

Precisie efficiënt ontworpen

In de precisietechnologie gaat veel aandacht uit naar het ontwerpen en maken van nauwkeurige positioneringssystemen. In de praktijk blijkt echter dat precisie zich niet gemakkelijk in het steeds strakker wordende keurslijf van doorlooptijd en kostprijs laat drukken. Maar al te vaak valt de behaalde nauwkeurigheid bij eerste oplevering tegen. Error Analysis & Budgetting kan dergelijke teleurstellingen voorkomen. Het is een methode om foutenbronnen in positioneringssystemen systematisch in kaart te brengen en hun effect op de uiteindelijke nauwkeurigheid af te schatten.

• Tom Bijmagne •

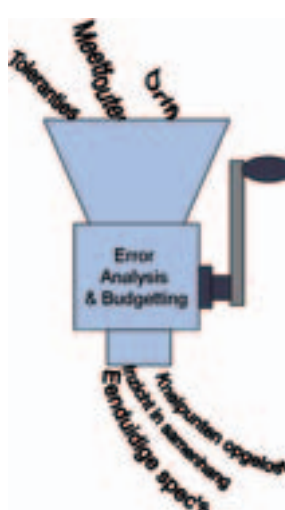
In de praktijk onttaardt het ontwerpen van precisie in het micrometerregime vaak in een trial & error-methode, waarbij alles uit de kast wordt gehaald om het ontwerp binnen de gestelde nauwkeurigheid te brengen. Dit is een probleem omdat aanpassingen in dit late stadium van het ontwikkeltraject resulteren in een aanzienlijk latere opleverdatum en in hogere kosten van het ontwerp.

Belangrijkste oorzaak van deze overschrijdingen ligt in de situatie dat de uiteindelijk behaalde nauwkeurigheid bepaald wordt door een groot aantal foutenbronnen, die pas geleidelijk tijdens het ontwerpen aan het licht komen. Ook kan het gebeuren dat een op zichzelf goed conceptontwerp tijdens het detailleren ondergraven wordt door kleine, maar – naar later blijkt – toch essentiële wijzigingen. Een andere oorzaak is dat veel aandacht uitgaat naar het beheersen van één of enkele bekende foutenbronnen, zoals bijvoorbeeld de nauwkeurigheid van een positie-sensor, en maar weinig aandacht wordt gericht op het inventariseren van het samenspel van alle foutbijdragen in het gehele systeem.

Error Analysis & Budgetting

Essentieel onderdeel van de ontwikkeling van precisie-apparatuur is daarom het verwerven van voldoende inzicht en

overzicht met betrekking tot alle mogelijke foutenbronnen die de uiteindelijk te behalen positie zullen gaan beïnvloeden. Dit inzicht is niet alleen belangrijk tijdens de oriënterende of conceptfase, maar tijdens het gehele ontwerp-proces.



Figuur 1. Error Analysis & Budgetting 'maakt gehakt van fouten'.

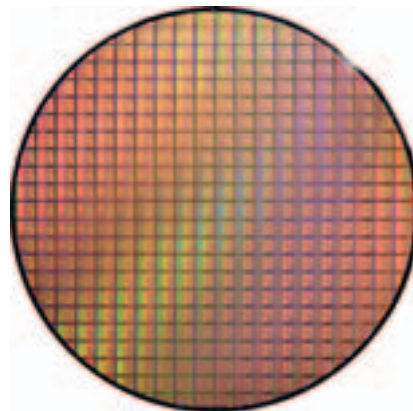
Error Analysis & Budgetting (EA&B) is een methode om foutenbronnen in positioneringssystemen systematisch in kaart te brengen en daarbij aan te geven welke fouten essentieel zijn voor het gehele systeem; zie Figuur 1. Het gaat hierbij zowel om het identificeren van de foutbron, als om het schatten van het effect van de fout op de uiteindelijke nauwkeurigheid.

Centraal in het proces van EA&B is het vinden van de keten van fouten, die een fysieke route door de constructie loopt. Zo'n keten loopt dan langs een aantal fysieke interfacepunten, zoals contactvlakken en passingen. Maar ook het centrum van het meetbereik van het positiemeetsysteem kan dienst doen als zo'n interfacepunt. De verbinding tussen de interfacepunten wordt gevormd door fysieke maten, die elk een eigen positiefout bijdragen. Een voorbeeld is in het kader op pagina 25 weergegeven voor een schuifmaat.

Analyse van een waferlaadmechanisme

Elke positiefout is zelf ook weer op te delen in een aantal onderliggende fouten, waardoor een foutenboom ontstaat. Een voorbeeld van zo'n gelaagde foutenboom is te vinden in de analyse van een laadmechanisme voor wafers, zoals

gebruikt voor de productie van halfgeleiders, zoals IC's. Een wafer is een dunne plak siliciumkristal, waaruit de IC's gemaakt worden; zie Figuur 2. Tijdens het fabricageproces bezoekt een wafer een groot aantal bewerkingsstations, zoals een wafertrack in Figuur 3. Bij een aantal van deze stations is het van belang de wafer met een nauwkeurigheid van enkele tientallen micrometers in zo'n apparaat te plaatsen.



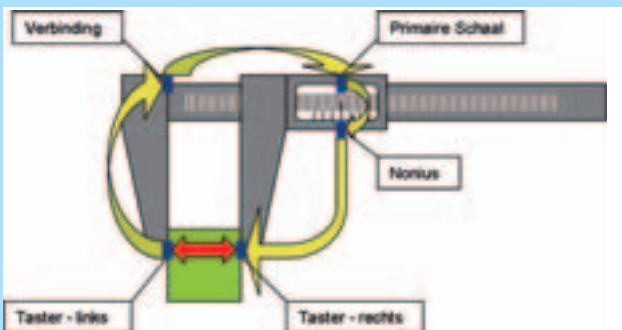
Figuur 2. Wafer.



Figuur 3. Wafertrack.

Error Analysis & Budgetting voor een schuifmaat

Als eenvoudig voorbeeld bekijken we een samenstelling die slechts bestaat uit starre mechanische onderdelen: een mechanische, analoge schuifmaat. Bij de schuifmaat is de kritische maat de afstand tussen de twee tasters. Voor de nauwkeurigheid van deze maat kunnen we aan de hand van Figuur 4 een tolerantieketen opstellen: een keten van interfacevlakken, aangegeven in blauw, verbonden via afstandsmaten met elk een eigen nauwkeurigheid, aangegeven met de gele pijlen. Eén van de tasters vormt het begin van de keten, we kiezen hiervoor de linkertaster. De tolerantieketen loopt dan van het contactvlak via de schaalverdeling naar het contactvlak van de rechtertaster. Onderweg passeert de keten enkele interfaces, die onderling verbonden zijn via maakfouten, de toleranties op de tekening.



Figuur 4. Schuifmaat: kritische maat en foutenketen.

Het nauwkeurigheidsbudget is nu eenvoudig op te stellen door de keten te volgen en voor elke verbinding tussen de interfaces na te gaan welke foutenbronnen een rol spelen. Voor elk van deze fouten kan een bijdrage worden afgeschat; zie Tabel 1. Hierbij moet worden opgemerkt dat alleen fouten in de schuifmaat zelf zijn betrokken. Fouten in het te meten product blijven hier buiten beschouwing, zoals vervorming of

Tabel 1. Error budget voor de schuifmaat.

Van	Naar	Foutenbron	Mechanisch +/- [μm]	Electronisch +/- [μm]
Aanslag linkertaster	Verbinding Taster-Lineaal	Onrechttheid Onhaaksheid	2 5	2 5
Verbinding Taster-Lineaal	Primaire Schaal	Nauwkeurigheid schaalverdeling Uitzetting/krimp Vervorming	10 10 2	10 10 2
Primaire Schaal	Nonius	Resolutie aflezing Resolutie geleiding Borgen geleiding	50 5 2	10 5 2
Nonius	Aanslag rechtertaster	Onrechttheid Onhaaksheid	2 10	2 10
Aanslag linkertaster	Aanslag rechtertaster	Totaal - kwadratisch	54	22

krimp/rek ten gevolge van temperatuurverschillen.

Bij het optellen van de fouten kan gebruik worden gemaakt van het feit dat de fouten elkaar kunnen uitmiddelen. Fouten die een normale verdeling hebben, zoals in dit voorbeeld, kunnen kwadratisch opgeteld worden, mits ze onderling onafhankelijk zijn. De totale nauwkeurigheid van de schuifmaat kan hiermee geschat worden op 54 [μm].

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de grootste bijdrage geleverd wordt door de resolutie van de aflezing. Dit geeft richting aan het ontwerp van een verbeterde schuifmaat; vervanging van de mechanische schaal met nonius door een elektronische uitlezing met een resolutie van 10 [μm] kan de totale onnauwkeurigheid meer dan halveren tot 22 [μm].

Overigens wordt hiermee weer eens duidelijk dat resolutie slechts een onderdeel is van alle vormen van onnauwkeurigheid; de schuifmaat met een resolutie van 10 [μm] heeft een uiteindelijke onnauwkeurigheid van ongeveer het dubbele. Een elektronische schuifmaat heeft bovendien de mogelijkheid tot nulstellen, vlak voor de meting. Hierdoor vallen enkele posten weg uit het budget, zoals de onhaaksheid van de linkertaster. Posten zoals de nauwkeurigheid van de schaalverdeling en het borgen van de geleiding blijven wel bestaan.

Voor een uitgebreider voorbeeld van Error Budgetting & Analysis kijken we naar een fictief waferlaadmechanisme, schematisch weergegeven in Figuur 5. Doel van het mechanisme is om de wafer op de tafel te leggen, waarbij twee kenmerken op de wafer binnen een nauwkeurigheid ± 50 [μm] moeten worden geplaatst ten opzichte van de kenmerken die aan de tafel zijn bevestigd.

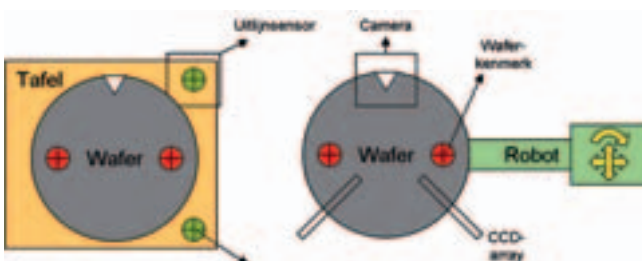
Het laadmechanisme is voorzien van een robotunit die een wafer in drie graden van vrijheid kan positioneren: twee horizontale translaties (X, Y) en een rotatie om de verticale as (Rz). Voor de rotatiemeting is de wafer voorzien van een driehoekige inkeping. Een meetsysteem, bestaande uit een combinatie van twee CCD-arrays en een CCD-camera, bepaalt de (X,Y,Rz)-positie van de wafercontour op de robotarm.

Kalibratie van het systeem gebeurt met behulp van de uitlijnsensor. Wanneer de wafer op de tafel is geladen, meet een uitlijnsensor de uiteindelijke positie van de twee waferkenmerken ten opzichte van de twee tafelkenmerken. Kalibratie vindt plaats door 25 wafers op deze manier te laden en te meten. Systematische positiefouten worden daarna gecorrigeerd door de robot.

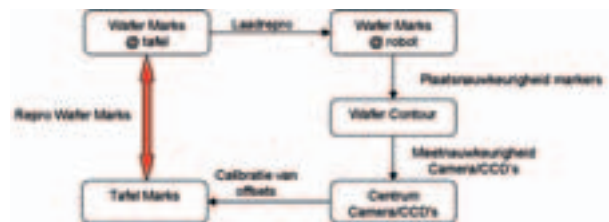
Na deze kalibratie wordt de nauwkeurigheid bepaald door drift van de robot en tafel gedurende de tijd na kalibratie, en door toevallige positioneringsfouten die tijdens het neerlegproces optreden. Op welke manier kunnen we deze fouten in kaart brengen en een voorspelling doen van de uiteindelijke nauwkeurigheid?

Keten van foutenbronnen

De eerste stap in de foutenanalyse is het bepalen van de keten van foutenbronnen die de gevraagde kritische maat bepaalt: de keten die de twee waferkenmerken verbindt met de twee tafelkenmerken, volgens Figuur 6. We starten bij de waferkenmerken. De nauwkeurigheid van deze positie kun-



Figuur 5. Waferlaadmechanisme.



Figuur 6. Keten voor reproduceerbaarheidsfouten in een waferlaadmechanisme.

nen we relateren aan een positie eerder in het neerlegproces: de positie van dezelfde waferkenmerken op de robotarm tijdens voor-uitmeting. Fouten tussen deze posities ontstaan tijdens het laden van een wafer op tafel. Dit zijn onder meer de robotnauwkeurigheid en de nauwkeurigheid van neerleggen op tafel, samengevat in de laadrepro.

De keten loopt verder via waferkenmerken naar de contour van de wafer, zoals die door het meetsysteem wordt gezien. De maaknauwkeurigheid van de kenmerken op de wafer, ten opzichte van de contour, is hier bepalend. Het meetsysteem legt de verbinding tussen de wafercontour en het nulpunt van het meetsysteem, bijvoorbeeld het centrum van het meetbereik in (X, Y, Rz). De kalibratie met de 25 wafers bepaalt de positie van de tafelkenmerken ten opzichte van dit centrum. Ook deze kalibratie vindt weer met een zekere onnauwkeurigheid plaats; omdat de wafers daadwerkelijk worden geladen tijdens kalibratie, komen de laadrepro, de plaatsnauwkeurigheid van de kalibratiewafers, en de meetnauwkeurigheid van zowel het camerameetsysteem als van de uitleessensor hierin terug.

De positieketen voor reproduceerbaarheid bepaalt de nauwkeurigheid van de positie direct na kalibratie. In de tijd na kalibratie treden nog positiefouten op door positiedrift van het meetsysteem, frames en de tafel. Ook voor deze fouten is een keten op te stellen; zie Figuur 7. Dit is de mechanische verbinding tussen de wafer- en tafelkenmerken, die in de figuur onderlangs door meetsysteem, frame en tafel loopt. Feitelijk sluit de kalibratie het onderste gedeelte van deze keten kort, maar positiefouten die na kalibratie in deze keten nog optreden, komen desondanks toch terug in de uiteindelijke positiefout van de wafer.

Foutenboom

De tweede stap in de foutenanalyse is het opstellen van een foutenboom. Nu de positie- en de driftketen bekend zijn, kan

een foutenboom worden opgesteld; elke fout in de keten is namelijk weer opgebouwd uit een aantal onderliggende fouten, die vervolgens weer op te delen zijn in onderliggende foutenbronnen. Dit is weergegeven in Figuur 8.

Op het eerste, hoogste niveau van de foutenboom treffen we de vier reproduceerbaarheidsposten aan uit de positieketen hierboven. Deze bepalen de positiefouten direct na kalibratie. Daarnaast vinden we nog een extra post voor de driftfouten. Op het tweede niveau vinden we onder de laadrepro de bijdrages van de robot, de tafel en overname. De nauwkeurigheid van kalibratie wordt bepaald door de fouten bij het laden, toleranties op de wafer en meetfouten van de uitlijnsensor. Omdat de kalibratiepositie bepaald wordt uit het gemiddelde van 25 geladen wafers, is de fout hierdoor een vijfde ($1/\sqrt{25}$) deel van de reproduceerbaarheid van één wafer. De drift wordt bepaald door bijdrages van het meetstelsel, het frame en de tafel. Op dezelfde manier kan nog een derde niveau van foutenbronnen worden uitgewerkt; zie Figuur 8. Hierbij valt de positionauwkeurigheid van robot en tafel nog weer onder te verdelen in meetnauwkeurigheid, positioneringsnauwkeurigheid en precisie van de positieregeling.

Numeriek model

De derde en laatste stap in de foutenanalyse is het samenbrengen van alle fouten in de foutenboom in een numeriek model; zie Tabel 2. In de praktijk kan een schatting worden gemaakt van de verschillende posten, aan de hand van specificaties van leveranciers, afschattende handsommen en ervaringen bij eerdere ontwerpen, of aan de hand van metingen. In dit voorbeeld zijn de getallen fictief, maar qua ordegrrootte geschat op basis van ervaringen met handling-apparatuur met deze precisie.



Figuur 7. Keten voor positiedrift in het waferlaadmechanisme.



Figuur 8. Uitgewerkte foutenboom.

Alle fouten in de boom worden van onderaf opgeteld (zie Figuur 8). De fouten van niveau 3 tellen samen in de bovenliggende fout van niveau 2. Vervolgens worden de niveau 2 fouten weer samengeteld in de betreffende fouten van niveau 1. Onderaan de tabel is dan de som te vinden van alle niveau 1 fouten, hetgeen de schatting is voor de uiteindelijke positiefout van de waferkenmerken ten opzichte van de tafelkenmerken. Het optellen gebeurt weer volgens de regel van kwadratisch optellen: alle fouten die onafhankelijk zijn en een normale verdeling hebben, worden kwadratisch opgeteld. Er zijn echter enkele uitzonderingen aan te geven. Dit geldt bijvoorbeeld voor de maaknauwkeurigheid van de waferkenmerken ten opzichte van de contour. Op zich is dat een normaal verdeeld getal, dat volgt uit een stochastisch proces, onafhankelijk van andere posten in het budget. Echter, omdat grote

	Unit	Niveau 3		Niveau 2		Niveau 1	
		XY (µm)	Rz (µrad)	XY (µm)	Rz (µrad)	XY (µm)	Rz (µrad)
Meetnauwkeurigheid Robot	lood	5	25				
Positionnauwkeurigheid Robot	lood	5	25				
Positionnauwkeurigheid Robot	lood	5	25				
Positionnauwkeurigheid Robot	lood			9	45		
Meetnauwkeurigheid Tafel	lood	1	10				
Positionnauwkeurigheid Tafel	lood	1	10				
Positionnauwkeurigheid Tafel	lood	1	10				
Positionnauwkeurigheid Tafel	lood			2	17		
Overname Robot → Leiden	lood	2	20				
Overname Leiden → Tafel	lood	1	10				
Overname offset	lood			2	20		
Leidrepro	lood					9	52
Positionnauwkeurigheid waferkenmerken in Meetnauwkeurigheid Camera	lood					10	50
Leidrepro	lood			9	52		
Positionnauwkeurigheid waferkenmerken in Meetnauwkeurigheid Camera	lood			10	50		
Positionnauwkeurigheid Tafel	lood			9	28		
Meetnauwkeurigheid Liftestensoren	lood	2	17				
Positionnauwkeurigheid Liftestensoren	lood	1	10				
Positionnauwkeurigheid Liftestensoren	lood			2	20		
Calibratie offset (x 1/5)	in					4	22
Drift meetstelsel in	in			2	4		
Drift frame in	in			2	4		
Drift tafel in	in			1	2		
Drift in	in					5	10
Repro Waferkenmerken	lood					20	140
Tafel vanwege R=Aut (aan 0.2 bij)	lood					28	
Positionnauwkeurigheid waferkenmerken tov tafelenmerken	lood					41	
Overname positionnauwkeurigheid	lood					10	
Capaciteit	lood					12	

Tabel 2. Gedetailleerd error budget voor een waferlaadmechanisme.

aantallen wafers geladen worden op een enkele machine, is de kans dat een extreme fout optreedt aanzienlijk. Om op een en dezelfde machine de hele populatie wafers aan te kunnen, wordt deze bijdrage lineair meegerekend.

Ook driftbijdragen zijn lineair meegerekend. Uitgangspunt voor statistiek is dat posten elkaar onderling kunnen uitmiddelen. Bij drift na kalibratie is dit niet het geval; een positievariatie door drift vertaalt zich één op één in een positiefout van alle wafers, zonder dat deze fout door andere fouten kan worden uitgemiddeld. In het budget moet daarom een vast gedeelte van de beschikbare nauwkeurigheid worden toegewezen aan drift – lineair optellen dus.

In het gedetailleerde error budget zijn nu alle fouten bij elkaar genomen. Onderaan Tabel 2 is de totale capability berekend, door de gevraagde positienauwkeurigheid te delen door de nauwkeurigheid die volgt uit het model. Met een capability van 1,2 heeft het gehele budget ongeveer 20% marge. Hiermee is duidelijk geworden dat het laadmechanisme de gewenste nauwkeurigheid kan bereiken, als alle bijdragen aan hun specificaties voldoen.

Houvast voor verbetering

Het foutenmodel biedt houvast om indien nodig de nauwkeurigheid van het laadproces verder te verbeteren; de grootste posten worden gevormd door de laadrepro en de nauwkeurigheid van de waferkenmerken. Dit zijn dan de posten waaraan kan worden gewerkt. Verbetering van het meetsysteem en de uitlijnsensor zal een minder groot effect hebben op de uiteindelijke wafer-nauwkeurigheid.

Het foutenbudget heeft een belangrijke functie in het vervolg van het ontwerptraject; dit model onderbouwt de eerste conceptontwerpen, omdat het aantoont dat een haalbare ontwerp-richting wordt ingeslagen. Bij verdere uitdetaillering geeft het model onderbouwde specificaties voor de deel-ontwerpen.

Voor aanvang van de test- en kwalificatiefase biedt het model de noodzakelijke basis voor het opstellen van de juiste testprocedures en kwalificatiecriteria. Ook het zoeken naar foutoorzaken gaat veel sneller als dan al inzicht is opgebouwd in de samenhang van de verschillende foutenbronnen.

Tot slot

Het is niet te voorkomen dat Error Analysis & Budgetting in eerste instantie tijd en aandacht vraagt. Dit verdient zich echter terug in een beter beheersbaar ontwerpproces. Het foutenbudget is namelijk een houvast om precisie in elk stadium van het ontwerp te evalueren. Bovendien kan het analyse- en budgetting-werk parallel worden uitgevoerd aan het reguliere

ontwerpwerk, en beperkt het daarmee niet de doorlooptijd van het project.

Opbrengsten van Error Analysis & Budgetting zijn:

- Er ontstaat focus op de juiste foutenbronnen.
- Eventuele knelpunten worden in een vroeg stadium helder.
- Effecten van alternatieve oplossingen kunnen worden beoordeeld.
- Specificaties van sub-modules en onderdelen zijn helder en onderbouwd.
- De juiste testprocedures voor kwalificatie kunnen worden opgesteld.

Uit het voorgaande blijkt dat een goede foutenanalyse niet kan ontbreken bij het ontwerpen van systemen waarin positienauwkeurigheid een rol speelt. De methode Error Analysis & Budgetting kan een belangrijke bijdrage leveren aan het efficiënt ontwerpen van precisie.

Auteursnoot

Tom Bijnagte studeerde werktuigbouwkunde aan de Universiteit Twente en werkte daarna aan de ontwikkeling van wafersteppers bij ASML. Sinds 2004 is hij via HiPrecision actief als zelfstandig analist op het gebied van de precisietechnologie. Daarnaast ontwikkelde hij voor het Mikrocentrum de cursus Tolerantieanalyse, waarvoor hij ook als docent optreedt.

Dit artikel is mede gebaseerd op een lezing tijdens de Precisiebeurs 2007, eind vorige maand in Veldhoven.

Informatie

HiPrecision adviseert klanten in de halfgeleiderwereld over het modelleren en testen van foutenbronnen in ontwerpen en het aanbrengen van onderbouwde verbeteringen hiervoor. HiPrecision is verbonden aan het High Tech Platform van het Mikrocentrum via de werkgroep High Tech Specialists, en neemt deel aan The House of Technology, een intermediaire organisatie voor specialisten in de high-tech machinebouw.

www.hiprecision.nl

www.mikrocentrum.nl

www.thehouseoftechnology.nl