthetische rubbersoorten. Daar aromaten altijd min of meer aanwezig zijn, moet het diëlektricum een paraffinisch karakter hebben, het aniline-punt of -gebied is belangrijk. Demiwater past men toe op draadvonkmachines en speciale microvonkmachines, omdat het zeer dunvloeibaar is en een korte pulsduur toelaat. Dat van alle mineralen gezuiverde water kan onder spanning corrosie van metalen veroorzaken. Voor een goed verloopend vonkproces dient de geleidbaarheid van zuiver demiwater bij draadvonkwerkzaamheden beneden een waarde van 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ te blijven. Daarvoor is een goede demi-installatie noodzakelijk.

Als spoelingsmethode kan men naar behoefte en afhankelijk van het toegepaste machinetype kiezen uit respectievelijk badspoeling, coaxiale spoeling en insluitspoeling (zie ook § 3.4)

1.6.4 De numerieke besturing

Een numerieke besturing toespitst op het vonken heeft als taak:

- aansturing van de assen (zie "Aansturing van de machine" hieronder);
- controle en regeling van het servosysteem;
- verandering van de generatorinstellingen;
- instelling van baan correcties (zie "Codering van de numerieke besturing");
- automatisch positioneren van de elektrode t.o.v. het werkstuk, alsmede indexeren met een rotatie-as (zie voorbeeld in figuur 2.97 in § 2.11);
- uitrichten van de elektrode en het werkstuk (meetcycli, § 4.6.1);

- automatisch elektrode en/of werkstuk wisselen;
- controle van de spoeling;
- en nog enkele andere specifieke machinefuncties (meten, telediagnose).

Aansturing van de machine

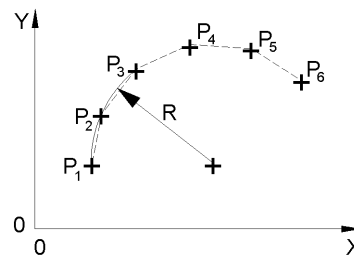
Om het gereedschap (elektrode) een bepaalde 'relatieve' beweging ten opzichte van het werkstuk te laten uitvoeren, zijn er de volgende besturingsvormen mogelijk:

- punt-punt besturing;
- lijnbesturing;
- contourbesturing.

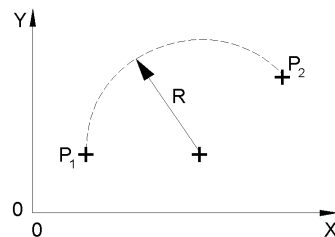
Contourbesturing komt hierbij het meeste voor.

Bij een contourbesturing (figuur 1.49 en 1.50) verloopt de beweging tussen gedefinieerde punten langs een vrij programmeerbare baan. Hierbij zijn er drie mogelijkheden om deze weg te volgen:

- tussen twee punten vindt er lineaire interpolatie plaats (figuur 1.49);
- er wordt circulair geïnterpoleerd (figuur 1.50);
- interpolatie tussen twee punten verloopt via wiskundige formules, bijvoorbeeld een hyperbool, parabool of spline.



figuur 1.49 Contourbesturing met lineaire interpolatie



figuur 1.50 Contourbesturing met circulaire interpolatie

Een contour kan nu worden uitgevoerd, afhankelijk van de uitvoeringsvorm van de machine, door middel van lineaire, dan wel circulaire en/of hogere graads interpolatie. Voor een gelijkblijvende nauwkeurigheid zijn bij circulaire interpolatie minder regels in het programma nodig.

Codering van de numerieke besturing

Voor de bewerking van een werkstuk moet een van de CAD-file afgeleid of een specifiek opgesteld programma ter beschikking staan. Hierin dient de informatie opgenomen te zijn, die de geprogrammeerde baan van de elektrode beschrijft met de daarbij te gebruiken vonktechnologie. Het werkstukprogramma moet dusdanig zijn opgesteld, dat de machine dit kan lezen, dat wil zeggen, het moet volgens de voor de machine geldende regels (syntax) zijn opgesteld. Het niet exact opvolgen van deze regels kan het niet starten of het vroegtijdig stoppen van de machine tot gevolg hebben.

Er is onderscheid te maken tussen een geometrisch en een technologisch NC programma. Een geometrisch NC programma bevat de geometriegegevens nodig voor het bewerken van een werkstuk. Het beschrijft in principe de baan van de elektrode en kan verwijzen naar verschillende geheugenregisters die de generator-

instelparameters bevatten. De codering van de informatie behoort zoveel mogelijk gestandaardiseerd te zijn volgens onder meer:

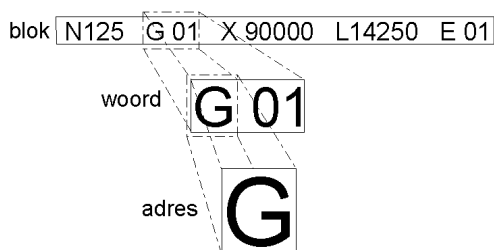
- ▶ ISO 841: benaming van de assen en bewegingsrichtingen;
- ▶ ISO 6983-1: dataformaat voor positionering, lijnbesturing en contourbesturing;
- ▶ ISO 6983-2: codering en gebruik van G-codes en universele M-codes;
- ▶ ISO 6983-3: codering van speciale M-codes.

Deze ISO-normen zijn algemeen opgesteld, zonder dat vonkersiemachines er expliciet in worden vermeld. Raadpleeg daarom voor een juist gebruik de machine-handleiding.

Een technologisch NC programma wordt gebruikt voor het off line instellen van de generator geheugen-registers (d.i. de instelling van stroomsterkte, pulsduur, spoeling, enz.). In tegenstelling tot de ISO programmeercode worden hier niet gestandaardiseerde formaten gebruikt. Dat betekent dat de syntax van dergelijke programma's volledig machine-afhankelijk is.

Geometrisch NC programma

Een geometrisch programma wordt opgesteld volgens de ISO 6983 standaard. Ieder programma bestaat uit een aantal lijnen (blokken) en iedere blok is opgebouwd uit één of meerdere woorden (zie figuur 1.51). Ieder woord is verder opgebouwd uit een adres, al dan niet gevolgd door een parameter. Een overzicht van de meest voorkomende adressen wordt in figuur 1.52 gegeven.



figuur 1.51 De opbouw van een "blok"

C	: Draaibeweging om de Z-as
D	: Gereedschapscorrectiegeheugen
E	: Generatorregister (niet standaard)
G	: Bewegingsfunctie
I	: x-coördinaat van het cirkelmiddelpunt
J	: y-coördinaat van het cirkelmiddelpunt
L	: Vonkdiepte-aanduiding (niet standaard)
M	: Hulpfunctie
N	: Programmaregel
S	: Spindeltoerental
T	: Elektrode
X	: Beweging over X-as
Y	: Beweging over Y-as
Z	: Beweging over Z-as

figuur 1.52 Meest voorkomende adressen

Gedetailleerde beschrijving van enkele "woorden":

- ▶ N gevolgd door een getal geeft het regelnummer aan (bijvoorbeeld N100);
- ▶ G-woorden (ook wel G-codes genoemd) beginnen met de letter G (adres), gevolgd door een cijfer. Deze hebben te maken met de bewegingsinformatie. Zo betekent bijvoorbeeld G01 dat de machine beweegt naar het volgende punt volgens een rechte lijn. Figuur 1.53 geeft een overzicht van veel voorkomende G-woorden;
- ▶ M-woorden (ook wel M-codes of M-functies genoemd) beginnen met de letter M (adres), gevolgd door één of twee cijfers. Deze M-woorden worden gebruikt voor het aansturen van hulpfuncties zoals elektrodewissel, aan- en afzetten van de spoeling,

e.a.. Figuur 1.54 geeft een overzicht van de meest voorkomende M-woorden;

- ▶ Geometrie-woorden bevatten een letter voor de adressering naar de geprogrammeerde functie, gevolgd door een getal afhankelijk van de waarde van de geometrie. Zo betekent bijvoorbeeld X100 de X-coördinaat met waarde 100, waarvan de eenheid wordt gespecificeerd via G70 of G71.

G00	: Positioneren in ijlgang
G01	: Lineaire interpolatie
G02	: Circulaire interpolatie rechtsom
G03	: Circulaire interpolatie linksom
G04	: Pauzetijd
G17	: XY-vlak selectie
G18	: ZX-vlak selectie
G19	: YZ-vlak selectie
G21	: Zinkbewegingscyclus
G30	: Hoekafronding
G40	: Uitschakelen baancorrectie (offset)
G41	: Baancorrectie naar links
G42	: Baancorrectie naar rechts
G70	: Maatvoering in inches
G71	: Maatvoering in millimeters
G90	: Programmeren met absolute maatvoering
G91	: Programmeren met incrementele maatvoering
G92	: Geprogrammeerde nulpuntsverplaatsing

figuur 1.53 Veel voorkomende G-woorden

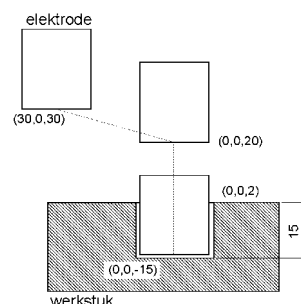
M00	: Onvoorwaardelijke stop
M01	: Voorwaardelijke stop
M02	: Einde programma
M03	: Spindel aan (rechtsom)
M04	: Spindel aan (linksom)
M05	: Spindel stop
M06	: Elektrode wissel
M08	: Spoeling aan
M09	: Spoeling uit

figuur 1.54 De meest voorkomende M-woorden

Figuren 1.55 en 1.56 geven voorbeelden van een programma voor bestuurd zinkvonken. Eenvoudige programma's voor het contourvonken geven de voorbeelden van figuren 1.57 en 1.58. Het E01 woord activeert het generatorregisternummer 1, welke de generatorinstelling bevat, die moet worden gebruikt. Het geheugen van de machine kan op die manier honderden voorgeprogrammeerde generatorinstellingen bevatten.

```
N100 G92 X-30000 Y0 Z30000
N105 T01 M06
N110 G00 X0 Z20000
N115 Z2000
N120 G01 L-14800 E01
N125 G00 Z20000
N130 T0 M06
N135 M02
```

figuur 1.55 Programmaproefbeeld (met resultaat in figuur 1.56) voor een zinkbeweging



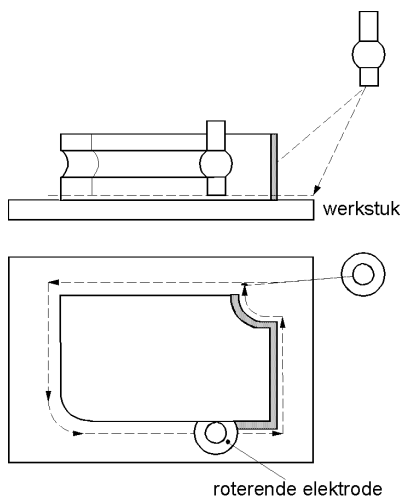
figuur 1.56 Resultaat van het programma uit figuur 1.55

```

N100 G92 X-120000 Y30000 Z10000
N105 T01 M06
N110 G30
N115 G42 D8000
N120 S20000 M04
N125 G01 X90000 L14250 E01
N130 X60000
N135 X-60000
N140 Y-15000
N145 G03 X-45000 Y-30000 I-45000 J-15000
N150 G01 X60000
N155 Y15000
N160 G02 X45000 Y30000 I45000 J15000
N165 G01 X12000 L10000
N170 M05
N175 T0 M06
N180 M02

```

figuur 1.57 Programvoorbeeld (met resultaat in figuur 1.58) voor een contourvonkbeweging



figuur 1.58 Resultaat van het programma uit figuur 1.57

In de besturing van de machine kan een aantal extra functies zijn opgenomen, waarvan de belangrijkste hiernavolgend worden weergegeven:

- **Absoluut/incrementeel maatsysteem**
Bij het werken in een absoluut maatsysteem worden de positiecoördinaten steeds aangegeven vanuit een referentie coördinatensysteem. Bij het werken met het incrementele systeem wordt de maat-aanduiding steeds aangegeven vanuit de actuele posities in zogenaamde kettingmaten. Op de meeste besturingen kunnen beide systemen door elkaar worden gebruikt.
- **Maatstelsel**
De meeste machines werken in het metrische systeem. Voor de numerieke besturing is het betrekkelijk eenvoudig het maatstelsel in inches om te zetten. Deze mogelijkheid kan soms ook in het programma naar keuze worden opgeroepen.
- **Assenmanipulatie**
Het machinecoördinatensysteem met haar nulpunten zal zelden overeenkomen met het coördinatensysteem van een geprogrammeerd werkstuk. Voor een correcte uitvoering moet het werkstuk exact worden gepositioneerd. De meeste besturingen hebben daarom de mogelijkheid om het coördinatensysteem van de machine te verschuiven en te verdraaien. Meestal is het mogelijk dit ook via het programma te doen met het werkstukcoördinatensysteem.
- **Baancorrectie**
Baancorrecties (offsets) kunnen worden ingegeven aan de besturing, hetzij handmatig, hetzij via op te roepen offset-waarden uit een geheugen (bijvoorbeeld offsetregister D01). Dit wordt vooral ge-

bruikt om de incorrecte positionering van de elektrode te compenseren.

– **Bewerkingscycli**

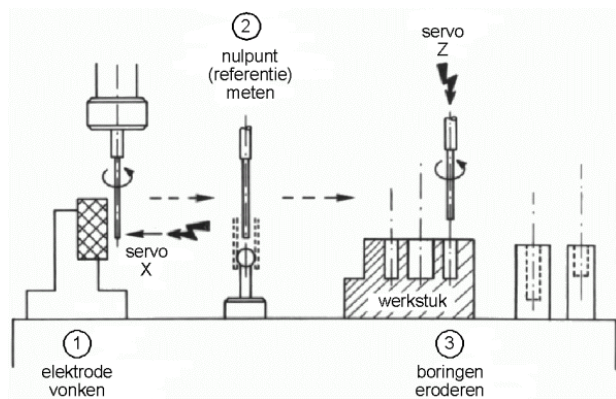
De besturing bezit meestal een aantal vaste (vooraf geprogrammeerde) bewerkingscycli. Voorbeelden zijn het zinkvonken, planetair vonkeroderen, helicoïdaal vonken, e.a. Deze bijzondere cycli worden geprogrammeerd met een specifiek G-adres. De G-parameter en de daarop volgende woorden - speciaal voor deze bepaalde cyclus - zijn sterk machineafhankelijk. Zo betekent bijvoorbeeld bij machine A, G21 een zinkbewegingscyclus. De bewerkingsrichting van deze cycli kan worden geprogrammeerd. Terwijl bij conventionele machines dit enkel in de neerwaartse richting ('zinken') kan, is dit nu volgens elke programmeerbare richting mogelijk. De betekenis van de verschillende cycli en hun waarde worden in hoofdstuk 4 meer in detail toegelicht.

– **Meetcycli**

De positie van een opgespannen werkstuk en/of elektrode dient ten opzichte van het machinecoördinatensysteem bekend te zijn. Daarvoor zijn machines veelal uitgerust met één of meerdere meetcycli, waarmee middels 'toucheren' positie en/of afmeting te bepalen is (zie figuur 1.59). Hierop wordt in § 4.6.1 verder in detail ingegaan.

– **Simuleren**

Na het opstellen van het werkstuk en het inlezen van het NC programma, wil men meestal controleren of alles naar wens zal worden uitgevoerd. Dit moet gebeuren op een opgegeven veilige hoogte. Veel machines zijn daartoe voorzien van de mogelijkheid om het complete programma te testen, zonder dat de vonkgenerator is ingeschakeld. De asbewegingen kunnen in dit geval versneld worden uitgevoerd. Ook kan grafisch de gereedschapsbaan op het machinebeeldscherm worden gegenereerd.



figuur 1.59 Meetcycli

Technologisch NC programma

Met het technologisch NC programma worden alle generatorinstellingen en offsetwaarden in de corresponderende registers geladen. Voor het opstellen van het technologisch NC programma bestaan geen standaard normen. Iedere machinefabrikant gebruikt hiervoor een machinespecifieke taal.

Het opstellen van een technologisch programma is niet steeds vereist, omdat moderne besturingen een geïntegreerde technologie bevatten (zelf of door de fabrikant ontwikkeld). Voorgeprogrammeerde registers bevatten de generatortechnologie voor verschillende materialen en strategieën. Verder zijn er besturingen voorhanden, die automatisch op basis van de gewenste productspecificaties (ruwheid, tolerantie, frontaal vonkoppervlak, enz.) een gewenste strategie opstellen. Een dergelijke vonkstrategie omvat het

aantal bewerkingsschappen en voor iedere stap de te gebruiken generatorinstelling en offsetwaarde. Daarmee is het gebruik van dergelijke technologische NC programma's interessant, ook als die instellingen op zich nog niet aanwezig zijn in de machinedatabank.

1.6.5 Beveiligingen

Alle functionele delen van een vonkersiemachine, alsmede het werkstuk en de elektrode, dienen te worden beveiligd tegen het optreden van storingen, onjuiste bediening en het ontstaan van ongewenste werkcondities. De beveiligingen zijn meestal van elektrische aard.

Beveiligingen bij het mechanische systeem zijn onder meer de volgende:

- ▶ afscherming tegen aanraking van stroomvoerende delen;
- ▶ eindaanslagen voor de verplaatsingen van de assen. De instelbare aanslag in de voedingsrichting wordt meestal gebruikt als eindaanslag bij het bewerken. Indien de gewenste bewerking ten einde is, kan deze aanslag ook de gehele installatie uitschakelen;
- ▶ het automatisch klemmen van de werkkop in het geval van energiestoring;
- ▶ beveiliging tegen overbelasting van de servomotoren (voor het bewegen van de assen) en van speciale inrichtingen, die bij het bewerken worden gebruikt (bijv. roterende werkkop). Bij hydraulische servosystemen zijn er overbelastingsbeveiligingen in het hydraulische gedeelte (druk, temperatuur, enz.).

Beveiligingen bij het diëlektrische systeem zijn onder andere:

- ▶ dubbel uitgevoerde niveaubegrenzings van de vloeistof in de diëlektricumbak, zowel voor het hoogste niveau (overlopen van de bak) als het laagste niveau (brandgevaar, zie § 4.11.1.2);
- ▶ beveiliging tegen te hoge temperatuur van het diëlektricum;
- ▶ overbelastingsbeveiliging van de diëlektricum-pompmotor.

Beveiligingen bij de elektrische pulsgenerator:

Naast de gebruikelijke elektrische beveiligingen, zoals smeltveiligheden en temperatuurbeveiliging (koeling), kunnen beveiligingsschakelingen ingebouwd zijn tegen onjuiste instellingen van de generator (zoals ongewenste combinaties van pulsduur en pulsstroom). Verder zijn beveiligingen gewenst tegen het optreden van boegontladingen en langdurige kortsluitingen in de vonkspleet en tegen botsing. De reactie van de machine hierop kan zijn: geluid- of lichtsignalen, het vergroten van de spleet, uitschakelen van de generator.

1.7 Technologie - procesinstelling

De technologische mogelijkheden van het vonkersieproces worden niet alleen bepaald door de generatorinstellingen, maar door heel wat meer factoren zoals de spoeling, het elektrode- en werkstukmateriaal, de dynamische karakteristieken van de machine en het servosysteem, enz., waarvan tabel 1.4 de trendmatige uitwerking laat zien. Figuur 1.22 (blz. 13) laat specifieke geleidingswaarden voor groepen materialen zien.

Om een gegeven oppervlaktekwaliteit en precisie te bereiken, moet de pulsenergie (stroom en pulsduur) worden beperkt. Het vonken van een complete job met deze lage pulsenergie is, gezien de lage materiaalafname, oneconomisch. Daarom wordt een werkstuk (draad-vonken van een contour, zinkvonken van een caviteit) in verschillende stappen aangemaakt. Een eerste voor vonkbewerking wordt uitgevoerd met een hoogenergetische generatorinstelling, terwijl bij volgende stappen de pulsenergie (kleinere stroom, kortere pulsduur) steeds wordt verkleind.

Het plannen van de verschillende stappen (voorvonken – navonken) gebeurt meestal aan de hand van door de machinefabrikant geleverde technologietabellen. Bij het kiezen van de parameters dient men een onderscheid te maken tussen primaire en secundaire technologie-parameters:

- ▶ **"Primaire"** parameters zijn die op de generator te regelen grootheden, die tijdens een vonkbewerking niet meer gewijzigd mogen worden, vanwege de directe invloed op het werkstuk (polariteit, pulsduur t_e , momentane pulsstroom i_e , open generatorspanning u_i).
- ▶ **"Secundair"** van karakter zijn die instelmogelijkheden, die geen directe invloed hebben op werkstukafmetingen of -ruwheid en gevarieerd kunnen worden tijdens de vonkbewerking ter optimalisering van het erosieproces (pulsintervaltijd t_0 , servo-instellingen, spoeling, timer).

tabel 1.4 Invloed van de machine-instellingen (generator, spoeling, enz.) op materiaalafname, elektrodeslijtage, oppervlakteruwheid en nauwkeurigheid

	materiaalafname	elektrodeslijtage	oppervlakteruwheid (oppervlaktekwaliteit)	nauwkeurigheid	vonkspleet
Pulsduur $t_e \uparrow$					
Pulsstroom $i_e \uparrow$		koper grafiet			
Pulsintervaltijd $t_0 \uparrow$					
Spoeling					

Hoofdstuk 2

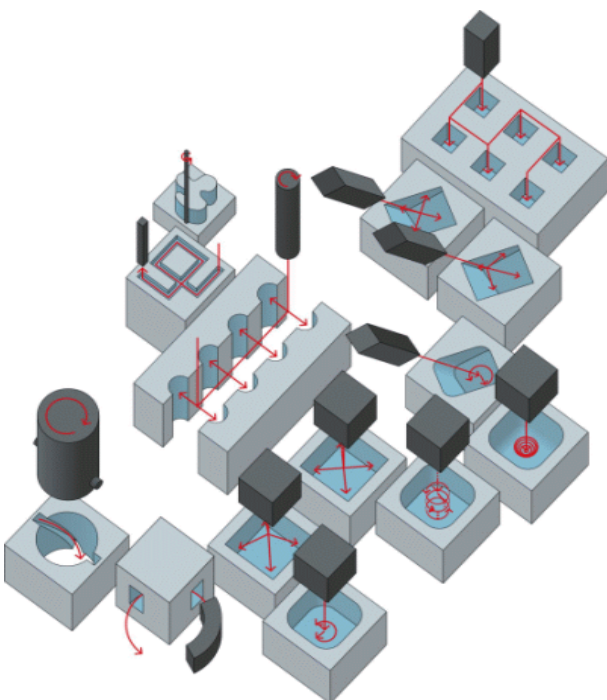
Zinkvonken

2.1 Inleiding

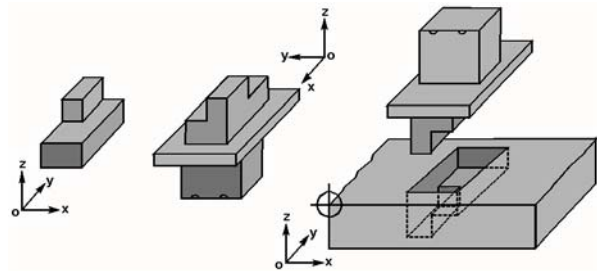
Sinds de eerste zinkvonkmachine, meer dan 60 jaar geleden, werd geconstrueerd, heeft zich een aantal structurele ontwikkelingen voorgedaan, mede door de opkomst van andere bewerkingstechnieken.

Kort samengevat is één van de belangrijkste ontwikkelingen de overgang van generatoren met roterende pulsopwekking (slecht regelbaar) met als tussenstap relaxatie (zeer nauwkeurig navonken) naar de moderne gestuurde pulsgenerator (betere, digitale afstelling van elke parameter afzonderlijk). Sterke stimulans ging in aanvang uit van het planetairvonken, evenals van het snel daarop volgende CNC zinkvonken met simultaan werkende extra bewegingsassen. Numerieke besturing heeft de handbediening op oudere machines vrijwel geheel verdrongen. Tevens is hierdoor een grote verscheidenheid aan bestuurd bewegingsmogelijkheden ontstaan (zie figuur 2.1). Grootste handicap en rem op de stijgende verbreiding van zinkvonken vormt nog altijd het ontbreken van standaardgereedschap en de relatief lage 'verspanings'snelheid. Bij het fabriceren van een matrijsholte als negatief van het product (zie figuur 2.2) is, voorafgaand aan het zinkvonken, het maken van een nauwkeurig evenbeeld van de gewenste productvorm als elektrode nodig. Deze elektrode is ondermaats om de vonkspleet te compenseren. Dat levert een licht voordeel op, omdat fabriceren van een negatieve geometrie (slechte bereikbaarheid, gereedschap nodig met relatief hoge L/D verhouding) moeilijker blijft dan een uitwendige vorm. De behoefte aan (bijna individuele) productvarianten en kleine series in korte tijd tegen lage prijs maakt zinkvonken economisch minder interessant voor algemeen gebruik.

Zo heeft hogesnelheidsfreen (High Speed Cutting) veel werk overgenomen, vooral wat betreft voorbereiden, maar ook in het finishen. Door de HSC-mogelijkheid uit te gaan van gehard materiaal tot HRc60, wint ook



figuur 2.1 Overzicht van bewegingsmogelijkheden met behulp van CNC besturing



figuur 2.2 Vervaardigingsvolgorde van elektrode tot de gewenste productvorm

direct hardfreen van een kant en klaar werkstuk (door haalbare maat- en vormtoleranties en het gladde oppervlak) aan betekenis. Anderzijds is het snelfreen een algemeen geaccepteerde manier om snel hoogwaardige complexe elektroden met gedetailleerde geometrie-elementen in koper en grafiet te maken, wat weer gunstig is voor het zinkvonken. Dit is mede te danken aan nieuwe CAD/CAM functionaliteit om op basis van de productgeometrie op een efficiënte en snelle manier de elektrodevormen te ontwerpen en de freesbanen hiervoor te genereren.

De volgende aspecten vormen een sterk antwoord op de genoemde bedreigingen:

- ▶ de koppeling van procesgerichte instellingen (technologie) aan de methode van aanpak (strategie);
- ▶ het werken met uitgebreidere meetcycli, via het werken in een netwerk met bewaking, controle en diagnose op afstand;
- ▶ verdere voortschrijdende automatisering.

De van oorsprong grote autonomie door de ingebouwde zelfregelende procesbewaking, maar ook technologie en strategie in het geheugen van de CNC-unit, staan nu ten voorbeeld voor ondermeer de freestechiek. Ook daar bestaat behoefte aan in dialoog met de besturing opgestelde acceptabele machine-instellingen, naar keuze gericht op snelheid, nauwkeurigheid of oppervlaktegesteldheid. Deze zijn door een ervaren vonker bedrijfsspecifiek verder te optimaliseren.

Er zijn veel soorten machines in de handel verkrijgbaar voor standaard of hoge precisie, voor micro, klein of groot werk, met simpele, normale of geavanceerde uitrusting, manueel of volautomatisch, klein of groot van afmeting. Kenmerkend is dat de, meestal verticale, vonk-kop (hoofdas), het machinegestel, de pulsgenerator en de diëlectricumunit tegenwoordig vaak tot een integrale (monobloc) constructie zijn samengevoegd. De snelheid van materiaalafname is inmiddels aanzienlijk verhoogd. Daarbij zijn de belangrijkste veranderingen tot stand gekomen door voortgaande verfijning van de pulsgenerator, processtoring en bewaking. Aandrijving met lineaire motoren en direct aangedreven geavanceerde kogelomloopspillen brengen een snellere reactie op processtoringen binnen bereik, verbeterde spoeling en het beter constant houden van veel kleinere (t.o.v. standaardmachines) vonkspleten. Daarnaast hebben deze ontwikkelingen een gunstig effect op de neventijden.

Wat elektrodematerialen betreft, hebben zich geen echt schokkende ontwikkelingen voorgedaan. Wel is het gebruik van (speciaal voor zinkvonken ontwikkelde) fijnkorrelige grafietsoorten met grotere afnamecapaciteit en lagere slijtage ten opzichte van koper, ook in Europa niet meer te stoppen. Hoofdzakelijk door HSC-freen is de eerder op gang gekomen trend tot opsplitsing van de totale productvorm in deelelektroden verdwenen.

De voornaamste toepassing ligt in het maken van blinde, fijn gedetailleerde diepe, slanke vormen met nagenoeg scherpe kanten, fragiele fijnmechanische onderdelen, bewerken van moeilijk verspanbare

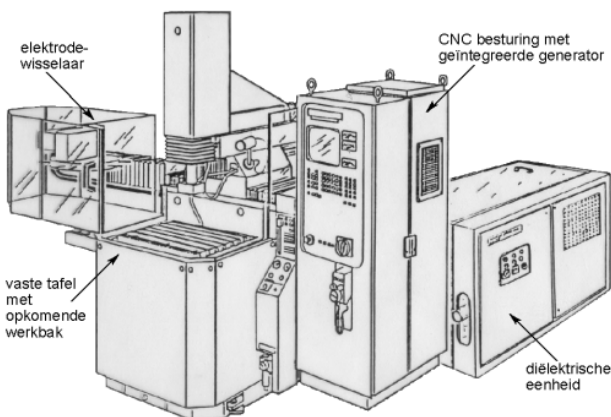
hogesterkte materialen, vonkboren, structureren en microbewerken. Alternatieve processen als ECM en laserbewerken verleggen de grenzen van het vonken. Vonkboren is volledig geaccepteerd als industriële techniek. Het biedt intussen meer mogelijkheden, zoals automatisch wisselen van (buis)elektroden al of niet op de opname en de fabricage van blinde gaten op maat (zelfs onder een hoek) door slim automatisch 'nullen'. Het aanbrengen van een geselecteerde structuur aan het productoppervlak vanuit design oogpunt vindt nog altijd veel toepassing, alhoewel andere methodes als chemisch etsen, fijnstralen en lasertextureren en -polijsten een groeiend aandeel van vonktextureren overnemen. Polijstvonken en vonkfrezen zetten nauwelijks door als industriële varianten.

2.2 De zinkvonkmachine

Aspecten betreffende de bouw van vonkmachines in het algemeen zijn beschreven in hoofdstuk 1. Deze paragraaf behandelt de specifieke aspecten bij de opbouw van zinkvonkmachines.

2.2.1 De mechanische opbouw

Het mechanische systeem wordt hier besproken aan de hand van een van de verschillende uitvoeringen van een middelgrote zinkvonkmachine (zie ook figuur 1.32). Figuur 2.3 toont een veel voorkomend type, dat geschikt is voor zinken en vonkboren van gaten. Zowel kleinere (zie figuur 2.81), als veel grotere machines (figuur 2.6) zijn in de handel verkrijgbaar.



figuur 2.3 Opbouw van een CNC vonkerosie-installatie

Kolom met vonkkop

Van oudsher bepaalt de verticale opstelling van de hoofdas de typische constructie van een zinkvonkmachine. Is de mogelijkheid tot roteren aanwezig, dan zit de draaiende C-as ingebouwd in de Z-as. Bijgevolg moeten hoge eisen worden gesteld aan de loodrechte stand en verplaatsing van de vonkkop ten opzichte van het werkstuk, daar iedere afwijking direct van invloed is op de afmetingen en de vorm van het te maken werkstuk. Vanwege de als gevolg van het planetaire systeem voorkomende bewegings- en spoelkrachten moet de spillagering ook in staat zijn aanzienlijke zijdelingse krachten op te nemen. Onder de Z-as bevindt zich meestal een opname voor een standaard elektrodespansysteem naar keuze.

Waar vroeger meerdere machinefabrikanten dubbelkops zinkvonkmachines in het assortiment hadden, levert nu nog slechts een enkel merk een dergelijke machine (zie figuur 2.4).

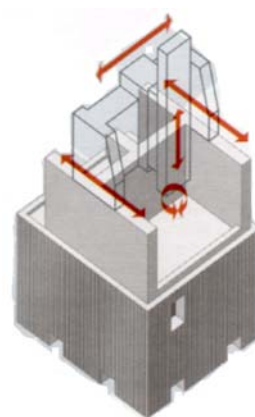
Machinegestel

Afmetingen en gewicht van het machinegestel (figuur 2.5) worden bepaald door de eisen die gesteld

worden aan de bewegingsmogelijkheden en afmetingen van het werkstuk, dat is geplaatst op de opspan-tafel, en aan de statische stijfheid in verband met de positioneer-nauwkeurigheid.



figuur 2.4 Dubbelkops zinkvonkmachine met vergroot bereik en met de mogelijkheid twee werkstukken tegelijkertijd te bewerken



figuur 2.5 Schematisch beeld van een zinkvonkmachine in portaaluitvoering met as-aanduidingen

Dynamische stabiliteitsproblemen ten gevolge van het 'verspanings'proces doen zich, in vergelijking met de conventionele bewerkingstechnieken, in principe bij de vonkerosiemachines niet voor. Druk- of zuigspoeling kan wel stationaire en dynamische krachten veroorzaken op de elektrode en het werkstuk. Deze hebben in het algemeen geen invloed op de stabiliteit van de elektrode.

In verband met temperatuur- en trillingsbeïnvloeding is het reservoir voor het diëlektricum en het oliereservoir met pompen meestal in een afzonderlijk systeem ondergebracht.

Coördinatentafel

De coördinatentafel (kruistafel) is een belangrijk onderdeel van de vonkerosiemachine in verband met het positioneren van het werkstuk ten opzichte van de elektrode (zie figuur 1.47, zonder beplating en figuur 2.6). De eisen die aan de coördinatentafel worden gesteld betreffen voornamelijk:

- ▶ de stijfheid van de constructie in verband met de totale belasting;
- ▶ de vlakheid van het opspanvlak;
- ▶ de evenwijdigheid en haaksheid van het opspanvlak;
- ▶ de nauwkeurigheid en de reproduceerbaarheid van de x- en y-instellingen;
- ▶ de tafel moet ten opzichte van zijn geleidingen kunnen worden vastgeklemd.

Eveneens kent men vonkmachines met vaste tafel, waarbij de voor het positioneren en vonken benodigde verplaatsingen worden uitgevoerd door bovenliggende assystemen (zie figuur 2.5).

Over het algemeen vallen de meetwaarden binnen de gestelde normen, zodat bij zorgvuldig instellen posi-



figuur 2.6 Zinkvonkmachine uitgerust met een coördinatentafel

tioneringsnauwkeurigheden van ongeveer 0,01 mm bereikbaar zijn (zie ook § 4.10 'Machineafname').

Een nieuwe trend binnen het zinkvonken zijn kleine compacte machines voor ultraprecies bewerken (zie figuur 2.7).



figuur 2.7 Compacte machine voor ultraprecies zinkvonken

Nog altijd worden zinkvonkmachines gebouwd van grote tot zeer grote afmetingen om te voldoen aan de vraag naar het bewerken van grote werkstukken uit één stuk (zie figuur 2.8).

2.2.2 De generator

In de generator van een vonkerosiemachine worden de energiepulsen opgewekt die nodig zijn voor het vonkerosieproces (zie § 1.6.1).

Enige karakteristieke gegevens van de pulsen zijn:
 open generatorspanning u_i : 60 - 400V
 gemiddelde pulsstroom $\bar{I}_e$: 1 - 200A
 generatorpulsduur: t_i : 1 μ s - 2 ms
 pulsperiodetijd: t_p : 1 μ s - 2 ms

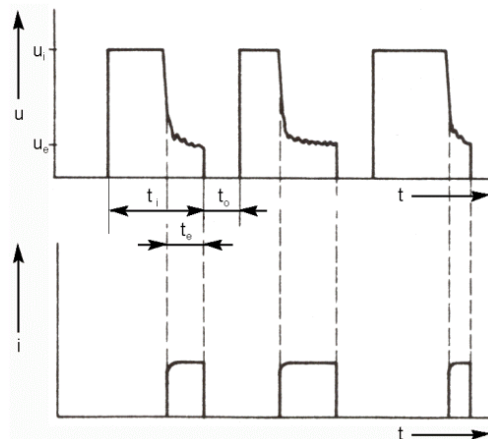
(Opmerking: Bij speciale vonkerosiemachines is de waarde t_i nog lager).

Tegenwoordig worden overwegend stroompulsen van rechthoekige vorm toegepast. Deze pulsen worden opgewekt in een statische pulsgenerator (zie hoofdstuk 1, figuren 1.36 en 1.37).



figuur 2.8 Zinkvonkmachine voor productieafmetingen van 2,5 x 1,5 x 0,5 m

Op het moment dat een spanningspuls aan de vonkspleet wordt toegevoegd, treedt niet onmiddellijk doorslag op. Het duurt enige μ s (ontsteekvertragingstijd t_d) totdat doorslag plaatsvindt en dus stroomdoorgang door de vonk optreedt (zie figuur 2.9).



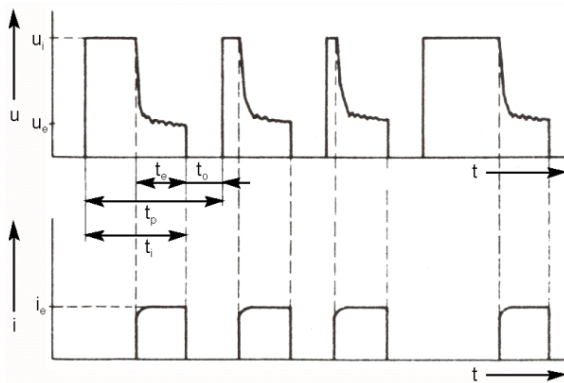
figuur 2.9 Constante generatorpulsduur en pulsinterval-tijd (iso-frequente pulsen)

Indien de door de generator bepaalde generatorpulsduur t_i en pulsinterval-tijd t_0 constant zijn (zoals in figuur 2.9), betekent dit een sterk variërende pulsontladingstijd t_e zodat de energie per puls niet constant is, en de materiaalafname per puls V_{we} van de opeenvolgende pulsen (de kraters) ongelijk is.

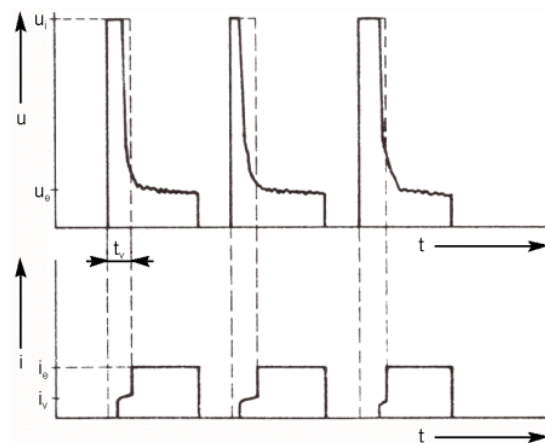
Door toepassing van generatoren die zogenaamd iso-energetische pulsen opwekken of die een ontsteekpuls kunnen leveren, kan genoemd nadeel vrijwel geheel worden ondervangen.

Generatoren die iso-energetische pulsen opwekken voeren spanningspulsen toe aan de vonkspleet, zodanig, dat bereikt wordt dat de pulsontladingstijd t_e en de pulsinterval-tijd t_0 constant zijn (zie figuur 2.10).

Doordat t_e constant is hebben alle pulsen gelijke (iso)energie, waardoor regelmatige kraters worden gevinkt. De pulsperiode t_p is echter niet constant en langer dan optimaal, zodat de puls-frequentie lager is en de materiaalafname V_w daarom minder wordt. Het type generator met ontsteekpuls levert energiepulsen die voorafgegaan worden door een ontsteekpuls van vrij hoge spanning (250 - 400V). Hierdoor treedt vrijwel altijd doorslag op, zie figuur 2.11.



figuur 2.10 Pulsen met gelijke energie (iso-energetische pulsen)



figuur 2.11 Pulsen met ontsteekpuls van hoge spanning, waardoor ontsteekvertraging wordt verminderd (ontsteekpulsduur t_e)

De ontsteekpuls levert een relatief lage stroom. Het voordeel van dit systeem is dat vrijwel alle pulsen gelijke energie bezitten en de pulsherhalingsfrequentie vrij hoog kan zijn.

2.2.3 Servosysteem

Bij zinkvonken zorgt het servosysteem dat de bij de ingestelde parameters horende vonkspleet wordt aangehouden. Dit door gecontroleerde verplaatsing van de elektrode, onafhankelijk van de gekozen hoofdas(sen) in de mode verticaal, horizontaal, planetair of CNC bestuurd (zie voor meer informatie § 1.6.2).

2.2.4 CNC besturing

Een moderne besturing zorgt als 'denktank'/centrale dat de geprogrammeerde acties zelfstandig worden uitgevoerd. Programma('s), werkstuk(ken), elektrode(s) en meetgegevens worden hiervoor gekoppeld op de machine. De taken die een CNC unit uit dient te voeren, staan vermeld in § 1.6.4.

2.3 Gereedschapselektroden

2.3.1 Algemeen

Wil men met behulp van zinkvonken een bepaalde vorm fabriceren, dan dient in het algemeen vooraf één of meer ervan afgeleide specifieke elektrode(s) te worden aangemaakt. Dit kost, ook organisatorisch bekeken, extra inspanning, tijd en geld. Het feit dat bij zinkvonken niet kan worden uitgegaan van in de handel verkrijgbaar gereedschap, zoals bij frezen en draaien, vormt nog altijd een rem op verdere verbreding. Enkel voor het vonkboren, het vonkfrezen en speciale veel voorkomende vormen, zoals bijvoorbeeld aansputtingen en ribben, worden standaardelektrodes aangeboden. Tegenwoordig staat bij de keuze van het elektrode-materiaal (na de vonktechnische eigenschappen, zoals materiaalafname en slijtage) vooral het snel en economisch kunnen frezen voorop. De opkomst van het hogesnelheidsfrezen heeft een positieve uitwerking op deze fase.

De tabellen 2.1, 2.2 en 2.3 geven een vergelijkend overzicht van de keuze als functie van:

- *de prijs (naar gewicht en volume)*
Door wijzigingen in de marktprijzen, valutakoersen, afnamehoeveelheden, enz. kunnen aanzienlijke prijsverschillen optreden. De gegeven richtprijzen geven slechts een globaal inzicht in de prijsverhoudingen;
- *de bewerkbaarheid*
Onder bewerkbaarheid wordt verstaan het materiaalgedrag wat betreft de materiaalafname en elektrodeslijtage;
- *het elektrode-oppervlak*
De keuze van het elektrodemateriaal is mede afhankelijk van de grootte van het elektrode-oppervlak (c.q. eigen gewicht) en de bewerkingsnauwkeurigheid.

Zowel in koper als grafiet zijn complexe geometriën met uiterst fijne details voortaan snel en uit één stuk aan te maken en, mits opgespannen op nulpuntsopnames, na slijtage weer in de uitgangsconditie te brengen. Grote voorraden (mogelijk her te gebruiken elektrodes op houder) komen bijgevolg minder en minder voor.

Door de bewegingsspoeling, die vanzelf ontstaat in planetaire modes (zie § 2.8) en met snelle, geprogrammeerde terugtrekbewegingen van de Z-as, alsmede geavanceerde servosturingen, zijn willekeurige vormen ineens te zinkvonken, zonder dat extra aandacht en voorzieningen vereist zijn wat spoeling betreft.

2.3.2 Materiaalsoorten en -keuze

In principe kan elk elektrisch en warmtegeleidend materiaal worden gebruikt als gereedschapselektrode-materiaal (in deze voorlichtingspublicatie steeds elektrode, resp. (elektrode)materiaal genoemd), weliswaar met verschillend resultaat ten aanzien van materiaalafname en elektrodeslijtage.

tabel 2.1 Elektrodemateriaalkeuze als functie van de prijs

elektrodemateriaal	prijsverhouding naar gewicht en volume (2005) *)	
	(factor t.o.v. 1 kg koper)	(factor t.o.v. 1 dm ³ koper)
koper elektrolytisch	1	1
grafiet voor ruwe bewerking	3	0,5
grafiet voor universele toepassingen	10	2
grafiet voor fijne toepassingen	18	3
wolframkoper	5	16

*) Door wijzigingen in de marktprijzen, valutakoersen, afnamehoeveelheden, enz. kunnen aanzienlijke prijsverschillen optreden

tabel 2.2 Elektrodemateriaalkeuze als functie van de bewerkbaarheid*)

elektrodemateriaal	te bewerken materiaal							
	gelegeerd staal	hardmetaal	gietijzer	aluminium	brons	koper	grafiet	messing
elektrolytisch koper	++	+	++	++	+	+	+	++
grafiet voor ruwe bewerking	+	-	+	+	+	-	-	+
grafiet voor universele en fijne bewerking	++	+	+	++	++	++	-	++
wolframkoper	++	++	++	++	+	+	+	++

*) Onder bewerkbaarheid wordt verstaan de eigenschappen t.o.v. materiaalafname en elektrodeslijtage (V_w en K)
 - gebruik af te raden
 + gebruik mogelijk
 ++ gebruik aanbevolen

tabel 2.3 Elektrodemateriaalkeuze als functie van het elektrode-oppervlak

elektrodemateriaal	elektrode-oppervlak				
	1-30 ¹⁾ mm ²	30-300 mm ²	3-300 cm ²	300-5000 cm ²	groter dan ²⁾ 5000 cm ²
elektrolytisch koper	-	++	++	++	++
telluurhoudend koper	+	++	++	++	-
grafiet voor ruwe bewerking	-	+	++	++	++
grafiet voor universele en fijne bewerking	+	++	++	++	++
wolframkoper	++	++	+	-	-

- gebruik wordt afgeraden
 + gebruik mogelijk
 ++ gebruik aanbevolen

1) Voor gaten < 1 mm² oppervlak worden behalve grafiet en wolframkoper hoofdzakelijk wolfram, molybdeen, messing of hardmetaal elektroden gebruikt
 2) Bij afmetingen > 5000 cm² worden vaak speciale elektrodenfabricagemethoden gebruikt, zie § 2.2.4

Als belangrijkste criteria zijn bij de materiaalkeuze tegen elkaar af te wegen:

- erosievastheid;
De erosievastheid is het product van de warmtegeleidingscoëfficiënt (thermische geleidbaarheid), de soortelijke massa, de soortelijke warmte (warmtecapaciteit) en het kwadraat van de smelttemperatuur: $E = \lambda \rho c T_m^2$;
- bewerkbaarheid (elektrodefabricagewijze en -kosten);
- vormvastheid (ofwel slijtage);
- materiaalafname;
- prijs.

Deze factoren staan steeds in directe relatie tot het betreffende werkstukmateriaal, -vorm en -afmeting, en het aantal producten.

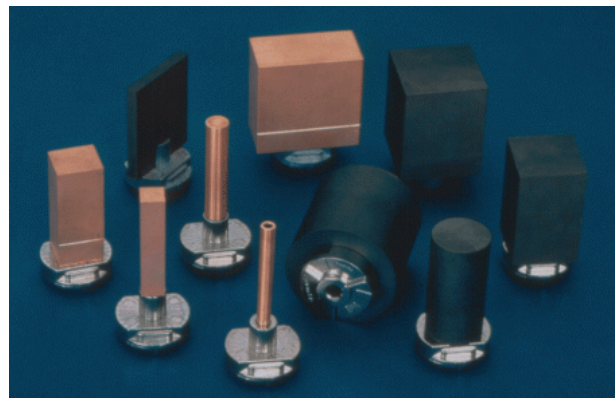
Tabel 2.4 geeft hiervan een overzicht voor een aantal materialen.

Als elektrodemateriaal voor het bewerken van staal worden het meest toegepast:

- elektrolytisch koper;
- grafiet;
- wolframkoper.

Eventueel zijn deze verkrijgbaar als op standaard elektrodehouders vóór opgespannen blokken, staven of

cilinders, die direct na ontvangst te bewerken zijn (figuur 2.12). Staal, wolfram, aluminium, molybdeen en legeringen ervan worden naast hardmetaal (wolframcarbide) alleen voor speciale toepassingen als elektrodemateriaal gebruikt. Tantaal, nikkel en molybdeen bieden soms in scherp begrensde toepassingsgebieden uitkomst.



figuur 2.12 Handelsuitvoeringen van elektrodemateriaal (in dit geval elektrolytisch koper en grafiet) opgespannen op standaardhouders

tabel 2.4 Overzicht eigenschappen van een aantal materialen (gemiddelde waarden) (voor bewerkbaarheid zie 2.3.4)

materiaal	erosie- vastheid E 10^{13}	warmtegelei- dingscoëff. A in $W/m \text{ } ^\circ C$	soortelijke massa ρ in g/cm^3	soortelijke warmte c in $J/kg \text{ } ^\circ C$	smelttem- peratuur t in $^\circ C$	soortelijke weerstand $10^{-8} \Omega m$	uitzettings- coëfficiënt $10^{-6}/^\circ C$
staal	33,7	45	7,8	490	1400	10	12
aluminium	32,2	268	2,7	1038	658	2,80	24
koper	151,5	359	8,9	403	1090	1,75	17
wolframkoper			13 - 16		3350	5 - 5,45	
grafiet	76,3 - 210,6	46,0 - 113,6	1,7 - 1,9	753	3600	1000 - 1500	3 - 4
messing 60/40	30,4	109	8,5	388	920	6,4 - 8,4	19
wolfram	521,6	146	19,3	163	3370	5,5	4,5
zink	5,5	113	7,2	388	418	5,75	29
molybdeen	256	147	10,2	250	2610	5,2	19
hardmetaal	151	67	14,3	209	(2750)	19,2	4,8

2.3.2.1 Elektrolytisch koper

Voor het eroderen in staal is elektrolytisch koper, mede door de hoge zuiverheid en het ontbreken van porositeit, een geschikt elektrodemateriaal. Men moet spanningsvrij materiaal gebruiken, anders kunnen tijdens de vonkersieve bewerking spanningen vrijkomen met als gevolg maatveranderingen.

Materiaalsamenstelling:

minimaal 99,92% Cu met maximaal 0,05% O₂

NORM-aanduidingen:

- draad (rond) ECU F20 DIN 1757
- staf (rond) ECU F25 of ECU F30 DIN 1756
- vierkant ECU F25 of ECU F30 DIN 1761
- plat ECU F25 DIN 1759-1 DIN 1768
- plaat ECU F25 DIN 1751
- band ECU F20 of ECU F25 DIN 1791
- buis ECU F30 DIN 1754

ECU = elektrolytisch koper

F20 = treksterkte 200 N/mm²

Fysische eigenschappen:

erosievastheid	151,5
warmtegeleidingscoëfficiënt	359 W/m °C
soortelijke warmte	403 J/kg °C
soortelijke massa	8,9 g/cm ³
smeltpunt	1090 °C
soortelijke weerstand	1,75.10 ⁻⁸ Ωm
uitzettingscoëfficiënt	17.10 ⁻⁶ per °C

Mechanische eigenschappen:

	zacht	hard
treksterkte in N/mm ²	200	300
rekgrens (σ _{0,2}) in N/mm ²	30	200
rek (l=5d) in %	40	5
Brinell hardheid in N/mm ²	400	850

Zacht koper wordt gewoonlijk toegepast voor plaatvormige elektroden; hard koper voor buis- en blokvormige elektroden.

Afmetingen:

- **rondmateriaal**
 - staf; van 4-100 mm Ø in handelslengten van 4 m;
 - draad; op rollen tot Ø 8 mm;
 - buis; vanaf 0,2 mm. Speciaal buismateriaal is in de handel verkrijgbaar.
- **staafmateriaal**
 - vierkant, van ca. 6-50 mm, grotere maten soms mogelijk;
 - plat; scherpkantig in dikten van 2-10 mm, breed 10-120 mm, in de maten 50x12 en 50x15 mm.
- **plaat**
 - tot 10 mm dik in de afmeting 1000x1000 mm.

Nadelen

Koper is vergeleken met grafiet en wolframkoper moeilijker te bewerken en -door de hoge soortelijke massa- minder geschikt voor grote en massieve elektroden. Grotere afmetingen zijn moeilijk verkrijgbaar en duur.

Voordelen

Koper is goed koud en warm te vervormen en het laat zich goed etsen. Koperelektroden kunnen ook galvanotechnisch worden vervaardigd. Eventueel is tussendoor met een Cu-elektrode te vonkdrassen. Met omgekeerde polariteit wordt de doorn daarbij tegen een blok hardmetaal of wolframkoper opnieuw vonkend op maat en/of vorm gemaakt.

2.3.2.2 Grafiet

Voor het eroderen in staal is industrieel vervaardigd grafiet een zeer geschikt elektrodemateriaal. Grafiet is op zich een, ook in de natuur voorkomende, modificatie van het element koolstof. De mechanische eigen-

schappen van grafiet maken het mogelijk dat men elektroden van kleine afmetingen met scherpe details, zoals hoeken en ribben, kan vervaardigen.

Voor de vonkersieve bewerkingen zijn speciale grafietkwaliteiten ontwikkeld. Deze speciale kwaliteiten onderscheiden zich van de normale grafietsoorten door een aantal fysische eigenschappen.

De voornaamste daarvan zijn:

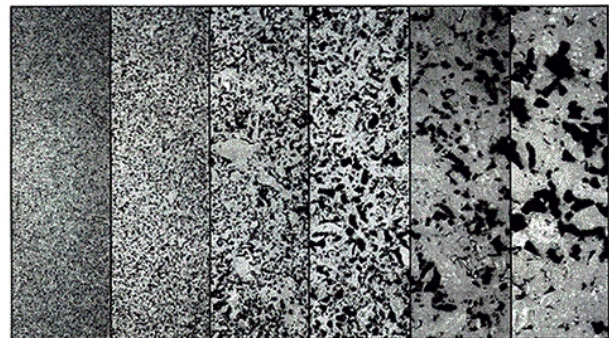
- grote erosievastheid;
- geringe poreusheid;
- kleine korrelgrootte;
- lage soortelijke weerstand;
- goede homogeniteit;
- hoge isotropie (gelijke eigenschappen over de doorsnede).

Indeling van de grafietsoorten naar toepassingsgebied

De grafietsoorten worden (meestal naar korrelgrootte, zie figuur 2.13) globaal ingedeeld naar toepassingsgebied:

- soorten voor ruwe bewerkingen (grofkorrelig);
- soorten voor universele bewerkingen;
- soorten voor fijne bewerkingen (met zeer fijne korrel).

De grovere en verhoudingsgewijs laaggeprijsde grafietsoorten (van 20 - > 100 µm) voor ruwe bewerkingen worden vooral gebruikt voor die bewerkingen waarbij, zonder al te grote nauwkeurigheid, grote hoeveelheden materiaal moeten worden verwijderd of de eindruwheid minder belangrijk is.



figuur 2.13 Microscopieopnames van diverse kwaliteiten grafiet (van zeer fijn tot grof)

Opmerking: een bekend feit is dat in het algemeen een positief gepoolde elektrode van grafiet een lagere slijtage oplevert, terwijl ompolen op negatief in een hogere afnamecapaciteit resulteert.

Grafietsoorten voor universele bewerkingen hebben grotere mechanische sterkte en slijten minder dan die voor ruwe bewerkingen; de materiaalafname is echter kleiner.

De relatief dure grafietsoorten voor fijne bewerkingen worden, om hun goede mechanische eigenschappen (o.a. door de uiterst kleine korrel tussen ca. 10 µm tot < 1 µm), vooral gebruikt voor de fabricage van zeer nauwkeurige elektroden van kleine afmetingen met hoge oppervlaktekwaliteit (zie figuur 2.14).

Bovendien is hun slijtage bij navonken betrekkelijk gering en kan men er een grote nauwkeurigheid mee verkrijgen, met name indien het elektroden betreft met scherpe hoeken of zeer fijne details.

Opmerking: als algemene vuistregel geldt dat met kleinere korrel de elektrodeslijtage verbetert, terwijl de materiaalafname vermindert.



figuur 2.14 Elektrodes van hoogwaardig grafiet voor het vervaardigen van delen van een spuitgietmatrijs

Indeling van de grafietsoorten naar fabricage

Naar fabricage kan men de soorten grafiet verder nog onderscheiden in:

- niet geïmpregneerde kwaliteiten (normaal);
- geïmpregneerde kwaliteiten;
- perskwaliteiten.

De met 25-35% koper geïmpregneerde kwaliteiten hebben een lagere soortelijke weerstand. Daardoor kan men de stroomdichtheid hoger kiezen en bereikt men grotere materiaalafname, zij het met grotere elektrodeslijtage. Deze soorten worden vooral bij de fijne bewerkingen toegepast waar een lage ruwheidswaarde is vereist of voor het bewerken van hardmetaal, refractaire- en aluminiumlegeringen. De uit koolstofpoeder geperste kwaliteiten, die vrij recent zijn ontwikkeld, maken het mogelijk de elektroden door persen te vormen (zie ook 2.3.4 'Elektrode-ontwerp en -fabricage').

Materiaalsamenstelling:

Zuivere koolstof (grafiet) met maximaal 0,1 % as.

Fysische eigenschappen (zie tabel 2.5).

Overige fysische eigenschappen zijn:

- smeltpunt (sublimatiepunt) 3600 °C;
- soortelijke weerstand $1000-1500 \cdot 10^{-8} \Omega m$;
- soortelijke warmte 753 J/kg °C. Deze neemt toe bij toenemende temperatuur;
- (lineaire) uitzettingscoëfficiënt $3-4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ bij 100 °C;
- lage anisotropie (hoge isotropie);
- redelijke warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze varieert sterk met de kwaliteit van het grafiet.

Mechanische eigenschappen:

- buigsterkte 30-84 N/mm²
- hardheid 35-700° Shore
- druksterkte 7-15 N/mm²

Afmetingen:

De maximale afmetingen worden begrensd door de gewenste eigenschappen. Voor de dichtste structuur (kleine korrel + lage poreusheid) zal men er rekening

mee moeten houden dat deze in zeer beperkte afmetingen verkrijgbaar zijn.

Grafiet wordt geleverd in blokken, platen (gevlakt), cilinders (gekalibreerd), pijpjes, slijpschijven, enz.

Nadelen

Bij de vervaardiging van de gereedschapselektroden komt zwarte stof vrij. Het materiaal is abrasief; krachtige afzuiging is daarom vereist, wanneer niet nat bewerkt wordt.

Door de gesinterde structuur is het bros en niet elastisch en daarmee kwetsbaar.

Grafiet is voor een ruwheid lager dan $1 \mu m R_a$ minder geschikt als elektrodemateriaal.

Fijnere soorten EDM-grafiet zijn isotroop, terwijl grove soorten grafiet een anisotrope structuur vertonen.

Voordelen

- gemakkelijk en glad te bewerken;
- lage uitzettingscoëfficiënt (maatvast);
- lage soortelijke massa (laag elektrodegewicht, ook voor grote elektroden);
- hoge toelaatbare stroomdichtheid (waardoor hoge materiaalafname mogelijk is);
- grafiet is tegen zeer hoge temperaturen bestand;
- in grote afmetingen verkrijgbaar;
- lage slijtage;
- geen inwendige spanningen ('dood' materiaal).

2.3.2.3 Wolframkoper

Wolframkoper is, naast het minder toegepaste wolfram-zilver, een op basis van wolfram via de sintermetallurgie ontwikkeld elektrodemateriaal. Dit materiaal is voor zinkvonken procestechnisch gezien ideaal vanwege zijn hoge erosievastheid.

Het is opgebouwd uit gesinterde wolframpoeder 'doordrenkt' met koper. De hoge slijtvastheid tegen erosie wordt verkregen door het wolfram; de goede elektrische geleiding en de betere ductiliteit door het koper. Bij de fabricage wordt een volkomen isotrope structuur verkregen, die niet vezelachtig is en geen interne spanningen bezit.

Het gedrag van diverse soorten bij het vonkeroderen hangt voor een groot deel af van de materiaaleigenschappen, zoals W-gehalte, poreusheid, korrelgrootte en de verdeling hiervan.

Materiaalsamenstelling:

In het algemeen 65 á 80% wolfram, verder koper.

Fysische eigenschappen:

- soortelijke massa, afhankelijk van de samenstelling 13-16 g/cm³
- smeltpunt wolfram 3350 °C
- soortelijke weerstand $5-5,5 \cdot 10^{-8} \Omega m$.

Mechanische eigenschappen:

- hardheid 220 à 240 Brinell
- E-moduul $\pm 2,5 \cdot 10^5 N/mm^2$

Nadelen

Voor grote elektroden zijn wolframlegeringen niet aan te bevelen in verband met de vrij hoge prijs en de hoge soortelijke massa. Ook zijn deze moeilijk verspaanbaar door de hoge hardheid.

tabel 2.5 Fysische eigenschappen grafietsoorten

grafietsoorten voor	fysische eigenschappen		
	erosievastheid	soortelijke massa g/cm ³	poreusheid %
ruwe bewerkingen	$< 100 \cdot 10^{13}$	1,6 - 1,7	16 - 25
universele bewerkingen	$100 - 200 \cdot 10^{13}$	1,7 - 1,8	10 - 16
fijne bewerkingen	$> 200 \cdot 10^{13}$	ca. 1,85	7 - 10

Voordelen

Door de hoge erosievastheid van dit materiaal, is de elektrodeslijtage laag. Het wordt hoofdzakelijk gebruikt voor de bewerking van metalen of legeringen, die ook refractair zijn, zoals bijvoorbeeld hardmetaal. Belangrijke andere toepassingen zijn het bewerken van geharde staalsoorten. De elektrodeslijtage is bij de afwerking of eindbewerking kleiner dan bij de koper- en grafietelektroden.

Het vervaardigen van kleine, zeer nauwkeurige, elektroden is mogelijk daar deze materialen een hoge elasticiteitsmodulus en een goede maatvastheid bezitten. Bovendien is wolframkoper, door de geringe oppervlakteruwheid, die hiermee wordt verkregen, zeer geschikt voor de fabricage door zinken van diepe en rechte gaten die moeilijk zijn te polijsten.

Ten slotte kan men door het kiezen van een hoger kopergehalte de stroomdichtheid verhogen. Daardoor is de materiaalafname groter, zij het ten koste van een grotere elektrodeslijtage.

Afmetingen:

Wolframkoper is leverbaar als:

- ▶ stafmateriaal tot 40 mm Ø met een lengte van maximaal 350 mm;
- ▶ tot 100 mm Ø met een lengte van maximaal 212 mm; tot 60 mm vierkant met een lengte van maximaal 175 mm;
- ▶ plaatmateriaal (rechthoekig) tot 75x20 mm met een lengte van maximaal 400 mm; 100x50 met een lengte van maximaal 212,5 mm;
- ▶ buisvormig materiaal (handelslengte 300 mm) van 0,3 mm tot 6 mm Ø.

2.3.3 Opbouw van de elektrode

De gereedschapselektrode kan zowel uit één stuk, als uit meerdere delen worden vervaardigd. De fabricage is mede afhankelijk van de afmetingen, de vorm en het type van de elektroden en de prijs van het basismateriaal.

2.3.3.1 Afmetingen van de elektrode

Voor elektroden met grote afmetingen zal men moeten nagaan in welke afmetingen het basismateriaal verkrijgbaar is. Voor elektrolytisch koper zie 2.3.2.1. Voor grafiet (zie 2.3.2.2), in de soorten die speciaal voor vonkerosie zijn vervaardigd en met name die met de dichtste structuur en fijne tot zeer fijne korrel, zijn de verkrijgbare afmetingen beperkt (men raadplege hiervoor de leveranciers).

Het wolframkoper (zie 2.3.2.3) is als basismateriaal slechts in betrekkelijk kleine afmetingen verkrijgbaar.

2.3.3.2 Vorm van de elektrode

Indien de te vervaardigen elektrodevorm zo is, dat bij fabricage veel basismateriaal moet worden verwijderd, zal men voor de grote afmetingen en moeilijke vormen de voorkeur geven aan het samenstellen van de elektrode uit meerdere kleine delen. Voor de kleinere afmetingen speelt dit verlies aan basismateriaal nauwelijks een rol.

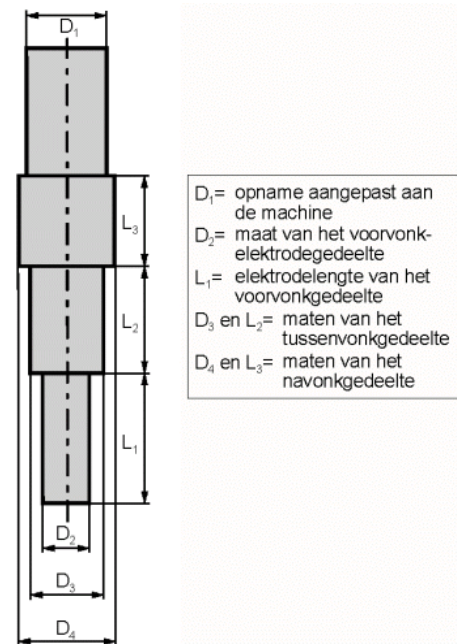
Elektrolytisch koper kan voordelen hebben boven grafiet (bijv. giet-, pers- en galvanotechnieken) en wolframkoper.

Enkelvoudige/samengestelde elektroden

Een veel voorkomende toepassing van samengestelde elektroden bij stempelfabricage is die waarbij het elektrodemateriaal op de snijder of nippel wordt bevestigd, waarna in één bewerking de gewenste vorm wordt gemaakt.

Gecombineerde elektroden

Hieronder wordt verstaan één gecombineerde elektrode voor zowel voor-, tussen- als navonken (zie figuur 2.15).



figuur 2.15 Gecombineerde elektrode

Men kan bij eenvoudige elektroden de ondermaat aanbrengen door draaien, frezen en slijpen. Bij gecombineerde elektroden van koper en wolframkoper kan de ondermaat ook worden verkregen door etsen.

Meestal wordt een dergelijke elektrode gebruikt om doorlopende cilindrische gaten te eroderen. Het voordeel van deze elektrode kan zijn kostenbesparing in de vervaardiging vergeleken met die van 3 afzonderlijke elektroden door:

- ▶ hogere nauwkeurigheid (éénmalige inspanning);
- ▶ de mogelijkheid (voor metaalelektroden) om de ondermaat door middel van etsen te verkrijgen.

De maten D2, D3 en D4 kan men berekenen met behulp van de technologie die bij de machine hoort.

De lengte L1 en de lengte L2 worden bepaald door de dikte van de te eroderen plaat vermeerderd met de elektrodenlengte die nodig is om de optredende slijtage te compenseren. Deze maat kan men eveneens berekenen.

De lengte L3 hangt af van de technologie en de slijtage. Aanbevolen wordt de elektrode na L3 een ondermaat te geven daar anders coniciteit kan optreden door toevallig overspringende vonken.

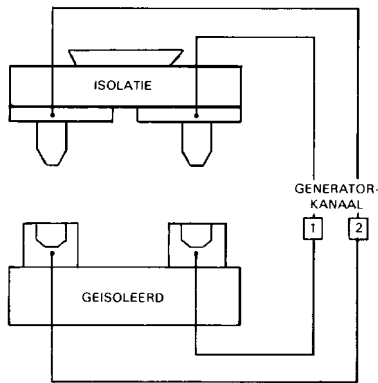
Zinkelektroden voor blinde holtes

Van groot belang voor het eroderen van blinde holtes is de elektrodeslijtage. Men moet de elektrode immers vernieuwen indien de slijtage zo groot is dat de maten van het werkstuk niet meer binnen de tolerantie liggen. Bij cilindrische gaten kan men volstaan met het inkorten van de elektrode. Diepte-instelling moet daarvoor mogelijk zijn.

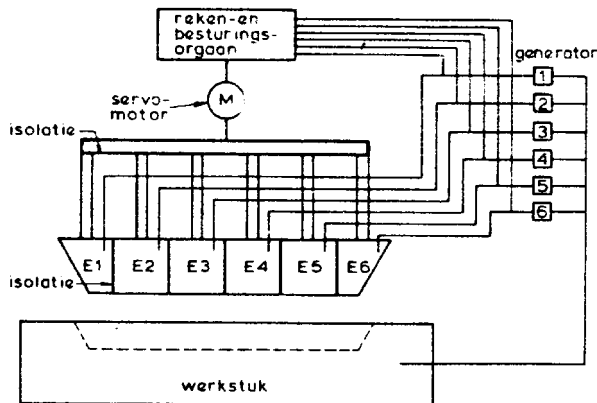
Een andere moeilijkheid bij het eroderen van blinde holtes is de spoeling. Men moet hiervoor voorzieningen treffen (zie paragraaf 2.5.3). Moderne zinkvonkmachines zijn door de ver ontwikkelde generator- en servo-systemen in staat veel van deze problemen op te lossen.

Meerkanaalselektroden

Het meerkanaalsvonken wordt in hoofdzaak gebruikt voor seriefabricage en enkliefabricage waarin meerdere profielen gelijktijdig worden gevonkt (bijv. eenvoudige matrijs). Eveneens gebruikt men deze methode voor het vonken van grote profielen, waarbij de elektrode in segmenten wordt verdeeld (zie figuren 2.16 en 2.17). Dit kunnen zowel blinde als doorlopende profielgaten zijn.



figuur 2.16 Meerkanaalsvonken; geïsoleerde elektroden



figuur 2.17 Meerkanaalsvonken

De elektroden worden op een isolerende grondplaat van bijv. gewapende kunststof bevestigd door schroeven of lijmen.

De van elkaar geïsoleerde elektroden of elektroden-segmenten worden door middel van verschillende aansluitkabels vanuit de afzonderlijke generatorkanalen gevoed (zie figuur 2.17).

2.3.4 Elektrode-ontwerp en -fabricage

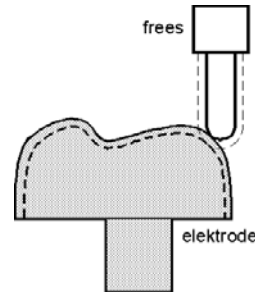
De elektrode-dimensies en elektrode-ondermaten worden bij klassieke vonkopertes vanuit het proces gedefinieerd door de grootte van de vonkspleet. Machine-strategieën vermelden de gewenste ondermaten die gebruikt dienen te worden bij elektrodeontwerp en elektrodefabricage.

Het ontwerp van de elektrodevorm kan grotendeels gebeuren startend vanaf het CAD-model van het werkstuk. Hiervoor worden de te vonken werkstukoppervlakken geselecteerd en afgesplitst (geëxtraheerd). Indien de elektrode maar een deel van de caviteit bewerkt (bijv. in het geval van opsplitsing), zijn maar een beperkt aantal werkstukoppervlakken beschikbaar (CAD-werk) voor het elektrode-ontwerp, waardoor extra modeleren noodzakelijk wordt.

De fabricage van de elektrodevorm kan nu op twee manieren gebeuren:

- Voor iedere elektrode wordt een afgeleide elektrodevorm berekend, waarbij alle oppervlakken worden gecorrigeerd voor de vonkspleetwaarde. Hierbij worden alle punten van het basisoppervlak verschoven volgens de normaal (loodlijn) op dit oppervlak en dit over een lengte gelijk aan de vonkspleet. Verder wordt voor iedere berekende elektrodevorm de gereedschapsbaan bepaald.
- In de tweede optie wordt één enkele gereedschapsbaan berekend op basis van de elektrodevorm zonder dat hierbij de vonkspleet in rekening wordt gebracht. Met de verschillende ondermaten wordt rekening gehouden door bijvoorbeeld bij het frezen

een andere freesdiameter te nemen. Figuur 2.18 toont dat een kleinere elektrode ontstaat door een grotere diameter van de bolrees te nemen. Met deze methode wordt eveneens de ondermaat (vonkspleet) volgens de normaal ten opzichte van het oppervlak gerealiseerd (equidistant). Bij een numeriek bestuurd freesmachine is dit te realiseren door een aangepaste gereedschapscorrectie in te geven.



figuur 2.18 Invloed van de grootte van de bolrees op de grootte van de elektrode

De elektroden kunnen op verschillende manieren worden vervaardigd namelijk door:

- verspanende bewerkingen (draaien, (hogesnelheids)frezen, boren, zagen, slijpen, al of niet met numerieke besturing);
- vonkerosief bewerken (vooral door draadvonken);
- niet-verspanende bewerkingen (smeden, persen, stampen);
- chemische bewerkingen (etsen, galvanotechnisch);
- vormschuren.

De elektroden kunnen op verschillende manieren worden vervaardigd namelijk door:

- verspanende bewerkingen (draaien, (hogesnelheids)frezen, boren, zagen, slijpen, al of niet met numerieke besturing);
- vonkerosief bewerken (vooral door draadvonken);
- niet-verspanende bewerkingen (smeden, persen, stampen);
- chemische bewerkingen (etsen, galvanotechnisch);
- vormschuren.

Niet genoemd zijn walsen, sinteren, e.d. daar deze methoden worden gebruikt om het uitgangsmateriaal, zoals dit in de handel verkrijgbaar is, te vervaardigen. Deze methoden worden in deze publicatie niet besproken.

2.3.4.1 Verspanende bewerkingen

Om uit het beschikbare elektrodemateriaal de gewenste vorm te maken, zal gewoonlijk een verspanende bewerking (zoals zagen, draaien, frezen, boren en tappen, slijpen) of zelfs draadvonken worden toegepast.

De in § 2.3.2 genoemde materialen zijn verspanend te bewerken. Soms behoeft men alleen de elektroden op lengte af te zagen, meestal is een alzijdige bewerking noodzakelijk.

Eenvoudige elektrodevormen kunnen op handmatig bediende machines worden aangemaakt. Meer ingewikkelde elektrodes worden vervaardigd met behulp van CNC machines: 3-assig frezen, 5-assig frezen, draadvonken, draaien, enz.

Het 5-assig frezen is complexer dan het 3-assig frezen, maar de productietijd kan sterk worden gereduceerd.

Bewerkingsgegevens van grafiet, koper en wolframkoper:

Grafiet

Grafiet is goed zonder braamvorming te bewerken op alle machines die in de metaalindustrie worden gebruikt, wat het materiaal des te meer aantrekkelijk

maakt als elektrodemateriaal. Vooral HSC-frezen heeft, samen met speciaal PCD gecoat of CBN snijgereedschap, door de hoge processnelheid, productiviteit en nauwkeurigheid (bij lagere freeskrachten) de fabricage van elektrodes aanzienlijk vereenvoudigd en versneld. De opslag van elektrodes op houders voor repeterende opdrachten heeft zodoende nauwelijks meer zin. Men moet rekening houden met de schurende eigenschappen van het grafiet en daarom de geleidingen en andere bewegende delen beschermen. De elektrische installatie van de machine moet goed geïsoleerd en stofdicht zijn. Ook moet men zorgen voor een afzuig- en tevens filterinstallatie.

Als de vorm en opspanning van de elektrode dit mogelijk maakt, kan men bij het bewerken een zeer hoge snijsnelheid toepassen (tot 1000 m/min). Het vermogen van de machines kan, wegens de goede bewerkbaarheid van grafiet, liggen tussen 20 en 50% van dat wat nodig is voor het bewerken van staal. Spillen met hoge toerentallen (10 - 50.000 omw/min) moeten worden toegepast wanneer men kleine diameters gebruikt. Tabel 2.6 geeft richtlijnen voor de grootte van de snijsnelheid, voeding en spaandiepte voor draaien, boren en frezen.

tabel 2.6 Richtlijnen voor draaien, boren en frezen van grafiet

bewerking	snijsnelheid in m/min	aanzet in mm/omw
draaien: - voorbewerken - nabewerken	250 à 270 300 à 400	0,30 - 0,40 0,10 - 0,20
boren:	50 à 60	0,05 - 0,20
		lineaire aanzet in mm/min
frezen: - voorbewerken - nabewerken	100 à 120 150 à 200	150 - 200 100 - 150

Het gereedschap moet men aan de bewerkingsmethode aanpassen. Bij lage snijsnelheid kan men snelstaal gebruiken. Bij hoge snijsnelheid en voor grote aantallen elektroden is het gebruik van hardmetaalgereedschap noodzakelijk. De meest geschikte hardmetaalkwaliteit is die welke gebruikt wordt voor het bewerken van gietijzer. Aan te bevelen is het geregeld controleren op bot worden. Dit kan namelijk tot gereedschapbreuk leiden en afsplintering van de grafielektrode.

Aanbevolen beitelhoeken:

- ▶ vrijloophoek 10 - 12°;
- ▶ spaanhoek 0 - 6°.

Vooral fijnere soorten grafiet, alsmede de koper geïmpregneerde, zijn met uitstekende detaillering en hoge precisie vorm te geven door middel van draadvonken. Tevens heeft men geen enkele last van stof tijdens de bewerking.

Bij driedimensionale bewerking op een kopieerfreesmachine dient men de freesdiameter aan te passen aan de taster om de gewenste ondermaat te verkrijgen. Vormschuren komt als fabricagemethode voor grotere afmetingen bij grafiet voor.

tabel 2.7 Richtlijnen voor slijpen van koper

slijpbewerking	snijsnelheid in m/s	slijpdiepte in mm	karacteristieke slijpsteen
doorslijpen	50	afhankelijk van de slijpschijf	A 80 NB 25
vlak-, rond- en profielslijpen	25 - 30	0,1 - 0,5	39C60/80 JV

Koper

Koper is in het algemeen goed te verspanen. Gelet moet worden op het zogenaamde 'dichtsmeren'; koper heeft namelijk een zeer lage rekgrens. Als snijvloei stof wordt aanbevolen raapolie te gebruiken. Snijnsnelheid 45-60 m/min met snelstalen beitels en 100-150 m/min met hardmetalen beitels.

Beitelhoeken:

- spaanhoek 15-25°;
- vrijloophoek 6-10°.

Het slijpen van koperelektroden kan met het oog op het dichtsmere problemen geven. Moet men toch slijpen, dan als koelvloeistof machineolie gebruiken of de slijpsteen dompelen in gesmolten schapenvet.

Slijpsteentype: 38A6OKVBE;

Slijpsnelheid: 25-30 m/sec.

Er zijn speciale slijpschijven voor koper in de handel, zie tabel 2.7.

Wolframkoper

Wolframkoper is te bewerken met snelstalen of hardmetalen snijgereedschap.

Snelstaal:

- ▶ snijsnelheid 12-20 m/min;
- ▶ aanzet tot 0,1 mm/omw;
- ▶ spaanhoek 8-10°.

Hardmetaal:

- ▶ snijsnelheid 60-100 m/min;
- ▶ aanzet tot 0,3 mm/omw;
- ▶ vrijloophoek 6-8°;
- ▶ spaanhoek 8°.

De normale snijvloei stoffen kan men gebruiken.

Men kan wolframkoper goed slijpen met slijpschijven welke geschikt zijn voor gehard staal.

Snelheid 25 - 30 m/sec.

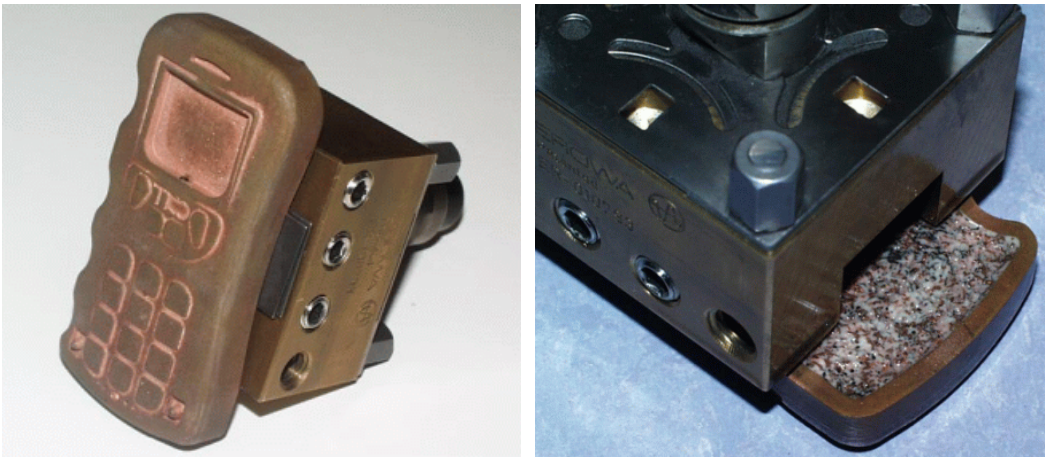
De normale koel- en snijvloei stoffen moeten hiervoor worden gebruikt.

2.3.4.2 Vonkerosief bewerken

Het is mogelijk om elektroden of bepaalde gedeelten daarvan met behulp van vonkerosie te vervaardigen, bijvoorbeeld schijfelektroden, waarvan met behulp van draadvonken de gehele contour wordt geërodeerd. De aanzienlijk meer uitgebreide mogelijkheden van numeriek bestuurd draadvonkmachines maken deze aanmaakmethode bijzonder aantrekkelijk. Tevens zijn daarmee in vele gevallen bijna gelijktijdig productspecifieke opspanmiddelen te fabriceren.

2.3.4.3 Generatief bewerken

Eind 20e eeuw begon de opkomst van computergestuurde processen, die werken op basis van laagsgewijze materiaalopbouw. Deze Rapid Prototyping (RP) technieken genereren (van oorsprong in kunststof) een werkstuk rechtstreeks vanuit een bestaand CAD-programma, door plaatselijk materiaal toe te voegen en niet door materiaal weg te nemen, zoals bij de conventionele methodes. Figuur 2.19 toont een elektrode welke elektrolytisch is opgegroeid op een stereolitografie model. Rapid Tooling technieken en Rapid Manufacturing als SLS (selectief laser sinteren), DMLS (direct metaal laser sinteren), DSLM (direct selectief laser ('melting'))



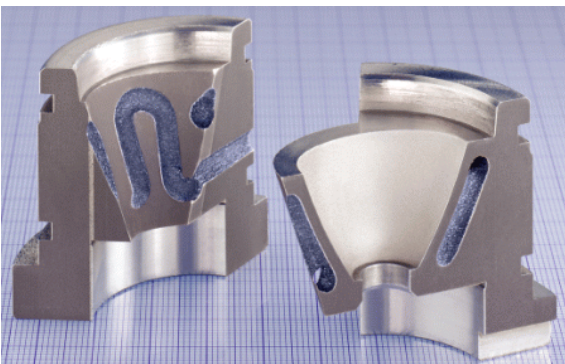
figuur 2.19 Met Rapid Tooling technieken vervaardigde elektrode (links: vooraanzicht; rechts: achteraanzicht)

smelten) en DMD (direct metal deposition, zie figuur 2.20) bieden zich aan als veelbelovende methodes om uit de CAD-file de elektrodevorm(en) af te scheiden en deze rechtstreeks in metaal op te groeien [ref. 38, 39].



figuur 2.20 Industriële CNC machine voor directe metaaldepositie

Eindkwaliteit, snelheid en structuur voldoen nog niet aan de meestal gewenste hoge kwaliteit ($< 0,01$ mm en 100% dichtheid). Tot nu toe onbekend is de unieke mogelijkheid de elektrode te vervaardigen uit vrijwel elke gewenste metaalsamenstelling, zelfs wisselend per locatie of geleidelijk overgaand als 'gradient' materiaal, afgestemd op het werkstuk. Mogelijkheden komen hiermee in het vizier om winst te behalen ten aanzien van elektrodeslijtage, oppervlaktegesteldheid en de snelheid van materiaalafname. Ook zijn op deze manier inzetstukken met vormvolgende koelkanalen te maken (zie figuur 2.21).



figuur 2.21 Voorbeeld van een functioneel inzetstuk direct in metaal gegenereerd d.m.v. DMD

2.3.4.4 Niet-verspanende bewerkingen

Ook niet-verspanende vormgeving van elektroden is naast verspanende methodes mogelijk. Dit betreft voornamelijk het maken van elektroden in series. Koper kan als elektrodemateriaal worden gesmeed. Dit kan eventueel koud worden uitgevoerd in de productie-smeedmatrijs zelf. Deze elektroden verkrijgen daardoor de maat en vorm van de matrijs.

De gesmede elektrode kan worden gebruikt na het aanbrengen van voorzieningen voor positioneren en spoelen. In verband met de vonkspleet kan het nodig zijn om de elektrode te etsen. Vooral voor de fabricage van smeedmatrijzen kan dit een goedkope en snelle methode zijn.

Persen

Men kan ook elektroden maken door deze uit grafietpoeder te persen. In verband met de indringdiepte van de persdruk zijn er beperkingen aan de verhouding breedte/diepte. Deze persmethode is vooral interessant voor grote aantallen gelijke elektroden die met het oog op de vorm geschikt zijn om te persen (geen scherpe hoeken).

Ponsen en buigen

Elektroden kunnen ook uitgaande van plaatkoper door middel van ponsen en buigen worden vervaardigd. Dit is een ideale methode voor zeer grote series elektroden die qua vorm hiervoor geschikt zijn.

2.3.4.5 Chemische bewerkingen

Naast de verspanende en niet-verspanende vormgeving is het ook mogelijk om de gewenste vorm met behulp van chemische processen te vervaardigen. Daarvoor bestaan er twee methoden:

- ondermaat-etsen;
- galvanotechnisch opgroeien.

Etsen

De diametrale ondermaat van een metaalelektrode kan door etsen worden verkregen. Voorbeeld: Een gesmede koperelektrode heeft reeds de maten van de matrijs, terwijl er in de matrijs nog geen rekening met de vonkspleet is gehouden.

Voor koper is een etsmiddel:

40 gewichtsprocenten 65% salpeterzuur (HNO_3),
s.m. 1375 kg/m^3

10 gewichtsprocenten 80% fosforzuur (H_3PO_4),
s.m. 1700 kg/m^3

50 gewichtsprocenten gedistilleerd water.

Voor wolframkoper:

- 50 gewichtsprocenten fluorwaterstofzuur (HF),
s.m. 1130 kg/ m³
- 40 gewichtsprocenten 65% salpeterzuur (HNO₃)
s.m. 1375 kg/ m³
- 10 gewichtsprocenten gedistilleerd water.

Werkwijze:

Plaats de bak, van polyetheen (PE) in water om oververhitting van de etsvloeistof te voorkomen; etssnelheid 10 - 12 µm/min. Onderbreek het etsen iedere 30-60 sec. om de elektrode af te wassen en te borstelen. Gebruik hiervoor een borstel met bronzen draden, om de geometrische vorm en de oppervlaktegesteldheid van de elektrode zo weinig mogelijk te beïnvloeden.

Voor staal:

- 40 gewichtsprocenten 65% salpeterzuur (HNO₃)
s.m. 1375 kg/m³
- 60 gewichtsprocenten gedistilleerd water.
- Esttemperatuur 45 °C; etssnelheid 60-80 µm/min.

Door de elektrode en/of de vloeistof tijdens het etsen in beweging te houden, bevordert men de gelijkmatigheid van het proces. Aanbevolen wordt het proces regelmatig te onderbreken; elektrode afspoelen in of met water en de maat controleren.

Waarschuwing

Het werken met deze agressieve vloeistoffen vereist de uiterste zorgvuldigheid en speciale verplichte voorzieningen. Zo moet men steeds de zuren in het water gieten en niet omgekeerd. Bij het werken met fluorwaterstofzuur is het gebruik van een zuurkast verplicht, terwijl het bij de andere zuren zeker aan te bevelen is, dit in verband met de bedrijfsveiligheid en ter bescherming van het machinepark.

Galvanotechnisch opgroeien

De vervaardiging van elektroden door galvanotechniek geschiedt in een aantal fasen en wel:

- het maken van een positief model (positief t.o.v. de te eroderen vorm);
Dit kan worden verkregen door het afgieten van een negatieve vorm, of het gebruik van bestaande modellen of afgietsel, of door een modelmaker speciaal vervaardigd model, of door een model vervaardigd middels Rapid Prototyping technieken (zie § 2.3.4.3);
- het model moet elektrisch geleidend zijn of door een op te brengen speciale laag geleidend worden gemaakt;
- het model wordt daarna galvanisch verkoperd;
Meestal is een laag van ongeveer 3 µm voldoende;
- de verkoperde laag moet vervolgens worden voorzien van verstijvingen indien deze al niet in een eerdere fase zijn aangebracht en/of van referentiepunten of vlakken, die zijn overgenomen van het model;
- de elektrode kan daarna van het model worden afgenomen en is na (eventueel) etsen gereed om als elektrode te worden gebruikt.

Deze methode is zeer geschikt voor gecompliceerde betrekkelijk moeilijk definieerbare vormen, grote aantallen kleine identieke elektroden of voor zeer grote elektroden (≥ 5000 cm² oppervlak).

2.3.4.6 Vormschuren

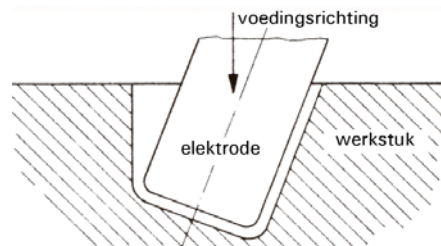
Vormschuren wordt veel voor grote elektroden gebruikt. Hierbij wordt een negatief model van het werkstuk vervaardigd, of door (grof) voorvonken van een metaal mal of door het bekleden van een kunststof moedermaal met slijpkorrels. Op een vormschuurmachine wordt vervolgens een grafietblok tegen dit moedermodel gedrukt, waarna

met relatieve, excentrische bewegingen de elektrodevorm wordt gefabriceerd.

De eventueel benodigde verschillende ondermaten worden verkregen door het variëren van de excenter instelling. Een groot voordeel van deze methode is dat men, zodra een moedermaal beschikbaar is, hiermee talrijke elektroden kan vervaardigen en de gesleten elektroden weer op vorm kan brengen.

2.3.5 Opspannen van elektroden

Indien enige nauwkeurigheid is vereist, is een goede opspanning van het gereedschap noodzakelijk. De hartlijn van de gereedschapselektrode dient in ieder geval nauwkeurig evenwijdig te zijn met de richting van de voedingsbeweging. Figuur 2.22 toont het effect van het scheef inspannen van een elektrode waarmee een cilindrisch gat moet worden gezonken.



figuur 2.22 Scheef opgespannen elektrode

Er zijn verschillende systemen voor het bevestigen van de elektrode aan de vonkkop, zoals het gebruikmaken van respectievelijk spantangen, V-blokken en speciaal voor dit doel in de handel verkrijgbare spanmiddelen.

Zware elektroden worden meestal met bouten of zwaluwstaart-opnames aan de vonkkop bevestigd. Het verdient aanbeveling om bij gebruik van een opspansysteem de elektrode in de fabricagefase reeds op de elektrode-opname te bevestigen.

Bij het spannen van de elektrode kan men twee gevallen onderscheiden:

1. Er wordt gebruikgemaakt van één (gecombineerde) elektrode, bijv. bij het maken van doorlopende gaten waarbij één elektrode wordt toegepast voor de voor-, na- en tussenbewerkingen of bij het zinken van gaten waarbij slechts één bewerking noodzakelijk is (als daarbij bijv. de gewenste ruwheid wordt bereikt bij een voldoende snelle materiaalafname).
2. Er wordt gebruik gemaakt van meerdere elektroden voor het voor-, tussen- en navonken.

In het eerste geval dient de elektrode met de vereiste maatnauwkeurigheid t.o.v. het werkstuk te worden gepositioneerd. In het tweede geval dient men bij het uitrichten bovendien rekening te houden met de voor de bewerkingen karakteristieke ondermaten van de elektroden.

Bij het navonken zal bijvoorbeeld slechts enkele honderdsten mm materiaal moeten worden verwijderd. De positioneernauwkeurigheid van de nabewerkings-elektrode ten opzichte van zijn voorganger dient dus zeker enige malen binnen deze waarde te zijn. Voor het positioneren van de elektrode maakt men gebruik van één of meerdere referentievlakken of -punten op de elektrode.

2.4 Diëlektricum

Zoals eerder beschreven (§ 1.2) heeft het diëlektricum een driedelige functie:

- positieve beïnvloeding van het vonkproces;
- verwijdering van de vonkdeeltjes en afbraakproducten;
- afkoeling van het werkstuk en de elektrode.

Een aparte of ingebouwde eenheid, algemeen diëlektricumunit genoemd, draagt zorg voor de reiniging, het in conditie houden en/of brengen en koelen van de vonkvloeistof en voert deze op wens met verschildruk toe aan de vonkzone.

Bij het zinkvonken wordt overwegend op koolwaterstof gebaseerd diëlektricum gebruikt. Bij speciale zinkvonktechnieken zoals bijvoorbeeld het vonkfreezen of microvonken (waarbij kleine elektroden worden gebruikt) kan demiwater als diëlektricum worden toegepast. De elektrische geleidbaarheid van demiwater is hoog in vergelijking met koolwaterstoffen, zodat bij het klassieke zinkvonken door de grote lekstromen geen vonkdoorslag kan worden gerealiseerd.

De keuze van een diëlektricum voor een bepaalde vonktoepassing wordt beïnvloed door de hieronder vermelde eigenschappen, die deze vloeistof karakteriseren, en de kostprijs.

► Vlampunt

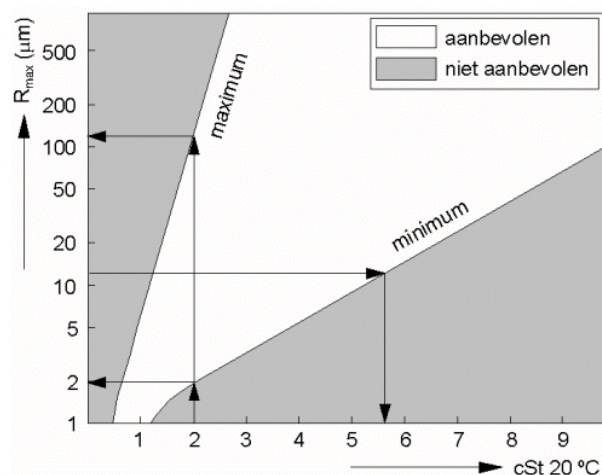
Het vlampunt is de laagste temperatuur waarbij er voldoende dampvorming is om een ontvlambaar mengsel van lucht en gassen te verkrijgen. Hoe hoger het vlampunt, des te veiliger de vloeistof. Diëlektrica kunnen op basis van hun vlampunt worden ingedeeld in drie klassen (zie tabel 2.8). De meest gebruikte vonkerosiediëlektrica behoren tot de klasse AIII. Diëlektrica met een vlampunt boven de 100 °C worden als niet ontvlambaar beschouwd.

tabel 2.8 Indeling van de diëlektrica op basis van hun vlampunt

Klasse	Vlam (flash) punt	Voorbeeld
A I	Onder 21 °C	benzine
A II	21 – 55 °C	ruwe petroleum, white spirit
AIII	55 – 100 °C	synthetische olie

► Viscositeit

In verband met de spoeling is bij kleine spleten (vooral bij het nabewerken) een lage viscositeit noodzakelijk. Laag viskeuze vloeistoffen geven verder aanleiding tot een lagere ruwheid (omdat een grotere verbreding van het plasmakanaal mogelijk is). Figuur 2.23 geeft schematisch aan hoe de keuze van een viscositeit kan worden gemaakt als functie van de gewenste ruwheid.



figuur 2.23 Keuze van de viscositeit als functie van de gewenste ruwheid

Bij het ruwen (grotere stromen en grotere vonkspleten) mag een diëlektricum met hogere viscositeit worden gebruikt. Diëlektrica met een viscositeit van 2 tot 3,5 cSt (bij 20 °C) zijn geschikt

voor het nabewerken (finishen), terwijl voor het afruwen een viscositeit van 4 tot 6,5 cSt geschikt is. In de praktijk dient men veelal een compromis te vinden, waardoor het diëlektricum zowel voor het ruwen als voor het nabewerken kan worden gebruikt.

► Soortelijke massa van het diëlektricum

In vergelijking tot het effect van de viscositeit is de soortelijke massa vooral van invloed op het nabewerken. Diëlektrica met een hogere soortelijke massa laten een grotere materiaalafname toe.

► Elektrische geleidbaarheid

De elektrische geleidbaarheid moet voldoende klein zijn. Gemiddelde waarden voor de elektrische geleidbaarheid van koolwaterstoffen (als diëlektricum) zijn $2 \cdot 10^{-14}$ Ohm/cm.

► Diëlektrische constante

De relatieve diëlektrische constante geeft aan met hoeveel de capaciteitswaarde van een lege capaciteit (t.o.v. vacuüm) wordt verhoogd door het diëlektricum. Gemiddelde waarden voor een vonkerosiediëlektricum variëren tussen 2 en 2,5. Een te hoge waarde heeft een negatieve invloed op de ruwheid.

► Doorslagspanning

De spanning nodig om een doorslag te krijgen tussen 2 elektroden, waartussen zich een diëlektricuml laag van 2,5 mm bevindt, wordt doorslagspanning genoemd. Diëlektrica, geschikt voor vonkerosie, dienen een doorslagspanning van 50....60 kV te hebben.

► Suspensiecapaciteit

Om de geproduceerde vonkdeeltjes tijdens de bewerking te verwijderen, dient het diëlektricum over een zekere suspensiecapaciteit te beschikken. In suspensie aanwezige micro-deeltjes geven verder aanleiding tot een beter vonkproces (zie bij poedergesuspenderde diëlektrica). Om een efficiënte verwijdering van de vonkdeeltjes door het filtersysteem mogelijk te maken, mag de suspensiecapaciteit ook weer niet te groot zijn.

► Compatibiliteit met machinecomponenten

Diëlektrica mogen de machine-onderdelen niet aantasten. Koolwaterstoffen kunnen afdichtingsmateriaal (bijv. siliconenkit) en lak aantasten. Speciale materialen dienen hiervoor te worden gebruikt.

► Stabiliteit

Stabiliteit tegen veroudering is belangrijk omwille van economische redenen (diëlektricum kan langer worden gebruikt).

► Effecten op gezondheid en milieu

Naast de functionele eigenschappen dient ook aandacht te worden besteed aan de mogelijke schadelijke effecten van industriële koolwaterstoffen op gezondheid en milieu (huidirritatie, toxiciteit, dampvorming, geurvorming). Het verdient de voorkeur om producten te selecteren met een zo beperkt mogelijke dermatologische invloed. Deze producten dienen zoveel mogelijk te bestaan uit verzadigde koolwaterstoffen en bevatten liefst zo weinig mogelijk aromatische componenten (kleiner dan 1% vol.). Op dit moment bestaan geen wettelijke regelingen betreffende toxische invloeden van diëlektrica. Een laag aromatische gehalte van een ongebruikt product betekent niet altijd een goede kwaliteit. Het is belangrijk dat er geen tendens bestaat dat tijdens het vonkproces aromatische componenten worden gegenereerd (stabiliteit tegen veroudering). Dampvorming wordt in belangrijke mate beïnvloed door de afnamesnelheid. Meer viskeuze diëlektrica geven meestal aanleiding tot meer dampvorming.

Poedergesuspenderde diëlektrica

In § 1.2 werd reeds de positieve invloed van de in het diëlektricum aanwezige vonkdeeltjes (minimale vervui-

lingsgraad) aangehaald. Poederdeeltjes kunnen ook bewust worden toegevoegd om de stabiliteit van het vonkproces te bevorderen. Het toevoegen van elektrisch geleidende deeltjes (bijv. Si en C) aan het diëlektricum beïnvloedt het proces en vergroot de vonkspleet, wat een betere spoeling (materiaalafvoer) en minder boogvorming (stabiel proces) mogelijk maakt. Deze vonkspleetvergroting geeft bij het nabewerken ook een lagere ruwheid.

Het is bekend dat bij het bewerken van ijzer of staal de geproduceerde koolstof (door ontbinding van het diëlektricum tijdens het vonkproces) aanleiding geeft tot vorming van bijkomende ijzercarbides. Op die manier kunnen poedergesuspenderde diëlektrica ook worden ingezet om de oppervlaktelaag tijdens het vonkproces te veredelen. Door het inbrengen van de juiste deeltjes kan een oppervlaktelaag (witte laag) worden verkregen met hogere hardheid en/of verminderd aantal microscheuren. Niettegenstaande het feit dat sommige fabrikanten beweren dat ze poedergesuspenderde diëlektrica voor oppervlaktevredeling op de markt brengen, is het effect niet in detail bekend. Oppervlaktevredeling tijdens het vonkproces is op dit moment nog steeds in een stadium van onderzoek en ontwikkeling [ref.2].

Watergebaseerde diëlektrica

Om de nadelen van koolwaterstofgebaseerde diëlektrica, zoals ontvlambaarheid en schadelijke effecten op gezondheid en milieu, te verminderen, werd een 10-tal jaar geleden heel wat onderzoek verricht naar de ontwikkeling van watergebaseerde diëlektrica. Gezien het feit dat gebruik van puur gedeïoniseerd water bij klassieke zinkvonkoperties moeilijk is, werd geprobeerd om additieven aan het water toe te voegen. Door het toevoegen van organische componenten (bijv. glycolen, suikers) verkrijgt men een stabiel vonkproces, maar de materiaalafname is lager in vergelijking tot het gebruik van koolwaterstoffen [ref.3 en 4]. Deze watergebaseerde diëlektrica worden op dit moment sporadisch gebruikt.

2.5 Technologie en strategie

2.5.1 Algemeen

Hoewel het in het algemeen niet nodig zal zijn, is het mogelijk voor een optimale machine-instelling eigen technologische informatie op te bouwen voor het samenstellen van bewerkingsnomogrammen. In figuur 2.24 is een praktisch bruikbaar bewerkingsnomogram gegeven.

Het nomogram is opgebouwd uit vier grafieken: materiaalafname (V_w), ruwheid (R_a), de elektrodeslijtage (v) en zijspleet (s_i) als functie van de generatorpulsduur (t_i); (bij iso-energetische systemen t_e , zie § 2.2.3). De gemiddelde pulsstroom ($\bar{i}_e$) fungeert hier als parameter, die vooraf moet worden afgeleid van onder andere elektrodemateriaal, stroomdichtheid en actief elektrode-oppervlak.

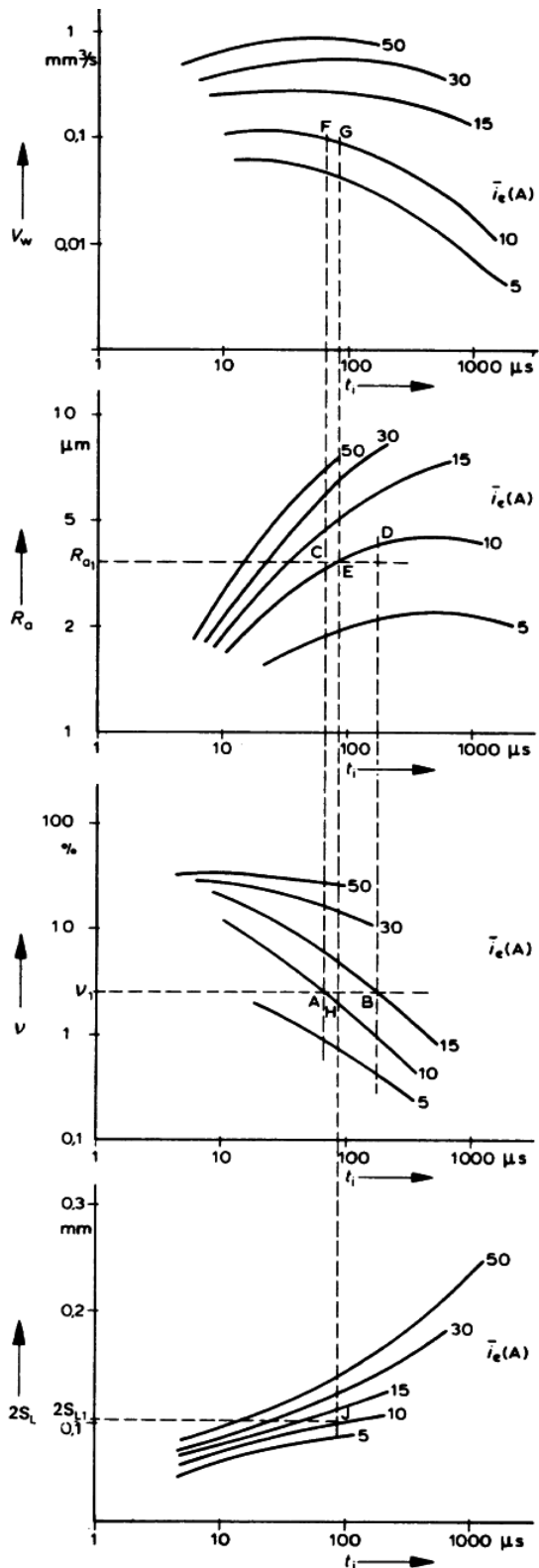
In dit voorbeeld zijn 5 instelmogelijkheden voor de gemiddelde pulsstroom ($\bar{i}_e$) gegeven.

Steeds moet bij een bewerkingsnomogram worden vermeld:

- werkstukmateriaal;
- elektrodemateriaal,
- diëlektricum;
- aard van de spoeling;
- polariteit en open generatorspanning;
- relatieve pulsduur of eventueel;
- pulsintervaltijd (zie ook § 1.6.1).

De procedure om de generatorinstellingen te vinden is als volgt (zie figuur 2.24):

Uitgaande van een maximaal toelaatbare waarde van de relatieve volumetrische elektrodeslijtage (v) vindt men twee mogelijke generatorinstellingen A en B.



figuur 2.24 Bewerkingsnomogram

Hiermee corresponderen in de R_a -grafiek respectievelijk de punten C en D. Bij een maximaal toelaatbare R_a zijn alleen voor ($\bar{i}_e$) = 10 A het traject C - E en alle instellingen van ($\bar{i}_e$) = 5 A mogelijk. De punten C en E corresponderen in de grafiek voor V_w met respectievelijk de punten F en G. Een maximale instelling levert F op (dus voorbewerken!).

Wordt echter t_i iets groter gekozen (door naar G te gaan) dan resulteert dit in een lagere elektrodeslijtage, omdat de lijn ($\bar{i}_e$) = 10 A vrij steil loopt, terwijl V_w dan niet veel minder wordt.

Anderzijds levert de instelling bij F een wat lagere R_a -waarde op (dus nabewerken!). Instellingen op de 5 A lijn geven lagere waarden van V_w . Vervolgens kan men 2x de zijspleet aflezen door de lijn G-H door te trekken tot punt J op de 10 A lijn. De gevonden dubbele zijspleet bepaalt mede de uiteindelijke ondermaat van de elektrode.

Opgemerkt wordt dat men bij de fabricage van ponsgereedschap, waarbij de snijder als elektrode wordt gebruikt, uitgaat van de zijspleet.

Een bewerkingsnomogram is, wanneer de machinefabrikant deze niet verstrekt, door een niet al te ingewikkelde proefopzet te realiseren.

Het nomogram van figuur 2.24 is verkregen door de volgende proefopzet:

Werkstukafmeting: Ø 400 mm, dikte 20 mm;
 Materiaal: 56 NiCrMoV7;
 Elektrodeafmetingen: Ø 40 mm en Ø 20 mm met een spoelgat van respectievelijk Ø 8 mm en Ø 4 mm;
 Elektrodepolariteit: positief;
 Elektrodemateriaal: koper.

Voor het verkrijgen van punten voor de curven zijn vijf series proeven uitgevoerd met respectievelijk gemiddelde pulsstromen van $\bar{I}_e = 5, 10, 15, 30$ en 50 A (in de praktijk is dit afhankelijk van de instelmogelijkheden op de generator).

Bij iedere pulsstroominstelling zijn proeven genomen met ongeveer 5 generatorpulsduren die liggen tussen $t_i = 5$ en 2.000 μs , relatieve pulsdur 50%, diëlektricum koolwaterstof, drukspoeling door elektrode. Aanbevolen wordt de proef driemaal te herhalen.

Na het eroderen van de doorlopende gaten in de proefplaatjes dienen, voor en na de erosie, de volgende grootheden te worden bepaald:

- ▶ materiaalafname (V_w) mm³/s;
- ▶ zijspleet (s_l) mm;
- ▶ ruwheid (R_a) μm ;
- ▶ relatieve volumetrische elektrodeslijtage (v) %.

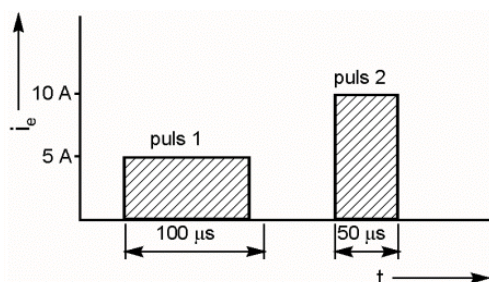
2.5.2 Invloed pulsform

De vorm van de spanning dan wel stroompuls heeft wezenlijke invloed op de technologische grootheden. Figuur 2.25 toont twee pulsen van gelijke grootte maar verschillende vorm.

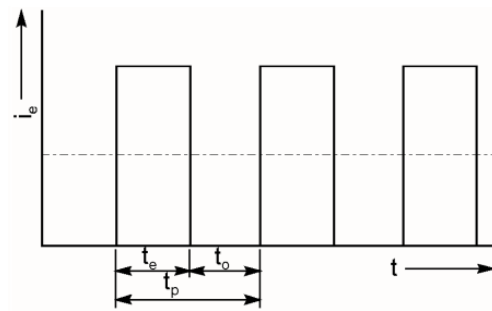
Door wijziging van de pulsform kan men de materiaalafname per puls beïnvloeden, zie figuur 2.26.

In het voorbeeld, tabel 2.9, is men uitgegaan van:
 werkstukmateriaal: 12% chroomstaal
 elektrodemateriaal: elektrolytisch koper

In tabel 2.9 ziet men dat pulsform 2, de zogenaamde harde puls, een grotere materiaalafname per puls geeft dan pulsform 1. Nadeel is daarbij dat de elektrodeslijtage en de oppervlakteruwheid groter kunnen zijn.



figuur 2.25 Pulsen van verschillende vorm bij gelijke grootte

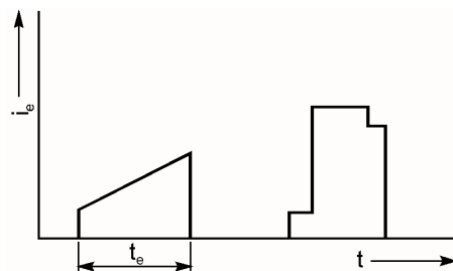


figuur 2.26 Gewijzigde pulsform: 'harde puls'

tabel 2.9 Invloed van de pulsform op de technologie

	puls 1	puls 2
materiaalafname per puls V_{we}	$9 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$	$24 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$
volumetrische elektrodeslijtage per puls V_{ee}	$0,1 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$	$0,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$
oppervlakteruwheid werkstuk R_a	3 μm	5 μm

Voor de materiaalafname is het kiezen van de pulsintervaltijd (t_o) van groot belang. Kiest men t_o te klein, dan bestaat de kans dat de vonk op dezelfde plaats als de juist gedoopte puls overslaat en het zogenaamde vlam-bogen ontstaat. Dit kan tot zeer ernstige beschadiging van elektrode en werkstuk leiden. Pulsvormen met langzaam of getrapt oplopende stroom zijn gunstig met het oog op de elektrodeslijtage (karakteristieken als gegeven in figuur 2.27).



figuur 2.27 Pulsvormen voor geringe elektrodeslijtage

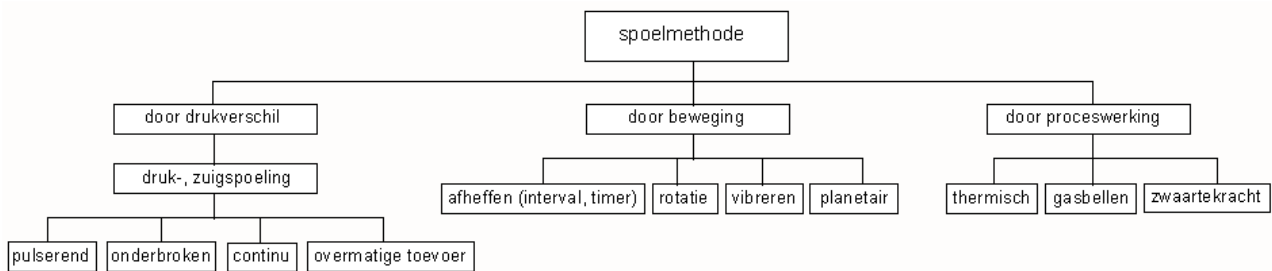
2.5.3 Invloed spoeling

Het vonkerosief bewerken geschiedt in een isolerende vloeistof (diëlektricum). Eén der functies van het spoelen is het verwijderen van de gevormde metaaldeeltjes en de afbraakproducten van het diëlektricum uit de vonkspleet, zie ook § 2.2.2.

Dit kan geschieden door (zie ook figuur 2.28):

- ▶ drukspoeling (in- of opspuiten);
- ▶ zuigspoeling, of een combinatie van druk- en zuigspoeling;
- ▶ bewegingsspoeling;
 - periodiek heffen van de elektrode (met timer);
 - periodiek geforceerd spoelen (ook pulserend spoelen genoemd);
 - combinatie van periodiek lichten en geforceerd spoelen;
 - roteren;
 - passief: geforceerde overloop door een groter volume in de werkbak toe te voeren met vrije wegliep (actieve doorstroming in de werkbak);
 - planetair bewegen.

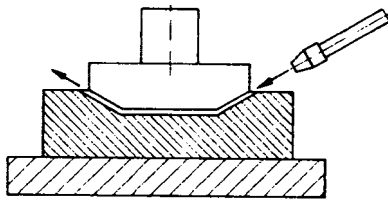
De figuren 2.29 - 2.36 geven hiervan voorbeelden. Het werkstuk staat hierbij minimaal 40 mm onder het vloeistofniveau omwille van de veiligheid.



figuur 2.28 Overzicht van de verschillende spoelmethodes bij zinkvonken door drukverschil, beweging en proceswerking

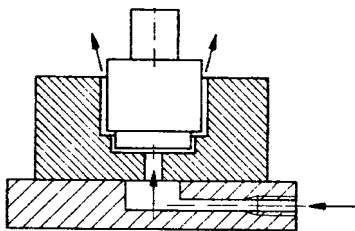
Druk/zuigspoeling

Zijdelingse drukspoeling door middel van een slang met spuitmond (zie figuur 2.29). Deze methode wordt gebruikt, daar waar geen spoelkanalen kunnen worden toegepast.

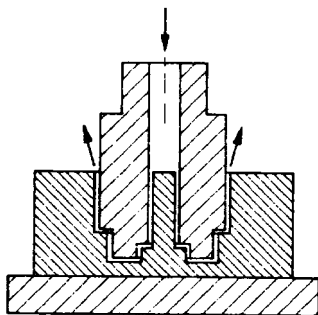


figuur 2.29 Zijdelingse drukspoeling

Drukspoeling vanuit de onderkant van het werkstuk dat is opgespannen op een spoelpot (door werkstuk, zie figuur 2.30) of door elektrode (zie figuur 2.31).



figuur 2.30 Drukspoeling door werkstuk

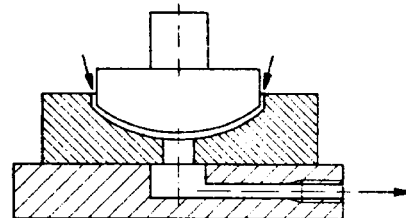


figuur 2.31 Drukspoeling door elektrode

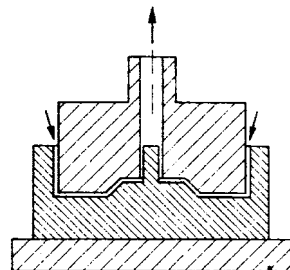
Zuigspoeling door werkstuk, waarbij het werkstuk is opgespannen op een spoelpot. Bij zuigspoeling (door werkstuk, zie figuur 2.32; door elektrode, zie figuur 2.33) heeft de zijdelingse speling een meer constante waarde over de hoogte dan bij drukspoeling.

Bij een gecombineerde druk-zuigspoeling moet de onderdruk van de zuigspoeling groter zijn dan de overdruk van de drukspoeling (figuur 2.34).

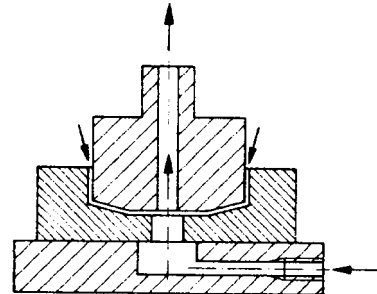
Met behulp van drukspoeling zijn hogere drukken te halen, wat van belang is voor boren met lange dunne buiselektroden.



figuur 2.32 Zuigspoeling door werkstuk



figuur 2.33 Zuigspoeling door elektrode



figuur 2.34 Gecombineerde druk-zuigspoeling

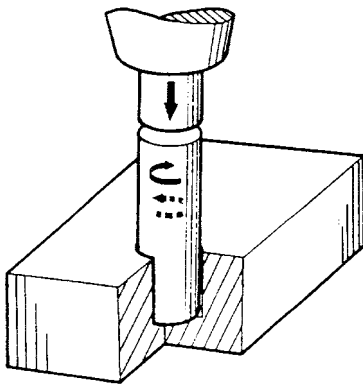
Bij het maken van gaten met een lange spoelweg (dus diepe of vlakke gaten) en speciaal bij die bewerkingen waarbij geen centrale spoeling kan worden toegepast, kan het verwijderen van de erosieproducten moeilijkheden opleveren. Meerdere vonkersiemachines zijn derhalve uitgerust met een systeem voor periodiek zeer snel lichten van de elektrode, waardoor de afbraakproducten fijn verdeeld en eenvoudig uit de spleet kunnen worden verwijderd.

Daarenboven is periodieke, geforceerde spoeling mogelijk. Deze twee mogelijkheden kunnen dan afzonderlijk of gecombineerd worden toegepast. Op oudere types was het gebruikelijk om relatief lang door te vonken alvorens de elektrode kort te lichten. Daardoor verslechterde de condities in de vonkspleet over de tijd gezien. Door snellere Z-asbewegingen en betere detectiesystemen trekken moderne machines nu na kortere tijd terug (over een grotere afstand) en keren snel en exact terug op de actuele Z-waarde.

Roteren

Door de elektrode te laten draaien (figuur 2.35) en daarmee de spoeling te ondersteunen, zijn een reeks voordelen te behalen. De verbeterde spoeling als ge-

volg van de elektrode-rotatie verleent het vonkproces een stabiel karakter tot op grotere diepte.

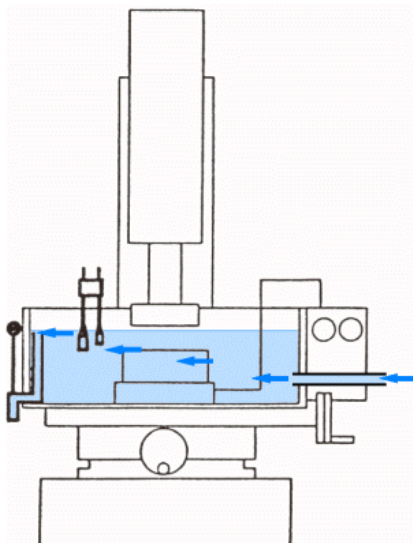


figuur 2.35 Roteren van de elektrode ter ondersteuning van de spoeling

Tevens ontstaat een gladdere en meer cilindrische boring. Een platte kant of een facet aanbrengen op de elektrode, over een iets grotere lengte dan de boring zelf, plus de elektrodeslijtage, heeft een verdere spoelverbeterende werking. In voorkomende gevallen is een rotatiesymmetrische elektrode snel en goedkoop aan te maken middels draaien.

Passieve spoeling

Een geforceerde overloop door een groter volume in de werkbak toe te voeren met vrije wegliep (doorstroming in de werkbak) veroorzaakt een 'passieve' spoeling (zie figuur 2.36).



figuur 2.36 Passieve spoeling door geforceerde overloop

2.5.4 Bewerkingsstrategie

De methodiek om te komen tot een uitgewerkte werkmethode of bewerkingsafloop wordt betiteld met de naam "bewerkingsstrategie". Van belang zijn hierbij aspecten als:

- ▶ wel of niet voorbereiden;
- ▶ keuze van het type zinkvonkoperatie (bijv. klassiek zinkvonken, CNC zinkvonken, planetair vonken). Zie § 2.6 t/m 2.10 voor de beschrijvingen van de verschillende zinkvonkoperaties;
- ▶ hoeveel vonkfases (ruwen, semi-finisseren, finisseren, enz.) worden toegepast en welke generatorinstelling wordt gekozen voor elke fase;
- ▶ hoeveel elektroden zijn nodig en wat is de vorm van iedere elektrode;

- ▶ wanneer wordt van elektrode gewisseld;
- ▶ verdeling van de verschillende elektrodes over een aantal gelijke holtes;
- ▶ een integrale elektrode of een samenstelsel van deelelektroden?

2.6 Klassiek zinkvonken

Zoals bij de meeste verspanende bewerkingen wordt bij het klassiek vonken een voor- en één of meerdere nabewerkingsfases gekozen. Het voorvonken wordt uitgevoerd met hoge pulsenergieën, waaruit een hoge materiaalafnamesnelheid echter ook een hoge ruwheid resulteert. Na de voorbereidingsfase volgt navonken met een laag energetische generatorinstelling, welke de gevraagde oppervlakteruwheid geeft.

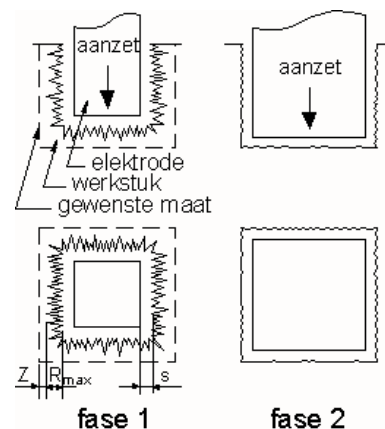
Tabel 2.9 laat globaal de verhoudingen zien bij voor-, tussen- en navonken.

tabel 2.9 Het verschil tussen verspaningssnelheid en oppervlakteruwheid bij een willekeurige voor-, tussen- en navonkinstelling

	voorvonken	tussenvonken	navonken
verspaningssnelheid (mm ³ /min)	100	5	0,05
oppervlakteruwheid (µm Ra)	7	1,6	0,4

Voor het eindresultaat van een bewerking is de oppervlakteruwheid (resultaat van de opeenvolgende vonkinstellingen en de ruwheid van de elektrode) van groot belang. Zou het gehele te verwijderen volume met de daarbij behorende generatorinstelling (met lage pulsenergie), worden 'verspaand', dan kost dit veel bewerkingstijd, terwijl bovendien een hoge elektrodeslijtage optreedt. Als gevolg hiervan is dan een groot aantal elektroden noodzakelijk.

Met navonken wordt uitsluitend de toegift weggevoerd die na het voorvonken nog in de holte zit (figuur 2.37).



figuur 2.37 Conventioneel vonken in twee fases (fase 1: voorvonken; fase 2: navonken)

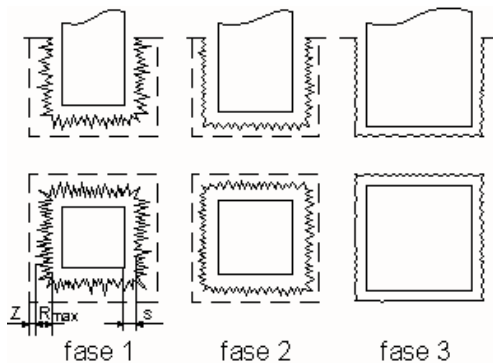
Bij het vaststellen van de afmetingen van de voorvonkelektrode zijn de volgende grootheden (zie § 1.3) van belang:

- ▶ vonkspleet: s_l
- ▶ ruwheid: R_a
- ▶ bewerkingstoegift: Z

Voor het verkrijgen van een kwalitatief goed materiaaloppervlak in het uiteindelijke product, is het van groot belang dat de door het voorvonken ontstane materiaalbeïnvloeding later door het navonken wordt verwijderd.

In de betreffende technologiebladen van de fabrikanten zijn de waarden van vonkspleet en ruwheid af te lezen. Ten aanzien van de materiaalbeïnvloeding staan meestal geen waarden ter beschikking. Deze worden in de praktijk op 50% van de som van de vonkspleet s_L en de ruwheid R_a gesteld. Hierbij is met een zekerheid rekening gehouden.

De meest gangbare bewerkingscyclus, voor- en navonken, kan worden uitgebreid met een aantal tussenvonkfases. De toegift die na het voorvonken nog in de holte achterblijft, wordt met tussenvonken onder gunstiger condities verwijderd, dan dit door navonken zou gebeuren. Via deze methode wordt in een aantal stappen (generatorinstellingen) met een steeds afnemende pulsenergie, geleidelijk de oppervlakteruwheid, de beïnvloede zone en de toegift gereduceerd (figuur 2.38).



figuur 2.38 Conventioneel vonken in drie fases
(fase 1: voorvonken; fase 2: tussenvonken;
fase 3: navonken)

Het werken met meer bewerkingsfases levert vonktechnisch het voordeel op, dat zowel de bewerkings-tijd als de totale elektrodeslijtage worden gereduceerd. Deze methode vergt echter wel een groot aantal, qua ondermaat, verschillend gecorrigeerde elektroden. De hiermee gemoeide kosten zijn over het algemeen hoog. Duidelijk zal zijn dat er ergens een optimum ligt tussen het aantal elektroden en de 'tijd/slijtage' winst bij het vonkeroderen.

2.7 CNC zinkvonken

In de meeste gevallen brengt de koppeling van een CNC aan een daarop ontworpen zinkvonkmaschine een aantal extra voordelen.

Bij handbediening vergen nevenactiviteiten als opspannen, uitrichten, instellen, tussentijds meten, naar de volgende positie verplaatsen, losnemen van elektrode en werkstuk, enz. een fors deel van de beschikbare vonkcapaciteit.

Bij moderne CNC machines worden geïntegreerde bewerkingsaflopen aangeboden, welke al of niet interactief kunnen worden aangeroepen. Naast deze mogelijkheden hebben CNC machines nog tal van andere mogelijkheden ten aanzien van bijvoorbeeld bewegingspatronen en autonomie.

Door de volledige integratie van generator, besturing, technologie, alsmede asbewegingen in de machine zijn er minder interactieproblemen, waardoor een betere procesbeheersing mogelijk is.

Bij CNC wordt het mogelijk identieke cyclische zinkvonkbewerkingen automatisch op diverse posities, in één of meerdere werkstukken te herhalen met grote zekerheid en nauwkeurigheid, met minimale hoeveelheid menselijk toezicht en maximale benutting van de machinetijd. Planetaire bewegingen spelen daarbij een belangrijke rol. Autonoom elektroden en/of werkstuk-

ken wisselen, maar ook opmeten, hoort tot de praktische mogelijkheden op CNC vonkmachines.

Een vonkcyclus kan daarbij onder meer opdrachten omvatten voor achtereenvolgens:

- ▶ het elektrode c.q. werkstuk wisselen;
- ▶ het positioneren van de elektrode ten opzichte van het werkstuk;
- ▶ het toucheren (referentievlak vastleggen);
- ▶ het instellen van de generator (of instelling wijzigen);
- ▶ het activeren van de spoeling en overige machinefuncties;
- ▶ het starten van de vonkbewerking;
- ▶ indien vereist, het repeterend voor verschillende tussenvonkfases gereedschap wisselen (inclusief bijbehorende correcties) met de benodigde wijziging voor de instelling van de generator, spoeling, planetairbeweging, enz.;
- ▶ het werkstuk opmeten;
- ▶ het gereedmelden/stoppen van de vonkcyclus en/of het opstarten van de volgende bewerking.

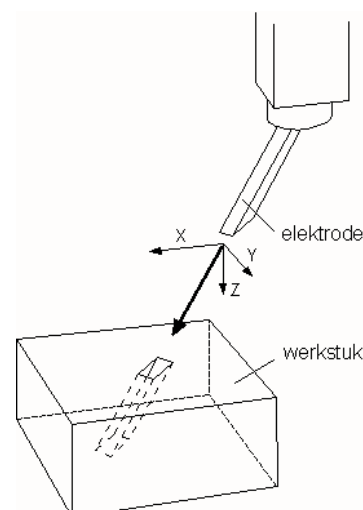
De op zich minder rendabele neventijden voor bijvoorbeeld programmeren, elektrode en werkstuk opspannen, voorinstellen en controleren, worden geminimaliseerd door deze tijdens een lopende vonkbewerking uit te voeren.

De uitvoering van deze zaken verschillen van machinefabrikant tot machinefabrikant. Voor het efficiënt laten verlopen van de bewerking zijn richtlijnen voor het opstellen van bewerkingsstrategieën onontbeerlijk.

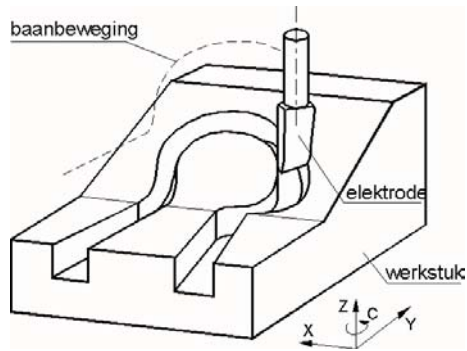
Via een relatief vrije keuze van de hoofdas komt de mogelijkheid beschikbaar, afhankelijk van de uitrusting van de machine, in elke beschikbare asrichting servo-gestuurd te vonken (X/Y/Z en C-as), al of niet in combinatie. Daarmee ontstaan bij CNC zinkvonken vonkbewegingen die tot nu toe als onmogelijk beoordeelde werkstukken binnen bereik brengen (zie de figuren 2.39 t/m 2.42). In § 2.11 wordt een aantal praktijkvoorbeelden weergegeven.

Mogelijk zijn geprogrammeerde -elkaar opvolgende - handelingen, zoals indexeren, eventueel EDM-dressen (opscherpen van de elektrodevorm) van Cu-doorns, afwickelen en van hoofdas (meestal de Z-beweging bij zinkvonken) overgaan op de X- of Y-as naar keuze. Dergelijke acties zijn, al of niet gekoppeld aan bijvoorbeeld planetairmodes, in willekeurige volgorde door de machine uit te voeren.

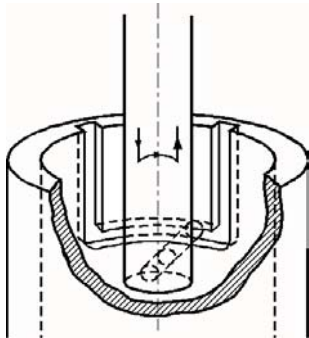
Gerichte ontwikkelingen op het gebied van de generator, de besturing, de software, de machine en de hulpapparatuur breiden de bestaande mogelijkheden regelmatig verder uit.



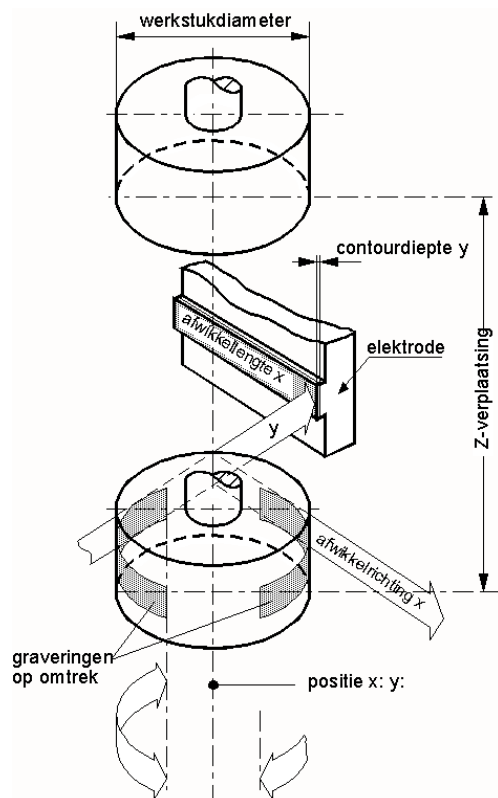
figuur 2.39 3-assig gestuurd zinkvonken (onder een vector)



figuur 2.40 Meerassig contourvonen met elektroderotatie (4-assig baangestuurd)



figuur 2.41 Vonkmogelijkheid door middel van verdraaiing van de C-as



figuur 2.42 Het afwikkelen van een platte elektrode op de buitenkant van een werkstuk (zie ook figuur 2.97 in hoofdstuk 2.11)

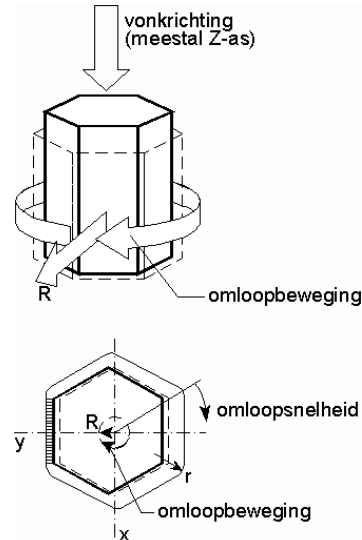
2.8 Planetair vonken

2.8.1 Begripsbepaling

Planetair vonken is vonkerodieren met een gedefinieerde, toegevoegde omloopbeweging (orbitale beweging) van de elektrode en/of het werkstuk op een afstand R (translatie-afstand) uit het hart van de al of niet ac-

tieve vonkrichting (zie figuur 2.43). Bij deze beweging draait de elektrode en/of het werkstuk niet om de eigen as (C-as staat stil).

Het doel is het verkrijgen van een equidistante vergroting van een reeds door zinkvonken vervaardigde holte. Hierdoor kan onder andere aan de maat worden gevonkt met elektroden die dezelfde ondermaat hebben. Bijkomend voordeel is het verbeteren van de spoeling als gevolg van de extra elektrodebeweging.



figuur 2.43 Het principe van planetair vonken

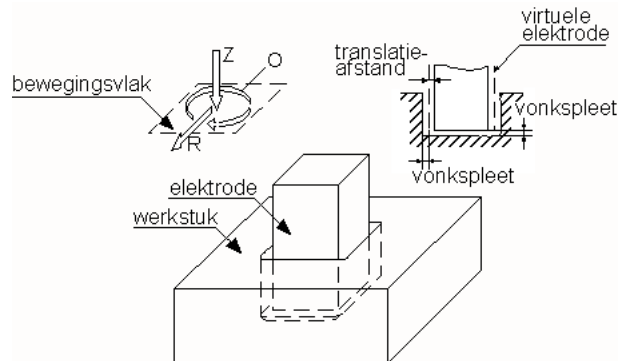
2.8.2 Algemeen

De ontwikkeling van een planetair systeem dat de verschillen in de ondermaat kan opvangen, heeft een doorbraak veroorzaakt.

De meeste planetaire systemen bewegen de elektrode met een constante translatie-afstand (excentriciteit) in een vlak, waardoor alle punten van de elektrode evenwijdig aan dit vlak bewegen.

Hierdoor wordt volgens het bewegingsvlak, welke meestal loodrecht is op de Z-as, een virtueel grotere elektrode gecreëerd (figuur 2.44). Een ruimtelijke alzijdige vergroting, zoals bij de vonkspleet, wordt niet verkregen. Deze wijze van vonken noemt men planetair vonken.

Naast deze grondvorm zijn met moderne planetair-systemen ook andere bewegingsprincipes mogelijk (zie § 2.7).

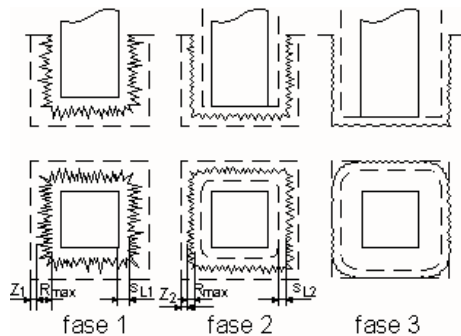


figuur 2.44 Schematische weergave van de planetair-beweging

Het beschreven bewegingspatroon wordt echter gezien de toepassingsmogelijkheden het meest gebruikt. In het voorafgaande is de strategie van het conventioneel zinkvonken in meerdere fases besproken. Deze strategie maakt, gebruikmakend van het planetair-

systeem, het mogelijk dat (zie figuur 2.45):

- conventioneel wordt voorgevonkt tot op de nominale diepte (waarbij een toegift tot op de bodem blijft zitten gelijk aan die op de zijvlakken van de holte);
- een generatorinstelling wordt geselecteerd met een lagere pulsenergie dan de voorafgaande;
- diepte-instelling en translatie-afstand worden aangepast;
- de bewerkingsfase start;
- de punten b tot en met d worden herhaald, totdat de gewenste oppervlaktekwaliteit is bereikt.



figuur 2.45 Planetair vonken in meerdere fases

2.8.3 Positieve/negatieve aspecten

Pluspunten

Dankzij de CNC wordt de primaire doelstelling van het planetairsysteem - te weten het compenseren van verschillende elektrode-ondermaten - in de praktijk beter realiseerbaar.

Bewerkingstijd en elektrodeslijtage worden verder geminimaliseerd door een verdere verfijning van het aantal te gebruiken bewerkingsfases.

Er kan worden gekozen voor één en dezelfde ondermaat voor alle te gebruiken elektroden. Dit heeft bij het vonken van meerdere gelijke profielen het grote voordeel dat elektroden die aan slijtage onderhevig zijn geweest, vooral ontstaan door het navonken, nog benut kunnen worden voor het voorvonken. Door dit 'doorschuiven' kan het aantal elektroden nog verder worden beperkt.

Naast deze primaire voordelen zijn nog andere belangrijke voordelen te noemen:

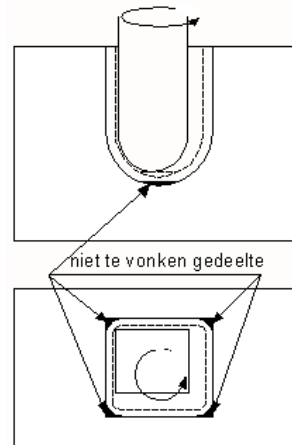
- ▶ doordat de slijtage bij het planetair vonken wordt verdeeld over het gehele manteloppervlak van de elektrode (bij het zinkvonken frontaal), is deze in absolute waarde (μm) zeer klein;
- ▶ door de planetairbeweging van de elektrode ontstaan zuigende en persende spoeeffecten in de vonkspleet. Deze hebben een positief effect op het reinigen van de vonkzone, hetgeen de processtabiliteit ten goede komt;
- ▶ de verkregen oppervlaktegesteldheid op het bodemvlak van de holte is tengevolge van de planetairbeweging beter als met dezelfde generatorinstelling zonder planetairbeweging, namelijk ongeveer gelijk aan de ruwheid op de zijvlakken;
- ▶ de elektrodeslijtage, ontstaan in de fases waarbij gebruik is gemaakt van de planetairbeweging (gelijkmatig over het gehele manteloppervlak van de elektrode verdeeld), kan worden gecompenseerd door vergroting van de laatste planetairbeweging;
- ▶ door de translatie-afstand aan te passen kan naar de maat worden toegewerkt.

Minpunten

Het planetair vonken kent behalve voordelen ook een aantal nadelen namelijk:

- ▶ de planetairbeweging veroorzaakt kleine vormfouten zoals het ontstaan van afrondingen en vervormingen

van radii en bolcontouren (figuur 2.46). Onder 'elektrodeconstructie voor planetair vonken' (zie § 2.8.5) wordt hierop verder ingegaan;



figuur 2.46 Vormfouten door planetair vonken

- ▶ de onder de voordelen genoemde zuig- en pers-effecten tengevolge van de planetairbeweging veroorzaken een geringe zijdelingse belasting van de elektrode. Slanke elektroden kunnen onder invloed van deze krachten enigszins doorbuigen;
- ▶ de voor het planetair vonken benodigde elektrode is niet eenvoudig te construeren, daar rekening dient te worden gehouden met vonkspleet (equidistante om de gehele elektrode) en translatie-afstand (equidistante in het planetairvlak). Zie hiervoor ook 'elektrodeconstructie voor planetair vonken';
- ▶ planetair vonken is bij de handbediende machines, doordat gebruik wordt gemaakt van een groot aantal instellingen, veel arbeidsintensiever dan het conventioneel zinkvonken. Bij de numeriek bestuurd machines is dit effect niet aanwezig.

2.8.4 Planetaire uitvoeringsvormen

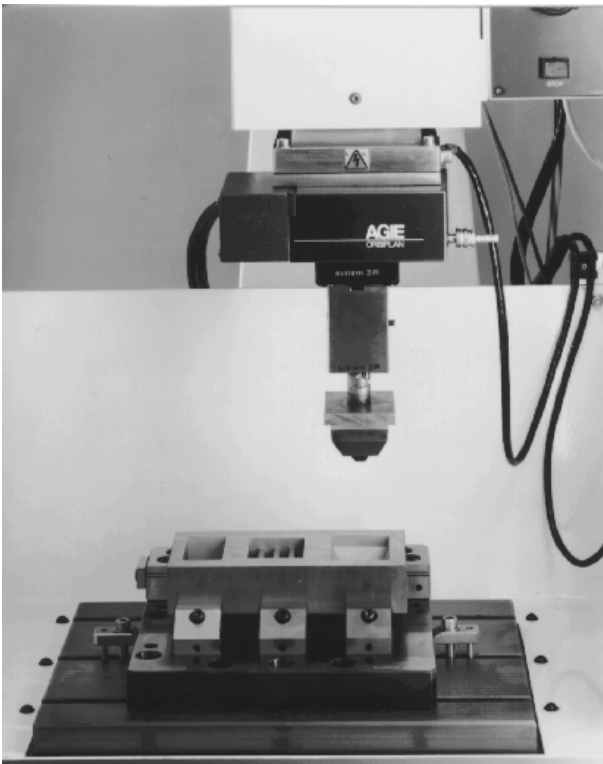
2.8.4.1 Inleiding

De oorsprong van het planetair vonken ligt in een handbediende machine met als optie een achteraf gemonteerde planetairkop voor het opwiden in een vlak. Eerst zonder koppeling met de Z-as beweging, later met. Tegenwoordig worden nog steeds losse koppen geleverd door leveranciers van machine-accessoires. Hierbij is geen koppeling met de generatorinstelling aanwezig (1e generatie planetair vonken).

Door de servo- en planetairbeweging te koppelen (2e generatie) is het mogelijk bijvoorbeeld spiraalvormig, conisch openend of sluitend op te wijden (zie § 2.8.4.2.2). Translatiestappen en generatorinstellingen zijn hierbij niet gekoppeld.

Door middel van een eenvoudige besturing tussen planetairkop en generator zijn een reeks bewerkings-trappen aan dezelfde contour automatisch af te lopen (zie figuur 2.47). Hierbij is bedoeld, verschillende translatie-afstanden met bijbehorende instellingen en daardoor een automatische afloop van zinken tot en met glad navonken.

De numerieke besturing bij moderne zinkvonkmachines (zie figuur 2.48) maakt losse koppen overbodig, omdat integraal middels de assen de planetaire bewegingen worden geregeld.



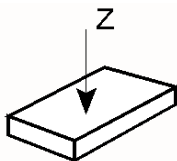
figuur 2.47 Machine met losse planetaire kop en automatische afloop



figuur 2.48 Moderne CNC zinkvonkmachine

2.8.4.2 Planetaire bewegingsmogelijkheden

Bij de navolgende planetaire bewegingscycli wordt voor een goed begrip steeds uitgegaan van een vonkbeweging volgens de Z-as (zie figuur 2.49).



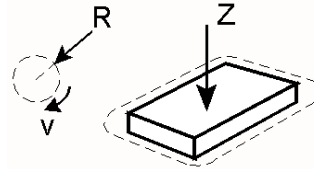
figuur 2.49 Zinkvonken volgens de Z-richting

CNC machines hebben echter de mogelijkheid om de vonkbeweging volgens X, Y of Z-as of een combinatie te laten verlopen. De planetaire beweging wordt door de besturing hierop gesuperponeerd. In de volgende paragraaf wordt schematisch een aantal translatiebewegingen weergegeven.

2.8.4.2.1 Bewegingen volgens één hoofdas

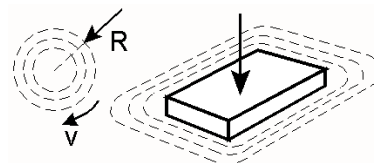
Enkelvoudige beweging

De planetaire beweging heeft één constante translatie-afstand R en hoeksnelheid v (ook wel omloopsnelheid genoemd) gedurende het gehele proces (zie figuur 2.50). Belangrijkste toepassing: voorvonken met planetaire beweging ter verbetering van de spoeling.



figuur 2.50 Enkelvoudige planetaire beweging met vaste translatie-afstand (R) en hoeksnelheid (v)

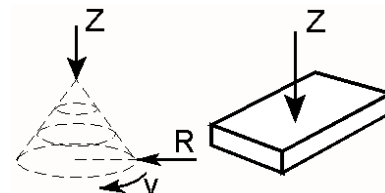
De translatie-afstand (R) wordt met stilstaande Z-as steeds vergroot tot een bepaalde maximale waarde (zie figuur 2.51).



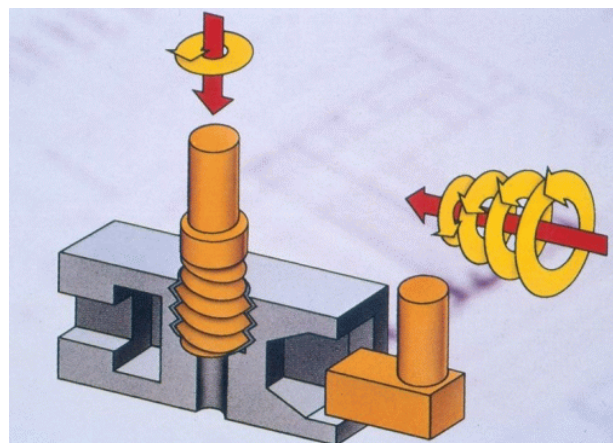
figuur 2.51 Enkelvoudige planetaire beweging met constante hoeksnelheid (v) en toenemende translatie-afstand (R)

Meervoudige bewegingen

Hierbij is de translatie-afstand R gekoppeld aan de Z-as beweging in de verhouding 1 op 1 (als planetaire beweging de meest gebruikte combinatie in verband met spoeling en elektrodeslijtage). Deze bewegingscyclus (zie figuren 2.52 en 2.53) geeft betere resultaten dan de enkelvoudige bewegingen.

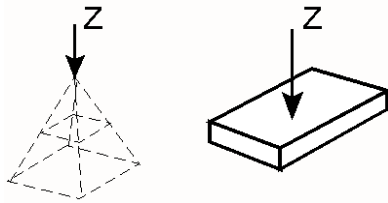


figuur 2.52 Planetaire beweging met translatie-afstand (R) en de Z-hoofdasbeweging gekoppeld in de verhouding 1 : 1 (45°)



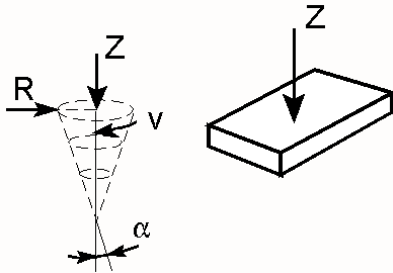
figuur 2.53 Schroefdraadvonken en 'conisch' vonken

Een variant hierop (zie figuur 2.54) is, in plaats van een circulaire, de elektrode een vierkante omloopbeweging uit te laten voeren (piramidevormig model).



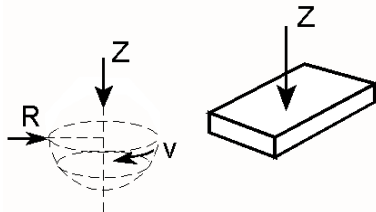
figuur 2.54 Planetaire beweging met een vierkante omloopbeweging en gekoppeld met de Z-as beweging in de verhouding 1 : 1

De translatie-afstand R kan ook afhankelijk van de Z -waarde willekeurig worden gewijzigd. Hierdoor kan elke hoek α tussen 0 en $\pm 90^\circ$ worden bereikt (zie figuur 2.55).



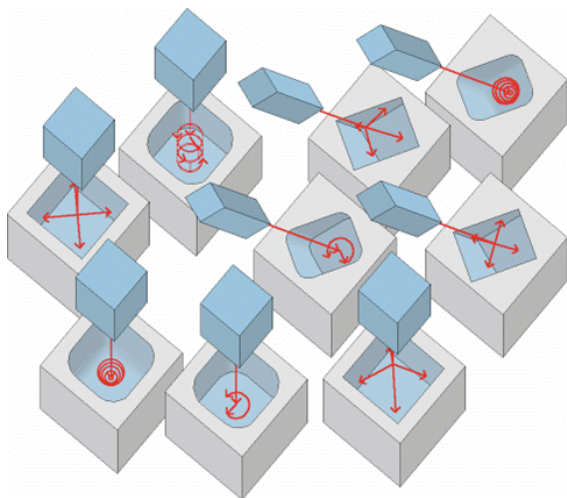
figuur 2.55 Planetaire beweging onder een willekeurige hoek α

Daarnaast kan de translatie-afstand R afhankelijk van de Z -waarde zodanig worden gewijzigd, dat daardoor met planetaire beweging een contour ontstaat (bijvoorbeeld een bolvormige contour, zie figuur 2.56).



figuur 2.56 Planetaire beweging waarbij de translatie-afstand R zodanig afhankelijk van de Z -waarde verandert, dat daardoor een contour met een bolvorm ontstaat (sferisch vonken)

Een duidelijk overzicht van de in de praktijk meest voorkomende planetaire modes is te zien in figuur 2.57.



figuur 2.57 Overzicht van verschillende planetaire modes

De voorgaande meervoudige bewegingen kunnen ook zonder de planetairbeweging worden uitgevoerd. Men kan hiermede bijvoorbeeld de radius in de hoeken

kleiner maken (zie ook § 2.8.4.2.3).

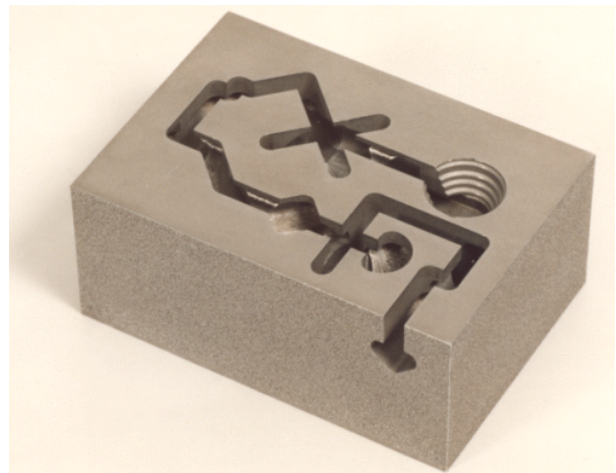
Soms kan ook de translatiesnelheid v handmatig worden ingesteld en/of worden beïnvloed door de servo.

2.8.4.2.2 Ruimtelijke bewegingen (meerdere hoofdassen)

Zoals eerder vermeld, is het op veel machines mogelijk om vrijwel elke willekeurige richting (X , Y , Z en rotatie (C -as) of een combinatie) als hoofdbewegingsrichting te kiezen.

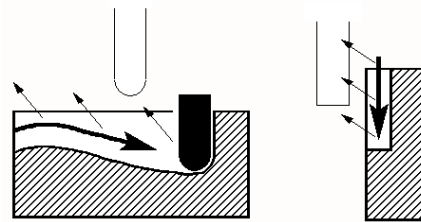
Deze mogelijkheid is bijvoorbeeld interessant voor het maken van autobandmatrizen (zie voorbeeld 8 in § 2.11).

Sommige besturingen maken het ook mogelijk om de omloopbeweging te superponeren op een reeds geprogrammeerde ruimtelijke beweging (contourvonken; zie figuren 2.39, 2.40 en 2.58).



figuur 2.58 Inwendige profilering door lijn en plan-functies met een draaiende elektrode

Voor het geval dat er problemen ontstaan tijdens het vonken, zal er een "vluchtstrategie" nodig zijn. Deze vluchtstrategie zorgt ervoor dat de elektrode zich op een zodanige manier terugtrekt, dat dit geen schade aan het product oplevert (zie figuur 2.59) en na het oplossen van het probleem de elektrode het werk doet hervatten vanaf het punt waar het probleem zich voordeed. Uiteraard zijn een geschikte besturing en software voor al deze mogelijkheden noodzakelijk.



figuur 2.59 Voorbeelden van een mogelijke vluchtstrategie

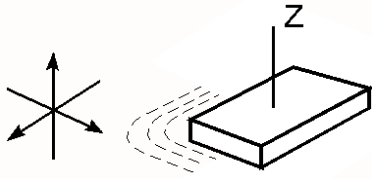
2.8.4.2.3 Contourcorrecties

Door het toepassen van translatie kunnen contourafwijkingen ontstaan (zie ook figuur 2.46). Deze zijn het gevolg van de translatie haaks op de actieve vonkrichting (zie bijvoorbeeld figuur 2.52).

Voor de meeste werkstukken heeft dit geen noemenswaardige afwijkingen tot gevolg. Sommige besturingen bieden de mogelijkheid om middels een correctieprogramma deze afwijkingen te elimineren.

Door de translatie-afstand met stilstaande Z -as en stilstaande planetairbeweging tot een bepaalde waarde te vergroten, kunnen contourcorrecties

worden uitgevoerd (zie figuur 2.60). Deze beweging kan in elke hoek tussen 0 en 360° plaatsvinden.



figuur 2.60 De translatie-afstand wordt vergroot bij stilstaande Z-as en stilstaande planetaire beweging

2.8.5 Specifieke aspecten in verband met planetaire bewerkingsstrategie

Bij moderne CNC machines worden geïntegreerde bewerkingsaflopen voor het planetair vonkeroderen aangeboden, welke al of niet interactief kunnen worden aangeroepen.

Naast deze mogelijkheden hebben CNC machines nog tal van andere mogelijkheden ten aanzien van bijvoorbeeld bewegingspatronen en autonomie.

Voor het efficiënt laten verlopen van de bewerking zijn richtlijnen voor het opstellen van bewerkingsstrategieën onontbeerlijk. Vaak ontbreken deze richtlijnen echter. Hieronder volgt een op ervaring gebaseerde algemene procedure om te komen tot een bewerkingsafloop voor het planetair vonkeroderen:

► Bepaling eerste generatorinstelling

De eerste toe te passen generatorinstelling wordt bepaald door de maximale toelaatbare elektrische belasting van de desbetreffende elektrode. Tabel 2.10 geeft de maximaal toelaatbare gemiddelde pulsstroom per vierkante centimeter doorsnede actief (geprojecteerd in een vlak $\perp$ op de servorijsing) elektrode-oppervlak (stroomdichtheid) in afhankelijkheid van elektrode-werkstukcombinatie.

Met de berekende maximale stroom, onder andere afhankelijk van de elektrodevorm, kan via de door de fabrikant verstrekte technologiebladen een generatorinstelling worden gekozen die deze stroom zal leveren. Hierbij kan een keuze worden gemaakt op grond van maximale materiaalafname, minimale elektrodeslijtage of een compromis.

tabel 2.10 Maximale stroomdichtheidswaarden van enkele elektrode-/werkstukmateriaal combinaties

elektrodemateriaal	werkstukmateriaal	toelaatbare stroomdichtheid (A/cm ²)
elektrolytisch koper	staal hardmetaal	8 - 25 15 - 25
grofkorrelig grafiet	staal	10 - 12
fijnkorrelig grafiet	staal	6 - 8
wolframkoper	staal hardmetaal	15 - 25 15 - 25

► Bepaling elektrode-ondermaat

De elektrode-ondermaat wordt op dezelfde wijze bepaald als bij het conventionele voorvonken. Als richtwaarde kan worden gebruikt: ondermaat elektrode = 1,5 à 2,5 ($2s_L$); zie betreffen de machinetechnologie, waarbij s_L de vonkspleet is.

► Bepaling laatste generatorinstelling

De gevraagde oppervlakteruwheid van het werkstuk is bepalend voor de laatste generatorinstelling. Via de technologiebladen kan een instelling worden geselecteerd die deze ruwheid geeft.

► Bepaling tussenliggende generatorinstellingen

Van de eerste en de laatste instelling kan de ruwheid worden opgezocht. Het verdient de voorkeur te werken met de ruwheidsaanduiding volgens VDI 3402.

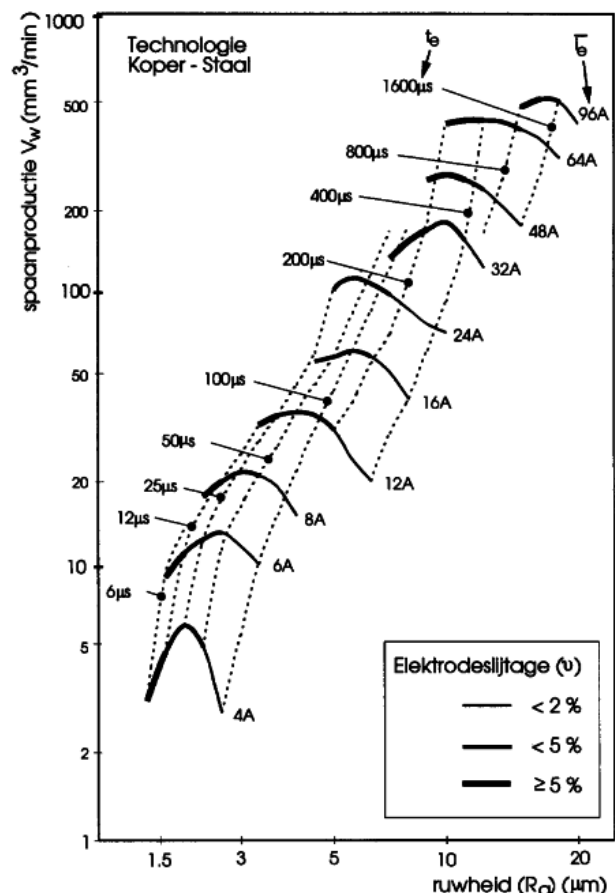
Uit de technologiebladen of de software worden generatorinstellingen geselecteerd, die deze ruwheden vonken. Door de fabrikanten worden in de technologie meerdere strategievoorstellen gedaan onder andere:

- maximum snelheid (slijtage minder van belang);
- compromis tussen snelheid en slijtage;
- redelijk weinig slijtage;
- zo min mogelijk slijtage.

In figuur 2.61 is een grafiek weergegeven die het verband aangeeft tussen materiaalafname (V_w) en de ruwheid R_a bij verschillende stroomsterkten (i_e) en pulstijden (t_e) voor drie verschillende slijtage-trajecten.

Per 'stroomsterkte'lijn is de elektrodeslijtage links het grootst en rechts minimaal. Per opvolgende vonkfase wordt aangeraden om steeds maximaal 2 ruwheidsklassen lager te kiezen (zie § 1.5.3). Door nu in de grafiek meer het rechtse gedeelte te gebruiken van elke stroomsterkte-lijn, krijgt men minimale slijtage. Wil men meer snelheid, dan moet men meer in het midden van de stroomsterkte-lijn blijven. Voor een lage ruwheidswaarde (en dus ook meer slijtage) kiest men meer voor het linker gedeelte van de stroomsterkte-lijnen.

Door de fabrikanten dienen technologieën te worden geleverd, waaruit men betrouwbaar kan voorspellen wat bij verschillende werkstuk-/elektrode-materiaal combinaties de resultaten zijn.



figuur 2.61 Verband tussen de materiaalafname en de ruwheid bij verschillende stroomsterkten en pulstijden

► Bepaling planetairbeweging

De planetairbeweging dient behalve de vonkspleten van de verschillende generatorinstellingen ook de steeds verder af te bouwen zekerheidstoegift te corrigeren. Deze toegift die in de eerste bewerking-fase op 50% van de som van s_L en R_{max} is gesteld, wordt voor de overige instellingen lineair afgebouwd tot uiteindelijk 0% bij de laatste generatorinstelling. Dit percentage heeft steeds betrekking op vonkspleet en ruwheid van de desbetreffende generatorinstelling.

Nadat de waarde van vonkspleet, ruwheid en zekerheidstoegift van elke bewerking-fase 'n' bepaald is, kan de translatie-afstand R worden berekend volgens:

$$2R = \text{ondermaat} - 2(s_{L_n} + R_{max,n} + Z_n)$$

R : enkelzijdige translatie-afstand

s_{L_n} : enkelzijdige vonkspleet

$R_{max,n}$: ruwheid (bij de n^{de} stap)

Z_n : bewerkingstoegift

► Bepaling wisselpunt van elektrode

Het wisselpunt wordt, in verband met de ruwheid die de elektrode aanneemt na de eerste bewerking-fases, gelegd op de gemiddelde ruwheid van de eerste en de laatste generatorinstelling. In het algemeen wordt voor kwalitatief hoogwaardig werk aangeraden om met één elektrode niet meer dan 10 ruwheidsklassen te overbruggen.

► Bepaling aantal elektroden

Het aantal benodigde elektroden bij een enkelvoudige holte wordt bij planetair vonken onder andere bepaald door de maximale stroom die kan worden toegepast bij het voorvonken en de toelaatbare stroominstelling welke nodig is om tijdens de laatste bewerking de gewenste oppervlakteruwheid te verkrijgen.

Hoe hoog de maximale stroom bij het voorvonken is, wordt bepaald door de frontale elektrode-oppervlakte. In de praktijk varieert het aantal elektroden van 1 tot 3.

Indien meerdere gelijke holtes aangemaakt worden, kan hierbij een bepaalde methode worden gevolgd. Vroeger werd als algemene regel gehanteerd dat het aantal elektroden gelijk is aan het aantal holtes vermeerderd met 1 of 2.

Met moderne machines, die slijtage-arm vonken toelaten, kunnen echter met een geringer aantal elektroden meerdere holtes worden vervaardigd. Het vinden van een optimale strategie is afhankelijk van meerdere factoren zoals gebruikte machine, gewenste oppervlakteruwheid, toleranties, en andere. In tabel 2.11 zien we een voorbeeld van een in de praktijk gevolgde methode voor het vonken van 7 identieke holtes.

tabel 2.11 Bewerkingsvolgorde bij het vonken van 7 identieke holtes

elektrode-nummer	voorvonken holtes	navonken holtes
1	1 t/m 5	-
2	6 en 7	1 en 2
3	-	2,3,4 en 5
4	-	3,4,5,6 en 7
5	-	5,6 en 7

Opmerking: Het zelf opstellen van een bewerkingsvolgorde is vrij tijdrovend. In verband hiermee is standaardisatie wenselijk. Men kan hierbij denken

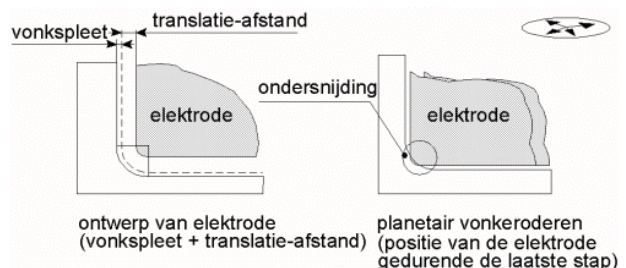
aan het standaardiseren van elektrode-ondermaten en gewenste oppervlakteruwheden. Wanneer de operator een holte gaat vonken met een elektrode van een bepaalde ondermaat, selecteert hij de gewenste bewerkingsafloop en start met zijn werkzaamheden. Constateert hij zaken die structureel voor verbetering vatbaar zijn, dan maakt hij melding hiervan.

Door deze wijze van werken worden alle ervaringen van betrokken medewerkers verzameld en vindt er een gestructureerde ervaringsopbouw plaats.

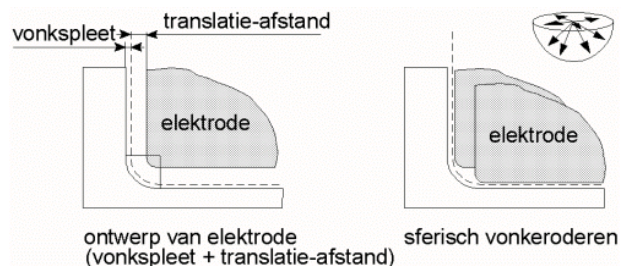
► Specifieke aspecten in verband met elektrode-fabricage

De elektrode-ondermaten worden bij het planetair vonkeroderen gedefinieerd door enerzijds de grootte van de vonkspleet en anderzijds door de translatie-afstand van de omloopbeweging bij het planetair vonken.

Door de vonkspleet en de translatie-afstand van de omloopbeweging beide volgens de normaal te nemen, kunnen bij het planetair vonken vormfouten ontstaan (zie figuur 2.62). Deze vormfouten, eigen aan het planetair vonkproces, kunnen worden vermeden door 3D planetair vonken (ook wel sferisch vonken of bolvormig vonken genoemd; zie figuur 2.56 en 2.63).



figuur 2.62 Ontstaan van vormfouten bij gebruik van de vonkspleet en translatie-afstand t.o.v. de normaal

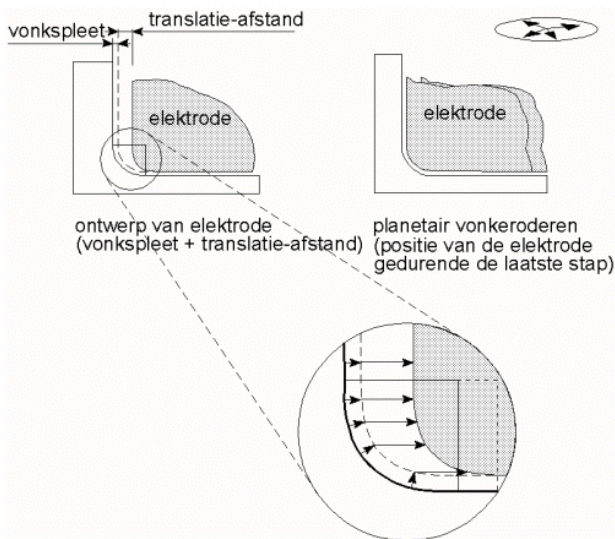


figuur 2.63 Voorkomen van vormfouten door sferisch vonken

Indien sferisch vonken op de machine niet mogelijk is en de ontstane fouten bij het planetair vonken ontoelaatbaar zijn, dan dient de elektrode nauwkeuriger te worden berekend.

Bij deze berekening wordt uitgegaan van de vonkspleet volgens de normaal (haaks) op het oppervlak. Met betrekking tot de translatie-afstand wordt deze volledig 'meegenomen' zolang de component van de vonkspleet in de richting van deze translatie-afstand niet gelijk is aan nul (zie het uitvergroete gedeelte in figuur 2.64).

Een volgens deze methode gecompenseerde elektrodevorm geeft geen fouten bij het planetair vonken zoals te zien is in figuur 2.64.

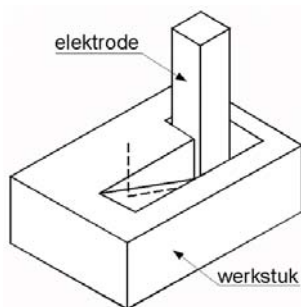


figuur 2.64 Voorkomen van vormfouten door gecompenseerde elektrodevorm

2.9 Contourvonken

2.9.1 Begripsbepaling

Met contourvonken (zie figuur 2.65) wordt bedoeld het verwijderen van materiaal door de elektrode vorkend een ruimtelijke baan te laten beschrijven. In principe kan de elektrode elke geometrische vorm aannemen, maar het contourvonken is pas interessant, als complexe holtes met eenvoudige elektrodevormen (cilindrisch, vierkant, enz.) kunnen worden aangemaakt.



figuur 2.65 Contourvonken

2.9.2 Positieve/negatieve aspecten

Pluspunten

Vergeleken met het zink- en planetairvonken heeft het contourvonken een aantal voordelen.

Het contourvonken maakt over het algemeen gebruik van eenvoudige elektroden.

Meestal worden kleine elektroden gebruikt in relatief grote holtes, die daardoor een betere spoeling of verwijdering van materiaaldeeljes toelaten.

Voordelen hiervan zijn:

- ▶ de elektrodekosten zijn vrij laag vergeleken met de duurdere complex gevormde elektroden voor het zink- en planetairvonken;
- ▶ de elektrodeslijtage is van minder belang, omdat de elektrode, door zijn lagere kosten, meerdere malen kan worden gewisseld;
- ▶ voorvonkoperaties laten hogere stroomdichtheden toe vanwege de door de beweging veroorzaakte betere spoeling;
- ▶ het gebruik van cilindrische elektroden laat toe de vonkspleet en de elektrodeslijtage te compenseren door middel van de CNC van de machine.

Het gebruik van eenvoudige prismatische elektroden (cilindrisch, vierkant, rechthoekig) heeft als bijkomend

voordeel dat deze gemakkelijk met behulp van de beschikbare meetsoftware op de machine kunnen worden opgemeten. Verder is bij het gebruik van ronddraaiende cilindrische elektroden de elektrodeslijtage as-symmetrisch, wat de berekening van de elektrodebaan vergemakkelijkt.

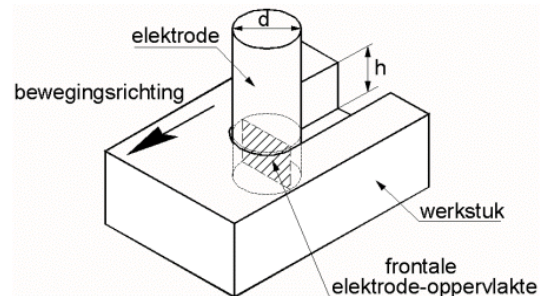
Minpunten

Naast de voordelen, heeft het contourvonken ook enkele nadelen:

- ▶ de hoge stroomdichtheden resulteren in vergelijking met het klassiek zink- en planetairvonken niet in een snellere materiaalafname;
- ▶ complexe elektrodebanen vragen CNC programmeersystemen, die niet altijd commercieel beschikbaar zijn;
- ▶ aandacht is nodig voor het vastleggen van de "vluchtstrategie";
- ▶ hoge stroomdichtheden zijn de oorzaak van hoog oplopende temperaturen en het ontstaan van lokale mechanische materiaalspanningen.

2.9.3 Vonktechnologie

De meeste machines (enkele uitgezonderd) zijn niet voorzien van een speciale vonktechnologie voor het contourvonken. Er wordt verwezen naar de algemene technologie geldig voor het zinkvonken. Voor een gegeven combinatie van werkstuk-/elektrodemateriaal wordt als functie van het frontale elektrode-oppervlak en de gewenste eindruwheid het aantal stappen en voor iedere stap de machine-/generatorinstelling bepaald. De berekening van het frontale en laterale elektrode-oppervlak gebeurt op dezelfde manier als bij het zinken en planetairvonken. Het frontale elektrode-oppervlak wordt berekend als de projectie van het actieve elektrode-oppervlak in een vlak loodrecht op de voedingsrichting (figuur 2.66).



figuur 2.66 Berekening van het frontale elektrode-oppervlak bij een contourvonkoperatie

Bij het voorvonken kunnen meestal hogere stroomdichtheden worden toegepast. Dit is enerzijds te verklaren door het gebruik van kleine elektroden en anderzijds doordat de vonkdeeltjes aan de zijkant worden geproduceerd en niet aan de onderkant van de elektrode.

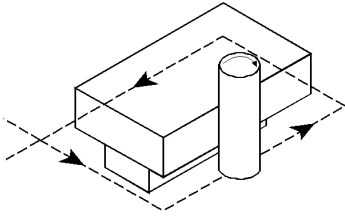
Extra spoeling is aan te raden, niet alleen om de verwijdering van de vonkdeeltjes te bevorderen, maar ook om door koeling de thermische uitzetting van de elektrode te beperken.

Het is belangrijk na te gaan hoe de machine reageert in geval van kortsluiting. Bij klassieke CNC vonkmachines trekt de elektrode terug volgens de geprogrammeerde baan. Hierbij wordt dezelfde vluchtstrategie gebruikt als bij het conventioneel CNC zinkvonken. Bij het contourvonken echter is het beter dat de elektrode zo vlug mogelijk van het werkstuk af beweegt. Dit betekent dat bij een elektrodebeweging in het XY-vlak, de elektrode in geval van kortsluiting zowel in het XY-vlak als in de Z-richting van het werkstuk af moet worden bewogen.

2.9.4 Uitvoeringsvormen

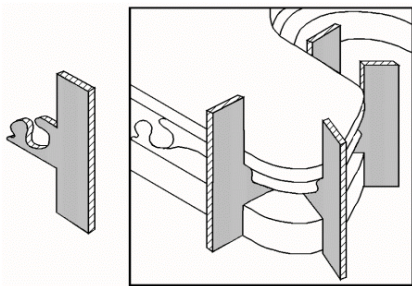
2.9.4.1 Profielvonken

Het profielvonken heeft als doel werkstukranden te bewerken. Rechte wanden kunnen met een ronddraaiende cilindrische elektrode worden bewerkt (zie figuur 2.67). Wand met een complexe structuur in de hoogterichting kunnen met een vlakke profielvormige (eventueel gedraadvonkte) elektrode worden geproduceerd (figuur 2.68).



figuur 2.67 Uitwendig contourvonken met ronddraaiende cilindrische elektrode

Zoals eerder vermeld, kan bij het gebruik van een cilindrische elektrode de vonkspleet en eventueel de elektrodediameter door de CNC van de machine worden gecompenseerd.

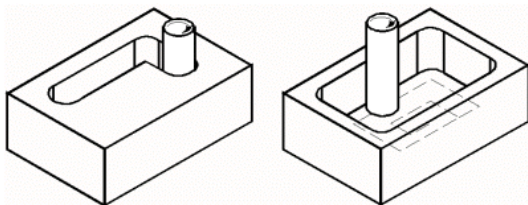


figuur 2.68 Profielvonken met plaatvormige elektrode

2.9.4.2 Uitkameren

Bij het vonken van een kamer (pocketing) beweegt de elektrode zich door het werkstukmateriaal heen om de gewenste werkstukgeometrie te verkrijgen. Een speciaal geval is het gebruik van een gedeeltelijke vormelektrode om een groef te maken (figuur 2.40). In dit geval kan de CNC de elektrode enkel compenseren in de Z-richting.

Het contourvonken kan ook worden ingezet om met eenvoudige elektroden holtes te bewerken zoals afgebeeld in figuur 2.69.



figuur 2.69 Uitkameren (pocketing)

De methode is enkel gebruikelijk voor 2,5D-vormen. Het toepassen van roterende elektroden met afgeronde top zou het nauwkeurig vonken van complexe oppervlakken mogelijk moeten maken. Om de resulterende oneffenheden (ribbels) op de bodem binnen bepaalde grenzen te houden, moet de overlap echter veel groter worden genomen (d.w.z. een klein effectief vonkoppervlak). Dit beperkt de stroom, resulterend in een veel hogere bewerkingstijd.

Bij het uitvonken van een kamer met roterende elektroden met vlakke onderkant moet worden opgemerkt dat de laterale vonkspleet aan de onderkant van de elektrode meestal groter is dan op de zijkant. Bij het nabewerken moet hiermee in alle gevallen rekening worden gehouden.

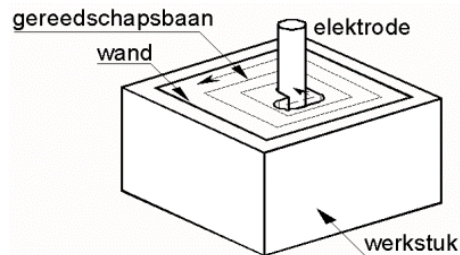
Het navonken van holtes door middel van uitkameren vergt meestal veel tijd. Toch kan deze techniek nuttig worden ingezet als voorbereiding gevolgd door het navonken met verschillende elektroden volgens een zink- of planetaire cyclus. Deze vorm van voorvonken vervangt hierbij het conventioneel voorfrezen, zodat de bewerkingen op één machine kunnen plaatsvinden.

2.9.5 Programmeringsaspecten

Bij het contourvonken dient veel aandacht te worden besteed aan de berekening van de gereedschapsbaan (elektrode). Bij het gebruik van eenvoudige elektroden kan de vonkspleet en de elektrodeshijte worden gecompenseerd door de CNC van de machine. Daartoe dient het CAM-pakket niet alleen de positie van de elektrode te berekenen, maar ook de nodige informatie te bevatten om de machine een automatische compensatie te laten doorvoeren.

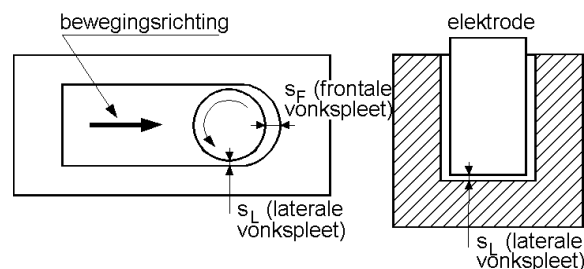
Over het algemeen moeten bij het NC programmeren de volgende punten in acht worden genomen:

- Beweeg bij het voorvonken van een kamer (meestal met een ronddraaiende elektrode) de elektrode vanuit het centrum van de holte om verder volgens een spiraal naar de buitenwand van de holte toe te bewegen (figuur 2.70). Deze strategie bevordert de verwijdering van vonkdeeltjes.



figuur 2.70 Voorvonken van binnen naar buiten volgens een spiraal

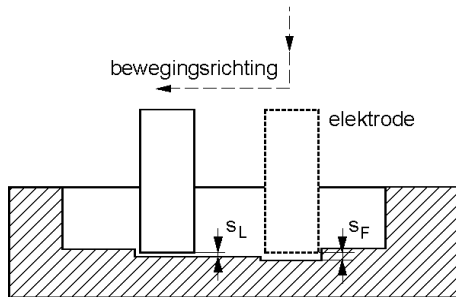
- Indien de frontale vonkspleet groter is dan de laterale vonkspleet, kan een verkeerde nabewerkingsstrategie leiden tot aanzienlijke vormfouten. Figuur 2.71 toont het verschil tussen de frontale en de laterale vonkspleet. De frontale vonkspleet wordt gemeten volgens de voedingsrichting, terwijl de laterale vonkspleet loodrecht op de bewegingsrichting wordt gemeten.



figuur 2.71 Frontale en laterale vonkspleet bij het contourvonken

In figuur 2.72 beweegt de elektrode eerst verticaal tot op de diepte van het bodemvlak, om daarna in een horizontaal vlak verder te bewegen. Daar bij

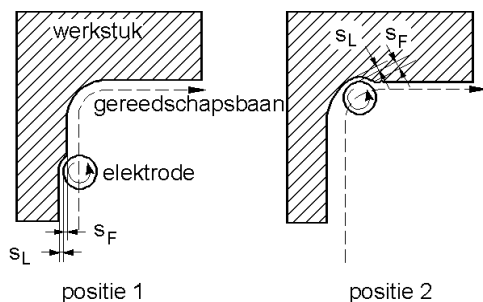
het contourvonken de frontale vonkspleet s_F meestal groter is dan de laterale vonkspleet s_L , zal een fout ($s_F - s_L$) ontstaan op de plaats waar de elektrode het bodemvlak benadert. Dergelijke fouten kunnen oplopen tot meer dan 40 μm . Deze vormfouten kunnen grotendeels worden vermeden door de elektrode volgens een opgegeven helling ten opzichte van het bodemvlak te laten naderen.



figuur 2.72 Onnauwkeurigheden ontstaan door loodrecht naderen van het werkstuk

- ▶ Houdt, zoals eerder vermeldt, bij de berekening van de gereedschapsbaan het frontale elektrodeoppervlak zo constant mogelijk. Dit vermijdt vonkspleetveranderingen en komt de kwaliteit van het afgewerkte stuk ten goede.

Als voorbeeld kan worden vermeld dat bij het bewerken van een werkstukrand met een ronddraaiende cilindrische elektrode, de straal van de elektrode hoogstens de helft mag bedragen van de kleinste afrondingsstraal die moet worden bewerkt (figuur 2.73). Tijdens het navonken is de laterale vonkspleet (s_L) verantwoordelijk voor de maatnauwkeurigheid van het afgewerkte werkstuk. Deze laterale vonkspleet verandert naargelang het frontale elektrodeoppervlak vergroot of verkleint. In alle gevallen moet worden geprobeerd de verandering van het frontale elektrodeoppervlak tijdens het vonkproces zo klein mogelijk te houden.



figuur 2.73 Afwerking van werkstukrand met ronddraaiende elektrode

2.10 Speciale vonkbewerkingen

2.10.1 Vonkboren

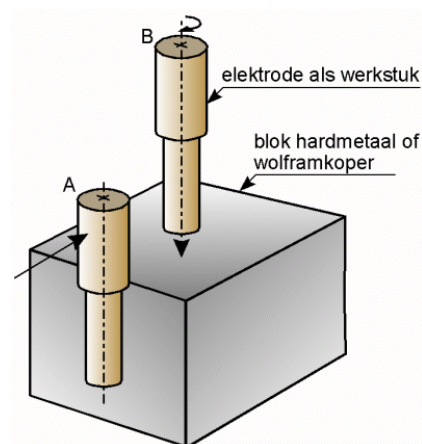
Het fabriceren van cilindrische gaten of boringen verloopt, behalve bij moeilijk verspanbare materialen, het meest economisch via verspanend boren met bijv. een spiraalboor. Is men gedwongen te kiezen voor vonkerosief boren, dan gebeurt dat voornamelijk op twee manieren:

- ▶ hetzij via puur zinkvonken, dat wil zeggen met alleen de verticale Z-as in actie;
- ▶ of roterend, met twee bewegingsassen tegelijk, waarbij de elektrode naast de aanzetbeweging ook om zijn as draait (zie ook figuur 1.22).

Al of niet roterend gebruikmaken van een massieve doorn voor vonkboren verloopt over het algemeen langzaam. Het aanbrengen van een facet op de zijkant (over een grotere lengte dan de te boren diepte, zie figuur 2.74) bespoedigt het vonkboren. Dit kan met omgekeerde polariteit gedaan worden door met de niet roterende elektrode horizontaal tegen een geslepen blok hardmetaal of wolframkoper te vonken (elektrode A in figuur 2.75). Aanpassen van de diameter van de vonkdoorn, of deze een getrapte of conische vorm geven, is op deze wijze ook roterend te doen. Nog aanzienlijk sneller kan worden geboord indien een pijpje als elektrode wordt ingezet met geforceerde spoeling binnendoor. Dergelijke buisjes met wisselende inwendige doorsnede zijn tegenwoordig verkrijgbaar op de markt. Op universele vonkmachines wordt het meest gewerkt met een elektrode die roteert om de ingebouwde verticale C-as. Deze opstelling lijkt veel op normaal mechanisch boren. Als gevolg van de rotatie ontstaat een betere spoeling, waardoor sneller, met lagere elektrodeslijtage en ook gladder wordt gevonkt met een aanzienlijk hogere diepte/diameterverhouding dan bij puur zinkvonken. Om de lengteslijtage te corrigeren (voor een meer rechthoekige onderkant) kan men (door met de elektrode boven op een blok te vonken) de afronding verwijderen (elektrode B in figuur 2.75).



figuur 2.74 Aangebracht facet op de zijkant van de vonkboorelektrode



figuur 2.75 Het aanbrengen van een facet

Het werken met handbediende of bestuurd, losstaande startgatboormachines, al of niet met een zwenkbare vonkkop (figuren 2.76 en 2.77) is relatief nieuw en zo snel dat verspanend boren in verderop genoemde diameters op lineaire boorsnelheid wordt overtroffen.

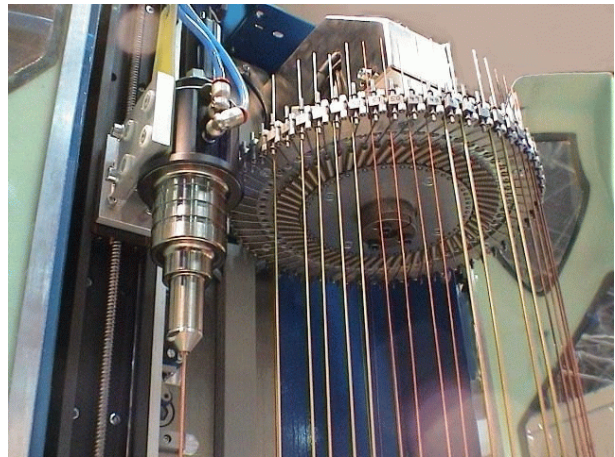


figuur 2.76 Startgatboormachine met mogelijkheid tot automatisch 'nullen'



figuur 2.77 Startgatboormachine met zwenkbare vonk kop

Hierbij worden standaard pijpelektrodes (meestal uit koper en messing) gebruikt tussen 3 mm en 0,25 mm in diameter en met lengtes oplopend tot 400 mm, die vlak boven het werkstuk geleid en automatisch gewisseld kunnen worden. Figuur 2.78 toont een praktische uitvoering van een automatische wisselaar met magazijn voor boorelektrodes gemonteerd op een houder. Om onder uit de lange dunne pijpjes nog enig diëlektricum te krijgen is hogedruk spoeling noodzakelijk. De op snel vonkboren ontworpen speciale generator werkt met zeer krachtige pulsen en een min of meer gedwongen aanzetbeweging. Men dient hierbij bedacht te zijn op het feit dat een maximale boorsnelheid ($> 30\text{--}50\text{ mm/min}$) een hoge ruwheid oplevert en kans geeft op aanzienlijke beschadiging van het geboorde oppervlak. Een minder agressieve instelling op de machine geeft meestal een gering snelheidsverlies, terwijl het uitgangsmateriaal meer ontzien wordt.



figuur 2.78 Voorbeeld van een magazijn met vonkdoorns op een houder, die automatisch worden gewisseld

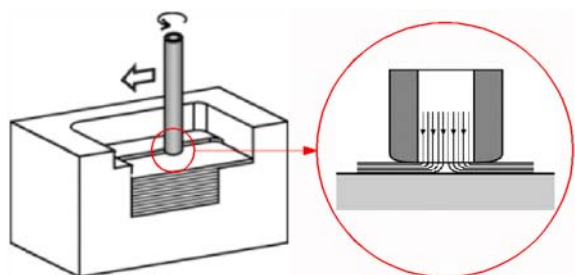
2.10.2 Vonkfrezen

2.10.2.1 Begripsbepaling

Vonkfrezen is een relatief nieuwe vorm van vonkerosief bewerken waarbij een ronddraaiend cilindrisch gereedschap met behulp van de CNC van de machine een voorgeprogrammeerde baan volgt. Het programma bepaalt de volledige vorm en niet de elektrode (zoals bij het klassieke zinkvonken). Men spreekt van vonkfrezen (EDM milling, milling EDM), omdat het gereedschap een beweging uitvoert, zoals bij het klassiek CNC frezen. Het voordeel in vergelijking met zinkvonken is, dat de elektroden een standaardvorm hebben, onafhankelijk van de werkstukcomplexiteit. Dit zorgt ervoor dat ze goedkoper zijn en een slijtagecompensatie (zie § 2.10.2.2) door middel van de sturing mogelijk is. De spoelcondities zijn eveneens beter, omdat door de open ruimte waarin de elektrode zich beweegt, de vonkdeeltjes gemakkelijker kunnen worden verwijderd.

Het vonkfrezen kan in principe worden toegepast voor zowel het bewerken van grote ($\sim 10 \times 10\text{ cm}$) als voor kleine matrijsholtes (microvonken). Het nauwkeurig bewerken van een grotere 3D-vorm door middel van 3-assig vonkfrezen vereist in principe een cilindrische elektrode met afgeronde tip (gelijkaardig aan een bol-frees). Het op die manier afwerken van iets grotere matrijsholtes is weinig efficiënt door de lage afnamecapaciteit. Daarom beperkt het 3-assig vonkfrezen van grotere matrijsholtes zich tot het bewerken van prismatische vormen, waarbij buisvormige elektroden worden toegepast (figuur 2.79). De elektrode gedraagt zich zoals een cilinderfrees. Extra spoeling door de elektrode verhoogt het afnamedebiet en ook de afkoeling van de elektrode.

Voor kleine matrijsholtes (microvonken) kunnen op een efficiënte wijze ook massieve elektroden worden gebruikt.



figuur 2.79 Principe van vonkfrezen met ronddraaiende cilindrische elektroden. Extra spoeling door de elektrode (zie detail) geeft een hogere materiaalafname

De rotatie van de elektrode is nodig om een bepaald afname-debiet te kunnen halen en het vermijdt ook boogvorming, wat nadelig zou zijn voor de oppervlaktekwaliteit van het werkstuk. Door de rotatie blijft de slijtage van de elektrode ook uniform.

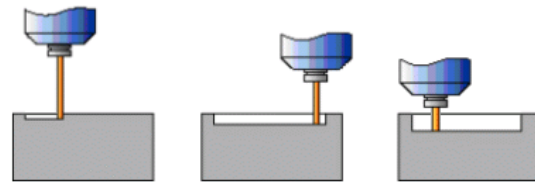
Figuur 2.80 geeft een vergelijking op basis van de nodige werkvoorbereidingsstappen tussen het klassiek zinkvonken en vonkfrezen. Het is duidelijk dat het vonkfrezen veel minder stappen nodig heeft door het gebruik van elektroden met een standaardvorm. Het eigenlijke vormgeven gebeurt door het programmeren zelf.

Het gebruik van standaard pijp- en buisvormige elektroden voor microtoepassingen (meestal koper, WCu en hardmetaal) heeft de volgende voordelen:

- ▶ de kosten om elektroden te maken zijn kleiner. Bij het zinkvonken worden complexe elektroden gebruikt, die vooraf ontworpen en gefabriceerd moeten worden;
- ▶ als er geen ingewikkelde elektroden moeten worden gemaakt, zijn er minder machines nodig: dit vergemakkelijkt de procesplanning;
- ▶ de totale tijd (elektroden maken + vonkfrezen) is kleiner bij beperkte (complexe) volumes;
- ▶ de spoeling is gemakkelijker en beter (door gebruik van holle buisjes komt de spoeling precies op de juiste plaats);
- ▶ werking met constante procescondities is mogelijk, bij zinkvonken nemen de prestaties gradueel af tijdens het bewerken;
- ▶ de procescondities zijn minder geometrie afhankelijk en daardoor zijn de bewerkingstijden beter in te schatten;
- ▶ de nauwkeurigheid en oppervlakteruwheid zijn dezelfde als die bij het zinkvonken kunnen worden verkregen;
- ▶ elektrodeslijtage kan automatisch gecontroleerd en gecompenseerd worden (zie verder).

Een nadeel is dat de ronde vorm van de elektrode beperkingen met zich meebrengt bij afrondingen in de hoeken. De bewerkingssnelheid is kleiner dan bij het zinkvonken door een kleiner 'contact'oppervlak.

Bij vonkerosie is er, zoals eerder gezegd, elektrodeslijtage. Door de toepassing van hogere stroomdichtheden (tot 1000 A/cm²) is de relatieve elektrodeslijtage heel groot. Deze slijtage kan bij het vonkfrezen worden gecompenseerd door het toevoegen van een neerwaartse beweging (figuur 2.81).

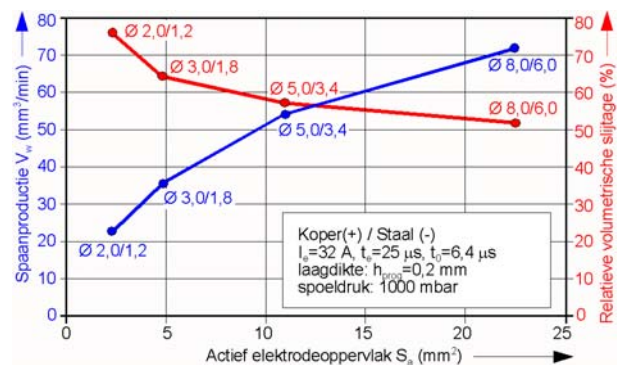


figuur 2.81 Compensatie van de elektrodeslijtage tijdens de bewerking

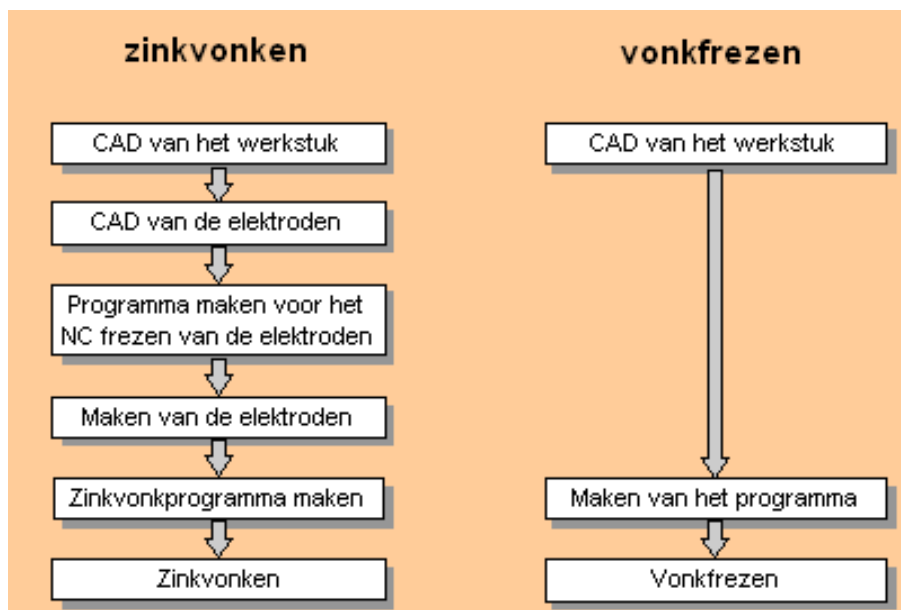
2.10.2.2 Specifieke aspecten i.v.m. technologie

Niettegenstaande het feit dat door de goede spoelcondities hoge stroomdichtheden (tot 1000 A/cm²) kunnen worden toegepast, heeft het actieve elektrodeoppervlak ook hier invloed op de materiaalafname en de elektrodeslijtage. Figuur 2.82 geeft de invloed weer van de grootte van de elektroden ($\varnothing x/y$ betekent x = buitendiameter, y = binnendiameter) op het afname-debiet en de relatieve slijtage.

Een grotere actieve elektrodeoppervlakte geeft een hoger afname-debiet en een kleinere slijtage. Dit is te wijten aan het feit dat een te hoge stroomdichtheid aanleiding geeft tot een minder efficiënt proces (materiaalafname per puls is kleiner [zie ook ref.5]).

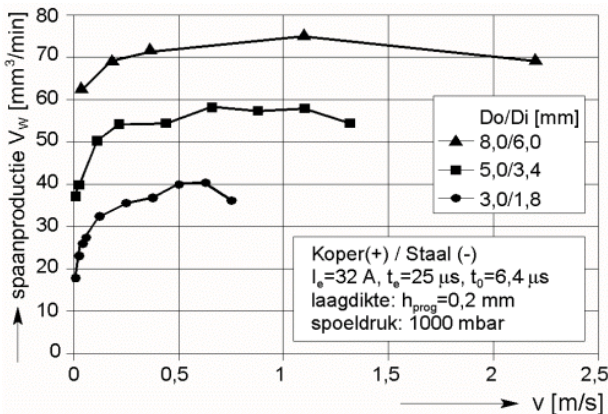


figuur 2.82 Invloed van de actieve elektrodeoppervlakte op het afname-debiet (blauwe lijn) en de volumetrische elektrodeslijtage (rode lijn)



figuur 2.80 Vergelijking klassiek zinkvonken en vonkfrezen (processtappen om een gegeven vorm te bewerken)

Verder heeft de rotatiesnelheid een belangrijke invloed op de materiaalafname (figuur 2.83). Een voldoende hoge snelheid is nodig om vonkdeeltjes goed af te voeren, maar vanaf een bepaalde rotatiesnelheid zal het effect van een verhoging verwaarloosbaar zijn.



figuur 2.83 Invloed van de rotatiesnelheid

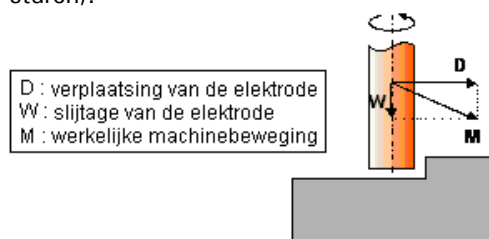
Volgens [ref.6] heeft de rotatierichting geen invloed op het afname-debiet. Er is geen noemenswaardig verschil tussen het zogenaamd tegenlopend en het meelopend vonkfreen (zie figuur 2.84).



figuur 2.84 Tegenlopend (links) en meelopend (rechts) vonkfreen

Voor een stabiel proces mag de excentriciteit op de elektrode niet meer dan 5 micron bedragen. De hoge elektrodeslijtage kan op verschillende manieren worden gecompenseerd:

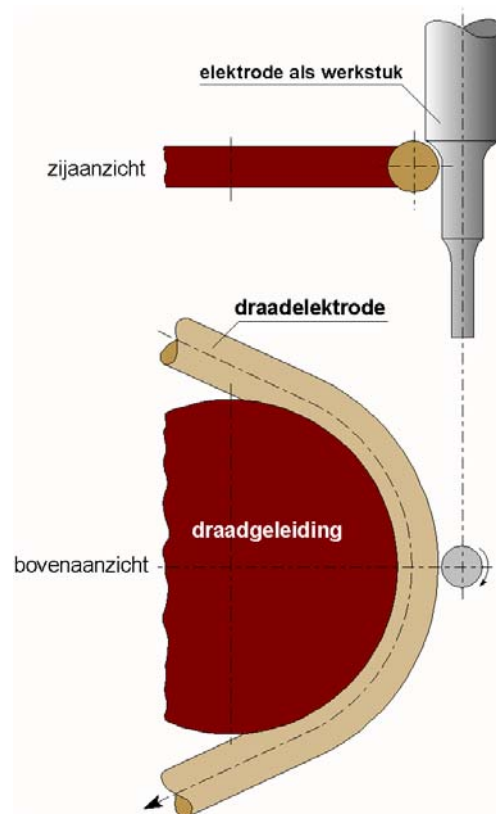
- **Op voorhand (off line):**
De slijtagecompensatie wordt ingebracht tijdens het programmeren. Op basis van een schatting van de hoeveelheid te bewerken materiaal en de relatieve elektrodeslijtage wordt de nodige slijtagecompensatie voor een gegeven positie bepaald. Het NC-programmeersysteem past op basis van deze waarde de Z-waarde van het programma continu aan (figuur 2.85).
- **Direct opmeten van de elektrodeslijtage tijdens de bewerking:**
Tijdens de bewerking wordt de elektrodeslijtage bepaald door de lengte van de elektrode op regelmatige tijdstippen op te meten. Op basis van de opgemeten waarde van de elektrodeslijtage wordt de positie van de elektrode bijgesteld.
- **Indirect opmeten van de elektrodeslijtage tijdens de bewerking:**
Bij deze methode wordt de elektrodeslijtage bepaald door continue evaluatie van het vonkproces (bijv. door opmeten van de pulsvorm en vervolgens bijsturen).



figuur 2.85 Elektrodesleedcompensatie door het op de voorhand aanpassen van de geprogrammeerde weg

Meestal wordt een combinatie van bovenstaande methoden gebruikt. Dit betekent dat een vooraf geprogrammeerde elektrodecompensatie tijdens de bewerking kan worden bijgesteld door het af en toe opmeten van de elektrodelengte.

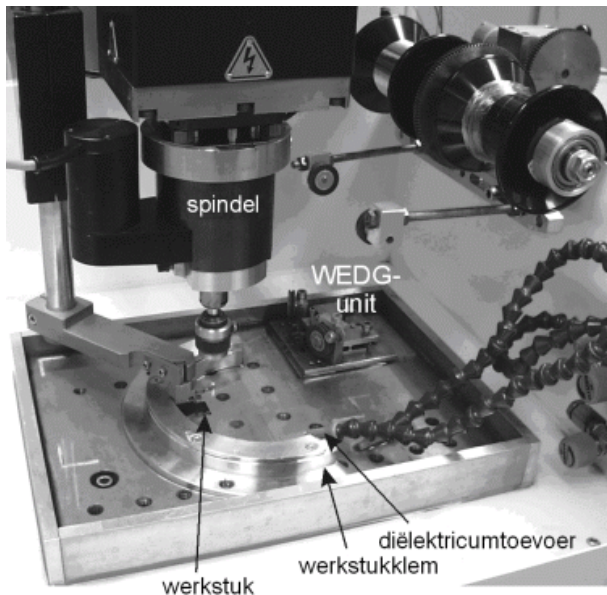
Het gebruik van pijpvormige elektroden heeft het voordeel dat de elektrode tijdens de bewerking een min of meer platte tip behoudt. Dit is niet zo bij het gebruik van massieve cilindrische elektroden, welke meestal worden gebruikt bij het vonkfreen van microholtes (microvonken). Bij het bewerken van een 3D-vorm kan -afhankelijk van de geometrie- een aan de voorzijde afgeplatte elektrode veranderen in een afgeronde punt of een bolvormige in een meer vlakke punt. Indien bij de programmering uitgegaan is van een perfect platte of bolvormige vonkdoorn, zullen dus geometrische fouten ontstaan. Door de afgesleten elektrodevorm af en toe te herstellen op de machine zelf ('vonkdressen'), kunnen deze fouten worden geminimaliseerd. Het herstellen kan op de machine gebeuren en door bijvoorbeeld een bijkomende EDM snijeenheid (bijv. door Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG) op maat worden gebracht. Met deze unit kan men de ronddraaiende elektrode opnieuw profileren (zie bijvoorbeeld figuren 2.86 en 2.87).



figuur 2.86 Principeschema van WEDG

Diëlektrica

Bij het vonkfreen wordt meestal een op koolwaterstof gebaseerd diëlektricum gebruikt. Het vervangen van olie door gedeïoniseerd water als diëlektricum zou een aantal belangrijke voordelen hebben voor het milieu, de veiligheid van mensen en materieel en de gezondheid van de operator. De eigenschappen van water (geleidbaarheid, viscositeit, koelvermogen) verschillen sterk van die van olie en de gevolgen hiervan werden reeds duidelijk bij het zinkvonken, waar gedeïoniseerd water als diëlektricum aanleiding gaf tot een lager afname-debiet. Vonkfreen verschilt echter sterk van het zinkvonken, omdat er met veel kleinere elektroden wordt gewerkt en omdat de spoeling veel beter is. Daarom zou het resultaat van water als diëlektricum bij vonkfreen erg verschillen met dat van zinkvonken. Uit

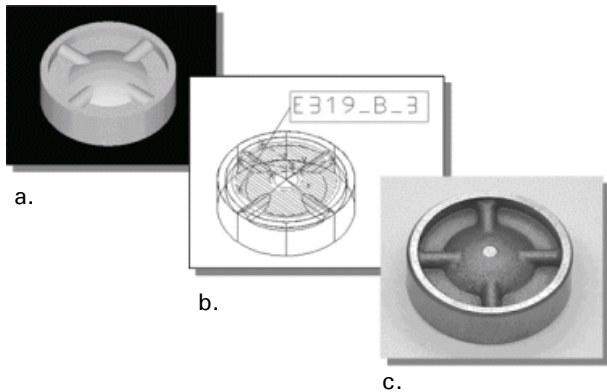


figuur 2.87 Africhten van de elektrode - een voorbeeld

recent onderzoek [ref.8] volgt dat bij het vonkfreen van grotere holtes (elektrodediameters van 3 mm) het afname-debiet bij water nog steeds lager is dan bij olie (en dit voor een bepaalde gevraagde ruwheid). Voor het vonkfreen van kleinere cavities met massieve dunne elektroden (diameter 0,150 mm) wordt soms gedeïoniseerd water gebruikt.

2.10.2.3 Fabricagevoorbeelden

Figuur 2.88 geeft een sprekend voorbeeld weer, waarbij van het vonkfreen gebruik is gemaakt. In § 2.11 worden nog meer voorbeelden gegeven.



figuur 2.88 Voorbeeld van een (solid) CAD-model (a), gereedschapsbaan (b) en het uiteindelijke product

2.10.3 Vonkslijpen

Door de ontwikkeling van geschikte hoogwaardige abrasieve grondstoffen voor het conventioneel rond-, profiel- en vlakslijpen, heeft het relatief trage vonkslijpen (zie ook figuur 1.22 en 1.23) in de industrie nooit echt ingang gekregen. In de productie van flexibele componenten (voor bijvoorbeeld bepaalde types scheerapparaten) wordt het contactloze en krachten-vrije vlakvonken, als een soort micro-slijpbewerking, al jaren toegepast. Slijpen valt in dit geval af vanwege de toch nog te hoge verspaningskrachten en de optredende braamvorming. Een speciale plaatelektrode maakt daarbij een speciale ruimtelijke orbitaalbeweging (boven een reeks op een pallet opgespannen producten) die zodanig is uitgeknipt, dat de vonkslijtage zelf de elektrode vlak houdt.

De afgelopen decennia heeft vonkslijpen een wedergeboorte beleefd in de productie van speciale PCD-snijgereedschappen (zie figuur 2.89), die op andere wijze met dezelfde kwaliteit niet economisch te fabriceren zijn. Verschillende fabrikanten leveren hiervoor speciaal voor die niche-toepassing geconstrueerde vonkslijpmachines zoals figuur 1.23 laat zien.



figuur 2.89 Voorbeelden van een werkstuk vervaardigd door vonkslijpen

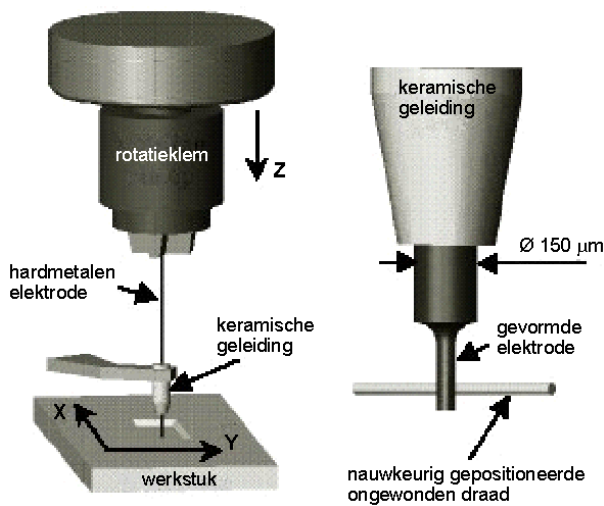
2.10.4 Microzinkvonken

Het contactloze karakter van het vonkproces en dus het ontbreken van mechanische bewerkingskrachten, maakt het zinkvonkproces uitermate geschikt voor microbewerkingen. Oorspronkelijk vond microvonken hoofdzakelijk plaats in wetenschappelijke of industriële laboratoria. Inmiddels zijn proces en apparatuur dermate ver ontwikkeld, dat het mogelijk is om microvonkbewerkingen uit te voeren in een commerciële industriële omgeving. De bewerking wordt meestal uitgevoerd als een vonkfrees- of -boorbewerking met massieve ronddraaiende elektrodes (diameters 150 μm en minder).

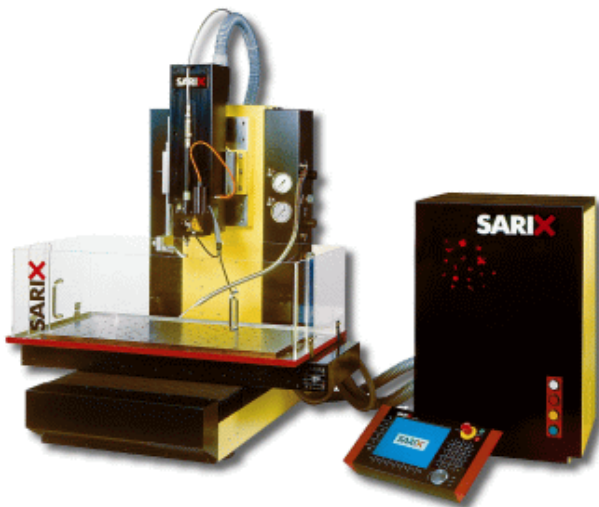
Het bewerken van de kleine onderdelen vereist ook generatoren voor het leveren van uitermate kleine pulsenergieën met aangepaste pulsformen. Figuur 2.90 toont een opstelling. Door de slapheid van de elektrode wordt deze geleid door een keramische geleiding. Via een speciale WEDG operatie (zie ook § 2.10.2.2) kan de elektrode worden vorgevormd.

Het microvonken (zoals hierboven voorgesteld) kan worden toegepast op min of meer klassieke CNC vonkmachines. Hiervoor wordt een opbouw rotatiespil gemonteerd met een bijkomende generatorunit (meestal gebaseerd op het relaxatieprincipe voor het leveren van kleine pulsenergieën).

Ook biedt de markt speciaal ontworpen vonkerosiemachines voor microvonken (zie figuur 2.91). Sommige van deze machines hebben 5-assige positioneringsmogelijkheden met een resolutie van 0,1 micrometer. De elektrodes kunnen tijdens het proces worden gedressed tot minimale diktes (gaten van 20 micron).



figuur 2.90 Het principe van microvonken



figuur 2.91 Microvonkmachine

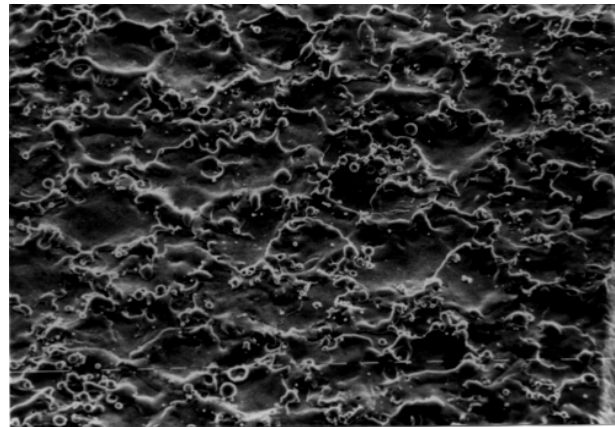
De grote procesbeheersing leidt tot gaten met extreem goede rondheid, caviteiten met hoge concentriciteiten, nauwkeurig getrapte geometriën en nauwelijks deformatie bij intrede en uitgang. Toepassingsvoorbeelden vinden we onder andere in medische apparatuur, kleine gaten in nozzles voor bijvoorbeeld dieselinjectoren, in de fiber-optiek, uiteraard bij micro-matrijzen en MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), maar ook bijvoorbeeld bij het vervaardigen van kleine figuren voor het bedrukken van textiel. Ook kan gelaagde materiaalafname via microvonkfreesen voor scherpe details afgewisseld worden met geïndexeerd zinkvonken.

2.10.5 Polijstvonken

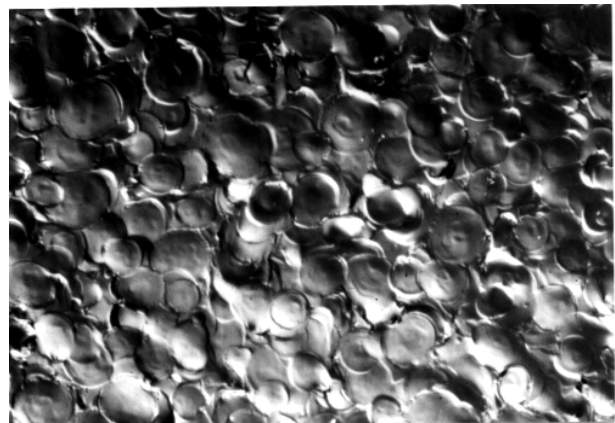
2.10.5.1 Begripsbepaling

Met deze bijzondere manier van navonken zijn oppervlaktekwaliteiten van 0,3 tot 0,15 $\mu\text{m Ra}$ te realiseren. Verdere nabewerkingen, zoals mechanisch polijsten, komen daarmee te vervallen. Bij het polijstvonken blijft in principe de bekende erosiestructuur behouden, die normaal ontstaat door opeenvolgende en deels elkaar overlappende smeltkraters. Wat opvalt is de geometrie van gevonkte krater-tjes. Deze bezitten een kenmerkende vlakheid en een uniforme, zuiver cirkelvormige doorsnede van circa 10 μm . Uit microscopische afbeeldingen valt af te leiden dat bij polijstvonken overwegend sprake is van het versmelten van de toppen van de oorspronkelijke ruwheidsstructuur, gevolgd door verstarren van dat

minimale volume vloeibaar metaal (zie figuur 2.92 en 2.93). Van het krachtig uitstoten van de smelt, zoals dit bij het abrupt beëindigen van iedere erosiepuls optreedt, is nu geen sprake. Bij het normale voor- en navonken dragen de mechanische uitstootverschijnselen aanzienlijk bij aan het realiseren van een zo groot mogelijke materiaalafname per puls.



figuur 2.92 Microscopische opname (vergroting 200x) van een normaal nagevonkt oppervlak. Smeltdeeltjes en kraterstructuur zijn goed zichtbaar



figuur 2.93 Vergroot beeld (220x) van een oppervlak dat volgend op navonken een polijstvonkbewerking heeft ondergaan. Hierdoor is een afgevlakte glanzende structuur ontstaan

2.10.5.2 Technologie

Evenals bij het zinkvonken zijn vonkelektrode, werkstuk (zowel qua afmetingen als materiaal), diëlektricum, spoeling, servo regeling en op elkaar afgestemde, getrapte generatorinstellingen van invloed op het eindresultaat. De laatste twee factoren dienen te zorgen voor zeer geringe ontladingsenergieën en enkelzijdige vonkspleten kleiner dan 10 μm . De bandbreedte tussen ongewenste "kortsluitpulsen" en niet werkzame "open pulsen", waarbinnen de beweging moet worden geregeld, is overeenkomstig van grootte en stelt bijgevolg hoge eisen aan de servo gestuurde asregeling.

De absolute elektrodeslijtage is verwaarloosbaar, aangezien vrijwel onmeetbaar kleine materiaalvolumes worden verwijderd. Materiaalafname is immers niet het hoofddoel van deze vorm van vonkeroderen. Geforceerde spoeling in de nauwe vonkspleet is niet wenselijk. In de praktijk blijkt een geringe mate van vervuiling noodzakelijk om optimaal te kunnen polijstvonken. Meestal kan worden volstaan met de spoeling die het gevolg is van de noodzakelijke planetairbeweging, eventueel aangevuld met een lichte pulse-rende spoelbeweging.

2.10.5.3 Toepassingsgebied

Het proces is goed in te zetten bij relatief kleine holtes (oppervlakken $\leq 80 \text{ cm}^2$), vooral daar waar op grond van vormcomplexiteit niet of nauwelijks mechanisch te polijsten is, zonder dat vormbeschadigingen optreden. De benodigde vonkpolijsttijd hangt sterk af van de elektrodegeometrie, de afmetingen en de voorbewerkingskwaliteit. Onder standaardcondities wordt, om een dergelijke lage ruwheidswaarde te bereiken, gerekend met ongeveer 30 minuten per cm^2 actief oppervlak. Ongunstige omstandigheden drijven de bewerkingstijd op tot veelvoud van de genoemde waarde. Belangrijk is daarom dat de zinkvonkmachine na de normale werktijd zonder toezicht kan doorvonken. Met negatief gepoolde koperen elektroden zijn op fijnkorrelige, laag koolstofhoudende staalsoorten (bijvoorbeeld gereedschapsstaal) ruwheden te behalen tot $0,15 \text{ } \mu\text{m Ra}$. Proeven met grafiet als elektrodemateriaal en hardmetaal of ander sintermetaal als werkstukmateriaal leveren geen goed resultaat op. De inhomogene structuur die bij de laatste materialen duidelijk zichtbaar is, wordt toegeschreven aan een plaatselijk sterk verschillende samenstelling.

In verschillende laboratoria wordt gewerkt aan verdere verbeteringen, o.a. door middel van het gebruik van meerkanaalsgeneratoren, het toevoegen aan het diëlektricum van ontstekingsbevorderende (vonkspleetverbredende) fijne (silicium)deeltjes en zogenaamde "Megageneratoren" met hoogfrequent elkaar opvolgende zeer korte pulsen.

In § 2.11 worden enkele voorbeelden gegeven van toepassingen.

2.10.6 Textureren (ED Texturing)

De gesteldheid van een bewerkt oppervlak wordt meestal aangegeven met een bepaalde ruwheidswaarde. Gedurende vonkerosie ontstaat een regelmatige, richtingsonafhankelijke kraterstructuur door de vele gelijkvormige pulsen. Afhankelijk van de instellingen zijn vonkpulsen sterker of zwakker, wat bij gelijkblijvende elektrode/werkstukcombinatie resulteert in een bepaalde gedefinieerde ruwheid (zie ook tabel 1.3). Bij vormgevende delen vindt men de afdruk van het gevonkte oppervlak terug in het product. Daarvandaan dat eisen gesteld worden aan het karakter van de oppervlaktegesteldheid. Men spreekt dan van oppervlakte-textuur.

Textuureisen komen veel voor bij het vervaardigen van matrijsholten en in het bijzonder bij matrijzen waarmee men delen van consumentenartikelen fabriceert. De bedoeling is dan de uitwendige oppervlakken van het product een bepaald aanzien of zekere gebruikseigenschappen te geven. Bij veel producten kan een mat gezandstraald uiterlijk al volstaan op esthetische eisen. De beoordeling van dergelijke texturen gebeurt uitsluitend visueel en meestal op basis van vergelijking met textuurmonsters. Pure oppervlakteruwheid daarentegen laat zich met de gestelde eisen vergelijken door meting van de ruwheidswaarde.

De textuurmonsters, die men gebruikt in de matrijzenbouw, zijn vastgelegd in plaatjes van thermoplastische kunststof. Deze vergelijkingslinialen hebben dus een identieke patroon als het product van de matrijs overneemt tijdens het spuitgieten, ofwel een negatieve afdruk van de textuur in de matrijsholte. Deze min of meer gestandaardiseerde texturen zijn in de praktijk uit te breiden met soorten die verkregen worden door geselecteerde vonkinstellingen. Afhankelijk van productmateriaal en lossingshoek kan voor kwaliteiten tussen VDI 18-37 worden gekozen, en zijn zo matrijzen delen te vervaardigen die geen extra polijst- of ets-

bewerking nodig hebben. Ook kan men juist de gevonkte harde laag gebruiken als middel voor het opruwen van machinedelen voor zowel technische als design doeleinden. Zo zorgen door vonkerosie getextureerde walsrollen in de automobiellindustrie ervoor, dat door walsen behandelde carrosserieplaatdelen een betere hechting van de op te brengen coating geeft.

Wel dient te worden opgemerkt, dat een vonktextuur, naast de generatorinstelling, ook enigszins beïnvloed wordt door factoren als de holtevorm, de grootte van het actieve elektrode-oppervlak en door de spoeling. Het gebruik van hoogspanning (200V) of laagspanning (60V) geeft eveneens een verschil in vonktextuur.

Vergeleken met andere technieken voor het aanbrengen van textuur in matrijzen, zoals stralen, etsen en galvanoplastiek, biedt EDM-texturen een tweetal voordelen:

- Het vonkerosief textureren gebeurt met normale vonkmachines. Gereedschapmakerijen die voor zinkvonken uitgerust zijn, kunnen dus zelf textuur aanbrengen of deze repareren. Dikwijls is het zelfs geen extra bewerking, omdat veel matrijsholten toch al worden nagevonkt.
- Een vonktextuur is tamelijk eenvoudig te reproduceren als naast de elektrode/werkstukcombinatie de generatorinstelling op tekening of in CAD-file wordt vermeld.

2.11 Praktijkvoorbeelden

Voorbeeld 1

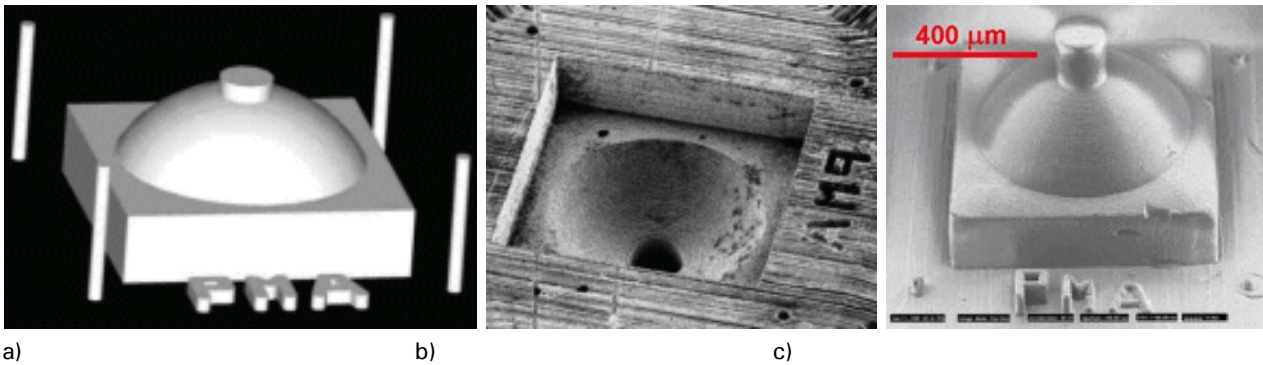
Figuur 2.94 laat een matrijsdeel aangemaakt via vonkfreen zien en het bijbehorende product.



figuur 2.94 Matrijsdeel en product

Voorbeeld 2

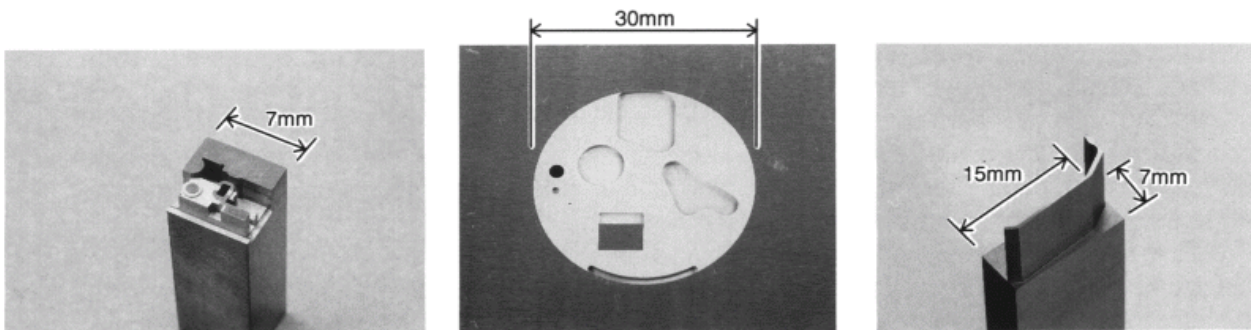
Figuur 2.95 geeft een voorbeeld van het vonkfreen van een microspuitgietmatrijs.



a) b) c)
figuur 2.95 Maken van microvormholte via microvonkfrezen (a. solid CAD-model; b. matrijs; c. product)

Voorbeeld 3

Figuur 2.96 geeft een drietal voorbeelden van vonkfrezen.



figuur 2.96 Drie voorbeelden van vonkfrezen

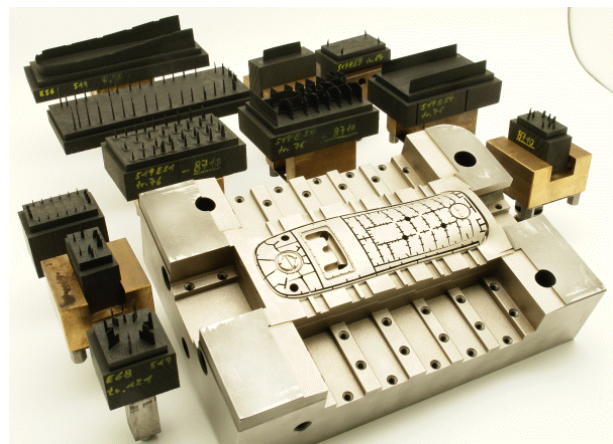
Voorbeeld 4

Figuur 2.97 laat een voorbeeld zien van afwikkelvonken.



figuur 2.97 Grafiet elektrode en werkstuk gebruikt voor afwikkelvonken (zie ook figuur 2.42)

Voorbeeld 5



figuur 2.98 Hoogwaardige grafietelektrodes met fijne details voor het vervaardigen van een matrijsdeel dat wordt gebruikt voor het spuitgieten van een mobiele telefoon

Voorbeeld 6

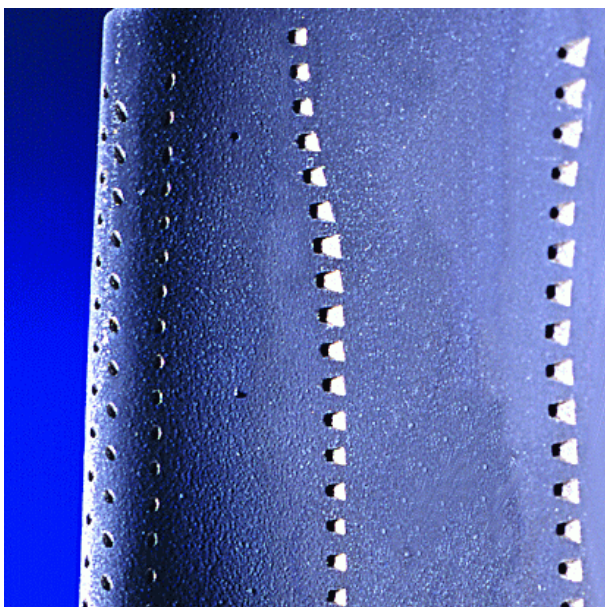
Onderwerp: Leidschoep van een industriële gasturbine met gezinkvonkte tipholte en afdichtings-sleuven.
Materiaal: Inconel



figuur 2.99 Loopschoep industriële gasturbine met gezinkvonkte tipholte en sleuven

Voorbeeld 7

Onderwerp: Turbineschoep
Beschrijving: lengte: 150 mm, $\varnothing$ 0,72 mm hardmetaal buiselektrode ('boor'snelheid = 17 mm/min). Fanshape (gatuitloop) gevinkt met een vierkante elektrode (WCu $\square$ 3 mm).
Materiaal: Hasteloy
Bewerkingstijd: Per profielgat 1 min.



figuur 2.100 Schoep van een industriële gasturbine met een geprofileerde uitloop van de gaten (fanshape)

Voorbeeld 8

Onderwerp: Autobandmatrijs

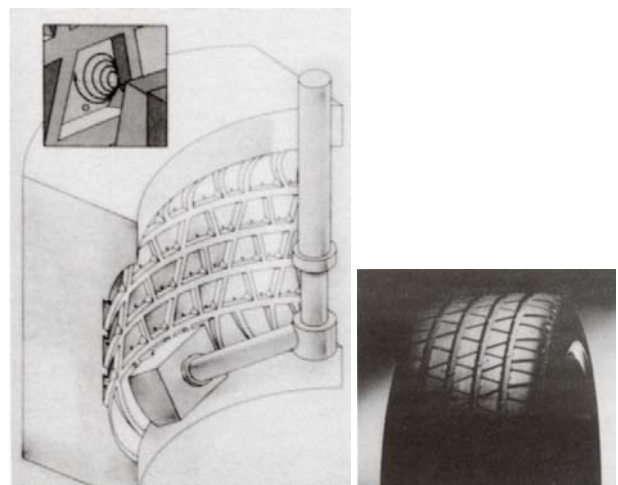
In figuur 2.101 wordt een schematische weergave gegeven van de 3D planetaire beweging om een autobandmatrijs te eroderen (links), alsmede het uiteindelijke product (rechts).

Voor 5 identieke holtes werden in totaal twee grafietelektrodes gebruikt met ondermaten van respectievelijk 0,5 en 0,2 mm.

De vereiste oppervlakteruwheid was $R_a = 1,6$ mm (klasse 24). Deze werd bereikt door een eerste generatorinstelling resulterend in een R_a van 10 mm (klasse 40) die verder in stappen werd afgebouwd tot $R_a = 4$ mm (klasse 32).

Bij deze ruwheid werd de elektrode gewisseld en verder gevinkt tot de gewenste waarde.

Totale bewerkingstijd per holte: 25 min.



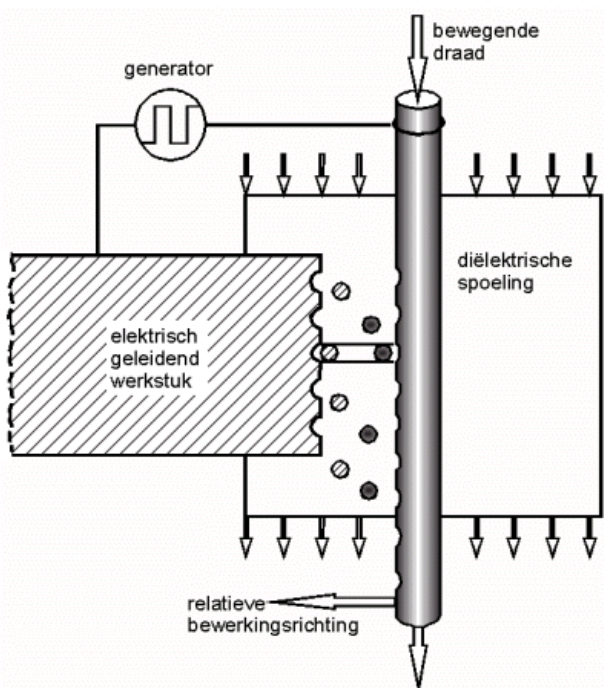
figuur 2.101 Vervaardiging van een autobandmatrijs

Hoofdstuk 3

Draadvonken

3.1 Inleiding

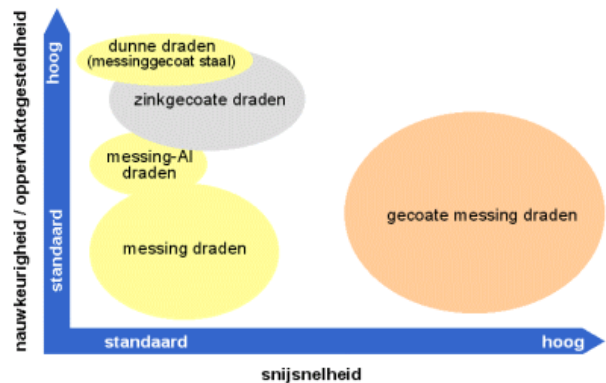
Rechtstreeks van het oorspronkelijke zinkvonkproces afgeleid is het vonkerosief snijden, dat in het algemeen het snijden, uitsnijden of insnijden van werkstukken met behulp van een gereedschap (band, draad, schijf of plaat) omvat. Gebeurt het 'snijden' met behulp van een draad, dan spreekt men van draadvonkerosie of CNC-draadvonken (Engels: 'wire EDM' of 'wire cutting'; Duits: Drahterodieren). Deze op zich complexe snijtechniek functioneert absoluut niet zonder numerieke besturing. Bij draadvonken snijdt een dunne, eenmalig bruikbare, elektrisch geleidende draadelektrode, die standaard in de handel verkrijgbaar is, binnen een vonksysteem de werkstukvorm, met hoge precisie uit (zie figuur 3.1).



figuur 3.1 Schematische opstelling in de draadvonkzone

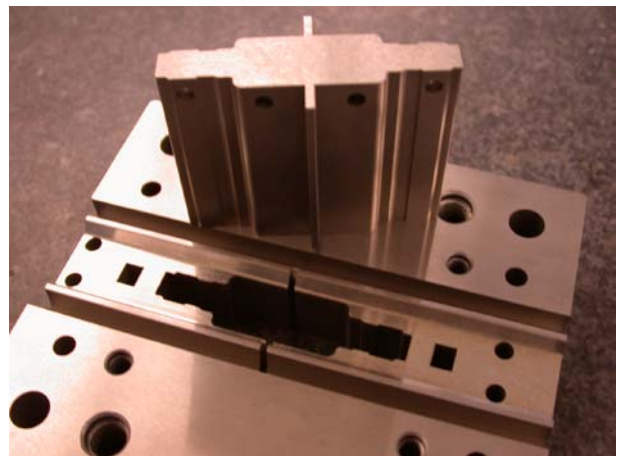
De vorm ontstaat hoofdzakelijk als gevolg van de numeriek gestuurde beweging volgens het opgestelde NC-programma. Instelling van de technologische parameters, die onder andere de snijnsnelheid en de slijtage bepalen, wordt, voorgeprogrammeerd en in het geheugen opgeslagen, door de besturing gegeven of is uit het machinehandboek te halen. De invloed van de slijtage van de draad vindt men bij een specifieke werkstukhoogte bijvoorbeeld direct terug in de draadtoevoer- of -afwikkelingsnelheid. In het algemeen dient de draadsnelheid voldoende hoog te zijn om niet te breken door de gezamenlijk invloed van slijtage en trekkracht van de voorspanning, en om geen lichte conicititeit te veroorzaken over de werkstukhoogte. Draaddiameter, vonktechnologie en beweging bepalen in een perfect samenspel de contour van de snede. Kleine wijzigingen veroorzaken variërende bewerkingscondities, die bijgevolg wisselende eindresultaten opleveren en die pas op het einde van de bewerking (te laat!) voor de dag komen. Het verregaand autonome proces heeft zich vooral bewezen in staal en hardmetaal binnen gereedschappmakerijen. Met hoge nauwkeurigheid (tot op $\pm 2 \mu\text{m}$) worden doorlopende gaten en profielen van willekeurige doorsnede als pons- en snij-

stempels en extrusiematrijzen vervaardigd. Fijnmechanische werkplaatsen passen deze precisiesnijtechniek toe voor de fabricage van hoogwaardige onderdelen op eindkwaliteit. Specifieke ontwikkelingen op het gebied van generatorteknik en draad brengen het vonkerosief snijden van bepaalde keramieksoorten binnen bereik. De uiteindelijke materiaalafhankelijke instelling van de draadvonkmachine varieert al naar gelang de proceskeuze gericht is op het behalen van minimale ruwheid, beste geometrische nauwkeurigheid of maximale snijnsnelheid (zie figuur 3.2).



figuur 3.2 Keuze van de vonkdraad als functie van snijnsnelheid en oppervlaktegesteldheid

Bij doorlopende profielen levert draadvonken winst op ten opzichte van zinkvonken, omdat alleen de contour wordt gevonkt. Het hele overblijvende volume is hetzij het gewenste gereedschap of het uitvalstuk (zie figuur 3.3). In het algemeen geldt dat het geen verschil maakt of het om een binnen- of buitenvorm gaat.



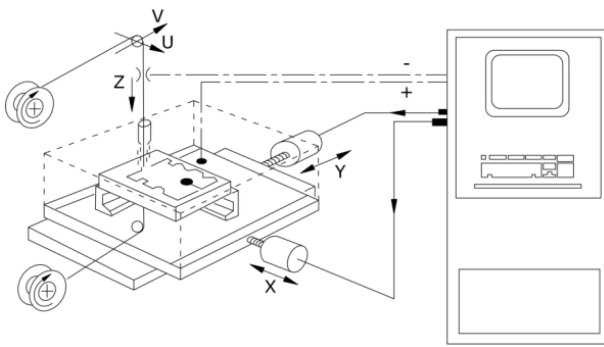
figuur 3.3 Snijder/snijplaat

3.2 De machine

Voor de terminologie betreffende de draadvonkmachine (zie ook § 1.5 en 1.6) wordt uitgegaan van de bestaande normen (DIN 8580, 69650, 69718). De volgende begrippen en grootheden zijn specifiek voor draadvonkerosie, zie ook VDI 3402 [9] en CIRP, deel 9 [10].

De CNC-draadvonkmachine heeft de volgende functionele delen:

- **De mechanische opbouw** (zie figuur 3.4)
Deze zorgt voor de relatieve verplaatsing van de draad ten opzichte van het werkstuk en omvat het machineframe, het draadaanvoer- en afvoersysteem inclusief een automatische draadinvoreenheid, de opspantafel, alle bewegingsassen en het servo-systeem.



figuur 3.4 Schematische weergave van besturing en generator gekoppeld aan draadhantering en bewegingsassen

► De generator

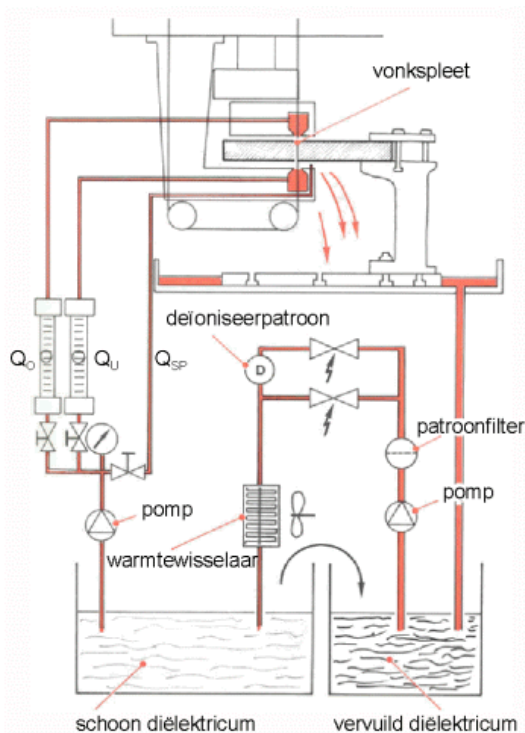
Deze levert korte, hoog energetische pulsen voor het draadvonken.

► Het servosysteem

Geïntegreerd in het elektrische systeem zorgt deze voor een gecontroleerde, relatieve voeding van de draad ten opzichte van het werkstuk.

► Het diëlektricumstelsel

Dit bestaat uit een reservoir, filter- en conditioneringsapparatuur, alsmede pompen, leidingen en de koelinstallatie (zie figuur 3.5). Daarmee wordt gezorgd dat het diëlektricum goed geconditioneerd op de geschikte plaats wordt gebracht.



figuur 3.5 Volledig demiwatercircuit

► CNC besturing

Hiermee worden de machinebewegingen en het proces vonkspecifiek aangestuurd.

► Beveiligingen

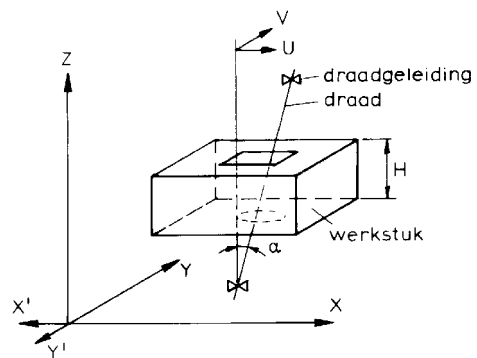
De generator voor het leveren van de energiepulsen voor het vonkerosieproces, alle schakelingen die nodig zijn voor het servo-, diëlektricum- en beveiligingssysteem, de aandrijving en de numerieke besturingseenheid vormen samen het elektrische systeem.

3.2.1 Assen en bewegingsnomenclatuur

De benaming van assen en bewegingen is afgeleid van ISO R841 [11], voor numeriek bestuurd machines. Het standaard coördinatensysteem is een rechts-draaiend rechthoekig Cartesiaans assenstelsel, betrokken op het werkstuk dat op de machine is opgespannen en uitgelijnd.

Een hoofdletter zonder accentteken wordt gebruikt wanneer het gaat om een verplaatsing van de draad (het gereedschap). Gaat het om een werkstukverplaatsing, dan wordt een hoofdletter met accent gebruikt en is de positieve richting tegengesteld aan de overeenkomstige beweging met de hoofdletter zonder accent.

De Z-as, als draadtoevoerring, staat loodrecht op het werkstukdragende oppervlak (figuur 3.6). De X- en Y-beweging zijn horizontaal en vormen samen met de Z-as het assenstelsel. In figuur 3.6 is de pijl met de aanduiding X' een bewegingsrichting voor een werkstuk, bewegend in positieve richting, terwijl de pijl met aanduiding X de bewegingsrichting aangeeft van het gereedschap met betrekking tot het werkstuk. De secundaire bewegingen van de bovenste draadgeleiding worden aangeduid met U respectievelijk V. Meestal kan men als optie een rotatie-as aanbrengen om al snijdend het werkstuk te laten draaien.

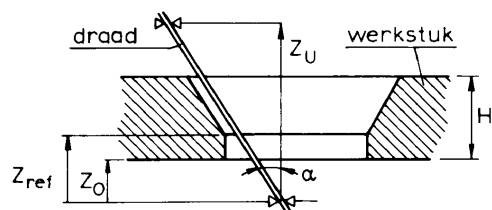


figuur 3.6 Assen-nomenclatuur bij draadvonken

Hoek α is de hoek die de draad ruimtelijk bewegend tijdens de bewerking maakt met de verticaal (Z-as). Deze zich verplaatsende inclinatie ontstaat door een relatieve beweging van U en V ten opzichte van X en Y.

3.2.2 Vlakkenomenclatuur

Bij het vastleggen van de ligging van een aantal vlakken (zie figuur 3.7), neemt men als uitgangspunt de hoogte van de onderste, vaste draadgeleiding, omdat deze een constante waarde heeft. Het werkstuk wordt opgespannen in een vlak dat op een bepaalde afstand daarboven ligt (hoogte Z_0). De programmering van de te vonken contour daarentegen gebeurt vanuit het referentievlak (Z_{ref}), dat in principe een willekeurige positie kan innemen.



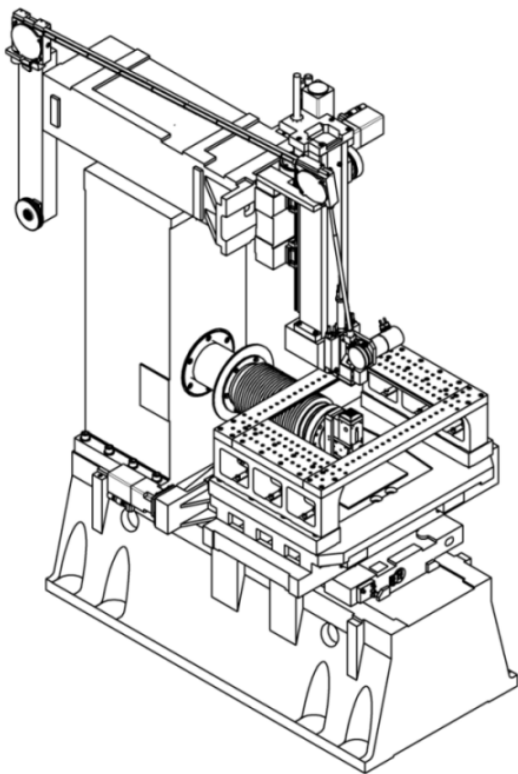
figuur 3.7 Definitie van vlakken (nulvlak, referentievlak)

3.2.3 *Bewerkingsgrootheden*

De specifieke bewerkingsgrootheden, hetzij in de vorm van een lineaire, oppervlakte- of volumetrische grootte, zijn bij het draadvonken verschillend van die bij het zinkvonken (zie § 1.3.3). Zo is de lineaire snijsnelheid v_w (mm/min) de effectieve voedingssnelheid waarmee de contour wordt gesneden. De oppervlaktesnijsnelheid A_w is het product van de lineaire snijsnelheid en de werkstukhoogte (mm²/min). In toenemende mate wordt ook bij deze vonkerosieve bewerkingstechniek de volumetrische snijsnelheid V_w (mm³/min) gehanteerd, die het volume per tijdseenheid verwijderd werkstukmateriaal weergeeft.

3.2.4 *Mechanisch deel*

Voorheen verschilde een draadvonkmaschine sterk van uitvoering vergeleken met meer gangbare werktuigmachines, ondermeer door de toepassing van dunne eenmalig te gebruiken draad als precisiegereedschap, het bijbehorende draadsysteem, de mogelijkheid conisch te snijden (3D), met behulp van verschillende cycli door toucheren te meten en te centreren, de verschillende spoelingsvarianten, de 'vliegende' opspanning van het werkstuk en de demiwaterinstallatie. Tegenwoordig krijgt de draadvonkmaschine steeds meer gelijkenis met zinkvonkmachines, mede door het economische streven naar modulaire opbouw (zie figuur 3.8).



figuur 3.8 Volledig uitgewerkt schema van een moderne draadvonkmaschine

Veelal wordt de opbouw symmetrisch uitgevoerd. Warmte- en trillingsbronnen, zoals aandrijfsystemen en pompen, worden bij precisie-uitvoeringen bij voorkeur geïsoleerd van framedelen als kolom en tafel. Tevens worden die gekoeld. Op die manier zijn werkstuk en proces losgekoppeld voor een verhoogde stabiliteit. Een voorbeeld daarvan wordt gegeven in figuur 3.9

Als gevolg van een continue evolutie in de aandrijving van de verschillende assen komen tegenwoordig zowel kogelomloopsystemen met direct gekoppelde motoren voor, als uitvoeringen met lineaire motoren.



figuur 3.9 Dubbele draadloop op de machine vereist een speciale, thermisch stabiele constructie om de gewenste hoge precisie te garanderen

Vooral de ultrakorte reactietijden van de laatste versie leveren procestechnisch voordeel op. Voor de hoogste precisie kan een speciale machinevariant worden geleverd met een horizontale draadloop (zie figuur 3.10). Hiermee zijn volautomatisch draadelektrodes te gebruiken tot minimaal $\varnothing 20 \mu\text{m}$.



figuur 3.10 Draadvonkmaschine met een horizontale draadloop

Om de productiviteit en autonomie te verhogen, zijn er nu mensarme machines op de markt met zowel een meervoudig uitgevoerd draadsysteem, als een duodraadwisselaar (zie figuren 3.11 en 3.12).

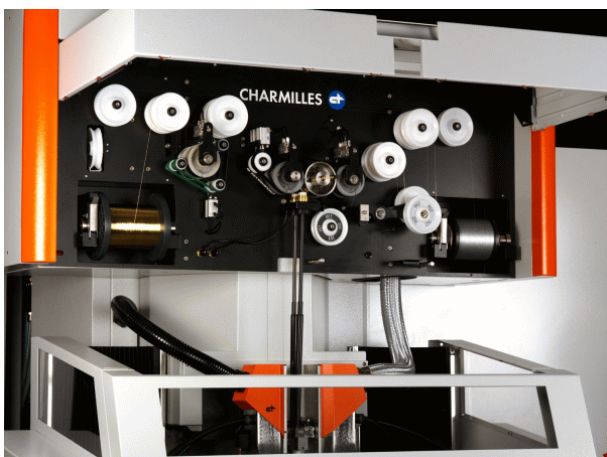
Hierdoor wordt de mogelijkheid geboden automatisch, zonder menselijk ingrijpen, zowel te veranderen van:

- draadsoort (snijsnelheid verhogend) en/of
- draaddiameter (idem of om voorgeschreven minimale radius te bereiken).

Regel is dat: hoe kleiner de radius in het werkstuk, hoe dunner de draad, des te lager de snijsnelheid en hoe hoger de snijkosten en hoe langer de bewerkingstijd.



figuur 3.11 Moderne machine geschikt voor automatisch wisselen van draad(soort/diameter) in bedrijf



figuur 3.12 Draadloop van een draadvonkmachine met dubbel draadsysteem

3.2.5 Diëlektricum systeem

Als diëlektricum wordt hoofdzakelijk gedeïoniseerd of demiwater gebruikt (zie §1.2 bij "functie van het diëlektricum"). Opslaan en ter plaatse brengen van de vonkvloeistof, alsmede het reinigen, in conditie brengen en houden en eventueel het koelen van deze vloeistof vraagt een aangepaste installatie. De in-proces, en door pompen en de motoren (ook in de machine zelf), ontwikkelde warmte moet gecontroleerd worden afgevoerd om de hoge nauwkeurigheid bedrijfszeker te kunnen realiseren. Door het agressieve karakter van demiwater dient de hele uitvoering in roestvast staal of kunststof te worden uitgevoerd. Voor het op een instelbare, constante temperatuur houden, zorgt een koelunit. Geavanceerde machines maken gebruik van de vonkvloeistof voor het gelijkmatig op temperatuur houden van de essentiële delen van de machine, zoals kolom en geleidingsarm(en). Tijdens het proces wordt het water verontreinigd door deeltjes die of blijven zweven of oplossen. Constant de zuiverheid, de pH en de geleidingswaarde op een ingestelde waarde houden, vraagt de nodige aandacht, tijd en geld. Gebruikelijk zijn instellingen tussen 20 en 1 μS . Te lage waarden leveren daarbij een traag snijproces op, met een korte levensduur van de benodigde deïoniseerpatroon; te hoge micro-Siemens/cm-waarden daarentegen een hogere ruwheid, plus versterkte kans op elektrolyse en draadbreek.

Voor het vangen van de losse deeltjes worden bekende industriële filtersystemen toegepast, zoals bezinkstanks en papierpatronen. Om vervolgens onge-

wenste, in oplossing gegane stoffen te verwijderen, gebruikt men tot nu toe overwegend patronen, op basis van een zorgvuldig gemengd bed van 40% kationen- (-) en 60% anionen- (+) hars (nieuw of geregenereerd). Dergelijke standaardpatronen hebben een relatief beperkte standtijd, waarna deze vervangen dienen te worden en/of geregenereerd, al of niet in eigen beheer of als een dienstfunctie. Er is sprake van chemisch afval na gebruik, aangezien het hars chemisch van samenstelling is, alsmede ingevangen zwaar metaal(deeltjes) bevat zoals chroom, mangaan, nikkel, vanadium en waartoe tegenwoordig ook koper en zink behoren.

Een nieuwe veelbelovende ontwikkeling die zich aandient, is de 'ioniser'eenheid. In principe gaat het daarbij om een gepatenteerde manier die werkt op basis van elektromagnetisme. Het systeem is milieuvriendelijker (geen chemisch afval), biedt een grote deïoniseercapaciteit van 40 l/min. en komt per unit overeen met 200 liter ten opzichte van een standaard 20 liter mengbed harspatroon. De geleidingswaarde ligt gemiddeld bij 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$; kan echter lager worden ingesteld indien nodig. Mede door de pH-waarde tussen 7,5 en 8 gedurende de volle bedrijfsduur, draagt deze nieuwe vinding bij aan het sterker dan voorheen voorkomen van corrosie, pitting en dergelijke.

3.2.6 De generator

Met betrekking tot de elektrische grootheden voor het draadvonken wordt verwezen naar §1.2 en 1.6.1, waarin de basisgrootheden staan vermeld.

3.2.7 CNC besturing/programmeringsaspecten

Momenteel wordt de beschrijving van de snijbanen meestal afgeleid uit een bestaand CAD-programma. Om respectievelijk een snijder of een snijplaat te fabriceren, wordt de correctie bestaande uit een enkele vonkspleet plus de draadradius, vanuit de nominale baan naar binnen of naar buiten gelegd. Voor een onbekende draad (soort en diameter) en materiaal (soort en dikte) combinatie kan de snijbreedte met behulp van een proefsnede worden vastgesteld.

3.3 Draadelektroden

Voor een belangrijk deel bepaalt de draad (soort en diameter) de effectiviteit en nauwkeurigheid ($\pm 0,002 \text{ mm}$; $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$) van het draadvonkproces. Zeer uiteenlopende aspecten bepalen de keuze van de draad. Eén universeel bruikbare draadelektrode als het precisiegeveerderschap in het draadvonken bestaat (nog) niet, daarvandaan vormt de keuze van de superprecieze draad (tolerantie $\pm 0,001 \text{ mm}$) altijd nog een compromis van specifieke eigenschappen. Dat de draad precies is, blijkt doordat er in de praktijk mee uit te richten en te meten is op de machine. De tegenwoordig leverbare standaardsoorten draadelektroden zijn in te delen volgens onderstaande criteria:

1. materiaalsoort:
 - = massief materiaal: koper, messing (CuZn37), molybdeen en wolfram;
 - = beklede draad (mantelelektrode: kern uit volmateriaal (CuMg, CuZn20) met deklaag (coating) of staal gecoat, of met kopermantel en diffusie gegloeide buitenste deklaag), enz.;
2. materiaaleigenschappen:
 - homogene structuur, hardheid, elasticiteit, treksterkte, ruwheid, thermische en elektrische eigenschappen, niet verouderd;
3. geometrie:
 - draaddiameter (d_e) of radius (r_e) en toleranties (op rondheid, doorsnede, glad oppervlak, uniformiteit over grote lengte en tussen verschillende spoelen, concentrische coating).

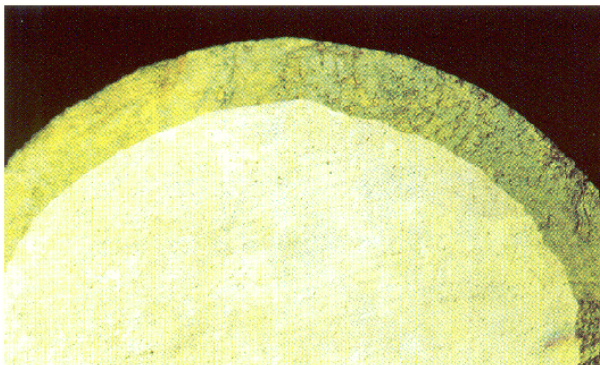
Deze kenmerken laten zich direct omzetten in de eisen die te stellen zijn aan de draad (draadspecificatie) voor een specifieke snijopdracht op een machine die beschikbaar is.

Vroeger werd overwegend koperdraad gebruikt, vanwege de hoge geleidbaarheid (zie tabel 3.1) en toen bekende fabricagemogelijkheden.

tabel 3.1 Vergelijkend overzicht geleidbaarheid in procenten volgens IACS (International Association of Classification Societies)

materiaal	geleidbaarheid [%]
koper (Cu)	100
messing (kwaliteit Cu63/Zn37)	20
aluminium (Al)	63
molybdeen (Mo)	32
zink (Zn)	28

Om snel te snijden past men overwegend grotere diameters toe; voor verfijnd afwerken op de gewenste toleranties (vooral minimale radii) de dunnere types. Omwille van de grotere treksterkte schakelde men over naar messingdraad, die wereldwijd nog steeds het meest wordt toegepast. In het begin van de jaren '80 werden (vooral met zink) beklede draadsoorten op de markt gebracht met erop aangepaste technologie (zie figuur 3.13)



figuur 3.13 Doorsnede van een messingdraad met een dikke zinkbekleding

Het zink oefent een stabiliserende werking uit op het vonkproces door snel smelten, een snelle ontsteking en een vergrote vonkspleet met betere spoeling, waardoor een hogere snijsnelheid wordt verkregen. De opbouw van de deklaag veranderde tevens van samenstelling (middels bijvoorbeeld diffusiegloeien) om een lagere kans op draadbreek te garanderen, vanwege het gestegen vermogen in de moderne draadvonkmachines. De draad beïnvloedt eveneens de correcte werking van de automatische draadvoer. Samengevat wordt duurdere, gecoatete draad ingezet voor snelle voorsneden (tot 400 mm²/min), terwijl draadsoorten uit volmateriaal verbeteringen brengen in oppervlaktegesteldheid en geometrische precisie. Conisch vonken vraagt een soepelere draad, terwijl een hoog werkstuk een draad met hoge treksterkte vergt. In speciale gevallen (kleine werkstukradii) waarvoor een dunne draad (< 100 µm) is vereist, wordt molybdeen, wolfram of speciaaldraad gebruikt [12]. Zo komt ook gefratiteerde Mo-draad voor.

In tabel 3.2 wordt een aantal illustratieve richtwaarden gegeven van de snijsnelheid voor verschillende draadsoorten en werkstukmaterialen. De draaddiameter is hierbij 0,250 mm en de werkstukhoogte 30 mm.

tabel 3.2 Illustratieve richtwaarden voor de oppervlakte-snijsnelheid (mm²/min) voor verschillende draadsoorten en werkstukmaterialen

draad Ø 0,250 mm	werkstuk (30 mm hoog)	
	X210Cr12	Aluminium
CuZn37 CuSn1 Zn(CuZn37)	snijsnelheid (mm ² /min)	
	170	645
	210	785
	190	755

Hoewel de maximaal haalbare snijsnelheid in mm² per minuut informatie geeft over de prestatie van de betreffende machine (in combinatie met draadsoort en materiaal), is dit alleen belangrijk als ineens delen versneden worden waar oppervlaktegesteldheid en tolerantie van ondergeschikt belang zijn, of direct voldoen.

Veel vaker is het zo, dat er eisen worden gesteld aan tolerantie en oppervlaktekwaliteit, waardoor aan de maat en aan de vorm snijden niet met vol vermogen mogelijk is. Ook als men met meerdere sneden naar een optimale eindkwaliteit gaat, is het nodig om bij de eerste snede de snelheid te reduceren om voor de volgende snede niet een te hoge ruwheid en oncorrigeerbare profielafwijkingen te veroorzaken.

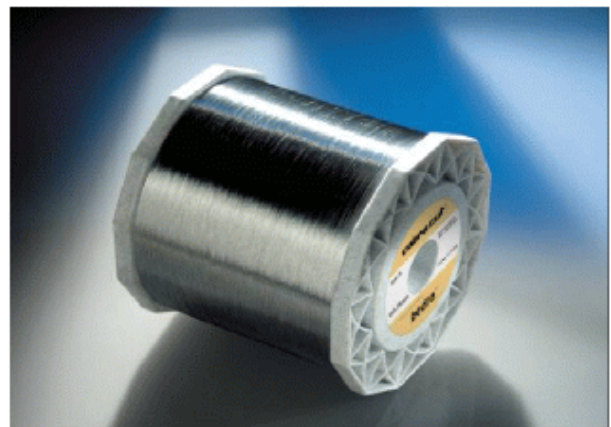
Bij de machinetechnologie vind men dan ook een optelsom van de snijtijd voor de verschillende sneden die hoort bij:

- ▶ materiaal;
- ▶ draadsoort/-diameter;
- ▶ hoogte;
- ▶ ruwheid;
- ▶ en profielafwijking.

Dit resulteert in een samengestelde snijtijd om de totale bewerkingstijd in te schatten en/of te calculeren.

Praktische aanwijzingen voor gebruik en opslag van vonkdraad

Uitgegaan wordt van strak gewikkelde, knikvrije draad uit één stuk op spoelen met gestandaardiseerde afmetingen (figuur 3.14).



figuur 3.14 Verder ontwikkelde 12-kantige spoel (met kijkgaten) uit slagvaste kunststof

Meest gebruikt zijn de soorten zoals in tabel 3.3 weergegeven.

Tussen haakjes staat vermeld de beschikbare lengte voor Ø 100 µm diameter; waar niet leverbaar is de draadlengte weergegeven voor de erbij vermelde diameter. De spoelen worden aangeleverd in een verpakking die slag- en stootvast is, alsmede afgeschermd tegen stof, oxidatie en vervuiling.

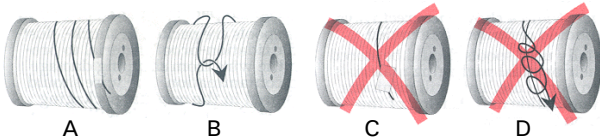
tabel 3.3 Meest gebruikte soorten draad

DIN spoel	nominaal* ¹ gewicht (kg)	standaard lengte (m) bij Ø 250 µm draad (100 µm draad)
K100	1,6	3.700 (23.500)
K125	3,5	8.000 (51.400)
K160	6	14.000 (niet; 39.000 Ø150 µm)
K200	15,7	37.000 (niet; 57.500 Ø200 µm)
K250	25	60.000 (niet; 93.750 Ø200 µm)
K335	45	106.000 (niet; 165.000 Ø200 µm)

*¹ niet elke machine kan het gewicht aan

Aangebroken, gedeeltelijk gebruikte spoelen dienen zorgvuldig te worden afgebonden, zodat enige trekkracht op de draad behouden blijft. Verschuiven of lossen van de afzonderlijke wikkelingen, met alle nadelige gevolgen van dien (knikken of opstropen van de draad), komt daardoor minder voor. Vastzetten van het draadeinde bij voorkeur door:

- ▶ lijmen op de rand van de spoel, of
- ▶ een lus maken in de opspoelrichting en hierdoor een draad trekken (figuur 3.15).



figuur 3.15 Methoden om aangebroken draad op spanning te houden.

- A: Strak afplakken op rand
 B: Lus leggen en aantrekken
 C + D: Zeker niet afplakken op rol of door middel van lussen in de opspoelrichting

Opslag gebeurt bij voorkeur met:

- ▶ klos liggend (draadlagen kunnen niet verschuiven);
- ▶ in droge ruimte met gelijkmatige temperatuur;
- ▶ in originele verpakking.

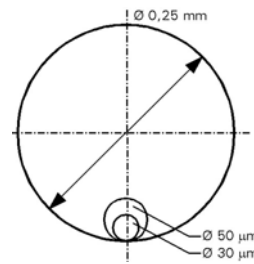
Onder genoemde voorwaarden is, zonder kans op problemen in bedrijf, de maximale opslagduur van deze speciale hoge kwaliteit draadsoorten 12 maanden.

Het elektrodesysteem

Het elektrodesysteem, dat de draadloop regelt, vormt een gecompliceerd en belangrijk geheel. De draad moet, onder andere voor visuele controle en een eenvoudige invoer, goed overzichtelijk en bereikbaar zijn voor de operator.

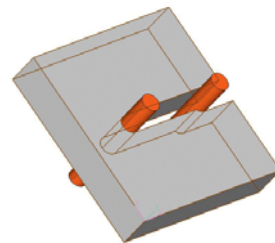
Het fabricageproces (o.a. bestaande uit: gieten, gloeien, galvaniseren, trekken, walsen, warmtebehandelingen, coating, enz.) zorgt er voor dat de krulvrije draad of die uit één component bestaat, dun of dik gecoat is, een gekalibreerde diameter heeft (tussen Ø 0,025 mm en Ø 0,330 mm (figuur 3.16) en gespecificeerde eigenschappen (zie tabel 3.4). Tevens wordt hij thermisch nabehandeld en gereinigd. Sommige oudere machines

maken nog gebruik van minder nauwkeurige messingdraad, die in de machine zelf wordt gekalibreerd. Dit gebeurt dan door middel van een treksteen en een gloeiunit.



figuur 3.16 Vergelijking diameterverhouding tussen diameter 0,030, 0,050 en 0,250 mm

De draad wordt voortdurend vernieuwd en dit met een snelheid v_E (lineaire afwikkelingsnelheid). Tijdens de bewerking wordt de draad strak gespannen, met trekkracht F_E . Om een indruk van het relatief geringe actief oppervlak te geven: bij volle of massieve sneden is de draad hoogstens op de halve omtrek belast, bij nasnijden niet meer dan een kwart (figuur 3.17).



figuur 3.17 Situatie werkstukelektrode bij voor- en nasnijden

Meest gebruikt wordt Ø 0,250 mm met een 69,4 x groter oppervlak dan een draad van Ø 0,030 mm (ter vergelijking: een menselijk haar heeft een doorsnede van 60 - 80 µm).

Vanaf de voorraadspoel gaat de draad normaal via geleidingsrollen, voorbij breukdetectoren (eindsensor) en trekkrachtregeling, naar de bovenste stroomtoevoer (open of gesloten), draadgeleiding en spoelkop (en eventueel knipelement en draadinvoerunit). Vervolgens loopt de draad door het werkstuk en wordt onder via een tweede geleiding, stroomtoevoer en spoelkop afgevoerd eventueel via een draadversnipperaar, die er bruikbaar schroot van maakt. Voor de oorspronkelijk veel gebruikte draadtransportbanden heeft men vervangende, minder onderhoudsgevoelige constructies uitgedacht. De draad moet strakgespannen en goed geleid zonder trillingen door de draadvoeringen en het werkstuk worden heengevoerd. In alle gevallen is voor zowel een optimaal snijproces als een maximale werkstukkwaliteit een zo klein mogelijke afstand te adviseren tussen de beide draadgeleidingen. In bedrijf wordt

tabel 3.4 Gespecificeerde materiaaleigenschappen van diverse soorten draad

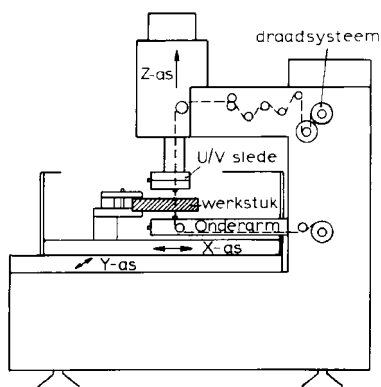
materiaal	T_s (°C)	T_v (°C)	k (W/cmK)	χ (Sm/mm ²)	R_m (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ρ (g/cm ³)	c_w (kJ/kgK)
Molybdeen	2610	4800	1,47	19,4	1540	336300	10,20	0,255
Staal	1530	3000	0,75	10,0	344	210000	7,86	0,461
CuZn37	910	1110	1,13	15,0	502*	105000	8,40	0,389
CuSn1	1040		2,09	26,0	375	128000	8,92	

T_s = smelttemperatuur
 T_v = verdampingstemperatuur
 k = warmtegeleidingscoëfficiënt
 χ = elektrische geleidbaarheid
 R_m = treksterkte
 E = E-modulus
 ρ = soortelijke massa
 c_w = soortelijke warmte
 * treksterkte kan afhankelijk van voorbehandeling oplopen tot 900 N/mm²

stukkwaliteit een zo klein mogelijke afstand te adviseren tussen de beide draadgeleidingen. In bedrijf wordt de draad thermisch belast, waardoor de uitgangstoestand qua structuur, hardheid, enz. niet meer aanwezig is. Daarnaast zullen slijtage van de draad en kraters erin alsmede smeltbolletjes erop de maat beïnvloeden. Ook automatische invoer wordt zodoende vrijwel onmogelijk. Omdat de gebruikte draad bovendien niet gelijkmatig kan worden opgewikkeld en niet meer 'eindloos' is, wordt de draad na de eerste doorloop afgevoerd.

Bij machines die zijn uitgerust met een zogenaamde U/V-slede voor het uitvoeren van conische sneden is deze geïntegreerd in de bovenarm. In de constructie van jongere draadvonkmachines is deze opbouw verlaten. Bij een draadvonkmachine wordt normaal de Z-as op een hoogte ingesteld, afhankelijk van het bovenvlak van het werkstuk. Aanpassing ervan ter voorkoming van botsing is meestal mogelijk via het werkstukprogramma.

Omdat de onderarm onder het werkstuk door moet kunnen bewegen, zonder botsingsgevaar of kans op het optreden van kortsluitingen, staat het werkstuk altijd vrij (als het ware hangend opgespannen, zie figuur 3.18).



figuur 3.18 Typische C-vormige constructie bij een draadvonkmachine (zie ook figuur 1.33)

3.4 Diëlektricum

Als diëlektricum wordt overwegend demiwater gebruikt. Die dunvloeibare vonkvloeistof wordt ten opzichte van koolwaterstoffen (olie-achtige media) gekenmerkt door de relatief hoge elektrische geleidbaarheid en de hogere dunvloeibaarheid. Zowel spoeling als koeling zijn daardoor beter verzekerd. Van invloed zijn verder de hardheid van het water waarvan wordt uitgegaan, de pH-waarde en het chloride-gehalte. De spoeling van de vonkspleet gebeurt normaal coaxiaal met de draad, van boven naar onder (debiet q_0) of omgekeerd (debiet q_1), of gecombineerd. De inlaatdruk van het diëlektricum voor de spoeling is p_e . Pers- en zuigspoeling zijn mogelijk.

Langer verblijf in demiwater onder spanning levert corrosie op, die in het ergste geval het werkstuk kan beschadigen. Getracht is met behulp van toevoegmiddelen, fysiek afschermen van het werkstuk en anti-elektrolyse schakelingen (tussentijds de polariteit kort wisselen) dat nadelig verschijnsel (corrosie, pitting en uitwassen van het kobalt bindmiddel) te elimineren of minstens terug te dringen.

Draadvonken op oliebasis levert een verbeterde oppervlaktegesteldheid op ($\geq 0,05 \mu\text{m Ra}$), zij het ten koste van de pure snijnsnelheid en een complex diëlektricum-systeem. Japanse machinebouwers leveren eveneens draadvonkmachines die een koolwaterstof als diëlektricum gebruiken. De mogelijkheid om op water over te schakelen op dezelfde machine is komen te verval-

len. Wel wordt overwogen een (snel snijdende) machine op water in lijn te zetten met een oliebadmachine (voor verbeterde oppervlaktegesteldheid). Door de gelijkvormigheid van de draadelektrode is een goede spoeling te bereiken met coaxiale spoeling. Dat wil zeggen dat de spoeling alzijdig om de draad plaatsvindt, eventueel in twee stappen. De laatste jaren is de spoeldruk sterk opgevoerd; drukken tot 12 bar zijn geen uitzondering meer (vereist stabielere werkstukopspanning). Daarnaast komt axiale spoeling in combinatie met badspoeling bij hoogste precisie-eisen veel voor. Daarbij is de werkstukbak gevuld tot een niveau boven het werkstukoppervlak. Badspoeling garandeert een verhoogde precisie, ondermeer door verbeterde thermische stabiliteit, maar verbetert eveneens de snijprestaties onder moeilijke omstandigheden (dik materiaal, wisselende snijhoogtes, zeer complexe fijne contouren, conische sneden en in pakket snijden). Bij eerstgenoemde spoelmethode dient de rand van de werkstukbak alleen ter bescherming tegen spatten.

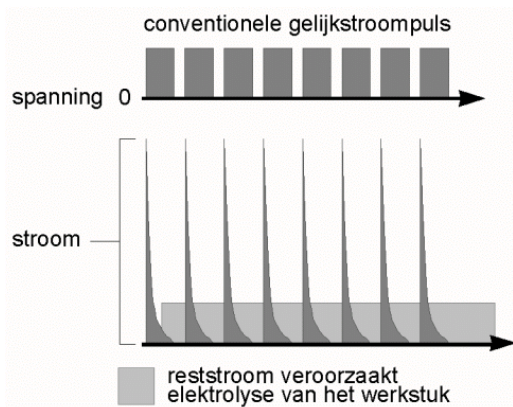
3.5 Technologie en strategie

Zoals in §1.2 is beschreven, wordt materiaal van het werkstuk verwijderd door de thermische werking van elektrische ontladingen. Deze vonkontladingen worden verkregen door het aanleggen van een elektrische spanning tussen draad- en werkstukelektrode, respectievelijk kathode en anode, waartussen zich demiwater, of een vloeibare koolwaterstof als diëlektricum bevindt.

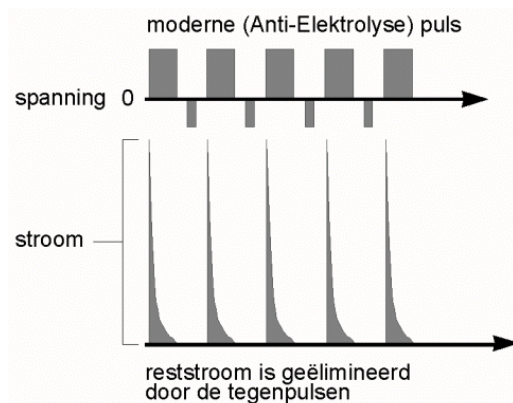
De vonkontladingen treden statistisch verspreid op over de oppervlakken van de elektroden, en wel op die plaats waar de condities voor vonkdoorslag het meest gunstig zijn. Dit leidt uiteindelijk tot het gelijkmatig eroderen van het werkstukmateriaal, mede door de relatieve verplaatsing van de draad ten opzichte van het werkstuk.

Bij draadvonkerosie speelt de elektrodeslijtage een volkomen andere rol dan bij het zinkvonken. Bij het zinkvonken wordt de elektrodeslijtage in het algemeen zo laag mogelijk gekozen. Bij draadvonken daarentegen wordt gebruikgemaakt van een continu aflopende draad als elektrode, zodat slijtage van de draadelektrode slechts een ondergeschikte rol speelt. Er kunnen derhalve generatorinstellingen worden gekozen, die gunstig zijn voor de oppervlakte-integriteit van het werkstuk en voor de snijnsnelheid. Daarom worden bij draadvonkerosie zeer kortdurende pulsen ($0,5 - 2 \mu\text{s}$) met een grote stroomamplitude (100 - 1000 A) gebruikt (figuur 3.19). Bij 'klassieke' pulsen blijft gemiddeld steeds een reststroom staan over de vonkspleet die in combinatie met de elektrische spanning het werkstukmateriaal kan aantasten. Om dat negatieve effect terug te dringen, maakt men gebruik van generatoren die geregeld een tegenpuls (van omgekeerde polariteit) geven, waardoor in de spleet een gemiddelde 'nul'-waarde wordt verkregen (zie figuur 3.20) of schermt men het werkstuk kathodisch af.

Tijdens het zinkvonken moeten, in verband met de elektrodeslijtage, langdurigere pulsen met een kleinere stroomsterkte worden toegepast (zie § 2.5.2). De gemiddelde stroomsterkte mag bij draadvonkerosie niet te groot zijn, omdat anders de draad eenvoudigweg smelt en dus breekt. Zo'n onderbreking is absoluut ongewenst tijdens het continue contoursnijden. De pauzetijd tussen twee pulsen moet derhalve relatief groot zijn, in tegenstelling tot zinkvonkerosie waar de pulsen elkaar snel kunnen opvolgen. Het proces is aanzienlijk beter voorspelbaar door eenvormigheid en het eindloze karakter van de elektrode, alsmede door het feit dat de doorlopende, open snede uitstekend bereikbaar is voor de spoeling.



figuur 3.19 Korte, 'harde' stroompulsen met relatief lange pauzetijd bij draadvonken



figuur 3.20 Pulsvorm met Anti-Elektrolyse (AE) schakeling

Aangezien de pulsduur kort is, kan de ontsteking van de pulsen moeilijk zijn. Nadat de spanning van de generator aangebracht is over de spleet, duurt het namelijk enige tijd voordat de eigenlijke doorslag optreedt. Dit tijdsverloop, ontstekungsvertraging genoemd, kan bij zinkvonken enige microseconden duren. Dat is bij draadvonkerosie met een pulsduur van 0,5 tot 2 μs niet toelaatbaar. Er kunnen drie maatregelen worden genomen om de ontsteking te vergemakkelijken:

- ▶ het aanbrengen van een hogere ontsteekspanning. Dit wordt verkregen door de keuze voor een open generatorspanning van 200 - 300 V;
- ▶ het diëlektricum meer elektrisch geleidend maken dan gebruikelijk is bij het zinkvonken. Een gangbaar geleidend diëlektricum wordt gevonden in de keuze van zuiver en niet te hard demi-water met een lage elektrische geleidbaarheid liggend tussen 1 en 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (eenheid van geleidbaarheid: S (Siemens) = $1/\text{ohm}$) en een pH-waarde (zuurgraad) tussen 7 en 8,5;
- ▶ het kiezen van een andere beklede draad, die een snellere ontsteking oplevert.

Een korte pulsduur tenslotte vereist dat de polariteit van het werkstuk positief ten opzichte van de draadelektrode dient te worden gekozen. Zoals bij het zinkvonken, kan ook bij draadvonken het zogenaamde 'bogen' optreden. Het kenmerk hiervan is het geheel afwezig zijn van de ontstekingsvertraging. Dit verschijnsel is bij draadvonken aanzienlijk minder belangrijk, vanwege het bewegen van de draadelektrode. Het kan grotendeels worden voorkomen door een betere spoeling.

Anders dan bij het zinkvonken is de elektrode (de draad) relatief korte tijd op een bepaalde positie in het

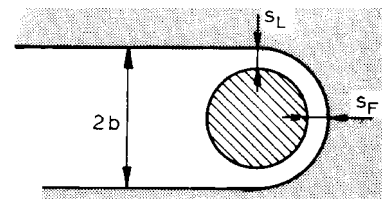
werkstuk, zodat de gevormde spleet niet 'uitgevonkt' wordt, wat wil zeggen dat de spleetbreedte principieel afhankelijk is van de afwikkelingsnelheid van een specifieke draad en de effectieve snijsnelheid bij gelijkblijvende generatorinstelling. Dit heeft consequenties voor het servosysteem. Bij kortsluiting zal, afhankelijk van de besturing, de snijbeweging stoppen, of zal over de gesneden baan terug worden gegaan.

Het besturingssysteem dient een geheugen te bezitten om de tevoren geprogrammeerde gegevens bij dergelijke ongewenste situaties vast te houden, ook als bijvoorbeeld draadbreek optreedt. In beide gevallen zal de generator stoppen teneinde 'dubbel' bewerken van de spleet te voorkomen. Onder dergelijke omstandigheden wordt de besturing tijdelijk beïnvloed door het servosysteem.

Voor optimale technologie, hetzij gericht op hoogste snijsnelheid, hetzij op maximale precisie of beste oppervlaktegesteldheid, bij een bepaalde materiaalsoort en werkstukhoogte, helpt een proefsnede om de reële snijcondities te bepalen, indien die niet in de bijgeleverde technologie aanwezig is.

Vonkspleet

De vonkspleet tussen draadelektrode en werkstuk is de zone waarin de vonkontladingen plaatsvinden. Men onderscheidt in dit verband de frontale spleet s_F , gemeten in de voedingsrichting, en de zijnspleet (laterale spleet) s_L , gemeten loodrecht op de voedingsrichting. Het geheel resulteert in een gesneden baan met een snijbreedte van $2b$ (zie figuur 3.21).



figuur 3.21 Frontale spleet s_F , zijnspleet s_L en snijbreedte $2b$ bij draadvonken

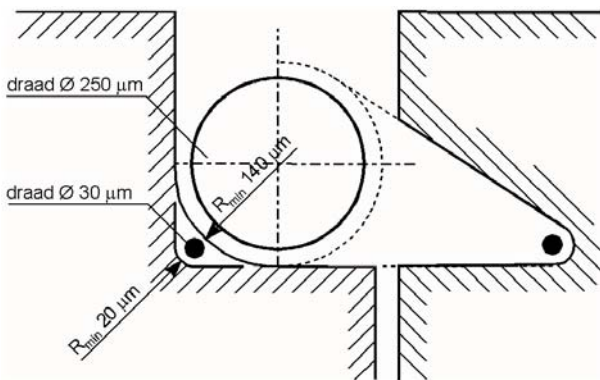
Gesneden wordt normalerwijs met meer dan één snede, waarbij de eerste bedoeld is om snel, maar verhoudingsgewijs grof de contour open te snijden, terwijl de komende verfijnder ingestelde snijcycli het werkstuk naar vorm, maat en oppervlakteruwheid afwerken.

Met een dikkere draad (voor maximale snijsnelheid) is het nasnijden niet optimaal uit te voeren gelet op maat en vormnauwkeurigheid. Daarvoor dient de nasnede met een kleine draaddiameter, dus ook kleine afrondingsradius in het werkstuk, te gebeuren. De tijd en de moeite die draadwisselen vraagt, houdt deze werkwijze op normale draadvonkers tegen. Een slimme Europese vinding die het toelaat op een machine met twee draadsystemen automatisch, of een dunne en een dikke identieke draad door elkaar te gebruiken, of een gecoate en een ongecoate, biedt hier een praktisch bruikbare oplossing (figuren 3.9 en 3.22). Voorsnijden start met het invoeren van een relatief dikke draad, die hoge snelheden mogelijk maakt, terwijl de na het knippen van de grotere draadelektrode ingevoerde dunne draad restmateriaal in de hoeken verwijderd en de gewenste finishruwheid realiseert (figuur 3.23).

Wordt nominaal geprogrammeerd, dan dient de midelpuntsbaan van de draadelektrode een equidistante verplaatsing te krijgen ten opzichte van de uiteindelijk gewenste contour. Deze waarde wordt baancorrectie of offset b_n genoemd (figuur 3.24).



figuur 3.22 Precisie draadvonkmachine met dubbele draadloop voor klein werkbereik



figuur 3.23 Effect op binnenradius door overgang op kleinste draad (links) en detaillering (rechts)

Bij het bewerken in meerdere stappen maakt men een onderscheid tussen de voorberekingsbaancorrectie b_n (n = aantal bewerkingstappen) en de eindbewerkingbaancorrectie b_1 .

De voorberekingsbaancorrectie is te berekenen uit de formule: $b_n = r_E + s_{L_n} + R_{\max,n} + Z_n$

r_E = radius van de draadelektrode.

s_{L_n} = zijspleet van de n -de voorberekingsstap

$R_{\max,n}$ = grootste oppervlakteruwheid in de zijspleet van de n -de voorberekingsstap

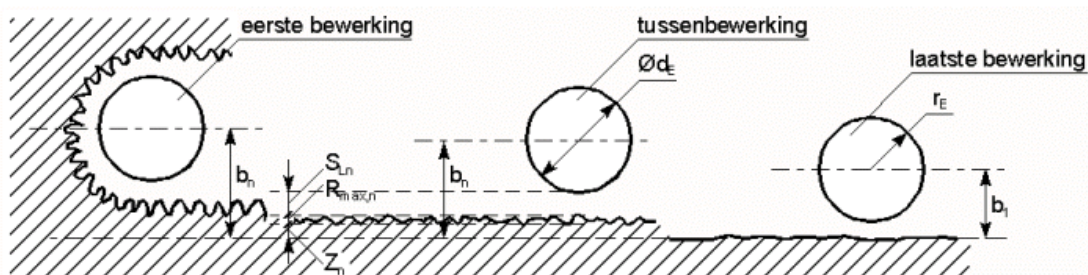
Z_n = bewerkingstoegift (in zijdelingse richting)

De bewerkingstoegift Z_n hangt onder andere af van de dikte van de thermisch beïnvloede zone van het geërodeerde oppervlak en de profielfouten ten gevolge van draaddoorbuiging, de thermische instabiliteit en de machine-onnauwkeurigheid.

Voor de thermisch beïnvloede zone moet men rekenen met minstens: $1/2 R_{\max,n}$

De baancorrectie b_1 is te berekenen met de formule:

$$b_1 = r_E + s_{L_1}$$



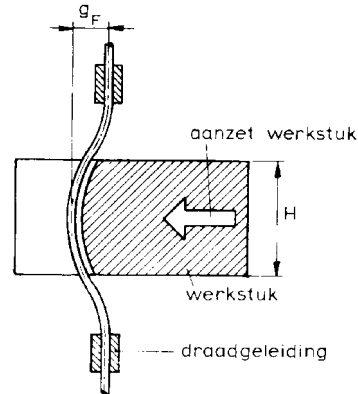
figuur 3.24 Schematische voorstelling van de grootheden die de baancorrectie b_n bepalen

s_{L_1} = zijspleet van de eindbewerkingstap

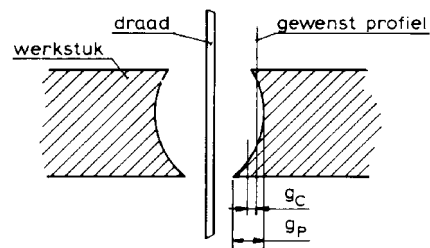
De frontale profielfout g_F is de maximale afwijking van de werkelijke positie van de draad ten opzichte van de gewenste positie gemeten in de snijrichting, zoals voorgesteld in figuur 3.25.

De parallelliteitsfout g_P is de afstand (gemeten loodrecht op de snijrichting) tussen de twee uiterste raaklijnen aan het gevonkte profiel die parallel zijn met de draad (figuur 3.26).

De lokale contourfout g_C is de afstand, gemeten loodrecht op de draad en loodrecht op de snijrichting, tussen het gewenste profiel en een rechte evenwijdig ermee door een punt van het werkelijke profiel (zie figuur 3.25). Meestal is de maximale g_C bepalend.



figuur 3.25 Schematische voorstelling van de profielfout, frontaal in de vonkspellet, ten gevolge van de krachtwerking op de draad



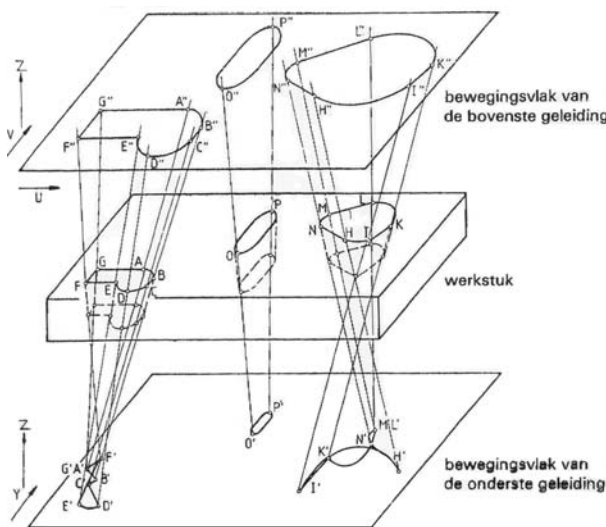
figuur 3.26 Parallelliteitsfout g_P en contourfout g_C

3.6 Conisch snijden

Vooral tijdens het snijden met tot 30° enkelzijdig schuingestelde draad doen zich omstandigheden voor, die strijdige eisen stellen aan de draadelektrode. Zelfs bij grotere afwijkingen uit de verticale stand (bijv. voor 30° ES bij 100 mm hoogte) moet de draad onder de ingestelde trekkracht in alle voorkomende geprogrammeerde standen een nauwkeurig bekende positie behouden. De dunne elektrode mag daarbij niet plastisch vervormen, d.w.z. permanent een andere vorm of lengte aannemen, maar moet binnen het elastische bereik blijven. Van de ene kant is een hoge treksterkte gewenst voor het in de hand houden van strakke

maat- en vormtoleranties. Echter een sterke draad laat zich door hoge buigstijfheid minder makkelijk uit de richting brengen. Daarom vinden zachtere, samengestelde of, rond een dunne, maar voldoende sterke kern met een gecoate mantel opgebouwde draden (zacht messing, zink gecoate messing of diffusie (zacht)gegloeid messing), met hoge rek en minder terugvering, toepassing bij het snijden van de tot 30° schuine vlakken. Bij voorkeur past men gesloten, spelingsvrije draadgeleidingen toe met zo groot mogelijke radii aan de in- en uitloop. De mogelijkheid tot automatisch invoeren wordt met ductielere draad sterk gereduceerd.

Om de gewenste schuinstelling van de draadelektrode te handhaven, vergt conisch snijden het nodige van het regelsysteem. Ter illustratie is in figuur 3.27 weergegeven de corresponderende CNC beweging van de bovenste en onderste draadgeleiding, nodig om de getekende contour dwars door het werkstuk te realiseren, in combinatie met vonktechnologie, -strategie, spoeling en draadtoevoer.



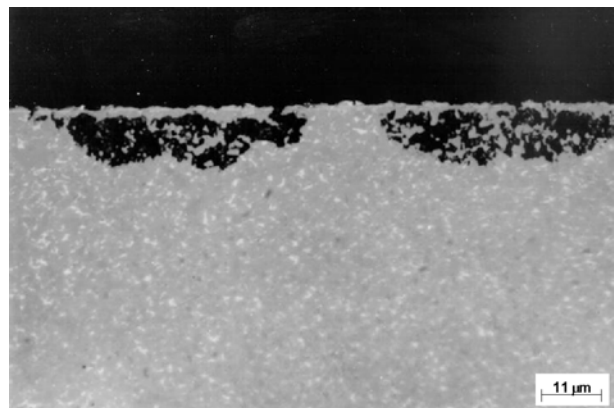
figuur 3.27 De draadbewegingen d.m.v. de onderste en bovenste draadgeleiding bij het vervaardigen van de getekende contour in het werkstuk

3.7 Microdraadvonken

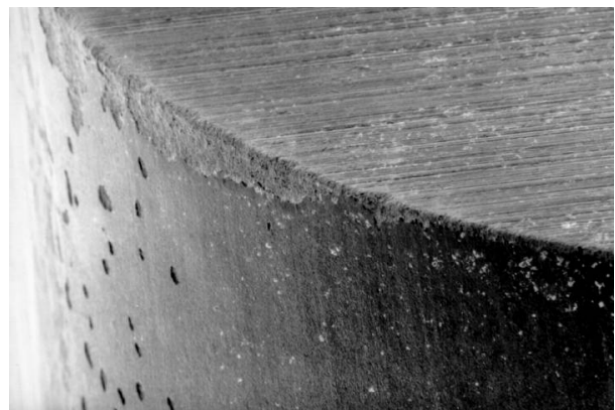
Bij microdraadvonken dient onderscheid te worden gemaakt tussen aan de ene kant kleine tot extreem kleine werkstukken met kleine radii, waar oppervlakte, geometrische en nauwkeurigheidseisen een hoofdrol spelen, en aan de andere kant soortgelijke onderdelen, waar dat niet wordt gevraagd. In het laatste geval kan een normaal in de markt aanwezige machine worden ingezet, terwijl in het andere geval er een absoluut hoognauwkeurige machine noodzakelijk is. Daar waar hoge oppervlakte-integriteit en ruwheden $< 0,1 \mu\text{m}$ R_a een eis zijn, worden machines toegepast welke qua beweging, thermische stabiliteit en generatormogelijkheden binnen $1 \mu\text{m}$ stabiel kunnen werken. Het gebruik van geavanceerde processturing en glasvezelverbindingen zorgen voor het optimaal en snel meten en regelen van onder meer vonkspleet, pulsgrootheden en de hoofdfrequentie microvonkontstekingen. Indien een juiste machinekeuze is gemaakt, kan verantwoord over microvonken worden gesproken. In geval van draadvonken worden draden met diameters $\leq 50 \mu\text{m}$ met hoge treksterkten ingezet om delen met kleine radii en/of afmetingen te vervaardigen. Daar waar andere bewerkingstechnieken hun beperkingen hebben ten aanzien van afwijkende profielvormen, kan vonken traditioneel weer economisch worden ingezet, zowel voor enkele stuks als, door inzetten van spansystemen, geautomatiseerd in grotere series.

3.8 Draadvonken van hardmetaal en exoten

Door de afwijkende metallurgische structuur kunnen gemakkelijk problemen ontstaan bij draadvonken van hardmetaal (HM). HM is een veel toegepast, zeer hard, slijtvast maar bros en oxidatiegevoelig sintermateriaal, opgebouwd uit een matrix van fijne korrels metaalcarbide, meestal wolframcarbide (WC), dat door het bindmiddel kobalt (Co) bij elkaar wordt gehouden. In de praktijk van het draadvonken ontstaat in het vochtige en spanningvoerende milieu na langdurig onderdompeling in demiwater kans op uiteenlopende aantastingen door de geringe elektrochemische resistentie, zoals onder andere in de vorm van corrosie in het algemeen, onderhuids corrosie (figuur 3.28) op de snijkanten, pitting op het bovensvlak (figuur 3.29) en uitwassen van de cobaltbinder onder het gesneden oppervlak.



figuur 3.28 Onderhuidse corrosie bij hardmetaal



figuur 3.29 Optredende vormen van hardmetaalaantasting (pitting = zichtbare putjes in oppervlak)

Zonder bijzondere voorzieningen te treffen wordt door de resulterende haarscheurtjes en losliggende korrels de kwaliteit en daarmee rechtstreeks de standtijd van gevonkt gereedschap (snij- en stansstempels, extrusie- en sintermatrijzen) negatief beïnvloed. Houdt men zich aan een aantal praktische adviezen, dan zijn goede soorten hardmetaal toch tevredenstellend te vonken (zie ook § 1.3). Aan te bevelen is te allen tijde een HM-werkstuk zo kort mogelijk bloot te stellen aan de combinatie van demiwater, elektrische spanning en lucht (vooral zuurstof). Op zich is het altijd aan te bevelen met zuiver demiwater te werken bij het draadvonkproces. Dat voorkomt eveneens roestvorming op overige machinedelen en gereedschap, uitgaande onder meer van vervuiling van de opspanning, het werkstuk, de geleidingen, enz.

Vooral echter bij hardmetaal is conditionering van de gehele draadvonkketen een must (schone en gedurende de hele bewerkingscyclus bedrijfszekere machine, filters en harspatronen op volle capaciteit, demiwater op kamertemperatuur, zuiver (bij geregeld draadvonken van HM minstens elke drie maanden vervangen) en vrij van vet, chloriden, reinigingsmiddelen of andere chemicaliën, pH-waarde neutraal tussen 7-8,5, lage hardheid (16 DH - 29FH), geleidingswaarde $\leq 5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Nog een aantal aanbevelingen:

- Plan een minimale verblijftijd in onder het wateroppervlak, hoe korter ondergedompeld in de werkstuktank, des te minder kans op vervelende bijverschijnselen.
- Ga uit van geselecteerd en zo corrosievast mogelijk hardmetaal (zonder porositeit, insluitels of vrije koolstof en zonder Eta-fase) van een vertrouwde fabrikant/leverancier, dat tevoren gedemagnetiseerd is.
- Neem niet te grote afmetingen om de verblijftijd kort te houden. Niet markeren met viltstiften aangezien het oplosmiddel erin de binder aantast. Vlakken waarop opgespannen wordt plus uitgericht en gepositioneerd dienen droog, schoon en niet geoxideerd te zijn. Bij voorkeur startgaten boren onder gecontroleerde, minimaal belastende omstandigheden, niet er in 'branden'.
- Pas de voorgeschreven technologie toe (voor- en nasneden zonder pauzes in te lassen) en gebruik voldoende nasneden om verfijnd de HAZ-laag te verwijderen.
- Zet de eventueel aanwezige Anti-Elektrolyse (AE) module (periodiek ompolen levert gemiddelde spanning op nulniveau) of het kathodische beschermingscircuit in. Spoel niet te krachtig en vul de werkstuk-tank rustig, zodat geen overtollige zuurstof in het diëlektricum wordt ingebracht. Direct na het programma-einde het werkstuk uitnemen, afspoelen met water, grondig drogen (bijvoorbeeld 1 uur op 100°C in een oven) en eventueel verpakken in vochtwerend materiaal.

Om het probleem van corrosie gedurende het draadvonken te voorkomen, zijn daartoe de laatste jaren speciale hardmetalen ontwikkeld. Deze hardmetalen met een chroomtoevoeging (zoals ook toegepast in roestvast staal), verminderen de corrosiegevoeligheid. Dergelijke hardmetalen werkstukken mogen langer (tot 24 uur) in de vonkerosiebak verblijven zonder dat daarbij aantasting door corrosie optreedt. Toch blijft het aangeraden om steeds met bovenstaande technologische maatregelen ter voorkoming van oppervlaktebeschadiging rekening te houden.

Om te voldoen aan de verschillende noden in de werktuigbouw zijn verschillende hardmetaalsamenstellingen beschikbaar. De samenstelling en de structuur (bijv. korrelgrootte) heeft een invloed op de vonkbaarheid en de uiteindelijke mechanische eigenschappen. Fijnkorrelige hardmetalen, ontwikkeld om een grotere hardheid en sterkte te verkrijgen, geven een grotere materiaalafname bij het vonken. Bij deze materialen is de vermindering van de buigsterkte van een gevonkt materiaal (t.o.v. het slijpen) echter groter [ref.8].

De grotere materiaalafname van deze fijnkorrelige materialen is te wijten aan de kleinere thermische geleidbaarheid van het materiaal. Deze thermische geleidbaarheid stijgt eveneens met een hoger Co-gehalte, wat eveneens resulteert in een lagere materiaalafname.

3.9 Werkvoorbereiding en set-up

Het draadvonken is als het ware het verfijnd uitsnijden (figuurzagen) van werkstukken door middel van

een strak gespannen draad met vonkerosie als 'ver-spanings'techniek.

Vele machines hebben niet alleen mogelijkheden voor 2D-vormen, maar ook voor meer gecompliceerde werkstukken, zolang de (verticaal open) doorlopende contour op te bouwen is uit rechte lijnstukken. Dit wordt onder andere haalbaar gemaakt door de onafhankelijk te besturen X-Y en U-V assen.

Speciale draadsoorten samen met de nieuw ontwikkelde vonkgeneratoren laten steeds hogere snijnsnelheden en/of lagere oppervlakteruwheden toe.

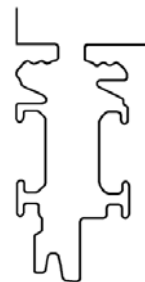
In dit hoofdstuk komt een aantal aspecten aan de orde met betrekking tot:

- het ontwerpen van te draadvonken onderdelen;
- de werkvoorbereiding en het bewerken;
- profielfouten;
- technologie.

3.9.1 Ontwerpen

De eerste voorbereidingen voor het draadvonken beginnen al bij het ontwerp. Zoals in hoofdstuk 1 vermeld, kunnen alleen elektrisch geleidende materialen worden gevonkt (soortelijke weerstand $< 100 \Omega\text{cm}$). Vaak voorkomende werkstukmaterialen zijn gereedschapsstaal (gehard of ongehard), hardmetaal, aluminium, koper, grafiet, messing, wolframkoper, bepaalde composietmaterialen, keramieken en polykristallijne diamant. Bij voorkeur dient uit te worden gegaan van spanningsvrij of -arm materiaal.

Omdat er bij draadvonken een dunne draad (25 - 350 μm) als gereedschapselektrode wordt gebruikt, hoeft vrijwel geen rekening te worden gehouden met de toegankelijkheid en de afmetingen van het gebruikte gereedschap. Afmetingen van het werkstuk en de te snijden contour zijn in principe afhankelijk van het werkbereik van de draadvonkmachine. Als haalbare maat en vormnauwkeurigheid geldt 5-10 μm met een oppervlaktegesteldheid tot 0,2 $\mu\text{m Ra}$, of zoals vermeldt in de machinespecificatie. Wel moet men er aandacht aan besteden dat er steeds een kleine afronding in de binnenhoeken ontstaat (namelijk b, de halve snijbreedte; minimale radius $> 0,1 \text{ mm}$ verdient aanbeveling, kleiner is duurder). Een scherpe binnenhoek is alleen te verkrijgen door 'verticaal delen'. Door de betere toegankelijkheid is het mogelijk, anders dan in het verleden toen verschillende afzonderlijke profielen achter elkaar werden gebruikt, deze nu samen te voegen tot één profiel van complexe vorm (zie figuur 3.30).



figuur 3.30 Snijpad van het contour van een uitwendig te snijden complex profiel

Tabellen 3.5 en 3.6 geven een overzicht van het verschil in het aantal onderdelen van de stempel en de respectievelijke aanmaaktijden (zie figuur 3.31). De montage- en reparatietijden van dergelijke gedraadvonkte stempels zullen over het algemeen lager liggen dan bij conventioneel aangemaakte stempels.

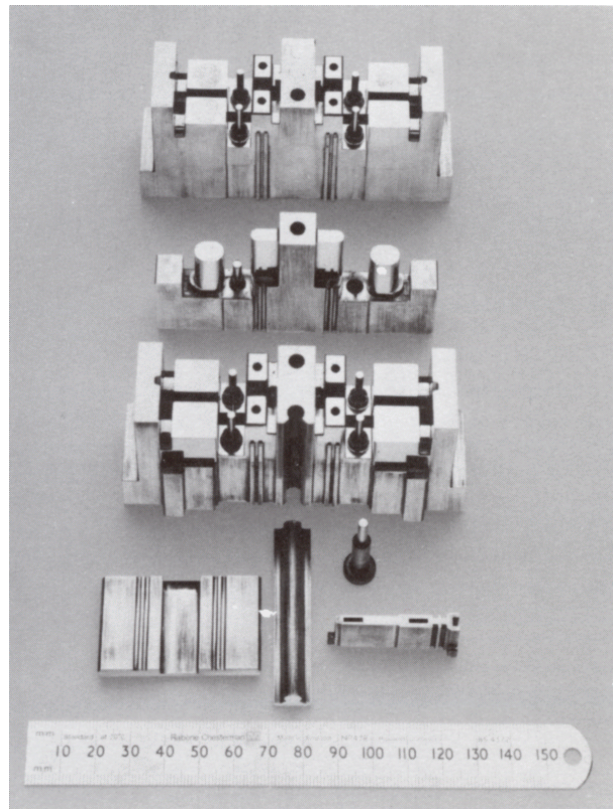
In veel gevallen is het tekenen van te draadvonken onderdelen eenvoudiger, omdat de contour slechts eenmaal bemaat hoeft te worden, waarna de aanduidingen van de snijspelen en de passingen per onderdeel worden aangegeven.

tabel 3.5 Overzicht aantal onderdelen bij conventioneel bewerken en bij draadvonken

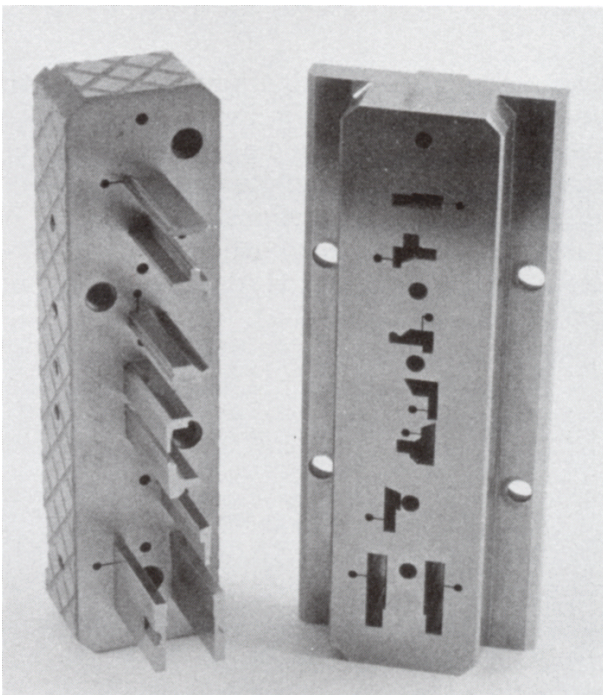
	gedeeld geslepen	gedraad-vonkt
snijders	10	8
stempelplaat	11	1
houder voor stempelplaat	4	1
leidingplaat	16	1
snijplaat	16	2 + 3
snijplaathouder	3	1
snijplaat-opvulplaat	5	2
totaal aantal delen	65	19

tabel 3.6 Overzicht van bewerkingstijd bij conventioneel bewerken en bij draadvonken

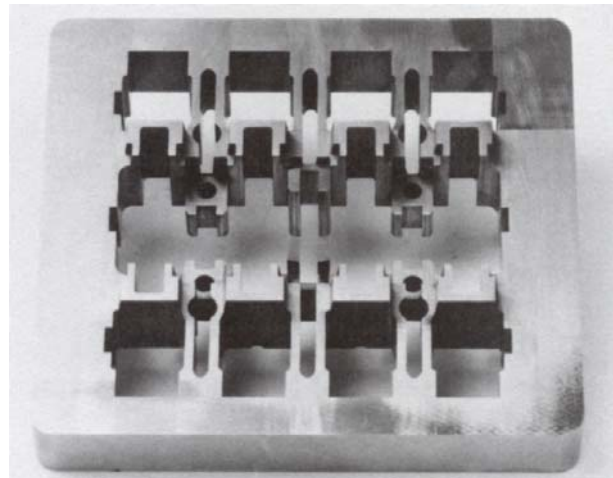
	ongedeeld geslepen stempel	gedraad-vonkte stempel
frezen en bankwerken	250	130
co-boren; co-slijpen	25	15
slijpen	500	200
zinkvonken	75	25
draadvonken	-	140
diversen	40	40
montage samenbouwen	100	70
uitproberen-conditioneren	60	60
totaal aantal uren	1050	680



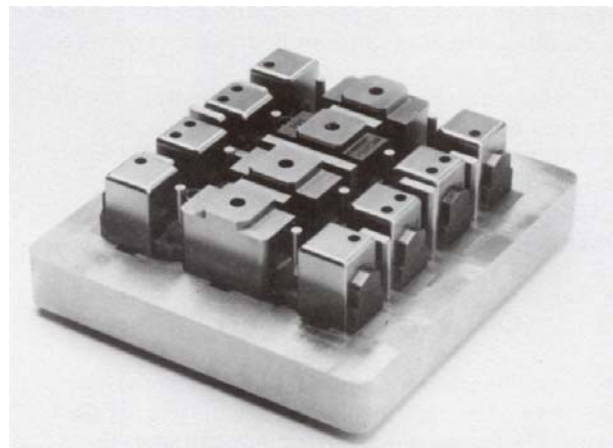
figuur 3.32 Inzetstukken voor spuitgietmatrijs



figuur 3.31 Voorbeeld van een stempel die gedraad-vonkt is



figuur 3.33 Matrijsplaat met holtes voor de inzetstukken



figuur 3.34 Matrijsplaat met inzetstukken

Bij het ontwerpen van spuitgietmatrijzen kan aan draadvonken worden gedacht. De spuitgietholte is op te splitsen in een doorlopende profielholte en een inzetstuk dat eventueel met hetzelfde programma kan worden gevonkt. Het toepassen van een inzetstuk zorgt in de praktijk bovendien meestal voor een betere ontluchting. Ook verticaal opdelen komt voor (zie figuren 3.32, 3.33 en 3.34).

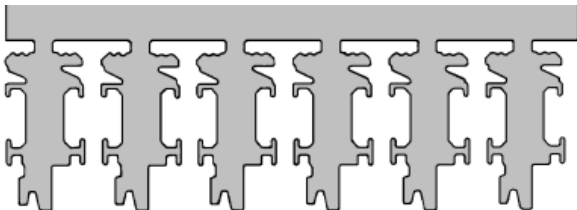
Voor het vervaardigen van plaatvormige prototypes is draadvonkerosie uiterst geschikt. Kleine series zijn eenvoudig te snijden door het materiaal te pakketten en/of meerdere producten naast elkaar uit te snijden. Op die manier hoeft er niet eerst een proefstempel te worden gemaakt. Zo'n proefstempel heeft het nadeel, dat deze niet zo gemakkelijk is te veranderen, indien het product nog eens wordt gewijzigd. Bij draadvonken wordt alleen het programma aangepast, indien weer andere prototypes moeten worden gesneden. Dit komt de doorlooptijd ten goede, wat bij een nieuw ontwerp van groot belang kan zijn.

Bij het vervaardigen van mallen, sjablonen en zinkvonkelektroden kan met behulp van draadvonken op eenvoudige wijze de benodigde vergroting of correctie worden verkregen (zie figuur 3.24).

3.9.2 Programmeren

Aan programmeren is in § 1.6.4 al aandacht besteed. Vanuit het standpunt van de werkvoorbereiding moet speciaal worden gelet op een aantal punten, die hierna worden opgesomd:

- Het programmeren kan meestal aan de machine zelf gebeuren of via een losstaande programmeer-eenheid. Het is dikwijls mogelijk een reeks stukken zo te programmeren, dat ze in een eerste fase, op het uitvallen na, worden afgewerkt en in een volgende fase met één snede losgesneden (zie figuur 3.35). Deze werkwijze heeft als voordeel dat de bediener de uitvalstukken allemaal terzelfder tijd kan klemmen. Bovendien kan op die manier een reeks kleine opdrachten worden gecombineerd, die bijvoorbeeld 's nachts kan worden uitgevoerd.



figuur 3.35 Voorbeeld van het samenvoegen van meerdere gelijke profielen tot één bewerkingsprofiel

- Zoals bij het ontwerp moet er ook bij het programmeren op worden gelet, dat het werkbereik van de machine niet wordt overschreden.
- Het is in de meeste gevallen mogelijk de machine-instelparameters te selecteren of te wijzigen vanuit het programma. Dit vereenvoudigt de eigenlijke bewerking in hoge mate.
- Voldoende aandacht moet worden besteed aan het programmeren van 'stops' om uitvalstukken te klemmen, en eventueel ook voor controle (zie ook § 3.9.6).
- De plaats van het startgat wordt bepaald door de beschikbare ruimte, de plaats van het zogenaamde 'litteken' en een eventuele geprogrammeerde 'stop'. Het startgat mag niet te groot worden gekozen en de afstand tot de contour niet te klein: het zou de spoeling bij de aanvang van het snijden kunnen verstoren.

3.9.3 Bewerkingsvolgorde

In vele gevallen kan draadvonken een hele combinatie van klassieke bewerkingstechnieken vervangen, waardoor bewerkingstijden en neventijden sterk worden gereduceerd. Bovendien kan het harden vooraf gebeuren. Vonkerosief bewerken is immers een elektrothermisch procédé, waarbij het werkstukmateriaal wordt gesmolten en de mechanische eigenschappen van het werkstuk, zoals de hardheid, vrijwel geen rol spelen. Het verwijderen van eventuele residuele spanningen

kan door middel van een aantal sneden vooraf gebeuren. Een aantal aspecten in verband met het aanbrengen van startgaten, opspanning, stops, warmtebehandeling en nabehandelingen worden in volgende paragrafen meer in detail behandeld. Afhankelijk van de vereiste precisie en oppervlaktegesteldheid, wordt het stuk in één keer afgewerkt, of wordt het zogenaamde voorsnijden gevolgd door één of meerdere keren nasnijden (zie § 3.3 en 3.5).

3.9.4 Aspecten rond startgat

Een draadvonkbewerking wordt bij voorkeur gestart vanuit een in het plaatvormige uitgangsmateriaal aangebracht startgat, ook al is dit fysisch niet noodzakelijk. Het opstarten van binnenuit het werkstukmateriaal kan, naar in de praktijk is gebleken, vervormingen van het werkstuk ten gevolge van restspanningen voorkomen. Afhankelijk van de grootte van de startboring (0,5 - 5 mm) kiest men de meest geschikte methode om het startgat te maken.

Waar mogelijk is dit een klassieke booroperatie; voor harde materialen (bijvoorbeeld hardmetaal) kan het startgat worden gevinkt op een zinkvonkmachine of op een draadvonkmachine wanneer een module voor het boren van startgaten beschikbaar is.

Tegenwoordig zijn speciale stand-alone vonkboormachines van zeer grote afmetingen en 4 tot 6-assig van uitvoering beschikbaar (zie figuur 3.36), die ongeëvenaard snel startgaten fabriceren (zie § 2.10.1), die voldoen aan de algemeen gestelde eisen (ononderbroken, redelijke tolerantie (maat, vorm, positie), 'open' gat).



figuur 3.36 CNC-vonkboormachine met bestuurd zwenkkop voor boven modale werkstukken

Typische kenmerken daarvan zijn:

- buisvormige elektrode (standaard in de handel);
- roterende vonkkop;
- hogedruk inwendige spoeling;
- speciale vonkgenerator met krachtige puls (hoge pulsenergie);
- onderdrukte servowerking.

In de praktijk hebben de volgende aanbevelingen zich bewezen:

- qua positie:
 - bij voorkeur op de centerlijn;

- minimaal 4 mm vanaf de te snijden contour bij voorkeur zo dat in de aanloop naar de werkstuk-vorm gelijke snijcondities voorkomen als daarna op de te snijden baan;
- daar waar het litteken geen bezwaar oplevert (een litteken is te vermijden of te minimaliseren door een radius te programmeren bij het verlaten van de te snijden contour of aan te lopen op een inwendige hoek);
- voorkom dat door de positie van het startgat bij het snijden meerdere uitvalstukken vrijkomen;
- identieke positie in snijder en snijplaat;
- bij voorkeur naast een rechte geometrie.
- qua conditie:
 - loodrecht op het bovenzvlak;
 - zuiver, vet- en oxidevrij en braamloos;
 - cilindrisch of na kleine rechte fase terugliggend, zeker als de draadtoevoer automatisch gebeurt of het gat als referentie wordt gebruikt.
- qua diameter:
 - groot genoeg om de draad door te voeren.

Aangezien het startgat door machines met meetcycli vaak wordt gebruikt om uit te richten, dient in dat geval extra op de kwaliteit van de boring te worden gelet.

3.9.5 *Opspannen en uitrichten*

Uit de aard van de draadvonkbewerking volgt dat het werkstuk steeds van onder en van boven bereikbaar moet zijn met de draadgeleidingen/spoelkoppen. Daardoor ligt het te vonken werkstuk voor het grootste gedeelte vrij boven de opspan tafel. Bij plaatvormige werkstukken met normale afmetingen levert dit meestal geen probleem op, omdat deze eenvoudig met een aantal blokken en spanklemmen kunnen worden opgespannen. Bij kleine werkstukken of stukken die niet plaat- of blokvormig zijn, kan het opspannen moeilijkheden opleveren.

Opspannen en uitrichten op de machine betekenen neventijden; er vindt dan geen bewerking plaats. Uitrichten gebeurt meestal aan één of twee van tevoren aangebrachte referentievlakken of pasgaten. Speciale uitrichtcycli maken het nauwkeurig bepalen van stand en positie van het werkstuk op de draadvonkmachine met de draad mogelijk.

Om het opspannen te vereenvoudigen zijn er allerlei opspan- en uitrichtsystemen op de markt gebracht. Men gaat in vele gevallen uit van systemen die zowel op de machine als op een voorinstelplaats kunnen worden gemonteerd. Na bevestiging en uitrichten van het werkstuk op de voorinstelplaats, kan het geheel met grote nauwkeurigheid op de machine worden overgeplaatst. Hierbij is een repetitienauwkeurigheid te behalen van circa 0,005 mm. Op deze wijze kan men een werkstuk op de machine afwerken, terwijl een ander stuk op de voorinstelplaats wordt uitgericht. Hierdoor worden de neventijden op de draadvonkmachine sterk gereduceerd en wordt dus het machinerendement verhoogd. Dergelijke nauwkeurige systemen vergen meestal wel een behoorlijke investering. Voor nog betere eindprecisie richt men na met de draadelektrode.

Naast het opspannen en uitlijnen van het werkstuk, moet ook de nodige aandacht worden besteed aan het elektrisch aan de 'massa' leggen van het werkstuk. Hiervoor volgt men de aanwijzingen van de fabrikant op. Bovendien moet de opstelling van het werkstuk zo zijn, dat de afstand tussen de draadgeleidingen en het werkstuk zo klein mogelijk is, om een goede spoeling en minimale draadtrillingen te verzekeren. Alvorens de bewerking te starten, kan men het beste de opstelling nog eens op botsingsgevaar controleren.

3.9.6 *'Stops' en uitvalstukken*

Het wordt ten eerste aangeraden de uitgesneden delen niet zonder meer los te laten komen, omdat dit op het werkstuk sporen achterlaat (kan een zogenaamd 'litteken' of andere beschadiging geven), het werkstuk kan verschuiven en beschadiging van machineonderdelen veroorzaken. Bovendien kan het uitvalstuk de draad klemmen, waardoor deze kan breken of waardoor kortsluiting kan ontstaan. Over het algemeen wordt de bewerking tot circa 5 mm (afhankelijk van het gewicht van het uitvalstuk) voor het loskomen van het uitgesneden deel, met een geprogrammeerde stop onderbroken. Bij grotere delen kunnen meerdere stops noodzakelijk zijn, om vervormingen te vermijden, hetgeen dan weer meerdere startgaten noodzakelijk maakt. Na een stop wordt het uitvalstuk gefixeerd. Voor kleine delen kunnen permanent-magneten, plastic klemmen, onderlegplaatjes voorzien van snelhardende lijm, kleefband, enz. worden gebruikt. Voor zwaardere delen gebruikt men onderlegblokken en/of klemmen. Het 'litteken' kan worden verminderd, door vanaf het stoppunt een gepaste baan te programmeren. Om op het einde van de bewerking nog een goed elektrisch contact met het wegvallende deel te verzekeren, zal men op bepaalde plaatsen de vonkspleet gedeeltelijk op moeten vullen met draad of geleidende folie.

Indien na de stop pas na enige tijd wordt verder gevonkt, kan er een markering ontstaan ten gevolge van de veranderde toestand van het diëlektricum en de eventueel veranderde temperatuur.

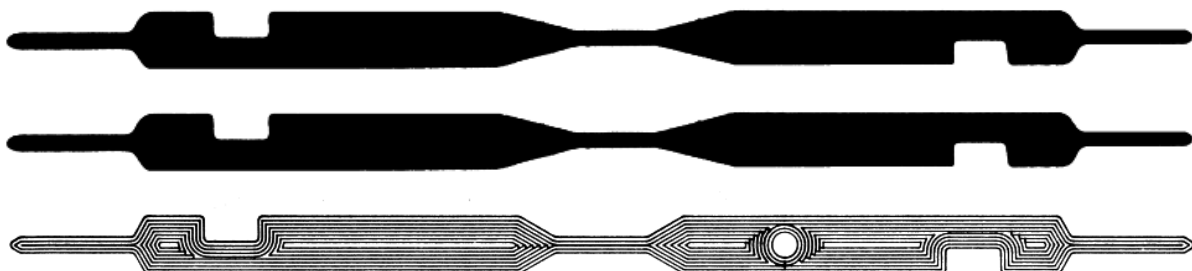
Bij kleine uitvalstukken kan het interessant zijn 'uitvalvrij' te vonken, dat wil zeggen dat het gedeelte dat normaal uitvalstuk zou zijn, volledig wordt weggevonkt (zie figuur 3.37). De benodigde extra vonktijd wordt dikwijls gecompenseerd door het voordeel langere tijd continu te kunnen doorwerken zonder toezicht.

3.9.7 *Voor- en nabehandelen*

Voorbehandelen

Wordt de voorbehandeling op de juiste wijze uitgevoerd, dan mag worden verwacht dat de eventueel benodigde nabehandeling minder problemen op zal leveren.

Voor elk werkstuk dienen referentiepunten te worden aangebracht. Het aanbrengen (bijvoorbeeld door middel van slijpen) is afhankelijk van de gebruikte opspanmiddelen.



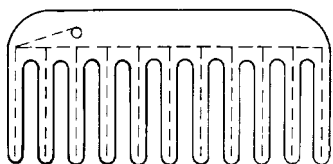
figuur 3.37 Twee gedraadvonkte profielholten die uitvalvrij zijn gevonkt met daaronder de bijbehorende gereedschapsbaan

Verder zal het werkstuk zorgvuldig gereinigd en ontvet moeten worden. Vóór het plaatsen van het uitgangsmateriaal dienen de opspanmiddelen goed te worden schoongemaakt en de spanvlakken te worden gecontroleerd op hinderlijke beschadigingen en/of ongewenste verplaatsingen. De mogelijk op het werkstukmateriaal aanwezige oxidelaag, ook de walshuid, zal van tevoren moeten worden verwijderd door middel van slijpen, schuren of stralen.

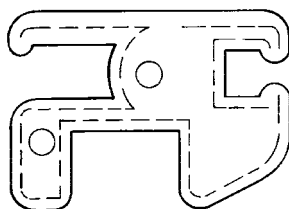
Losse deeltjes en bramen mogen niet voorkomen, zeker niet in het startgat. Waar nodig dient men het materiaal voor het snijden te demagnetiseren.

Wanneer door inwendige spanningen moeilijkheden te verwachten zijn, dan verdient het aanbeveling een voorbewerkingssnede aan te brengen, eventueel vóór het harden, om te voorkomen dat het materiaal tijdens de bewerking teveel vervormt. Inwendige spanningen zijn te verwachten bij onder meer gewalste materialen, na warmtebehandelingen, bij het wegsnijden van relatief grote volumes en bij lange slanke contouren (zie figuren 3.38 en 3.39).

Moeten relatief grote volumes worden verwijderd, dan is het mogelijk voorafgaand aan de uiteindelijke bewerking, reeds grote stukken te verwijderen door bijvoorbeeld boren, frezen, zagen of draadvonken.



figuur 3.38 Gedraadvonkte voorbewerkingssnede bij lange slanke contouren om inwendige spanningen vrij te maken



figuur 3.39 Gedraadvonkte voorbewerkingssnede met parallelle baancorrectie van max. 2 mm

Nabehandelen

Evenals dit het geval is bij voorbehandelen kunnen, al naar gelang de gestelde eisen en de toekomstige toepassing van het gedraadvonkte werkstuk, nabehandelingen noodzakelijk zijn.

Deze zijn te splitsen in acties ten behoeve van ontroesten, schoonmaken in het algemeen en ter verbetering van de werkstukruwheid.

Een juiste keuze van parameters voor bijvoorbeeld voor- en eventueel herhaald nasnijden geeft in vele gevallen een zodanige acceptabele oppervlaktegesteldheid, dat daardoor nabewerking wordt voorkomen. In het algemeen verdient het aanbeveling een werkstuk een zo kort mogelijke tijd opgespannen te laten zitten op de draadvonkmachine.

Ontroesten kan op een aantal manieren worden uitgevoerd:

- Langs chemische weg, zoals voorgeschreven kan zijn door de fabrikant in het handboek van de machine, bijvoorbeeld beitsen met een 10% fosforzuuroplossing om aanslag te verwijderen. Denk hierbij ook aan de veiligheid.
- Door het in de praktijk meer toegepaste glasparelstralen. Het basismateriaal van het werkstuk wordt bij juist gebruik nauwelijks aangetast. Glasparels met

een diameter tussen 40 en 60 μm hebben de voorkeur, of voor het iets grovere werk 80 tot 120 μm ; straaldruk circa 200 kPa (2 atm.); straaltijd circa 2 - 4 s/cm²; straalhoek 0 - 60°.

Stralen verwijdert nagenoeg alle niet gewenste resten van andere zich op het werkstuk bevindende stoffen, zoals onder meer oxiden en lijmresten en verbetert terzelfder tijd ook de oppervlaktegesteldheid van de snede.

- Met behulp van een staal- of messingborstel, al of niet roterend.

Schoonmaken, voor zowel het verwijderen van achtergebleven stoffen, het verwijderen van de dofzwarte vonkaanslag, de koper- of messingneerslag, enz., kan plaatsvinden met een geschikte harde (kunststof)-borstel, een passend oplosmiddel of een harde radeergum. In sommige gevallen kan het droogmaken van het werkstuk direct na de snijbewerking voldoende zijn.

Voor genoemde methoden gericht op het ontroesten en schoonmaken, zijn ook toepasbaar voor het verbeteren van de ruwheid. Hiervoor kan men eveneens een installatie gebruiken voor het zogenaamde extrudeerhonen (abrasive flow machining).

Aftekeningen of littekens ten gevolge van het lossnijden, aanlopen, onvoldoende trekkracht op de draad, versleten draad geleidingen of slechte klemming van uitvalstukken kunnen eventueel met behulp van een fijn vijltje, een oliesteen of een schuurstokje worden verwijderd. De vorm-/maatnauwkeurigheid wordt hierdoor beïnvloed.

Ook kan een lap- c.q. polijstbehandeling of een slijpbewerking worden toegepast ter verbetering van de ruwheid.

Ten behoeve van standtijd verhoging kan met behulp van coatingen een oppervlaktelaag worden aangebracht. Om (nieuwe) roestvorming tegen te gaan kunnen bepaalde beschermingsmiddelen worden aangebracht op het oppervlak van het werkstuk.

3.9.8 Profielfouten

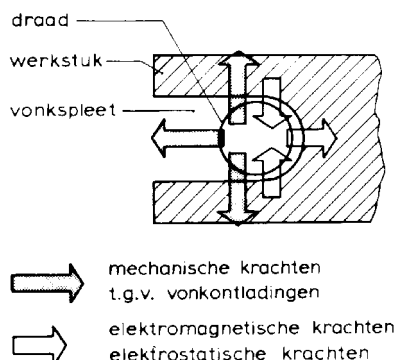
In vergelijking met de traditionele bewerkingsmethoden treden bij draadvonken slechts geringe krachten op in de vonkspleet. Vanuit het standpunt van geometrische precisie, moet aan deze krachtwerking niettemin de nodige aandacht worden besteed.

Verschillende fenomenen liggen aan de basis van de krachtwerking op de draadelektrode:

- De elektrostatische aantrekkingskracht ten gevolge van het elektrische veld tussen draad- en werkstuk-elektrode is vooral belangrijk bij relaxatiegeneratoren. De gemiddelde spanning tussen draad en werkstuk is in dit geval veel hoger dan bij statische pulsgeneratoren. De draad wordt als gevolg hiervan naar het werkstuk toe getrokken.
- Elektromagnetische krachten treden alleen op wanneer de elektrische stroom vloeit, dus tijdens de pulsduur. Ze zijn bovendien heel wat kleiner dan de elektrostatische krachten.
- De mechanische krachten ten gevolge van de vonkontlading; deze ontstaan door de hoge druk in het plasmakanaal op het moment van vonkdoorslag. Dit zijn bijgevolg afstotingskrachten, die de draad van het werkstuk wegduwen.
- De mechanische krachten ten gevolge van de spoeling; deze treden op door turbulenties in de vonkspleet. Daarom ook is een goede coaxiale spoeling vereist.

Voor genoemde effecten worden voor het grootste deel gecompenseerd door de axiale trekkracht F_E . Niettemin blijft er steeds een resultante in de tegenovergestelde richting van de snijrichting bestaan, die de draad naar achteren buigt (zie figuur 3.25).

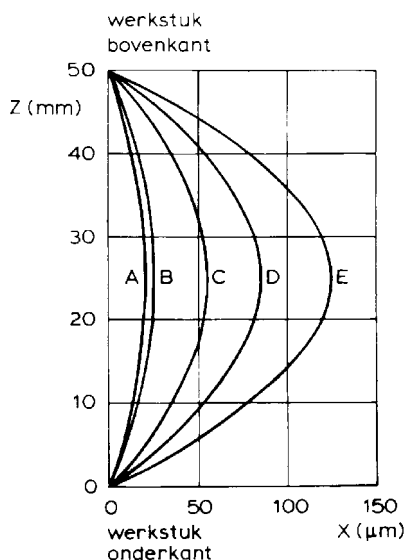
Als gevolg van de symmetrie, heffen de krachten, haaks op de bewegingsrichting, elkaar op (figuur 3.40). De draad trilt bij gevolg in de snijrichting voortdurend rond een gemiddelde positie in het verticale vlak.



figuur 3.40 Schematische voorstelling van de krachtwerking op de draad

De kromming van de draad die zo ontstaat, wordt als het ware in het werkstuk afgebeeld. De naar achteren verplaatste positie ten opzichte van de draadgeleidingen is onder andere een functie van de afstand tussen draadgeleidingen en boven- en onderkant van het werkstuk (figuur 3.25). De fout die op deze manier in het werkstuk ontstaat, kan verminderd worden door de draadkracht F_E op te voeren.

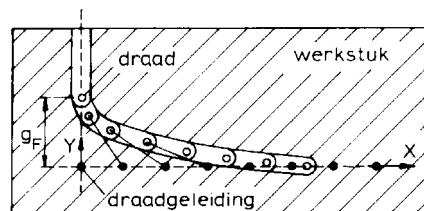
Figuur 3.41 geeft de vorm van de frontale vonkspleet als functie van de draadkracht. Men bemerkt een duidelijke vermindering van de fout tot ongeveer 10 N (bij messingdraad van $\varnothing 0,25$ mm). Een verdere verhoging van de draadkracht heeft niet veel effect meer.



figuur 3.41 Invloed van de draadkracht op de frontale profielfout [12].
Werkvoorwaarden: werkstuk X 210 Cr 12; draad CuZn37 $\varnothing 0,25$ mm; $t_s = 1,3$ μ s; $f_p = 80$ kHz; $u_i = 300$ V; $i_s = 100$ A; $\gamma = 15$ μ S/cm; $H = 50$ mm; F_E : A = 16,5 N; B = 10,5 N; C = 6,5 N; D = 4,5 N; E = 2,5 N

De hiervoor genoemde fenomenen worden pas echt belangrijk bij het snijden van hoeken, of kleine radii. Ten gevolge van het achterblijven van de draad, verkrijgt men uiteindelijk de situatie van figuur 3.42 voor het snijden van een hoek van 90° . De draad beweegt steeds in de richting van de verbindingslijn die kan worden getrokken door het middelpunt van de draad $\circ$ en de draadgeleidingen $\bullet$. Pas na een zekere tijd vallen de beide banen weer samen. Bovendien is aan te tonen dat de draad ter hoogte van de hoek, vanwege de asymmetrische belasting, versterkt gaat trillen.

Bij een hoek van 15° kan de fout, zonder gepaste maatregelen, op die manier oplopen tot 300 - 400 μ m.



figuur 3.42 Profielfout bij het vonken van een hoek van 90° [13].

$\bullet$ draadgeleiding; $\circ$ draadmiddelpunt

Nog een aantal andere factoren hebben invloed op de uiteindelijke maatnauwkeurigheid:

- Thermische instabiliteit. Het opstellen van draad-vonkmachines in een geklimatiseerde ruimte is noodzakelijk wanneer men strenge eisen qua precisie stelt. Thermische stabilisering voor motoren en mechanische onderdelen vinden meer en meer toepassing.
- Onnauwkeurigheden van de geleidingen, de schroefspillen in het bijzonder en het mechanische frame in het algemeen, inclusief het trillen van de machine en het draadsysteem, weerspiegelen zich in het gevonkte product.
- Onnauwkeurig verticaal uitlijnen van de draad en eenzijdige ondersteuning van het werkstuk kunnen storingen veroorzaken en ook leiden tot geometrische fouten.
- Restspanningen in het werkstuk geven aanleiding tot niet onbelangrijke werkstukvervormingen. In § 3.9.7 is hierop reeds ingegaan.

3.10 Fabricagevoorbeelden

Met draadvonken kunnen zowel eenvoudige als complexe vormen worden gesneden uit harde, geharde of taai metalen. Ongedeelde constructies zijn in één bewerking op efficiënte wijze te maken, eventueel meer eenvoudig uit gestapeld uitgangsmateriaal. Cilindrische en conische mantelvlakken, of een combinatie hiervan, zijn mogelijk.

Een goede werkvoorbereiding en planning zijn daarvoor noodzakelijk. Voor standaardbewerkingen zijn over het algemeen van de zijde van de fabrikanten voldoende gegevens beschikbaar. Met betrekking tot de constructieve kant wil het wel eens voorkomen dat hierover te weinig bekend is, zodat men de mogelijkheden en beperkingen niet helemaal door heeft. Toch is het nodig dat, als men het draadvonken optimaal wil toepassen, al in de constructiefase van een te fabriceren stempel, matrix of prototype hiermee rekening wordt gehouden.

Toepassingsmogelijkheden zijn onder andere:

- snijders voor snijstempels;
- doorlopende profielholtes in snij- en trekstempels, extrusie- en sintermatrizen;
- elektroden ten behoeve van zinkvonken (vooral schijfelektroden);
- prototypes en seriewerk (eventueel in pakket);
- draai-, snij-, slag- en profielbeitels;
- speciaal gereedschap en opspanningen;
- fijnmechanische onderdelen zoals flexibele scharnieren (zie voorbeeld 7);
- sjablonen, kopieermallen, meet- en controlemallen;
- uitslagen voor hoogwaardig plaatwerk;
- snijden van moeilijk te verspanen materialen (hardmetaal, titaan, PCD, keramische sintermaterialen, enz.);
- snijden van speciale 3D-vormen;
- materiaalbesparend snijden in extreem duur en/of schaars materiaal;

- snijden van mathematisch moeilijk te definiëren vormen;
- speciale serieproducten, eventueel meervoudig (momenteel al 10 draden/machine).

In deze paragraaf wordt aan de hand van enige voorbeelden getoond wat mogelijk is met draadvonken.

Voorbeeld 1

Onderwerp: snijders voor snijstempels (4 stuks); zie figuren 3.43 en 3.44.

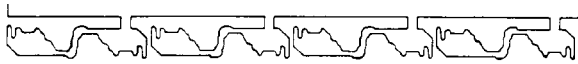
Snijhoogte 29 mm; totale snijlengte 797 mm; oppervlakteruwheid $R_a = 0,35 \mu\text{m}$; gebruikte draad $\varnothing 0,2 \text{ mm}$ (CuZn37).

Totale programmeertijd: 4,75 uur

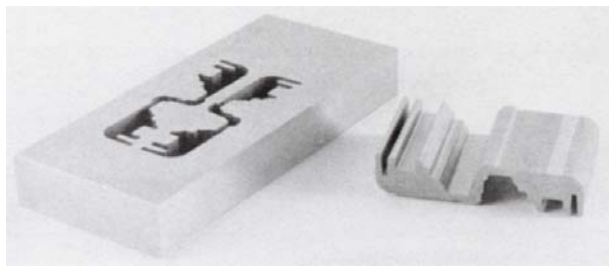
Opspantijd: 0,25 uur

Voorsnijden	: 10,00 uur
Nasnijden 1 ^e keer	: 2,75 uur
Nasnijden 2 ^e keer	: 2,75 uur
Nasnijden 3 ^e keer	: 8,50 uur

Totale snijtijd (4 stuks) : 24,00 uur



figuur 3.43 Snijpad van de 4 snijders



figuur 3.44 Snijder van voorbeeld figuur 3.43 (rechts) en snijplaat van voorbeeld figuur 3.45 (links)

Voorbeeld 2

Onderwerp: snijplaat; zie figuren 3.44 en 3.45.

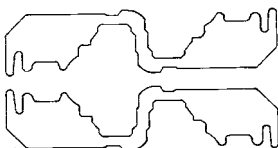
Snijlengte 308 mm; snijhoogte 5,5 mm, Conisch deel 3,0 mm; coniciteit 1°; oppervlakteruwheid $R_a = 0,9 \mu\text{m}$; gebruikte draad $\varnothing 0,2 \text{ mm}$ (CuZn37).

Totale programmeertijd: 2,25 uur

Opspantijd: 0,50 uur

Voorsnijden:	3,50 uur
Nasnijden 1 ^e keer:	1,00 uur
Nasnijden 2 ^e keer:	1,00 uur
Conisch snijden:	1,75 uur

Totale snijtijd: 7,25 uur



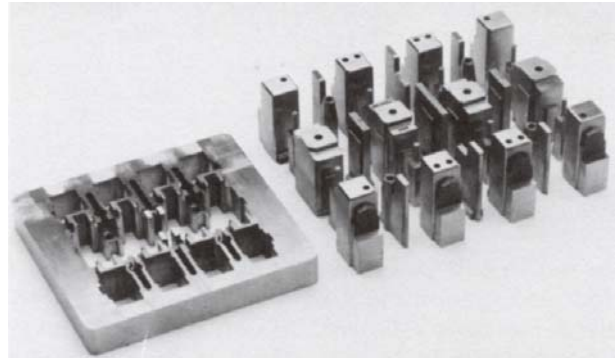
figuur 3.45 Snijpad van de snijplaat

Voorbeeld 3

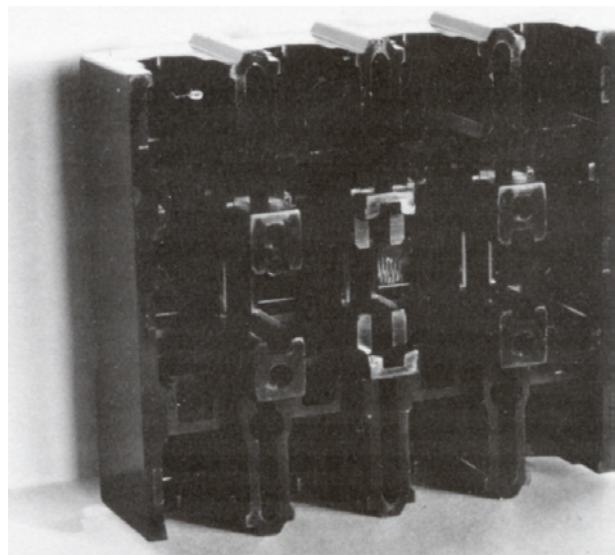
Onderwerp: doorlopende profielgaten (figuur 3.46 en 3.47)

Bij het productontwerp en de matrijsconstructie voor dit product is optimaal gebruikgemaakt van de mogelijkheden die draadvonken biedt. Naast de voordelen van het betere product zijn de resultaten onder andere:

- het verminderen van de matrijskosten tot ca. 40% van die van een conventioneel vervaardigde matrijs;
- het terugbrengen van de totale doorlooptijd van de matrijs tot 1/3 van die van een conventioneel vervaardigde matrijs.



figuur 3.46 Een aantal matrijsdelen voor het product in figuur 3.47



figuur 3.47 Het uiteindelijke product (zekeringhouder)

Voorbeeld 4

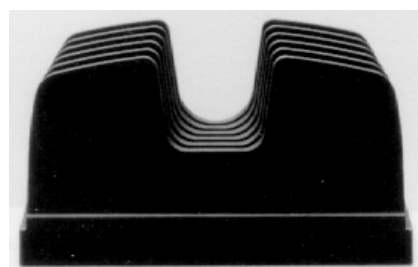
Onderwerp: grafielektrode voor zinkvonken ten behoeve van een spuitgietmatrijs voor koelribben (figuren 3.48 en 3.49)

Gebruikte draad: $\varnothing 0,25 \text{ mm}$

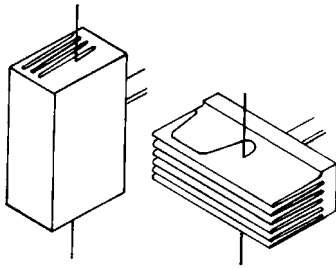
Programmeertijd: 25 minuten (vanuit CAD-file)

Snijtijd: 4 uur

Nasnijden: ca. 0,9 uur



figuur 3.48 Zinkvonkelektrode



figuur 3.49 Draadbeweging bij het vervaardigen van de zinkvonkelektrode. Tussentijds is het werkstuk 90° gedraaid

Voorbeeld 5

Onderwerp: messing soldeerplaatje; zie figuur 3.50 en 3.51.

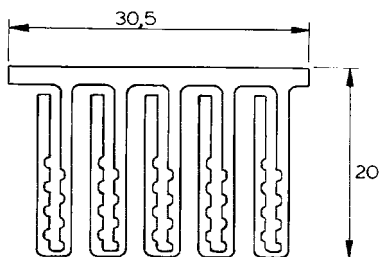
Materiaal: messing, dik 0,216 mm.
Gebruikte draad: Ø 0,2 mm (CuZn37 gecoat).

Pakke hoogte: 42,56 mm (160 stuks + pakketplaten)
Snijlengte voor 5 stuks: 457 mm

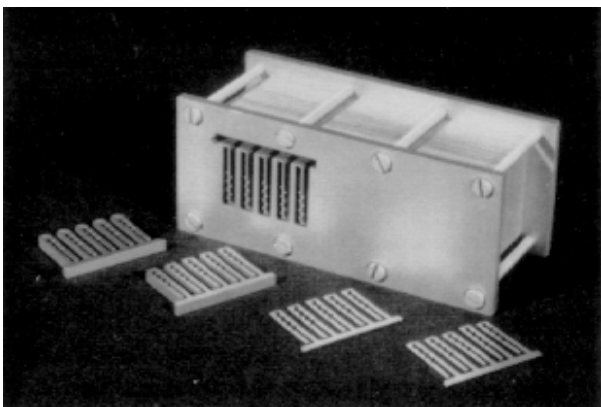
Totale programmeertijd: 0,75 uur (overgenomen van CAD)

Neventijden zoals o.a.
opspannen, controleren: 1,00 uur
Totale snijtijd: 15,65 uur

Totale tijd (800 producten): 17,40 uur



figuur 3.50 Snijpad van 5 producten (messing soldeerplaatjes) op een rij



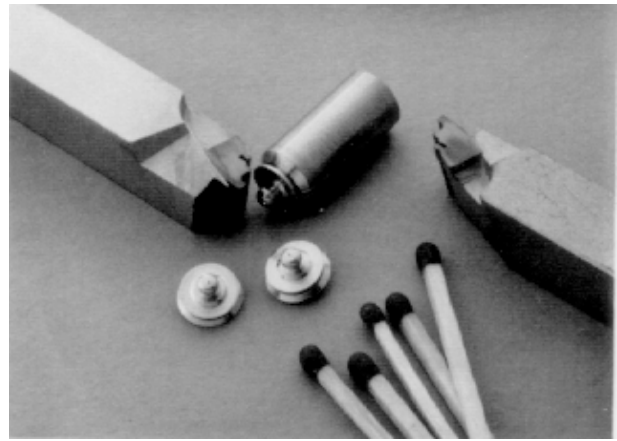
figuur 3.51 Voorbeeld van een pakket met het product

Voorbeeld 6

Onderwerp: Draaibeitels (zie figuur 3.52).

Materiaal: hardmetaal

Doorlooptijd per beitel ca. 1,5 uur; oppervlakteruwheid $R_a = 0,35 \mu\text{m}$

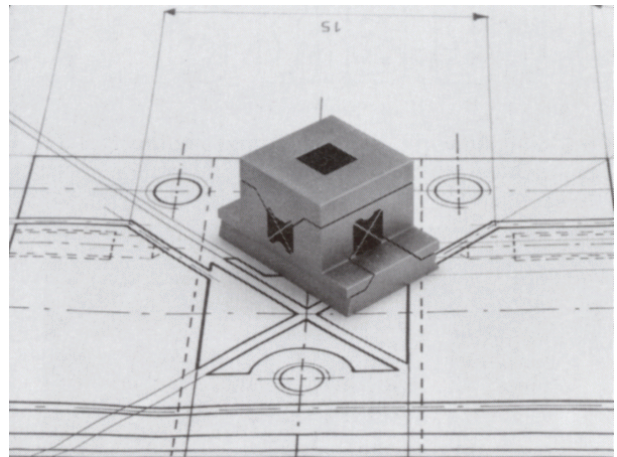


figuur 3.52 Draaibeitels met werkstukken

Voorbeeld 7

Onderwerp: speciaal gereedschap (precisie kanteltafeltje, zie figuur 3.53).

- Het kanteltafeltje is uit één stuk metaal gedraadvonkt.
- Door middel van deze bewerking zijn elastische scharnieren ontstaan met een begrensde hoekverdraaiing.
- Het tafeltje heeft twee vrijheidsgraden.



figuur 3.53 Precisie kanteltafeltje

Voorbeeld 8

Product: Sintermatrijs (zie figuur 3.54).

Materiaal: Hardmetaal kern Ø 45 mm; staalvatting Ø 75 mm.

Hoogte: 70 mm; snijlengte: 122 mm; paralleliteitsfout: $2 \mu\text{m}$; $R_a = 0,5 \mu\text{m}$.

Totale bewerkingstijd: 11,5 uur



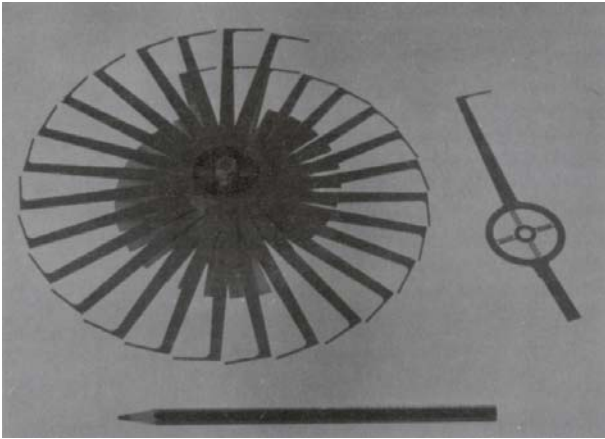
figuur 3.54 Sintermatrijs

Voorbeeld 9

Onderwerp: uitslagen hoogwaardig plaatwerk (zie figuur 3.55).

Materiaal: nikkel; Dikte: 0,1 mm; contourfout: $\pm 0,01$ mm; $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Erodeertijd van een pakket (200 stuks): 180 minuten



figuur 3.55 Uitslagen hoogwaardig plaatwerk

Voorbeeld 10

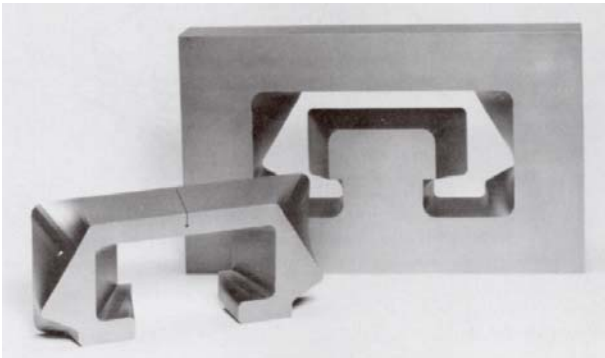
Onderwerp: speciale 3-D vormen (zie figuur 3.56).

Onderdeel van een kunststof extrusiematrijs met een uitvalstuk.

Oppervlakteruwheid $R_a = 1 \mu\text{m}$.

Onder- en bovencontour verschillend; afzonderlijk geprogrammeerd.

Hoek α varieert tussen $+$ en -30° .



figuur 3.56 Extrusiematrijsonderdeel en uitvalstuk

Voorbeeld 11

Onderwerp: extrusiematrijs voor aluminium (zie figuur 3.57).

Programma : via CAD/CAM.

Gebruikte draad: $\varnothing 0,25$ CuZn 37 gecoat.

snijtijd : per holte 50 minuten.

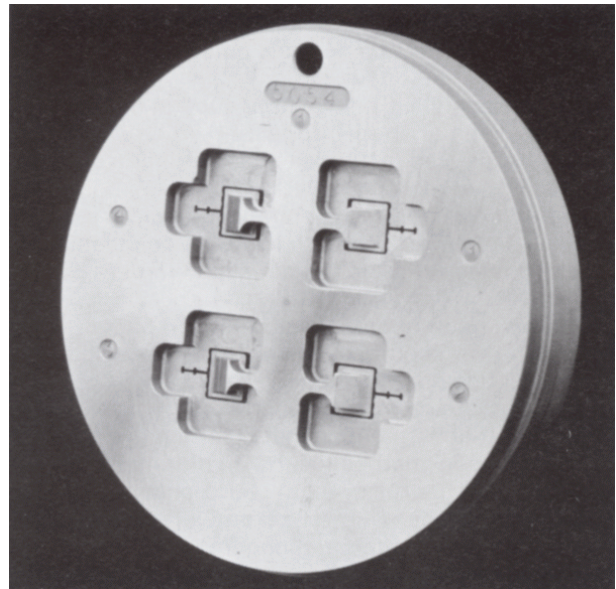
oppervlakteruwheid : $R_a = 0,7 \mu\text{m}$.

Voorbeeld 12

Onderwerp: productievoorbeeld pijpen eroderen (zie figuren 3.58 en 3.59).

Het product is een "lanceer"pijp voor een luchtweefmachine.

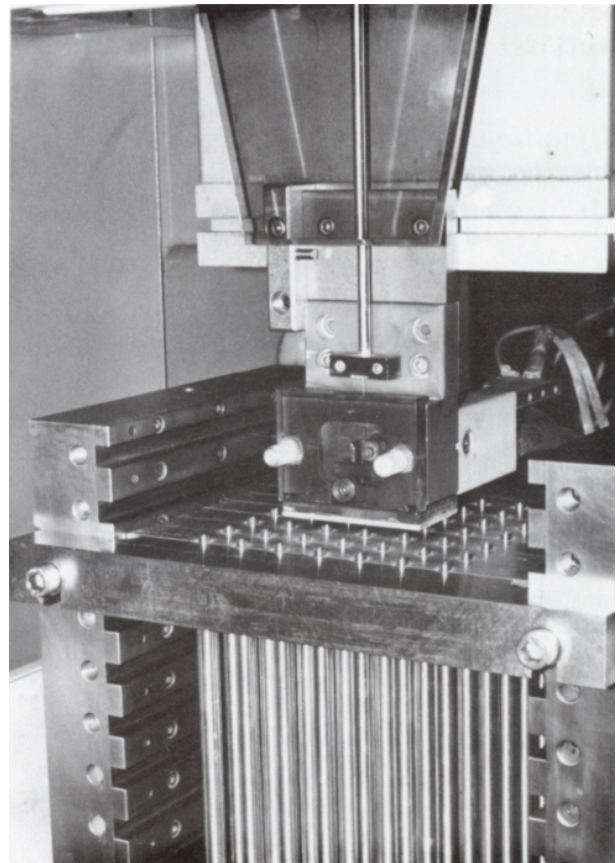
- in één opspanmal worden 48 producten opgespannen, die zonder handmatig ingrijpen automatisch



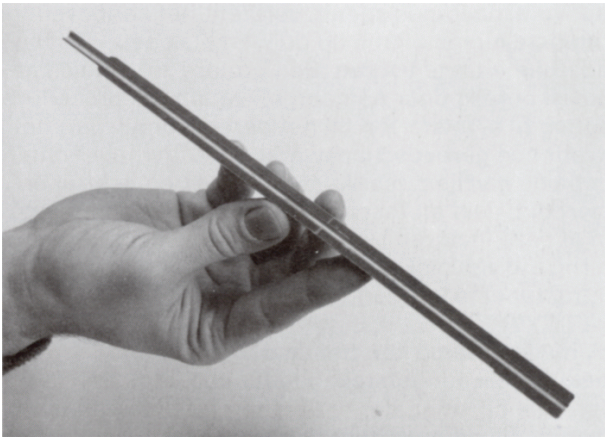
figuur 3.57 Extrusiematrijs 4-voudig

worden bewerkt, inclusief automatisch draadknippen, invoeren, generatorstanden wisselen, baancorrectie, enz. Hierdoor maakt de machine 150 erodeeruren per week.

- lengte pijp 290 mm.
- voorbereiding op langgatboormachine $\varnothing 2,8$ mm.
- de diameter van het gesneden conische gat is aan de ingaande zijde : $\varnothing 4,00 \pm 0,02$ mm; uitgaande zijde: $\varnothing 3,00 \pm 0,02$ mm.
- snijtijd per pijp: 40 min.
- in verband met het onbemande productieproces wordt het gehele uitvalmateriaal weggeërodeerd, dus geen afval.
- oppervlakteruwheid na polijsten: $R_a = 0,4 \mu\text{m}$.



figuur 3.58 Meervoudige opspanmal voor 'lanceer'-pijpen



figuur 3.59 Dwarsdoorsnede van een gedraadvonkte 'lanceer'pijp

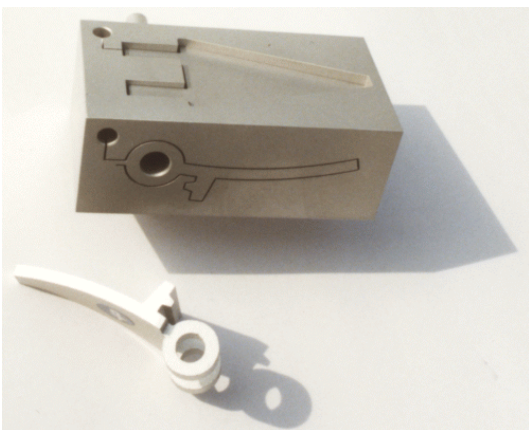
Voorbeeld 13

Onderwerp: Gedraadvonkte weegschaalonderdeel (zie figuur 3.60)

Voorbeeld 14

Onderwerp: Een geheel uit massief materiaal gedraadvonkt hefboompje (zie figuur 3.61).

Bij het draadvonken van dit product is uitgegaan van een drietal startgaten.



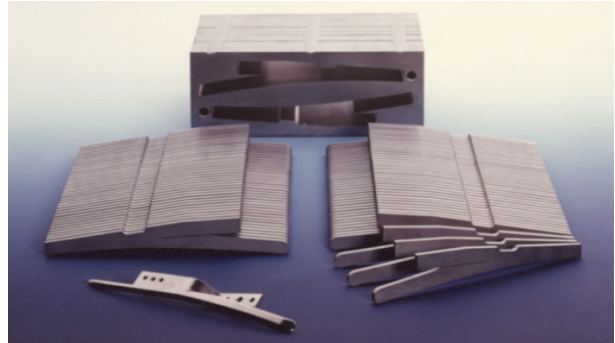
figuur 3.61 Geheel uit massief materiaal gedraadvonkt hefboompje (vanuit drie startgaten)

Voorbeeld 15

Onderwerp: Het gelijktijdig vervaardigen van een serie nauwkeurige producten door middel van "pakketten".

Bij het vervaardigen van deze producten is uitgegaan van een pakket van 40 platen (zie figuur 3.62), waaruit een tweetal productvormen wordt uitgesneden. Het platenpakket van dit product wordt vastgeklemd door middel van bouten.

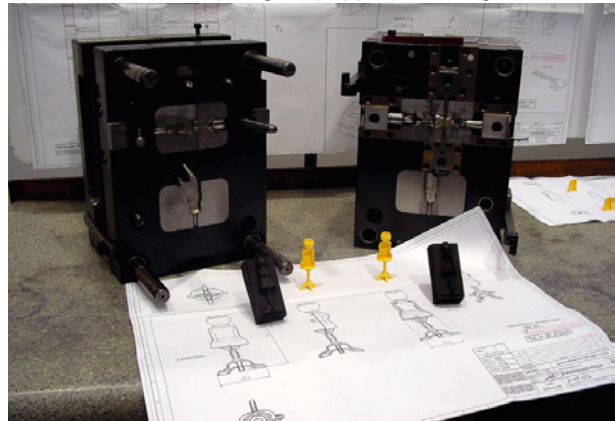
Een andere mogelijkheid om dergelijke plaatpakketten te pakketten is door middel van lassen.



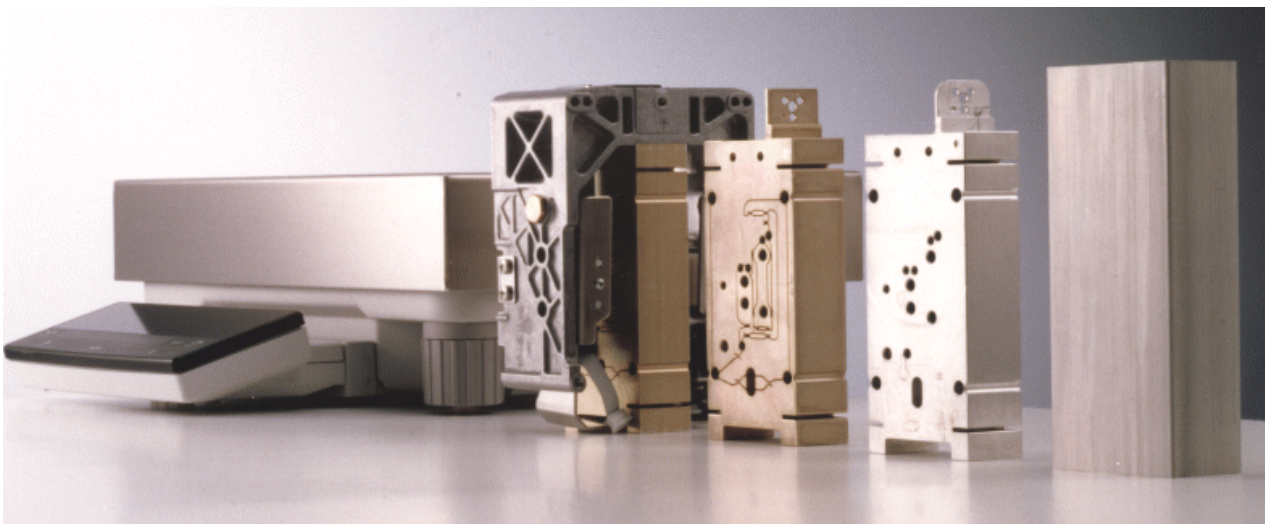
figuur 3.62 Het door middel van "pakketten" vervaardigen van kleine series nauwkeurig plaatwerk met behulp van draadvonken

Voorbeeld 16

Onderwerp: Enkelvoudige spuitgietmatrijs voor kunststof speelgoedpoppetje (zie figuur 3.63)



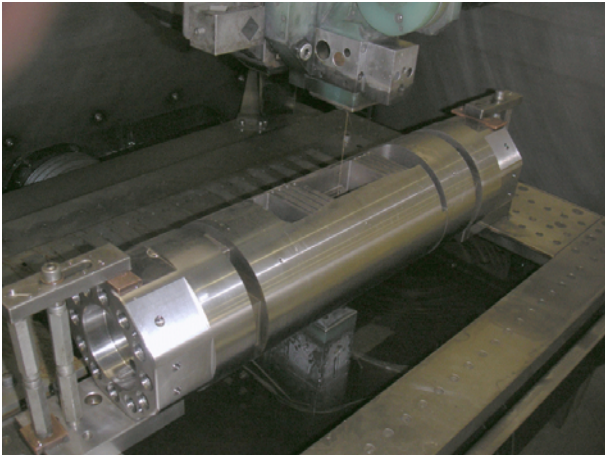
figuur 3.63 Spuitgietmatrijs voor kunststof speelgoed



figuur 3.60 Voorbeeld van gedraadvonkte Mettler weegschaalonderdeel

Voorbeeld 17

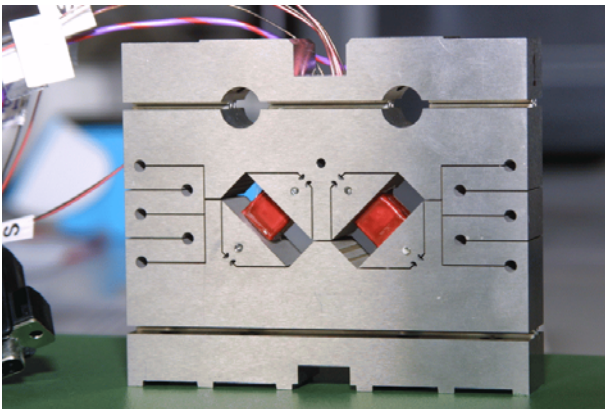
Onderwerp: Gedraadvonkte balans voor het uittesten van de vluchtmodellen in de windtunnel van het NLR (zie figuur 3.64).



figuur 3.64 Het draadvonken van een meetinstrument voor het uittesten van vluchtmodellen in de windtunnel van het NLR

Voorbeeld 18

Innovatieve "smartdisc" uit metalen blok met gedraadvonkte elastische scharnieren (zie figuur 3.65). Door de combinatie van sensor en actuator zijn daarmee piezoelektrisch waargenomen trillingen actief elektronisch te compenseren, bijvoorbeeld voor toepassing in wafersteppers.



figuur 3.65 Voorbeeld van elastische scharnieren

Voorbeeld 19

Onderwerp: Volledig gedraadvonkte samengestelde fijnstansstempel (zie figuren 3.66 en 3.67) voor het vervaardigen van onderdelen van een autostoelverstelling (figuur 3.68)

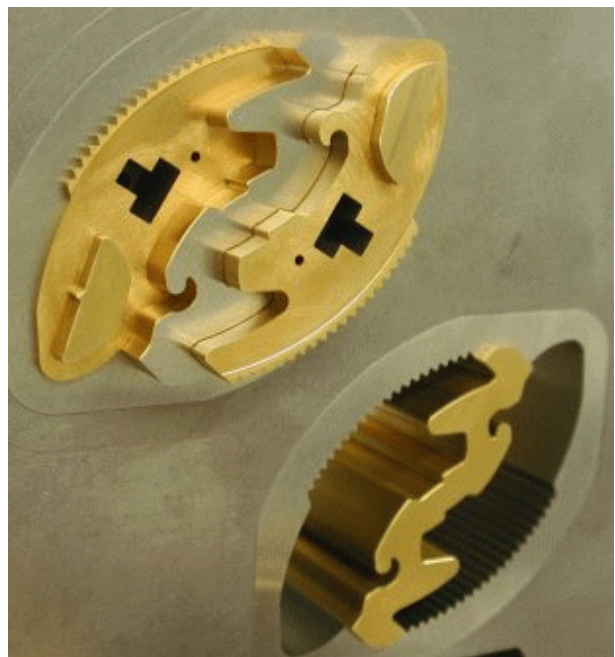
Materiaal: HSS 1.3343

Afmetingen van het te stansen product is: ca. 20 × 50 mm; 2,5 mm dik

Figuur 3.66 toont op de voorgrond vier staande snijders.



figuur 3.66 Snijplaat met op de voorgrond 4 snijders



figuur 3.67 Detaillering van de samengestelde fijnstansstempel



figuur 3.68 Onderdeel van een autostoelverstelling vervaardigd m.b.v. het gereedschap uit figuur 3.66 en 3.67

Hoofdstuk 4

Automatisering en organisatie

4.1 Inleiding

Wereldwijde concurrentie, prijsdruk en technische innovaties brengen een aanzienlijke betere benutting van op zich vrij prijzige gereedschapsmachines tot stand dan nu gebruikelijk is op basis van CAO-afspraken en een aantal doorlooptijden (zie figuur 4.1).

beschikbaar:	365 dagen x 24 uur = 8760 uur			
effectieve machine-uren:	1840 uur dagdienst	3680 uur nachtelijke uren (onbemand)	2200 uur weekend (onbemand)	1040 uur vakantie
effectieve machine-uren overdag:	1200 uur			
overdag en doorvonen: productieve tijd:	1200 uur +	3000 uur	+ 1800 uur	
	totaal 6000 uur			

figuur 4.1 Beschikbare uren: traditioneel vonkend (1200), met overlooptijden (3000) en volautomatisch (richting 5-6000)

Moderne CNC machines zijn in staat om lange tijd onbemand of met weinig toezicht door te werken. In het bijzonder geldt dit voor vonkmachines waar van oudsher een zelfregelend servosysteem - naast tegenwoordig een redelijke hoeveelheid bruikbare technologie - is in-

gebouwd. Nu een CNC-eenheid als onderdeel van een (bedrijfs)netwerk op elk moment zelfstandig de bij een bepaald karwei benodigde gegevens kan opvragen en uitwisselen, vormt eigenlijk alleen de geringe graad van automatisering een bottleneck.

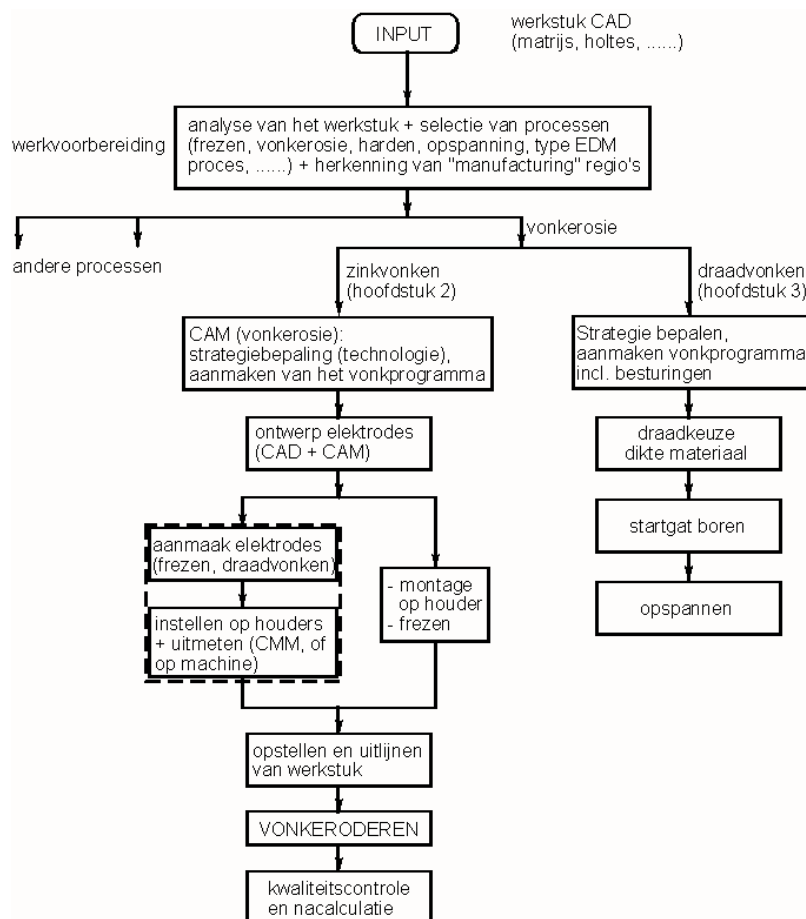
Basisvoorwaarde voor verantwoord automatiseren is het gestructureerd opbouwen van inzicht in o.a. de bedrijfsorganisatie, het totale werkpakket, de machinebezetting, het beschikbare personeel en expertise, soft- en hardware-elementen, enz. Hieruit is een plan af te leiden, waarop projectmatig de aanpak van een interne (en deels externe) automatisering gebaseerd kan worden.

Absoluut noodzakelijk is het planmatig vastleggen van bedrijfsseigen kennis en ervaring, om minder persoonsafhankelijk te worden.

Een doordacht investeringsplan met efficiëntieberekening dient het automatiseringsproject te ondersteunen. In z'n algemeenheid verschuift in de totale procesketen de nadruk van de vonkbewerking op zich sterk naar voren over de programmeerafdeling naar de werkvoorbereiding, met alle organisatorische consequenties van dien.

Zodra besloten is een bepaalde caviteit of werkstuk deels via vonkerosie te bewerken, is het zaak een efficiënte strategie te bepalen. Ook ten behoeve van de werkvoorbereiding moet de gehele voorgenoemde strategie al bekend zijn. Alleen dan kan een inschatting worden gemaakt van de benodigde materialen, capaciteit van bewerkingsmachines, opspanmiddelen en de verwachte bewerkingstijden.

Figuur 4.2 geeft een schematisch overzicht van de verschillende uit te voeren activiteiten (taken) nodig om op basis van een gegeven werkstuktekening een afgewerkt stuk, geheel of gedeeltelijk bewerkt via vonkerosie, te verkrijgen.



figuur 4.2 Stroomdiagram voor zink- en draadvonkbewerkingen

De verschillende activiteiten kunnen worden onderverdeeld in volgende sequentiële hoofdtaken:

► **Werkvoorbereiding**

De werkvoorbereiding heeft tot doel om voor een gegeven werkstuk de verschillende bewerkingsprocessen en bijbehorende strategie te definiëren. Niet alleen vonkerosieprocessen, maar ook andere processen zoals het frezen en harden dienen in acht te worden genomen om tot een kostenoptimale productie te komen. Werkvoorbereiding voor vonkerosie is vrij complex en verschilt naargelang het zink- of draadvonkerosie betreft. Voor typische aspecten i.v.m. werkvoorbereiding bij draadvonkerosie wordt verwezen naar § 3.10 "Werkvoorbereiding en set-up". § 4.2 van dit hoofdstuk gaat dieper in op een aantal werkvoorbereidingsaspecten waarbij het zinkvonken een belangrijke rol speelt.

► **Programmering van vonkerosiemachines**

Nadat alle processen zijn gedefinieerd, dienen voor de verschillende processen NC-programma's te worden aangemaakt. In de context van dit deel van de publicatie wordt enkel ingegaan op de NC-programmering van vonkerosiemachines. Typische aspecten i.v.m. programmering wordt beschreven in § 4.4.

► **Ontwerp en maak gereedschapselektrodes**

Bij het zinkvonken is het ontwerp en de fabricage van de verschillende elektrodevormen een niet te onderschatten taak. Het ontwerpen, met name de afleiding van de geometrische vorm, vraagt veelal extra CAD-werk. Door de aanwezige ondermaat en/of correcties voor excentriciteiten bij het plane-tair vonkeroderen is de elektrode kleiner dan het negatief van de te vonken holte. Specifieke aspecten in dit verband werden reeds beschreven in § 2.8). Meerdere CAD systemen hebben extra functionaliteit om het elektrodeontwerp op een versnelde manier af te leiden van de caviteitgeometrie. Het fabriceren van de nodige gereedschapselektrodes gebeurt, afhankelijk van de geometrische vorm, zowel via klassieke bewerkingsprocessen (frezen, draaien,...) als met fysische bewerkingsprocessen zoals het draadvonken.

► **Set-up van het werkstuk op de machine** (zie § 4.7.4)

Opspannen en uitlijnen van het werkstuk dient zoals bij de elektrodes evenzeer met de nodige aandacht te gebeuren. Door het gebruik van werkstukpaletten kan het opspannen en de opmeting van nulpuntsposities buiten de machine gebeuren.

► **Het eigenlijke vonkeroderen**

Nadat het werkstuk en elektrodes op de machine voorzien zijn (eventueel automatisch lading van robotwisselaar) en de nodige NC-programma's op de besturing aanwezig zijn, kan het vonkproces starten. Tijdens het vonken worden verschillende procesparameters (efficiëntie, voortgang van het proces, enz.) via de besturing gevolgd. Moderne besturingen bezitten functionaliteit om deze toestandparameters via een netwerkverbinding ter beschikking te stellen op andere media (off line PC, GSM, enz.).

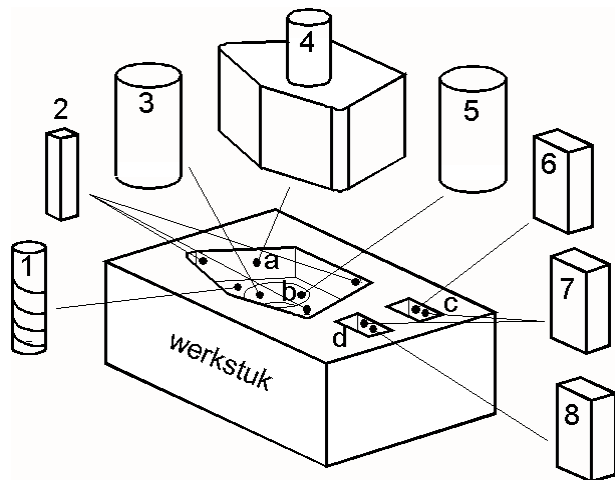
► **Kwaliteitscontrole en nacalculatie**

Om de kwaliteit van het te bewerken stuk te controleren dient het te worden nagemeten. Nacalculatie van de bewerkingstijd is nuttig om de tijdberekening tijdens de werkvoorbereiding van volgende opdrachten nauwkeuriger te kunnen uitvoeren.

Het algemene stroomdiagram kan voor ieder bedrijf verder worden gedetailleerd (inclusief ander processen, zoals frezen, boren, enz.). Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 4.3.

4.2 Werkvoorbereiding

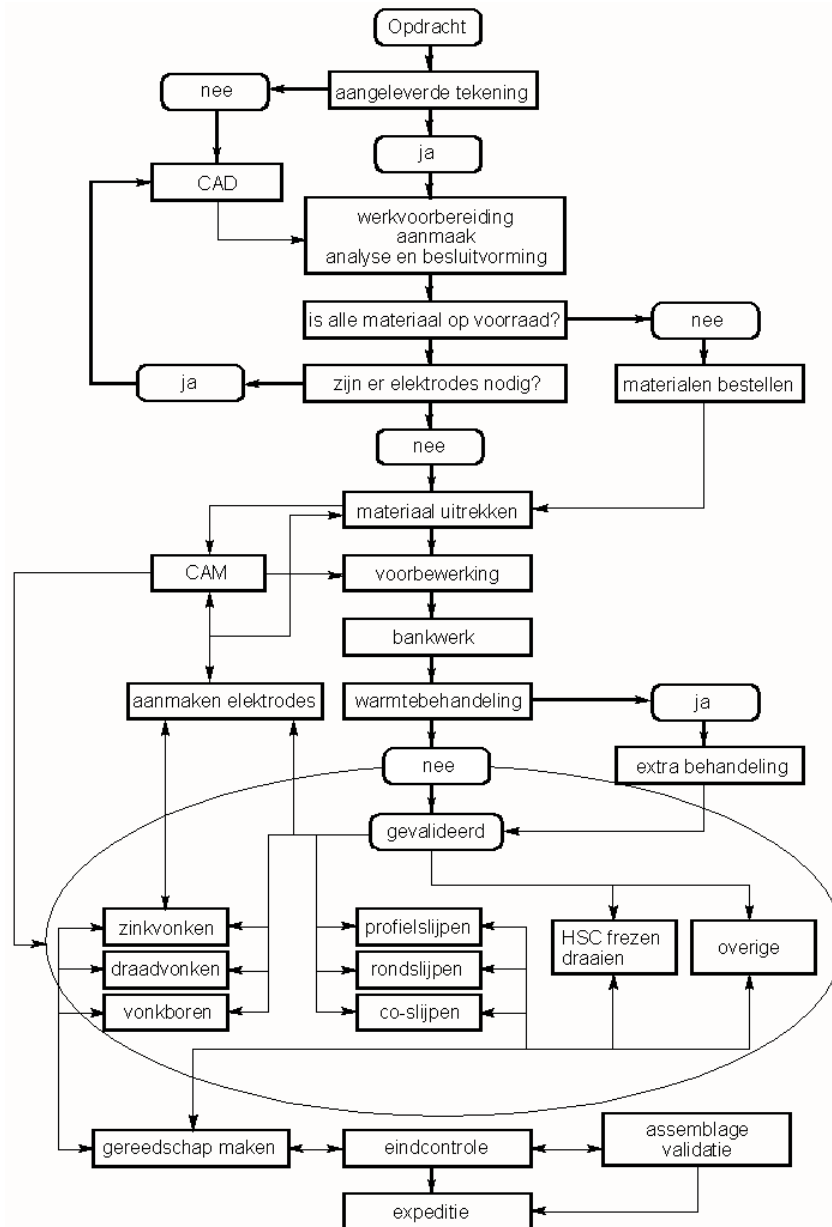
De werkvoorbereiding heeft tot doel de nodige bewerkingsprocessen te selecteren om op zo'n kostenoptimale manier het werkstuk te bewerken. Het begrip "kostenoptimaal" dient zo ruim mogelijk te worden bekeken. Het kan bijvoorbeeld globaal goedkoper zijn om een duurder, maar sneller proces in te zetten, om zodoende het stuk binnen een korter tijdsbestek af te leveren. De werkvoorbereiding start steeds met een gedetailleerde analyse van het werkstuk (zie figuur 4.4). Het komt er hierbij op neer om de verschillende bewerkingsregio's, welke m.b.v. van een bepaald bewerkingsproces zullen of kunnen worden bewerkt, te herkennen. Deze bewerkingsregio's worden in het vakjargon meestal "process planning features" genoemd. Voorbeelden van eenvoudige zogenaamde "process planning features" zijn ronde gaten. Minder eenvoudige features zijn pockets of complex gevormde caviteiten.



figuur 4.4 Schematisch voorbeeld van een automatische bewerkingsafloop met verschillende elektrodevormen; a = kamer, b = cilindrisch gat, c en d = rechthoekige gaten

In een tweede stap worden de verschillende bewerkingsprocessen (bijv. frezen, harden, vonkerosie, enz.) met bijbehorende bewerkingsstrategieën gedefinieerd. Gezien de vele alternatieve mogelijkheden om een werkstuk optimaal te bewerken is de sequentie van bewerkingsprocessen niet uniek. Afhankelijk van het beschikbare machinepark en de bezetting van de machines kan een werkvoorbereiding voor een gegeven werkstuk verschillen.

Werkvoorbereiding voor vonkerosie, meer specifiek de keuze van de vonkstrategie, is complex. Een gegeven caviteit kan bijvoorbeeld gemaakt worden door een zinkvonkopertatie toe te passen met een elektrodevorm welke tegengesteld is aan de te maken holte. Maar vaak wordt een elektrode opgedeeld in meerdere losse elektroden, of worden meerdere te bewerken delen juist samengevoegd tot 1 elektrode. In beide gevallen liggen hier diverse overwegingen aan ten grondslag zoals: de maximale capaciteit van de machine, de maakbaarheid van de elektroden, de mogelijkheid een goede spoeling te creëren, het aantal beschikbare plaatsen in de wisselaar, het maximale elektrodegewicht van een specifieke machine, de benodigde eindruwheid, de verwachte slijtage van kleine features op de elektrode, of zelfs de mogelijkheid tot hergebruik van elektroden. Met een CNC machine kunnen alle separate elektroden zeer nauwkeurig naar hun specifieke coördinaat worden gestuurd, zodat uiteindelijk een accuraat bewerkt geheel ontstaat.



figuur 4.3 Stroomdiagram voor een specifiek bedrijf

Figuur 4.4 geeft een schematisch voorbeeld van een bewerkingsafloop waarbij verschillende elektrodevormen worden gebruikt. De volgende bewerkingsstappen vinden plaats:

- stap 1: voorfrezen van holte a met een frees van Ø 15 mm. Na het frezen kan restmateriaal in de hoeken achterblijven;
- stap 2: voorvonken van de resterende afrondingen van holte a met een vierkante elektrode (10 x 10). De elektrode wordt in het vlak van de holte bewogen;
- stap 3: voorvonken van holte b met cilindrische elektrode 3 (Ø 30 mm);
- stap 4: afwerken van holte a met elektrode 4;
- stap 5: afwerken van holte b met cilindrische elektrode 5 (Ø 30 mm);
- stap 6: voorvonken van holte c met rechthoekige elektrode 6;
- stap 7: afwerken van holte c met rechthoekige elektrode 7;
- stap 8: voorvonken van holte d met rechthoekige elektrode 7. De navonkelelektrode van de vorige holte wordt hiervoor gebruikt;
- stap 9: afwerken van holte d met rechthoekige elektrode 8.

De volledige bewerking kan via een NC programma op de CNC van de machine worden ingegeven. Elektroden kunnen automatisch worden gewisseld door middel van een elektrodewisselaar.

Het opstellen van kostenoptimale sequentie van bewerkingsprocessen (inclusief verschillende vonkerosiestappen) vereist een gedetailleerde tijdscomputatie. Het inschatten van de bewerkingstijden voor de aanmaak van elektroden is veelal geen probleem. Het inschatten van de bewerkingstijden van het vonkproces blijkt een moeilijker kwestie. De totale bewerkingstijd is afhankelijk van vele parameters en kan daardoor nogal fluctueren. Wanneer overwegend producten met een grote onderlinge gelijkheid worden gemaakt, kan op basis van ervaring vaak nog een heel redelijke inschatting worden gemaakt. Het blijkt erg moeilijk een universeel geldende inschatting van de bewerkingstijd te maken. Een veel toegepaste methode is om eerst de theoretische bewerkingstijd te berekenen aan de hand van te verwijderen volume en materiaalafname. Deze waarde wordt vervolgens gecorrigeerd met factoren op basis van de eigen ervaring. Bijvoorbeeld maal twee voor hoog nauwkeurig werk of maal 1,5, wanneer spoelingsproblemen worden verwacht.

Aantal en ondermaten

In § 2.5.4 "Bewerkingsstrategie" is aangegeven hoe vervolgens een programma gemaakt wordt per te bewerken holte. Hierin worden de verschillende instellingen vastgelegd, om tot het gewenste eindresultaat te komen. Bij verschillende generatorinstellingen horen verschillende ondermaten (vonkspleetcompensatie op de elektrode). Daardoor ontstaat de noodzaak om per holte ook nog eens meerdere elektroden aan te maken, met verschillende ondermaten: voor-, tussen- en navonk-elektroden.

Opspannen en nulpuntbeheersing

Al deze elektroden moeten worden opgespannen en op de juiste plaats in het werkstuk terechtkomen. Ook moeten ze in de juiste volgorde, met de juiste bijbehorende programma's worden gebruikt (voorvonker met voorvonkprogramma, tussenvonker met tussenvonkprogramma, enz.). Het mag duidelijk zijn, dat een goede beheersing van deze gegevens noodzakelijk is. Hoe dit gebeurd is natuurlijk van vele factoren afhankelijk, het kan in diverse automatiseringsgraden gebeuren. Dit geschiedt veelal onder eigen verantwoording in het geheugen van de operator, via bakjes-systemen met invulformulieren en kleuren, tot elektrodehouders met chips erop, die alle relevante informatie bevatten die bij een elektrode behoort. Deze chips worden door de machine zelf uitgelezen, zodra de elektrode in het magazijn wordt geplaatst.

In alle gevallen zijn goede nulpuntbeheersing en controles aanbevolen. Wanneer de elektrode reeds opgespannen in de houder wordt gefreesd, wordt de kans op positioneringfouten geminimaliseerd. Ook het nameten van elektroden vlak voor de feitelijke bewerking wordt vaak toegepast. Hierbij wordt o.a. gelet op oriëntatie, beschadigingen, ongewenste vervormingen en vooral of de juiste ondermaat is aangebracht. Met name een onjuiste ondermaat kan in combinatie met de gekozen bewerkingsstrategie van de machine tot nare fouten leiden (zie § 2.8.5 onder het kopje 'Specifieke aspecten in verband met elektrodefabricage').

4.3 Afleiden elektrodevorm/vonkcyclus

Een eenmaal in 3D CAD opgestelde productbeschrijving vormt een uitstekend basis om zowel de elektrodevorm af te leiden als de serie vonkbewegingen en -bewerkingen, nodig om een eindproduct te realiseren.

4.4 Programmering

Hergebruik van alle bestaande digitale gegevens binnen een bedrijf, of extern in samenwerkingsverbanden, zal een steeds grotere nadruk krijgen, al is het maar uit tijdsbesparing en ter minimalisering van fouten. Hiervoor staat een aantal middelen ter beschikking.

4.4.1 CAM programmering

4.4.1.1 Communicatie

Communicatie met de machine kan plaatsvinden met de machinebesturing en/of met externe apparaten zoals PC, centrale computer en printer of plotter. Deze laatste zijn dan met de machine verbonden via een RS232 of ethernet aansluiting.

Door deze communicatie met de machine kunnen de volgende taken worden uitgevoerd:

- NC programmering;
- instelling van de machine;
- procescontrole;
- melding van storingen.

Machines zijn verder voorzien van een aantal "on/off" uitgangen die worden aangestuurd als hulpfuncties

(M-codes in het NC programma). Dit geeft de mogelijkheid om bijvoorbeeld separate hulpapparaten zoals extra assen te commanderen, of het einde van of een storing in een werkstukprogramma te laten melden via een telefoonnetwerk of andere oproepsystemen.

4.4.1.2 Programmeringaspecten

Met programmering wordt bedoeld het opstellen van de nodige NC programma's (geometrisch en technologisch) voor de numerieke besturing.

Bij numeriek bestuurd zinkvonken kunnen de instructies talrijk en complex zijn en de programma's worden vaak éénmalig gebruikt. Bijgevolg worden aan de programmeermethode dan ook hoge eisen gesteld. Het programmeren dient effectief en foutloos te geschieden.

Afhankelijk van het werkpakket, het machinepark en de organisatie, kan men voor één van de volgende methoden kiezen:

- programmering via directe ingave;
- gebruik van CAM-programmatuur.

4.4.1.2.1 Programmering via directe ingave

Door middel van een toetsenbord en een beeldscherm zijn de 'woorden' rechtstreeks in te toetsen. De ingevoerde en eventueel geoptimaliseerde programma's kunnen worden vastgelegd in het geheugen van de machine of op magnetische media zoals floppy's. Deze manier van programmeren vraagt veel werk, kennis en kunde. Bij de directe ingave kunnen twee methoden worden onderscheiden:

- de directe ingave van het geometrisch en/of technologisch NC programma;
- de directe ingave via machine-afhankelijke, APT gebaseerde programmeertalen, welke meestal eenvoudiger zijn dan de NC code syntax. In veel gevallen is de numerieke besturing voorzien van menugestuurde dialoogsystemen en/of grafische systemen voor het opstellen van die programma's. Deze programma's worden in de besturing omgezet naar de desbetreffende NC codes.

NC programmering door directe ingave wordt nog steeds het meest toegepast als de op te stellen NC programma's tamelijk eenvoudig zijn. Het betreft vooral het programmeren van zink- en planetaire vonkcycli. Het programmeren van contourbewerkingen is complexer, waardoor het gebruik van CAM programmatuur voor deze toepassingen is aan te bevelen.

4.4.1.2.2 Gebruik van CAM-programmatuur

Het aanmaken van NC programma's buiten de machine biedt het voordeel dat de verschillende NC programma's off line kunnen worden opgesteld en gesimuleerd, zonder dat de machinewerking hierbij moet worden onderbroken. Men onderscheidt drie methoden, waarbij de derde nog niet volledig is uitgewerkt:

- het gebruik van machine-afhankelijke CAM-programmatuur welke in de meeste gevallen identiek is aan de programmatuur die beschikbaar is op de machinebesturing;
- het gebruik van universele CAM-programmatuur voor het programmeren van vonk- en freesbewerkingen. Het CAM systeem heeft meestal een aantal ingebouwde NC postprocessors en is zo geschikt voor het programmeren van verschillende machines. Het instellen van de toe te passen vonktechnologie kan door directe ingave gebeuren of via een technologiebestand. Sommige CAM systemen zijn voorzien van CAD interfaces (IGES, DXF), die het inlezen van CAD informatie, aangemaakt op andere systemen, mogelijk maken. In een aantal gevallen moet echter

de nodige geometrie opnieuw worden ingevoerd, wat de kans op fouten sterk vergroot;

- het gebruik van algemene CAD/CAM systemen. Onder "algemene CAD/CAM systemen" wordt verstaan een ontwerp/bewerkingssysteem op basis van één gemeenschappelijke databank. De gereedschapsbaan wordt rechtstreeks berekend uitgaande van het CAD-model.

De meeste algemene CAD/CAM systemen hebben modules voor het programmeren van draai- en freesbewerkingen. Een aantal kan draadvonkoperaties programmeren, terwijl op dit moment (2007) geen enkel systeem gereedschapsbanen voor zinkvonkoperaties genereert.

Het gebruik van CAD/CAM voor zinkvonkerosie kan in de toekomst belangrijk worden door de beschikbaarheid van de nieuwe CL-data standaard (ISO 3592, ISO 4343). Deze "Cutter Location" data standaard beschrijft draad- en zinkvonkoperaties zowel geometrisch (baan) als technologisch (machine-instelling).

4.5 *Communicatie-/netwerkaspecten*

Communicatie-functionaliteit (operator ↔ besturing) van CNC vonkmachines evolueert op dezelfde wijze als bij andere CNC bewerkingscentra. Besturingen zijn meer en meer gebaseerd op PC-functionaliteit, met onder meer de volgende voordelen:

- Een herkenbare PC-achtige gebruikersinterface;
- Grote capaciteit geheugen- en schijfruimte;
- Datatransfer via netwerken (al of niet draadloos), CD, DVD, USB-stick, floppy;
- Integratie van de machinebesturing in het bedrijfsnetwerk (intranet/internet);
- Mogelijkheid om machinedata (o.a. status van de machine) op het intranet/internet beschikbaar te stellen.

In principe laten PC-gebaseerde sturingen toe om commercieel beschikbare of eigen ontwikkelde softwaretoepassingen te implementeren (bijv. CAM-systeem, tekstverwerking). De machinebouwers houden deze zogenaamde "open sturingen" echter nog steeds gesloten en laten de gebruiker niet toe om 'eigen' software te implementeren. De verwachting is echter, dat ook in het domein van de CNC vonkerosiemachines de openheid van de sturing zal toenemen. Bij de integratie van besturingen binnen een netwerk dienen echter wel afdoende maatregelen te worden genomen ter beveiliging tegen onbevoegd (ook intern) gebruik.

4.6 *Opmeten van werkstukken en elektroden*

4.6.1 *On line/Off line meten*

Kwaliteit gerelateerd meten blijft in de industrie nog steeds de belangrijkste, echter niet de makkelijkste, schakel binnen processen. Door goed te meten is bekend wat je maakt en ontstaat ook zekerheid dat afgeleverd wordt conform de vraag van de in- of externe klant. In werkplaatsen vindt meten al vroeg in elke cyclus plaats, beginnend met opspannen en uitrichten en het vastleggen van de relatieve positie van werkstuk, gereedschap en machine.

Meten is weten als je weet wat je meet

Om betrouwbare meetgegevens vast te leggen, wordt dan ook een grondige basiskennis van, en vaardigheid in, meten verondersteld. Vanaf 1789 (het moment dat het metrisch stelsel met de liter, de meter en de gram werd aangenomen als uniform stelsel van maten en gewichten) is meten onderwerp van gesprek. Sinds de introductie in Nederland (1820) houdt het IJkwezen toezicht op het metrische stelsel en de ijking van de maten en gewichten. De enige genormeerde waarde

voor 'lengte' is sindsdien de standaardmeter (vastgelegd als: één tienmiljoenste deel van de afstand Duinkerken-Barcelona) die in de vorm van een staaf platina aanwezig in Parijs (zie figuur 4.5).



figuur 4.5 De standaardmeter in Parijs

Op of buiten de machine meten

Alvorens een keuze te maken voor het meten op de verspaningsmachine zelf, of op een computergestuurde meetmachine (CCM), moet goed worden nagedacht over de positieve en negatieve aspecten hiervan.

Een meetbank heeft veelal als voordeel:

- een vaste, ingewerkte en deskundige bediener;
- een lager uurtarief;
- meer mogelijkheden voor genereren, vastleggen, statistisch verwerken en presenteren van gegevens binnen in-/externe netwerken met databases;
- een hogere nauwkeurigheid (mede door standaard kalibratie en betere conditionering);
- een hoge betrouwbaarheid;
- meer en geschiktere meetmiddelen;
- meet sneller.

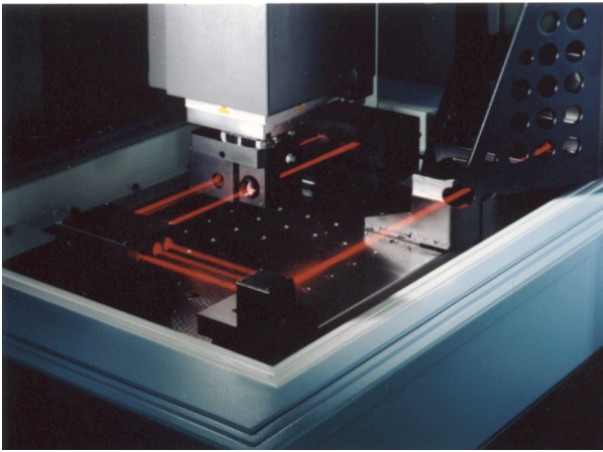
Om maximaal rendement uit een gereedschapswerktuig te halen, moet deze zo lang mogelijk effectief verspanen. Het feit dat 'dure' machinetijd verloren gaat aan meten, omspannen én opnieuw uitrichten, is zonder meer een minpunt, evenals de magazijnruimte die door (regelmatig te kalibreren) meetgereedschap wordt weggenomen.

Ondanks alle voortgang blijft het uitvoeren van betrouwbare metingen (in proces of op het einde) op de bewerkingsmachine slechts beperkt mogelijk. Systematische en toevallige afwijkingen worden door elkaar meegenomen in de meting.

Controles op afwijkingen in maatvoering zijn, binnen een van de machineprecisie afhankelijke tolerantieband, mogelijk; absoluut nameten nauwelijks.

Belangrijk is tevens een juiste interpretatie van de meetgegevens, wat simpeler ligt bij een CMM.

Vaak worden meten, meetwaarden vergelijken en uitwisselbaarheid met elkaar verward. Internationale normen voor uitwisselbaar fabriceren op maat kunnen uitsluitend worden gegarandeerd met een nauwkeurige machine die ter plaatse is afgeijkt, uiteraard met gekalibreerde meetinstrumenten zoals een laserinterferometer (zie figuur 4.6). Bij deze meetmethode voor verplaatsingen, geometriegrootheden en hoekposities wordt er bij de meting van uitgegaan dat de omgevingstemperatuur, vochtigheid en luchtdruk bekend zijn. In het algemeen geldt dat metingen op een gereedschapswerktuig, met gebruikmaking van de bewegingsassen, binnen dezelfde nauwkeurigheidsklasse liggen als de gekalibreerde precisie van de machine. Ruwweg mag men aannemen dat op machines gemeten waarden betrouwbaar zijn tot anderhalve keer de gekalibreerde nauwkeurigheid mits de machine staat opgesteld in een geconditioneerde ruimte van $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$.



figuur 4.6 Voorbeeld van een laserinterferometer

Voert men geregeld omslagmetingen op de machine uit om asafwijkingen uit te middelen, dan kan een zeer betrouwbare manier van positioneren van de werkstuk-middelpunten worden gerealiseerd. Ook werken met een taster of laser voor opmeten van gereedschappen is een betrouwbare manier van meten op de machine.

Te verwachten valt dat meer en meer machines zullen worden uitgerust met optische meetmiddelen, zodat werkstukposities nauwkeuriger bepaald kunnen worden.

4.6.2 Meten met de machine

Vonkerosiemachines laten toe het werkstuk evenals de elektrode op te meten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het principe dat er een stroom vloeit bij werkstuk/elektrode/taster contact. Op die manier kan men de positie van de werkstukvlakken bepalen. Daartoe omvat de numerieke besturing een aantal meetcycli. De meest voorkomende meetcycli zijn:

- werkstuk opmeten;
- opmeten van elektroden met behulp van een opgemeten referentiebol.

Men moet zich ervan bewust zijn, dat meten op de machine een belangrijke neventijd kan zijn op een relatief duur apparaat. In dat geval wordt zowel ter voorbereiding, als ook voor kwalitatieve controles kostbare machinetijd gebruikt. Is deze neventijd onacceptabel, dan kan het meten buiten de machine worden uitgevoerd met speciale voorinstelapparatuur of op een meetmachine (zie § 4.6.3).

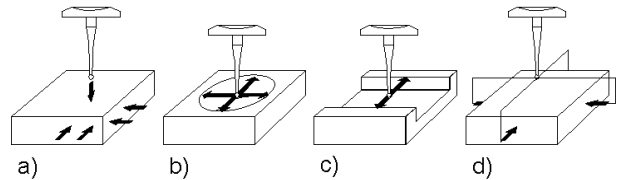
4.6.2.1 Werkstuk opmeten

Om het werkstuk op te kunnen meten, wordt de gereedschaphouder voorzien van een meettaster. De in de vonkmaschine aanwezige houder met elektrode wordt dan vervangen door die waarin de meettaster zich bevindt.

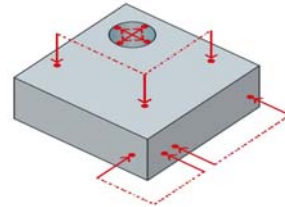
De basis vormt de standaardopspanning in het hart van de Z-(C-)as. Voorbeelden van metingen zijn (zie ook figuren 4.7 en 4.8):

- bepaling van het centrum van een inwendig of uitwendig symmetrisch profiel (rond, vierkant, rechthoekig);
- contact (toucheren);
- hoekbepaling;
- bepaling van het hart van een referentiebol.

Bij draadvonkerosiemachines wordt getouchéerd met de draad, om op die manier de positie van het werkstuk in het X-Y vlak te bepalen.



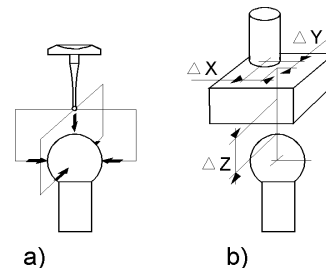
figuur 4.7 Diverse meetcycli: a) Hoekbepaling; b) en c) centrubepaling (intern); d) centrubepaling (extern)



figuur 4.8 Automatisch uitrichten in 3D: bovenkant met taster, zijkanten met de draadelektrode

4.6.2.2 Opmeten van elektroden (zinkvonken)

Het volledig opmeten van elektroden is meestal beperkt tot cilindrische, vierkante en rechthoekige elektrodevormen. Complexe elektroden zijn moeilijker op te meten en daarom zijn hiervoor referentievlakken nodig. De meetnauwkeurigheid bedraagt circa $5\text{ }\mu\text{m}$ (zie ook figuur 4.9).



figuur 4.9 a. Automatische positionering door middel van een referentiebol;
b. Excentriciteitsmeting van de bewerkings-elektrode door middel van een referentiebol

4.6.3 Meten buiten de machine

Door de metingen buiten de machine te verrichten, kan men de kostbare machine-uren maximaal benutten. Tevens kan men naast kwalitatieve controles de verschillende benodigde correctiewaarden vastleggen. Als dit alles vroegtijdig gebeurt, kan dit bijdragen tot een efficiënte organisatie van het CNC vonken.

Voor meetmachines is speciale programmatuur ontwikkeld om naast de gebruikelijke controlemetingen ook nog de gewenste instelwaarde vast te leggen, geschikt voor diverse vonkmaschinen.

4.6.4 Vastleggen van correcties

Het is voor de hand liggend dat alle gegevens van elektroden en werkstukken worden opgeslagen. Wordt via de machine opgemeten, dan worden correctiewaarden automatisch in de besturing opgeslagen. Wordt via een meetmachine gemeten, dan is ook dit gedeelte van het proces verder te automatiseren. De meetwaarden kunnen via netwerkverbinding (of andere gegevensdragers, zoals floppy of USB-stick) van de meetmachine naar de vonkmaschine worden overgedragen. Met een geheugenchip op de houder is directe invoer mogelijk.

De volgende stap kan zijn om de meetmachine in een netwerk op te nemen samen met de vonkmaschine, zodat van één gegevensbank gebruik wordt gemaakt.

Een strakke registratie en organisatie van elektroden, werkstukken en NC programma's maakt vergaande automatisering mogelijk (VDI 3402, deel 5).

4.7 Opspannen

4.7.1 Inleiding

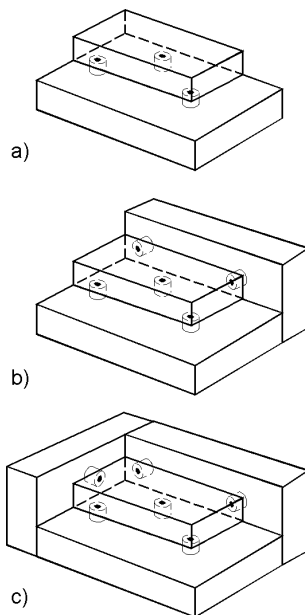
Bij het opspannen van zowel de elektrode als het werkstuk is in principe sprake van de navolgende handelingen:

- opleggen op 3 punten (figuur 4.10a);
- aanleggen tegen 2 punten (figuur 4.10b);
- blokkeren van beweging ten opzichte van 1 punt (figuur 4.10c);
- klemmen of opsluiten.

Door het opspannen worden elektrode en werkstuk met de vonkmachine verbonden, met als doel een eenduidige referentie gedurende de gehele bewerking. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met de elektrische geleiding die nodig is voor het goed verlopen van het vonkproces.

Met behulp van de bewegingsassen X, Y, Z en C kunnen vervolgens elektrode en werkstuk nauwkeurig in een gedefinieerde positie ten opzichte van elkaar worden gebracht, zodat de vonkbewerking kan plaatsvinden.

In tegenstelling tot de meeste andere bewerkingsmethoden is voor het bewerken van een werkstuk geen standaard vormgereedschap beschikbaar.



figuur 4.10 Principe van het opspannen

Voor vrijwel iedere bewerking dient de elektrode apart te worden aangemaakt, bij voorkeur op een genormaliseerde houder.

Naast het in het coördinatensysteem brengen van het werkstuk bij het opspannen, wordt er extra aandacht gevraagd om ook de elektrode uit te lijnen.

Bij het conventioneel zinkvonken is het elektrode-uitrichten vereenvoudigd door speciaal ontwikkelde opspansystemen te gebruiken. Hierdoor worden onrendabele steltijden op de machine gereduceerd. Bij het CNC vonken ontkomt men niet meer aan inzet van deze speciale opspansystemen voor elektroden en in mindere mate aan die voor de werkstukken.

Wil men bij deze bewerking het optimale rendement bereiken, dan moeten afmetingen, verplaatsingen en verdraaiingen van de elektrode en het werkstuk, alsmede

de ondermaten van de elektrode van tevoren eenduidig bekend zijn. Hierdoor is het mogelijk het geheel van acties vast te leggen en vervolgens te programmeren.

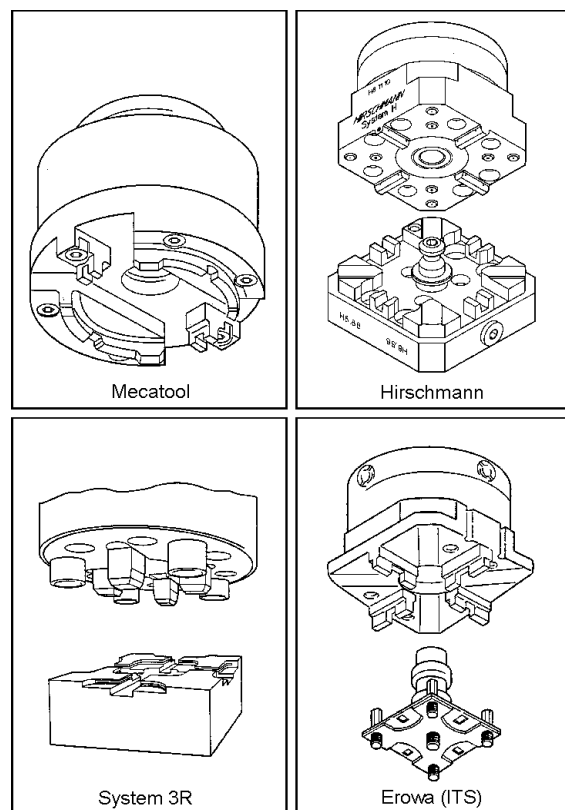
4.7.2 Opspannen van de elektrode

Een van de eerste uitvoeringen van een universeel opspansysteem voor elektroden ging uit van het span-tangprincipe, waarbij een fixeerpenn het verdraaien voorkwam. Door de elektroden op dergelijke pennen aan te maken op bewerkingsmachines uitgerust met hetzelfde opspansysteem, was men er zeker van dat deze in lijn werden aangemaakt. De huidige span-systemen zijn geschikt voor het werken in vervuild diëlektricum en het automatisch wisselen met hoge repetiteernauwkeurigheid.

De verschillende systemen hebben ieder hun specifieke voordelen met betrekking tot:

- snel opspannen ruw materiaal;
- hoge nauwkeurigheid ($< 10 \mu\text{m}$);
- lage exploitatiekosten;
- goede spoeling;
- stabiliteit.

In figuur 4.11 wordt een overzicht gegeven van de vier meest gebruikte opspansystemen.



figuur 4.11 De vier meest gebruikte opspansystemen

Alle spansystemen fixeren de elektrode met een bepaalde nauwkeurigheid (ca. $5 \mu\text{m}$), zodat het uitrichten hooguit een controlefunctie heeft. Nastellen op de vonkmachine is niet nodig en veelal niet mogelijk. Hierdoor wordt de steltijd op de machine minimaal.

Omdat elektroden vaak complexe vormen en voor het vonkproces ook nog verschillende ondermaten hebben, verdient het aanbeveling om volgens de coördinatennulpunten van elektrode en werkstuk te positioneren. Hierdoor kan voor de verschillende elektroden een relatief eenvoudig programma worden gemaakt zonder in deze fase al rekening te hoeven houden met verschillende ondermaten.

De houder waarin de elektrode is opgenomen met zijn vaste fixeerpunt kan nu zonder elektrode, maar met speciale taster of meetklok, worden afgesteld ten opzichte van het werkstuk. Alleen zo kan de CNC zinkvonkmachine optimaal worden ingezet, zeker als het elektrode wisselen wordt geautomatiseerd.

Elektrodegegevens

De machinebesturing beschikt over registers waarin men de diverse waarden van een elektrode kan vastleggen. Als de elektrode niet in het hart van het coördinatensysteem van de opspanning is geplaatst, kunnen voor het vonken de correcties op de X-, Y- en C-waarden worden ingegeven (zowel kleine als ook grotere aanpassingen).

Bovenstaande gegevens zijn machine-afhankelijk. De elektroden dienen ieder voor zich gecodeerd te zijn ter identificatie evenals bijbehorende ondermaten. Wil men tot een universele manier van programmeren komen, dan zal men voor de inrichting van dergelijke registers tot internationale afspraken (standaardisering) moeten komen.

4.7.3 Opspannen werkstuk (zinkvonken)

Voor het te bewerken werkstuk is in principe geen bijzondere benadering nodig. Er wordt gehandeld zoals op elke andere bewerkingsmachine. Afhankelijk van de grootte van het werkstuk kan ook hier optimaal gebruik worden gemaakt van de opspan-systemen. Nadrukkelijk dient gelet te worden op de geschiktheid voor het functioneren in vervuld diëlektricum. Kleinere werkstukken kunnen op het machinebed op dezelfde spansystemen worden opgenomen als de elektrode, terwijl grotere werkstukken worden opgespannen op zogenaamde pallets. Dit heeft zin als men ook met het opstellen op de machine van de werkstukken steltijd wil besparen en/of ook werkstukken eventueel automatisch wil gaan wisselen.

Het is mogelijk om op de machine vaste referentiepunten op te nemen in een register. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om snel verschillende werkstukken op te spannen en, indien vereist, flexibel bewerkingen te onderbreken voor een tussentijds spoedeisend werkstuk.

Naar analogie van het elektrode-opspannen is een strakke organisatie en registratie nodig.

4.7.4 Opspannen werkstuk (draadvonken)

Het meest gangbare type draadvonkmachine werkt met een verticaal lopende draadelektrode. Deze doorlopende, eindloze draad wordt als standaard gereedschap vanaf de bovenarm (met draadgeleiding, stroom- en diëlektricumtoevoer) door het werkstuk naar de onderarm geleid. Ten opzichte van zinkvonken geeft dit duidelijk een andere situatie voor wat betreft het opspannen van werkstukken. Deze worden als het ware, 'vliegend' opgespannen op een horizontaal oplegvlak (parallel aan de machinetafel), binnen het werkbereik van de machine gebracht. Bovenzijde basisoplegvlak en onderzijde werkstuk liggen op het machinenulpunt in Z-richting of op een machinespecifiek punt. In de meeste gevallen is voor opspannen een spantoegift nodig. De oplegging op een vaste referentiewaarde kan twee- of driezijdig zijn. De daarvoor meestal gebruikte, precisie vlakke basislijsten, vlakke basis balken, ramen of spanbokken moeten, om botsing te voorkomen, een machinespecifieke minimumafstand buiten het bereik van de vonkkoppen liggen. Het spanbereik is dus duidelijk groter dan het werkbereik. Op de oplegging wordt het werkstuk met normale spanmiddelen als kikkers, parallelklemmen, of (voor)instelbare spanmallen of -ramen en speciale, automatisch te wisselen draadvonkspansystemen en paletten geklemd. In prin-

cipe dienen zowel de onderkant als de bovenkant van het werkstuk vrij toegankelijk te zijn. Dit om de zich vlak erboven of eronder ($\pm 0,1$ mm, kritisch om optimale spoeling te verzekeren) bevindende vonkkoppen vrij te laten bewegen. Voor ongestoord bedrijf mogen er zich ook geen storende uitsteeksels op of onder bevinden (botsingsgevaar en slechte spoeling, dus minder snel snijden).

4.8 Wisselsystemen

Systemen voor het automatisch wisselen van elektrodes en/of werkstukken helpen de autonomie en de productiviteit van CNC vonkmachines te verhogen. De bijbehorende elektrode-/werkstukopspansystemen zijn meestal ontworpen met het oog op handmatig en automatisch wisselen. De wisselaar is daarbij vaak een optie op de machine. Onafhankelijk of het gaat om een 'stand alone' machine of een combinatie-opstelling (bijvoorbeeld een meervoudige vonkcel of een vonkfreescel, zie figuur 4.12) is een wisselsysteem meestal opgebouwd uit een enkel- of meervoudig magazijn (eventueel voor elektrodes én werkstukken gezamenlijk), één of meerdere grippers (met chip-uitleesmogelijkheden) en een manipulatievoorziening (translatie en/of rotatie: door de machine zelf verzorgt of door een wisselarm of een robot).



figuur 4.12 Combinatiemachine voor vonken en frezen

Aangezien er meerdere uitvoeringen bestaan, zal afhankelijk van het werkpakket, het investeringsbudget en de beschikbare gereedschapsmachine moeten worden overwogen welk type het meest geschikt is. In het algemeen zijn automatische wisselaars onder te verdelen in de volgende categorieën:

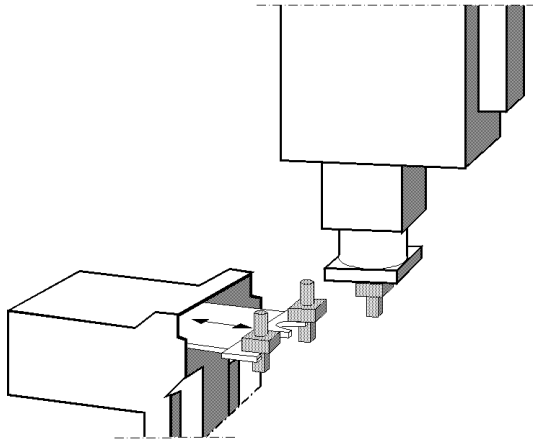
- ▶ apparaten gestuurd door de CNC eenheid van de vonkmachine of een separate eenheid;
- ▶ statische (niet bewegende) of dynamische modellen;
- ▶ integraal onderdeel of los opgesteld van de vonkmachine;
- ▶ geschikt voor elektrode- of werkstukwisselen of voor beide;
- ▶ voorzien van een lineair magazijn, een rotatiemagazijn of een combinatie;
- ▶ robotsysteem al of niet universeel van karakter voor één afzonderlijke of voor meerdere CNC machines.

4.8.1 Elektrode wisselen met de machine

De meest eenvoudige uitvoering is een statische wisselaar met een magazijn (zie figuur 4.13) waarin een gering aantal elektroden zijn op te nemen, links en/of rechts, of onder de pinole (spil) in de werkbak van de machine.

De machinebesturing zelf zorgt voor een relatieve beweging van de kop naar het vaste wisselpunt. Overname uit het magazijn kan zelfstandig of met behulp van een wisselarm of -schuif gebeuren. Deze

goedkope mogelijkheid is praktisch goed toepasbaar voor kleine elektroden. Dit neemt echter nogal wat bruikbare ruimte in beslag in de bak.



figuur 4.13 Stationaire wisselaar

Grotere elektroden en grotere aantallen kunnen in een magazijn naast de machine worden opgenomen (zie figuur 4.14). Wisselen gebeurt dan zoals dat ook bij freesmachines gebruikelijk is met een enkel- of tweevoudige wisselarm.



figuur 4.14 Roterende 16-voudige wisselaar

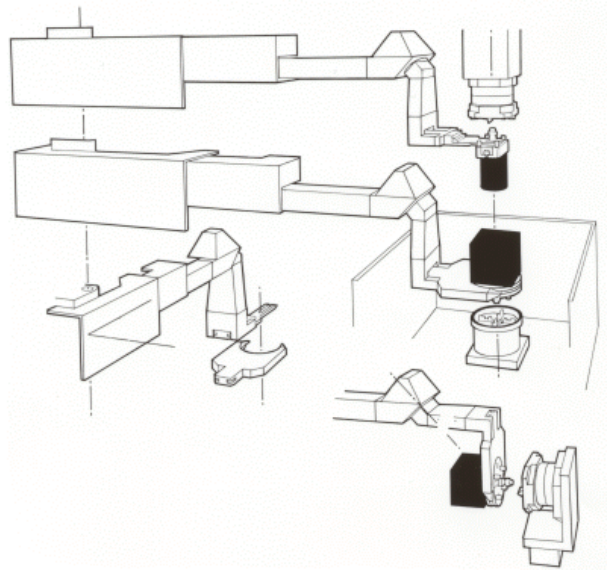
Afhankelijk van het soort elektrodemagazijn plaatst de schijf, ketting of schuif zich in de gewenste positie, alvorens de vonkdoorn wordt uitgenomen of teruggeplaatst. Daarbij komt het zowel voor dat de elektrode een vaste positie heeft, als dat naar een willekeurige plaats wordt gewisseld. Herkenning via barcodes of een ingebouwde chip komt in dat geval in toenemende mate voor. Door middel van een extra wisselelement (extra 'hand') ontstaat de mogelijkheid met dezelfde wisselaar eveneens werkstukken te wisselen. Voordelen zijn, dat hiermee de opspanruimte volledig is te benutten en wisseling snel en zonder de machinebesturing extra te belasten geschiedt.

4.8.2 Robotwisselaar

Hierbij staan magazijn en automatische wisselaar,

zelfstandig werkend, opgesteld naast de vonkmachine. De mogelijkheid bestaat om met de robotarm zowel elektroden als werkstukken te wisselen, aan de vonkzoude zowel als in de bak (zie figuur 4.15). Er bestaan uitvoeringen die meerdere (draad- en zink-) vonkmachines kunnen verzorgen. Hierdoor is men in staat om zelfs bij relatief kort-cyclische bewerkingen vele uren onbemand te werken. Het wordt mogelijk om met dergelijke aanvullende investeringen de machine meer dan 3000 uur per jaar in te zetten.

Zodra een CNC vonkmachine is uitgerust met een automatische wisselaar, een voldoende groot magazijn voor elektroden en/of werkstukken en een grote geheugen-capaciteit voor technologie-, geometrie- en elektrode-/werkstukgegevens, heeft men een zogenaamd erodeercentrum ter beschikking.



figuur 4.15 Voorbeeld hoe met één robotarm zowel elektroden als werkstukken kunnen worden gewisseld

4.8.3 Palletwisselaar

Zowel bij machines met een kruistafel als met een vaste tafel kunnen ook zwaardere of series kleinere werkstukken automatisch worden geplaatst. Hiervoor zijn op het spansysteem aangepaste palletwisselaars op de markt die te koppelen zijn met standaard vonkmachines. Eveneens bestaan er machine-uitvoeringen waarbij zelfstandig hele tafels te wisselen zijn, zoals dat ook bij conventionele bewerkingscentra gebeurt.

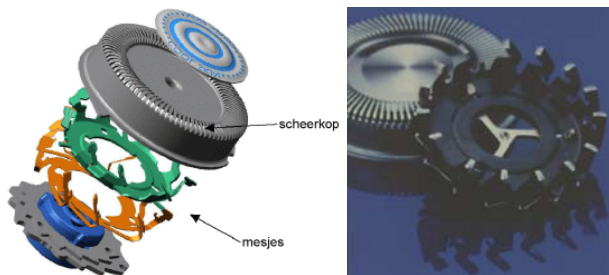
4.9 Productievonken

Vonkverspanen wordt, vooral vanwege de hoge nauwkeurigheid die bereikbaar is wat maat, vorm en ruwheid (lees: oppervlaktegesteldheid) aangaat, al jaren lang in de productie toegepast, daar waar de specifieke voordelen de doorslag geven. Dit ondanks het feit dat productie tegenwoordig in het algemeen hoge verspaningssnelheden en korte doorlooptijden vereist. Uitgaande van de ingebouwde onafhankelijkheid van de hardheid en sterkte (ook in minimale zin) van het uitgangsmateriaal, het contactloze karakter van het proces, een relatief breed diktebereik, de hoge autonomie, beheersbaarheid en bedrijfszekerheid, doen zich verschillende applicaties voor in productiematige zin. Met name betreffende hoogwaardige componenten, kleine profielen en producten.

Onder productievonken wordt hier verstaan het bewerken van grotere aantallen identieke producten of

productfamilies met behulp van een van de voorkomende varianten van de vonkerosieve techniek, zoals zinkvonken, vonkboren, draadvonken, vonkslijpen of microvonken. Zeker niet vergeten dient te worden dat in laboratoriumomstandigheden (wel of niet als productie te karakteriseren) veel wordt gevondt.

Op grond van het trage procesverloop, de sterke concurrentie van bijvoorbeeld hogesnelheids- en hardverspanen en het duale karakter (vooraf product-specifieke profielgereedschap(pen) aanmaken is een absolute voorwaarde) komt zinkvonken het minst voor productiedoeleinden in aanmerking. Bewerkingen als het afvlakken of vlakvonken van uiterst flexibele producten als roterende scheermesjes (figuur 4.16) zijn daarop een uitzondering (die de stelling nog eens bevestigt). Verfijnd traditioneel slijpen valt hier af, vanwege de nog te hoge verspaningskrachten en de optredende braamvorming.

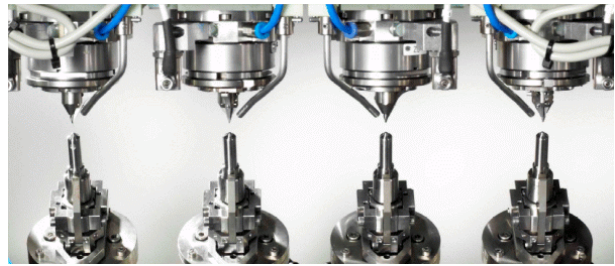


figuur 4.16 Het vonken van scheermesjes

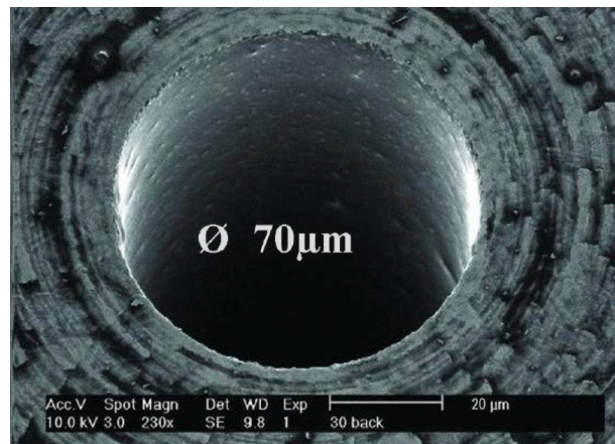
Voor doorgaande en blinde gaten komt ook vonkboren in aanmerking als productietechniek. Vooral omdat fjndoseren van vloeistoffen en gassen naast gecontroleerd ontluchten een groeiende rol speelt binnen onder meer de auto-industrie, alsmede de lucht- en ruimtevaartindustrie. Daarvoor zijn speciale machines in de handel van kleine tot zeer grote afmetingen (zie figuur 4.17). Deze kunnen automatisch enkel- of (steeds meer) meervoudig snel vonkboorbewerkingen (zie figuur 4.18) uitvoeren (tussen $\varnothing 50 \mu\text{m}$ en 2 mm, zie figuur 4.19). De boringen kunnen conisch oplopend of aflopend zijn en de doorsneden hoeven niet altijd cilindrisch te zijn. De productspecifieke spantangen laten schuinstellen van de met 500 tot 1.000 toeren per minuut roterende



figuur 4.17 Speciale precisievonkboormachine voor het aanbrengen van microboringen op vier producten tegelijk met behulp van vier onafhankelijk servokoppen en generatoren



figuur 4.18 Vier-voudige productspecifieke opspanning van de roterende en indexerende elektroden en werkstukken



figuur 4.19 Voorbeeld van een precisieboring vervaardigd op de viervoudige vonkboormachine van figuur 4.17

elektrode toe. Ze gaan tot grote dieptes met L/D verhouding tot 200 inclusief in-proces meten, detectie van doorkomen en automatisch wisselen van standaard-elektrodes met handelsafmetingen tot maximaal 400 mm lengte.

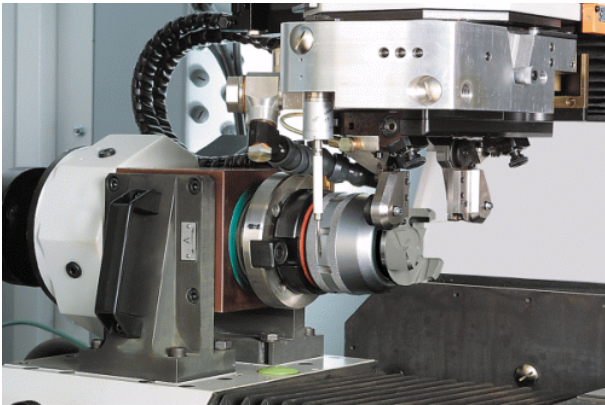
Draadvonken is momenteel ongetwijfeld de meest geschikte techniek in dit opzicht en komt wel degelijk in de productie voor, mede dankzij geavanceerde draadmaterialen en speciale, geavanceerde en ver geautomatiseerde draadvonkmachines met soms meervoudige draadloop, voor relatief fragiele producten en prototypes, maar ook vanuit het uitgangspunt van moeilijk bewerkbare materialen. In de onbemande fabricage voor het snijden van de gleuven van Philips scheerkappen werken zo bijvoorbeeld batterijen omgebouwde zinkvonkmachines in 24-uurs bedrijf met een 10-voudige draadloopsysteem en verfijnde indexerkoppen. Figuur 4.20 toont een opstelling van een aantal zinkvonkmachines naast elkaar.

Ook in de seriematige fabricage van hoogwaardige en dunwandige medische componenten (al of niet als gestapelde plaatonderdelen) biedt draadvonken (met geautomatiseerde aan- en afvoer van producten) genoeg technische voordelen om economisch mee te kunnen doen. Speciale hulpstukken maken vonkerosief snijden van complexe, hoogwaardige frezen uit moeilijk verspanbaar of slijpbaar materiaal mogelijk (zie figuur 4.21).

Het afgelopen decennium heeft vonkslijpen een hergeboorte beleefd in de productie van speciale PKD- en CBN-snijgereedschappen, die op andere wijze met dezelfde kwaliteit niet economisch te fabriceren zijn. Vrijwel elke gerenommeerde fabrikant van gereedschapsslijpmachines (zoals Vollmer, EW AG, Walter, Haas, Lach Diamant, enz.) levert een of meer op die niche-toepassing geconstrueerde CNC-vonkslijpmachines zoals figuur 4.21 laat zien.



figuur 4.20 Een aantal zinkvonkmachines op rij



figuur 4.21 Zes-assige draadvonkmachine voor het opmeten, draadvonken en nameten van PKD profielgereedschappen

Voor de nabije toekomst komt microvonken ook als productietechniek voor mechatronische componenten (zoals bijv. elastische scharnierconstructies, medisch gereedschap, enz.) binnen de microtechniek sterk opzetten. Veel vonkmachinebouwers zien dat intussen in, gelet op de vele opkomende "nano"-modellen vonkmachines van uiteenlopende afmeting. Omdat hier sprake is van een relatief gering te verspanen volume gaat het vonkfrezen met een standaardelektrode in deze μ -sfeer voor een doorbraak zorgen, mede door een sterk vereenvoudigde programmering. Vonkproces, bijbehorende apparatuur en hulpgereedschap zijn intussen zover geëvolueerd, dat zelfs met de als maar stijgende producteisen boringen (verstuivers), miniprofileringen (voor textieltoepassingen) en mini-contouren (voor bijv. MEMS) met dergelijke aangepaste machines vonkerosief probleemloos in grote en kleine series zijn aan te brengen.

Hoofdstuk 5

Machineselectie, -afname en veiligheid

5.1 Inleiding

Investeren in machines (ter vervanging, economisch/technische uitbreiding of rationalisering) en invoering in het bedrijf vraagt een grondige gestructureerde aanpak. In een dergelijk aankooptraject is (na vaststelling dat de investering zinvol, haalbaar en economisch verantwoord is) globaal onderscheid te maken in een drietal fases:

- ▶ de algemene oriëntatie, voorbereiding en selectie (bestaand en toekomstig werkpakketonderzoek en opstelling specificatie);
- ▶ de commerciële fase (budgettaire en kostprijs-technische aspecten, inclusief bestelling);
- ▶ de machineafname en inbedrijfstelling.

Belangrijk aspect hierbij is, dat men gebruikmaakt van de meest recente normen m.b.t. de machines.

In de praktijk blijkt dat de **machineselectieprocedure** staat of valt met de betrokkenheid van (zoveel mogelijk) medewerkers.

5.2 Stappenplan aankoopprocedure

- Aan te bevelen is het traject (goed gedefinieerd qua opdracht en technische, organisatorische en budgettaire speelruimte) in te gaan met een project- of werkgroep van gemotiveerde betrokkenen uit het bedrijf. Wees reëel, want elke extra optie, eis en kwaliteitsverzwaring kost geld. Denk aan bijkomende kosten als selectie-uren, reizen, opleiding, afname, inbedrijfstelling en onvoorziën, en neem die mee in het komende prijsplaatje.
- Start met het (huidige en toekomstige) werkpakket gestructureerd te inventariseren en te analyseren, naar o.a.:
 - opdeling naar de aard van werkzaamheden en werkstukken:
 - bewerkingsproces(sen) al of niet in combinatie (en eventuele alternatieven);
 - kubisch/cilindrisch/vrijgevormd;
 - te bewerken materialen;
 - groot, middel of klein van afmetingen;
 - moeilijkheidsgraad: complex of simpel (meten op de machine en/of extern);
 - seriegrootte;
 - nauwkeurigheidsklasse en toleranties;
 - voldoende bezetting;
 - automatiseringsgraad;
 - 3- of 5-assige machine;
 - benodigd snij- en hulpgereedschap (houders, pallets, meetmiddelen; incl. inventarisatie bestaande pakket);
 - extra CAM-, postprocessor- en netwerksoftware nodig;
 - scholing en training;
 - consequenties voor de organisatie, machinepark en werkplaats;
 - beschikbare ruimte, bedrijfsmiddelen, bereikbaarheid, fundering;
 - toekomstvisie.
- Leidt daaruit het eisenpakket af voor de komende investering.
- Stel een machinespecificatie op met de belangrijkste eisen (beginnend met werkbereik, aantal bewegingsassen (hoeveel simultaan), functionele, technologische en strategische parameters, automatiseringsvoorzieningen, benodigde toebehoren, enz.).

- Bepaal via vertegenwoordigingen, beurzen, bedrijfsbezoek collega's, literatuur, internet, enz., de in aanmerking komende fabrikanten en vraag gericht schriftelijke, mondelinge en internetinformatie op.
- Stel van al de gewenste en verstrekte gegevens een overzichtstabel of matrix op (zie **bladzijde xx**) met waardering per item (let daarbij terdege op de voorschriften met betrekking tot de arbeidsomstandigheden, milieu en veiligheid).
- Bereken zo goed mogelijk de consequenties op het machine-uurtarief en de stukprijs.
- Ga na grondige selectie (geen of onvolledige informatie ontvangen betekent afvallen) verder door een beperkt aantal (± 3) machines technisch/economisch dieper uit te spitten op mogelijkheden, technologie, prijs, ondersteuning, service, garantie(duur), opleiding en inbedrijfstelling. Vraag offerte aan.
- Laat (bij voorkeur in eigen aanwezigheid) een praktijktest uitvoeren aan de hand van bijv. standaard proeven van de fabrikant én op een voor het eigen werkpakket representatief werkstuk (let op tijd, programmeer- en bedieningsgemak, ruimtecondities, werking machine en resultaten (inclusief meetprotocol, meetmethodes en -middelen)).
- Vergelijk de kandidaten op prijs/prestatie en testresultaten en onderhandel.
- Maak, voorafgaand aan de bestelling, strakke, definitieve afspraken (concrete waarden vastleggen) over prijs en betalingscondities, toegeleverde hard- en software, leveringscondities (incl. voorlopige (in de fabriek) en definitieve afname (in de eigen werkplaats, met afnametest), inbedrijfstelling (preventief) onderhoudscontract en garantie).
- Bereidt personeel en (werkplaats)ruimte (o.a. op voorzieningen als afzuiging, brand- en lekkagebeveiliging) voor op de komende installatie in het bedrijf.
- Neem definitief af op vastgestelde condities en meetwaarden (ook van het testwerkstuk).

5.3 Machinekarakteristieken

In dit hoofdstuk worden ter vergelijking afzonderlijk de voornaamste kenmerken vermeld van zink- en draadvonkmachines voor het selecteren, aanvragen en bestellen van dergelijke machines. Vervolgens worden praktische aanbevelingen gedaan voor de afnameprocedures.

Besteller en gebruiker van vonkerosiemachines kunnen door gebruik te maken van deze aanbevelingen hun eisen en wensen vastleggen en daardoor de aanbiedingen beter vergelijken. Verschillen tussen de machines vallen dan beter op en openen de mogelijkheid voor meer gerichte technische en zakelijke besprekingen. Bovendien is de afnamecontrole eenvoudiger. Voor de vonkmachinefabrikant is gebruik van deze aanwijzingen nuttig, omdat hij daardoor de kenmerken van de machine en de verdere uitrusting overzichtelijker en systematischer kan aangeven. Daardoor beschikt hij later ook over een goed overzicht van de bestelling.

De opgenomen machinewaarden kunnen betrekking hebben op de statische of dynamische kwaliteit van het mechanische deel van de machine, op de vonk-generator, op de besturingseenheid, op het diëlektricumaggregaat, op de werkstukopspanning, enz.. Evengoed zijn deze specificaties gericht op de voor het bewerkingsproces kenmerkende bewerkings-eigenschappen, alsmede (indien nodig of gewenst) voor een overeen te komen afnameprocedure ter acceptatie van de gekozen vonkmachine. Gezien het hoge investeringsniveau dat bij machines speelt, verdient het aanbeveling tenminste bij installatie op de werkplek een eindafname uit te voeren.

Met name in geval van mogelijke afwijkingen, kan een grotere zekerheid worden verkregen, door bij de fabrikant de meetgegevens op te vragen die tijdens de fabricage van specifieke machineonderdelen al gegeneerd zijn. Die voorlopige afname vraagt van beide partijen (fabrikant/verkoper en gebruiker/koper) tijd, geld en inspanning. Een juiste afweging van al deze factoren ten opzichte van elkaar is zinvol. Het geheel dient van tevoren contractueel te worden vastgelegd.

Na de afname kan het daarbij opgestelde meetprotocol uitstekend functioneren als referentie op een later tijdstip ter vergelijking van bijvoorbeeld de momentane mechanische conditie. Het fabriceren van een zorgvuldig geselecteerd proefwerkstuk in de afnameprocedure als praktische 'verspaningstest' biedt de mogelijkheid bepaalde afwijkingen indirect te meten. Voor testdoeleinden is deze laatste methode ook periodiek tijdens de levensduur van de machine goed te gebruiken.

Voor nauwkeurige gereedschapswerktuigen als een CNC-draadvonkmaschine (met langdurige continu inzet) is het gedrag in de tijd gezien (als gevolg van optredende plaatselijke opwarming) een erg belangrijke factor. Om inzicht in dat thermische gedrag te krijgen, verdient het aanbeveling een duurttest (12 à 16 uur lang) op te nemen in de afnametest.

Richtlijnen

De richtlijnen in de volgende paragrafen (5.4 voor zinkvonkerosie en 5.5 voor draadvonkerosie) geven het minimum aan gegevens, nodig ter typering van de desbetreffende vonkerosie-installatie en geldt voor alle vonkerosieve bewerkingen vermeld in hoofdstuk 2 "Zinkvonkerosie" en 3 "Draadvonkerosie".

Na een beknopte beschrijving van de machine-installatie worden gedetailleerde omschrijvingen gegeven met de afname-eisen (met en zonder elektronische compensatie) voor de machinedelen (statische, dynamische en thermische, systematische en/of toevallige geometrie en/of positieafwijkingen (P: positieonzekerheid, Pa: positieafwijking, Ps: positiespreiding), omkeerfout (U), trillingen met bijv. VDI/DGQ 3441). Voor het vaststellen van de gegevens, nodig voor beoordeling en afname van de machine, zijn vervolgens beproevingsmethoden (met de wijze van uitvoering en meetmiddelen) opgenomen.

Richtlijnen dienen tot het standaardiseren van de aanvragen, aanbiedingen en technische beschrijvingen (zie o.a. ref. 40). Niet besproken zijn de accessoires die normaal wél worden meegeleverd (als opspansystemen, elektrodehouders, enz.), maar niet tot de installatie behoren.

5.4 De zinkvonkmaschine

5.4.1 Algemene omschrijving van de machine

- ▶ Vonkerosieve bewerkingsmethode volgens de begrippen en grootheden, vastgelegd in hoofdstuk 1 en 2.
Voorbeeld: Installatie voor het vonkerosief bewerken
- ▶ Fundamentele opbouw van de vonkerosiemachine.
Voorbeeld: Gelast C-frame en verzinkbare diëlektricumbak
- ▶ Generatortype.
Voorbeeld: Statische pulsgenerator
- ▶ Diëlektricumstelsysteem.
Voorbeeld: RVS stalen bak; filtering door papierpatronen
- ▶ Speciale uitrusting.
Voorbeeld: Automatische werkstukwisselaar

Algemeen voorbeeld: CNC zinkvonkerosiemachine met gelast monobloc C-frame, verzinkbare werkbak en pulsgenerator. Diëlektricumstelsysteem met doorstroomfilters en waterkoeling.

5.4.2 Installatie- en opstellingsgegevens

Transport en opstelling

- ▶ Bruto transportgewicht, aantal en afmetingen van de machine(delen) in verpakking.
- ▶ Gewicht en afmetingen van de delen voor de inbedrijfstelling (nettogewichten).
- ▶ Opstellingsmethode (funderingseisen, trillingsdemping).
- ▶ Maximale puntbelasting (bedrijfsklaar).

Plaatsruimte

De plaatsruimte (inclusief de minimale deuropeningen en minimale hoogte) wordt in een plattegrond aangegeven, met de maten van de bouwgroepen en de plaats van de aansluitingen voor de toe- en afvoerleidingen. Eveneens moet rekening worden gehouden met een eventuele afzuiginstallatie, klimaatregeling, automatische werkstukwisselaar, enz..

Aan te geven zijn de op 0,1 m afgeronde afmetingen van de ruimte, waarin de installatie moet worden opgesteld, rekening houdend met de vereiste afstanden tot muren, overige machines en installaties, alsmede de minimumhoogte van de bedrijfsruimte.

Ook van de ruimte voor bediening moeten de maten zijn vermeld (Arbowet), evenals de ruimten voor onderhoud en controle.

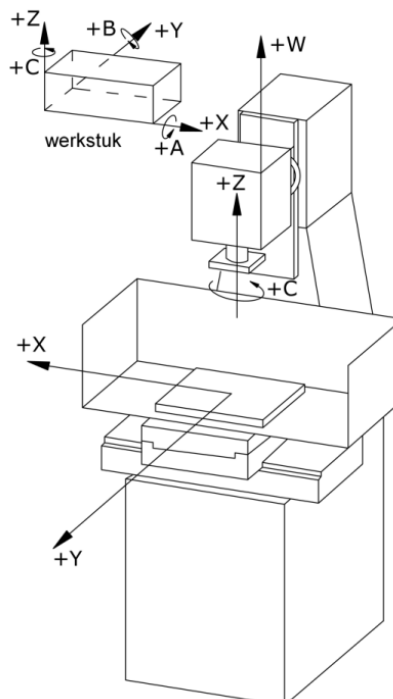
Aansluitingen en bedrijfsmiddelen

- ▶ Elektrisch aansluitvermogen (kVA), netspanning (380V/60Hz), toelaatbare spanningsvariatie (%), netfrequentie, $\cos \phi$ bij nominale belasting.
- ▶ Gespecificeerde gegevens voor toe- en afvoerwater (druk, debiet, temperatuurbereik, enz.).
- ▶ Gespecificeerde gegevens voor perslucht (druk, debiet, toelaatbare vochtigheid, enz.).
- ▶ Gespecificeerde gegevens voor de afzuiginstallatie (capaciteit, aantal zuigmonden: star/flexibel).
- ▶ Gespecificeerde gegevens voor diëlektricum en filter (toevoerdebiet, -druk en filtercapaciteit).
- ▶ Gespecificeerde gegevens voor smeermiddelen.

5.4.3 Het mechanische systeem

5.4.3.1 Machinetype

De opbouw van de zinkvonkmaschine wordt in een schets aangegeven (figuren 5.1). Voor beschrijving



figuur 5.1 Coördinatenstelsel van een zinkvonkmaschine

van de machine en het werkbereik ($l \times b \times h$) wordt een rechthoekig coördinatenstelsel (X, Y, Z) genomen [ref.11]. De machinedelen (bijv. kop, werkstuktafel, servomechanisme, enz.) en de assen van de machine moeten daarin zijn aangegeven. De constructie en het fabricagetype van de machine dienen kort te zijn beschreven.

Voorbeeld:

Verticale zinkvonkmachine met gelast C-frame, spanningsvrij gegloeid. Elektro-mechanisch aanzetmechanisme met voorgespannen rollengeleiding. Rotatie (C-as) in de vonkkop. Verzinkbare diëlektricumbak.

5.4.3.2 Omschrijving van de samenstellende delen

X-as

- Geleiding
- Aandrijving
- Verplaatsingssnelheid
- Verplaatsing
- Asnauwkeurigheid
- Instelling
- Meetstelsel/-resolutie
- Begrenzing
- Toelaatbaar gewicht

Voorbeeld:

horizontale vlakke geleiding met onafhankelijke rollen elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
ijlgang 800 mm/min; voeding 555 mm/min
500 mm
0,005 mm
geprogrammeerd
glasliniaal/1 μ m
in CNC geheugen vastgelegd
250 kg

Y-as

- Geleiding
- Aandrijving
- Verplaatsingssnelheid
- Verplaatsing
- Asnauwkeurigheid
- Instelling
- Meetresolutie
- Begrenzing
- Toelaatbaar gewicht

Voorbeeld:

horizontale vlakgeleiding met onafhankelijke rollen elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
800 mm/min
200 mm
0,005 mm
geprogrammeerd
1 μ m
in CNC geheugen opgeslagen
250 kg

Z-as (hoofdas zinkvonken; aanzet)

- Geleiding
- Aandrijving
- Verplaatsingssnelheid
- Verplaatsing
- Asnauwkeurigheid
- Instelling
- Begrenzing
- Klemrichting
- Planetairmodes
- Toelaatbaar (centrisch) gewicht aan (snel) wisselbare elektrodehouder (nominale belasting)¹⁾

Voorbeeld:

hydrostatische geleiding met tegen verdraaiing beveiligde pinole (spil)
elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
traploos van 0,01-25 mm/s (met "high jump")
200 mm
0,005 mm
geprogrammeerd
in CNC geheugen vastgelegd
automatische rem
cilindrisch, conisch (openend of sluitend), willekeurige geometrie, hoekfunctie, bol- of kegelvorm

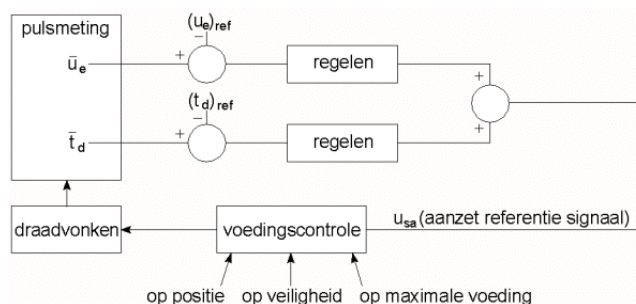
Voor verplaatsing in W-richting (grovverstelling van de vonkkop), A-richting (rotatie om de X-as), B-as (om Y-as), enz. gelden identiek omschrijvingen, die indien van toepassing apart vermeld en beoordeeld moeten worden.

Aanzetregeling²⁾

- Vorm (liefst in blokschema aangeven: figuur 5.2)

Voorbeeld:

Een van de vonkspleet afgeleide spanning wordt, via een passief filter, vergeleken met een instelwaarde. Het verschil wordt, na elektrische versterking, toegevoerd aan de servomotor van de verplaatsing in Z-richting



figuur 5.2 Blokschema aanzetregelkring draadvonkerosie-installatie

Diëlektricumbak

- Vormgeving
- Afmetingen
- Vloeistofhoogte boven werkttafel

Voorbeeld:

gelaste staalplaatconstructie met twee deuren
 $l_x \times l_y \times l_z = 800 \times 600 \times 500$ mm
continu in te stellen tussen 200 en 450 mm

1) Zie ook 'Geometriefouten' in § 5.6.1 'Machinenauwkeurigheid'

2) Voor nadere aanduiding van de onderdelen van het regelcircuit gelden de in DIN 19226 genormeerde begrippen

- Min. afstand tussen werktafel en elektrodehouder . .	200 mm
- Max. afstand tussen werktafel en elektrodehouder . .	700 mm
<i>Werkstuktafel</i>	Voorbeeld:
- Vormgeving	tafel met 3T -groeven
- Afmetingen	$I_y \times I_x = 400 \times 600$ mm
- Normbelasting	100 N
<i>Elektrodehouder</i> [ref.9, Blatt 3]	Voorbeeld:
- Vormgeving	standaard pinoleflens
- Afmetingen	type 2
- Nominale belasting	1.000 N
<i>Palletwisselaar</i>	
- Type (met identificatie)	eigen besturing; schijfmagazijn met 18 plaatsen; twee grijpertypen
- Pallets	nulpuntspansysteem met standaard gatenpatroon
- Afmetingen	250 × 250 mm
- Max. wisselgewicht	30 kg
- Wisselprecisie	0,05 mm
<i>Algemeen</i>	Voorbeeld:
	- documentatie (nl)
	- service handleiding (nl)

5.4.3.3 Speciale uitrusting	Voorbeeld:
	- rotatie-inrichting
	- elektrodeopspanning
	- 3D meettaster (in magazijn)
	- rookafzuiging

5.4.4 Generator

Omschrijving

Aangeven van het principe, typerende onderdelen en uitvoering van de kast.

Voorbeeld:

Statische, getransistoriseerde pulsgenerator in stofdichte kast van staalplaat, met ventilatorkoeling.

5.4.4.1 Typegegevens

Generatorgegevens

- netbelasting	5 kVA
- stuurspanning	110V
- beveiliging ³⁾	IP 43

Voorbeeld:

Uitgangsgegevens

- instelbare generatorpulsduur $t_i^{(4)}$	2 μ S - 2 ms
- instelbare ontladingsstroom $i_e^{(4)}$	1,5 A - 60 A
- instelbare of mogelijke pulsintervaltijd dan wel relatieve generatorpulsduur τ of frequentie ⁴⁾	$\tau = 0,3 - 0,98$
- max. werkstroom $I^{(5)}$	tot 55A
- open generatorspanning $u_i^{(4)}$	100V/150V/300V

5.4.4.2 Standaarduitrusting

Voorbeeld:

- Netfilter
- uitrichtmiddelen
- kortsluitbeveiliging

5.4.4.3 Speciale uitrusting

Voorbeeld:

- Indicator van de bedrijfstoestand

5.4.5 CNC-besturing

- Bestuurde verplaatsingen, X, Y, Z, A, B, C;	500 mm, 200 mm, 200 mm, $\pm 110^\circ$, 360° , 150 min^{-1}
- Type/processor	
- Programmering	ISO/Dialog
- Data-invoer	CD/DVD, netwerk, handingave, USB
- Grootte werkgeheugen	250 MB
- Gereedschapcorrectie	
- Resolutie	
- Technologie/Strategie (cycli incl. meten)	
- Netwerkimterfaces (Intranet)	
- Bewegingssimulatie	
- Diagnosemogelijkheden	
- Bewaking/Monitoring op afstand	

3) Volgens DIN 40050, Teil 1; IEC 144

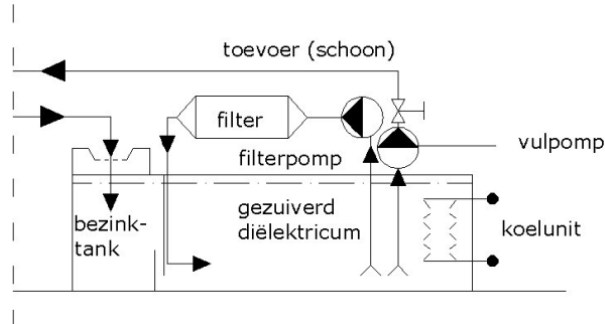
4) Te meten met een oscilloscoop

5) Te bepalen met instrumenten op de generator

5.4.6 Het diëlektricumstelsel

5.4.6.1 Type

- Beschrijving
- Schematische opbouw; liefst in een schets⁶⁾ aangegeven (figuur 5.3)



figuur 5.3 Schema diëlektricumstelsel voor zinkvonkmachine

Voorbeeld:

Gelaste staalplaat met profielversterking. Aggregaat en leidingsysteem boven het reservoir opgesteld. Ingebouwde warmtewisselaar voor koeling.

Filtrering door papierpatronen in de hoofdstroom van het koolwaterstofdiëlektricum

5.4.6.2 Omschrijving van de samenstellende delen

Pompinstallatie

- Pomptype
- Debieten
- Motoren

Voorbeeld:

Blok-centrifugaalpomp $\Delta p_{\max} = 2,5$ bar
 Vullen: 2 l/s (120 l/min) bij $\Delta p = 0,1$ bar
 Drukspoelen: 1 l/s (60 l/min) bij $\Delta p = 1$ bar
 Zuigspoelen: 150 cm³/s (9 l/min) bij $\Delta p = 0,5$ bar
 Flensuitvoering, uitwendig gekoeld, explosie veilig

Filterinstallatie

- Filter
- Filtrering
- Totaal filteroppervlak
- Voorraad koolwaterstofdiëlektricum

Voorbeeld:

2 staalplaatcilinders, barstdruk 30 bar, met in elk 25 kunststoffilterkaarsen, automatisch pneumatische afstootinrichting (afwisselend in bedrijf), automatische toevoer- en filterdosering, elektrische aanwijzing, vervuiling, drabopvangreservoir
 kiezelgoer (gespecificeerd)
 20 m²
 300 liter

Koelinstallatie

- Koelapparaat
- Besturing

Voorbeeld:

Leidingsysteem met koperen ribben, voor water of speciale koelvloeistoffen
 Thermostatisch bediende waterkraan.
 Ingebouwde temperatuurmeter voor het diëlektricum

5.4.6.3 Speciale uitrusting

Voorbeeld:

Compressor - Koelaggregaat
 Drab - Filterpers

5.5 De draadvonkmachine

5.5.1 Algemene omschrijving van de machine

- Vonkersieve bewerkingsmethode volgens de begrippen en grootheden, vastgelegd in hoofdstuk 1 en 3
Voorbeeld: Installatie voor het vonkersief snijden
- Fundamentele opbouw van de draadvonkmachine
Voorbeeld: Gietstalen portaalframe
- Substelsel coniciteit
Voorbeeld: U/V-slede
- Draadsysteem
Voorbeeld: draadgeleiding en -afvoer
- Generatortype
Voorbeeld: Statische pulsgenerator
- Numerieke besturingseenheid
Voorbeeld: gegevensinvoer direct via netwerk, CD/DVD en handingave
- Diëlektricumstelsel
Voorbeeld: losstaande RVS-bak; filtrering door

papierpatronen, deïoniseerptraan

- Speciale uitrusting

Voorbeeld: automatische draadinvoer

Algemeen voorbeeld: CNC draadvonkmachine met gelast stalen portaal, hoofdassen X/Y/Z-as, separate U/V-slede (conisch snijden), pulsgenerator, bad- en coaxspoeling, en automatische draadinvoer. Diëlektricumstelsel met bezinktank, papierfilters, deïoniseerptraan en compressorkoeling.

5.5.2 Installatie- en opstellingsgegevens

Transport en opstelling

- Bruto transportgewicht, aantal en afmetingen van de machine(delen) in verpakking.
- Gewicht en afmetingen van de delen voor de inbedrijfstelling (nettogewichten).
- Opstellingsmethode (funderingseisen, trillingsdemping).
- Maximale puntbelasting (bedrijfsklaar).

6) Symbolen overeenkomstig NEN-ISO 1219

Plaatsruimte

De plaatsruimte (inclusief de minimale deuropeningen en minimale hoogte) wordt in een plattegrond aangegeven, met de maten van de bouwgroepen en de positie van de toe- en afvoerleidingen. Eveneens moet rekening worden gehouden met een eventuele klimaatregeling, automatische werkstukwisselaar, enz..

Aan te geven zijn de op 0,1 m afgeronde afmetingen van de ruimte, waarin de installatie moet worden opgesteld, rekening houdend met de vereiste afstanden tot muren, overige machines en installaties, alsmede de minimumhoogte van de bedrijfsruimte.

Ook van de ruimte voor bediening moeten de maten zijn vermeld (Arbowet), evenals de ruimten voor onderhoud en controle.

Aansluitingen en bedrijfsmiddelen

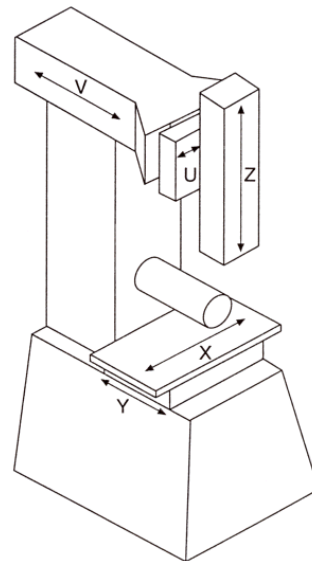
- Elektrisch aansluitvermogen (kVA), netspanning 380V/60Hz, toelaatbare spanningsvariatie, netfrequentie %, netfrequentie, $\cos \phi$ bij nominale belasting.
- Gespecificeerde gegevens voor toe- en afvoer van het water (druk, debiet, temperatuurbereik, enz.).
- Gespecificeerde gegevens voor perslucht (druk, debiet, toelaatbare vochtigheid, enz.).
- Gespecificeerde gegevens voor diëlektricum, filter en deïoniseerpatroon (toevoerdebiet, -druk en filtercapaciteit).
- Gespecificeerde gegevens voor smeermiddelen.
- Grootste gemiddelde pulsstroom I.
- Afmetingen werkbereik ($l \times b \times h$).
- Toelaatbaar werkstukgewicht (nominale belasting).
- Toelaatbaar gewicht draadspool (nominale belasting).
- Bestuurde verplaatsingen, X, Y, Z, U, V, B.
- Verplaatsingstrajecten, X, Y, Z, U, V, B.
- Nauwkeurigheid per as.

5.5.3 Het mechanische systeem

5.5.3.1 Machinetype

De opbouw van de machine is in de schematekening van figuur 5.4 weergegeven. Voor de aanduiding van

asrichtingen en het werkbereik ($l \times b \times h$) van deze numerieke machines wordt uitgegaan van een rechthoekig coördinatenstelsel (X, Y, Z, U, V) [ref.11]. De machinedelen (bijv. onder- en bovenarm, werkstuktafel, servomechanisme, enz.) en de assen van de machine moeten zijn aangegeven. De constructie en het fabricatetype van de machine dienen kort te zijn beschreven.



figuur 5.4 Coördinatenstelsel voor draadvonken

Voorbeeld:

Numeriek bestuurd draadvonkmachine met een gelast frame, materiaal kunstmatig verouderd. X/Y-kruistafel met voorgespannen rollenlagering met optische positie-uitlezing. Elektromechanisch servosysteem met AC-motoren met schroefspil, voorgespannen kogelomloopmoeren en voorgespannen rollengeleiding. Geïntegreerd draadsysteem met breukdetectoren, magneetrem, enz.. In de Z-as geïntegreerde U- en V-as (voor coniciteit). Vast opgestelde rotatiekop (B-as). Verzinkbare diëlektricumbak.

5.5.3.2 Omschrijving van de samenstellende delen

Werkstuktafel

- Vormgeving
- Afmetingen
- Normbelasting

Voorbeeld:

spanraam
 $l_y \times l_x = 400 \times 600 \text{ mm}$
 100 N

Opspanhouders

- Vormgeving
- Afmetingen
- Nominale belasting

Voorbeeld:

standaardsysteem
 1.000 N

Palletwisselaar

- Type (met identificatie)
- Pallets
- Afmetingen
- Max. wisselgewicht
- Wisselprecisie

eigen besturing; schijfmagazijn met 18 plaatsen; twee grijptypen
 nulpuntspansysteem

10 kg
 0,05 mm

X-as

- Geleiding
- Aandrijving
- Verplaatsingssnelheid
- Verplaatsing
- Instelling
- Meetsysteem/-resolutie
- Begrenzing

Voorbeeld:

horizontale vlakke geleiding met onafhankelijke rollen
 elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
 ijlgang 800 mm/min; voeding 555 mm/min
 500 mm
 geprogrammeerd
 glasliniaal/1 μm
 in CNC geheugen vastgelegd

Y-as

- Geleiding
- Aandrijving
- Verplaatsingssnelheid

Voorbeeld:

horizontale vlakgeleiding met onafhankelijke rollen
 elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
 800 mm/min

- Verplaatsing 200 mm
- Instelling geprogrammeerd
- Meetresolutie 1 μm
- Begrenzing in CNC geheugen opgeslagen

Z-as

- Geleiding **Voorbeeld:**
lineaire geleiding met tegen verdraaiing beveiligde pinole
- Aandrijving elektromotor met voorgespannen kogelomloopspil
- Verplaatsingssnelheid traploos van 0,01-25 mm/s
- Verplaatsing 200 mm
- Instelling geprogrammeerd
- Begrenzing in CNC geheugen vastgelegd
- Klemrichting automatische rem

Voor verplaatsing in W-richting (kopverplaatsing), A-richting (rotatie om de X-as), B-as (om Y-as), U-as (evenwijdig aan X-as), V-as (evenwijdig aan Y-as), enz. gelden identiek omschrijvingen, die (indien van toepassing) apart vermeld en beoordeeld moeten worden.

- Algemeen** **Voorbeeld:**
- documentatie (nl)
 - service handleiding (nl)

- 5.5.3.3 Speciale uitrusting** **Voorbeeld:**
- rotatie-inrichting
 - draadafvoersysteem
 - 3D meettaster

5.5.4 Pulsgenerator**5.5.4.1 Type**

- Omschrijving
Aangeven van het principe, typerende onderdelen en uitvoering van de kast. **Voorbeeld:**
Statische, getransistoriseerde pulsgenerator in stofdichte kast van staalplaat, met ventilatorkoeling.

5.5.4.2 Typegegevens

- Generatorgegevens** **Voorbeeld:**
- netbelasting 5 kVA
 - stuurspanning 110V
 - beveiliging⁷⁾ IP 43

Uitgangsgegevens

- instelbare generatorpulsduur $t_i^{8)}$ **Voorbeeld:**
2 μS - 2 ms
- instelbare ontladingsstroom $i_e^{8)}$ 1,5 A - 60 A
- instelbare of mogelijke pulsintervaltijd dan wel relatieve generatorpulsduur τ of frequentie⁸⁾ $\tau = 0,3 - 0,98$
- max. werkstroom $I^{9)}$ tot 55A
- open generatorspanning $u_i^{8)}$ 100V/150V/300V

5.5.4.3 Standaarduitrusting

- Voorbeeld:**
- Netfilter
 - uitrichtmiddelen
 - kortsluitbeveiliging

5.5.4.4 Speciale uitrusting

- Voorbeeld:**
- Indicator van de bedrijfstoestand

5.5.5 CNC-besturing

- Beschrijving
- Processor
- Programmering ISO/Dialog
- Software (updates)
- Data-invoer CD/DVD, netwerk, handingave, USB
- Grootte werkgeheugen 1 Gb
- Gereedschapcorrectie
- Resolutie
- Technologie/Strategie (cycli incl. meten)
- Netwerkkinterfaces (Intranet)
- Bewegingssimulatie
- Diagnosemogelijkheden
- Bewaking/monitoring op afstand

7) Volgens DIN 40050, Teil 1; IEC 144

8) Te meten met een oscilloscoop

9) Te bepalen met instrumenten op de generator

5.5.6 Het diëlektricumstelsel

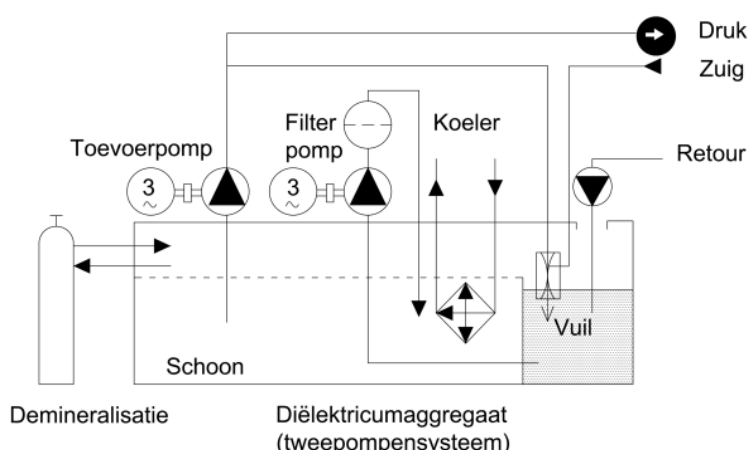
5.5.6.1 Type

- Beschrijving
- Schematische opbouw; bij voorkeur in een schets¹⁰⁾ aangegeven (figuur 5.5)

Voorbeeld:

Gelaste stalen gecoate (of kunststof) behuizing met profielversterking. Aggregaat (boven het reservoir opgesteld), leidingsysteem, onderdelen als pomp(en), behuizingen, afsluiters en kleppen, enz. geconstrueerd op corrosiebestendige niet-geleidend materiaal. Ingebouwde warmtewisselaar voor koeling.

Filtrering door (tijdens bedrijf) snel wisselbare patronen in de hoofdstroom van het demiwater. CNC gestuurde deïonisering met harspatronen.



figuur 5.5 Schema diëlektricumstelsel voor draadvonkmachine

5.5.6.2 Omschrijving van de samenstellende delen

Werkbak

- Vormgeving
- Afmetingen
- Vloeistofhoogte boven werktafel

Voorbeeld:

gegoten en gecoate constructie met deur
 $I_x \times I_y \times I_z = 800 \times 600 \times 500$ mm
 continu in te stellen tussen 200 en 450 mm

Pompinstallatie

- Pomptype
- Debieten
- Motoren

Voorbeeld:

Blok-centrifugaalpomp $\Delta p_{\max} = 2,5$ bar
 Vullen: 2 l/s (120 l/min) bij $\Delta p = 0,1$ bar
 Drukspoelen: 1 l/s (60 l/min) bij $\Delta p = 1$ bar
 Flensuitvoering, uitwendig gekoeld, explosie veilig

Filterinstallatie

- Filter

Voorbeeld:

2 staalplaatcilinders, barstdruk 30 bar, met in elk 25 kunststoffilterkaarsen, automatisch pneumatische afstootinrichting (afwisselend in bedrijf), automatische toevoer- en filterdosering, elektrische aanwijzing, vervuiling, drabopvangreservoir papierpatronen (gespecificeerd)
 20 m²
 300 liter

Deïonisatiesysteem

- Medium
- Regeling

Voorbeeld:

Harspatronen (recyclebaar)
 CNC-bestuurde deïonisering

Koelinstallatie

- Koelapparaat
- Besturing

Voorbeeld:

Leidingsysteem met koperen ribben, voor water of speciale koelvloeistoffen
 Thermostatisch bediende waterkraan.
 Ingebouwde temperatuurmeter voor het diëlektricum

5.5.6.3 Speciale uitrusting

Voorbeeld:

Compressor - Koelaggregaat
 Drab - Filterpers

10) Symbolen overeenkomstig NEN-ISO 1219

5.6 Machineafname

Een correcte machine-afname gebeurt (zoals bij andere bewerkingsmachines) door enerzijds controle van de machinenauwkeurigheid (vastgelegd in normen) en anderzijds door de uitvoering van verspaningsproeven en aanmaak van teststukken.

5.6.1 Opmeten van de machinenauwkeurigheid

De machinenauwkeurigheid hangt niet alleen af van de onderdelen maar ook van de functionele eisen. Machinedeformaties ontstaan door temperatuurverandering tijdens de bewerking, door klemkrachten, alsmede door gewichtsverplaatsingen en massakrachten bij verplaatsingen. Om inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid van de machine wordt met name uitgegaan van de statistische metingen van maatvoering en de stijfheid in de aanzetrichting.

De normen ISO 230 (algemene afname), ISO 11090 (zinkvonken) en ISO 14137 (draadvonken) beschrijven criteria ter bepaling van de machinekwaliteit (zie bijvoorbeeld ook tabel 5.1). Deze criteria geven geen voorschrift voor de grootte van de toelaatbare afwijking of de te gebruiken meetinstrumenten. De keuze daarvan hangt af van de kwaliteitsklasse van het product.

De in tabel 5.1 gegeven criteria zijn gegroepeerd ten aanzien van het bepalen van respectievelijk:

- vormafwijkingen van de onbelaste op- en inspanvlakken (van elektrode en werkstuk); criteria 1 en 2;
- positie-afwijkingen van de onbelaste elektrodehouder en werktafel; criteria 3 - 14;
- positie-afwijkingen bij belasting van de elektrodehouder en werktafel. Criteria 15 en 16.

Opmerking: Bij voorkeur dient men de aanbevolen metingen bij elke afname van een machine toe te passen. Bij vertrouwde leveranciers gelden ze in het algemeen als typegebonden garantievoorwaarden. Bij bestelling kan men overeenkomen dat de garantiewaarden gecontroleerd worden, waarbij de meetmethode moet worden vastgelegd.

5.6.2 Verspaningsproeven (aanmaak van teststukken)

Ter beoordeling van het technisch en economisch verantwoord toepassen van vonkersie worden vaak op de toepassing gerichte proeven genomen.

Eén algemeen geldende teststuk en/of bewerkingsproef kan echter niet worden gegeven daar:

- een representatieve toepassing van vonkersie zelfs op grond van meer proeven niet kan worden gegeven, wegens de grote verschillen in vorm, afmetingen, werkmethode en elektrodekeuze;
- de eisen in de diverse branches zeer verschillend zijn;
- de productietechnische zwaartepunten bij bedrijven in dezelfde branche zeer verschillend zijn;
- elke toekomstige koper bij zijn kostprijsberekening ter vergelijking uitgaat van een werkstuk naar eigen keus;
- de proefresultaten op grond van doorgaande ontwikkeling slechts voor korte tijd gelden en het daardoor niet te voorkomen is, dat bij aanschaffing nieuwe proeven worden genomen.

Legt men daarentegen gedetailleerde fysische en technologische proeven vast, dan zal blijken dat deze niet meer informatie zouden geven dan meer gestandaard-

diseerde proeven.

Wanneer uitvoerige kostprijsberekeningen aan de hand van concrete proeven worden uitgevoerd, dan dienen aanvrager en aanbieder ten aanzien van de volgende punten tot overeenstemming te komen:

- Bewerkingsomschrijving:
 - ♦ werkstukmateriaal;
 - ♦ werkstukvorm (afmetingen);
 - ♦ bewerkingsgeometrie;
 - ♦ voorbewerking en voorbehandeling;
 - ♦ bewerkingskwaliteit (ruwheid, toleranties, vormnauwkeurigheid);
 - ♦ fabricagefrequentie en seriegrootte.;
- Bewerkingsmiddelen:
 - ♦ installatie en -uitrusting;
 - ♦ opspan- en hulpgereedschappen;
 - ♦ materialen;
- Elektrode:
 - ♦ materiaal;
 - ♦ vorm;
 - ♦ aantal;
 - ♦ fabricage;
 - ♦ ondermaat, tussenbewerkingen.
- Fabricage:
 - ♦ planningsgegevens;
 - ♦ omschrijving van de opspanning;
 - ♦ verspaningsgegevens (settings van de generator, type en regeling van spoeling, enz.);
- Werkstuk:
 - ♦ meetmiddelen en meetresultaten;
 - ♦ oppervlaktetoestand;
 - ♦ vereiste nabewerking.

5.6.2.1 Verspaningsproeven

Verspaningsproeven hebben tot doel de algemene **performanties** van de machine te bepalen. Hieronder wordt een voorbeeld gegeven van een beschrijving van testvoorwaarden voor het uitvoeren van verspaningsproeven:

- Materiaalcombinatie¹¹⁾:
 - I Staal 1.2714.05 (56NiCrMoV7 gehard)¹²⁾;
 - Grafiet ($\rho = 1,78 - 1,80 \text{ g/cm}^3$);
 - II Staal 1.2080.05 (X210Cr12 gehard)¹²⁾;
 - Elektrolytisch koper;
 - III Gesinterd hardmetaal G20¹³⁾;
 - Wolframkoper¹⁴⁾;
- Werkstukafmetingen:
 - frontaal vlakbewerkte werkstukken;
- Elektrode afmetingen (zie ook tabel 5.2):
 - frontaal vlakbewerkt;
 - verhouding uitwendige tot inwendige diameter = 5:1;
 - uitwendige diameter kleiner dan werkstukdiameter;
- Diëlektricum:
 - Koolwaterstof op paraffinebasis (laag-aromatisch);
 - Soortelijke massa $0,8-0,83 \text{ g/cm}^3$, viscositeit bij 20°C $5 - 7 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($5 - 7 \text{ cSt}$);
- Spoeling:
 - Continu drukspoeling door de elektrode;
 - Druk en spoeldebiet moet worden gemeten;
- Duur van het onderzoek:
 - minstens 30 min indien $V_w < 4 \text{ mm}^3/\text{min}$;
 - minstens 15 min indien $V_w > 4 \text{ mm}^3/\text{min}$.

De resultaten van de uitgevoerde proeven kan men het beste in een protocol (zie tabel 5.3) met doorlopende nummering van alle essentiële kenmerken noteren.

Elke proef dient men 3 maal uit te voeren, zonder de machine-instelling te veranderen. Bij een zekere ont-

11) Fabrikaat vermelden

12) Materiaalaanduiding als in:

DIN 17007 T2 Werkstoffnummern; Systematik der Hauptgruppe 1; Stahl DIN 17007 T4 Werkstoffnummern; Systematik der Hauptgruppe 2 und 3; Nichteisenmetalle, DIN 1787 Kupfer; Halbzeug, Werkst. Nr. 2.0060

13) DIN 4986 Anwendungsgruppen von Hartmetallen für Werkzeuge zum Umformen und Schneiden und für Verschleisschutz

14) Voor gesinterd wolframkoper bestaat nog geen normaanduiding. Toegepast werd de meest gangbare soort met ongeveer 80% wolfram

tabel 5.1 Meetcriteria 1 - 16

	meetcriterium	principe meetopstelling	meetcriterium	principe meetopstelling
vormafwijking, onbelast	1 Rechtheid van aanslagen en opspangroeven		2 Vlakheid werkstuktafel	
	3 Evenwijdigheid van aanslagen en opspan-groeven t.a.v. de coördinatenassen		4 Evenwijdigheid en plaats-nauwkeurigheid van de werkstuktafel t.o.v. de coördinatenassen	
plaatsafwijking, onbelast	5 Haaksheid van de coördinatenassen		6 Verplaatsings- en her-halingsnauwkeurigheid t.o.v. de coördinatenassen	
	7 Evenwijdigheid tussen elektrodehouder en werkstuktafel		8 Haaksheid tussen aan-zetas en elektrodehouder	
	9 Haaksheid tussen verplaatsing van de kop en elektrodehouder		10 Rechtheid en hoek van de aanzetas t.o.v. werkstuktafel	
	11 Rechtheid en hoekver-plaatsing bij verstelling van de kop t.o.v. werk-stuktafel		12 Hoekverdraaiing van de aanzetbeweging	
	13 Hoekverdraaiing van de kop bij verstelling		14 Rondloop van de aanzetas	
	15 Hoek- en standnauwkeu-righeid t.o.v. werkstuk-tafel bij belasting van de elektrode-opspanning (ge-meten in middenstand)		16 Standnauwkeurigheid van de werkstuktafel t.o.v. de kop van de machine en hoeknauwkeurigheid van de werkstuktafel t.o.v. de kop bij verstelling naar de eindstand zowel in X-as als in Y-richting	

tabel 5.3 Afnameprotocol in tabelvorm

firma:		vonkersiemachine:										omschrijving:								datum:							
instelling:		bedrijfsgegevens:										uitwerking:															
Nr.	materiaalcombinatie	elektrode			polariteit	u_i (V)	I_e (A)	t_i (μ s)	t_e (of t_0) (μ s)	τ (%)	U (V)	I (A)	voeding (mm/min)	spoeling		temperatuur van het dieëlektricum ($^{\circ}$ C)	tijd (min)	verspanning			elektrodeslijtage			frontale ruwheid		opmerkingen:	
		$\varnothing d_a$ (mm)	$\varnothing d_i$ (mm)	druk (kPa)										debiet (cm^3/s)	Δg_w (g)			Volume (mm^3)	V_w (mm^3/min)	Δg_B (g)	Volume (mm^3)	V_B (mm^3/min)	v (%)	R_a (μ m)	standaard nr.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Opmerkingen:																											
Verklaring van de kolommen: 1 Proefnummer. 2 Volgnummer van de proef. 3 Materiaalcombinatie volgens § x.x.x. 4 en 5 Elektrode volgens § x.x.x. 6 Waarde van de hoofd- en ontladingspuls (eerste halve puls). 7 ... 11 Spanning, stroom en tijd, gemeten met een oscilloscoop. 12 en 13 Aanwijzing van de generatorinstrumenten. Indien bijzondere meetinstrumenten worden gebruikt, dienen deze te worden omschreven. 14 ... 17 Instelwaarden (standen) na de inloofase. De inloofase mag niet langer dan 10 % van de proefduur zijn. 18 Tijdsduur volgens een van de generatorstroom onafhankelijk aanwijsinstrument 19 en 22 De massa's moeten nauwkeuriger zijn dan 5 % van de gemeten waarde. 20 en 23 Volumeberekening met behulp van opgegeven dichtheid; voor grafiet in droge toestand. 26 Zie paragraaf 5.2.6.2. 27 Zo nodig aangeven welke standaard is gebruikt.																											

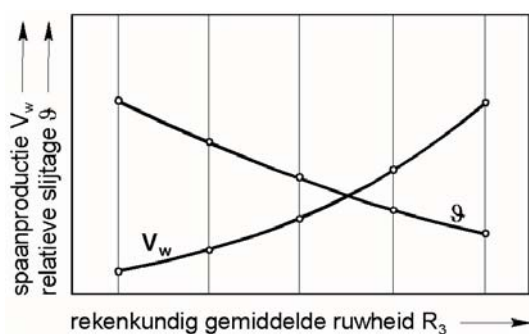
tabel 5.2 Elektrode-afmetingen

Elektrodenummer			1	2	3	4	5	6	7
Uitwendige diameter (mm)			5	7	10	20	40	60	100
gatdiameter (mm)			1	1,4	2	4	8	12	20
oppervlakte (cm ²)			0,19	0,37	0,75	3	12	27	75
$i_{e,max}$ (A)	bij materiaal-combinatie	I + II	–	–	4	15	60	135	375
		III	6	12	25	90	–	–	–

ladingsstroom i_e wordt die generatorpulsduur t_i gekozen, welke maximale spaanproductie geeft. Voor de grootste ontladingsstroominstelling van de generator krijgt men dan, bij deze testvoorwaarde, de grootste spaanproductie. De gebruikte meetinstrumenten moet men voldoende omschrijven (fabrikaat, type, eigenschappen).

Uitwerking van de proeven

De spaanproductie en de ruwheid worden grafisch, als functie van de ruwheid (R_s in μm) uitgezet. De meetpunten moeten worden aangegeven (zie figuur 5.6).

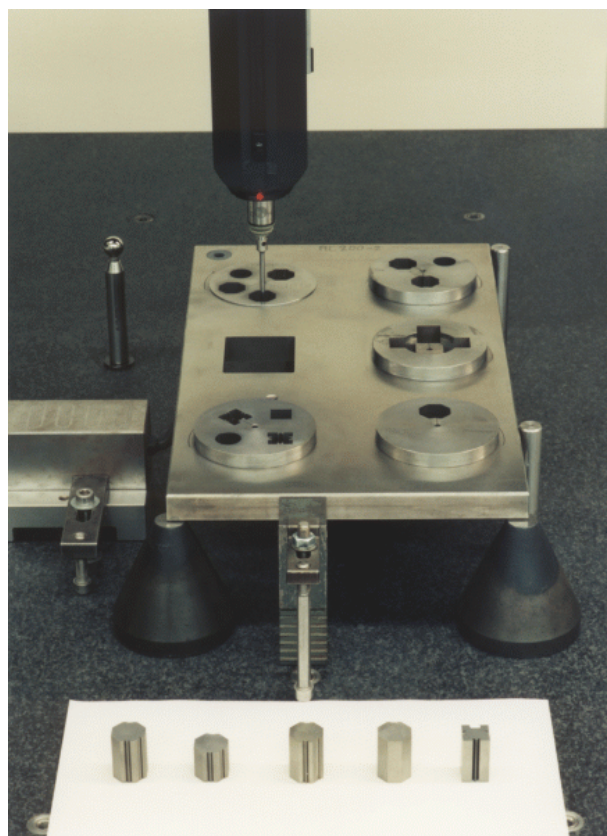


figuur 5.6 Dubbel logaritmisch diagram van spaanproductie en relatieve slijtage tegen oppervlakteruwheid

De aanduiding en bepaling van de ruwheid dienen te worden uitgevoerd overeenkomstig de normen. Als ruwheid wordt de ruwheid R_s gebruikt. Daarnaast kan de ruwheid R_t worden aangegeven voor de grootste profielafwijkingen van een oppervlak. In het algemeen is het voldoende de oppervlakteruwheid te meten door vergelijking met de in de handel gebruikelijke vergelijkingsstandaarden. Daarbij moet erop worden gelet dat het gaat om een vergelijking van de ruwheid en niet van de oppervlaktestructuur.

5.6.2.2 Voorbeeld van een teststuk (draadvonken)

Voor het bepalen van de werkelijke technologiewaarden (instellingen met bijbehorende uitkomsten) kunnen uitstekend een select aantal doorlopende profielen worden gebruikt. Het snijden ervan kan per profiel worden gedefinieerd om het effect van verschillende draadvonk-modes voor de betreffende machine eenduidig vast te leggen. Gemeten worden, afzonderlijk of in combinatie, volsneden en diverse nasneden op pure snelheid, profielnauwkeurigheid en oppervlaktegesteldheid. Een eigen testwerkstuk is zinvol in die gevallen waarin de fabrieksmatige proeven bepaalde zaken niet (voldoende) afdekken. Daarbij valt te denken aan bijvoorbeeld snijden in speciaal materiaal en bij grote of zeer kleine werkstukhoogte, maar evengoed aan het snijden in een (minimaal aantal) stap(pen) tot op een hoge meetnauwkeurigheid of optimale ruwheid. Een snijtest die de afwijking bij gecombineerde asbewegingen vastlegt geeft een indruk van de haalbaarheid bij herhaald voorkomende profielen op steek.



figuur 5.7 Serie standaard testwerkstukken bij de afname van een draadvonkmachine

5.7 Veiligheid, milieu en onderhoud

5.7.1 Algemeen

In Europees (CEN) verband is men op dit moment vergoederd met het opstellen van veiligheidsnormen voor de bouw van onder meer vonkerosie-apparatuur (EN 60204). Alle na 1-1-'95 geleverde nieuwe machines moeten voldoen aan de machinerichtlijn (CE 89/392/EEG). Tevens moeten alle gebruikte machines die van buiten de EEG worden ingevoerd eveneens voldoen aan deze machinerichtlijn. Dat de machine voldoet aan deze richtlijn is te zien aan de CE-markering en bijbehorende conformiteitsverklaring. Bij de opstelling van deze publicatie is al zoveel mogelijk rekening gehouden met de hierin gestelde eisen. Voor zover ze niet reeds in andere normen en richtlijnen zijn vereist, worden in de hiernavolgende paragrafen aanbevelingen gedaan met betrekking tot de installatie, de werkplaats en de bedrijfsvoering.

Tevens wordt aangeraden om bij gebruik van de diverse materialen na te gaan in hoeverre de hiervoor geldende wettelijke MAC-waarden niet worden overschreden. Waar nodig dient men in Nederland te voldoen aan de eisen die in de Arbeidsomstandighedenwet (Arbowet) zijn gesteld. In België geldt daarvoor het "Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming" (ARAB), die inmiddels geleidelijk wordt vervangen door de "Codex over het welzijn op het werk".

5.7.2 Meest belangrijk eisen voor de installatie

1. De elektrische aansluiting, opstelling en de bediening van vonkerosiemachines moeten voldoen aan de IEC 204 serie (= EN 60204 en NEN-EN 60204), voorzover van toepassing en in overeenstemming zijn met de installatievoorschriften NEN 1010.
2. Delen van de machine, die meer dan 25 volt (effectieve waarde) voeren, moeten tegen aanraking zijn beveiligd (IEC 204). Aan deze eis is ook voldaan indien de meer dan 25 volt spanningvoerende delen, dan wel het vonktraject, minstens 40 mm onder het niveau van het diëlektricum ligt. Voor het instellen van de machine zonder beveiliging tegen aanraking, mag de werkspanning maximaal 25 volt bedragen.
3. Beveiliging van het niveau van de vloeistof in de diëlektricumbak door twee onafhankelijk werkende niveauschakelaars is noodzakelijk. Deze moeten, met het oog op brandgevaar, verhinderen dat de machine gaat vonken voordat het ingestelde vloeistofniveau is bereikt in de diëlektricumbak. Dit niveau moet zich minstens 40 mm boven de plaats bevinden waar wordt gevonkt. De generator moet automatisch worden uitgeschakeld indien het vloeistofniveau beneden de ingestelde waarde daalt.
4. Beveiliging van de temperatuur in de diëlektricumbak dient, met het oog op brandgevaar, te bestaan uit twee onafhankelijk van elkaar werkende begrenzingssystemen. Deze moeten de generator en de pomp (voor de toevoer van het diëlektricum) uitschakelen, wanneer de temperatuur van de vloeistof boven 45°C komt. Het is verplicht om op de machine het vlampunt van de gebruikte vloeistof te vermelden. Deze mag niet beneden de 60°C liggen. In de gebruiksaanwijzing van de machine moet worden vermeld welke vloeistoffen in aanmerking komen.
5. Heeft de machine voor het diëlektricum een gesloten koel- of opvangbak, dan dient de daarin aanwezige elektrische installatie tegen explosie te zijn beveiligd.
6. De machine moet zijn voorzien van een goed werkende en beveiligde afzuiginstallatie.
7. De machine moet voldoen aan de eisen gesteld aan de elektromagnetische invloeden volgens de norm EN 55011.

5.7.3 Werkplaatsaanbevelingen

1. Werkplaatsen waarin vonkerosiemachines zijn geplaatst die met koolwaterstoffen als diëlektricum werken, gelden als brandgevaarlijk: de elektrische installatie moet aan de regels van brandgevaarlijke bedrijfsruimten voldoen, NEN 1010, hoofdstukken VII en VIII.
Open vuur en het roken is hierbij verboden. Dit moet in de ruimte zijn aangegeven. In grote werkplaatsen is een veiligheidsafstand van 5 meter van de machine voldoende. Binnen deze afstand moet men over een voldoende aantal brandblusapparaten van het juiste soort en met toereikende capaciteit beschikken.
2. De werkplaatsconditie moet zo zijn, dat voor de gezondheid schadelijke gassen of licht ontvlambare gassen een vastgestelde waarde niet overschrijden. Een goede, op de vonkmaschine aangesloten, afzuiging van de dampen is noodzakelijk. Goed betekent: afzuiging met voldoende luchtsnelheid, dan wel plaatselijke afzuiging met behulp van een integrale afzuigkap die de vonkzone omhult.
3. Gebruik bij voorkeur geen licht ontvlambare vloeistoffen.
4. Neem naast de voorgeschreven brandblusapparaten in de nabijheid van de machine, extra maat-

regelen zowel ter voorkoming als voor bestrijding van brand (bijvoorbeeld automatische brandalarm-resp. CO₂-brandblusinstallatie (koolzuursneeuw)). Ook voor brandbestrijding is een (neerlaatbare) afzuigkap per machine nuttig. Tenslotte dient nabij de machine een zogenaamde branddeken aanwezig te zijn.

5.7.4 Bedrijfsaanbevelingen

Naast de aspecten die betrekking hebben op de installatie en de werkplaats, moet ook een aantal aanvullende organisatorische maatregelen worden genomen.

1. Vonkerosiemachines mogen alleen door daarmee belast geschoold personeel worden bediend. Bij de scholing dient bijzondere aandacht te worden besteed aan de gevaren en de veiligheidsmaatregelen.
2. Regelmatige controle van de beveiligingen en het juist functioneren van de vonkerosiemachines is noodzakelijk. Bij het constateren van gebreken ten aanzien van de veiligheid moet de machine buiten werking worden gesteld tot deze zijn opgeheven.
3. Vermijdt elk onnodig contact van het diëlektricum met de huid. Huidaandoeningen, veroorzaakt door omgang met diëlektricum, komen voor in de vorm van:
 - verstopping van de haarzakjes (acne) welke kunnen ontsteken;
 - één of andere vorm van eczeem.

Hoewel de soort diëlektricum hierop invloed kan hebben, zijn huidaandoeningen in de meeste gevallen te voorkomen door bescherming en goede persoonlijk hygiëne. Daartoe is het gewenst dat men:

- beschermende werkkleding gebruikt.
Dit verhindert nat worden van de overige kleding en de huid;
 - regelmatig de werkkleding verschoont;
 - een oliebestendige beschermingscrème op handen en armen aanbrengt. Herhaal dit gedurende de werktijd steeds na het wassen van de handen;
 - bij het einde van de werktijd, na het wassen, de huid goed insmeert met huidverzorgende crème.
4. Laat vonkerosiemachines alleen dan zonder toezicht werken wanneer alle aanwezige beveiligingen zijn ingeschakeld en houdt rekening met de eisen van brandpreventie.

5.7.5 Onderhoud

Geregeld en grondig onderhoud door gekwalificeerd personeel is essentieel voor zink- en draadvonkmachines. Dat past bij hun positie binnen de huidige metaalindustrie. Deze machines worden immers veelvuldig ingezet in een uitermate kritische fase, namelijk als een van de laatste stappen (met een hoge toegevoegde waarde) in de bewerkingsvolgorde. Daarmee is hun invloed op de afleverdatum, kwaliteit en kostprijs van doorslaggevend belang. Fouten of afwijkingen als gevolg van vonkbewerkingen op de (in deze fase al vergeworpen en prijzige) werkstukken leiden vrijwel altijd tot afkeur (dus reparatie of een totaal nieuw product) en vertraging. Voor optimale bedrijfszekerheid en een maximaal aantal effectieve bedrijfsuren moet aan een vonkmaschine getrap het nodige onderhoud worden gepleegd. De vakman/bediener voert de eerstelijns handelingen uit. In de machinehandleiding geeft de fabrikant daartoe voorschriften over dagelijkse (bijvoorbeeld reinigen vóór en na de job, beschikbare draadlengte) of wekelijkse onderhoudsactiviteiten (bijvoorbeeld controle op lekkage, diëlektricumniveau, werking van ventilatoren en onder de vonkvloeistof werkende toebehoren), of volgens een bepaald interval (lucht- en filter- en/of deïonisierpatroon wisselen, diëlektricumtank grondig schoonmaken). Ook staat hierin beschreven hoe be-

paalde storingen te verhelpen. Bij meer ingrijpende taken verzorgt een goed opgeleide eigen afdeling of een betrouwbare externe onderhoudsdienst de benodigde handelingen, bij voorkeur op preventieve basis. Een op zich meer complexe draadvonker vraagt nog intensiever om zuiver werken en regelmatig onderhoud dan een zinkvonkmachine. Dit enerzijds door kwetsbaarheid van het dunne en nauwkeurige standaardgereedschap. Anderzijds vooral door de combinatie van (corrosief) demiwater, metaal- en harsdeeltjes van verschillende soort, stroom en spanning in de hele machine.

Symbolen en indices

Grootheden

b	ondermaat
f	frequentie
I, i ¹	stroom
l	lengte
P	vermogen
R	ruwheid
s	spleet
t	tijd
U, u ¹	spanning
V	volume
W	energie
Z	zijdelingse bewerkingstoegift
v	relatieve slijtage
φ	relatieve pulsduur
λ	relatieve frequentie
τ	relatieve generatorpulsduur

¹ Hoofdletters kenmerken vaste grootheden, overeenkomstige gewone letters worden algemeen gebruikt voor in de tijd veranderlijke grootheden.

Indices

Onderstaande indices moet men alleen gebruiken, wanneer dit voor onderscheiding van de overeenkomstige grootheden van plaats en/of toestand noodzakelijk is.

Plaatsindices

C	hoek
E	elektrode
F	frontaal (voorkant)
G	ontladingsweg
K	kant
L	lateraal (zijkant)
W	werkstuk
α	contourhoek (bijv. 0 of 90°)

Toestandindices

e	ontlading
ea	abnormale ontlading
en	normale ontlading
d	vertraging
i	door de generator bepaald
l	lengte
p	periode
o	pauze
max.	maximale waarde
[^]	actuele waarde
—	gemiddelde waarde

Verloop-indices

n	volgnummer
---	------------

Vaktermen

Nederlands	Engels	Duits
A		
'achterwieleffect'	trail off	Bahnabweichung
afstroker	stripper	Abstreifer
afzinkbare werkstukbak	rise and fall tank	Hubbehälter
automatische draadinvoer	automatic wire threading	automatische Drahteinfädelung
B		
blinde holte	blindcavity	Gravur, Kavität
braamvrij	burr)-free)	gratfrei
brandbaar	combustable	brennbar
C		
cilindrische fase	land	Fase
cilindrische snede	straight cut	Zylinderschnitt
condensatorgenerator	buffer/capacitor	Speichergenerator
coniciteit	taper	Konizität
conisch snijden	conical cutting	konisch schneiden
contactloos	non-contact	berührungslos
D		
diëlektricum (vonkvloeistof)	dielectric (fluid)	Dielektrikum
diëlektricumaggregaat	filter unit	Filtriereinheit
draadelektrode	traveling wire	Drahtelektrode
draadgeleiding	wire guide	Drahtführung
draadvonken	wire EDM	Drahterosion
draadvonken (4-assig)	fourth axis cutting	4-Achsenschnelden
draadvonkmachine met relaxatiegenerator	capacitance discharge wire EDM	kapazitive FE-Schneidanlage
E		
EDM (Electrical Discharge Machining)	EDM (Electrical Discharge Machining)	EDM (Electrical Discharge Machining)
effectieve pulsduur	discharge duration time	Entladedauer
elektrode/vonkdoorn	electrode	Elektrode
elektrodewisselaar	toolchanger (ATC)	Elektrodenwechsler
EMC (elektromagnetische verdraagbaarheid)	EMC (electro magnetic compatibility)	- (elektromagnetische Verträglichkeit)
equidistant	equidistant	abstandsgleich
extrusiematrijs	extrusion die	Strangpressmatrize
F		
filter	filter (cartridge)	Filter (Patrone)
frequentie	frequency	Frequenz
G		
gedeelde snijplaat	sectionalized die	geteilte Schnittplatte
gedeïoniseerd -/gedemineraliseerd -/demiwater	deionized water	entionisiertes/demineralisiertes Wasser
geleiding	conductivity	Leitwert
gelijkstroompuls	DC puls	Gleichstromimpuls
gemiddelde pulsstroom/-spanning	average discharge current/voltage	mittler Entladungsstrom/-Spannung
gemiddelde werkstroom/-spanning	average working current/voltage	mittler Arbeitsstrom/-Spannung
generatorpulsduur	pulse duration	Impulszeit
gereedschapmakerij	tool and die shop	Werkzeugmacherei
geregenereerde hars	regenerated resin	regeneriertes Harz
H		
hardheid onafhankelijk	hardness independent	härte-unabhängig
I		
isolerend	non-conductive	nicht leitend
J		
K		
kaliber (draad-)	gage (thread-)	Lehre/Eichmass
kantuitrichtfunctie	edge finder	Kantenantastung
koelunit	chiller	Kühlaggregat
koolwaterstof	hydrocarbon	Kohlenwasserstoff
kortsluitpuls	short circuit pulse	Kurzschlussimpuls

<i>Nederlands</i>	<i>Engels</i>	<i>Duits</i>
L		
lineaire snijsnelheid	linear cutting speed	lineare Schnittgeschwindigkeit
M		
mal	jig	Schablone
materiaalaantasting	surface damage	Gefüge-beeinflussung
matrijs	mold	Matrize
meerkanaal	multilead	mehrkanal
messingdraad	brass wire	Messingdraht
mill (0,001 inch)	mill	Mill
N		
nasnijden	skim cutting	Nachschneiden
navonken	finishing	Schlichten
netspanning	mains voltage	Netzspannung
O		
oliehoudende vonkafval	swarf	ölige Abtragpartikel
ondermaat	undersize	Untermass
ontbramen	deburring	Entgraten
ontsteekpuls	ignition puls	Zündimpuls
ontsteekvertragingstijd	ignition delay time	Zündverzögerungszeit
open puls	open circuit pulse	Leerlaufimpuls
oppervlaktegesteldheid	surface finish	Oberflächegüte
opspanning	fixture	Aufspannvorrichtung
opspansysteem	clamping system	Spannsystem
overmaat (elektrodemaat + 2xgap)	overcut	Aufmass
oxidehuid	scale	Gusshaut/Zunder
P		
pakketeren (stapelen)	stacking	Paketieren
passing (pers-/schuif-)	fit (press- or slip-)	Passung/Sitz (Press-/Gleit-)
piekstroom	peak current	Spitzenstrom
pinole/spil	quill	Pinole
planetairkop	planetary head	Planetärkopf
planetair vonken	orbiting/planetary	Planetärerodieren
polariteit (normaal elektrode -)	polarity (normal)	Polarität (normal)
(omgekeerde elektrode +)	(reverse)	(umgekehrt)
pulsgenerator	generator	Generator
pulsinterval/pauzetijd	off time	Pausendauer
pulsperiodetijd	pulse cycle time	Periodendauer
pulsstijgtijd	pulse rise time	Impulsanstieg
pulstijd	pulse time (on pulse)	Impulsdauer
pulsvorm	pulse shape	Impulsform
R		
referentiebooring	pick up hole	Antastbohrung
relatieve generatorpulsduur	duty factor	Tastverhältniss
relaxatiegenerator	relaxation generator	Relaxationsgenerator
ruwheid (rekenkundig gemiddelde)	roughness (CLA centerline average)	Rauheit (arithmetischer Mittelwert)
S		
servosysteem	servo controll circuit	Servosystem Circuit
sjabloon/mal	template	Schablone
slijtage (lengte-/zijkant-/hoek-)	wear (linear/side/edge)	Verschleiss (Längen-/Kanten-/Ecke-)
slijtageverhouding	wear ratio	Verschleissrate
snijder	punch	Stempel/Patrize
snijden (onstabiel) met lucht tussen de spoelkoppen buiten/in werkstuk	air machining	unterbrochene Schnitt
snijpad	wire path	Schnittspur
snijplaat	die	Schnittplatte
snijspleet	wire kerf	Schnittspalt
spankop/-klem	chuck	Spannfutter
spantang	collet	Spannzange
spoel	spool	Spule
spoelen/spoeling (druk-/zuig-)	flushing (pressure/suction)	spülen (Druck-/Saug-)
spoelmond (onderste/bovenste)	flushport (lower/upper)	Spüldüse (untere/obere)
startgat	starter hole	Startloch
statische (gestuurde)	static pulse	statische Impuls-
stroom	current	Strom
stroombichtheid	current density	Stromdichte

<i>Nederlands</i>	<i>Engels</i>	<i>Duits</i>
T		
'timer' (voor periodiek afheffen/spoelen)	timer	Intervallschalter
toegift	allowance	Zugabe
tonvorming	barreling effect	Bauchung
U		
uitvalstuk	core (slug)	Ausfallstück (-teil)
V		
verspaningscapaciteit	metal removal rate	Werkstoffabtragrate
vervorming	distortion	Verzerrung
vlamboogvonken	electric-arc erosion	Lichtbogenerosion
vlampunt	flashpoint	Flammpunkt
vonk	spark	Funke
vonkboren	EDM drilling	FE-Bohren
vonkeroderen	spark erosion	Funkenerodieren/FE
vonkerosie/vonk'verspanen'	EDM	Funkenerosion (FE)
vonkgenerator	power supply (generator)	FE-Generator
vonk-/servokop	workhead	Arbeitskopf
vonkkrater	discharge crater	Bearbeitungskrater
vonkontlading/-overslag	erosion pulse	Funkenentladung
vonkslijpen	EDM grinding	FE-Schleifen
vonkspleet (zijdelings/frontaal)	gap (lateral/frontal)	Funkenspalt (seitlich/frontal)
voorinstellen	presetting	Voreinstellen
voorsnijden	rough cutting	Schruppen
W		
warmte beïnvloede zone (HAZ)	heat affected zone (HAZ)	wärmebeeinflusste Zone
weggevonkte deeltjes	chips	Erodierpartikel
werkstuk (karwei)	workpiece (job)	Werkstück
werkstukbak	worktank	Werkstückbehälter
witte laag	recast (white) layer	weisse Schicht
wolframcarbide (hardmetaal)	tungsten carbide	Wolframkarbid (Hartmetall)
Z		
zandstralen	sandblasting	Sandstrahlen
zinkvonken	die sinking EDM (plunge EDM)	Senkerodieren

Literatuuroverzicht

- [1] B. Lauwers, J.P. Kruth, W. Eeraerts, Wear Behaviour and Tool Life of Wire-EDM-ed and Ground Carbide Punches, Annals of the CIRP, Vol. 54/1, 2005, pp. 163-166.
- [2] M. Kunieda, B. Lauwers, K.P. Rajurkar, Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, Annals of the CIRP, Vol. 54/2, 2005, pp 599-622.
- [3] T. Masuzawa, T. Tanaka, Water-based dielectrics solution for EDM, Annals of the CIRP, Vol. 32/1/1993.
- [4] W.König, F. Siebers, EDM-sinking with waterbased working medium, Production Engineering, Vol I/2 (1194).
- [5] B. Lauwers, Computer Aided Process Planning and manufacturing for Electrical Discharge Machining, PhD Thesis, 1993, K.U. Leuven, ISBN 90-73802-25-3.
- [6] Ph. Bleys, Electrical discharge milling: technology and tool wear compensation, PhD Thesis, 2003, K.U. Leuven, ISBN 90-5682-454-6.
- [7] Numerieke besturing, (Flexibele productie automatisering, deel I); L. Reijers/H. de Haas; ('88); De Vey Mestdagh..
- [8] Influence of the composition of WC-based cermets on the manufacturability by wire-EDM, B. Lauwers, W.Liu, W. Eeraerts, Journal of Manufacturing Processes, Vol 8/No.2, 2006.
- [9] VDI 3402 - Elektroerosive Bearbeitung (Blatt 1-5); VDI - Düsseldorf.
- [10] CIRP deel 9 - Wörterbuch der Fertigungstechnik; 1984; Girardet, D-E-Fr.
- [11] ISO/R 841 - "Numeriek bestuurd machine, aanduiding assen en bewegingsrichtingen".
- [12] "Werkzeugspezifische Einflüsse beim funkenerosiven Schneiden mit ablaufender Drahtelektrode"; G. Hensgen; Dissertation TH Aachen, BRD; 1984.
- [13] "Current Trends in Non-Conventional Machining Techniques"; R. Snoeys, F. Staelens, W. Dekeyser; Annals of the CIRP, Vol. 23/2/1986.
- [14] CAD/CAM; M. Groover/Zimmers; ('84); Prentice Hall.
- [15] Elektroerosive Metallbearbeitung; M. Feurer; ('83); Vogel Fachbuch.
- [16] CNC Funkerosion;
- [17] Erodieren; CNC Ausbildung, Deel 6; Carl Hanser Verlag.
- [18] Planetair vonken; J. van den Nieuwenhof; Polytechnisch Tijdschrift Werktuigbouw 10/87.
- [19] Onderhoud Zinkvonkmachines; PTW 2/88.
- [20] Constructie zinkvonkmachine; J.L.C. Wijers; Polytechnisch Tijdschrift Werktuigbouw 10/89.
- [21] Vonkerosief bewerken; Special Report, B. Lauwers, W. Clappaert, B. Van Daele, J.P. Kruth; MB-produktietechniek, nr 11, november 1991.
- [22] Computer Aided Process Planning and Manufacturing for Electrical Discharge Machining; B. Lauwers; Doctoraats thesis, 93D5, Departement Werktuigkunde, K.U.Leuven; 1993.
- [23] Syllabus Themadag "Vonkerosie" 1994; Mikrocentrum Nederland, Eindhoven.
- [24] Ontwikkeling bij vonkverspaningsmachines en integratie met CAD/CAM; D. Dauw.
- [25] Development of EDM-Die-Sinking to a computer integrated Technology; W. Jutzler.
- [26] Integration of EDM within a CIM environment; M. de Vries; N. Duffie; J.P. Kruth; D. Dauw; Annals of the CIRP, Vol.39/2/1990, Hallwag, Bern.
- [27] EN 60204 - Elektrische Ausrüstung von Industrie Maschinen; Allgemeine Anforderungen.
- [28] Roterend vonken; J.L.C. Wijers; Metaal & Kunststof 1/2 1995.
- [29] VDI DGQ 3441.
- [30] Abtragen, Band 3, Fertigungsverfahren; W. König; 1979; VDI-Verlag.
- [31] VDI 3406.
- [32] CNC Ausbildung Erodieren; Carl Hanser Verlag.
- [33] Abtragen und Beschichten, Band 4/1; Spur c.s.
- [34] Handbuch der Fertigungstechnik; 1987; Carl Hanser Verlag.
- [35] "Knowledge-based system for wire-EDM"; W. Dekeyser; Ph.D-thesis 88D2; K.U. Leuven, België; 1988.
- [36] EN 12957, Machine tools: Safety - Electro Discharge Machines; mei 2001.
- [37] "Electrodes in a hurry"; Mark Albert, Prof. W. Bradley, Dr. B.Stucker. MMS on line articles 029602.
- [38] "Onderzoek rapid EDM elektrodes met verrassend resultaat" Ing. R. Zander Ing , N.M.J.P.Kooijmans; MB metaalbewerking nr.9 sept 2003
- [39] VDI 3227 - 3232 "Technische ausfuhrungsrichtlinien für Werkzeugmaschinen"

Tijdschriftartikelen

- * W. König, G. Hensgen; "Auf den Werkstoff kommt es an"; Industrie-Anzeiger, Nr. 56/57, 20/7/1983, 105e jaargang.
- * "CNC draadvonken"; PT/Werktuigbouw, 2/86.
- * B.M. Schumacher; "Modernes funkenerosives Schneiden"; Werkstatt und Betrieb, 120e jaargang, 9/87.
- * Vonk special: Planetair vonken; F.M.G. van Tuijl; "Draadvonken"; J.L.C. Wijers; "Vonkboren"; PT/Werktuigbouw, 10/87.
- * "CNC - vonkontwikkelingen", Metaal & Kunststof, 24/25 1987.
- * "Autonoom draadvonken"; J.L.C. Wijers; MB Metaalbewerking, 6/88.

Vaktijdschriften

- * EDM Today (USA).
- * EDM Europe.
- * EDM Japan.
- * Annals of the CIRP (www.cirp.net).

Vonkcursussen/voorlichting

- * Mikrocentrum Eindhoven: zinkvonken, draadvonken.
- * Tilburg.
- * Machinefabrikanten.
- * TH Aken.

Bron figuren

Met dank aan:

- Berkenhof (, D):
3.2; 3.8; 3.9; 3.11
- BES EDM (Fluorn-Winzeln, D):
3.36
- Ceratizit (Reutte, Au):
3.28; 3.29
- Cetim (Senlis, Fr):
1.19
- Deckel (D):
2.3
- Eldim (Lomm/Arcen)
- Erowa (..., CH):
4.1
- GF AgieCharmilles (Agie, Charmilles en Mikron) (CH)
1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.47; 2.1; 2.4; 2.5; 2.44;
2.57; 2.89; 2.90; 3.7; 3.18; 3.19; 3.22; 3.23;
3.48; 3.49; 3.52; 3.59; 4.7; 4.8; 4.9; 4.15;
4.17; 5.4; 5.7
- FME (Zoetermeer):
2.33; 2.71
- Heun EDM (Kahl, D):
2.73
- Holec
3.33; 3.34
- Intech EDM (Lomm)
- K.U.-Leuven/PMA (Leuven, B):
1.14; 1.21; 2.65; 2.66; 2.67; 2.68; 2.74; 2.76;
2.79; 2.80; 2.82; 2.86; 2.88; 4.4
- Makino (Tokio, J):
2.93; 3.10
- MB Funkenerosionsmaschinen (... ,):
2.72
- Mitsubishi (..., J):
2.83; 2.91; 2.92
- Nekofa (Vianen)
3.64
- NTS (Eindhoven):
3.57; 3.58
- Oel-Held (Stuttgart, D)
1.12
- OPS/Ingersoll (Burbach, D):
2.6; 4.12
- Philips (DAP, Drachten):
4.16; 4.17; 5.2; 5.3
- Poco Graphite (..., USA):
2.12
- Sarix (Losone, CH):
2.90,
- Seibu (... ,J)
- SMS (Tilburg):
1.6; 1.48; 3.3; 4.2; 4.3; 5.5
- Sodick (..., J):
1.46; 2.46
- System 3R (Vällingby, S):
2.11
- TNO Industrie en Techniek (Eindhoven):
2.2; 2.17
- Trumpf Laser GmbH (Ditzingen, D):
2.18; 2.19
- Uddeholm (... , S):
1.18
- Universiteit Tokio (Tokio, J):
2.81
- Vollmer (... , D):
1.23; 1.24; 2.84; 2.88; 4.19
- Walter/Exeron (... , D):
2.38; 2.39
- W.I.S.E 2000 Eindhoven):
1.16; 2.54; 3.4; 3.14; 3.21; 3.53

Trefwoordenlijst

A-as	instelparameter	servo
adressen	kathode	servosysteem
afname	klemmen	simuleren
afwikkelen	kortsluitpuls	sintermatrijs
afwikkelsnelheid	krachtwerking	snijden
anode	krater	snijplaat
assenmanipulatie	kwaliteitscontrole	snijnsnelheid
	litteken	snijstempel
B-as	M-woorden	soortelijke massa
baancorrectie	maatstelsel	soortelijke warmte
beïnvloede zone	maatsysteem	spanning
besturingssysteem	machineframe	specificaties
beveiligingssysteem	materiaalbeïnvloeding	spleet
bewerkingsnomogram	matrijs	spoeling
bewerkingsstrategie	meetcycli	spoelkop
bewerkingstoegift	meetnauwkeurigheid	startgat
bogen	microvonken	statische pulsgenerator
boogpuls	mogelijkheden	stempel
CEN	nabehandelen	stop
communicatie	nacalculatie	stroom
coniciteit	nulvlak	stroomdichtheid
contourbesturing	numeriek bestuurd draadvonken	stroomtoevoer
contourcorrecties	numerieke besturing	
contourfout	offset	technologie
contourvonken	omloopbewegingen	testsneede
coördinatensysteem	omtreksnijkant	toekomstperspectief
deelelektroden	onderhoud	tolerantie
demineraliseringsinstallatie	onderhoudsplan	toucheren
demiwater	ontsteekspanning	translatie(-afstand)
diëlektricum	ontstekingsvertraging	treksterkte
diëlektricumaggregaat	opbouw	
diëlektricumspoeling	opdelen	U-as
doorlooptijd	open generatorspanning	uitkameren
doorslag	open puls	uitlijnen
draad	oppervlaktegesteldheid	uitrichten
draadsysteem	oppervlakteruwheid	uitvalstuk
draadbreek	opspannen	UV-slede
draaddiameter	opspansystemen	
draadelektrode	opspantafel	V-as
draadgeleiding		veiligheid
draadinvoer	parallelliteitsfout	veiligheidsaanbevelingen
draadradius	planetaire beweging	viscositeit
draadsoorten	planetaire bewegingsmogelijkheden	vluchtstrategie
draadtrillingen	planetair vonken	vonk
draaduitrichten	plasma	vonkboormachine
draadvonken	polariteit	vonkdoorslag
draadvonkmachine	polijstvonken	vonkerosieproces
	positieve aspecten	vonkfrezen
EDM (Electrical Discharge Machining)	positioneernauwkeurigheid	vonkspleet
elektrode	positioneren	vonk'verspanen'
elektrodeconstructie	profiel	voorbehandelen
elektrodeslijtage	profielfout	voorstelling
elektrodesysteem	profielnauwkeurigheid	voorstelplaats
elektrodewisselaar	programmeermethode	
elektronen, primaire	programmeersysteem	warmtegeleidingscoëfficiënt
equidistant	prototype	werkstuk
erosiepuls	pulsduur, effectieve	werkstukbak
extrusiematrijs	pulsduur	werkstukcontour
	pulsenergie	werkstukopspantafel
fabricagevoorbeelden	pulsfrequentie	werkstukverplaatsing
filtersysteem	pulsgenerator	werkvoorbereiding
	pulsintervaltijd	wisselpunt
G-woorden	pulsperiodetijd	wisselsystemen
gedeïoniseerd water	pulsspanning	
gedemineraliseerd water	pulsstroom	X-as
geleidbaarheid, elektrische		Y-as
generatorinstelling	rapid prototyping	Z-as
generatorpulsduur	referentievlak	zinken
geometrisch programma	relaxatiegenerator	zinkvonken
	restspanningen	zinkvonkerosie
hardheid	robotwisselaar	
hardmetaal		
hulpfuncties		



Vereniging FME-CWM

vereniging van ondernemingen
in de metaal-, kunststof-,
elektronica- en elektrotechnische industrie
en aanverwante sectoren

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

Telefoon (079) 353 11 00

Telefax (079) 353 13 65

E-mail: alg@fme.nl

Internet: <http://www.fme-cwm.nl>