

Miniaturisatie*

Prof. Ir. F. Doorschot

Adviseur Centrum voor Fabricagetechnieken, Nederlandse Philips Bedrijven BV, Eindhoven
Burtengewoon Hoogleraar T.U. Eindhoven

Allereerst wordt ingegaan op enkele effecten die samenhangen met miniaturisatie, waaruit blijkt dat bepaalde grenzen worden bereikt waarmee men rekening moet houden, bijvoorbeeld kristallietgrootten.

Vervolgens worden een aantal gebieden behandeld waarin problemen worden verwacht bij (verdere) miniaturisatie. Deze zijn: het maken, meten, mechanisch handlen, verbinden en beschermen (verpakken) van kleine onderdelen.

Inleiding

Van Dale geeft voor het begrip miniaturisatie (miniaturisering) de volgende omschrijving:

"Het werken op zeer kleine schaal met name het toepassen van steeds kleinere onderdelen bij de bouw van zeer samengestelde (elektronische) machines".

In deze omschrijving zitten twee zaken die de moeite waard zijn om even bij stil te staan.

- Het gaat over het toepassen van kleine onderdelen die zich bevinden in een apparaat dat verder best lomp/groot mag zijn.
- Elektronica staat tussen haakjes, dus dat mag wel maar hoeft niet persé.

Een koppeling van de miniaturisatie met de fijnmechanische industrie is zeer voordehand liggend. Eigenlijk is deze koppeling veel sterker dan met de elektronica, maar zo ervaart men het niet!

Een andere koppeling die men wel eens maakt is. miniaturisatie → fijnmechanische industrie → High Tech. Deze laatste koppeling is niet terecht, en houdt zelfs een niet klein gevaar in.

Onder "High Tech", hoogwaardige technologieën, wordt wel verstaan, een groep industrie sectoren, waaraan een minstens tweemaal zo hoge research & ontwikkelingsinspanning ten grondslag ligt, als percentage van de omzet, dan gemiddeld geldt voor alle industrie sectoren.

Dit zou dus inhouden, dat men van elke technologie "High Tech" kan maken door er meer in te investeren en dat lijkt onzin. Verder dient men te bedenken dat als er "High Tech" is, er toch ook

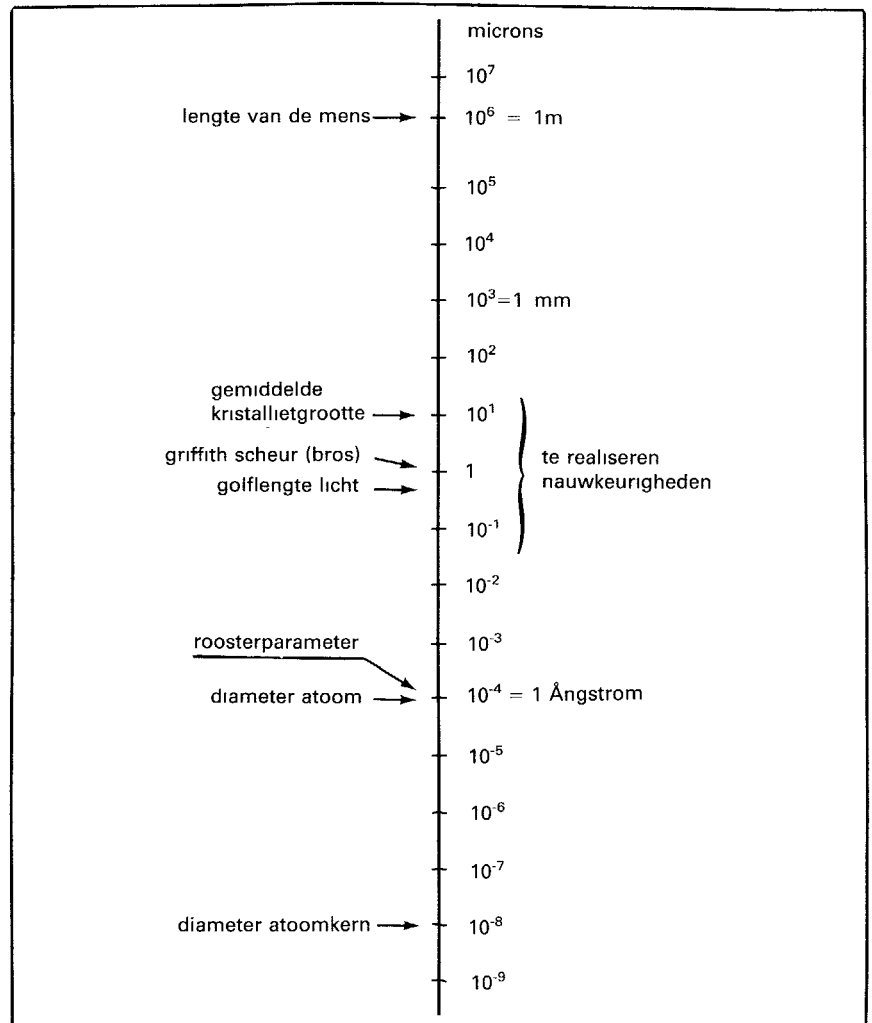
"Low Tech" moet zijn. Als de huidige "High Tech" niet in zich heeft om "Low Tech" te worden, zal het toepassingsgebied maar zeer klein blijven en waarschijnlijk snel verdwijnen. Dit geldt zeker niet voor de fijnmechanische techniek. Die was er, die is er en die zal er blijven.

Een plaatsbepaling

Zoals eenieder weet, zijn groot en klein relatieve begrippen. Het is daarom voordehand liggend, om eens na te gaan hoe de te realiseren afmetingen en nauwkeurigheden liggen t.o.v. de structuren waaruit de metalen zijn opgebouwd. In onderstaande grafiek zijn op logaritmische schaal de afmetingen (in microns) van enige zaken uitgezet. We kijken nu verder even alleen naar de nauwkeurigheden.

De te realiseren nauwkeurigheden zijn niet te extreem gekozen, namelijk tussen de 0,1 en 10 μm .

Wat we zien, is dat deze nauwkeurigheden vallen binnen:



* Voordracht gehouden tijdens de Manifestatie Fijnmechanische Techniek, 4, 5 en 6 november 1986

- a. de gemiddelde kristallietgrootte,
- b. de afmetingen van een Griffith-scheur,
- c. de golflengte van het licht.

Aangezien we in de diverse vakgebieden niet met dezelfde eenheden werken, zal velen dit ontgaan. Ook zien we dat we nog maar zo'n drie decaden (dus een factor 1000) afliggen van de roosterstructuren en de diameters van de atomen. Bedenken we echter dat we ook moeten meten, en dat de nauwkeurigheid van meten toch een factor 10 à 100 beter moet zijn dan de maaknauwkeurigheid, dan zien we dat we grenzen gaan naderen.

Het bestuderen en oplossen van de problemen die dit oplevert, zal een sterke stimulans gaan betekenen voor de totale werktuigbouwkunde. Met name in het vak Precision Engineering worden de problemen integraal aangepakt, ook nu reeds.

Enige effecten die samenhangen met miniaturisatie

Uit de voorgaande grafiek zien we al, dat miniaturisatie niet eenvoudig betekent dingetjes klein maken. We worden geconfronteerd met zaken die in de macro-wereld een ondergeschikte rol spelen. Aan de hand van de onderstaande drie willekeurige voorbeelden zullen we proberen of we iets van de problemen kunnen aanvoelen.

De invloed van de kristallietgrootte

De invloed van de kristallietgrootte op het mechanisch gedrag van een materiaal kan men met statistische technieken berekenen. We hebben gekozen voor de E-modulus. We weten dat de E-modulus van een éénkristal afhangt van de richting waarin we hem meten t.o.v. de roosterstructuur (kristal-anisotropie). Indien er "veel" kristallieten in de doorsnede liggen middelt het effect van de anisotropie echt uit en meet men steeds één E-modulus. Bij een klein aantal vindt men een gemiddelde en een spreiding.

$$\frac{1}{E_{gem}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} \right\}$$

$$\sigma \left\{ \frac{1}{E} \right\} = \frac{1}{2\sqrt{KLM}} \left\{ \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{E_{11}} \right\}$$

K, L en M zijn respectievelijk het aantal kristallieten in de dikte, lengte en breedte van een strip.

Wat betekent dit nu voor bijvoorbeeld een strip. Stel: afmeting van de kristalliet is gemiddeld 20 µm.

Dikte van een strip is 0,1 mm ± 100 µm, dus

$$K = \frac{100}{20} = 5 \text{ stuks}$$

Voor $\frac{E_{11}}{E_{22}} = 1,5$ kan men berekenen dat $K \cdot L \cdot M = 3672$, als men de spreiding in $E_{gem} \leq 1\%$ wil hebben.

Stel, de breedte is 0,5 mm ± 500 µm,

$$\text{dus } M = \frac{500}{20} = 25 \text{ stuks}$$

$$\text{Dat wil zeggen } L = \frac{3672}{5 \cdot 25} \approx 30 \text{ stuks,}$$

en de lengte van de strip wordt dan

$$l = 30 \cdot 20 \mu\text{m} = 600 \mu\text{m} \pm 0,6 \text{ mm}$$

Dus we zien dat we te doen hebben met afmetingen die nu al reëel zijn.

$\frac{E_{11}}{E_{22}} = 1,5$ is niet extreem, bijvoorbeeld

voor koper geldt.

$$\frac{E_{11}}{E_{22}} \approx 2,5, \text{ dan is: } K \cdot L \cdot M = 16863$$

$$\text{En dus } l = \frac{16863}{5 \cdot 25} \cdot 20 \mu\text{m} = 2698 \mu\text{m} \pm 2,7 \text{ mm}$$

Bij het buigen van een dunne strip wordt het effect nog duidelijker merkbaar; zie de foto.

Geluid, het gehoor

Als we geluid horen, dan heeft dat te maken met het trillen van de lucht waardoor er drukvariaties optreden. We gaan nu eens kijken naar de amplitude Y_m in lucht bij een frequentie van $\nu = 1000 \text{ Hz}$.

Men kan berekenen:

$$Y_m = \frac{P}{k\rho\nu^2}$$

Hierin zijn:

$$\nu = 331 \text{ m/sec (in lucht)}$$

$$k = \frac{2\pi\nu}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 1000}{331} = 19 \text{ m}^{-1}$$

$$\rho_o = 1,22 \text{ kg/m}^3$$

De maximale drukvariatie die het oor nog net kan verdragen is: $P = 28 \text{ N/m}^2$

Dan is:

$$Y_m = \frac{28}{19 \cdot 1,22 \cdot 331^2} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ m} \pm 11 \mu\text{m}$$

De P die men nog net kan waarnemen is: $P = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ bij 1000 Hz

Dan is.

$$Y_m = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{19 \cdot 1,22 \cdot 331^2} \approx 8 \cdot 10^{-12} \text{ m} \approx 10^{-11} \text{ m} \pm 10^{-5} \mu\text{m}$$

In de grafiek kan men zien dat de diameter van een atoom $10^{-4} \mu\text{m}$ bedraagt! Vraag: Hoe is het oor in staat om zo'n kleine verplaatsing te registreren?



Figuur 1 Gebogen magneetplaat, $t = 0,5 \text{ mm}$, vergroting 52 maal. Hier is duidelijk de vervorming van een aantal kristallieten te zien.

Het pletten van draad

Stel, we slaan een draadje $\varnothing d$ over 1 mm plat tot de dikte h . Het draadje is van koper met $\sigma_B = 300$ N/mm² (breekspanning).

Verdere gegevens: $d = 0,06$ mm;
 $h = 0,015$ mm en
 $l = 0,3$ mm

Voor de maximale drukspanning kan men berekenen:

$$\sigma_{\max} = \left\{ \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{h} \right)^2 + 1 \right\} \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}} = 2350 \text{ N/mm}^2$$

Voor de breedte van de plet vindt men:

$$b = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{h} = 0,19 \text{ mm}$$

De gemiddelde drukspanning = $\sigma_{\text{gem}} \approx 0,5 \sigma_{\max}$

Daarmee wordt de pletkracht:

$$K = 0,5 \sigma_{\max} \cdot b \cdot l \\ = 0,5 \cdot 2350 \cdot 0,19 \cdot 0,3 = 67 \text{ N}$$

Hiermee hebben we een situatie te pakken die in de praktijk zeer vaak misgaat. Als men twee stalen blokjes pakt en men legt het draadje ertussen, dan kan men het tussen de vingers plat knijpen. 67 Newton of 6,7 kgf kan men gemakkelijk bereiken. Echter, de maximale drukspanning σ_{\max} wordt 2350 N/mm², een spanning die men slechts met hardmetaal kan beheersen.

Het probleem is, dat onze ervaringswereld ons wel iets zegt over krachten maar nauwelijks iets over mechanische spanningen. Met name bij de miniaturisatie gaat dit ons steeds meer parten spelen en alleen berekeningen kunnen ons voor problemen behoeden.

Een ander bekend probleem uit deze reeks is het kleine kogellager. Door de schokken tijdens het transport lopen de spanningen zo hoog op, dat er stukjes uitspringen c.q. putjes ontstaan waardoor de lagertjes onbruikbaar worden.

Uit de getoonde voorbeelden moge duidelijk zijn, dat miniaturiseren meer inhoudt dan alleen maar dingetjes heel klein maken.

Waarzal miniaturisatie gevolgen hebben?

Als we miniaturiseren, dan heeft dat niet alleen maar effect op het onderdeel dat we miniaturiseren. Na het fabriceren van het geminiaturiseerde onderdeel, moeten we het handlen, enz. Ook deze problemen moet men voorzien en doorzien om tot een succesvol einde te komen.

Om hierin inzicht te krijgen werd in 1979 een onderzoek ingesteld in de elektronische en optische industrie. Via een provocerend rapport werd aan diverse top-specialisten gevraagd om te reageren. De respons was 100%, waaruit men kan afleiden dat het probleem leeft. Aan de hand van de reacties werd een nieuw rapport samengesteld en wederom om reactie gevraagd, maar nu mondeling. Daarna werd een samenvatting geschreven waarover consensus werd bereikt.

De informatie die men zo verkrijgt is natuurlijk in de tijd gedateerd. De ervaring leert echter dat de zaken niet zo snel veranderen. Dus het verkregen inzicht kan ook nu nog succesvol gebruikt worden, bijvoorbeeld om de ontwikkelingen te sturen. We zullen op dit rapport nader ingaan.

Uit de studie komen vijf gebieden naar voren waarin men problemen verwacht en wel:

- het maken van kleine onderdelen,
 - het meten,
 - het mechanisch handlen,
 - het verbinden en
 - het beschermen (verpakken),
- die achtereenvolgens behandeld zullen worden.

Het maken van kleine onderdelen met hoge nauwkeurigheden + ontbramen + reinigen

Voor de verbinding van de *elektrische en elektronische* componenten met de grofstoffelijke buitenwereld heeft men o.a. metalen onderdelen nodig. Denk aan IC-roosters, roosters van een TV-kanon, enz.

Door de miniaturisatie worden de metalen onderdelen kleiner maar tevens de spleetbreedten van gestampte sleuven, c.q. de afmetingen van de gestampte gaten. Dit heeft een aantal gevolgen:

- a. De stampbare verhouding spleetbreedte/plaatdikte is ≥ 1 . Indien deze verhouding kleiner wordt dan 1 kan men niet goed meer stampen c.q. etsen. Dus de materiaaldikte wordt kleiner als de spleetbreedte kleiner wordt.
- b. Meestal vraagt men niet een absolute nauwkeurigheid maar een relatieve. Dus bij kleinere maten neemt de absolute nauwkeurigheid toe.
- c. Men gaat naar kleinere materiaaldikten om.
 - de stampbaarheid te bevorderen (zie a.),
 - materiaal te sparen
 Hierdoor wordt de invloed van het mechanisch gedrag van een enkele kristalliet op het materiaalgedrag groter.
- d. Stampbramen hebben relatief meer invloed op de mechanische c.q. elektrische werking van het onderdeel.

Enige opmerkingen:

- Momenteel kan men redelijk beheerst spleten stampen van 0,3 mm. Voor het stampen van kleinere spleten (in massafabricage) bestaat geen goede technische oplossing.
- Onder andere door het anisotrope gedrag van de materialen (zie c.), kan men de onrondheid van diepgetrokken onderdelen niet kleiner krijgen dan ca $\pm 0,015$ mm.
- Het anisotrope gedrag heeft ook invloed op de nauwkeurigheid van geextrudeerde onderdelen.
- Bewerkingstechnieken die geen hinder hebben van de anisotropie, zoals kraagtrekken, ironing (verjongen), enz., worden steeds meer belangrijker.
- Reinigen en ontbramen gebeurt nu in bulk (stenen + water + zeep + producten worden samen getrommeld). Bij fragile producten is dit niet meer mogelijk. Er zijn principieel nieuwe oplossingen nodig.
- Het realiseren van nauwkeuriger producten zonder beheersing van de braam is waarschijnlijk zinloos. Dus onderzoek naar braamvorming, zowel bij stamp- als spuitproducten is dringend noodzakelijk.

Het meten van miniatuuronderdelen

- Een groot probleem treedt op als de maak- en de meetnauwkeurigheden aan elkaar gelijk worden. In de gereedschappmakerij is dit probleem reeds bekend, echter ook de maasafabricage tendert hoe langer hoe meer in deze richting. Dit geldt niet alleen voor de miniaturisatie.
- Bij het mechanisch meten van fragile onderdelen speelt de vervorming t.g.v. de meetdruk een grote rol. We weten eigenlijk niet hoe we contactloos fragile onderdelen moeten meten. Hierbij valt ook te denken aan het meten van de oppervlaktegesteldheid zowel *geometrisch* als *mechanisch*. Wellicht is er een koppeling met de (automatische) visuele inspectie mogelijk.
- Indien men ook *mechanisch* voor een modulaire opbouw van producten kiest, kan het zinvol zijn om de producten t.b.v. één module te selecteren zodat de bedoelde functies voor de module optimaal kunnen zijn. Hiervoor hebben we dan selectieapparatuur nodig die niet alleen de fragile onderdelen meet, maar ook selecteert.

Het handlen van fragile onderdelen in gemechaniseerde c.q. geautomatiseerde apparatuur

- Handlen van fragile onderdelen zal vervormingsloos dienen te geschieden tenzij correctie achteraf mogelijk is. Oplossingen als trilvullers, overneemtangen, inzettangen, lassen op stift, enz., zullen wellicht niet meer mogelijk blijken te zijn. Het ingieten en vastvriezen van onderdelen - denk aan bijenwas en cerrocast - zal op grotere schaal toegepast gaan worden dan nu het geval is
- In dit verband is het ook erg nuttig om de mogelijkheden van glas-metaalverbindingen na te gaan
 - a. Het vullen van koolmallen op lineaire tritafels is nu handwerk, batchproces.
 - b. Door juist kiezen van diverse koolmallen kan men gecompliceerde halfabrikaten (los)-samenstellen.
 - c. Via een glas-metaalverbinding zet men de onderdelen aanekaar vast.

Opmerking: De glas-metaalverbinding kan men misschien vervangen door lijmen.

- Indien men fragile produkten in batch gaat verwerken bestaat de kans op beschadiging. De beschadigingen kunnen bestaan uit.
 - oppervlakteverstoreningen,
 - maatafwijkingen,
 - vormafwijkingen.
 Een belangrijke parameter is de verhouding: grootste geometrische maat/gewicht. Hele grote lichte produkten beschadigen minder gauw dan de hele grote zware

Het onderling verbinden van fragile onderdelen

Opmerking. Tevens is bedoeld het onderling verbinden van fragile halfabrikaten.

- Met uitzondering van de elektronica dient het onderling verbinden *gepositioneerd* te gebeuren. Dit houdt in dat de principes met betrekking tot positionering, zoals ontwikkeld door Prof. W van der Hoek, hoe langer hoe belangrijker worden. Handlen van produkten, dynamisch gedrag van machines, statisch bepaald construeren, vormen de bouwstenen om de gewenste positionering tot stand te brengen.

- Het verbindingsproces. Tijdens het verbinden van produkten treden veranderingen op in:

- de geometrie van het produkt,
- de materiaalsamenstelling en materiaaleigenschappen van het produkt

Deze laatste veranderingen hebben invloed op de elektrische overgangswaarden die in het elektronica-vak vaak wezenlijk zijn; verder speelt dit punt meestal geen rol.

Het contactloos lassen (laser, electronbeam welding-EBW), zal in de miniaturisatie zeker steeds vaker toegepast gaan worden. Een groot probleem in deze technieken is de kleine spleet die tussen de twee te verbinden onderdelen zal bestaan.

Bij contactlassen wordt deze spleet dichtgedrukt - ten koste van vervormingen van het produkt.

De kleine spleet ($\approx 0,1$ mm) legt grote tolerantieproblemen op aan de onderdelen. Immers, na het verbinden van een aantal onderdelen treden opteltoleranties op en die moeten dan binnen 0,1 mm blijven wil men contactloos verbinden toe kunnen passen.

- In het lasproces zit een groot nadeel, het geschiedt namelijk bij een hoge temperatuur. Dit heeft het lijmp proces voor, maar daaraan kleven ook grote nadelen:
 - is tijdrovend,
 - geeft slechte overgangswaarden en de verbinding is
 - schokgevoelig,
 - gevoeliger voor temperatuursinvloeden (thermospanningen),
 - gevoelig voor verouderingen.
 Vooral ten behoeve van de miniaturisatie is er onderzoek nodig in deze vijf gebieden.

Het beschermen van de fragile onderdelen (halfabrikaten)

Dit onderdeel van het spel heeft tot nu toe nog steeds de minste aandacht. De verpakingsdeskundigen leggen bijvoorbeeld vast hoeveel g een onderdeel ondergaat tijdens transport. Hieruit volgt een (niet klein) aantal eisen ten aanzien van de onderdelen of halfabrikaten.

Bij fragile, kleine miniatuurprodukten wordt het beschermen steeds belangrijker

Echter, de verpakingsdeskundigen zullen bij de voortschrijdende miniaturisatie steeds meer geconfronteerd worden met temperatuuffecten, of algemener: stralingseffecten.

Enige algemene opmerkingen

Indien men praat over miniaturisatie is een van de eerste vragen, **waarom?**

Hier volgen enige argumenten:

1. De gevraagde informatiedichtheid neemt toe (plaat, beeldscherm, glasfiber en tape), en men vraagt een steeds hogere kwaliteit bij de beeldvorming (TV-apparaat, lichtschrjver, elektronenmicroscop). Hierdoor wordt miniaturisatie in de hand gewerkt.
2. Het is o.a. ten gevolge van de miniaturisatie mogelijk om signaalverwerking en informatieverwerking te doen in een *korte tijd*.
3. Indien het *volume* van een apparaat niet in overeenstemming is met de functie. Denk bijvoorbeeld aan een TV-apparaat. In feite is het verkregen beeld tweedimensionaal en de derde dimensie is overbodig. We zien dan ook. 90° buis $\rightarrow 110^\circ$ buis \rightarrow platte "schilderijen".
4. Indien de miniaturisatie leidt tot minder verbruik van grondstoffen of energie.
5. Indien men bepaalde elementen van een verkoopproduct c.q. machine kleiner kan maken zal men dit doen om de constructieve vrijheden te vergroten (denk aan elektromotoren, tandwielkasten, enz.)
6. Om in "matrix" te kunnen fabriceren.

Het lijkt verstandig om na te gaan waar:

- a. Zeker miniaturisatie gaat optreden c.q. zal voortgaan. Bedoeld zijn hier produkten waarbij het volume en de functie direct gekoppeld zijn, bijvoorbeeld IC's maar ook optische elementen.
- b. Zeker *geen* miniaturisatie gaat optreden (Denk aan huishoudelijke apparaten: *niet te minimaliseren i.v.m. de warmtehuishouding*) Indien de *functies* van deze apparaten geen miniaturisatie toelaten, is het meestal toch wel zo dat de onderdelen die de functies mogelijk maken en sturen, geminiaturiseerd kunnen worden.

Miniaturisatie zal voort blijven gaan in de:

- elektronische industrie (signaal- en dataverwerking),
- optische industrie,
- meet- en regeltechniek, met name bij de sensoren.