

SPC BIJ LAAG VOLUME EN KLEINE SERIES FABRICAGE

Kit C.B. Roes*

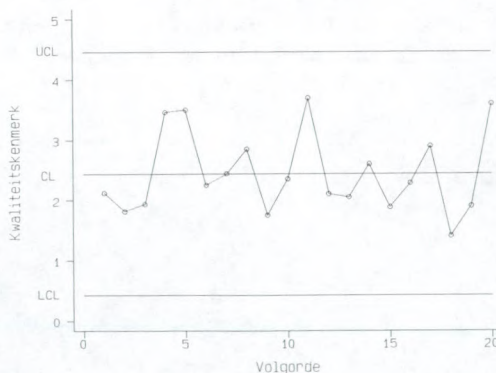
Samenvatting

Statistische procesbeheersing (SPC) kent zijn oorsprong in de twintiger jaren. Lange tijd heeft men de overtuiging gehad dat SPC alleen toepasbaar is in productieprocessen met grote volumes van dezelfde produkten. Ook productieprocessen met kleine series of een laag volume kunnen uitstekend met behulp van SPC beheerst en continu verbeterd worden, op basis van een gestructureerde aanpak zoals gehanteerd door ons in diverse projecten, en met behulp van maatwerk betreffende de statistische methoden. In deze publicatie wordt de gestructureerde aanpak geschetst en worden, aan de hand van voorbeelden, noodzakelijke aanpassingen aan de statistische methoden beschreven. Op deze wijze is SPC niet alleen toepasbaar voor kleine series en laag volume fabricage; de processen kunnen vaak aanzienlijk verbeterd worden.

* *Instituut voor Bedrijfs- en Industriële Statistiek*
Universiteit van Amsterdam
Plantage Muidersgracht 24
1018 TV Amsterdam
020 - 525 5203

1. Inleiding

SPC staat voor "Statistical Process Control" en wordt in het Nederlands vertaald als statistische procesbeheersing. SPC is van de grond gekomen in de tijd dat massafabricage haar intrede deed, de jaren 20 van deze eeuw. Het was een periode waarin men zich voor het eerst realiseerde dat je niet naar de produkten zelf, maar naar de voortbrengende processen moet kijken om tot vermindering van het aantal fouten te komen. In 1924 ontwikkelde Dr Walter A. Shewhart de regelkaart om procesbeheersing te realiseren bij Western Electric (zie Does, Roes en Trip, 1996). De regelkaart is bij uitstek een instrument dat daarbij kan helpen. Het is een grafiek met op de horizontale as de tijdstippen waarop een kwaliteitskenmerk gemeten wordt en op de verticale as de waarde van het kwaliteitskenmerk. De punten worden verbonden. Door dit kwaliteitskenmerk in de tijd te volgen, kan beoordeeld worden of een proces statistisch beheerst verloopt of niet. In Figuur 1 is een voorbeeld van een regelkaart gegeven. In deze figuur stelt CL de centrale lijn voor, UCL de "Upper Control Limit" of in het Nederlands de bovenste regelgrens en LCL de "Lower Control Limit" (de onderste regelgrens). Deze regelgrenzen worden uit de data berekend en zijn wezenlijk anders dan de zogenaamde specificaties.



Figuur 1. Voorbeeld van een regelkaart met centrale lijn en regelgrenzen.

Het principe van de regelgrenzen is dat waarden die buiten de regelgrenzen vallen (boven UCL of onder LCL) zeldzaam zijn als het proces beheerst is. In de geest van Shewhart (1931) betekent zeldzaam hier dat de kans op een waarde buiten de regelgrenzen in een beheerst proces *economisch* klein is. Op grond van zijn ervaring in praktische situaties stelde Shewhart vast dat regelgrenzen op 3 standaardafwijkingen van het gemiddelde leiden tot een economisch verantwoorde waarde van de kans op een waarde buiten grenzen. Dit zijn de beroemde *3 σ grenzen*, met σ de standaardafwijking van de uitgezette grootheid.

Maar statistische procesbeheersing is veel meer dan het berekenen van regelgrenzen en het toepassen van regelkaarten. Achter SPC zit een managementfilosofie die de gehele bedrijfsvoering drastisch beïnvloedt. Dit staat uitgebreid beschreven in Does, Roes en Trip (1996). Door de toenemende concurrentie op de wereldmarkt zijn vele bedrijven overgegaan op een bedrijfsvoering geënt op SPC. Voor sommige bedrijfstakken geldt inmiddels dat het zonder SPC onmogelijk is om te kunnen produceren. Een goed voorbeeld is de halfgeleiderindustrie. Het is een illusie te veronderstellen dat geïntegreerde schakelingen (IC's) in grote aantallen gefabriceerd kunnen worden zonder een bedrijfsvoering geënt op SPC.

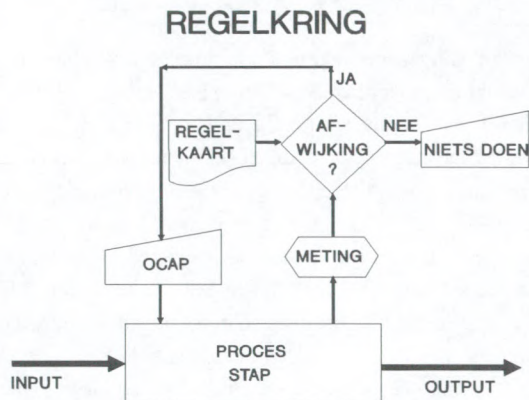
Vanaf begin jaren 80 zijn het met name grote bedrijven die SPC integraal hebben ingevoerd. Invloedrijke voorbeelden zijn de auto-industrie met Ford als belangrijkste, de vliegtuigindustrie en de halfgeleiderindustrie. De processen waarmee producten tot stand komen en de uiteindelijke gebruiker bereiken blijven niet beperkt tot een bedrijf, integraal. Elke industrie heeft vele toeleveranciers (en die op hun beurt ook), en tussen het bedrijf en de klant zitten vaak ook meerdere tussenstappen. Een integrale invoering van SPC kan dus niet plaatsvinden, zonder dat ook de toeleveranciers hierin worden betrokken. Via de grote industrieën en de eisen die zij stellen aan hun toeleveranciers, verspreidt SPC zich als vanzelf over een groot scala aan bedrijven. Het midden en klein bedrijf staat op dit moment aan de vooravond van een brede vraag van hun klanten SPC in te voeren. Het is daarmee een uitstekende volgende stap na ISO 9000 in voortdurende kwaliteitsverbetering. De motivatie om SPC in te voeren moet echter niet alleen komen van de klant; de voordelen voor het eigen bedrijf zijn niet gering. Te behalen voordelen omvatten onder andere (Does, Roes en Trip, 1996): reductie van uitval, voorspelbare processen, betere afstemming tussen klant en leverancier, en duidelijkheid in taken en verantwoordelijkheden in de procesvoering op de werkvloer. De grotere motivatie die met name de operators krijgen door hun nieuwe taken en bevoegdheden leiden vaak tot extra verbeteringen.

Bedrijven die (nog) niet actief met SPC bezig zijn, geven veelal als belangrijkste reden dat hun productieproces zich niet leent voor SPC. Andere redenen (uitvluchten?), die we vaak tegenkomen zijn: "we zijn een te klein bedrijf", "we missen de statistische expertise", "onze aantallen zijn niet groot genoeg" en "we hebben het al zo druk".

In deze publicatie zal de nadruk liggen op de productieprocessen en de te kleine aantallen. We gaan achtereenvolgens in op de aanpak van SPC op de werkvloer, laag volume en kleine series productie en de noodzakelijke aanpassingen in statistische methoden. We zullen ook nog aanstippen hoe continu verbeteren verankerd is in de aanpak.

2. Aanpak van SPC op de werkvloer

De kern van de concrete invoering van SPC is het ontwikkelen van een regelkring voor elke belangrijke processtap (zie Figuur 2). Deze regelkring bestaat uit een regelkaart voor een proceskarakteristiek en een rampenplan. Dit rampenplan (ook wel Out of Control Action Plan, OCAP) is het voorschrift voor de operator hoe te handelen indien er middels de regelkaart een uitzonderlijke (out of control) situatie voor het procesesignaleerd wordt. Te vaak nog wordt zo'n OCAP achterwege gelaten in de toepassingen van SPC. Regelkaarten signaleren dan alleen maar en leiden onvoldoende tot actie. De ontwikkeling van zo'n regelkring is de taak van een SPC-team. Dit team bestaat uit operators, de verantwoordelijke technicus, reparatie&onderhoud en wordt ondersteund door een statisticus.



Figuur 2. SPC-regelkring.

Aan de hand van een werkboek met een stappenplan (Figuur 3) start het team met een beschrijving van het proces zoals het daadwerkelijk wordt uitgevoerd. Op basis van de procesbeschrijving worden alle risico's (oorzaak en gevolg) geïnventariseerd. Deze Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) mondt uit in een totale waardering van elke oorzaak-gevolg combinatie met een risico-prioriteitsnummer. Op basis hiervan wordt de prioriteit van elk probleem vastgesteld. Dit bepaalt welke acties ondernomen moeten worden om de problemen te voorkomen, i.e., de oorzaken weg te nemen. Hieruit volgen vaak al indrukwekkende verbeteringen. De uitgebreide diagnose levert ook de basis voor het kiezen van de juiste parameters om de processtap te kunnen beheersen. Nadat is vastgesteld dat de parameters voldoende reproduceerbaar gemeten kunnen worden, worden regelkaarten en rampenplannen opgesteld. Ook voor het rampenplan kan grotendeels teruggevallen worden op de FMEA. Tot slot wordt de regelkring ingevoerd voor de processtap. Met de resultaten

van de verschillende SPC-teams ontstaat een SPC-systeem. Door het inslijten van de gevolgde werkwijze is er een goede bodem voor continue verbetering.

Deze aanpak is eind jaren tachtig ontwikkeld, ondermeer op basis van de ervaringen bij Philips Semiconductors in Nijmegen (zie van Dongen en Roes, 1992). Het is in de loop van vele SPC implementaties gebleken dat SPC-teams, opgericht tijdens het implementatie-project, het best langdurig kunnen blijven bestaan om de geïntroduceerde regelkring up to date te houden en op eigen initiatief nieuwe problemen aan te pakken en op te lossen voor 'hun' processtappen.



Figuur 3. Stappenplan voor een SPC-team.

Het betrekken van operators bij SPC middels deze teams is van grote waarde gebleken; hun kennis over het proces is onontbeerlijk bij het ontwikkelen van een goede regelkring en het werkt sterk motiverend (het zijn immers 'hun' processen).

3. Laag volume en kleine series productie

Het stappenplan is algemeen toepasbaar; ongeacht de aard van het productieproces kan het proces beschreven worden en kan een FMEA toegepast worden. Voor het ontwerpen van een regelkring is het meten van goede parameters cruciaal. De FMEA geeft de indicatie wat geschikte parameters zijn. Voor het meten en het ontwerpen van de regelkaart is de aard van het proces wel sterk bepalend (zie ook Trip, elders in dit nummer). De standaard methoden voor regelkaarten gaan ervan uit dat het produktievolume of het tempo van herhalen van hetzelfde proces voldoende hoog is om in korte tijd tussen de 20 en 50 steekproeven voor een regelkaart te kunnen nemen. In een aantal gevallen is dit niet redelijk. ASM Lithography te Veldhoven, bijvoorbeeld, produceert rond 250 wafersteppers per jaar. Gezien de aard van het productieproces houdt dit in dat ook veel processtappen slechts 250 maal per jaar worden

uitgevoerd. In dit geval spreken we van een productieproces met een *laag volume*. Een gerelateerde situatie is een proces met *kleine series*: er worden veel verschillende variaties op hetzelfde (type) produkt gemaakt, wat leidt tot frequente veranderingen van procesinstellingen en ook andere uitkomsten voor produkt karakteristieken. In deze situatie is het totale volume (of de frequentie van uitvoeren van processtappen) toch nog hoog. Dit maakt dat er voor *kleine series* eenvoudige, pragmatische oplossingen mogelijk zijn. De productie van Printed Circuit Boards bij Hollandse Signaalapparaten is een voorbeeld van kleine serie productie, met een gemiddelde seriegrootte van $2\frac{1}{2}$. We zullen eerst *laag volume* productie behandelen, en vervolgens *kleine series*.

Laag volume productie

Voor productieprocessen met een *laag volume* zijn om twee redenen wel aangepaste methoden nodig. Ten eerste staat het lage volume niet toe dat eerst 20 tot 50 steekproeven afgewacht moeten worden voordat de regelkaart kan starten. De beheerscyclus moet zo snel mogelijk starten. Ten tweede, zullen de grenzen voor een regelkaart in het begin gebaseerd zijn op zeer weinig data, hetgeen kan leiden tot een hogere frequentie van vals alarm signalen. De oplossingen die we hiervoor bieden zijn gebaseerd op de originele ideeën van Quesenberry (1991) en de aanvullingen hierop van Roes, Does en Stam (1995).

Laten $X_1, X_2, X_3, \dots$ de metingen in de tijdsvolgorde 1,2,3,... zijn van de karakteristiek die, bepaald op basis van de FMEA, gebruikt wordt om het proces te beheersen. Vaak zullen dit in processen met een laag productievolume individuele metingen op een continue schaal zijn. We nemen aan dat de X_i onderling onafhankelijk, identiek normaal verdeeld zijn met parameters μ en σ (in een beheerst proces; μ en σ zijn onbekend). Gezien het lage volume is het de bedoeling zo snel mogelijk een regelkaart te beginnen. We doen dat door steeds de meting X_t op tijdstip t te vergelijken met het gemiddelde dat tot dit tijdstip gold. Dit bepalen we uit de eerste $t-1$ metingen. Hetzelfde zullen we dan moeten doen met het bepalen van de variatie in de metingen. Laat dus bij k metingen:

$$\bar{X}_k = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k X_t = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \bar{X}_{k-1} + \frac{1}{k} X_k.$$

Op basis hiervan kan steeds het geldende gemiddelde worden aangepast. De variatie wordt geschat door het gemiddelde van de moving ranges:

$$MR_k = \frac{1}{k-1} \sum_{t=2}^k |X_t - X_{t-1}| = \frac{k-2}{k-1} MR_{k-1} + \frac{1}{k-1} |X_k - X_{k-1}| \quad (k \geq 2).$$

Ook deze formule leent zich eenvoudig voor aanpassingen. Het is echter niet wenselijk bij elke nieuw berekende waarde voor gemiddelde en spreiding ook weer andere grenzen te

geven: elke meting krijgt dan zijn eigen grenzen, wat lastig is voor de interpretatie en de uitvoering. Dit kan opgelost worden door te standaardiseren, en de regelkaart te baseren op de grootheden TR_k , gebaseerd op de huidige meting X_k en het gemiddelde en de gemiddelde moving range tot en met tijdstip $k-1$:

$$TR_k = \frac{(X_k - \bar{X}_{k-1})}{MR_{k-1} / d_2(2)} \quad (k \geq 2) .$$

Het ligt voor de hand de TR_k direct in een regelkaart te zetten met vaste regelgrenzen op $+3$ en -3 , omdat deze grootheden gestandaardiseerd zijn met een zuivere schatter van de standaardafwijking. Dit kan helaas niet, omdat dan met name in het begin meer vals alarm gegeven wordt. In Roes, Does en Stam (1995) is afgeleid dat voor $WR_k = g(k)TR_k$ - met $g(k)$ constanten afhankelijk van het steekproefnummer k - dit wel kan. Dit zijn dus de grootheden die in een regelkaart worden gezet: de WR kaart. De constanten $g(k)$ staan in Tabel 1.

Meting (k)	2 σ grenzen	3 σ grenzen
	$g(k)$	$g(k)$
10	0.7949	0.5238
15	0.8715	0.7266
20	0.9063	0.8062
25	0.9262	0.8496
30	0.9392	0.8770
50	0.9642	0.9288
> 50	1	1

Tabel 1. *Standaardisatie constanten $g(k)$ voor WR kaarten.
(Tussenliggende waarden door lineaire interpolatie te verkrijgen).*

Merk op dat niet onmiddellijk met de WR-kaart begonnen kan worden: er dienen voldoende waarnemingen te zijn voor een eerste schatting van het niveau en de spreiding. Bij gebruik van de moving range als schatter houdt dit in dat eerst ongeveer 10 metingen beschikbaar moeten zijn.

In processen met een laag produktievolume is het van extra groot belang snel te reageren bij verstoringen. In veel situaties mag dit dan ten koste gaan van vaker ten onrechte op zoek gaan naar een speciale oorzaak. Het zal zeker voorkomen dat daarom 2 σ grenzen gebruikt kunnen worden. Daartoe moeten de constanten $g(k)$ ook anders gekozen worden, dus Tabel

1 is opgesplitst naar 3σ grenzen en 2σ grenzen. We onderscheiden de 3σ WR kaart (grenzen op -3 en 3) dus van de 2σ WR kaart (grenzen op -2 en 2).

Voorbeeld: Transporttijden van maskerliftjes in wafersteppers.

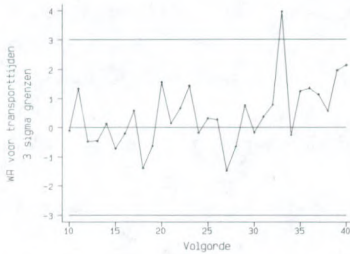
ASM Lithography in Veldhoven is een toonaangevende producent van wafersteppers voor de productie van geïntegreerde schakelingen (ICs). ICs worden gemaakt met honderden stuks tegelijk op plakken silicium (wafers). Wafersteppers leggen het patroon van ICs vast op een plak door licht of laser licht via een masker (reticle) te projecteren op een fotogevoelige laag. Het masker bevat een deel van het IC patroon, dat zo op de plak wordt gemarkeerd. Na verdere behandeling van de plakken wordt het gewenste patroon in de plak aangebracht. Door dit proces vele malen te herhalen ontstaat het uiteindelijke gelaagde patroon van een IC. In elke waferstepper zit een liftje dat het masker op de juiste plaats brengt (reticle handling elevator). Op grond van de FMEA is de volgende meting voor de beheersing van het monteren van het liftje vastgesteld. Om na te gaan of het liftje na montage juist werkt, meet de operator de tijd die een vastgesteld gewichtje nodig heeft om de armen van het liftje van boven naar beneden te laten bewegen. Gezien het produktievolume van de wafersteppers (ca. 250 stuks per jaar) is ook het monteren van maskerliftjes een processtap met laag produktievolume. Het is dus noodzakelijk na elke individuele meting het proces van monteren van de liftjes te evalueren. De veertig opeenvolgende transporttijden uit Tabel 2 vormen een reeks metingen uit de lopende productie die voor beheersing zijn gebruikt.

Lift	Tijd (s)	Lift	Tijd (s)	Lift	Tijd (s)	Lift	Tijd (s)
1	2.12	11	3.69	21	2.57	31	2.78
2	1.81	12	2.10	22	3.00	32	3.09
3	1.93	13	2.05	23	3.63	33	5.41
4	3.46	14	2.60	24	2.38	34	2.41
5	3.50	15	1.88	25	2.78	35	3.65
6	2.25	16	2.28	26	2.75	36	3.78
7	2.44	17	2.90	27	1.43	37	3.60
8	2.85	18	1.40	28	2.00	38	3.15
9	1.75	19	1.90	29	3.06	39	4.25
10	2.35	20	3.60	30	2.37	40	4.44

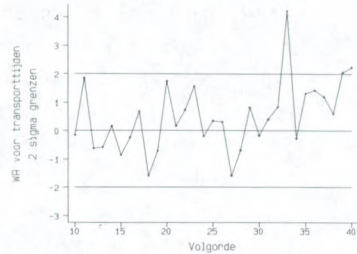
Tabel 2. Transporttijden van 40 opeenvolgende gemonteerde liftjes.

Op basis van het bovenstaande staan in Figuren 4 en 5 de 3σ WR kaart en de 2σ WR kaart. Beide signaleren een speciale oorzaak bij het 33^e liftje, maar de 2σ WR kaart is duidelijk

strenger en signaleert ook nog bij het 39^e en 40^e liftje. Dit is een extra aanwijzing dat het niveau voor de laatste 8 liftjes inderdaad structureel hoger is.



Figuur 4. 3σ WR kaart voor transporttijden.



Figuur 5. 2σ WR kaart voor transporttijden.

Op grond van statistisch-economische overwegingen kan aangetoond worden (Roes, Does en Stam, 1995) dat de strengere 2σ WR kaart in laag volume productie op zijn plaats kan zijn. Hiermee kan kort na het starten van productie begonnen worden, en hij is voldoende gevoelig voor speciale oorzaken die het proces verstoren. Een andere - in prestatie vergelijkbare - oplossing is het gebruik van additionele run-regels, zie Quesenberry (1995). Op de uitgezette grootheden kunnen ook CUSUM of EWMA technieken toegepast worden, om de gevoeligheid voor kleine verschuivingen te vergroten. Deze technieken zijn echter niet substantieel beter dan het gebruik van extra run regels.

Kleine series productie

Door de enorm toegenomen flexibiliteit in het produceren, komt fabricage in kleine series steeds vaker voor. Als men dan voor de te beheersen parameters uitsluitend denkt aan produktkarakteristieken (kritische maten, kwaliteitseigenschappen) ontstaan er problemen. Deze zullen voor verschillende produkten dermate uiteenlopen, dat er geen zinnige regelkaart in de loop van de tijd te maken is. Toch zijn er in de praktijk zeer goede, praktische mogelijkheden het proces met behulp van regelkaarten te beheersen. Daarin onderscheiden we twee principieel verschillende opties:

- (i) Op grond van de risico analyse is vast komen te staan dat de procesparameters sterk bepalend zijn voor de beheersing van de processtap. Denk hierbij aan temperatuur van een oven, badsamenstelling voor een galvanisch proces, gebruikt vermogen bij boren/frezen, belichtingsintensiteit bij een fotografisch proces. In zo'n geval kan het proces uitstekend worden beheerst door enerzijds de procesparameters met behulp van regelkaarten te beheersen, en anderzijds dit aan te vullen met periodieke monitoring van een standaard produkt of proefstuk. Hiermee wordt echt het proces beheerst, onafhankelijk van de produkten die erin geproduceerd worden.

- (ii) De risico analyse maakt het noodzakelijk dat beheersing toch (deels) gebaseerd moet zijn op metingen aan de produkten. In plaats van de metingen van de betreffende karakteristiek (zoals de plakdikte na het slijpen van silicium plakken voor IC fabricage) zelf te gebruiken voor een regelkaart, kan een van de volgende mogelijkheden gebruikt worden (zie o.a., Wheeler (1991), Al-Salti, Aspinwall en Statham (1992) en Pyzdek (1993))
1. Verschil van een meting met de nominale waarde voor het onderhavige produkt.
Dan moet de nominale waarde gemiddeld wel gehaald kunnen worden en de procesinherente variatie bij de diverse produkten hetzelfde zijn.
 2. Verschil van een meting met het gemiddelde van de de afgelopen tijd bij hetzelfde produkt. De nominale waarde hoeft nu niet noodzakelijk gemiddeld gehaald te worden, maar de procesinherente variatie moet bij de diverse produkten wel hetzelfde zijn.
 3. Een gestandaardiseerde meting: $(\text{meting} - \text{gemiddelde}) / \text{standaardafwijking}$. Deze mogelijkheid werkt ook als de procesinherente variatie verschilt tussen produkten. Het gemiddelde en de standaarddeviatie worden geschat uit reeds beschikbare metingen.

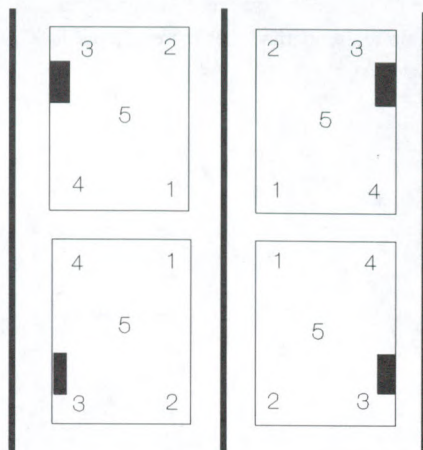
In de meeste gevallen van *kleine series* werkt keuze 2 uitstekend. Voor het ontwerpen van regelkaarten kan teruggevallen worden op methoden voor normaal productie volume (Does, Roes en Trip, 1996).

Voorbeeld: Printed Circuit Board productie

Een voorbeeld uit de industriële praktijk is het galvanisch aanbrengen van een koper patroon in de productie van Printed Circuit Boards (PCBs) bij Hollandse Signaalapparaten. In dit voorbeeld vormt het aangebrachte koper vormt de verbindingen in de gaten tussen verschillende lagen op het PCB. In dit proces wordt de laag koper aangebracht op PCBs die al een patroon van gaten bevat voor de te plaatsen componenten. Van belang is dat de in de gaten aangebrachte laag voldoende dik is, en dat de dikte uniform verdeeld is over het PCB. Een te dikke laag geeft immers kleinere gaten, en dat levert problemen bij het plaatsen van doorsteek-componenten.

Het koper wordt aangebracht op meerdere PCBs tegelijkertijd, die aan stangen in het galvanisch bad gehangen worden (Figuur 6). In principe wordt de dikte van de laag koper bepaald door de stroomdichtheid, het totale kale oppervlak van de PCBs, de tijd, de samenstelling van het galvanisch bad (o.a., concentratie kopersulfaat) en het anode-oppervlak. De stroomdichtheid en de tijd worden nauwkeurig ingesteld. De procesbeheersing richt zich met name op het bad (concentraties van de diverse stoffen), in het licht van methode (i). Dit is echter niet voldoende. Bijzonderheden met het anode oppervlak of de stroom-toevoer naar de Printed Circuit Boards worden hiermee niet onderkend. Dus dient de

gerealiseerde laagdikte ook aan produkten gemeten te worden. Door grote verschillen in patronen op verschillende typen PCBs, is de spreiding in laagdikte aanzienlijk. Aan deze door het ontwerp bepaalde variatie kan de processtap niets doen. Daarom is ervoor gekozen op gezette tijden een standaard board te gebruiken en hieraan op vaste posities te meten.

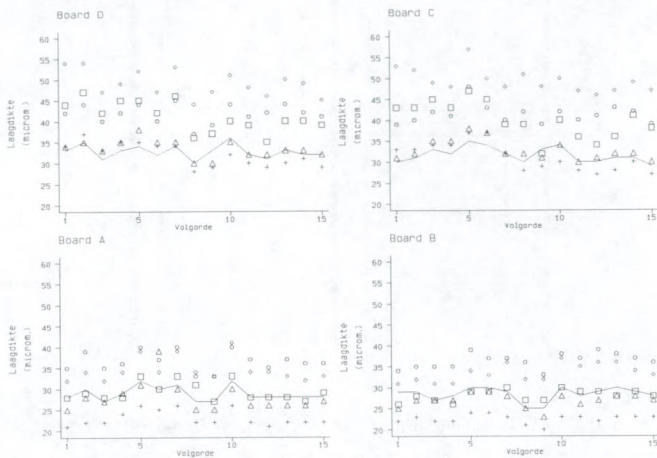


*Figuur 6. PCBs op een stang voor galvanisch koper aanbrengen.
(linksonder board A, rechtsonder B, rechtsboven C en linksboven D)*

Deze boards worden ook op constante wijze ingerekt. Doordat ze voor en achter hetzelfde patroon hebben, en ingerekt worden zoals aangegeven, zijn dezelfde posities op verschillende boards steeds vergelijkbaar: verschillen in dikte tussen die posities worden niet veroorzaakt door het patroon, maar door het galvanische proces. Er is adequate apparatuur om direct de laagdikte in een gat te meten beschikbaar. In de diagnostische fase heeft het betreffende SPC team besloten van een vijftiental stangen van vier PCBs in wording, op 5 posities van elk PCB de laagdikte in een gat te meten (Figuur 6). Daarnaast is er in de referentierand van elk PCB een vaste plaats waarop de laagdikte gemeten kan worden (in het aangegeven zwarte vlakje, Figuur 6). In Figuur 7 staan alle individuele metingen per board uitgezet, met figuren per board zoals ze in het galvanisch bad verwerkt zijn (linksonder board A, rechtsonder B, rechtsboven C en linksboven D). De doorgetrokken lijn betreft steeds de meting in de referentierand.

Uit Figuur 7 is het volgende af te leiden. Er zijn binnen hetzelfde board duidelijk systematische verschillen in laagdikte. Deze systematiek is voor de 4 boards grotendeels gelijk, en hangt samen met het ontwerp. De twee boards boven in het bad (C en D) laten een duidelijk grotere laagdikte zien, vergeleken met de twee boards onder (A en B). Dit is,

gezien de wijze van inrekken, direct te wijten aan de spreiding van het galvanisch bad. De verschillen tussen posities binnen de twee bovenste boards zijn ook wat groter dan dezelfde verschillen binnen de twee onderste boards. De meting in de referentierand komt voor de onderste board goed overeen met de gemiddelde dikte op dat board. Voor de bovenste boards is dat geenzins het geval: de werkelijke laagdikte is bijna overal op het board groter. Dit betekent dat de meting in de referentierand niet representatief is, en niet als enige gebruikt kan worden voor procesbeheersing.



Figuur 7. Figuren van gemeten dikten per positie.

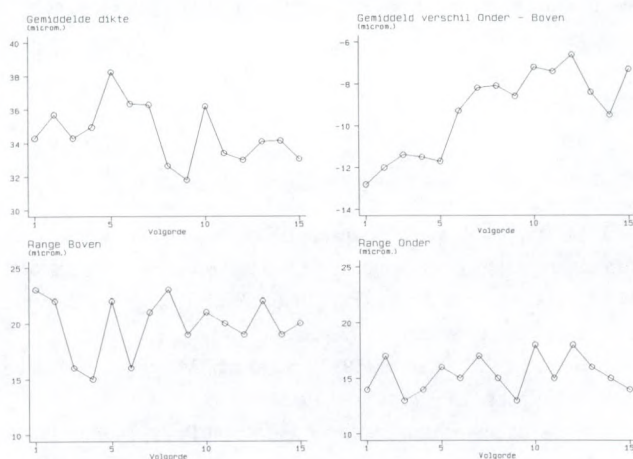
+: Positie 1 ◇: Positie 2 o: Positie 3
 Δ: Positie 4 □: Positie 5 —: Meting in rand

Uit het voorgaande volgt dat de belangrijkste karakteristieken van het bad samen te vatten zijn in de volgende grootheden:

- (1) de (overall) gemiddelde laagdikte;
- (2) het verschil tussen de gemiddelde laagdikte op board A en B (onder) en de gemiddelde laagdikte op boards C en D (boven);
- (3) de range van laagdiktes op boards C en D (boven)
- (4) de range van laagdiktes op boards A en B (onder)

Deze vier grootheden staan in Figuur 8 uitgezet tegen de tijd.

De gemiddelde laagdikte laat een redelijk stabiel beeld zien. De grootste variatie zit duidelijk binnen een stang van vier boards die in een keer behandeld worden. Het is daarmee duidelijk dat de grootste verbetering moet komen van het reduceren van de variatie binnen een stang (dus het koperbad, anode-oppervlak en dergelijke). Deze variatie kent duidelijk tenminste twee componenten: het verschil tussen boven en onder in het bad en de variatie binnen een board. In de resultaten van de vijftien proef-boards kan worden gezien, dat het verschil tussen boven duidelijk gereduceerd is (van ongeveer $13\text{ }\mu$ tot $8\text{ }\mu$), door in dit geval betere beheersing van de samenstelling van het bad. Ook is duidelijk dat de range in laagdiktes binnen een board boven groter is dan onder. De range onder is gedurende de gehele periode beheerst. De range boven is in de loop van de tijd minder variabel geworden, maar nog gemiddeld even groot. Verdere verbetering wordt nu pas mogelijk door maatregelen aan de vorm van de anode (afscherming e.d.) en een andere chemie in het galvanisch bad. Dit is inmiddels ondernomen.



Figuur 8. Trendgrafieken gemiddelde, verschil onder-boven en ranges.

Het gebruik van standaard PCBs voor de bewaking van het proces, waar zeer veel verschillende typen PCBs in worden geproduceerd, levert zo een heldere bewaking van de processtap op. Deze methodiek is bij Hollandse Signaalapparaten nog verder doorgevoerd; dezelfde boards worden tevens gebruikt voor de bewaking van andere processtappen. Op deze wijze wordt ook nog beter inzicht verkregen in de samenhang tussen processtappen.

4. Conclusie

Kleine aantallen en kleine series zijn geen excuus om niet met SPC aan de slag te gaan. Op basis van een goed doortimmerde, procesgerichte aanpak en maatwerk met betrekking tot de statistische methoden valt zeer veel te bereiken. In deze publicatie is met een aantal voorbeelden aangegeven hoe dit in de praktijk is toegepast. Kern van de aanpak is dat men ook in dergelijke situaties de ogen gericht houdt op het voortbrengende proces en creatief is in het bedenken van parameters en methoden om dit proces te beheersen. De aanpak die een SPC team gebruikt kan, nadat het eerste doel - een beheerste processtap - bereikt is, uitstekend dienen als werkmethode om continu verbeteren in de organisatie te verankeren. Dit is niet van vandaag op morgen bereikt; het is een proces dat minimaal een tot twee jaar in beslag neemt. Om succes te hebben zal maatwerk in de aanpak en de gebruikte statistische methoden noodzakelijk zijn.

Referenties

- Al-Salti M., E.M. Aspinwall en A. Statham (1992), Implementing SPC in a Low-volume Manufacturing Environment, *Quality Forum*, Vol. 18, No. 3, blz. 125-132.
- Does R.J.M.M., K.C.B. Roes en A. Trip (1996), *Statistische procesbeheersing in bedrijf*, Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer.
- Dongen van G.B.W. en K.C.B. Roes (1992), Statistiek: Motor van een moderne kwaliteitsaanpak in Nijmegen, *Sigma* 6, blz. 19-22.
- Pyzdek T. (1993), Process Control for Short and Small Runs, *Quality Progress*, Vol. 26, No. 4, blz. 51-60.
- Quesenberry C.P. (1991), SPC Q charts for Start-Up Processes and Short or Long Runs, *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, No. 3, blz. 213-224.
- Quesenberry C.P. (1995), On Properties of Q charts for Variables, *Journal of Quality Technology*, Vol. 27, No. 3, blz. 184-203.
- Shewhart W.A. (1931), *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, Princeton, Van Nostrand Reinhold Company.
- Roes K.C.B., R.J.M.M. Does en R. Stam (1995), Shewhart-type control charts in low volume manufacturing, Mathematical preprint series 95-10, Universiteit van Amsterdam.
- Wheeler D.J. (1991), *Short Run SPC*, SPC Press Inc., Knoxville, Tennessee.