

De transformatie faktor : een maat voor het produktieve gedrag van een produktieproces

Citation for published version (APA):

Ron, de, A. J. (1992). *De transformatie faktor : een maat voor het produktieve gedrag van een produktieproces*. (TU Eindhoven. TUE/BDK/FT, Fac. TBDK, Vakgroep FT : rapporten; Vol. 9204). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**De Transformatie Faktor:
een maat voor het produktieve gedrag
van een produktieproces**

Ir. A.J.de Ron

Rapport TUE/Bdk/FT/9204



Vakgroep Fabricagetechnologie



**DE TRANSFORMATIE FAKTOR:
EEN MAAT VOOR HET PRODUKTIEVE GEDRAG VAN EEN PRODUKTIEPROCES**

Ir. A.J.de Ron
Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit Technische Bedrijfskunde
Vakgroep Fabricagetechnologie
Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Samenvatting

Door gebruik te maken van geavanceerde produktieprocessen zullen de produktieresultaten kunnen toenemen. Toch zijn er twijfels om in dergelijke processen te investeren vanwege de financiële risico's, mede door het ontbreken van technische en economische kengetallen, die een dergelijke beslissing zouden moeten ondersteunen. Maar kengetallen die de voordelen van geavanceerde processen, zoals kwaliteit en flexibiliteit, bevatten, zijn nog niet ontwikkeld.

Op grond van de massabalans is een technisch kengetal afgeleid, de transformatie faktor, waarmee het produktieve gedrag van een produktieproces weergegeven kan worden. Aan de hand van praktijkwaarden alsook waarden van simulaties wordt de praktische bruikbaarheid van de transformatie faktor als kengetal voor zowel het vergelijken van ontwerp alternatieven, als het beheersen van een produktieproces, aangetoond.

Door middel van een kostenfunctie wordt de invloed van de transformatie faktor op de kosten aangegeven. Aangetoond wordt, dat een toenemende automatisering niet altijd tot een kostenverlaging leidt. Het blijkt, dat er een optimale waarde van de transformatie faktor bestaat, waarbij de kosten minimaal zijn.

1. Inleiding

De beslissing om in geavanceerde produktieprocessen te investeren is, ondanks de grote potentie die deze processen hebben om tot een aanzienlijke produktiviteitsverbetering te komen, dikwijls niet gemakkelijk te nemen vanwege de grote financiële risico's. Daar komt bij, dat er tot nu toe indicatoren ontbreken die een dergelijke beslissing zouden kunnen onderbouwen. Immers, de met geavanceerde produktieprocessen gepaard gaande verbeteringen van de flexibiliteit en de kwaliteit komen in de gangbare indicatoren niet tot uiting. Een goed gefundeerd kengetal geeft niet alleen een ondersteuning bij investeringsbeslissingen, maar kan tevens gebruikt worden bij het vergelijken van ontwerp-alternatieven en voor het beheersen van een proces. Onder een proces wordt dan verstaan het object, de technische installatie of de machine die beschouwd wordt.

In de literatuur zijn publicaties te vinden die een geïntegreerde waarde toekennen aan een combinatie van de (totale) produktiviteit, de kwaliteit en de flexibiliteit van een geavanceerd produktieproces (FMS,CIM), Son (1987), Son & Park (1988) en Son (1990). Een dergelijk concept is echter fundamenteel onjuist. Niet alleen worden dan de kwaliteit en flexibiliteit in kosten uitgedrukt, hetgeen leidt tot het vergelijken van 'appels met peren', maar ook wordt daarmee een economisch kengetal gehanteerd, terwijl gedrag, kwaliteit en flexibiliteit technische grootheden zijn. Het ligt daarom veel meer

voor de hand om een technisch kengetal te gebruiken, welke eventueel, via weegfactoren in de vorm van kosten, in een economisch kengetal uitgedrukt zou kunnen worden. Overigens menen wij dat het concept van de totale produktiviteit eveneens onjuist gehanteerd wordt, hetgeen in het vervolg zal worden aangegeven.

2. Enige kengetallen

Zo veel publikaties er over produktiviteit geschreven zijn, zo weinig publikaties zijn er te vinden op het gebied van kengetallen die het proces-gedrag weergeven.

Barbiroli (1992) introduceert het begrip 'real machine capability', welke een maat is voor de actuele produktiecapaciteit van een machine met het oog op verliezen t.g.v. stilstand, gereduceerde produktiestroom en defecten, hetgeen resulteert in:

$$MC = \frac{T_c}{T} \cdot (Q - Q_s) \quad (1)$$

waarin:

MC = machine capability

T_c = theoretische doorlooptijd

T = operationele tijd van de machine

Q = geproduceerde hoeveelheid

Q_s = afgekeurde hoeveelheid

Het nadeel van voorgaande omschrijving is, dat het gerelateerd wordt aan de operationele tijd van de machine en niet aan de beschouwde tijdsperiode. Verder hangt de geproduceerde hoeveelheid af van de snelheid van de machine, hetgeen een vergelijking met andere, soortgelijke, machines onmogelijk maakt.

Florentin en Omachonu (1991) definiëren drie indicatoren, t.w. de machine efficiëntie (ME), het machine gebruik (MU) en de machine produktiviteit (MP):

$$ME = \frac{\text{actuele uitgang}}{\text{theoretische (verwachte) uitgang}} \cdot 100\% \quad (2)$$

waarin de theoretische uitgang bepaald wordt door het produkt van de machinesnelheid en de operationele tijd van de machine.

$$MU = \frac{\text{gebruikte tijdsduur}}{\text{totale tijdsduur}} \cdot 100\% \quad (3)$$

waarin de gebruikte tijdsduur de tijdsduur is waarin de machine gebruikt wordt.

$$MP = ME \cdot MU \quad (4)$$

Bovenstaande definities hebben een groot aantal nadelen. Zo hangt de machine-efficiëntie af van de machinesnelheid waardoor het geen maat is voor hetgeen met de machine haalbaar is. Overigens is ook de keuze van het woord efficiëntie voor iets wat op de uitgang betrekking heeft zeer ongelukkig aangezien het begrip efficiëntie gedefinieerd is voor relaties aan de ingang van het proces (In 't Veld, 1988). Tenslotte is de gegeven definitie van de machine produktiviteit totaal afwijkend met de gangbare definities voor de produktiviteit, t.w. de verhouding tussen de resultaten (uitgangen) en de offers (ingangen).

Zijn de genoemde indicatoren technisch van aard, een economisch kengetal is de produktiviteit. Het begrip produktiviteit wordt op diverse niveaus toegepast: op internationaal, nationaal, bedrijfstak en bedrijfsniveau. Meestal wordt met de produktiviteit de arbeidsproduktiviteit bedoeld, maar de produktiviteit omvat meer, aangezien deze gedefinieerd wordt als de verhouding tussen het resultaat (uitgang) en de offers (ingangen). Craig en Harris (1972) definiëren drie typen van produktiviteit, t.w.:

- * **partieel:** de verhouding tussen de uitgang in geldswaarde en één ingang (b.v. arbeidskosten of kapitaalkosten)
- * **"total factor":** de verhouding tussen de uitgang in geldswaarde en de som van twee ingangen, nl. de arbeidskosten en de kapitaalkosten
- * **totaal:** de verhouding tussen de uitgang in geldswaarde en de som van alle ingangen (arbeidskosten, kapitaalkosten, grondstofkosten en overheadkosten).

In de praktijk treden er moeilijkheden op bij het gebruik van de produktiviteit; zo geeft o.m. de toekenning van de kosten problemen, evenals de bepaling van de uitgang in geldswaarde. Betreffende de definitie van het begrip produktiviteit schrijft Bekker (1988): "... de verhouding tussen de in geldswaarde omgerekende in- en output is niet de produktiviteit, maar een faktor waarin de winstgevendheid zit". Daar de produktiviteit niet een kengetal is dat het economisch gedrag van een geavanceerd produktieproces juist weergeeft, mede omdat de kwaliteit en flexibiliteit niet beschouwd worden, heeft Son (1987) een methode beschreven waarin deze invloeden wel verwerkt worden, zoals weergegeven in figuur 1.

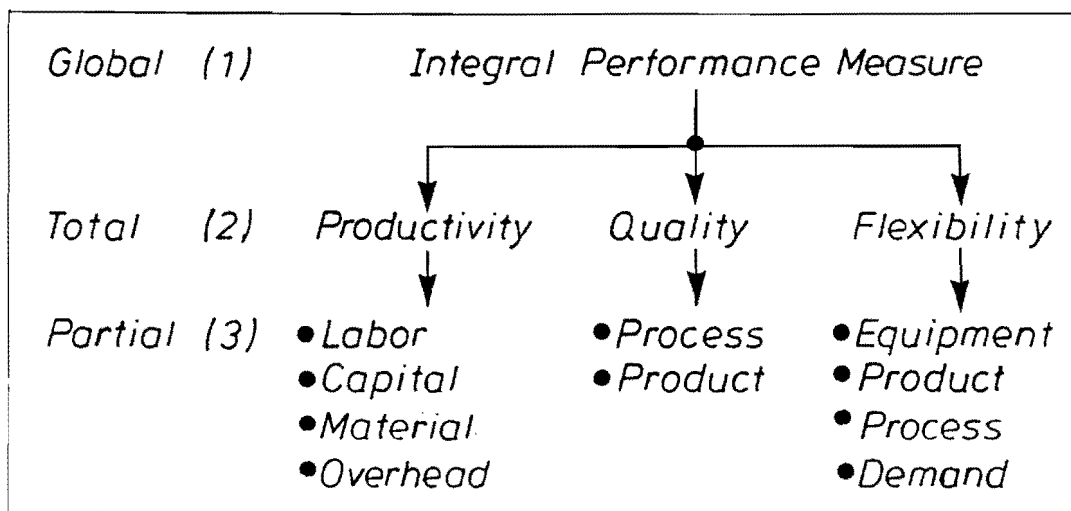


Fig. 1: De kwaliteit en flexibiliteit zijn gelijkwaardig aan de produktiviteit.

Son beschouwt de kosten van kwaliteit en flexibiliteit (grotendeels opportuiniteitskosten) en definieert dan:

- * totale kwaliteit: de verhouding tussen de uitgang in geldswaarde en de som van de proces- en produkt kwaliteitskosten
- * totale flexibiliteit: de verhouding tussen de uitgang in geldswaarde en de som van de machine-, produkt-, proces- en vraag flexibiliteitskosten.

De totale produktiviteit (PT), kwaliteit (QT) en flexibiliteit (FT) worden dan omgezet in één kengetal, de "Integral Manufacturing Performance" (IMP), volgens:

$$\frac{1}{IMP} = \frac{1}{PT} + \frac{1}{QT} + \frac{1}{FT} \quad (5)$$

De kritische woorden van Bekker, zoals die met betrekking tot de produktiviteit zijn aangehaald, gelden eveneens voor de IMP. Verder ontbreekt bij Son enige onderbouwing voor de juistheid van vergelijking (5).

In de praktijk leidt de methode van Son tot onjuiste gevolgtrekkingen. Neem het volgende, in de praktijk opgedane, geval:

- uitgang tegen geldswaarde	= 139 Mfl
- de som van kapitaal-, arbeids-, grondstoffen- en overheadkosten	= 103 Mfl
- totale flexibiliteitskosten	= 44 Mfl
- totale kwaliteitskosten	= 0,84 Mfl

Voor de kengetallen geldt dan:

$$\begin{aligned} PT &= 1,35 \\ QT &= 165 & IMP &= 0,94 \\ FT &= 3,15 \end{aligned}$$

De verhouding van de verandering van de IMP door een verandering van één van de kengetallen, geeft dan de grootte van de invloed van dat kengetal op de IMP weer (gevoeligheid). Deze zijn:

$$\frac{\delta IMP}{\delta PT} = 0,48 \quad \frac{\delta IMP}{\delta QT} = 0,00 \quad \frac{\delta IMP}{\delta FT} = 0,09$$

Er volgt uit, dat verbeteren van de kwaliteit (vermindere van de kwaliteitskosten) geen enkele zin heeft, en dat verbeteren van de flexibiliteit nauwelijks zin heeft. Toch vormen de flexibiliteitskosten ca. 30% van de totale kosten, waardoor een vermindering van deze flexibiliteitskosten zeker tot een beter resultaat zal leiden!

De IMP moet daarom afgeraden worden om als kengetal gebruikt te worden voor het vergelijken van processen en ter ondersteuning van beslissingen.

De voorgaande beschouwingen over enkele bestaande kengetallen geven aan, dat er behoefte bestaat aan tenminste twee kengetallen, welke de invloed van kwaliteit en flexibiliteit bevatten, en wel:

- * een kengetal dat het technische produktieve gedrag van een produktieproces weergeeft, waarmee de technische prestatie vergeleken en beheerst kan worden
- * een kengetal dat het economische produktieve gedrag van een produktieproces weergeeft, waarmee de economische prestatie vergeleken en beheerst kan worden.

3. De Transformatie Faktor (TF)

Om tot zinvolle kengetallen te komen, gaan we eerst na wat onder een technisch productieproces verstaan wordt.

Bekker (1988) geeft de volgende beschrijving: "een verzameling enkelvoudige, parallel- en/of sequentieel- geschakelde transformatieprocessen, welke..... gericht (zijn) op het maken van ... industriële produkten".

Boer en Krabbendam (1989) geven de volgende omschrijving: "transformeert ingangen naar gewenste uitgangen", terwijl Propst (1989) zegt: "transformeert ingangen naar meer waardevolle uitgangen".

Belangrijke termen in deze omschrijvingen zijn: transformatieproces, gewenste uitgangen, meer waardevolle uitgangen.

Wij zullen de volgende omschrijving hanteren: een technisch productiesysteem is een transformatieproces waarbij tenminste één van de uitgangen gewenst is en tevens een toegevoegde waarde bezit t.o.v. de ingangen.

Immers, tenminste één van de uitgangen dient de (gewenste) produktenstroom te zijn, en deze produkten dienen een meerwaarde te hebben t.o.v. de ingangen (o.m. de grondstoffen en/of afzonderlijke componenten).

Met de gegeven omschrijving van een productieproces, kunnen we dan stellen (Propst, 1989):

- een proces dat materialen transformeert naar meer waardevolle produkten, voegt alleen waarde toe aan de materialen en NIET aan machines, mensen, methoden of omgeving.
- aan machines, mensen, methoden en omgeving wordt alleen waarde toegevoegd als het ingangssignalen zijn die getransformeerd worden.

Zo vormen bij een verkooptraining de mensen de ingang van het systeem aangezien hieraan een meerwaarde toegekend wordt.

Deze systeembeschrijving wijkt geheel af van het produktiviteitsconcept, waarbij immers zowel de materialen in de vorm van de materiaalkosten, als de machines in de vorm van de kapitaalkosten, als de mensen in de vorm van arbeidskosten, als de methoden en omgeving in de vorm van overheadkosten als ingangssignalen worden beschouwd, zie figuur 2.

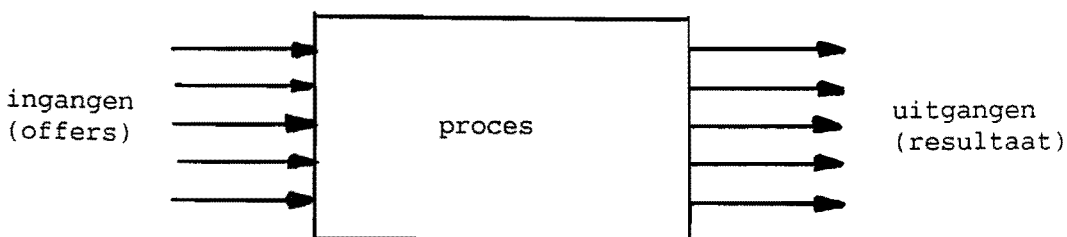


Fig.2: Voorstelling van een proces volgens het produktiviteitsconcept.

De gegeven omschrijving geeft aan dat het fundamenteel onjuist is om machines, mensen, methoden en omgeving als ingangssignalen te gebruiken bij een productieproces, omdat deze niet getransformeerd worden en er dus geen meerwaarde ontstaat; ze zijn de noodzakelijke voorwaarden om te kunnen transformeren.

Voor het transformatieconcept geeft figuur 3 dan het systeem weer voor een productieproces.

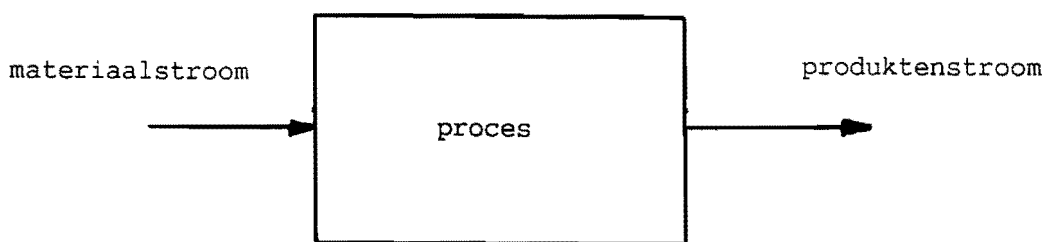


Fig.3: Voorstelling van een productie-eenheid als transformatiesysteem.

In feite is ook de toegevoerde energiestroom een ingangssignaal, aangezien de energie getransformeerd wordt naar een andere, meer waardevolle, energievorm. Daar we echter alleen geïnteresseerd zijn in de transformatie van materialen en/of grondstoffen, wordt de energiestroom buiten beschouwing gelaten.

Op grond van de massabalans van het productieproces is in de Appendix een uitdrukking afgeleid voor de verhouding tussen de hoeveelheid geproduceerde produkten gedurende een bepaalde periode en de maximale hoeveelheid die in deze periode geproduceerd zou kunnen worden; deze verhouding zullen we de transformatie factor (TF) noemen:

$$TF = U \cdot A \cdot E_{av} \quad (6)$$

waarin U de benuttingsgraad van het productieproces voorstelt, A de beschikbaarheidsgraad, welke grootheid in feite een maat is voor de flexibiliteit, en E_{av} de gemiddelde effectiviteit van het productieproces, welke een maat is voor de kwaliteit.

Met deze transformatie faktor zijn we in staat om het produktieve gedrag van machines te kwantificeren en te vergelijken.

Daarnaast kan de transformatie faktor ook gebruikt worden als kengetal dat een waarde toekent aan een productie-eenheid als onderdeel van een productieproces.

Tussen de benuttingsgraad U en de beschikbaarheidsgraad A is er een wisselwerking hetgeen aan de hand van figuur 4 zal worden verklaard.

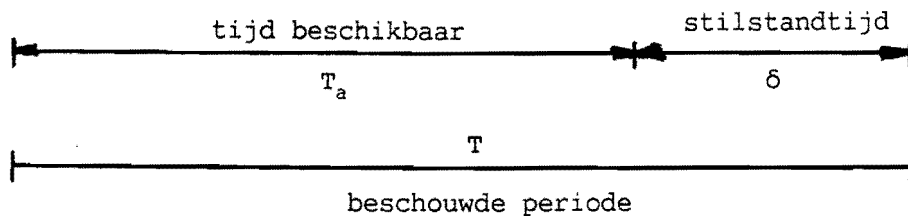


Fig. 4. De benoemde tijdsintervallen in de beschouwde periode.

Als $U = 1$, hetgeen wil zeggen dat er gedurende de volledige tijd die beschikbaar is, wordt geproduceerd, is $A < 1$ aangezien $T_a < T$. Is echter $U < 1$, dan kan het omstellen in de niet-productieve tijd gebeuren, waardoor de stilstandtijd kleiner wordt en daarmee A groter. Is er uitsluitend een stilstand t.g.v. het omstellen, dan zal $A = 1$ zijn, omdat de stilstandtijd dan buiten de beschouwde tijdsperiode gehouden kan worden.

4. Enige numerieke voorbeelden

Bij een metaalverwerkend bedrijf staan een groot aantal personen voor het ponsen van onderdelen. De personen hebben een lage benuttingsgraad, waardoor het omstellen in de niet-productieve tijd kan gebeuren, terwijl er geen overige stilstandtijden zijn, zodat $A = 1$. De resultaten zijn gegeven in Tabel 1. We zien dat, ofschoon de waarden van de IPF van de personen bij een 100% benutting goed zijn, de lage benuttingsgraad ertoe leidt dat de waarden van de TF enorm verslechteren.

Voor dit bedrijf is de TF ook voor de totale productie-afdeling bepaald. Gezien de grote fractie van de niet-productieve uren, kan wederom het omstellen in deze uren plaatsvinden waardoor de beschikbaarheid $A = 1$; verder is gevonden dat de gemiddelde waarde van de effectiviteit E_{av} gelijk aan 0.94 is, terwijl de gemiddelde benuttingsgraad 60% bedraagt, waarmee $TF = 0.56$ wordt. Het is duidelijk dat deze TF veel te laag is vanwege de lage benuttingsgraad. Het verhogen van de effectiviteit (een maat voor de kwaliteit) of van de beschikbaarheid (een maat voor de flexibiliteit) heeft geen zin; men dient er op bedacht te zijn, dat de beschikbaarheid wat af zal nemen als de benuttingsgraad wordt verhoogd doordat dan de omsteltijden in rekening dienen te worden gebracht.

Pers no.	T(min)	T_u (min.)	U	TF
10	110.700	66.620	0.602	0.57
11	109.350	35.742	0.327	0.31
12	109.350	37.278	0.341	0.33
13	109.350	49.818	0.456	0.43
20	111.150	78.312	0.705	0.67
21	109.350	57.510	0.526	0.50
22	109.350	79.692	0.729	0.69
30	109.350	40.962	0.375	0.35
31	109.350	38.772	0.355	0.34
40	109.350	42.402	0.388	0.37
50	109.350	31.698	0.290	0.27
51	109.350	9.714	0.089	0.08

Tabel 1: Overzicht van de TF voor diverse personen.

Ook voor een destilleerderij is onderzocht hoe groot de transformatie factor is. Dit resulteerde in: $A = 0.70$, $U = 1$, $E_{av} = 0.995$, zodat $TF = 0.697$. Deze cijfers geven aan, dat de produktie verbeterd kan worden door de beschikbaarheid, en daarmee de flexibiliteit, van het produktieproces te vergroten. Een verbetering van de effectiviteit (kwaliteit) heeft geen enkele zin omdat deze al zeer goed is.

Tenslotte is m.b.v. simulaties nagegaan hoe de TF verandert als een taak die eerst in een job shop situatie werd uitgevoerd daarna m.b.v een flexibel produktieproces (FMS) wordt uitgevoerd. De resultaten zijn ($U = 1$):

	job shop	FMS
	-----	-----
A	0.808	0.863
E_{av}	0.954	0.995
TF	0.771	0.859

We zien hieruit, dat door de toepassing van het flexibele produktieproces niet alleen de beschikbaarheid is toegenomen, maar eveneens de effectiviteit; de verbetering van de TF bedraagt ruim 11%.

Deze numerieke voorbeelden geven aan, dat de transformatie factor een goed hanteerbaar kengetal is om het produktieve gedrag te kwantificeren en machines of processen te vergelijken.

5. De kostenfunctie

De transformatie factor speelt een invloedrijke rol in de bepaling van de kosten die met een produktie gepaard gaan. De kosten voor een produktieproces zijn te verdelen in de vaste kosten C_p en de variabele kosten C_v ; deze laatste hangen af van het produktievolume en dus van de TF. Tot de vaste kosten behoren o.m. de kapitaalkosten.

Om diverse produktieprocessen te kunnen vergelijken, gaan we uit van een gelijke hoeveelheid produkten, en wel het maximale produktievolume in het geval $TF = 1$; de materiaalstroom wordt in dit geval geheel omgezet in een produktstroom, zonder uitval of afgekeurde produkten en zonder stilstandsverliezen (100% transformatie). De bijbehorende variabele kosten noemen we $C_{v,max}$.

Zou een produktieproces met een $TF < 1$ dit maximale produktievolume moeten leveren, dan zijn de variabele kosten gelijk aan $C_{v,max}/TF$. Definiëren we nu een kostenfunctie C die de kosten weergeeft voor een produktie met genoemd maximale volume, dan geldt:

$$C = C_p + \frac{C_{v,max}}{TF} \quad (7)$$

De kostenfunctie C is dan een functie van de TF, niet alleen doordat de variabele kosten van de transformatie factor afhangen, maar ook omdat de vaste kosten van deze transformatie factor afhangen. Zo zal een verbetering van de TF leiden tot hogere kapitaalkosten en dus tot hogere vaste kosten.

In Fig.5 is de kostenfunctie weergegeven als functie van de TF.

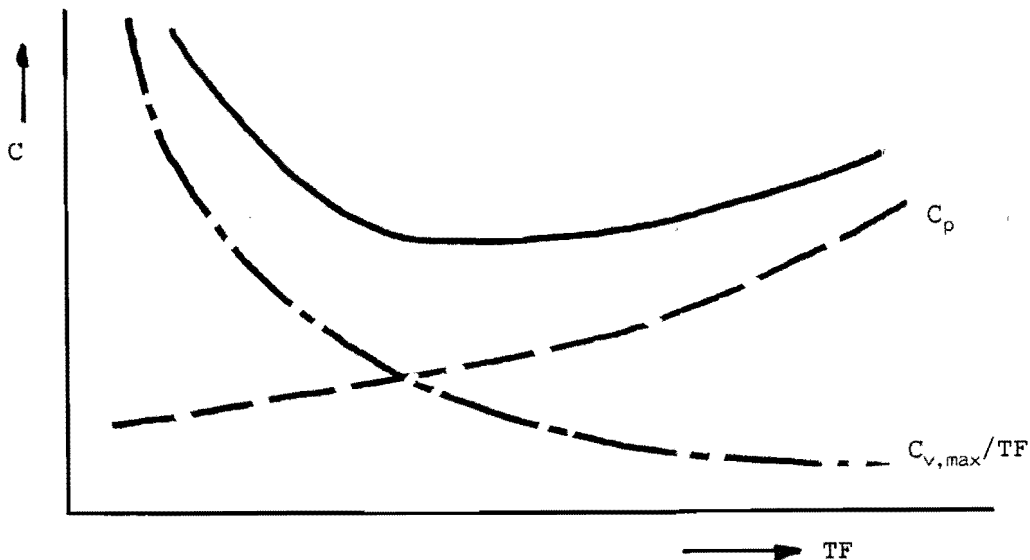


Fig.5: De kostenfunctie als functie van de TF.

We zien, dat de kostenfunctie een minimum waarde vertoont bij een bepaalde TF, hetgeen inhoudt dat deze waarde van de TF voor het betreffende produktieproces het optimale werkpunt voor het procesontwerp dient te zijn.

Dit minimum wordt bereikt indien:

$$\frac{df}{dTF} = \frac{C_{v,max}}{(TF_m)^2} \quad (8)$$

waarin f de funktie voorstelt die het verband weergeeft tussen C_p en TF , terwijl TF_m de waarde van de transformatie faktor is bij de minimale waarde van de kostenfunktie.

Hangen bijvoorbeeld de vaste kosten lineair van de TF af, dus: $C_p = C_{p,o} + \gamma \cdot TF$, dan is de minimale waarde van de kostenfunktie:

$$C_m = C_{p,o} + 2 \cdot \sqrt{\gamma \cdot C_{v,max}} \quad (9)$$

waarin $C_{p,o}$ het deel van de vaste kosten voorstelt dat onafhankelijk van de TF is.

Deze minimale waarde treedt dan op bij:

$$TF_m = \sqrt{C_{v,max}/\gamma} \quad (10)$$

Het een en ander houdt in, dat als de beschikbaarheid (flexibiliteit) en/of de effectiviteit (kwaliteit) te groot zijn, dit tot een verslechtering van de kostenfunktie kan leiden, indien de minimale waarde van de kostenfunktie gepasseerd is. Dit als gevolg van de te grote (financiële) offers om tot deze grote waarden van de beschikbaarheidsgraad en effectiviteit te komen.

We zien dat de transformatie faktor TF invloed heeft op de kostenfunktie; deze kostenfunktie leidt tot inzicht in de ontwikkeling van de kosten bij het ontwerp of herontwerp van het produktieproces. De kostenfunktie kan gebruikt worden voor het vergelijken en/of beheersen van de economische prestatie. Een belangrijk voordeel van deze kostenfunktie ten opzichte van bijvoorbeeld de produktiviteit is, dat de uitgang niet gemeten dient te worden.

6. Conclusies

De bekende kengetallen geven niet of onvoldoende de voordelen van een geavanceerd produktieproces, zoals kwaliteit en flexibiliteit, weer. De afgeleide transformatie faktor bevat deze grootheden wel, en blijkt als technisch kengetal praktisch bruikbaar te zijn, zoals waarden uit simulaties en uit praktijkgevallen, aangeven.

Door de invloed van de transformatie faktor op een kostenfunktie, bestaat er een optimale waarde van de transformatie faktor, waarbij de kosten minimaal zijn. Hieruit volgt, dat een te ver doorgevoerde automatisering tot hogere kosten leidt, dan in het geval van de optimale waarde van de transformatie faktor.

Een verder gebruik van de transformatie faktor in praktische omstandigheden zal aan moeten geven in hoeverre deze faktor voldoet als kengetal voor het ondersteunen van beslissingen en het vergelijken van processen.

7. Referenties

Graig, C.E. and C.R. Harris (1972). Total Productivity Measurement at the firm Level. Sloan Management Review, 14, (3), 13-29.

Son, Y.K.(1987). An economic evaluation model for advanced manufacturing systems, Dissertation, Auburn University.

Bekker, P.C.F. (1988). Ontwerpen/beheersen van technische produktiesystemen. Dictaat nr. 1259, T.U. Eindhoven.

In 't Veld, J. (1988). Analyse van Organisatieproblemen, Stenfert Kroese.

Son, Y.K. and C.S. Park (1988). Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems, J. of Manuf.Systems, 6, 3, 193-207.

Boer, H. en K. Krabbendam (1989). Anticipating and managing organisational measures for the implementation of new technologies. Univ. of Twente

Propst, A.L. (1989). In search of a new process, Quality Progress, june, 43-47.

Son, Y.K. (1990). A performance measurement method which remedies the 'productivity paradox', Prod.and Inventory Man. Journ., sec.quarter, 38-43.

Florentin, H.E. and V.K.Omachonu (1991). Machine Centre productivity measurement, Int.J.Techn.Management, 6, 1/2, 131-147.

Barbiroli, G. (1992). Towards a definition and a dynamic measure of strategic technology, Technovation, 12, 5, 285-296.

Appendix - De afleiding van de transformatie faktor.

Beschouwen we de massabalans voor Fig.3, dan:

$$\frac{dM}{dt} = F_m - F_p - F_w \quad (11)$$

waarin M de in het systeem opgehoopte massa voorstelt (de materialen die bewerkt worden in het proces), F_m de materiaalstroom, F_p de produktstroom en F_w de afvalstroom.

In een te beschouwen tijdsperiode T verkrijgen we dan:

$$\int_0^T dM = \int_0^T (F_m - F_p - F_w) dt \quad (12)$$

Noemen we de maximale goedgekeurde produktstroom die met de materiaalstroom te verkrijgen is F_{pqm} en is de beschouwde tijdsperiode veel groter dan de bewerkingstijd van het materiaal waardoor de ophopingsterm verwaarloosd kan worden, dan ontstaat:

$$\int_0^T F_{pq} \cdot dt = \int_0^T E \cdot F_{pqm} \cdot dt \quad (13)$$

waarin F_{pq} de goedgekeurde produktstroom is en E de effectiviteit van de produktie-eenheid; de fractie afgekeurde produkten is dus opgenomen in de effectiviteit van het proces. Deze effectiviteit is dan een maat voor de kwaliteit van het transformatieproces.

De grootheid F_{pqm} zullen we als een constante mogen beschouwen. Is T_a de tijdsperiode dat het proces beschikbaar is en wordt het proces gedurende een kortere tijd dan T_a benut, dan is de benuttingsgraad

$$U = \frac{T_u}{T_a} < 1$$

en geldt voor (13):

$$\int_0^T F_{pq} \cdot dt = \int_0^{T_u} E \cdot F_{pqm} \cdot dt \quad (14)$$

waarin T_u de tijd is dat het proces gebruikt wordt.

Noemen we de over de produktietijd gemiddelde effectiviteit E_{av} , dan wordt (14):

$$\int_0^T F_{pq} \cdot dt = \int_0^{T_u} E \cdot F_{pqm} \cdot dt = E_{av} \cdot F_{pqm} \cdot T_u \quad (15)$$

Het totale produktievolume gedurende de beschouwde tijdsperiode T kan dan worden uitgedrukt als:

$$\int_0^T F_{pq} \cdot dt = U \cdot A \cdot E_{av} \cdot F_{pqm} \cdot T \quad (16)$$

waarin A de verhouding tussen de tijdsduur dat het produktie proces beschikbaar is en de beschouwde tijdsperiode (T_a/T), U de verhouding tussen de tijd dat het produktieproces benut en beschikbaar is (T_u/T_a) en $F_{pqm} \cdot T$ het maximale produktievolume in de beschouwde tijdsduur T voorstelt.

Noemen we de verhouding tussen de verkregen hoeveelheid produkten in de beschouwde tijdsperiode en de maximaal haalbare hoeveelheid in dezelfde periode de transformatie faktor ~~X~~_{TF} dan:

$$TF = U \cdot A \cdot E_{av} \quad (17)$$