

SPC bij grote-aantallen-fabricage

Albert Trip*

Samenvatting

Bij grote-aantallen-fabricage staat de grote hoeveelheid beschikbare gegevens niets de toepassing van SPC in de weg. Er zijn volop mogelijkheden om door middel van een goede procesanalyse tot efficiënte steekproefschema's en effectieve regelkringen te komen. Wanneer steekproefschema's en/of regelkaarten echter niet goed functioneren, kan de hierdoor veroorzaakte schade aanzienlijk zijn omdat er veel beroep op wordt gedaan. Het geloof in SPC kan hier sterk door worden ondermijnd. In de praktijk wordt een parameter (om allerlei redenen) vaak bewaakt met een $\bar{X}$ -R-kaart (of $\bar{X}$ -s-kaart), maar in veel situaties functioneert deze kaart niet goed, namelijk wanneer er structuur is binnen steekproeven en/of extra variatie tussen steekproeven. Dit artikel geeft aan wat de gevolgen zijn van het ten onrechte toepassen van de $\bar{X}$ -R-kaart, en hoe op eenvoudige wijze een effectieve regelkaart kan worden ontworpen. De lezer moet echter beseffen dat de regelkaart niet meer is dan een aspect van een SPC-systeem; voor een goed werkend SPC-systeem moet een organisatie allereerst de implementatie en borging van regelkringen goed hebben ingebed in een organisatorische structuur. Pas wanneer dat goed is geregeld, dragen effectieve regelkaarten en regelkringen bij tot het succes van het SPC-systeem.

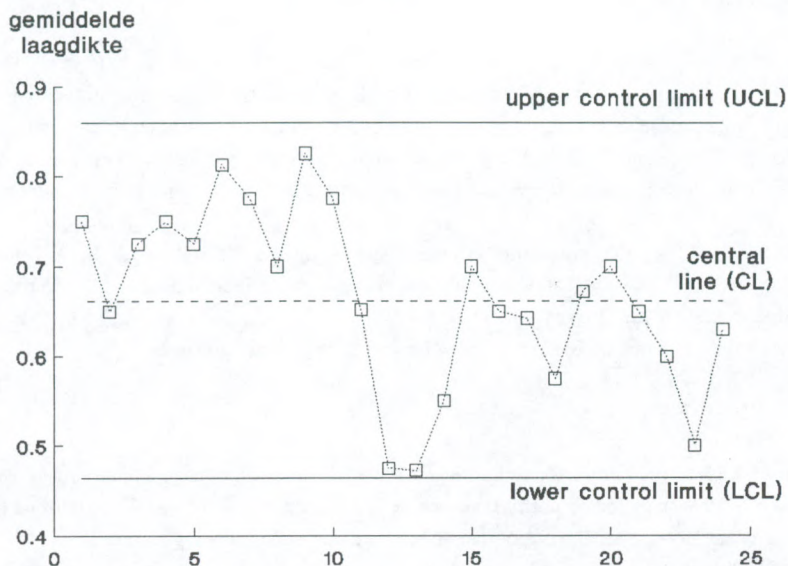
* Philips Semiconductors, Stadskanaal
Industrial Support Group
Gebouw S-1
Postbus 10
9500 AA Stadskanaal
tel. 0599-632590
fax. 0599-632504
E-mail: TRIP@NLSKNFS1.SCSKN.PHILIPS.NL

1. SPC als managementfilosofie

Statistische Procesbeheersing (SPC) is een managementfilosofie met methoden die de bedrijfsvoering drastisch beïnvloeden. Een organisatie die werkt volgens de ideeën van SPC beseft dat alle activiteiten als processen worden uitgevoerd en dat de uitkomsten ervan voortdurend zullen variëren. De wijze waarop de organisatie reageert op die variatie is echter allesbepalend. Met SPC in het vaandel maakt de organisatie onderscheid tussen gewone en speciale oorzaken van variatie. Gewone oorzaken zijn inherent aan het proces en zijn steeds van invloed op alles en iedereen, terwijl speciale oorzaken slechts incidenteel optreden en voortvloeien uit speciale omstandigheden. Dit onderscheid werd voor het eerst aangebracht door Walter A. Shewhart (1931), terwijl W. Edwards Deming (1994) deze gedachten in en na de Tweede Wereldoorlog verder uitwerkte tot een managementfilosofie. De kern van SPC is dat een organisatie het onderscheid tussen beide soorten variatie als leidraad gebruikt voor hoe ze reageert. In het artikel van Does, elders in dit nummer van Kwantitatieve Methoden, wordt de management invalshoek, zoals die zich in het kielzog van Deming ontwikkelde, nader belicht.

Om gemakkelijk onderscheid tussen de twee soorten variatie te kunnen maken, heeft Shewhart de regelkaart ontwikkeld (zie afbeelding 1). Zolang het proces binnen de twee regelgrenzen (LCL en UCL, 'lower control limit' resp. 'upper control limit') blijft, is er sprake van gewone variatie. Wanneer een regelgrens wordt overschreden, is dat voldoende aanwijzing voor een speciale oorzaak van variatie. De regelgrenzen worden berekend uit historische procesgegevens, en staan geheel los van eventuele eisen op het resultaat. Overigens worden soms extra regels gehanteerd om speciale oorzaken van variatie aan te wijzen, zoals bijvoorbeeld de regel dat 9 opeenvolgende waarnemingen boven de centrale lijn (aangegeven met CL) liggen.

In het verleden werd SPC sterk vereenzelvigd met de regelkaart. Onder invloed van Deming is dat het afgelopen decennium veranderd en met name het bedrijfsleven heeft daarvan geprofiteerd (zie Does, Roes & Trip (1996) voor ervaringen bij ASM Lithography te Veldhoven, Hollandse Signaalapparaten te Hengelo, en Philips Semiconductors te Stads kanaal). Ook in de dienstverlening begint SPC veld te winnen (zie bijv. Boswinkel (1995) en Wiersma & Bertsch (1995)), omdat de nadruk op de regelkaart verdwijnt. SPC is een samenspel van weten wanneer en hoe op variatie gereageerd moet worden: de regelkaart is één kant van de medaille, de wijze van reageren de andere. Bij de invoering van SPC in een organisatie moet juist ook veel aandacht worden besteed aan het vastleggen van een procedure die in geval van een speciale oorzaak van variatie gevolgd moet worden. Zo'n procedure, een rampenplan of OCAP ('Out-of-Control Action Plan'), kan worden beschouwd als de meest praktische beschrijving van de strategie om problemen met betrekking tot het proces op te lossen (zie Sandorf & Bassett (1995)).



afbeelding 1. voorbeeld van een regelkaart

Toch geldt SPC tot op heden nog het best in industrieën die worden gekenmerkt door grote-aantallen-fabricage. Regelkaarten zijn in zulke omgevingen het meest voor de hand liggend, en in feite heeft Shewhart de grafiek ook voor deze situatie ontworpen. Vaak is een overvloed aan historische gegevens beschikbaar voor gedegen procesonderzoek, zodat een verstandig steekproefschema kan worden ontworpen en goede beslissingscriteria kunnen worden opgesteld. Ook kan een doeltreffend terugkoppelmechanisme worden geïnstalleerd omdat het mogelijk is frequent steekproeven te nemen.

Maar helaas, in de praktijk blijken de potentiële voordelen van grote-aantallen-fabricage nogal eens in hun tegendeel te verkeren. Wanneer de procesanalyse NIET gedegen genoeg geschiedt, waardoor een ongelukkig steekproefstelsel en/of slechte beslissingsregels tot stand komen, kan dat door het grote gebruik dat ervan gemaakt wordt leiden tot enorme tijdverspilling en veel foute beslissingen. Het is dan ook geen wonder dat verscheidene bedrijven om deze reden een flinke dosis scepsis tegen SPC hebben opgebouwd. In dit artikel hoop ik aan te tonen dat zulke bedrijven daarmee toch vooral zichzelf schade toebrengen. Overigens zijn er andere redenen waarom organisaties (niet alleen grote-aantallen industrieën, maar ook kleine-aantallen industrieën en dienstverlenende bedrijven) weerstand hebben tegen SPC, redenen die te maken hebben met implementatie en borging. In de slotparagraaf wil ik daar kort op ingaan.

2. Standaard regelkaarten

De standaard regelkaart die in elk boek over SPC wordt besproken is de $\bar{X}$ -R-kaart. Deze kaart heeft (net als de verwante $\bar{X}$ -s-kaart) betrekking op de situatie waarbij uit een proces regelmatig steekproeven worden genomen, waarbij de elementen uit de steekproef onderling onafhankelijk en identiek verdeeld zijn, en er geen extra variatie is tussen steekproeven. De regelkaart moet een signaal afgeven wanneer de parameters van de verdeling veranderen.

Zij $X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{nt}$ zo'n steekproef van omvang n op tijdstip t ($t = 1, \dots, k$). De $\bar{X}$ -R-kaart bestaat dan uit twee grafieken, waarin de steekproefgemiddelden $\bar{X}_t$ resp. de spreidingsbreedten (de 'ranges') $R_t = \max \{X_{1t}, \dots, X_{nt}\} - \min \{X_{1t}, \dots, X_{nt}\}$ tegen de tijd worden uitgezet. Voor de R-kaart worden de volgende grenzen gehanteerd:

$$UCL_R = D_4 * \bar{R}$$

$$CL_R = \bar{R}$$

$$LCL_R = D_3 * \bar{R}$$

met $\bar{R} = k^{-1} \sum R_t$ (de gemiddelde spreidingsbreedte) en D_3 en D_4 constanten die op basis van de veronderstelling dat de X_{ij} normaal verdeelde grootheden zijn, leiden tot "3 σ -grenzen" (zie Banens et al. (1994), par. 3.3). Voor de $\bar{X}$ -kaart gelden de volgende grenzen:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 * \bar{R}$$

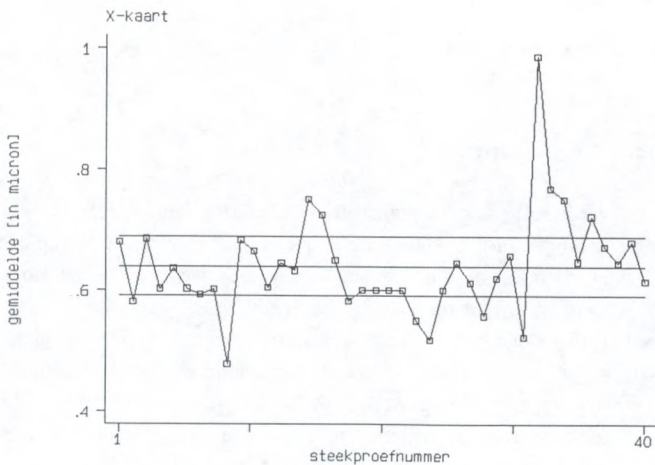
$$CL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 * \bar{R}$$

met $\bar{\bar{X}} = k^{-1} \sum \bar{X}_t$ (het totale gemiddelde) en A_2 wederom een constante die onder de veronderstelling van normaliteit tot "3 σ -grenzen" leidt. De constanten A_2 , D_3 en D_4 hangen af van de steekproefomvang n , en zijn o.a. getabelleerd in Banens et al. (1994).

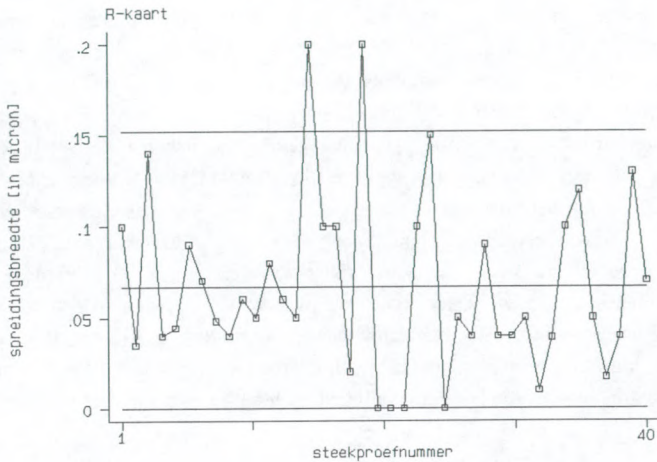
Tot zover de theorie. De praktijk is echter weerbarstiger. In de organisatie waar schrijver dezes zich verdienstelijk poot te maken, is in een steekproef nogal eens sprake van structuur (i.p.v. onafhankelijkheid), terwijl extra variatie tussen steekproeven vrijwel altijd optreedt. In Does, Roes & Trip (1996) komen enkele van deze gevallen ter sprake, alsmede het algemene kader dat Roes (1995) als promotie-onderzoek uitgebreid beschreef. Wanneer in zo'n situatie toch de gewone $\bar{X}$ -R-kaart wordt gebruikt, hetgeen nogal eens het geval is, leidt dat tot teleurstellingen waar ik in een voorbeeld dieper op inga. Eerst wil ik nog plausibel maken waarom deze fout wordt gemaakt. In de eerste plaats is de ontwerper van de regelkaart bij een bepaalde processtap veelal geen professionele SPC-deskundige. Hij of zij is daarom meestal niet in staat om maatwerk te leveren en grijpt derhalve terug op bekende theorie en hulpmiddelen; daarin speelt de $\bar{X}$ -R-kaart een allesoverheersende rol. Ten tweede staat ondersteunende software vaak alleen maar standaard regelkaarten toe. En tenslotte beseft de ontwerper vaak niet dat er sprake is van structuur in de steekproef, laat staan dat dit de effectieve werking van de regelkaart in de weg staat. Het is dan ook moeilijk de vinger op de zere plek te leggen op het moment dat zich teleurstellingen voordoen.

Als typisch voorbeeld beschrijf ik het terugkoppelmechanisme van de processtap "zilveropdampen", een onderdeel van het fabricageproces van dioden bij Philips Semiconductors te Stadskanaal. De soldeerprop, uit Molybdeen bestaand, vormt een onderdeel van de diode. Deze krijgt een laagje zilver omdat de elektrische eigenschappen van de diode daardoor gunstig worden beïnvloed (zij het dat het laagje niet te dik mag worden). Het laagje zilver wordt in een opdampklok op de prop aangebracht. Per opdampcharge worden 67 mallen met elk ± 4500 proppen tegelijkertijd behandeld. Het proces wordt bewaakt door per charge twee koperen schijfjes ("meetcenten") toe te voegen, één meetcent bovenin de klok en één onderin. De zilverlaagdikte wordt gemeten met een X-ray Fischerscope, maar de meetnauwkeurigheid-analyse (zie Does, Roes & Trip (1996), par. 5.7) gaf aan dat deze meting slecht reproduceerbaar was (zie appendix). Om deze reden is besloten de zilverlaagdikte van iedere meetcent twee keer te bepalen. Aldus bestaat iedere steekproef uit vier metingen. Aanvankelijk werden deze in een $\bar{X}$ -R-kaart verwerkt (zie afbeelding 2). Met het overall gemiddelde van $0.639 \mu\text{m}$ en een gemiddelde spreidingsbreedte van $0.067 \mu\text{m}$ zijn de regelgrenzen eenvoudig te bepalen (in een steekproef van omvang $n=4$ geldt $A_2=0.729$, $D_3=0$ en $D_4=2.282$).



afbeelding 2a. $\bar{X}$ -kaart

De $\bar{X}$ -kaart van afbeelding 2a suggereert een uiterst onbeheerst proces: ongeveer een derde deel van alle gemiddelden valt buiten de regelgrenzen!



afbeelding 2b. R-kaart

3. 'Moving range' regelkaarten

Een belangrijke verbetering van de standaard regelkaarten kan worden bereikt door de regelgrenzen met behulp van de zogenaamde 'moving range' methode te bepalen (zie ook Banens et al. (1994, par. 3.3.4)). Zij $X_1, \dots, X_k$ een reeks waarden van het proceskenmerk dat in een regelkaart wordt uitgezet (bijv. het gemiddelde van een steekproef, of de spreidingsbreedte), dan worden de grenzen bepaald op basis van de opeenvolgende absolute verschillen $MR_t = |X_t - X_{t-1}|$ ($t=2, \dots, k$). Het gemiddelde van deze verschillen wordt de gemiddelde 'moving range' genoemd: $\overline{MR} = (k-1)^{-1} \sum MR_t$. Om weer op de "3 σ -grenzen" uit te komen (vanuit de veronderstelling dat de X_t onderling onafhankelijk en identiek normaal verdeeld zijn) worden de volgende grenzen gehanteerd:

$$UCL_x = \bar{X} + 2.66 * \overline{MR}$$

$$CL_x = \bar{X}$$

$$LCL_x = \bar{X} - 2.66 * \overline{MR}$$

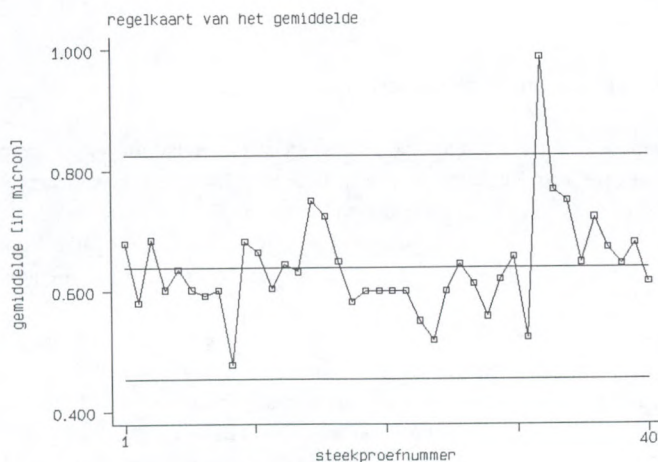
met $\bar{X} = k^{-1} \sum X_t$ (het totale gemiddelde).

Op deze wijze wordt alleen van de variatie in het onderhavige kenmerk gebruik gemaakt om de regelgrenzen te bepalen. Of deze variatie nu wel of niet beïnvloed wordt door structuur

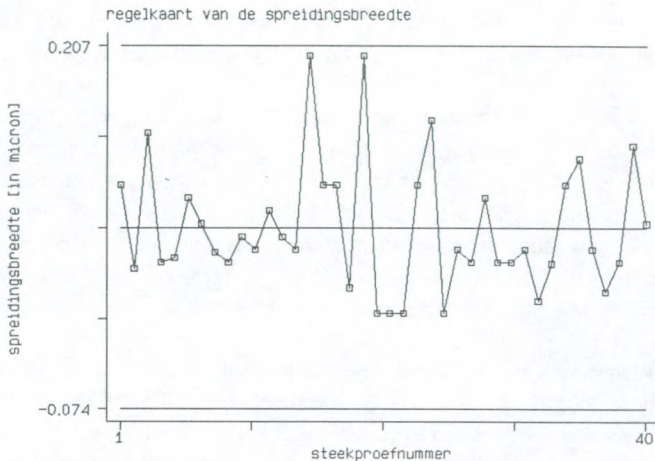
in de steekproef, maakt in het geheel niets meer uit. Eventuele extra variatie tussen steekproeven wordt nu meegenomen doordat de spreiding in het kenmerk op basis van achtereenvolgende realisaties ervan wordt bepaald. De 'moving range' methode kan derhalve als een robuuste methode voor het bepalen van regelgrenzen worden opgevat.

Opgemerkt zij dat de bepaling van de regelgrenzen is gebaseerd op de veronderstelling dat het uitgezette kenmerk normaal is verdeeld. Bij duidelijk niet-symmetrisch verdeelde kenmerken (zoals vaak bij spreidingsbreedten en standaard-afwijkingen het geval is) leidt dat tot "lelijke" regelkaarten. Een mogelijke remedie is om in zo'n geval het kenmerk eerst te transformeren (bijv. door de logaritme te nemen) tot een min of meer symmetrische verdeling, daarop de 'moving range' methode los te laten, en vervolgens alles terug te transformeren.

In het voorbeeld van het zilveropdampen levert de toepassing van de 'moving range' methode de verbeterde $\bar{X}$ -R-kaart van afbeelding 3, voor resp. de gemiddelde zilverlaagdikte en de spreidingsbreedte. De regelgrenzen liggen voor $\bar{X}$ aanzienlijk minder eng; we zien nu dat het gemiddelde op één waarneming na beheerst is - een heel ander beeld dan de $\bar{X}$ -R-kaart suggereerde. Op basis van de R-kaart zien we nu dat de spreiding, uitgedrukt in de spreidingsbreedte, toch als beheerst mag worden beschouwd.



afbeelding 3a. $\bar{X}$ -kaart gebaseerd op 'moving range' methode

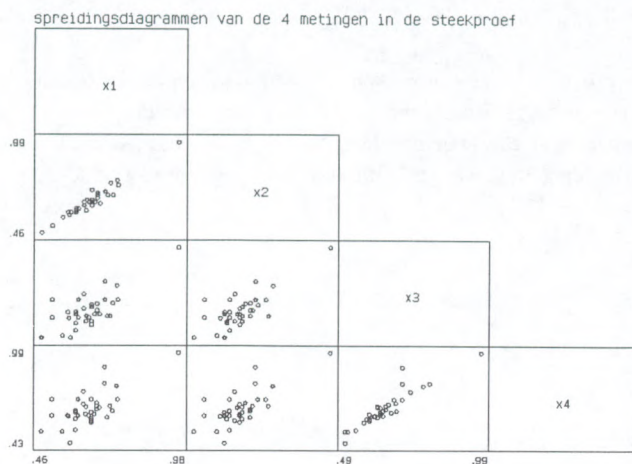


afbeelding 3b. R-kaart gebaseerd op 'moving range' methode

4. Regelkaarten voor steekproeven met structuur

In de vorige paragraaf is de 'moving range' methode beschreven, die leidt tot goede grenzen voor het in de regelkaart uitgezette kenmerk. Daarmee wordt de situatie met structuur in de steekproef echter nog niet volledig afgedekt. Er is maatwerk vereist om die structuur zodanig te verwerken dat uit de gegevens de juiste kenmerken worden bepaald om het proces mee te bewaken en te regelen. Het voorbeeld van het zilveropdampen illustreert een en ander.

Een procesanalyse van de meetgegevens toont aan dat er structuur in de gegevens van het zilveropdampen zit: de spreiding tussen beide meetcenten is aanzienlijk groter dan de spreiding tussen de twee herhalingsmetingen aan dezelfde meetcent. De spreidingsdiagrammen van afbeelding 4 maken duidelijk dat herhalingsmetingen aan dezelfde meetcent (X_1 en X_2 resp. X_3 en X_4) zeer hoog correleren, terwijl de correlatie tussen verschillende meetcenten kleiner is. Een andere grafische techniek die in deze fase nuttig is, is de *multi-vari-kaart* (zie Does, Roes & Trip (1996), par. 9.2). Met behulp van principale componenten-analyse en/of variantie-analyse kan de professionele statisticus zijn of haar vermoedens eventueel onderbouwen.



afbeelding 4. matrix van spreidingsdiagrammen

De procesanalyse van het zilveropdampen leidt nu tot de volgende belangrijke proceskenmerken:

1. de gemiddelde zilverlaagdikte;
2. het verschil in zilverlaagdikte tussen de bovenste en de onderste meetcent;
3. de gemiddelde spreidingsbreedte van herhalingsmetingen aan dezelfde meetcent.

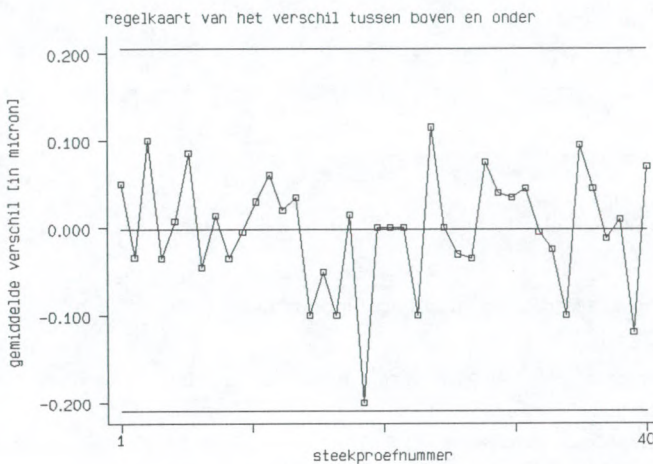
Toch is de analyse alleen onvoldoende reden om de belangrijke proceskenmerken te bewaken met behulp van een regelkring. Er moet ook iets te regelen zijn, met andere woorden, de kenmerken moeten vanuit de praktijk als zinvol worden ervaren. Voor de proceskenmerken van het zilveropdampen is dat het geval:

1. met de gemiddelde zilverlaagdikte wordt de hoeveelheid opgedampt zilver bewaakt;
2. verschillen in de opdampklok komen tot uiting in het verschil tussen beide meetcenten; wanneer het verschil te groot wordt, vertelt het rampenplan de operator hoe hij of zij door bijbuigen van de reflector het verschil kan opheffen;
3. grote verschillen tussen herhalingsmetingen wijzen op haperen van het meetinstrument.

Wanneer de vier laagdiktemetingen in steekproef bij zilveropdampen worden aangeduid als X_{11} , X_{12} , X_{13} , X_{14} (met X_{11} en X_{12} de metingen aan de bovenste meetcent), dan worden de volgende proceskenmerken bewaakt:

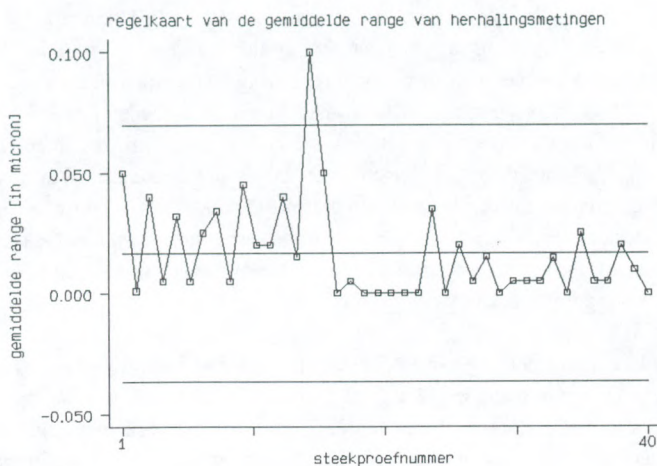
1. $\bar{X}_t = (X_{t1} + X_{t2} + X_{t3} + X_{t4}) / 4$
2. $V_t = (X_{t1} + X_{t2})/2 - (X_{t3} + X_{t4}) / 2$
3. $R_t = \{ |X_{t1} - X_{t2}| + |X_{t3} - X_{t4}| \} / 2$

De procedure is nu dat ieder proceskenmerk een eigen regelkaart heeft. De regelgrenzen worden in alle gevallen bepaald met de 'moving range' methode. De regelkaart van het gemiddelde staat al afgebeeld in afbeelding 3a. Die van V_t en R_t - die dus gezamenlijk de R-kaart van afbeelding 3b vervangen - zijn resp. weergegeven in afbeelding 5.



afbeelding 5a. regelkaart van V_t

De regelkaarten van afbeelding 5 tonen aan dat het verschil tussen beide meetcenten ook beheerst is (met gemiddeld geen verschil), maar dat er met betrekking tot de herhalingsmetingen een onbeheerste situatie optrad. Inderdaad was er in die periode een probleem met het meetinstrument.



afbeelding 5b. regelkaart van R_i

5. Implementatie en borging

De keuze van de juiste regelkaarten is belangrijk voor het welslagen van een SPC-punt. Een verkeerde keuze draagt niet bij tot effectieve beheersing, omdat

1. de juiste momenten om in te grijpen niet worden gevonden; en
2. de kaart niet bijdraagt tot het kiezen van de juiste maatregelen.

Voor het bepalen van geschikte proceskenmerken en het bepalen van de bijbehorende regelgrenzen biedt de in dit artikel beschreven aanpak eenvoudige aanknopingspunten. Het is een voordeel om gevoel te hebben voor variatiebronnen, maar ook met behulp van eenvoudige grafische methoden openbaart eventuele structuur in een steekproef zich geredelijk. De daarbij te kiezen componenten liggen dan meestal voor de hand, te meer daar ze praktische betekenis moeten hebben om zinvol te zijn. De regelkaart van een component volgt dan automatisch met behulp van de 'moving range' methode. Het voordeel van deze aanpak is dat de beslissingscriteria weer helder zijn terwijl ze tevens de vinger naar de zere plek leiden.

Bij implementeren van SPC moet de lezer echter goed bedenken dat de regelkaart niet meer is dan een aspect van het geheel. Het cruciale punt is hoe een systeem van regelkringen kan worden geïntroduceerd dat in de praktijk, op de fabrieksvloer, op een samenhangende manier

werkt. In veel gevallen van grote-aantallen-fabricage worden de machines continu gebruikt en wordt in ploegen gewerkt. Om SPC dan van de grond te krijgen en in de lucht te houden, is communicatie tussen alle betrokkenen van het grootste belang. In Stadskanaal hebben we zeer goede ervaringen met teams die een operator bevatten uit iedere ploeg, en als opdracht hebben een processtap beheerst te maken en een regelkring op te stellen. De teams gebruiken een werkboek dat structuur geeft aan de noodzakelijke werkzaamheden (zie Does, Roes & Trip (1996), hoofdstuk 5). De essentie van de werkwijze is dat de processtap eerst in kaart wordt gebracht en potentiële problemen worden geïnventariseerd. Daarna worden verbeteracties gedaan die tot een beheerst proces moeten leiden. Dan wordt de parameter waarmee de processtap moet worden bewaakt onder de loep genomen en wordt de regelkring opgesteld. Tenslotte worden de prestaties van de processtap geanalyseerd waarna de formele afsluiting van het team plaats kan vinden.

Uiteraard wordt de implementatie van SPC ingebed in een organisatorisch kader waarin een SPC-stuurgroep de verantwoording draagt. Op de stuurgroep rust ook de taak om na implementatie van SPC de borging te bewaken. Er moet een structuur zijn waarin de verworvenheden van SPC niet slechts bewaard blijven, maar ook worden uitgebouwd. Daartoe moet de aandacht op de processtap blijven gericht; door het installeren van verbeterteams kan het management daar invulling aan geven. Verbeterteams kunnen opdrachten krijgen met betrekking tot allerlei vormen van beheersing (kwaliteit, leverbetrouwbaarheid, kosten, veiligheid en motivatie). Een voorwaarde daartoe is dat de stand van zaken rondom de processtap absoluut helder is, en dat de leden van de verbeterteams ook invloed hebben op de resultaten. In Stadskanaal maken we gebruik van het "Shop Floor Management" concept van Kiyoshi Suzuki (1993) om verbeterteams een plaats in de organisatie te geven en de voorwaarden voor hun goede functioneren te vervullen.

Eén van de kenmerken van "Shop Floor Management" is dat de productieorganisatie (de 'shop floor') uit een aantal mini-bedrijven bestaat. Onder leiding van een directeur:

- ontwikkelt een mini-bedrijf een naam en een missie;
- worden doelstellingen geformuleerd en wordt een actieplan opgesteld om die te bereiken;
- wordt het plan uitgevoerd;
- wordt de voortgang gerapporteerd.

Een mini-bedrijf communiceert op heldere wijze met alle betrokken partijen (klanten en leveranciers, de bankier en het personeel). Daartoe worden de doelstellingen en de voortgang op een scorebord bijgehouden, overzichtelijk ingedeeld naar vijf categorieën: kwaliteit, kosten, leverbetrouwbaarheid, veiligheid en motivatie. De verbeterteams krijgen in deze opzet tot taak één of meer aspecten te verbeteren. Net als SPC-teams maken ze gebruik van een werkboek om op gestructureerde wijze de verbetercyclus (of Plan-Do-Check-Act cyclus)

in te gaan. De tijd moet ons echter nog leren in hoeverre het hele SPC-bouwwerk daarmee ook wordt geborgd.

Appendix. Meetnauwkeurigheid-analyse

Alle vijf operators in het SPC-team hebben meegewerkt aan de meetnauwkeurigheid-analyse. Ieder heeft de 10 geselecteerde meetcenten 3 keer achter elkaar gemeten.

Voor iedere reeks van 3 metingen is de spreidingsbreedte uitgerekend, waarna per operator de gemiddelde laagdikte en de gemiddelde spreidingsbreedte is bepaald, zie tabel. (zie Does, Roes & Trip (1996), par. 5.7, voor een nadere beschrijving van de analyse)

operator	gemiddelde laagdikte	gemiddelde spreidingsbreedte
1	0.6895	0.057
2	0.7150	0.048
3	0.6749	0.048
4	0.7113	0.082
5	0.7061	0.067

Volgens de standaard-analyse van een meetnauwkeurigheid-onderzoek wordt de herhaalbaarheid bepaald uit het gemiddelde van de gemiddelde spreidingsbreedten (0.0604):

$$\text{herhaalbaarheid} = 3.05 * 0.0604 = 0.184$$

De reproduceerbaarheid wordt berekend uit de spreidingsbreedte van de gemiddelde laagdikten per operator (0.0401):

$$\text{reproduceerbaarheid} = 2.08 * 0.0401 = 0.083$$

De totale meetspreiding vinden we door de herhaalbaarheid en reproduceerbaarheid kwadratisch op te tellen:

$$\text{totale meetspreiding} = (0.184^2 + 0.083^2)^{1/2} = 0.202$$

Daarmee neemt de totale meetspreiding 34% van het tolerantiegebied (0.4 - 1.0 μm) in beslag, hetgeen volgens de geldende standaard onaanvaardbaar veel is. Omdat met name de herhaalbaarheid hiervoor verantwoordelijk is, is besloten iedere meetcent twee keer te meten.

Referenties

Banens, P.J.A. et al. (1994), *Industriële Statistiek en Kwaliteit*; Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer.

Boswinkel, R. (1995), *Procesbeheersing en lagere overheden*; Sigma, 1995 nr. 6, pp. 12-15.

Deming, W.E. (1994), *De crisis overwonnen*; Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer.

Does, R.J.M.M., K.C.B. Roes, A. Trip (1996), *Statistische Procesbeheersing in bedrijf*; Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer.

Roes, K.C.B. (1995), *Shewhart-type Charts in Statistical Process Control*; Thesis, Amsterdam.

Sandorf, J.P., A.T. Bassett III (1995), *Het OCAP: hoe te reageren op onbeheerste situaties*; Sigma, 1995 nr. 4, pp. 10-14.

Shewhart, W.A. (1931), *Economic control of quality and manufactured product*; Van Nostrand Reinhold, Princeton.

Suzaki, K. (1993), *The new Shop Floor Management*; The Free Press, New York.

Wiersma S., B. Bertsch (1995), *Kwaliteitsverbetering en statistiek in dienstverlening*; Sigma, 1995 nr. 2, pp. 15-19.

Ontvangen: 22 maart 1996
Geaccepteerd: 14 mei 1996