

Balansering av kapaciteten i en kundorderstyrd tillverkningsprocess.

Av INGEMAR ASPLUND*)

Introduktion:

En tillverkningsprocess kan i korthet beskrivas på följande förenklade sätt: Processen har en ström av ankomster, som representeras av t. ex. råmaterial, halvfabrikat, kundordrer etc. Denna inström betjänas därefter i en serie av operationer, vars sekvens, typ och antal bestäms av inströmmens karaktär. Under denna betjäning fattas ett antal beslut för processens informationsflöde.

Antalet operationer kan variera från en till flera och kan vid en mekanisk process innebära mekanisk bearbetning, gjutning, montering etc. Mellan varje operation i processen kan existera ett mellanlager där en väntan = väntetid före påföljande operation uppträder. Denna väntetid kan variera från nolltid och uppåt beroende på tillverknings- typ och alltefter den beläggning som råder i processen.

Då inströmmen betjänats i de föreskrivna operationerna erhålles en utström bestående av färdiga produkter och/eller kompletterade eller bearbetade detaljer och halvfabrikat, leveranshandlingar, fakturor etc. Denna betjäning av en inström av material, halvfabrikat och kundorder till en utström av färdiga produkter, detaljer och leveranshandling ur såväl administrativ som operativ synpunkt utgör en produktionsprocess.

Karaktären hos inströmmen till denna produktionsprocess är emellertid varierande och då den är grundläggande för processens karaktär, är en systematisering av olika typer av produktionsprocesser erforderlig.

*) Tekn. lic., AB Svenska Kullagerfabriken, Göteborg.

Balansering av kapaciteten i en kundorderstyrd tillverkningsprocess.

Av INGEMAR ASPLUND*)

Introduktion:

En tillverkningsprocess kan i korthet beskrivas på följande förenklade sätt: Processen har en ström av ankomster, som representeras av t. ex. råmaterial, halvfabrikat, kundordrer etc. Denna inström betjänas därefter i en serie av operationer, vars sekvens, typ och antal bestäms av inströmmens karaktär. Under denna betjäning fattas ett antal beslut för processens informationsflöde.

Antalet operationer kan variera från en till flera och kan vid en mekanisk process innebära mekanisk bearbetning, gjutning, montering etc. Mellan varje operation i processen kan existera ett mellanlager där en väntan = väntetid före påföljande operation uppträder. Denna väntetid kan variera från nolltid och uppåt beroende på tillverknings- typ och alltefter den beläggning som råder i processen.

Då inströmmen betjänats i de föreskrivna operationerna erhålles en utström bestående av färdiga produkter och/eller kompletterade eller bearbetade detaljer och halvfabrikat, leveranshandlingar, fakturor etc. Denna betjäning av en inström av material, halvfabrikat och kundorder till en utström av färdiga produkter, detaljer och leveranshandling ur såväl administrativ som operativ synpunkt utgör en produktionsprocess.

Karaktären hos inströmmen till denna produktionsprocess är emellertid varierande och då den är grundläggande för processens karaktär, är en systematisering av olika typer av produktionsprocesser erforderlig.

*) Tekn. lic., AB Svenska Kullagerfabriken, Göteborg.

Systematiseringen baseras därvid på hur materialflödet genom processen betjänas till *tid, rum och kvantitet*. Följande produktionstyper kan urskiljas:

1. Intermittent tillverkning
 - a) Kundorderstyrd tillverkning (blandad)
 - b) Serietillverkning
2. Kontinuerlig tillverkning
 - a) Masstillverkning
 - b) Processtillverkning

De olika produktionstyperna behandlas utförligt i litteraturen. (Se bl. a. 6).

Den fortsatta problembehandlingen berör i huvudsak en produktionsprocess av den förutnämnda typen, *tillverkning på kundorder*. Denna produktion benämns i den engelskspråkiga litteraturen Job Shop. En närmare beskrivning av densamma skall ges i anslutning till figur 1.

Deskriptiv analys av en kundorderstyrd tillverkningsprocess

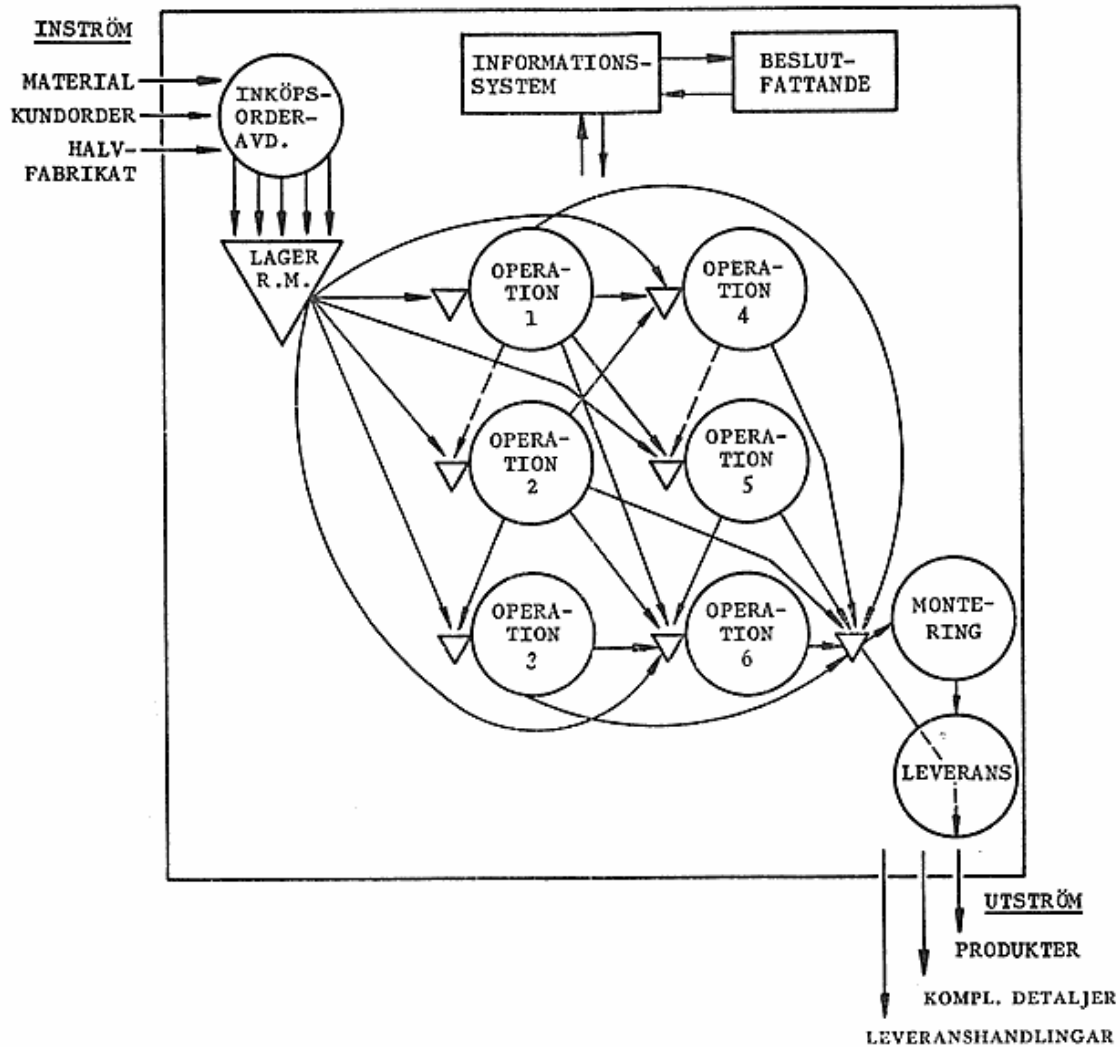
Den tillverkningsprocess som behandlas i denna uppsats har definierats som kundorderstyrd, d. v. s. en intermitterande tillverkning där den primära styrningen av tillverkningsprocessen initieras av de ankommande kundorderna.

Problembehandlingen baseras emellertid på den förutsättningen, att tidsavståndet mellan två kundankomster (kund-order) till olika betjäningstationer är *en stokastisk variabel* (Poisson-fördelning) samt att *betjäningstiderna i olika stationer är exponentialfördelad*. I det praktiska fall som avslutar uppsatsen har dessa förutsättningar undersökts.

Inströmmen av kundorder till processen antages således vara slumpmässig, det vill säga kundernas beställningar inkommer vid varierande på förhand icke kända tidpunkter, avseende olika typer av produkter i varierande antal.

Beroende på den ständigt varierande produktsammansättningen kommer tillverkningssekvensen att variera från tidpunkt till tidpunkt liksom det antal operationer som är erforderliga för betjäning av produkterna. Den kundorderstyrda tillverkningsprocessen beskrivs i figur 1.

En kundorderstyrd tillverkningsprocess har flera särdrag som märkbart skiljer densamma från övriga tillverkningsstyper. Bland de faktorer som har betydelse för den fortsatta problembehandlingen kan nämnas:



Figur 1. Flödesdiagram för produktionsprocessen.

- A. Ett flertal olika produkter samtidigt i produktionsprocessen med en instabil produktblandning. Produkttyperna varierar ständigt, varför varje produkt måste planeras individuellt och produktutrustningen måste vara rustad så att denna variabla produktblandning kan betjänas.
- B. Funktionellt ordnad produktionsapparat. Detta innebär att identiska maskiner äro sammanförda i maskingrupper utförande samma typ av betjäning. Antalet maskiner i vardera maskingruppen varierar med efterfrågan på kapacitet. De olika maskingrupperna är icke uppställda efter materialflödet, då detta ständigt ändrar riktning alltefter produktvariationen.

- C. *Ankomsten av kundorder till tillverkningsprocessen är slumpmässig.* Detta innebär att ordena anländer helt oberoende av varandra och att tidsavståndet mellan de olika ankomsterna utgör en stokastisk variabel. De beställande kunderna styr sålunda ankomsten av order.
- D. *Orderns storlek varierar slumpmässigt.* Såväl den tid som åtgår för betjäning av en order som den ianspråkta kapaciteten varierar för varje order och är oberoende av föregående och efterföljande order. Vidare varierar såväl antalet i en order ingående produkter som dessas volymväde på samma sätt.
- E. *Ett stort antal möjliga kombinationer mellan produktflöden och produktionsvägar.* Då produktblandningen oupphörligt ändras kommer de olika produkterna att taga i anspråk olika delar av produktionsprocessen.

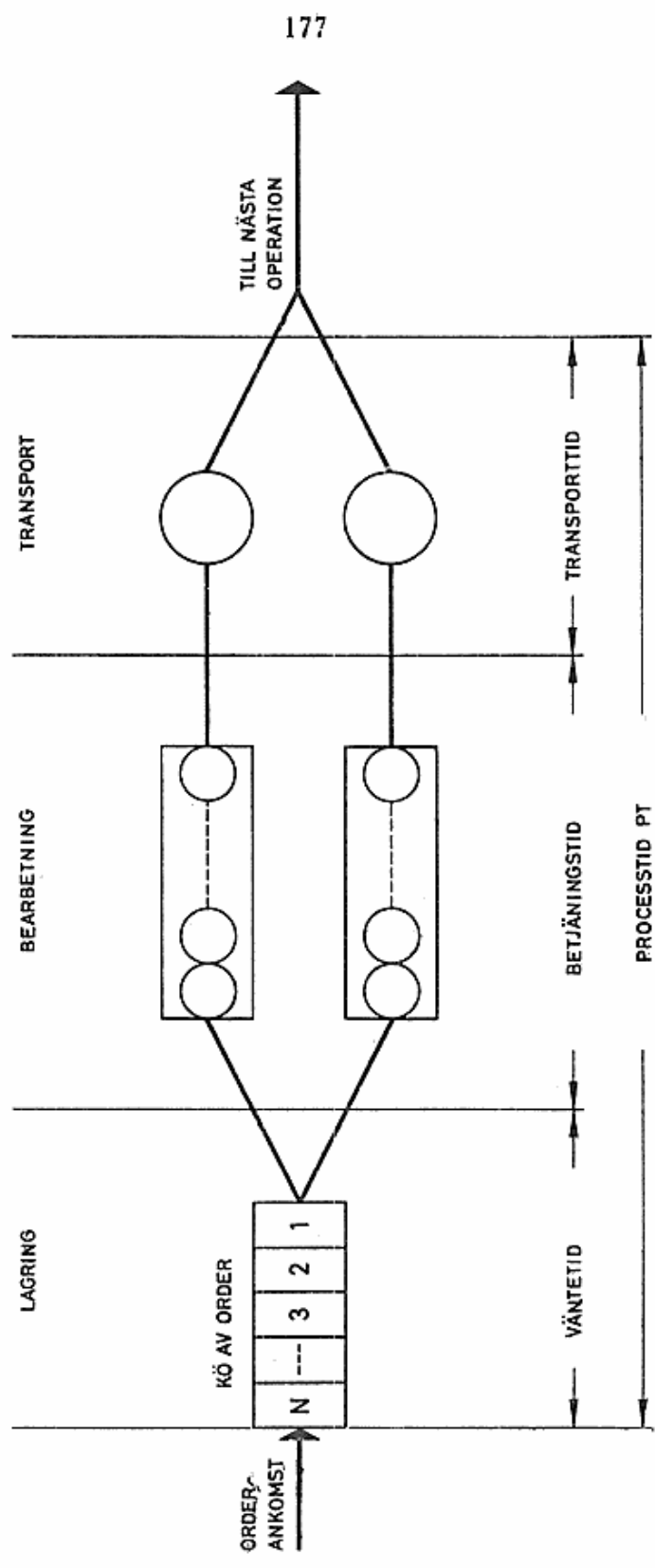
De ovan nämnda särdragen för en kundorderstyrd tillverkningsprocess ställer stora krav på styrningen av densamma. Ett av dessa krav är att kunna leverera beställda produkter vid en på säkra grunder planerad leveranstid. Leveranstiden för en produkt bestämmes emellertid av den totala tiden för väntan och betjäning i processen, det vil säga genomloppstiden. Denna inkluderar och påverkas av väntetiden framför resp. betjäningstationer, operationstider och transporttider (kontrolltider etc.), såsom framgår av figur 2.

Operationstider och transporttider bestämmes av verkstads- och produktionstekniska faktorer medan väntetiden är ett resultat av tillverkningstypens komplexitet, det vill säga ankomstprocessen, betjäningstationens storlek samt utnyttjandegraden.

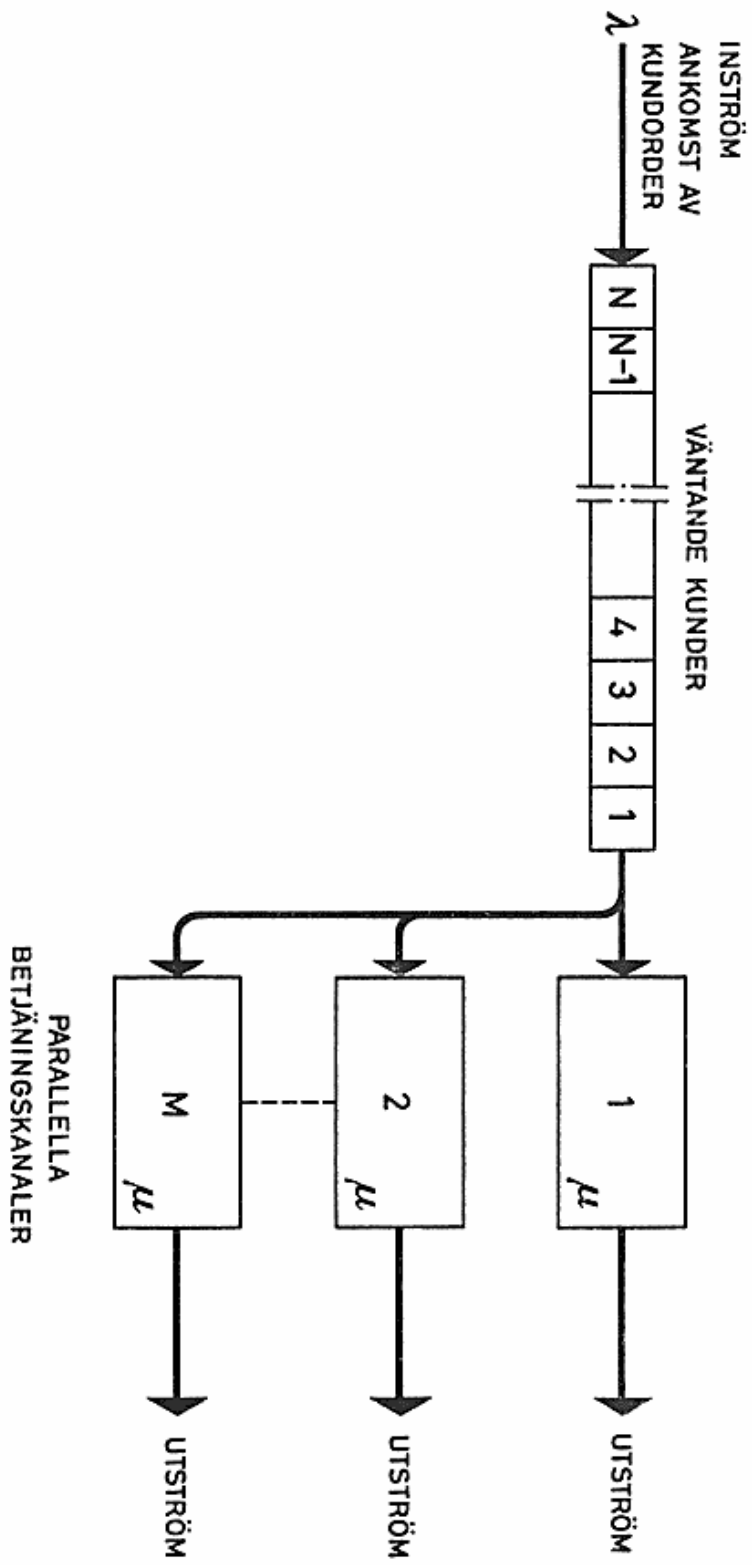
Väntan och Betjäning i en tillverkningsprocess.

Flödet i en kundorderstyrd produktionsprocess kan brytas ner i ett antal element som tillsammans karakteriserar materialflödets typ och grunddrag. Dessa element kan beskrivas sålunda: En sekvens av *kunder* (order) ankommer till en *betjäningsskåp*, vilken *betjänar* kunderna efter den *ködisciplin* som fastställts för betjäningen. Med kund avses här en order, en produkt eller en grupp av produkter, vilka betjänas i processen. Se figur 3.

Vid en produktionsprocess utgöres denna betjäningsskåp av de olika i processen ingående maskingrupperna till vilka de olika kunderna ankommer efter en på förhand uppgjord tillverkningssekvens. Betjäningen av en kund utgöres av maskin- och monteringsoperationer, kontroll- och transportoperationer etc.



Figur 2. Betjäningsstation.



Figur 3. Kösystem.

I en produktionsprocess betjänas vanligen kunderna i flera parallella maskiner, vilka är identiska och således var för sig kan betjäna materialflödet. Vidare är kunderna alltid styrda efter den för varje produkt erforderliga tillverkningssekvensen; operationerna måste härvid utföras i enlighet med fastställd sekvens.

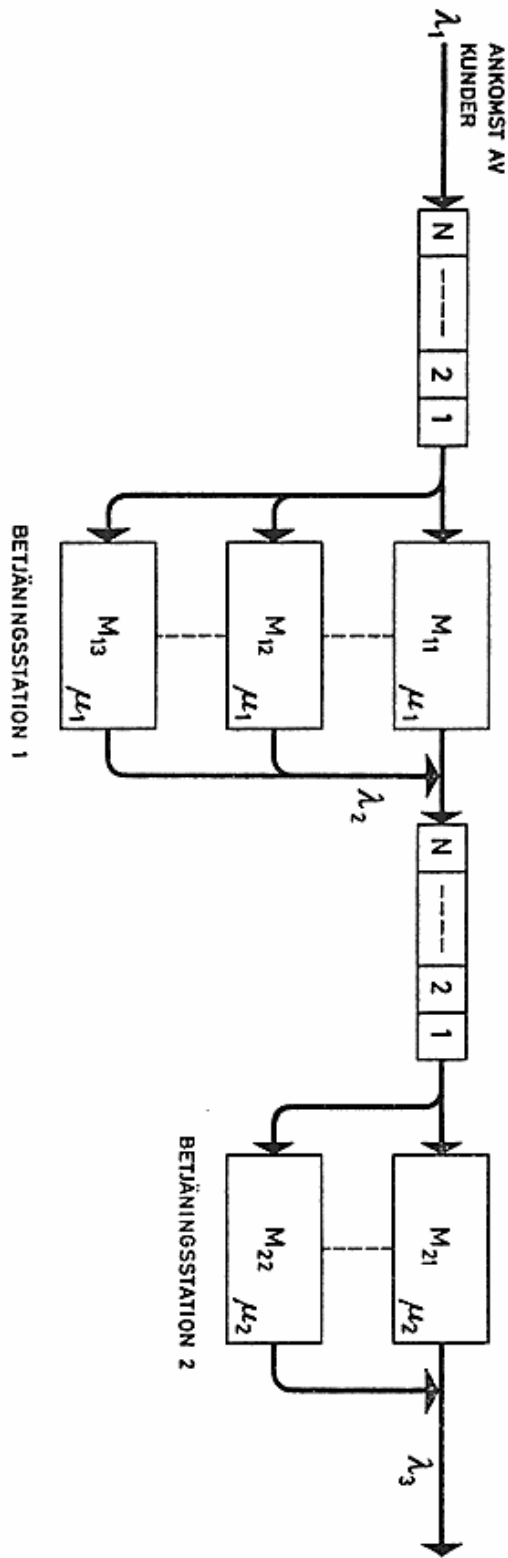
Vid betjäning i en kundorderstyrd process existerar normalt en variation i tidsintervallet mellan kundankomsterna och/eller i den för betjäning erforderliga tiden, varvid betjäningen kommer att försiggå i ett tillstånd av fluktuationer. I vissa fall ankommer fler kunder än vad betjäningsapparaten kan betjäna, varvid en kö av varierande storlek uppträder. I andra fall återigen kommer delar av den totala betjäningsapparaten i produktionsprocessen att vara outnyttjad. De ankommande kunderna får härigenom vänta olika lång tid i kö och utströmmen av kunder från betjäning kommer att variera med tiden. Varje del av betjäningen varierar således mer eller mindre slumpmässigt varvid varje mätbart element förenat med denna betjäning kommer att vara en *stokastisk variabel*, varierande med tiden stundom över, stundom under något medelvärde. Det system som föreligger, då en sekvens av kunder anländer till olika betjäningsstationer i en produktionsprocess och kunderna väntar en varierande tid i kö innan betjäningen påbörjas benämnes fortsättningsvis ett kösystem.

Ett sådant kösystem framgår av figur 4, där kösystemet består av två seriekopplade stationer med 3 resp. 2 kanaler. Varje betjäningsstation i en sådan process kan definieras som enkanals eller multipelstation med exponentialfördelad betjäning (μ), Poissonfördelad ankomstprocess (λ), antalet väntande kunder N och antalet parallella betjäningskanaler i multipelstationen M där μ och λ betecknar betjänings- resp. ankomstintensitet.

För en närmare redogörelse för ankomst- och betjäningsprocessen hänvisas till bl. a. (1, 7).

I en produktionsprocess av typen kundorderstyrd förekommer begränsningar såväl i köernas längd framför olika betjäningsstationer som regler för det sätt, på vilket kunderna utväljes ur kön för betjäning. Dessa begränsningar och regler för köns avveckling benämnes *ködisciplin*. Processen kan på basis av ködisciplinen indelas på följande sätt:

1. De kunder som ansluter sig till en kö i en produktionsprocess tilldelas ett nummer i kön och tilldelas i normalfallet ett lägre nummer allteftersom de tidigare anlända kunderna utväljes för betjäning. Urvalet sker enligt principen »Först anländ – Först be-



Figur 4. Seriekopplat kösystem

tjänad» (FIFO = First in – first out), och några begränsningar i kön förekommer inte. Denna ködisciplin är den i produktionen vanligast förekommande och benämns ordnad kö.

2. På grund av utrymmesbrist eller tidsbrist tillåtes kön eller *väntetiden* icke att överskrida *ett maximalt värde*. Om detta värde överskrides avvecklas de aktuella kunderna genom betjäning utanför den »normala» betjäningsapparaten (legotillverkning, skift, övertid etc.). Denna ködisciplin är vanlig vid de produktionsprocesser som arbetar med smärre leveranstider och där avvikelser från dessa är av avgörande betydelse.
3. Slutligen förekommer vid ett flertal produktionsprocesser att köerna i processens olika betjäningsstationer avvecklas genom *prioritering*. Vissa kunder ges därvid prioritet framför andra kunder i kön och väntetiden för kunderna varierar därmed alltefter den grad av prioritet dessa tilldelats. Denna form av ködisciplin är vanlig i de produktionsprocesser där servicegraden gentemot kunderna är mycket varierande och/eller i de processer där kontroll av utnyttjandegrad och produkter i arbete kontinuerligt sker. Prioritering har härvid en avgörande inverkan på köbildning och därmed produkter i arbete.

En kundorderstyrd tillverkningsprocess har redan definierats som en kedja av på varandra följande betjäningsstationer, där vardera betjäningsstationen består av en eller flera betjäningskanaler. Denna seriekoppling av betjäningsstationerna formar ett kösystem, där köer kan bildas och kunder vänta framför betjäningsstationerna.

Om ankomstprocessen till en betjäningsstation (M) i detta kösystem är Poissonfördelad (tidsintervallet mellan två kundankomster följer en exponentialfördelning) med ankomstintensiteten λ och betjäningstiderna följer en exponentialfördelning med betjäningsintensiteten μ ($\mu < \lambda$), så har Burke (2) påvisat att utströmmen från stationen M är en Poissonprocess med medelintensiteten λ . Med de förutsättningar under vilka ett sådant kösystem fungerar, framgår att de olika betjäningsstationerna arbetar helt oberoende av varandra och kan behandlas som individuella enheter. Detta problem har även behandlats av Jackson (9). De ankommande kunderna till en betjäningsstation får vänta i en gemensam kö och den betjäningskanal, som först blir ledig, påbörjar betjäning av kunder i kön.

Antalet parallella betjäningskanaler i en betjäningsstation har en avgörande inverkan på effektiviteten hos betjäningen. En ökning av

antalet kanaler vid konstant ankomstintensitet skapar en snabbare betjäning medan en minskning av antalet parallella kanaler ger en ökad väntetid. I motsvarande grad ökar resp. minskar den tid betjäningsstationen är outnyttjad.

Utnyttjandegraden δ för en betjäningsstation kan bestämmas på följande sätt:

Under en lång tidsperiod T inströmmar i *genomsnitt* T/T_a kunder till betjäningsstationen, där T_a anger medelankomstintervallet ($T_a = 1/\lambda$). Under motsvarande tid kan i genomsnitt $M \cdot T/T_b$ kunder betjänas i stationen ($T_b = 1/\mu$).

Detta ger att utnyttjandegraden = betjäningsfaktorn blir

$$\delta = \frac{T_b}{M \cdot T_a}$$

som efter omskrivning kan ge ovanstående samband.

Betjäningsfaktorn är sålunda förhållandet mellan det antal betjäningsskanaler i en betjäningsstation, som i genomsnitt är upptagen med betjäning och totala antalet tillgängliga betjäningsskanaler. *Betjäningsfaktorn* är således lika med den *genomsnittliga utnyttjandegraden* för betjäningsstationen.

Utnyttjandegraden δ har en avgörande inverkan på köbildningen framför en betjäningsstation.

Då utnyttjandegraden antar värden mindre än 1 innebär detta, att systemets kapacitet i det långa loppet är tillräcklig. Köer kan bildas på grund av de slumpvisa variationerna men av samma orsak kan systemet stundom vara tomt. Om utnyttjandegraden däremot är like med eller större än 1 är kapaciteten på lång sikt ej tillräcklig och antalet väntande kunder kan teoretiskt sett öka som en funktion av tiden.

Betjäningskapacitet och Medelväntetid

Vid beskrivning av betjäningskapacitetens samband med medelväntetiden skall vi begynna med en-kanal betjäningsstation för att sedan övergå till att behandla det mer komplicerade fallet med flera betjäningsskanaler.

En Poisson-fördelad ankomstprocess till en betjäningsstation genererar en med tiden varierande utnyttjandegrad (belastning) av stationen. Utnyttjandegradens medelvärde är, som vi tidigare sett

$$\delta = \frac{\lambda}{\mu}$$

där λ och μ anger ankomst- resp. betjäningsintensitetens medelvärde.

Denna medelutnyttjandegrad kan också skrivas som

$$\delta = \frac{\text{Total effektiv maskintid}}{\text{Total tillgänglig maskintid}}$$

Den totala tiden i kö och betjäningsstation (W) det vill säga väntetiden och operationstiden kan bestämmas enligt sambandet

$$W = \frac{1}{\mu(1-\delta)}$$

för vilket samband härledning återfinnes i (7).

Om medelbetjäningstiden T_b är känd kan medelväntetiden i kön bestämmas på följande sätt:

Medelväntetiden = Väntetidsfaktorn · Medelbetjäningstiden eller

$$W_q = F_w \cdot T_b$$

där väntetidsfaktorn F_w bestämmas ur sambandet

$$F_w = \frac{\delta}{1-\delta}; \text{ (en-kanals station)}$$

Vid flera parallella kanaler kan väntetidsfaktorn F_w bestämmas ur sambandet

$$F_w = P_w \cdot \frac{1}{M(1-\delta)} \text{ (parallella kanaler)}$$

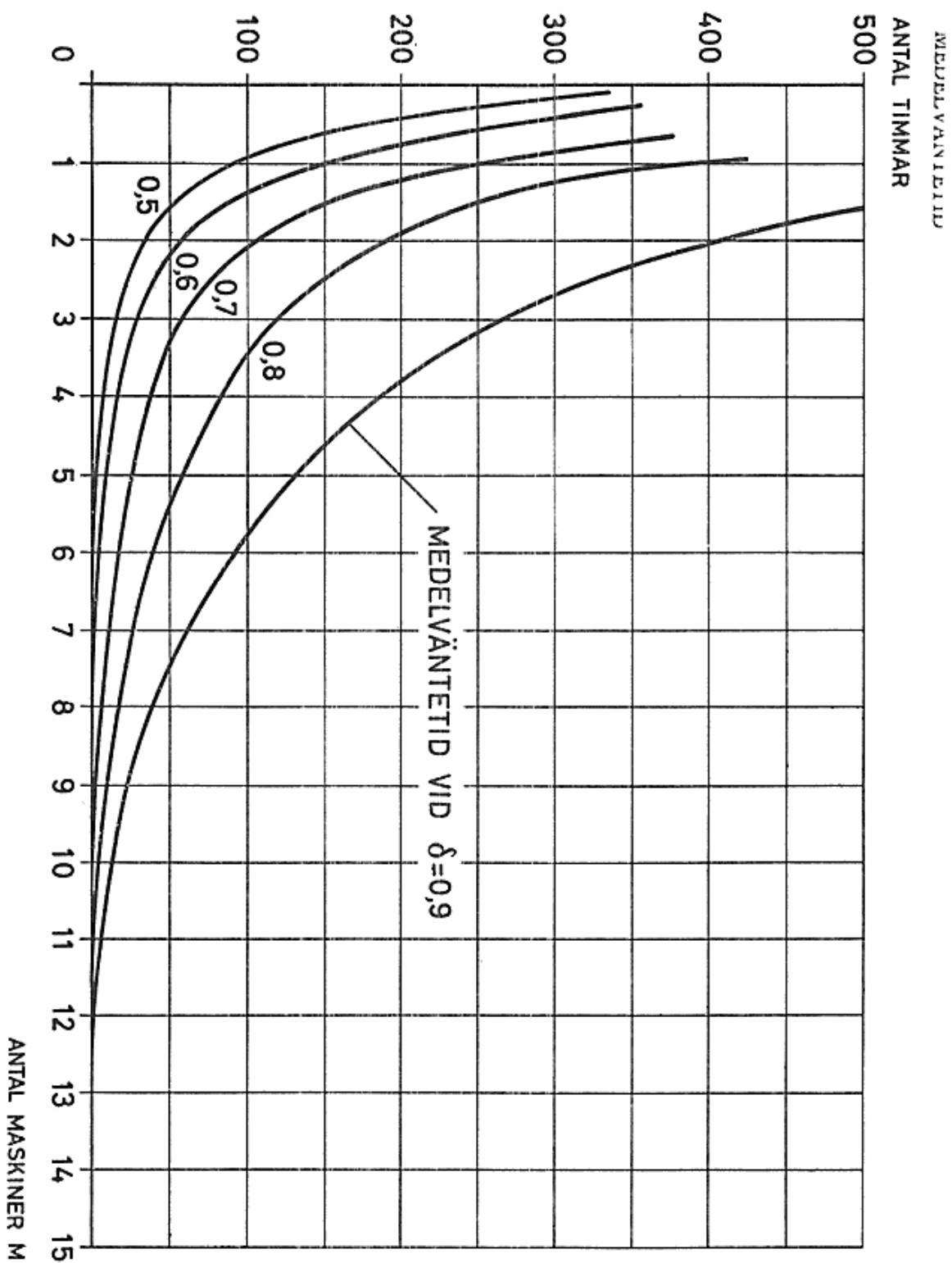
där P_w anger sannolikheten för väntan i kö. För härledning av dessa samband hänvisas till (2).

Om medelantalet kunder i kön betecknas med L framgår sambandet mellan köbildning och betjäningsfaktor vid en-kanals betjäningsstation av följande tabell:

Tabell 1.

λ	2	5	10	12	13	14	15	16
μ	16	16	16	16	16	16	16	16
δ	0.125	0.313	0.625	0.75	0.812	0.875	0.938	1.0
L	0.017	0.142	0.04	2.25	3.52	6.13	14.0	∞

Om medelbetjäningstiden i en flerkanals betjäningsstation antages vara 100 timmar kan medelväntetiden vid olika värden på betjäningsfaktorn δ bestämmas ur diagrammet i figur 5. Ur diagrammet kan som exempel avläsas att en ökning av antalet parallella kanaler från 2 till 4 vid oförändrad betjäningsfaktor 0.9 ger en minskning av medelväntetiden med mer än 50 %, närmare bestämt från 400 timmar till 190 timmar.



Figur 5. Medelväntetiden i antal timmar vid olika utnyttjandefaktorer som funktion av antal maskiner.

Balansering av Väntetid och Betjäningskapacitet.

Varje kundorder som betjänas i en kundorderstyrd tillverkningsprocess erfordrar betjäning av vissa eller samtliga av processens olika betjäningsstationer. Då behovet av betjäning och maskinkapacitet varierar från den ena ordern till den andra blir det totala kapacitetsbehovet i produktionsprocessen icke konstant, utan varierar med tiden. Ett karakteristiskt problem i den kundorderstyrda tillverkningsprocessen är följaktligen att bestämma vad som kan anses vara ett optimalt medelvärde för maskinkapaciteten i en maskingrupp med hänsyn till kostnaderna för den variation i väntan som uppstår framför maskingruppen och kostnaderna för outnyttjad kapacitet i densamma vid olika servicegrad gentemot beställarna.

Om orderingången till en tillverkningsprocess ökar resulterar detta i en ökning av antalet ankomster per tidsenhet till de olika stationerna, det vill säga ankomstintensiteten ökar. En ökning av ankomstintensiteten (λ) med oförändrat antal parallella kanaler (M) och betjäningsintensitet (μ) ger en ökad belastning på stationen, varvid betjäningfaktorn ökar. Detta leder till en ökning av medelväntetiden framför stationen. Ökad ankomstintensitet ger längre medelväntetid och ökad utnyttjandegrad. Emellertid kan den ökade medelväntetiden med ökad ankomstintensitet balanseras med antalet parallella betjäningskanaler. Generellt har följande samband påvisats gälla

$$\text{Utnyttjandegraden} = \frac{\text{Ankomstintensitet}}{\text{Antal maskiner} \cdot \text{Betjäningsintensitet}}$$

Då betjäningsintensiteten är beroende av antalet parallella kanaler, gäller således att en ökning av antalet maskiner (kanaler) i en betjäningsstation vid ökad ankomstintensitet kan ge oförändrad medelväntetid. Denna balansering skall åskådliggöras med ett exempel i anslutning till figur 5.

En betjäningsstation med 3 maskiner vid utnyttjandegraden 0.7 har en medelväntetid av ca. 60 timmar, då medelbetjäningstiden är 100 timmar. Ankomstintensiteten antages öka 1.9 ggr, vilket vid 3 maskiner ger en utnyttjandegrad 100 %. En utnyttjandegrad större än 100 % ger ett s. k. mättat kösystem, medelväntetiden kan teoretiskt sett bli oändligt stor. Vid en ökning av antalet maskiner till 4 blir utnyttjandegraden 99 %, vilket ger en väntetidsfaktor av 8–10 (se diagram i (2,3)), det vill säga medelväntetiden blir 800–1000 timmar. En ytterligare ökning av antalet maskiner till 5 ger en utnyttjandegrad av 80 %. Medelväntetiden blir då 60 timmar; densamma som före ökningen av ankomstintensiteten.

- Om C_w = kostnaden för väntan per tidsenhet
 C_k = kostnaden för outnyttjad kapacitet per tidsenhet
 C_r = övriga kostnader i betjäningstationen såsom direkt lön och materialkostnader etc., vilka kostnader emellertid är oberoende av antalet parallella kanaler

kan ovanstående balansering uppställas i en matematisk modell för den av antalet kanaler beroende rörliga kostnaden för en betjäningstation.

Den totala rörliga kostnaden förenad med *outnyttjad maskinkapacitet* är

$$C_k (1 - \delta) M$$

medan den totala rörliga kostnaden för *väntan* för en order är

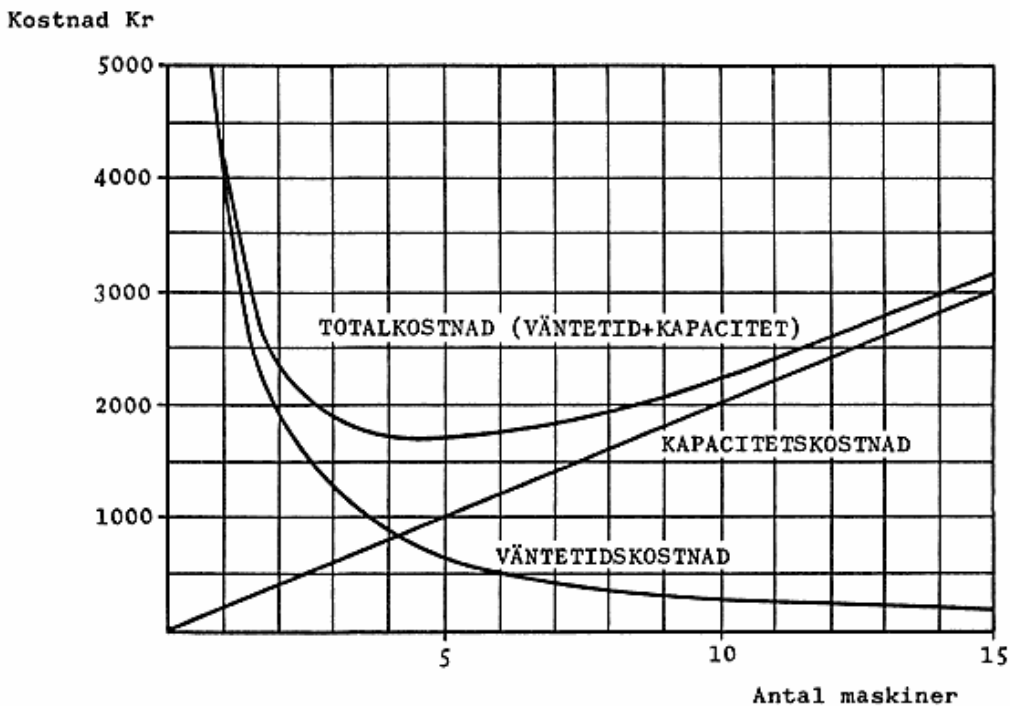
$$C_w (W_q \cdot \lambda)$$

där W_q som förut betecknar medelväntetiden i kön.

Härav erhålles den totala rörliga kostnaden (TRK) för en betjäningstation i en produktionsprocess:

$$\text{TRK} = C_k (1 - \delta) \cdot M + C_w (W_q \cdot \lambda) + C_r \quad (1)$$

Denna balanseringsmodell visas grafiskt i figur 6 för specialfallet $C_w = 10$ kr och $C_k = 200$ kr.



Figur 6. Kostnaden för väntetid och outnyttjad kapacitet vid variation i kapaciteten ($C_w = 10$ kr, $C_k = 200$ kr).

Genom att införa väntetidsfaktorn för kanal M , F_{wM} i detta samband kan en balansering av antalet maskiner i stationen utföras genom att söka minimivärdet på TFK för olika värden på antalet kanaler M . En derivering av sambandet för den totala rörliga kostnaden m. a. p. M ger

$$\frac{C_w}{C_k} = \frac{(M + 1) (1 - \delta_{M+1}) - M (1 - \delta_M)}{\lambda \cdot T_b \cdot (F_{wM} - F_{w_{M+1}})} \quad (2)$$

varvid minimivärdet erhålles genom att införa ett värde på M som satisfierar sambandet C_w/C_k . Detta värde anger optimala antalet parallella betjäningsskanaler.

Diagram och tabeller över ovanstående samband återfinnes i litteraturen (3).

Följande exempel visar beräkningsgången: Ett optimalt antal parallella betjäningsskanaler skall bestämmas för en station där ankomstintensiteten (λ) har bestämts till 3.0 kunder per timma och medelbetjäningstiden (T_b) till 0.75 timmar. Kostnaden för väntan (C_w) är 10 kr medan kostnaden för outnyttjad kapacitet antages vara 25 kr (allt per timma). Härav erhålles $\lambda \cdot T_b = 3 \cdot 0.75 = 2.25$. Vidare fås att $C_w/C_k = 0.4$. Ur diagram (i 2) kan nu optimala antalet kanaler bestämmas, vilket i detta exempel ger 3.7, vilket värde ökas till 4. Stationen skall alltså ha 4 parallella betjäningsskanaler med identiska betjäningstidsfördelningar.

Maskinbalansering – Praktikfall.

Praktikfallet är hämtat från en mekanisk verkstad, där tillverkningen omfattar verkstadsmaskiner av olika slag samt verktyg och utrustning till dessa. Olika typer av maskiner tillverkas och kunderna beställer normalt enstaka maskiner med div. utrustning. Då varje kund har speciella önskemål om utförande och utrustning innebär detta att varje order behandlas som en separat enhet ur tillverkningsynpunkt. Den nuvarande maskinkapaciteten i verkstaden är i de flesta fall tillräcklig för den produktion verkstaden belägges med. I vissa enstaka fall, toppbeläggningar etc., tillgripes övertid eller s. k. legotillverkning, d. v. s. vissa operationer utföres externt.

Maskinbalanseringen innebär således ej att fastställa hur många maskiner som skall inkluderas i olika stationer utan snarare att avgöra hur många maskiner i de olika stationerna som skall opereras. Denna frågeställning accentueras av att operatören endast i undantagsfall kan flyttas från en station til en annan.

Verkstadens servicegrad bör emellertid vara hög, varför leveranstiden och därmed genomloppstiden bör hållas under kontroll. Den del av genomloppstiden som utgör väntetid tillåtes icke överstiga vissa värden. Emellertid har kostnaden för väntetid visat sig svår att bestämma. Såsom kriterium för balansering av betjäningsstationerna har därför valts en maximalt tillåten väntetid mellan två på varandra följande tillverkningsoperationer (stationer). I de fall toppbelastningar förekommer får extern tillverkning tillgripas.

I det praktikkfall som skall redovisas har den maximalt tillåtna väntetiden mellan två operationer bestämts till 1 dag (9 timmar). Innan en balansering kan ske måste en statistisk analys av ankomst- och betjäningprocessen företagas.

Ankomstfördelning:

Maskinbalanseringen i detta praktikkfall omfattar tre olika maskingrupper ingående i den produktionsprocess som ovan beskrivits. Dessa grupper är revolversvävar, fräsmaskiner och slipmaskiner. En företagen undersökning har visat att tidsintervallet mellan två på varandra följande kundankomster väl följer en exponentialfördelning, det vill säga kundankomsterna utgör en Poisson-process. Detta framgår av figur 7. En statistisk undersökning har styrkt denna teori.

Betjäningsfördelning:

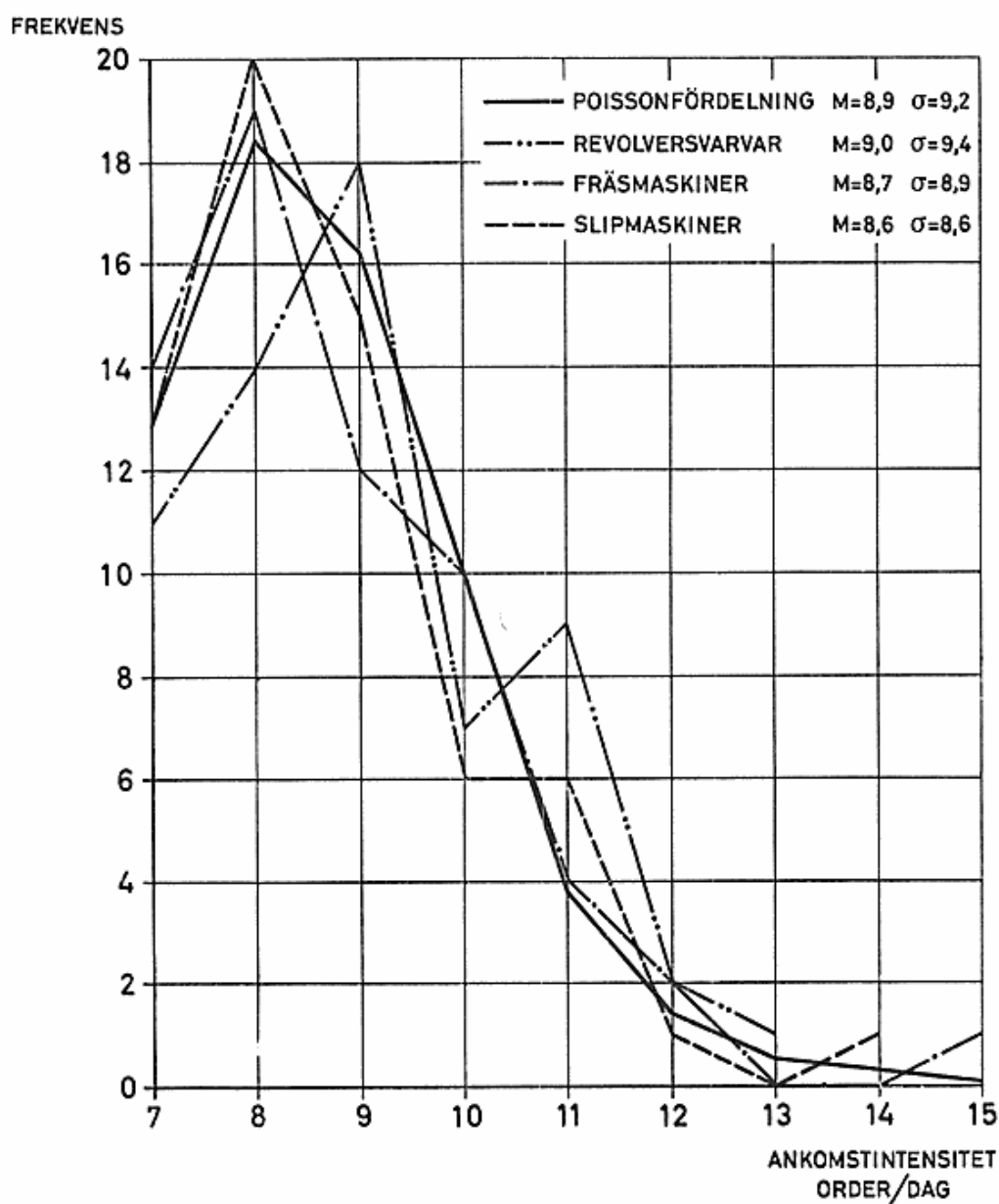
Ett studium av betjäningstiderna eller operationstiderna har även företagits. Denna studie visade att den bästa överensstämmelsen mellan den verkliga betjäningsfördelningen och exponentialfördelningen erhöles för de längre operationstiderna medan avvikelserna blev större för de kortare operationstiderna.

En approximering med den negativa exponentialfördelningen innebär därmed för de kortare operationstiderna ett avsteg från verkligheten. Emellertid göres den teoretiska beräkningen för ett »sämre« fall än verkligheten om exponentialfördelningen användes.

Maskinbalansering:

Balanseringen omfattar tre olika maskingrupper: MG 1-revolversvävar, MG 2-fräsmaskin och MG 3-slipmaskiner.

Den genomsnittliga aktiviteten i de tre maskingrupporna återgives i tabell nedan, tabell 2. Dessa data är hämtade från en företagen studie under 60 arbetsdagar med 9 timmars arbetsdag.



Figur 7. Ankomstfördelningar vid olika betjämningsstationer i produktionsprocessen.

Tabell 2.

	MG 1	MG 2	MG 3
Medelvärde av ankomstintensiteten λ (order/tim)	1.00	0.99	0.96
Medelvärde av betjäningstiden T_b (tim/order)	7.45	12.23	6.41
Medelvärde av betjäningintensiteten μ (order/tim)	0.13	0.08	0.16
Utnyttjandegraden $\delta = \lambda/\mu$ (tn-kanal)	7.5	12.1	6.2

Då ankomst- och betjäningstidsfördelningarna nu är kända kan den *förväntade medelväntetiden* vid de olika betjäningstationerna bestämmas för olika antal betjäningsskanaler i stationen. Detta sker enklast genom att ur diagram (2) bestämma väntetidsfaktorn F_w som är en multipel av betjäningstiden. Väntetidsfaktorn framgår av Tabell 3.

Tabell 3.

Antal betjä- ningskanaler	Väntetidsfaktorn F_w		
	MG 1	MG 2	MG 3
6			10.0
7	10.0		$\boxed{0.7}$
8	$\boxed{0.9}$		0.22
9	0.35		0.09
10	0.11		0.03
11	0.05	10.0	
12		1.6	
13		$\boxed{0.56}$	
14		0.20	
15		0.06	

Baserat på betjäningstiderna i de tre stationerna kan väntetidsfaktorerna för en försening av en halv dag, en dag, en och en halv dag och två dagar resp. i vardera maskingrupperna beräknas:

Tabell 4.

Försening	Antal tim.	Väntetidsfaktor F_w		
		MG 1	MG 2	MG 3
En halv dag	4.5	0.01	0.40	0.73
En dag	9.0	$\boxed{1.22}$	$\boxed{0.80}$	$\boxed{1.46}$
En och en halv dag	13.5	1.83	1.20	2.19
Två dagar	18.0	2.44	1.00	2.92

De väntetidsfaktorer som angivits i tabell 3 är beräknade på medelankomstintensitet och medelbetjäningstid. Detta innebär att såväl ankomsterna som betjäningstiderna under en tidsperiod kommer att omväxlande över- och understiga dessa medelvärden. Det får därför ur servicesynpunkt anses vara rekommendabelt att balansera maskingruppen så att de förväntade medelväntetiderna understiger vad som för resp. station kan betraktas som acceptabelt. I detta fall har som övre gräns för accepterad medelväntetid satts 1 dag per operation och be-

tjäningsstation. Den maximala acceptabla väntetidsfaktorn har därför i tabell 4 angivits med \square . De förväntade medelväntetiderna under denna acceptnivå har sedan uppsökts i tabell 3, varvid följande balansering erhöles.

Tabell 5.

Maskingrupp	Antal kanaler (parallella maskiner)
MG 1 (Revolversvarvar)	8
MG 2 (Fräsmaskin)	13
MG 3 (Slipmaskin)	7

Litteratur:

- (1) Asplund I.: Prioritering vid tillverkningsbeordring – en metod att effektivisera tillverkningen. Affärs ekonomi 13–15, Stockholm 1963.
- (2) Asplund I.: Optimal Maskinbalansering. En köteoretisk studie av en kundorderstyrd tillverkningsprocess i en mekanisk verkstad. Göteborg 1965. (Stencil).
- (3) Bowman – Fetter: Analyses of Industrial Operations, Homewood 1959.
- (4) Burke, J. P.: The output of a queuing system, Journal of Operations Research Society of America 4, 1956.
- (5) Conway, R. W.: Test of saturated queue. Cornell Production Control Research Committee, Discussion Paper No. 16, November 23, 1960.
- (6) Eilon S.: Elements of production planning and control, London 1962.
- (7) Essén C. G.: Köteori – Operationsanalytiska metoder I. V. A. Stockholm 1961.
- (8) Halldén L.: Köteori – grundbegrepp och användningsområden. Affärs ekonomi 3, Stockholm 1962.
- (9) Jackson, J.: Networks of waiting lines. Journal of Operations Research Society of America, 5, 1957.
- (10) Saaty, T. L.: Elements of queuing theory, New York 1961.

tjäningsstation. Den maximala acceptabla väntetidsfaktorn har därför i tabell 4 angivits med \square . De förväntade medelväntetiderna under denna acceptnivå har sedan uppsökts i tabell 3, varvid följande balansering erhöles.

Tabell 5.

Maskingrupp	Antal kanaler (parallella maskiner)
MG 1 (Revolversvarvar)	8
MG 2 (Fräsmaskin)	13
MG 3 (Slipmaskin)	7

Litteratur:

- (1) Asplund I.: Prioritering vid tillverkningsbeordring – en metod att effektivisera tillverkningen. Affärs ekonomi 13–15, Stockholm 1963.
- (2) Asplund I.: Optimal Maskinbalansering. En köteoretisk studie av en kundorderstyrd tillverkningsprocess i en mekanisk verkstad. Göteborg 1965. (Stencil).
- (3) Bowman – Fetter: Analyses of Industrial Operations, Homewood 1959.
- (4) Burke, J. P.: The output of a queuing system, Journal of Operations Research Society of America 4, 1956.
- (5) Conway, R. W.: Test of saturated queue. Cornell Production Control Research Committee, Discussion Paper No. 16, November 23, 1960.
- (6) Eilon S.: Elements of production planning and control, London 1962.
- (7) Essén C. G.: Köteori – Operationsanalytiska metoder I. V. A. Stockholm 1961.
- (8) Halldén L.: Köteori – grundbegrepp och användningsområden. Affärs ekonomi 3, Stockholm 1962.
- (9) Jackson, J.: Networks of waiting lines. Journal of Operations Research Society of America, 5, 1957.
- (10) Saaty, T. L.: Elements of queuing theory, New York 1961.