



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Industriële statistiek als technologie voor het oplossen van problemen

de Mast, J.

Publication date

2012

Document Version

Final published version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

de Mast, J. (2012). *Industriële statistiek als technologie voor het oplossen van problemen*. (Oratiereeks; No. 424). Vossiuspers UvA.

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Industriële statistiek als technologie voor het oplossen van problemen

Industriële statistiek als technologie voor het oplossen van problemen

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
hoogleraar Industriële Statistiek
aan de Universiteit van Amsterdam
op woensdag 25 januari 2012

door

Jeroen de Mast

 VOSSIUSPERS UVA

Vossiuspers UvA is een imprint van Amsterdam University Press.
Deze uitgave is totstandgekomen onder auspiciën van de Universiteit van Amsterdam.

Dit is oratie 424, verschenen in de oratiereeks van de Universiteit van Amsterdam.

Omslag: Crasborn BNO, Valkenburg a/d Geul
Opmaak: JAPES, Amsterdam

ISBN 978 90 5629 701 5
e-ISBN 978 90 4851 642 1 (pdf)
e-ISBN 978 90 4851 643 8 (ePub)

© Vossiuspers UvA, Amsterdam, 2012

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 jº het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

*Geachte mevrouw de Rector Magnificus,
Mijnheer de decaan van de Faculteit Economie en Bedrijfskunde,
Hoogleraren van de Universiteit van Amsterdam en van zusterfaculteiten,
Zeer gewaardeerde toehoorders,*

Mijn overtuigingen:

- Het is van belang professionals in het bedrijfsleven en de non-profitsector goed op te leiden in vaardigheden in het doen van onderzoek en het oplossen van problemen.
- Industriële statistiek is geen toegepaste wiskunde, maar een technologisch vak waarin methoden en technieken voor het doen van onderzoek en het oplossen van problemen worden ontworpen en kennis wordt vergaard ten behoeve van een effectieve toepassing ervan.

Dat is de clou van mijn betoog. Mocht ik u verderop in het verhaal kwijtraken, dan kent u in ieder geval de conclusie. De rest van het verhaal komt erop neer dat ik mijn vakgebied zo zie.

1. Professionele probleemoplossers

In 1854 werd Londen geteisterd door een grote cholerauitbraak. De meeste in die tijd gangbare opvattingen brachten de verspreiding van cholera niet in verband met hygiëne of mens-op-mens-besmetting, en namen in plaats daarvan aan dat cholera veroorzaakt wordt door miasma's, oftewel onheilzame lucht (Vinten-Johansen et al., 2003). Een dokter genaamd John Snow was ervan overtuigd dat een belangrijk verspreidingsmechanisme via de drinkwatersystemen opereerde. Om zijn theorie te bewijzen, deed hij in 1853-54 een studie die hij het 'Grand Experiment' noemde. Zuid-Londen werd door twee bedrijven voorzien van drinkwater, die beide hun water van de rivier de Theems betrokken. De Southwark & Vauxhall Waterworks Company nam water in op een locatie die, gezien vanuit het centrum van Londen, stroomafwaarts lag, en het drinkwater dat het bedrijf leverde was dan ook vermengd met riool- en afvalwater. De Lambeth Company had zijn waterinname in 1852 verplaatst naar een locatie die ten opzichte van Londen stroomopwaarts lag.

Snow concentreerde zich in zijn studie op een aantal districten waaraan beide bedrijven water leverden. In deze districten woonden zo'n 300.000 mensen van alle klassen en standen, en de klanten van beide waterleveranciers woonden gemengd door elkaar heen: zo kon het ene huishouden zijn water betrekken bij Lambeth, en de burens bij Southwark & Vauxhall. De omstandigheden benaderden die van een gerandomiseerd experiment – 'a natural experiment on a grand scale', schrijft Snow. Uitermate consciëntieus zocht Snow van duizenden huishoudens uit van welke leverancier zij hun water kregen, en hij stelde vast dat de prevalentie van cholera acht keer zo hoog was in huishoudens die voorzien werden door Southwark & Vauxhall dan die voorzien werden door Lambeth: 1263 slachtoffers uit 40.046 huishoudens versus 98 uit 26.107 (Snow, 1855, p. 86). Daarmee meende Snow overtuigend te hebben aangetoond dat de drinkwatervoorzieningen van Londen instrumenteel waren bij de verspreiding van cholera. Snows *Grand Experiment* is een meesterlijke demonstratie van methodische en statistische studie.

John Snow was arts, en het probleem dat hij onderzocht was er één betreffende de volksgezondheid. Ook in het tegenwoordige bedrijfsleven en de non-profitsector werken professionals als John Snow. Sommige zijn arts of verpleegkundige, andere ingenieur of technoloog, en weer andere lijnmanager of beleidsmedewerker. De problemen waarmee zij geconfronteerd worden, zijn de lange toegangstijden en onvoldoende patiëntveiligheid in de zorg, kwaliteitsproblemen of het ontwerpen van duurzamere producten in de industrie, of fouten en lange doorlooptijden in een dienstverlenende organisatie. John Snow was een uitzonderlijk begaafde probleemoplosser en onderzoeker; door zijn talent voelde hij aan hoe een dergelijke studie uitgevoerd moest worden. Ruim anderhalve eeuw later heeft mijn vakgebied veel van wat Snow intuïtief aanvoelde expliciet en operationeel gemaakt ten behoeve van professionals. De industriële statistiek biedt methodologische ondersteuning voor het structureren van problemen, het stellen van een causale diagnose en het ontwerpen van remedies. In de huidige kenniseconomie, die gedreven wordt door innovatiekracht, zijn het soort vaardigheden dat John Snow van nature bezat van cruciaal belang voor veel professionals.

2. Statistiek als methoden en technieken om problemen op te lossen

Mijn vader, die zulke zaken grondig uitzoekt, vertelt vaak dat het woord 'statistiek' wil zeggen 'de staat betreffende'. Aanvankelijk had de term betrekking op het verzamelen van gegevens ten behoeve van staatsbestuur. Statistiek ver-

wees in eerste instantie naar een loutere enumeratie van feiten; het boek van Snow bevat veel tabellen en kaarten, maar geen analyses met conclusies waarvan de betrouwbaarheid wordt beheerst door statistische redeneringen.

Later ging het vakgebied statistiek zich bezighouden met de analyse van data om inferenties te maken. De door Snow gevonden prevalenties (3% bij Southwark & Vauxhall tegen 0,4% bij Lambeth) zouden we nu schattingen noemen, en met een p -waarde ($p = 0.000$ in dit geval) zouden we nu de significantie van het verschil en de betrouwbaarheid van de daaraan gekoppelde conclusie uitdrukken. Weer later begon het vakgebied methoden en technieken te ontwerpen voor het verzamelen van gegevens, zoals de theorieën van proefopzetten en steekproeftrekken, en voor het meetbaar maken van concepten, zoals richtlijnen voor operationele definities, en methoden en technieken voor het evalueren van de betrouwbaarheid van meetmethoden. Statistiek, en sterk verwante vakgebieden als psychometrie, econometrie en biometrie, groeiden uit tot de vakgebieden waarin methoden en technieken worden ontworpen en bestudeerd voor empirisch onderzoek.

Je hebt statistieken niet alleen nodig voor het besturen van staten. Al in de jaren 1920, in het kielzog van het ontstaan van de massafabricage, ontdekte men dat je statistiek ook nodig hebt om een bedrijf te voeren. De industrie is een van de omgevingen waarin in de twintigste eeuw moderne statistische methoden werden ontwikkeld; nieuwe methoden bedacht door bijvoorbeeld William 'Student' Gosset, Walter Shewhart, Sir Ronald Fisher en George Box hielden bedrijven in de kwaliteitscontrole en productieoptimalisatie.

Industriële statistiek ondersteunt bedrijven met methoden en technieken om routinematige beslissingen te nemen en empirisch onderzoek te doen. De statistische evaluatie van schema's voor steekproefkeuring en statistische technieken voor procesbewaking zijn voorbeelden van de methodologische ondersteuning die de statistiek biedt bij het nemen van routinematige beslissingen. De theorieën van het ontwerpen en analyseren van experimenten en methoden voor het toetsen van hypothesen zijn voorbeelden van ondersteuning bij empirisch onderzoek.

Naast de inhoudelijke ontwikkeling van statistiek – van het verzamelen van feiten tot het ontwikkelen van methoden en technieken voor het doen van onderzoek, zijn ook de toepassingsgebieden van de statistiek veranderd. De oorspronkelijke toepassingen van industriële statistiek lagen vooral in de kwaliteitscontrole. Moderne toepassingen liggen enerzijds in het ontwerpen, beheersen en verbeteren van bedrijfsprocessen (de huidige *buzzwords* zijn 'operations management' en 'operational excellence') en anderzijds in productontwikkeling, waar bijvoorbeeld bij het optimaliseren van ontwerpparameters of het bestuderen van de levensduur van producten veel methoden en technie-

ken uit de industriële statistiek worden gebruikt. Het toepassingsgebied is bovendien verruimd van alleen de productie-industrie naar de dienstverlenende industrie, de gezondheidszorg en de overheid. Methoden en technieken die ontwikkeld zijn in de automobieliindustrie voor het beheersen en betrouwbaar maken van fabricageprocessen worden nu, in aangepaste vorm, toegepast in ziekenhuizen. Experimentele technieken waarmee televisietoestellen werden geoptimaliseerd, worden nu toegepast door banken en verzekeraars om hun financiële diensten te optimaliseren.

Als vakgebied heeft industriële statistiek steeds meer overlappingsen en raakvlakken gekregen met dat andere vakgebied dat methoden en technieken voor het bedrijfsleven ontwerpt: *operations research en management science* en INFORMS (het Institute for Operations Research and the Management Sciences) begint de ASQ (de American Society for Quality) te verdringen van haar positie als belangrijkste vakvereniging.

Sommige onderwerpen zijn inmiddels grondig onderzocht; de theorieën van schatten en hypothesetoetsen, bijvoorbeeld, zijn volwassen geworden en verrijkt. Andere onderwerpen staan nog in de kinderschoenen, vooral die welke minder goed zijn te vangen in wiskundig redeneren. Ikzelf heb veel onderzoek gedaan naar exploratieve data-analyse en het proces van hypothesevorming.

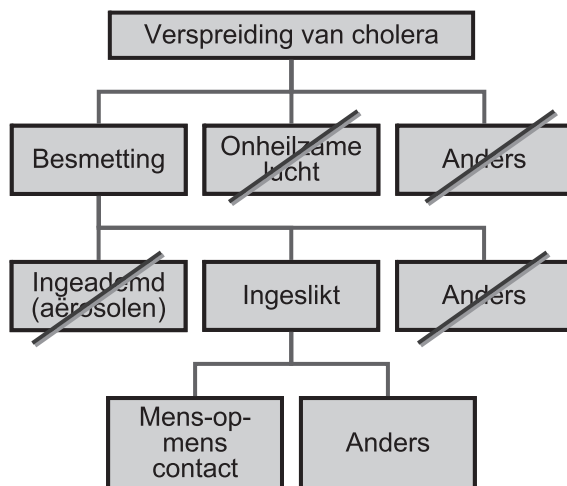
Met zijn *Grand Experiment* toetste Snow het vermoede verband tussen de drinkwatervoorziening en de verspreiding van cholera. Maar hoe kwam Snow überhaupt bij de hypothese dat de kwaliteit van het drinkwater hiermee verband hield? Op basis van zijn boek *On the Mode of Communication of Cholera* uit 1855¹ kom ik tot de conclusie dat zijn denkproces eruit kan hebben gezien als in Figuur 1 (p. 10). De figuur verbeeldt een zogenaamde *branch-and-prune*-strategie, een denkschema voor het vinden van de oorzaak van een probleem. Het diagram laat zien hoe de zoekruimte van causale verklaringen steeds wordt opgesplitst (*branch*), waarna de onderzoeker probeert om een aantal takken te elimineren opdat hij zijn zoektocht kan concentreren op één of slechts enkele takken (*prune*). Als praktiserend arts kon Snow vaak een cholera-besmetting traceren van de ene naar de andere persoon, en hij stelde vast dat cholera vanuit het Verre Oosten naar Europa was gemigreerd langs de routes en ongeveer met de snelheid van menselijk verkeer. Op basis daarvan concludeerde hij dat cholera wordt doorgegeven door besmetting van mens op mens. Verder observeerde hij dat de ziekte als eerste het spijsverteringskanaal aantast en niet de longen of het bloed. Daaruit leidde hij af dat de ziekteverwekker ingeslikt wordt en bijvoorbeeld niet ingeademd. Al met al begreep Snow dat de ziekteverwekker doorgegeven kan worden door direct menselijk contact. Maar Snow vermoedde dat er nog een ander mechanisme meespeelde, want

soms verspreidde de ziekte zich over afstanden en op een schaal die niet verklaard konden worden door een mechanisme gebaseerd op direct contact van mens op mens.

In 1854, gelijktijdig met het *Grand Experiment*, werd de Londense wijk Soho getroffen door een bijzonder felle uitbraak van cholera. Binnen tien dagen stierven hieraan vijfhonderd mensen. De onderzoekingen die Snow deed om de oorzaken van deze felle uitbraak te begrijpen, vind ik nog steeds indrukwekkend door hun methodologische virtuositeit.

Snow onderzocht de ontwikkeling van de epidemie door de tijd heen en zag dat de uitbraak heel plots en hevig was ontstaan in de laatste dagen van augustus 1854; door *branch-and-prune*-redeneren kon hij de zoekruimte beperken tot gebeurtenissen rond eind augustus. Daarnaast maakte Snow een kaart van Soho, waarop hij aangaf hoeveel slachtoffers er in ieder huishouden waren gevallen. De kaart liet een aantal saillante patronen zien. In de eerste plaats leken de slachtoffers zich te clusteren rond het midden van Broad Street. Maar vlak bij het epicentrum van het cluster lagen een fabriek en een brouwerij waarin onder de werknemers relatief weinig of zelfs geen slachtoffers waren gevallen. Enkele slachtoffers woonden duidelijk buiten de grenzen van het cluster. En weer ging Snow feiten verzamelen, met mensen praten en de situatie ter plaatse bekijken. In Soho hadden de huizen nog geen waterleidingen, maar haalden de inwoners hun water uit waterpompen op straat. In het epicentrum van het cluster, ongeveer op de hoek van Broad Street en Cambridge Street, stond zo'n pomp, en deze trok Snows aandacht. Snow kwam erachter dat de arbeiders in de fabriek en de brouwerij deze pomp niet gebruikten, omdat zij een eigen waterbron op het terrein hadden. Hij vernam dat slachtoffers buiten het cluster kinderen hadden die in de buurt van Broad Street naar school gingen. Sommige slachtoffers buiten het cluster bleken de smaak te prefereren van het water uit de pomp op Broad Street boven het water van dichterbij liggende pompen, en zij lieten hun bedienden dit water uit Broad Street halen. Samen met een lokale dominee reconstrueerde Snow wat er eind augustus gebeurd zou kunnen zijn. In het huis op Broad Street nr. 40, vlak naast de pomp, stierf eind augustus een kind aan cholera. De moeder spoelde de luiers uit en liet het water weglopen in een beerput. De uitbraak barstte de dag erna uit. Later werd de beerput opgegraven, en toen bleek dat hieruit water lekte in de bron waaruit de pomp haar water betrok. In een tijd waarin het verband tussen hygiëne en ziektes als cholera nog niet algemeen werd erkend, concludeerde Snow correct dat de ziekteverwekker een substantie is die zich verplaatst van het ene slachtoffer, via het drinkwatersysteem, naar een volgend slachtoffer en zich daar vermeerdt.

Er is een mythe dat John Snow de uitbraak stopte door eigenhandig de hendel van de pomp op Broad Street te verwijderen. Een feit is dat de stadsbestuurders, gespeend van Snows talent voor methodisch onderzoek en daarin ook niet opgeleid, Snows conclusies niet overnamen, maar in Snows kaart van Soho (en een soortgelijke kaart die zijzelf hadden samengesteld) juist bewijs zagen van de miasmatheorie.



Figuur 1. Reconstructie van Snows mogelijke denkproces: een *branch-and-prune* redenering

Ook dit soort detectivewerk, het methodisch zoeken naar de oorzaken van een probleem en aan de hand hiervan hypothesen vormen, is het domein van de industriële statistiek. In het bedrijfsleven hebben deze vormen van het aanpakken en oplossen van problemen onder namen als ‘six sigma’ en ‘statistical engineering’ de afgelopen decennia een grote vlucht genomen. John Snow gebruikte exploratieve data-analyse om de uitbraak in Soho te onderzoeken; de afgelopen jaren heb ik onderzoek gedaan om de doelen en werkende principes van exploratieve data-analyse expliciet te maken, opdat deze belangrijke toepassing van statistiek effectiever kan worden onderwezen aan studenten. John Snow gebruikte *branch-and-prune*-redeneren om de oorzaak van de uitbraak te vinden. Naast deze vorm van diagnostisch redeneren heb ik *symptomatic searches*, *proximate causes*, *syndrome driven pruning* en *funneling tactics* geïdentificeerd als denkstrategieën om tot een causale hypothese te komen.

Industriële statistiek heeft zich daarmee ontwikkeld van het verzamelen en tabuleren van feiten, via schema's voor inferentie op basis van gegevens, tot methoden en technieken voor het doen van onderzoek en het oplossen van problemen in het algemeen. Deze opvatting van de missie van het vak industriële statistiek is steeds uitgedragen door de in mijn ogen meest vooraanstaande wetenschapper in het vakgebied, George Box, die herhaaldelijk repte van 'statistics as a catalyst to learning by scientific method' (Box, 1999). Deze opvatting werd ook uitgedragen door een van de belangrijkste leerlingen van Box, namelijk Søren Bisgaard. Søren was degene die de leerstoel Industriële Statistiek voor mij bekleedde, tot zijn droevige overlijden in 2009. In zijn geest wil ik invulling geven aan de mij toevertrouwde leerstoel.

3. Competentie in het oplossen van problemen als onderdeel van professionaliteit

In industriële statistiek ontstaan ontwikkelingen en innovaties net zozeer in het veld als op de universiteiten. Sinds 1998 werk ik bij het Instituut voor Bedrijfs- en Industriële Statistiek (IBIS) van de UvA. IBIS is een zelfstandig adviesbureau (b.v.) dat volledig eigendom is van de UvA. Medewerkers van het instituut werken deels als adviseur in het bedrijfsleven, en deels als promovendus, onderzoeker of hoogleraar voor de universiteit. De revenuen uit het advieswerk zijn sinds de oprichting dermate substantieel dat de hele groep eruit kan worden gefinancierd, en daarbovenop nog een deel van de rest van de faculteit.

Als wetenschappelijk vakgebied is het belangrijk om na te denken over de wijze waarop je je kennis tot maximaal nut van de maatschappij kunt maken. De visie van mijn groep is dat de wetenschappelijke literatuur slechts één onderdeel is van de disseminatie van onze denkproducten. Advieswerk is een goede aanvulling daarop, omdat je als adviseur je kennis van methoden en technieken rechtstreeks inzet voor problemen waarmee klanten worstelen. Maar in onze visie is een van de belangrijkste peilers van het benutten van onze kennis het geven van onderwijs aan professionals in het bedrijfsleven. IBIS leidt jaarlijks honderden professionals op, variërend van ingenieurs en technologen, managers en beleidsmakers, tot verpleegkundigen en artsen. De door ons opgeleide professionals zetten de methoden en technieken van de industriële statistiek massaal in om betere producten te maken, de kosten van bedrijfsprocessen te minimaliseren, betrouwbaardere en veiliger processen te bewerkstelligen, en de dienstverlening te verbeteren.

Het advies- en opleidingswerk dat wij doen, is niet alleen een kanaal om onze kennis van nut te doen zijn voor de maatschappij, maar dient ook om de methoden en technieken die de wetenschap ontwikkelt uit te testen in de praktijk. Statistische methoden en technieken die niet aansluiten bij de doelen of de praktische beperkingen van de gebruiker en de context waarin die de methoden en technieken toepast, zijn slechte methoden en technieken, en behoeven meer onderzoek.

Op de High Tech Campus in Eindhoven leid ik productontwikkelaars op in het gebruik van statistische methoden en technieken voor productontwerp, met bijzondere nadruk op het ontwerpen van betrouwbare en duurzame producten (robuust en met een lange levensduur). Daarnaast werk ik veel voor banken, verzekeraars en andere dienstverleners, waarbij de nadruk ligt op operationele effectiviteit, dat wil zeggen, op de kwaliteit, snelheid, betrouwbaarheid, flexibiliteit en kostenefficiëntie van de bedrijfsprocessen. Tot slot werk ik veel voor de gezondheidszorg, en over die doelgroep wil ik in het bijzonder wat zeggen.

De toepassing van methoden uit de industriële statistiek heeft in de gezondheidszorg de afgelopen jaren een enorme vlucht genomen. Dat is ingegeven door de acute noodzaak om de kostenefficiëntie, betrouwbaarheid, veiligheid en tijdigheid van de zorg te verbeteren. Toch stuit het toepassen in de zorg van methoden en technieken die hun oorsprong hebben in de industrie op argwaan. De discussie in de populaire literatuur lijkt zich dan wel eens te fixeren op de vraag of patiënten en zorgprocessen lijken op auto's en de productie ervan. Ik zal u mijn visie op deze zaak vertellen. Het is de missie van de medische wetenschap om effectieve methoden te ontwikkelen voor diagnose en behandeling; het is niet op dat medisch-technische domein dat industriële statistiek een bijdrage levert. Daarnaast: in het denken over de waarde van zorgprocessen staat de mens centraal; het redeneren in termen van 'kwaliteit' en 'efficiëntie', waarin de industriële statistiek grossiert, dient altijd ten dienste te staan van dit menselijke waarde kader. De bijdrage van de industriële statistiek aan de zorg betreft de processen die de diagnose- en behandelmethode van de geneeskunde daadwerkelijk leveren aan de mensen die ze nodig hebben. Vanuit de medische en menselijke kant kan men vaststellen dat aan die processen veel te verbeteren valt op het gebied van kwaliteit, betrouwbaarheid, snelheid, flexibiliteit en kosten; maar het is het vakgebied industriële statistiek dat methodologische handvatten geeft om die verbeteringen daadwerkelijk te bewerkstelligen.

4. Industriële statistiek als wetenschap

Het voorgaande zou de indruk kunnen wekken dat ik weinig op heb met fundamenteel of theoretisch onderzoek. Het tegendeel is echter waar. Ik houd erg van theoretiseren en het uitdiepen van ideeën. In het hiernavolgende zal ik uiteenzetten in welke richting in mijn ogen het onderzoek en onderwijs in de industriële statistiek zich zouden moeten verbeteren. Dat impliceert een zekere kritiek op de huidige status quo, vooral op de dominantie van wiskunde in de industriële statistiek. Ik beoog met deze kritiek niet bestaande praktijken in diskrediet te brengen, maar wil collega's ermee laten zien dat er een weg is om het vakgebied meer impact te doen hebben.

Statistiek wordt in Nederland veelal ondergebracht bij het vakgebied wiskunde, als toepassing of specialisatie ervan. Ik ben van oorsprong wiskundige en overtuigd van het grote belang van wiskundig redeneren in de statistiek. Maar door statistiek te reduceren tot een onderdeel van de wiskunde, ontstaat denk ik een aantal gevaren voor zowel onderzoek als onderwijs. De grond van die gevaren is dat er twee kennisdomeinen zijn: enerzijds dat van de interne logica van statistische methoden en technieken, en anderzijds de logica van hun functionele toepassing bij het doen van empirisch onderzoek en het oplossen van problemen. Deze twee logica's zijn respectievelijk een wiskundig-deductieve en een teleologische, en zij zijn incompatibel.

Dat laatste zal ik uitleggen aan de hand van de volgende metafoor: een auto ziet er vanachter het stuur anders uit dan onder de motorkap.² Om te begrijpen hoe een auto intern werkt, onder de motorkap, heb je kennis nodig van de wetten van de mechanica en de elektronica. Maar om een auto functioneel te kunnen gebruiken, heb je een geheel ander domein van kennis nodig: kennis van de verkeersregels, motorische vaardigheden, kennis van de functie van de pedalen en van de betekenis van de indicatorlampjes op het dashboard. Dat kennisdomein van de functionele toepassing is niet op een zinvolle manier te reduceren tot of af te leiden uit de mechanica en elektronica die de interne werking van een auto beschrijven.³

Om goede auto's te kunnen ontwerpen, is kennis van de mechanica en elektronica alleen niet voldoende: de ontwerper moet daarenboven begrip hebben van de uitdagingen en beperkingen van het besturen van een auto. Uit de wetten van de mechanica en elektronica is niet te verklaren waarom een auto een stuur heeft. Om te begrijpen waarom er een stuur is, en waarom het een bepaalde vorm en plek heeft, heb je een teleologische verklaring nodig, dat wil zeggen een verklaring gebaseerd op een analyse van de doelen van de gebruiker en een vertaling ervan in functies en deelfuncties van de onderdelen van een auto. Vertaald naar onderzoek in de industriële statistiek wordt deze stel-

ling: Het ontwerpen van statistische methoden en technieken vergt niet alleen kennis van de wiskundige interne logica van statistiek, maar daarnaast intieme bekendheid met de praktijk van empirisch onderzoek en probleemoplossen, en de functies die statistische methoden en technieken daarin vervullen. Dit is een precair punt voor industriële statistiek; veel wiskundigen hebben geen eersthands ervaring met empirisch onderzoek. Een problematisch gevolg is dat statistische methoden en technieken vaak uitsluitend vanuit wiskundige criteria worden ontworpen, zoals wiskundige correctheid en optimaliteit. Dat zijn natuurlijk belangrijke criteria, maar er is meer nodig om methoden en technieken te ontwerpen die van nut zijn bij het doen van empirisch onderzoek en het oplossen van problemen.

Als industriële statistiek – in mijn opvatting – geen specialisatie of toepassing is van de wiskunde, in welke wetenschappelijke traditie is zij dan wel te plaatsen? Een definiërende karakteristiek van wetenschap is dat uitspraken duidelijke claims doen, en dat deze claims gerechtvaardigd worden met een onderbouwing. Naar de aard van de claims en de daartoe geëigende onderbouwing kun je formele, verklarende en technologische wetenschappen onderscheiden.⁴ Wiskunde is een formele wetenschap, die systemen van proposities afleidt van premissen en deze rechtvaardigt door een deductieve bewijsvoering. Formele wetenschappen zijn empirisch leeg: zij doen claims die logischerwijs geïmpliceerd worden door de premissen, zonder de validiteit van de premissen zelf te claimen. Natuurkunde en biologie zijn verklarende wetenschappen: zij ontwikkelen modellen en theorieën die empirische fenomenen beschrijven, verklaren en wellicht zelfs voorspellen. Het typische product van dit soort wetenschappen zijn causale wetten en wetmatigheden; de claim is dat deze *waar* (of in het geval van wetmatigheden: *reproduceerbaar*) zijn.

Ik pleit ervoor om industriële statistiek te beoefenen als een technologische wetenschap. Technologie verwijst naar de kennis over het ontwerpen en gebruiken van gereedschappen en technieken. In een ruime betekenis omvat dit niet alleen materiële gereedschappen en technieken, maar ook methoden, protocollen en heuristieken, en behoren tot de technologische disciplines niet alleen de werktuigbouwkunde, maar bijvoorbeeld ook de geneeskunde, die behandelprotocollen ontwerpt en kennis vergaart over de toepassing ervan om zieken te helen, en de organisatiekunde, die heuristieken en aanpakken ontwerpt om organisaties te veranderen en te verbeteren. De uiteindelijke missie van zulke wetenschappen is niet om de empirische wereld te begrijpen en te verklaren, maar om te weten hoe je kennis moet inzetten om gebruikers te helpen hun doelen te bereiken (zieken helen, organisaties verbeteren). De uiteindelijke claim van technologische kennis is niet *waarheid* of *logische correctheid*, maar *effectiviteit*.

Zulke vakgebieden worden nogal eens gezien als niet meer dan de toepassingsgebieden van de formele en verklarende wetenschappen; zo zou werktuigbouwkunde niet meer zijn dan toegepaste natuur- en wiskunde, geneeskunde niet meer dan bijvoorbeeld toegepaste biologie en biochemie, en het ontwerpen van statistische methoden en technieken niet meer dan toegepaste wiskunde. Herbert Simon (1996) heeft een belangrijke rol gespeeld bij de emancipatie van de technologievakken tot wetenschap, en hij maakte duidelijk dat het te eenvoudig is om ze te zien als louter de toegepaste tak van de formele en verklarende wetenschappen.⁵ Hoeveel wetten de ontwerper van auto's ook uit de mechanica en de elektronica kent, op basis van alleen die kennis zal hij geen auto kunnen ontwerpen.

Een belangrijk onderscheid met de formele en verklarende wetenschappen is dat de technologische wetenschappen niet uitgaan van wiskundige premissen (zoals de formele wetenschappen doen), of de empirische werkelijkheid (zoals in de verklarende wetenschappen), maar dat zij de doelen van de eindgebruiker als uitgangspunt nemen en deze doelen vertalen naar functies en functionele eisen. Een doel van de gebruiker van een auto kan zijn om van A naar B te komen. Dit doel brengt deelfuncties van auto's met zich mee, zoals de deelfunctie dat een auto bochten moet kunnen nemen. Een stuur maakt onderdeel uit van een effectieve realisatie van deze deelfunctie. Dit soort kennis heeft geen wiskundig-deductieve of causale, maar een teleologische rationale.

Concreet betekent deze opvatting dat industriële statistiek als technologische wetenschap methoden en technieken ontwerpt en kennis verzamelt over de toepassing ervan in empirisch onderzoek en het oplossen van problemen. Als uitgangspunt gelden niet wiskundige premissen, maar functionele eisen vanuit de toepassing. Geldigheidscriteria zijn bijvoorbeeld:

1. Relevantie: De beoogde toepassing van statistische methoden en technieken sluit aan op de onderzoeksvragen van gebruikers.
2. Principiële effectiviteit: Methoden en technieken bereiken bij correcte toepassing en binnen gespecificeerde randvoorwaarden hun beoogde doel.
3. Toepasbaarheid: Methoden en technieken hebben randvoorwaarden en aannames die aansluiten op de realiteit waarin de gebruiker ze toepast, en hebben een operationele vorm waarmee de gebruiker uit de voeten kan.

Door uitsluitend te werken vanuit wiskundige criteria raken in het bijzonder de punten 1 en 3 buiten beeld, maar zelfs het tweede criterium moet niet beperkt worden tot wiskunde, omdat met name van meer heuristische methoden en technieken voor het oplossen van problemen de effectiviteit door andere rationales dan wiskundige gestaafd moet worden.

Ik zal kort statistische toetsen voor normaliteit bespreken als voorbeeld van de problemen die ontstaan als onderzoek in de industriële statistiek wordt gereduceerd tot wiskunde. De beoogde toepassing van zulke technieken bestaat uit het toetsen of een dataset kan worden opgevat als een realisatie van de normale verdeling. De meeste statistische normaliteitstoetsen geven een zwart-wit antwoord: een p -waarde geeft aan of normaliteit al dan niet moet worden verworpen. Nu is de hypothese van normaliteit in de praktijk in veel gevallen al op a priori gronden onhoudbaar. De werkelijke vraag van de onderzoeker is of de normale verdeling een bruikbare benadering geeft van de zich voordoende situatie; dat is niet een zwart-wit vraag maar een graduele. En indien de normale benadering niet redelijk is, dan is het belangrijk voor de onderzoeker om indicaties te krijgen van de aard van de afwijking: gaat het om één of enkele incidentele afwijkingen, zijn er aanwijzingen dat de data uit meer dan één populatie komen, of moet naar een geheel andere verdeling worden gezocht? De zwart-wit antwoorden die veel normaliteitstoetsen geven, sluiten daarom vaak niet goed aan bij de onderzoeksvragen van de gebruiker.⁶

Wiskundig redeneren is daarmee erg belangrijk in de industriële statistiek, maar in mijn visie slechts één van de peilers van een wetenschappelijke beoefening van het vak. Vooral de criteria die te maken hebben met de punten 1 en 3 kunnen niet worden behandeld vanuit de wiskunde, maar vragen van statistici dat zij de toepassingscontext verkennen en begrijpen. Met deze opvatting denk ik aan te sluiten bij een recente beweging in mijn vakgebied, geleid door Ron Snee en Roger Hoerl (2010), die een beroep doen op de vakgenoten om het vak minder te benaderen als wiskunde en meer als een *engineering science*. Ook buiten de industriële statistiek spreken gerenommeerde statistici als Huber en Efron over de ‘overmathematization of statistics’.⁷ Het belang van het verkennen en begrijpen van de toepassingscontext van statistische methoden en technieken was een van de uitgangspunten bij de oprichting van het *European Network for Business and Industrial Statistics* (ENBIS), waarbij ik nauw betrokken ben geweest.

5. Rijles en onderwijs in de industriële statistiek

De incompatibiliteit tussen de interne wiskundige rationale van statistiek enerzijds, en de rationale van de functionele toepassing ervan in empirisch onderzoek anderzijds, heeft ook consequenties voor onderwijs. Teruggrijpend op de geïntroduceerde metafoor: het beperken van statistiekonderwijs tot wiskunde is als het beperken van rijlessen tot het geven van onderricht in mechanica en elektronica. Kennis van de mechanica en elektronica onder de motorkap ma-

ken niet dat je een auto goed kan besturen, en evenzo geldt: statistiekonderwijs dat beperkt wordt tot wiskunde faalt erin studenten te leren hoe je statistische methoden en technieken toepast bij empirisch onderzoek.

Om u het gevaar daarvan te doen voelen, wil ik u het volgende, waargebeurde verhaal vertellen. In een college aan derdejaars studenten mathematische statistiek heb ik ooit een experiment uitgevoerd, waarvan de studenten de resultaten moesten analyseren met de bekende t -toets van Student. Dat ging goed, sterker nog: de studenten konden de toetsingsgrootte met de hand uitrekenen, en we hebben enige tijd gesproken over een wiskundige eigenschap van de t -toets, namelijk of hij al dan niet *uniformly most powerful* is. Ook op mijn vraag 'Zijn er nog aannames die we moeten onderzoeken?' kwam al snel een correct antwoord: 'De data moeten uit een normale verdeling komen.' Op mijn vervolgvraag: 'Hoe verifiëren we dat?' was het eerst stil. Daarna kwam het amusante, maar ook verontrustende antwoord: 'Is dat niet gewoon gegeven ...?'

Als IBIS leiden wij honderden professionals per jaar op in het gebruiken van statistische methoden en technieken op een redelijk geavanceerd niveau. Cursisten leren statistische methoden en technieken toe te passen in het inductieve proces van empirisch onderzoek. Zij leren de functie van de verschillende statistische methoden hierin en zij leren de resultaten en *goodness-of-fit*-indicaties te interpreteren. Maar zij leren vooral veel meer dan statistische methoden en technieken alleen; zij leren een probleem te structureren en in deelproblemen uiteen te rafelen; zij leren problemen operationeel te definiëren en meetbaar te maken; zij leren een onderzoeksplan te maken; zij leren causaal te redeneren en een diagnose te stellen; zij leren de betrouwbaarheid en de validiteit van conclusies in te schatten; zij leren de statistische resultaten te vertalen naar conclusies in de terminologie en in het waardesysteem van de bedrijfseconomische context. Goed deductief leren redeneren, is een onderdeel van deze vaardigheden, maar de nadruk ligt meer op het aanbieden en leren werken met een groot aantal standaard denkschema's die de gebruikers ervan helpen om een problematische situatie te structureren en te herleiden tot de vorm van een bekend, stereotyp probleem met een bekend oplosschema. Opdat studenten deze denkschema's oppakken, is het van belang dat zij in hun opleiding worden uitgedaagd te worstelen met realistische, situationele vraagstukken. Van gestileerde en steriele sommen leren studenten in mijn ogen niet de vaardigheden die zij voor de toepassing van statistische methoden en technieken nodig hebben. Net als voor onderzoek, geldt naar mijn mening dat het voor het geven van goed onderwijs in industriële statistiek noodzakelijk is de toepassingscontext goed te kennen.

Onderricht voor monteurs en ontwerpers van auto's moet verdergaan dan onderwijs voor de gewone gebruiker. Als in een auto een technisch probleem ontstaat, dan is kennis van de mechanica en elektronica noodzakelijk. De meeste gebruikers zullen dan de hulp inroepen van een monteur. In de opleiding van monteurs moet daarom wel degelijk de mechanica en elektronica aan bod komen, en dat geldt natuurlijk ook voor de opleiding van auto-ontwerpers. Net zo zal de gewone gebruiker van statistische methoden en technieken bij technische problemen de hulp inroepen van een statistische expert. De opleiding van statistische experts zal wiskunde als ruggengraat moeten hebben, maar ik pleit ervoor om studenten statistiek daarnaast ook ervaring mee te geven in empirisch onderzoek en het oplossen van problemen, opdat zij de toepassingscontext van hun vak goed begrijpen.

Een obstakel bij dat streven is dat het leren toepassen van statistiek in empirisch onderzoek wel eens wordt gezien als een mindere intellectuele prestatie dan het leren van esoterische wiskunde, en als geschikter voor een hbo- dan voor een universitaire opleiding. Nu denk ik dat het waar is dat problemen uit de zuivere wiskunde abstracter zijn dan alledaagse problemen, wat ze moeilijker maakt. Daar staat tegenover dat problemen uit de zuivere wiskunde vaak erg goed gestructureerd zijn (het doel is duidelijk, de uitgangssituatie is duidelijk en het soort bewerkingen dat in aanmerking komt is duidelijk). Problemen in de praktijk zijn doorgaans veel minder gestructureerd: vaak is er sprake van een kluwen van problemen waarvan de afbakening en doelen onduidelijk zijn, of is het niet makkelijk een werkbare representatie van het probleem te vinden, of is het geheel onduidelijk om wat voor soort taak het eigenlijk gaat. Zulke ongestructureerde problemen vergen veel van de intellectuele capaciteiten van de oplosser, wat ze bij uitstek geschikt maakt voor universitair onderwijs.

6. *De name of the game*

Het vak statistiek benoemen als 'de staat betreffend' dekt allang niet meer de lading, en ook industriële statistiek louter zien als het verzamelen van feiten en cijfers, als een vakgebied dat probabilistische modellen voor inferentie levert en als toegepaste wiskunde ten behoeve van data-analyse, doet er geen recht aan. Bovendien zijn de toepassingen van de industriële statistiek nog slechts voor een deel in de industrie. Kortom, industriële statistiek, *What's in a name?*

Zoals ik u begon te vertellen, is in mijn ogen industriële statistiek iets anders dan toegepaste wiskunde, namelijk een methodologie voor empirisch onderzoek en voor het oplossen van problemen. Voor professionals is het, zoals gezegd, van steeds groter belang om hiervan kennis te hebben. Ik wil u aan het

einde van deze rede vertellen welke concrete invullingen van die visie ik voor de komende tijd voorzie.

In 2009 is IBIS overgegaan van de faculteit der Natuurwetenschappen, Wetenschap en Informatica naar de faculteit Economie en Bedrijfskunde. Wij voelen ons in de huidige omgeving op onze plek. In het onderwijs hebben wij aansluiting gevonden in de toepassingen van ons vakgebied in de *Process and Operations Management*, en dit jaar gaan we een vak onder die titel geven in de MBA-opleidingen en in het reguliere onderwijs. Dit vak gaat over het ontwerpen, beheersen en verbeteren van de primaire voortbrengende processen in organisaties, en om die reden verdient het een prominente plaats in de bedrijfskundeopleiding. Het curriculum neemt bedrijfsstrategieën als vertrekpunt en laat zien hoe je van daaruit een strategie voor de operatie ontwerpt, en welke methoden en technieken nodig zijn om daar handen en voeten aan te geven.

De disseminatie via het adviesbureau IBIS blijft doorgaan en de vraag naar onze diensten blijft groot. Wij werken nog steeds voor zakelijke dienstverleners, maar het zwaartepunt lag de laatste jaren in de gezondheidszorg en de productontwikkeling van de hightechindustrie. Professionals die door ons zijn opgeleid, kunnen een universiteitsdiploma behalen tot de titel van *lean six sigma blackbelt* of *greenbelt*, mits zij slagen voor een theorie-examen en twee praktijkopdrachten. Honderden professionals per jaar doen inmiddels aan deze examens mee.

Op onderzoeksgebied wil ik de synergie – die enerzijds ontstaat door de samenwerking met andere onderzoeksgroepen en anderzijds door de vele interessante casussen die ik in het veld tegenkom – verder en grootschaliger gaan uitnuttigen. Een onderzoekslijn die de afgelopen jaren internationaal op de kaart is komen te staan, is de statistische evaluatie van de betrouwbaarheid van meetsystemen, inspecties en testmethoden.⁸ Dit onderwerp is zeer uitgebreid onderzocht in de medische en psychometrische wereld en blijkt weerbarstig te zijn. In de praktijk is gebleken dat het soort aselechte steekproeven dat nodig is voor zulke studies moeilijk te realiseren is en dat premissen betreffende *exchangeability* en conditionele onafhankelijkheid op ingewikkelde manieren geschonden worden. Voor veel standaardsituaties is daardoor nog steeds geen goede methode voorhanden, terwijl de alomtegenwoordigheid van meet- en testmethoden in de industrie en industriële standaards voor kwaliteitscontrole het bestuderen en beheersen van de betrouwbaarheid van metingen en testresultaten erg noodzakelijk maken.

De casus van John Snows ontdekking van het verspreidingsmechanisme van cholera is een voorbeeld van diagnostische probleemoplossing. Ik beschik over veel van zulke casussen in de industrie en in het bedrijfsleven, waarbij profes-

sionals door goed detectivewerk de oorzaken hebben achterhaald van problemen met producten of processen. Op basis van zulke casestudy's enerzijds, en conceptuele modellen uit de kunstmatige intelligentie, medische diagnostiek en andere wetenschappelijke disciplines anderzijds, zijn we inmiddels ver gekomen met het ontwerpen van methodologische ondersteuning voor het diagnosticeren en oplossen van problemen in bedrijfsprocessen, en het begrijpen van de rol van statistische methoden en technieken daarin.⁹ De komende jaren wil ik de theorieën die in de afgelopen jaren zijn ontwikkeld grootschalig blootstellen aan toepassing in het veld en aan gecontroleerde experimenten met gesimuleerde probleemsituaties.

Het benutten van onze ervaringen in het veld en de theoretische inzichten in verwante wetenschappelijke disciplines zullen ook de basis blijven vormen voor het onderzoek van onze groep naar *six sigma* en *lean six sigma*.¹⁰ Deze methodologieën hebben zich ontwikkeld tot de wereldstandaarden voor het ontwerpen, beheersen en verbeteren van bedrijfsprocessen. Zij integreren statistische en niet-statistische methoden en technieken met onderzoeksstrategieën en project- en programmamanagementstructuren tot een integraal model. Zij bieden een raamwerk waarbinnen substantiële aantallen professionals bekend zijn geraakt met statistische methoden en technieken.

7. Tot slot: erkenning en dank

Een leidend principe in mijn professionele leven is dat je regelmatig bezig moet zijn met de vraag: 'Voeg ik voldoende waarde toe in de ogen van mijn klant?' Om die reden richt ik mij allereerst tot de klanten van IBIS en de gebruikers van dat wat op mijn vakgebied wordt uitgedacht. De belangrijke rol die de klanten van mijn advieswerk in mijn wetenschappelijke werk spelen, heb ik al uitgebreid besproken. Maar daarnaast heb ik met veel klanten een langdurige persoonlijke relatie, die ik plezierig en waardevol vind; dank.

Al dertien jaar werk ik als promovendus, medewerker en collega-hoogleraar samen met Ronald Does. Ronald is mijn leermeester en degene die mij enthousiast maakte voor deze carrière en de mogelijkheid schiep en mij de ruimte gaf om mijn carrière vorm te geven zoals ik heb gedaan. Ronald en ik hebben sterk verschillende persoonlijkheden en talenten. Vanaf het begin hebben wij de verschillen tussen ons erg gewaardeerd en er wederzijds ons voordeel mee gedaan. De dynamiek tussen complementaire persoonlijkheden en talenten is spannend, en steeds een drijvende kracht geweest achter het succes van IBIS. Aan Ronalds steun ben ik een groot deel van mijn ontwikkeling tot hoogleraar verschuldigd.

Søren Bisgaard is de vorige leerstoelhouder, en zijn overlijden in 2009 betreuren wij erg. Ons instituut dankt aan hem ons goede internationale netwerk. Daarnaast zijn Søren en zijn weduwe Sue Ellen bijzondere en sympathieke mensen, van wier avontuurlijke ideeënwereld wij hebben genoten. Søren kennende, denk ik dat grote delen van mijn verhandeling hem uit het hart gegrepen zouden zijn, en ik ben er trots op dat ik als nieuwe leerstoelhouder in zijn geest verderga.

Bij IBIS heb ik in de afgelopen dertien jaar met een grote diversiteit aan collega's samengewerkt. Zij hebben mij geïnspireerd, bij de les gehouden en met mij spannende opdrachten uitgevoerd bij klanten. Ik noem allereerst mijn copromotor, Kit Roes, en daarnaast mijn huidige collega's Atie, Marit, Benjamin en Tashi.

Ik denk dat de manier waarop ik invulling wil geven aan mijn vak het beste tot haar recht komt bij de faculteit Economie en Bedrijfskunde, maar dat laat niet onverlet dat ik met plezier en waardering terugkijk op mijn tijd bij het Korteweg-De Vries Instituut voor Wiskunde en mijn collega's aldaar.

Mijn familie en vrienden delen met mij de andere kant van mijn leven, die kant waar het niet gaat om methoden en technieken; dank jullie wel dat jullie er zijn.

Ten slotte wil ik, nadat ik zojuist mijn commerciële klanten heb bedankt, ook die andere belangrijke klant bedanken. Ik ben de leiding van de faculteit Economie en Bedrijfskunde en het College van Bestuur van de UvA erkentelijk voor de ruimte die zij mij bieden, en ik ben sterk gemotiveerd om er iets moois van te maken.

Ik heb gezegd.

Noten

1. Snow (1855).
2. Ik moet deze uitspraak aannemen op autoriteit van anderen; een rijbewijs heb ik namelijk niet.
3. Dit is een belangrijk inzicht uit de systeemtheorie. De interne werking van door de mens gemaakte artefacten, zoals auto's, kan typisch begrepen worden door causale verklaringen, zoals die van de mechanica en elektronica. Maar het functioneel toepassen van die artefacten, bijvoorbeeld het besturen van een auto, moet worden verstaan in teleologische termen als 'doel' en 'functie', omdat het in eerste instantie niet wordt bepaald door de causaliteit van de interne mechanieken, maar door het zelfregulerende en adaptieve gedrag van het systeem dat gevormd wordt door het artefact en de gebruiker. Zie Simon (1996).
4. Varianten van dit raamwerk zijn: formele, verklarende en ontwerpwetenschappen (Van Aken, 2004) en formele logica, natuurwetenschap en techniek (Roozenburg en Eekels, 1995).
5. Zie bijvoorbeeld ook Rosenberg (1982) of Van Aken (2004).
6. Grafische technieken, zoals P - P - en Q - Q -plots, sluiten in mijn ogen veel beter aan bij de functionele eisen van empirisch onderzoek.
7. Zie de discussie naar aanleiding van een artikel van Mallows in *Technometrics* (2006).
8. Zie bijvoorbeeld De Mast en Van Wieringen (2010) en De Mast, Erdmann en Van Wieringen (2011).
9. Zie bijvoorbeeld De Mast en Trip (2007) en De Mast (2011).
10. Zie bijvoorbeeld De Koning en De Mast (2006).

Referenties

- Box GEP (1999), 'Statistics as a catalyst to learning by scientific method – Part II: A discussion' *Journal of Quality Technology* 31(1), 16-29
- De Koning H, De Mast J (2006), 'A rational reconstruction of Six Sigma's Breakthrough Cookbook', *International Journal of Quality and Reliability Management* 23(7), 766-787
- De Mast J (2011), 'The tactical use of constraints and structure in diagnostic problem solving', *Omega* 39(6), 702-709
- De Mast J, Erdmann T, Van Wieringen WN (2011), 'Measurement system analysis for binary inspection: Continuous versus dichotomous measurands', *Journal of Quality Technology* 43(2), 99-112
- De Mast J, Trip A (2007), 'Exploratory data analysis in quality improvement projects', *Journal of Quality Technology* 39(4), 301-311
- De Mast J, Van Wieringen WN (2010), 'Modeling and evaluating repeatability and reproducibility of ordinal classifications', *Technometrics* 52(1), 94-106
- Mallows C (2006), 'Tukey's paper after 40 years', *Technometrics* 48(3), 319-325
- Roozenburg N, Eekels J (1995), *Product Design: Fundamentals and Methods*, John Wiley & Sons
- Rosenberg N (1982), *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge University Press
- Simon HA (1996), *The Sciences of the Artificial* (derde druk), MIT Press
- Snee R, Hoerl R (2010), 'Statistical thinking and methods in quality improvement: A look to the future', *Quality Engineering* 22(2), 119-129
- Snow J (1855), *On the Mode of Communication of Cholera* (tweede druk), John Churchill
- Van Aken J (2004), 'Management research based on the paradigm of the design sciences: The quest for field-tested and grounded technological rules', *Journal of Management Studies* 41(2), 219-246
- Vinten-Johansen P, Brody H, Paneth N, Rachman S, Rip MR (2003), *Cholera, Chloroform, and the Science of Medicine: A Life of John Snow*, Oxford University Press