

Een draadzaag voor het produceren van ultrageluidstransducenten

N. de Jong, A. den Ouden, J.F. Brinkman, R. Niesing, C.T. Lancée, N. Bom;
Erasmus Universiteit, Rotterdam

Echografie op basis van ultrageluid is heden ten dage een belangrijk hulpmiddel in de medische diagnostiek, bijvoorbeeld in de cardiologie, de gynaecologie of de radiologie. Een zeer belangrijk onderdeel van de ultrageluidsapparatuur vormt de transducent, welke bestaat uit een groot aantal afzonderlijke elektrische en mechanische elementen (tot 600) op een onderlinge afstand van 0,2 mm.

In dit artikel wordt een draadzaag beschreven waarmee in een keer maximaal 600 akoestische elementen over een breedte van 120 mm gezaagd kunnen worden. Verschillende parameters zoals draadspanning, zaagsnelheid, etc., worden automatisch geregeld. Hierdoor treedt draadbreek zelden op en wordt een optimaal zaagresultaat bereikt. Met deze zaag zijn de produktiekosten laag, worden geringe krachten op het te zagen materiaal uitgeoefend, wordt weinig warmte geproduceerd, is het gezaagde oppervlak zeer glad en kan tot onbeperkte diepte gezaagd worden.

De hier beschreven draadzaag heeft bewezen zeer goed bruikbaar te zijn voor het fabriceren van experimentele ultrageluidstransducenten, zoals lineaire arrays, phased arrays en transoesofagale (slokdarm) phased arrays. Andere toepassingen komen ook in aanmerking, vooral als een diepe zaagsnede vereist is of als de uit te oefenen krachten tot een minimum beperkt dienen te blijven.

Inleiding

Voor onderzoeksdoeleinden is er bij de Erasmus Universiteit Rotterdam een verscheidenheid aan prototypes van ultrageluidstransducenten gefabriceerd. Reeds in 1972 werd de eerste enkeldraads zaag ontwikkeld, welke het mogelijk maakte een 32-elementen akoestische transducent te produceren met een uitwendige diameter kleiner dan 3 mm die op het uiteinde van een catheter gemonteerd kon worden. De huidige eisen hebben geleid tot het ontwikkelen van een geheel nieuwe parallelle draadzaag, waarmee maximaal 600 akoestische elementen in één keer zijn te zagen. Dit nieuwe instrument, tezamen met de elektronische besturing, zijn te zien in figuur 1. Het draadzaagprincipe maakt het mogelijk harde materialen zeer diep te zagen. Het apparaat heeft bewezen uitstekend geschikt te zijn voor toepassing bij de fabricage van ultrageluidstransducenten. Ongetwijfeld zijn er ook andere toepassingsmogelijkheden. Dit artikel bevat een kort overzicht van de principes en de ontwikkelingen van ultrageluidsmethodieken en de daarbij behorende transducenten, waarbij het laatste een specifieke toepassing is van de ontwikkelde parallelle draadzaag. Voorts worden de mechanische aspecten van de draadzaag behandeld en

daarna volgt een beschrijving van de elektronische stuurprincipes.

Principes en ontwikkeling

Ultrageluidstransducenten bestaan uit een groot aantal afzonderlijke elementen, waarvan de fabricage tamelijk gecompliceerd is vanwege de kleine afme-

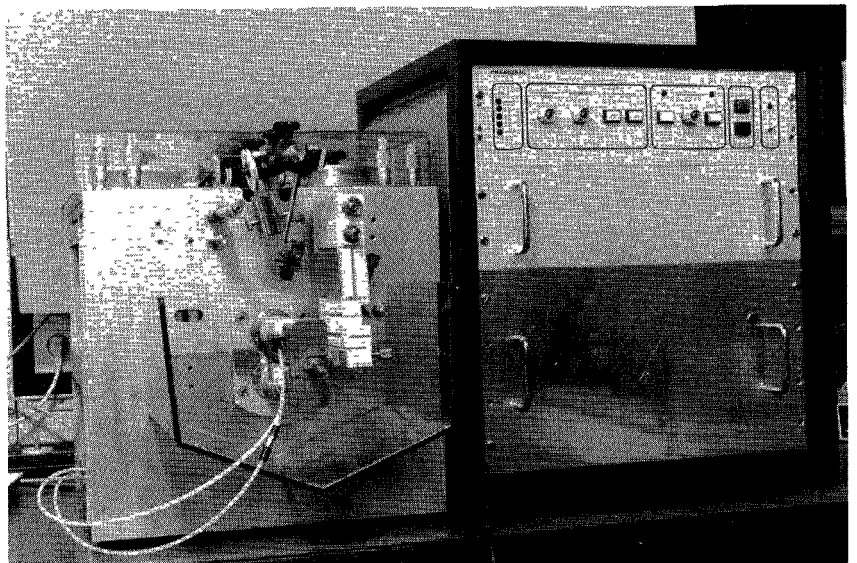
tingen. In figuur 2 ziet men een gedetailleerde afbeelding van een ultrageluidstransducent

Een zeer belangrijke stap in het fabricageproces is het verspanen van het keramisch materiaal voor het verkrijgen van de afzonderlijke elementen. De volgende methoden zijn hiervoor geschikt:

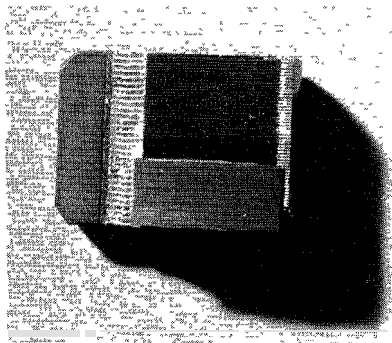
1. Zagen met een draadzaag.
2. Verspanen met een laser bundel.
3. Verspanen met een ultrageluidsbundel
4. Verspanen met een elektronenbundel.
5. Zagen met kleine diamantzaagjes
6. Etsen.

In het algemeen dienen de volgende aspecten in aanmerking te worden genomen bij het verspanen van het keramisch materiaal:

- de ontstane warmte;
- de uitgeoefende mechanische krachten;
- de gewenste zaagdiepte;
- de zaagsnelheid;
- de aard van het te zagen materiaal;
- de flexibiliteit (met het oog op onderlinge afstand en de vorm van de elementen);
- de kwaliteit van de zaagsnede;
- de produktiekosten.



Figuur 1 De nieuwe draadzaag met huis voor de elektronische besturing, zoals deze werd ontwikkeld voor de produktie van ultrageluidstransducenten. Hiermee kunnen tot 600 elementen gezaagd worden over een breedte van 120 mm met een minimum zaagsnede van 40 micron bij een snelheid van 1 mm / 5 minuten. De zaagdiepte is instelbaar.



Figuur 2 Detail van een ultrageluidstransducent. De grootte is ongeveer 10×10 mm

De parallelle draadzaag oefent geringe krachten uit op het werkvlak en ontwikkelt weinig warmte. Warmte die geproduceerd wordt, wordt door de slijpvloeistof afgevoerd. De zaagdiepte is niet begrensd; de zaagsnelheid is hoog omdat een groot aantal elementen tegelijk gezaagd wordt. Echter, de flexibiliteit is gering en zachte materialen kunnen niet met grote precisie gezaagd worden.

De flexibiliteit van de laser is groot. Niet alle materialen kunnen op deze wijze gezaagd worden. De zaagsnelheid is tamelijk laag omdat er in serie gezaagd wordt en de warmteontwikkeling beperkt dient te blijven. Ook de zaagdiepte is beperkt. Om deze redenen wordt de laser slechts in speciale gevallen gebruikt, als het kostenaspect niet het belangrijkste is.

Verspanen met een ultrageluidsbundel heeft twee belangrijke nadelen: de zaagsnede is tamelijk breed en het breekbare keramische materiaal wordt blootgesteld aan grote krachten.

De elektronenbundel biedt bijna dezelfde mogelijkheden als de laserbundel. Ook hier liggen de productiekosten op een hoog niveau. Deze methode is geschikt voor andere materialen dan die welke met de laserbundel gezaagd kunnen worden.

De diamantzaag wordt veel gebruikt. De zaagsnede kan smal gehouden worden: 30 tot 40 μm . Het zaagproces verloopt in serie, maar de zaagsnelheid kan opgevoerd worden door verschillende zagen parallel te plaatsen. De diepte is beperkt (25 maal de zaagbreedte). Om de temperatuur laag te houden wordt waterkoeling toegepast. De mechanische krachten zijn aanzienlijk. De productiekosten zijn tamelijk laag.

Etsen van de elektrode van het keramiek is slechts zinvol als de laterale koppeling van afzonderlijke elementen laag is. Voor de huidige keramische transducers is deze methode niet aanvaardbaar.

Parallele draadzagen werden van oudsher gebruikt voor het zagen van halfgeleiders. Tegenwoordig wordt dit met een diamantzaag gedaan. Toch heeft het zagen van piezo-elektrisch materiaal met een parallelle draadzaag voordelen, zoals

- het parallelle zaagprocédé en de daaruit voortvloeiende lage productiekosten,
- de kleine krachten die worden uitgeoefend en de geringe warmteontwikkeling waardoor de kwaliteit van de transducent optimaal blijft;
- het gezaagde oppervlak is zeer glad; Het speciale materiaal waaruit 'backing' en 'matching' van de transducent bestaan, kan goed worden gezaagd.
- de diepte van de zaagsnede is onbeperkt, zodat elementen met minimale overspraak vervaardigd kunnen worden.

Een theoretische beschrijving van de bovengenoemde aspecten is gegeven door Fujisawa [2]. Baer [1] beschrijft de praktische aspecten van een draadzaag. De eerste bij de Erasmus Universiteit ontwikkelde draadzaag werd in 1975 gebouwd ten behoeve van het ontwerp van een speciale intracardiale scanner [3]. De parallelle draadzaag welke in dit artikel beschreven wordt, is ontworpen voor de constructie van transducenten zoals het lineair-, het phased- en het transoesofagale array.

De noodzaak van een smalle zaagsnede voor

ultrageluidstransducenten met meer elementen.

De transducent bestaat uit piezo-elektrisch materiaal dat onder invloed van elektrische energie van vorm verandert. Het omgekeerde gebeurt ook. Door op de transducent een elektrische spanning van een bepaalde frequentie te zetten, ontstaat een longitudinale drukgolf in het aangrenzende medium. Gereflecteerde drukgolven veroorzaken weer een elektrische lading op de transducent.

Voor de verschillende afbeeldingswijzen met elektronisch afgebogen ultrageluidsbundels worden twee soorten transducenten gebruikt: het lineair array en het phased array. Een lineair array bestaat uit een rij kleine elementen waarvan ieder element of iedere groep van elementen werkt als een

afzonderlijk transducent. Door elektronisch van het ene naar het andere element te schakelen wordt een rechthoekig beeld met evenwijdige echolijnen opgebouwd. Met een phased array wordt de geluidsbundel sectorgewijs afgebogen. Deze afbuiging van de geluidsbundel gebeurt elektronisch door de elementen elkeen eigen vertragingstijd te geven. Door deze vertragingstijden zo te kiezen dat er een constant oplopend verschil bestaat ($\Delta t = \tau$), ontstaat een golffront dat een hoek maakt met de as van de transducent. Het beeld heeft de vorm van een sector.

De beeldkwaliteit bij de bovengenoemde technieken hangt sterk af van de vorm van de geluidsbundel. Volgens het principe van Huygens kan een akoestisch veld worden beschouwd als een oneindig aantal afzonderlijke geluidsbronnen.

Teneinde een goede definitie van de geluidsbundel te krijgen, is het noodzakelijk voor een groot aantal geluidsbronnen (afzonderlijke elementen) de amplitude en de fase te definiëren. Voor wat betreft het aantal elementen en de afstand daartussen, kan het Nyquist criterium worden gehanteerd (afstand tussen de elementen kleiner dan de halve golflengte). Voor een frequentie van 3 MHz, welke algemeen gebruikelijk is in de medische diagnostiek, en een voortplantingssnelheid in het menselijk lichaam van $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\rightarrow \lambda = 0,5 \text{ mm}$), levert dit een afstand tussen de elementen van minder dan 0,25 mm.

Het voorgaande maakt duidelijk dat voor het verkrijgen van een goede tweedimensionale registratie het aantal afzonderlijke elementen groot zal moeten zijn en de onderlinge afstand klein en equidistant. Dit stelt hoge eisen aan de toe te passen zaagmethoden.

Mechanische aspecten van de draadzaag

Op basis van eerder opgedane ervaring bij het ontwerp van enkeldraadszaag en bij de fabricage van lineair array transducenten met een aangepaste, in de handel zijnde parallelle draadzaag, achten we de volgende ontwerpcriteria noodzakelijk:

- continu draadtransport in twee richtingen,
- snelheid van de draad tot $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- geschikt voor draad met een dikte tussen 20 en 50 μm ,
- draadspanning regelbaar van 1 tot 10 N,
- regelbare zaagdruk,
- langzaam en automatisch oplopende zaagdruk aan het begin van het zaagproces (van 0 N tot de van tevoren ingestelde waarde in vijf minuten),

- bewegende delen bestand tegen slijtage door slijpmiddelen,
- 600 elementen kunnen zagen over een breedte van maximaal 120 mm,
- het zaagproces dient zo automatisch mogelijk te verlopen

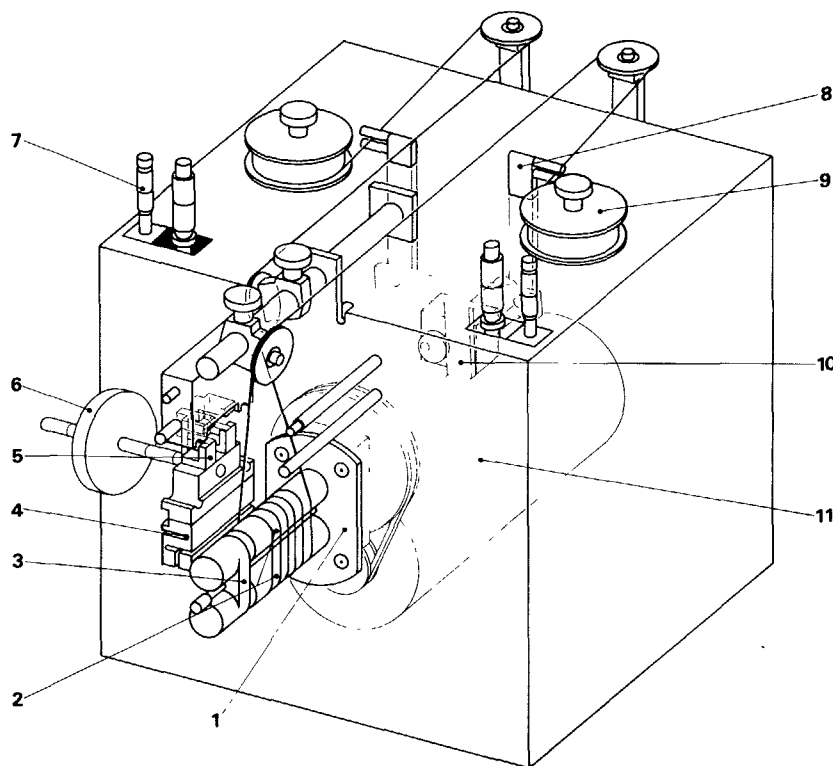
Om aan deze eisen te voldoen, is de zaag als volgt geconstrueerd; zie ook de figuren 3 en 4, waarvan de positienummers corresponderen met de in de vol-

gende tekst tussen haakjes geplaatste nummers.

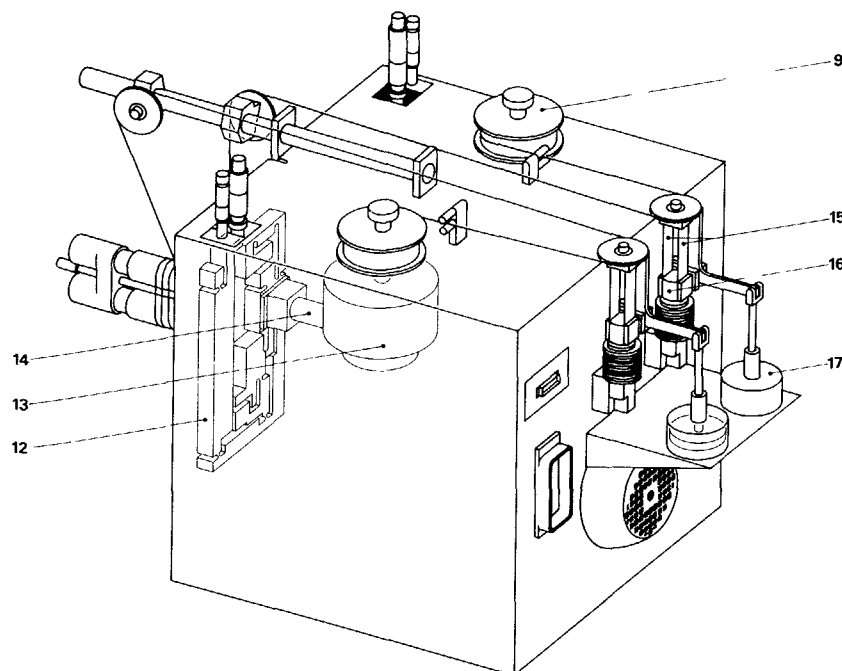
De draad wordt om twee cilinders (2) gewonden die boven elkaar zijn geplaatst. De draadafstand wordt bepaald door in de cilinders aangebrachte groeven. Op die manier ontstaan twee verticale draadvlakken. De cilinders zijn gemonteerd op assen, waarvan er een wordt aangedreven door de hoofd elek-

tromotor (11). Deze motor zorgt voor het transport van de draad. De motor is bidirectioneel; het aantal omwentelingen per minuut is regelbaar van 0 tot 1200. Dit resulteert in een loopsnelheid van de draad van iets meer dan 2 m.s^{-1} . Aangezien de cilinders parallel moeten blijven, zelfs als er 600 wikkelingen zijn aangebracht, moet het ophangstelsel absoluut vrij van speling zijn. Daarom is de afdichting erg belangrijk. Immers, er moet voorkomen worden dat het bij het zagen gebruikte slijpmiddel in het ophangstelsel komt. De vrije uiteinden van de assen worden verbonden met een massief blok (3) waarin zich kogellagers bevinden, om het doorbuigen van de assen tegen te gaan. De aan- en afvoer van de draad wordt verzorgd door twee spoelen (9) die om beurten als aanvoer- of opslagspoel kunnen dienen. Deze spoelen worden ieder afzonderlijk door een speciale elektromotor (13) aangedreven die de draad op spanning houdt. Deze spanning wordt gemeten door twee dynamometers (16). Gedurende het zaagproces kunnen longitudinale golven in de draad ontstaan. Om de invloed hiervan op het regelmechanisme te onderdrukken, zijn veren (15) met hydraulische dempers (17) aangebracht.

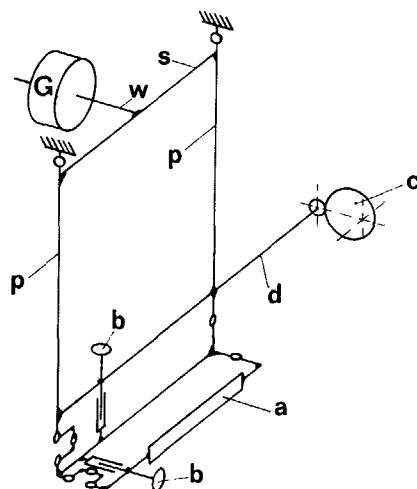
Om de transducent voor en gedurende het zaagproces te kunnen manipuleren, is er een speciaal mechanisme ontworpen. Dit bestaat uit twee rechthoekige polyacetaat blokken (4 en 12). Hierin zijn groeven en gaten gemaakt voor het verkrijgen van flexibele scharnieren, terwijl het overige materiaal dienst doet als arm voor het overbrengen van ingestelde krachten. Op die manier is het mechanisme volkomen bestand tegen slijtage door de slijpvloeistof. Het mechanisme is schematisch weergegeven in figuur 5.



Figuur 3 Schematische tekening van de voorkant van de draadzaag



Figuur 4 Schematische tekening van de zijkant van de draadzaag



Figuur 5 Schematische tekening van het assenstelsel dat dient om het werkstuk te manipuleren en slijtage te beperken

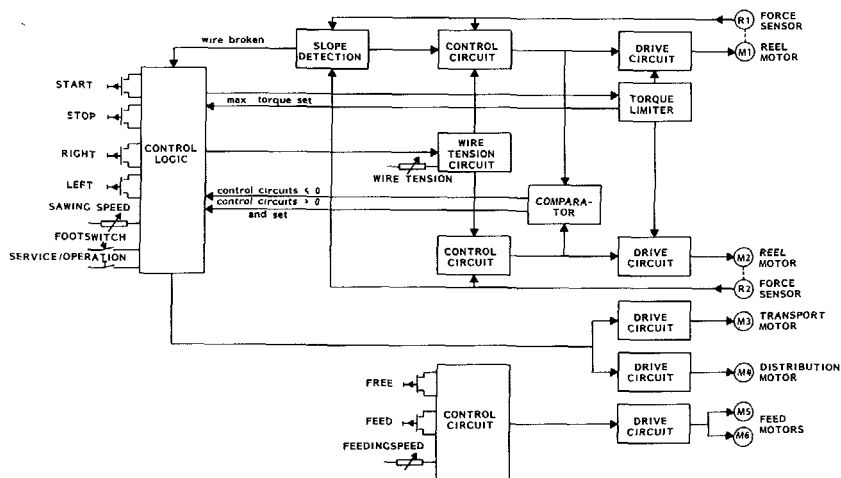
De transducent wordt gemonteerd op een plaat (a) en evenwijdig gesteld met het draadvlak door middel van stelschroeven (b). De armen (p) die rond de scharnieren (r) draaien geven de transducent een cirkelvormige beweging. De rotatiehoek is echter zo klein dat de beweging van de transducent als lineair beschouwd kan worden. Gedurende het zaagproces moet de transducent met een constante kracht tegen de draden gedrukt worden. Deze kracht wordt uitgeoefend door gewicht G en is te veranderen door het gewicht langs staaf w te schuiven. Aan het begin van het zaagproces is er geen contact tussen de transducent en het draadvlak en beweging van staaf (d) wordt voorkomen door nok (c). Deze nok wordt door een kleine elektromotor (onderdeel 14 in figuur 4) heel langzaam in een roterende beweging gebracht, zodat de transducent geleidelijk naar de draden toe wordt bewogen, totdat hij er tenslotte met de ingestelde kracht tegenaan wordt gedrukt. Een dergelijk begin van het zaagproces heeft een zeer gunstige invloed op de kwaliteit van de transducent, aangezien het leidt tot grotere precisie ten aanzien van de onderlinge afstand van de elementen en tot rechte zaagsneden.

Aspecten van de elektronische besturing

Draadspanning en zaagsnelheid moeten gedurende het zaagproces aan te passen zijn zonder dat schokbewegingen ontstaan die draadbreek kunnen veroorzaken. In het laatste geval moet het zaagproces onmiddellijk gestopt worden. Gedurende de beginfase van het zaagproces moet de zaagdruk langzaam toenemen van 0 tot de uiteindelijke druk, omdat anders geen rechte zaagsnede wordt verkregen. Om aan deze en andere eisen te voldoen, wordt gebruik gemaakt van elektronische schakelingen. Het startprogramma en de verschillende schakelingen en onderdelen zijn schematisch weergegeven in het blokdiagram van figuur 6 en het stroomdiagram van figuur 7.

Tijdens het zagen dienen plotselinge of grote veranderingen in de draadspanning te worden vermeden. Deze verkorten de levensduur van de draad of veroorzaken onmiddellijke breek. Aan deze belangrijke voorwaarde wordt voldaan door gebruik van de start/stop procedure en het invoeren van integratoren in het ontwerp.

De controle- en aandrijfschakelingen van de motoren 1-4 (zie figuur 6) worden in een vaste volgorde geactiveerd: de start/stop procedure. Deze procedure bestaat uit verscheidene stappen die



Figuur 6 Blokdiagram van de elektronica

elk slechts kunnen worden gestart, nadat de voorgaande is beëindigd. De hele procedure wordt gestuurd door de besturingslogica. Figuur 7 laat het stroomdiagram van de startprocedure zien.

Nadat de startknop is ingedrukt controleert de logica of de spanning van de besturingsschakelingen van m1 en m2 (onderdeel 13 in figuur 4) gelijk is aan 0. Als dit niet zo is, dan heeft het systeem de voorafgaande stopprocedure nog niet beëindigd en wordt het startcommando genegeerd.

In de volgende stap wordt de spanning tot een maximum opgevoerd. Dit maximum is van tevoren ingesteld door middel van een potentiometer die van buitenaf onbereikbaar is. In de daarop volgende stap wordt de spanning van de besturingsschakelingen opgevoerd, hetgeen resulteert in een verhoging van de draadspanning, welke door middel van sensoren op een monitor zichtbaar wordt gemaakt. Als de ingestelde spanning is bereikt, kunnen de laatste stappen worden genomen.

Omdat de transportmotor m3 (onderdeel 11 in figuur 3) vanuit stilstand langzaam sneller moet gaan draaien, controleert de logica eerst of de invoerspanning van m3 gelijk is aan 0. Als dit niet zo is, wacht de logica tot dit wel het geval is. Dan kan m3 op gang komen en de snelheid wordt vervolgens opgevoerd tot de ingestelde zaagsnelheid. De transducent kan nu naar de draden toe worden bewogen en het zagen kan beginnen.

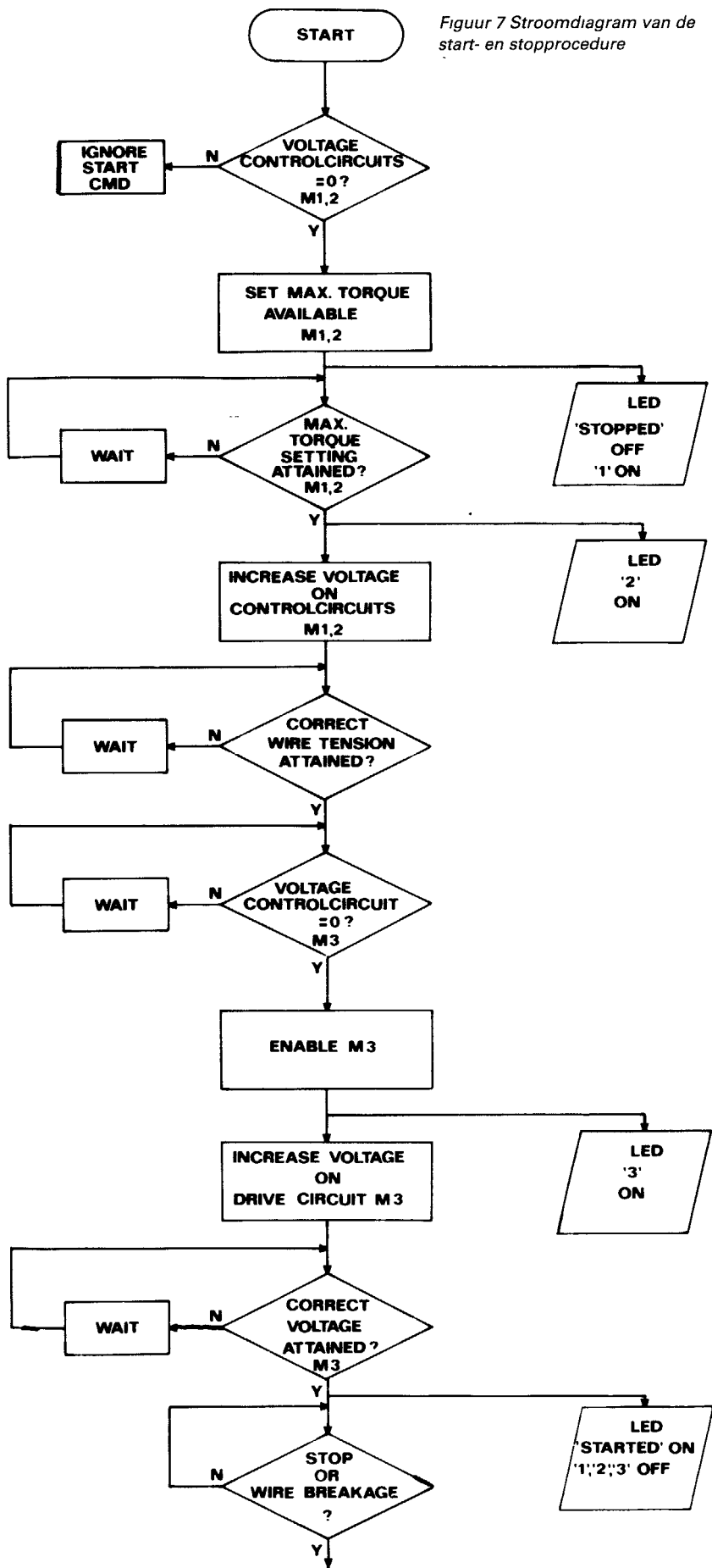
Aan beide zijden van de transportmotor is een opwindmotor geplaatst, waarvan de besturings- en de aandrijfschakeling in combinatie met een sensor een constante draadspanning in stand moeten houden. Voor een dergelijke combinatie worden twee terugkoppelingsslussen gebruikt. De grootste van deze slussen gebruikt de sensoren voor de draadspanning als terugkoppelingselement.

De kleinere lus registreert de uitgangsspanning van de aandrijvingschakelingen en houdt deze op een constant niveau. De stopprocedure is in wezen gelijk aan de startprocedure, behalve dan dat hier eerst op m3 wordt gelet en dan op m1, m2 en dat overal waar in de startprocedure opvoeren staat, hier vertragen moet worden gelezen. De startprocedure kan alleen maar ingezet worden als een voorgaande stopprocedure beëindigd is, doch een stopprocedure kan op elk gewenst moment worden ingezet.

Een ander belangrijk punt is draadbreek. Als er geen voorzorgsmaatregelen genomen worden, kan draadbreek tot een gevaarlijke situatie leiden. Als de draad breekt, zal de desbetreffende sensor een veel te lage draadspanning aangeven. De besturingsschakelingen zullen dan trachten de draadspanning te herstellen door het motorvermogen op te voeren. Daardoor zal de motor, niet langer tegengehouden door de draad, zijn toerental tot een maximum op gaan voeren, daarbij het losse draadeinde in het rond slingerend. Om dit te voorkomen wordt de eerste afgeleide van de draadspanning aan beide zijden bepaald. Op het moment dat de draad breekt, is deze afgeleide groot. Dit wordt doorgegeven aan de besturingslogica, die ervoor zorgt dat dan alle motoren onmiddellijk worden stopgezet en er teruggekeerd wordt naar de begintoeestand.

Onderhoudsbediening

Het winden van de draad (600 windingen) is een intensief karwei. Hiervoor kan het systeem overschakelen naar de onderhoudsstand. In deze stand kan m3 in- en uitgeschakeld worden met behulp van een voetschakelaar, waardoor degenen die de machine bedient de handen vrij heeft om de draad om de cilinders te leggen. De rest van het systeem is in deze stand buiten werking. Onderin



figuur 6 staat voorts het blokdiagram met de afzonderlijke aandrijfschakelingen en motoren voor transport en beweging van het werkstuk.

Conclusies

Meer-elementen ultrageluidstransducenten voor medische toepassing vragen om kleine elementen en een smalle zaagsnede. Zagen met een draadzaag is een van de methoden om dergelijke transducenten te vervaardigen. De hier beschreven draadzaag is in staat om over een breedte van 120 mm tot 600 elementen te zagen met een minimum zaagsnede van 40 micron. Vergeleken met andere apparaten, zoals de diamantzaag of de laser, heeft de draadzaag een aantal specifieke voordelen, zoals:

- het parallel zagen en de daarmee samenhangende lage productiekosten;
- de geringe kracht die uitgeoefend wordt en de geringe warmteproductie, waardoor de kwaliteit van de transducent optimaal gehandhaafd blijft;
- de zaagsnede is zeer vlak; het speciale materiaal voor backing en matching van de transducent kan goed worden gezaagd;
- de zaagdiepte is niet aan een limiet gebonden, zodat elementen met geringe overspraak kunnen worden geproduceerd.

De door ons ontwikkelde draadzaag heeft zijn nut bewezen voor het vervaardigen van experimentele ultrageluidstransducenten zoals lineaire arrays, phased arrays en slokdarm phased arrays. De machine is volkomen automatisch. Andere toepassingen, speciaal wanneer een diepe zaagsnede is vereist of wanneer de zaagdruk minimaal gehouden dient te worden, zijn eveneens mogelijk.

Dankbetuiging

De auteurs danken L. Bekkering, A A Brouwer, J. Maas en J. Storm voor hun voortdurende inzet bij het tot stand komen van deze zaag en Corrie Eefting voor het daadwerkelijk totstandkomen van dit manuscript.

Literatuur

1. Baer K. Erfahrungen mit dem Fadentrennen. Mededeling Max Planck Institut, Stuttgart
2. Fujisawa M et al. Precision sawing with wire saw. Annals of the CIRP 32 1, 1983
3. Niesing R. Een draadzaag, constructie en resultaten. Mikroniek 16: 172-175, 1976.