DK 681.3.01 : 681.322.06.008

Ziele und Hilfsmittel der Betriebsmittelverwaltung in Rechenanlagen*

Bernhard Walke

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. W. T. Runge zum 80. Geburtstag

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert. Der Bundesminister für Forschung und Technologie übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

Einleitung und Zusammenfassung

Die Leistung eines Rechenzentrums kann durch kostenintensive Erweiterung einzelner Betriebsmittel[1]) oder auch durch nahezu kostenneutrale Maßnahmen, wie die Einführung von leistungssteigernden Strategien der Betriebsmittelverwaltung[1]) erhöht werden. Bei der Diskussion von Strategien kann man die Arbeitsweise des Betriebssystems[1]) (multiprogramming, viele Transporte je Programmlauf usw.) als gegeben ansehen. Eine allgemeinere, aber wohl bisher nicht angegangene Fragestellung wäre es, das Betriebssystem selbst mit in die Optimierungsuntersuchungen einzubeziehen. Etwa mit dem Ziel, anzugeben, wie ein Betriebssystem beschaffen sein sollte, um ein durch bekannte Benutzerprogramme gegebenes Aufgabenprofil leistungs-preisgünstig zu bearbeiten.

Beherrscht man alle Hilfsmittel, um für eine gegebene Anlagenkonfiguration die maximale Leistung zu erreichen, dann kann man umgekehrt auch eine Anlage für eine geforderte Leistung optimal dimensionieren. Dabei erhält man eine besonders preisgünstige Konfiguration. Die folgenden Betrachtungen sollen demonstrieren, wie durch geeignete Organisation des Arbeitsablaufs einer Rechenanlage die Leistung (gemessen in fertiggestellten *Jobs* je Zeiteinheit) deutlich gesteigert werden kann. Bei unveränderten Betriebskosten sinkt damit der Preis je bearbeiteten Job deutlich. Die vorgestellten Methoden sind bei mittleren und großen Rechenanlagen anwendbar — das unterstellte Aufgabenprofil ist typisch für den technisch-wissenschaftlichen Rechenzentrums-Betrieb.

1. Einführung von Modellen (Programmbearbeitung, Rechenanlage) und von Strategien

Im sogenannten *Stapelbetrieb* eines Rechenzentrums werden die Jobs über Lochkarten und den Lochkartenleser in die Anlage eingegeben. Die so eingelesenen Daten werden auf einem *Hintergrundspeicher*, beispielsweise einem Plattenspeicher, gelagert, und stehen dort auf Abruf zur Bearbeitung bereit (Bild 1). Der Plattenspeicher ist über einen *Transportkanal* mit dem *Zentralspeicher* der Rechenanlage (meistens einem Kernspeicher) verbunden. Die vom Benutzer geforderte Verarbeitungsleistung muß vom sogenannten *Rechnerkern* erbracht werden. Der Rechnerkern kann nur solche Jobs bearbeiten, deren Daten im Zentralspeicher verfügbar sind. Damit also ein im Plattenspeicher wartender Job bearbeitet werden kann, muß er über den Transportkanal in den Zentralspeicher transportiert werden. Anschließend kann der Rechnerkern die einzelnen Befehle des Jobs abarbeiten. Das Resultat der Bearbeitung wird üblicherweise auf einen Schnelldrucker ausgegeben.

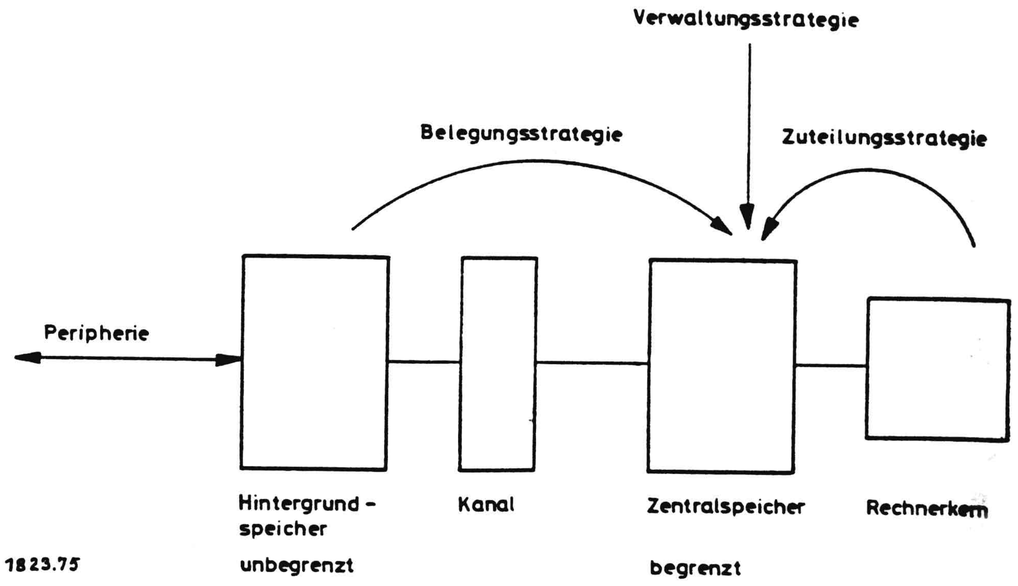

Bild 1. Wichtige Betriebsmittel einer Rechenanlage und Strategien zu ihrer Verwaltung (vgl. auch Bild 3)

Für die Optimierung des Betriebsablaufs betrachten wir ein *Modell* dieser Rechenanlage (Bild 3). Es enthält nur die wichtigsten und teuersten Betriebsmittel, nämlich Rechnerkern, Zentralspeicher und Transportkanal. Der Plattenspeicher wird nur bezüglich seiner Transporteigenschaften, nicht aber bezüglich seiner Größe betrachtet. Ein- und Ausgabegeräte wie Lochkartenleser und Schnelldrucker müssen so dimensioniert sein, daß sie die Leistung der Anlage nicht spürbar begrenzen.

Unterstellt man, daß im Zentralspeicher nur ein einziges Programm Platz hat, dann können Kanal und Rechnerkern nur abwechselnd arbeiten (*monoprogramming*). Der Rechnerkern kann nur an einem vollständig in den Zentralspeicher geladenen Programm arbeiten. Währenddessen muß der Kanal warten. Umgekehrt muß der Rechnerkern warten, solange der Kanal transportiert.

Ist im Zentralspeicher Platz für die Befehle und Daten von mehr als einem Programm, dann spricht man von *multiprogramming*.

* Überarbeitung eines Vortrags auf der AEG-TELEFUNKEN-Professorenkonferenz, Ulm, 26./27. 2. 1975

1) Zu den *Betriebsmitteln* einer Rechenanlage gehören primär der Rechnerkern, der Zentralspeicher, die Transportkanäle, der Hintergrundspeicher, dann aber auch Peripheriegeräte wie Kartenspeicher, Schnelldrucker, Sichtgerät. *Betriebsmittelverwaltung* ist die Steuerung des Einsatzes der Betriebsmittel in der zeitlich richtigen Ablauffolge im Hinblick auf gegebene Betriebsziele. *Betriebssystem* ist ein Programmpaket zum Betreiben der *Be*triebsmittel. Die Betriebsmittelverwaltung ist demgemäß ein Teil des Betriebssystems.

Dann können mehrere Programme gleichzeitig bedient werden: Während *eines* durch den Rechnerkern bearbeitet wird, kann ein *anderes* transportiert werden. Hier ist eine Überlappung von Transport- und Rechenarbeit möglich.

Bei monoprogramming hat man nur sehr beschränkte Möglichkeiten, die Leistung einer Rechenanlage durch Methoden der *Betriebsmittelverwaltung* zu beeinflussen. Dagegen ergibt sich bei Anlagen mit multiprogramming eine große Vielfalt von Ansatzpunkten. Wir unterstellen im folgenden einen für multiprogramming ausreichend großen Zentralspeicher, geben aber zum Vergleich auch die Ergebnisse für monoprogramming an.

Rechenanlagen mit multiprogramming sind in der Regel mit Hardware-Einrichtungen ausgestattet, die es dem Rechnerkern erlauben, ohne großen Zeitverlust von der Bearbeitung eines Programms im Zentralspeicher auf ein anderes dort wartendes überzugehen. Die Festlegung, welches Programm gerade vom Rechnerkern zu bearbeiten ist, wird mit Hilfe einer *Rechnerkern-Zuteilungsstrategie* getroffen. Die einfachste Strategie ist die *nichtunterbrechende* Strategie *FCFS* (*f*irst *c*ome *f*irst *s*erve). *Unterbrechende* Strategien benötigen Kriterien, nach denen sie sich richten. Ein wichtiges Kriterium kann sein, von der Bearbeitungszeit her gesehen kurze Programme *vor* langen zu bearbeiten. Bei beengtem Zentralspeicher wird damit am besten dafür gesorgt, daß baldigst Platz frei wird.

Die Entscheidung, welches Programm aus dem Hintergrundspeicher auf einen freien Platz in den Zentralspeicher geladen werden soll, wird von der *Zentralspeicher-Belegungsstrategie* gesteuert. Es gehört zu ihren Aufgaben, trotz begrenzten Zentralspeichers, aus der Sicht des Rechnerkerns einen unbegrenzten Zentralspeicher zu *simulieren*. Auch hier ist die einfachste Strategie FCFS (Reihenfolge des Eintreffens im Hintergrundspeicher einhalten). Kompliziertere Strategien streben eine gute Ausnutzung des vorhandenen Zentralspeichers an und versuchen, günstige Voraussetzungen für den wirkungsvollen Einsatz der Rechnerkern-Zuteilungsstrategie zu schaffen. Die Zentralspeicher-*Belegungsstrategie* kann man so als verlängerten Arm der Rechnerkern-*Zuteilungs*strategie ansehen.

Die Steuerung des Programmflusses mit Hilfe von Strategien findet man bei allen Rechenanlagen, unabhängig von ihrer Größe. Man kann jedoch sagen, daß die Strategien mit zunehmender Anlagengröße komplizierter werden.

Bei genauerer Betrachtung des zeitlichen Ablaufs der Bearbeitung eines Programms stellt man fest, daß nach der ersten Zuteilung von Zentralspeicher an ein Programm in der Regel eine große Zahl von Rechen- und Transport-Phasen einander abwechseln. Das liegt daran, daß weder das *Betriebssystem* noch das *Benutzerprogramm* genügend Platz im Zentralspeicher

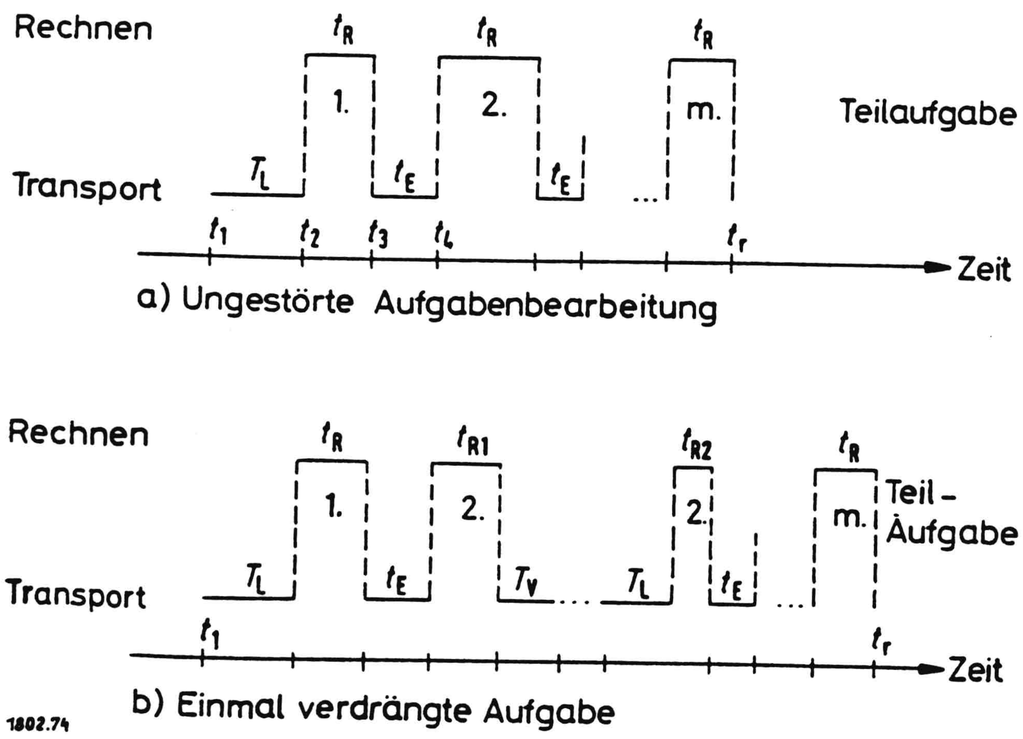

Bild 2. Modell der Programmbearbeitung

a) ungestörte Aufgabenbearbeitung
b) einmal verdrängte Aufgabe

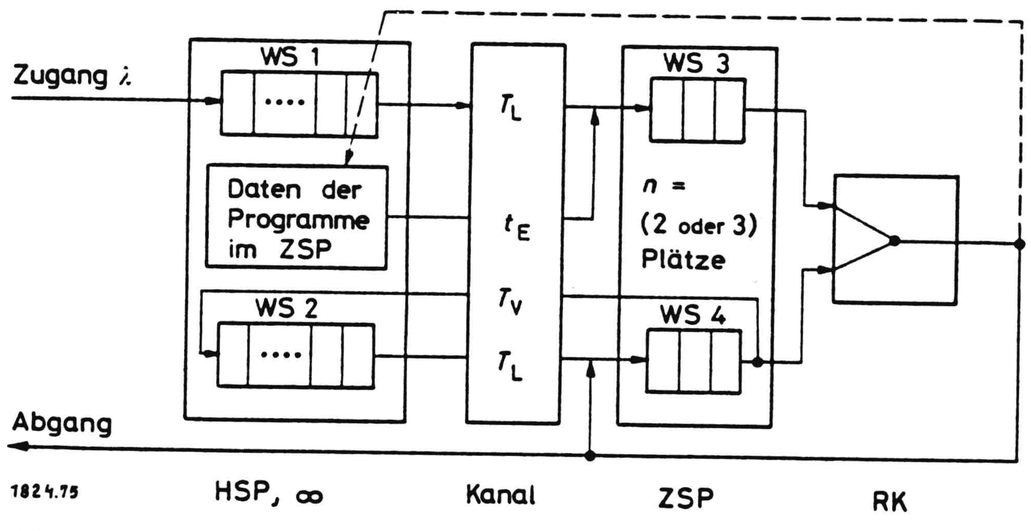

Bild 3. Modell der Rechenanlage

HSP Hintergrundspeicher
ZSP Zentralspeicher
RK Rechnerkern
WS Warteschlange

bekommen, um dort alle Befehle und Daten zugriffsbereit zu halten. Im Fehlfall wird die Rechenarbeit unterbrochen und der notwendige Transport vom Hintergrundspeicher veranlaßt. Damit stoßen wir auf Verhältnisse, wie sie durch ein weiteres Mittel der Betriebsmittelverwaltung, nämlich die *Zentralspeicher-Verwaltung* geschaffen werden. Sie legt fest, wieviele Programme sich zu jedem Zeitpunkt in den Arbeitsspeicher teilen müssen.

Bild 2a zeigt schematisch die Transport-Rechenzeitfolge eines Programmlaufs (Aufgabe = Job genannt) unter der Annahme, daß keine Störungen der Bearbeitung durch konkurrierende Aufgaben auftreten. Nach dem Ladetransport der Dauer T_L kann die Rechenzeit t_R der ersten Teilaufgabe abgearbeitet werden. Anschließend ist die Ausführung eines Ergänzungstransports der Dauer t_E die Voraussetzung dafür, daß die Aufgabe weitergerechnet werden kann. Bei größeren Rechenanlagen kann eine Aufgabe (Job) durchaus einige hundert Teilaufgaben haben. Störungen der Bearbeitung einer Aufgabe durch konkurrierende Aufgaben führen dazu, daß

— die Rechenarbeit an einer Teilaufgabe vorübergehend unterbrochen wird (Lücke in t_R),
— ein Transport nicht sofort bei Bedarf ausgeführt wird (Lücke vor t_E),
— eine Aufgabe mit ihren Daten vorübergehend aus dem Zentralspeicher *verdrängt* werden muß (Bild 2b).

Letzteres kann auch von der Zentralspeicher-Belegungsstrategie aus Gründen der Leistungs-Optimierung *veranlaßt* werden. Dann treten eine *Verdrängungs*-Transportzeit T_V und später eine *Wiederlade*-Transportzeit T_L auf. Die Zeiten T_L und T_V sind üblicherweise $\gg t_E$.

In Bild 3 ist das Rechner-Modell wirklichkeitsnäher gestaltet worden: Es gibt einen Zugangsprozeß unbearbeiteter Programme in dem Hintergrundspeicher HSP mit λ Aufgaben/Zeiteinheit. Unbearbeitete Aufgaben werden in der Warteschlange 1 (WS 1) gesammelt. Jede von ihnen benötigt eine Transportzeit T_L. In der Warteschlange 3 (WS 3) des Zentralspeichers ZSP stehen Aufgaben mit ihrer jeweils ersten, oder einer weiteren Teilaufgabe, die durch einen Ergänzungstransport t_E ermöglicht wurde. In WS 4 des Zentralspeichers ZSP können bestimmte Programme aus der WS 3 übernommen werden, für die eine Verdrängung aus dem ZSP zugelassen wird. Verdrängte Programme werden im Hintergrundspeicher HSP in WS 2 verwaltet. Mit von Null an steigender Zugangsrate λ nimmt auch die Fertigstellungsrate von Aufgaben zu und erreicht schließlich eine Sättigung. Diese Sättigungs-Fertigstellungsrate heißt *maximaler Durchsatz*. Die später diskutierten Ergebnisse sind für dieses Rechnermodell mit n Plätzen im Zentralspeicher (WS 3 + WS 4 insgesamt) durch Berechnung bzw. Simulation gewonnen worden.

Bild 4 beschreibt den Durchlauf einer Aufgabe durch das Rechner-Modell. Die Anzahl der Schleifendurchläufe hängt ab von der Zahl der Teilaufgaben (obere Schleife), der Zahl der Verdrängungen (linke Schleife) und der Anzahl der Unterbrechungen der Rechnerkern-Arbeit an einer prioritätslosen Teilaufgabe aus

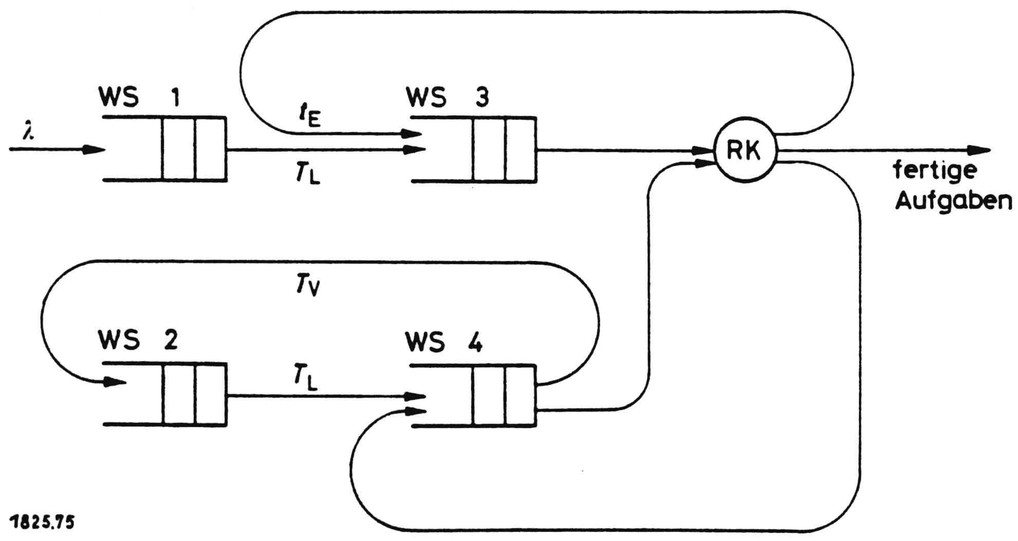

Bild 4. Durchlauf einer Aufgabe durch das Rechnermodell

WS 4 durch eine Teilaufgabe aus WS 3 (rechte Schleife). Betrachtet man die Vorgänge bei der Programmbearbeitung in einer Rechenanlage als statistischen Prozeß, dann kann man nach sorgfältigen Beobachtungen Wahrscheinlichkeiten für die Dauer eines Transports oder einer Teilaufgabenrechenzeit angeben. Die Transport- und Rechenzeiten in Bild 2 können dann als *Zufallsvariable* mit bekannten Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktionen betrachtet werden. Für die Teilaufgaben-Rechenzeit (Bild 5) ist die Streuung sehr groß — deutlich größer als bei einer negativ exponentiellen Verteilung [4] (siehe Vergleichskurve). Diese Voraussetzung ist wesentlich für die folgenden Betrachtungen. Transportzeiten dürfen, wie entsprechende Messungen ergeben, durch negativ exponentielle Verteilungen angenähert werden.

2. Einfluß der Leistung von Betriebsmitteln und von Strategien auf Optimierungsziele

Der *maximale Durchsatz* (Aufgaben/Zeiteinheit) ist das allgemein anerkannte Leistungsmaß und Optimierungsziel für Rechenanlagen im Stapelbetrieb. Neben diesem Optimierungsziel kann es noch weitere Anforderungen an eine Rechenanlage geben, die man mit dem Begriff *Bedienqualität* umschreiben kann. Sie führen in der Regel zu einer Durchsatzminderung (Bild 6). Bei Teilnehmer-Rechensystemen sind auch die zwei Kriterien *„kleine mittlere Antwortzeit"* und *„gerechte Bedienung"* wichtig. Bei Prozeßrechnern spielt die Garantie einer *maximalen Antwortzeit* eine wichtige Rolle.

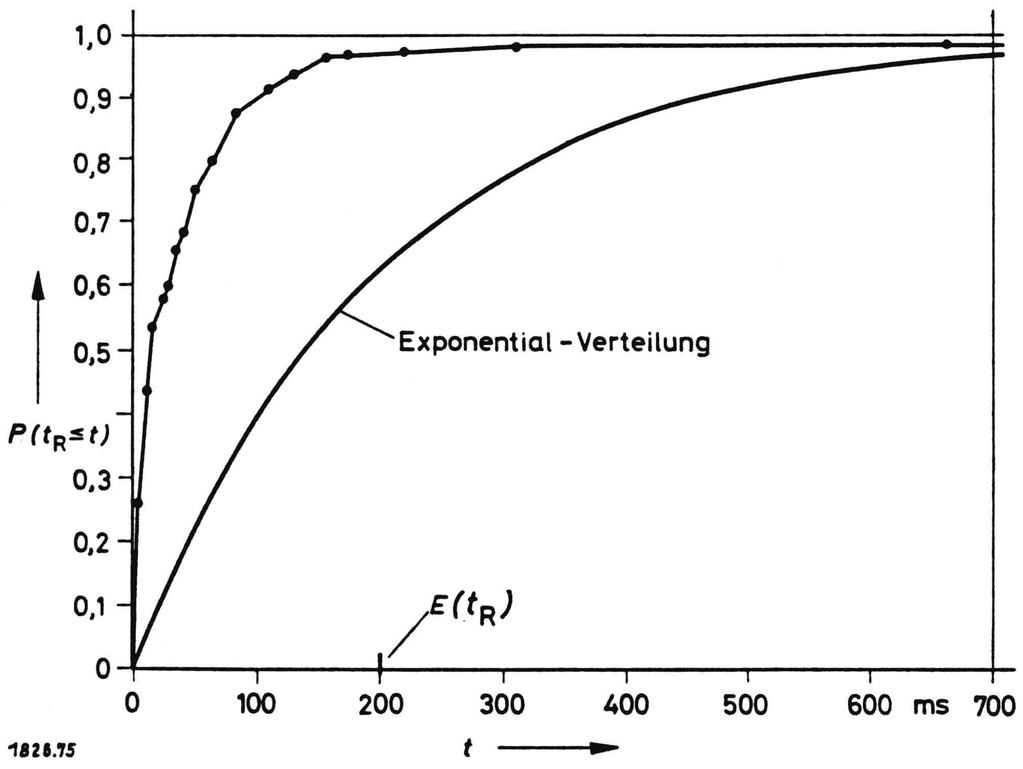

Bild 5. Gemessene Summenhäufigkeit von Teilaufgaben-Rechenzeiten bei der TC-TR 440 und Exponential-Verteilung gleichen Erwartungswertes $E(t_R)$
Bei der Exponentialgleichung gilt $P(t_R \leqq t) = 1 - e^{-t/E(t_R)}$

1. LEISTUNG
   + DURCHSATZ (Aufgaben pro Zeiteinheit): maximal
2. BEDIENQUALITÄT
   + MITTLERE ANTWORTZEIT: klein
   + MITTLERE ANTWORTZEIT ALS FUNKTION DER BEARBEITUNGSZEIT (gerecht)
   + ANTWORTZEIT-GARANTIE (Maximalwert)

1827.75

Bild 6. Übliche Optimierungsziele für Rechenanlagen

Der maximale Durchsatz D wird beeinflußt durch:

1. LEISTUNG/GRÖSSE von Betriebsmitteln
   + RECHNERKERN (Operationen/s)
     ~ mittlere Aufgaben-Rechenzeit $E(T_R)$
   + KANAL (Zugriff und Übertragung)
     ~ mittlere Aufgaben-Transportzeit $E(T_H)$
     (ohne Verdrängung)
   + ZENTRALSPEICHER (Zahl der Programm-Plätze)
2. STRATEGIEN
   + RECHNERKERN-ZUTEILUNG
     an bearbeitbare Programme im Zentralspeicher
   + ZENTRALSPEICHER-BELEGUNG
     mit bearbeitbaren Programmen aus dem Hintergrundspeicher
   + ZENTRALSPEICHER-VERWALTUNG
     (dynamische Festlegung der Zahl der Programmplätze)

1828.75

Bild 7. Einflußgrößen für den maximalen Durchsatz

Die Einfluß-Größen für den maximalen Durchsatz sind in Bild 7 zusammengestellt. Wir klammern im folgenden zunächst die Demonstration des Einflusses der Zentralspeicher-Verwaltung auf den Durchsatz aus und holen sie später (Abschnitt 3) nach.

Erstes Beispiel: Abhängigkeit des Durchsatzes von den Einflußgrößen nach Bild 7

Unterstellt man eine entartet negativ exponentielle Teilaufgaben-Rechenzeitverteilung [4] mit großem Variationskoeffizienten ($VK = 10$) und eine negativ exponentielle Transportzeitverteilung, dann kann man die in Bild 8 durchgezogenen Kurven berechnen [2]. Dort ist die Rechnerkernauslastung, nämlich das Produkt aus maximalem Durchsatz D und Aufgaben-Rechenzeit-Erwartungswert $E(T_R)$, über dem Verhältnis der Erwartungswerte für Transport- und Rechenzeit aufgetragen. Man sieht wenn man beispielsweise die Schar der durchgezogenen Kurven betrachtet, daß bei gegebenem Verhältnis $E(T_H)/E(T_R)$ die Rechnerkernauslastung mit steigender Zahl n der Programmplätze im Zentralspeicher deutlich ansteigt. Ein entsprechend vergrößerter Zentralspeicher steigert also den maximalen Durchsatz. Mit abnehmender Transportleistung nimmt $E(T_H)$ zu. Bei konstanter Rechnerkernleistung, also festem Erwartungswert $E(T_R)$, nimmt der normierte maximale Durchsatz bei konstanter Zahl n der Zentralspeicher-Plätze ab. Mit abnehmender Leistung des Rechnerkerns nimmt $E(T_R)$ zu. Bleiben die übrigen Parameter konstant, dann nimmt zwar die Rechnerkernauslastung $DE(T_R)$ zu, aber um weniger, als der Vergrößerung von $E(T_R)$ entspräche, d.h. der maximale Durchsatz nimmt ab.

Den Einfluß von Strategien kann man an Bild 8 ebenfalls demonstrieren. Die durchgezogenen Kurven gelten für eine optimale Rechnerkern-Zuteilungsstrategie. Die gestrichelten[2]) gelten für die Strategie „Reihenfolge einhalten" (FCFS). Sie wurden durch Simulation gewonnen. Bei der ungünstigen Rechnerkern-Zutei-

[2]) $(2 \approx 3)$ bedeutet das Aufeinanderfallen zweier gestrichelter Kurven

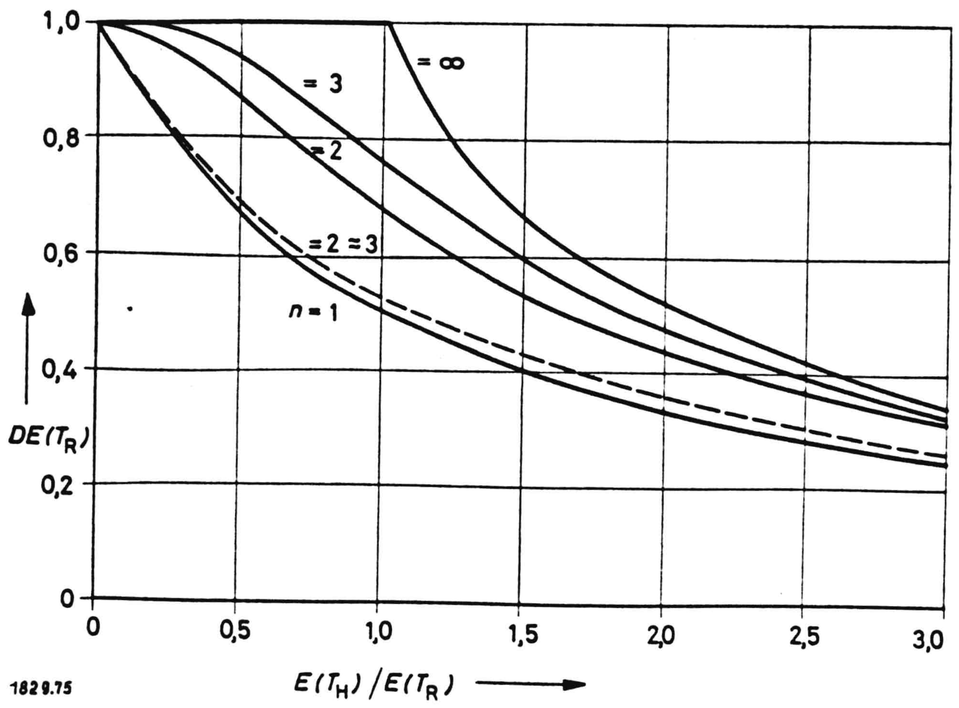

Bild 8. Rechnerkernauslastung bei n Plätzen im Zentralspeicher
Strategien:

RK-Zuteilung: optimal ———, FCFS — — —; ZSP-Belegung: FCFS

lung FCFS würde man sehr viele Plätze (also einen sehr großen Zentralspeicher) benötigen, um die Rechnerkernauslastung der optimalen Strategie bei 2 oder gar 3 Plätzen zu erreichen. Das kann man daraus schließen, daß sich die gestrichelten Kurven für 2 oder 3 Plätze nur so geringfügig unterscheiden, daß das in der Strichstärke untergeht. Als Zentralspeicher-Belegungsstrategie ist FCFS gewählt.

In Bild 9 ist eine optimale Rechnerkern-Zuteilungsstrategie unterstellt. Die gestrichelten Kurven gelten für die ZSP-Belegungsstrategie FCFS, die durchgezogenen für eine besonders günstige Belegungsstrategie mit Verdrängungen. Für die Berechnung der durchgezogenen Kurven ist (vgl. Bild 2) für die Transportzeit-Erwartungswerte $E(T_L) = E(T_V) = 3E(t_E)$ unterstellt, d.h. Ergänzungstransporte beanspruchen im Mittel $^1/_3$ der Transportzeit eines Lade- bzw. Verdrängungstransportes. Aus den Bildern 8 und 9 ist beim Vergleich der durchgezogenen Kurven (n = 2, 3) mit den gestrichelten Kurven zu sehen, welch großen Einfluß bei unveränderter Dimensionierung der Betriebsmittel Strategien haben können. Die gezeigten Ergebnisse gelten für technisch-wissenschaftliche Aufgabenprofile. Selbstverständlich kann man unter Verzicht auf solche günstigen Strategien (wenn man sie nicht kennt) durch entsprechend höhere Leistung (Größe) der Betriebsmittel den entsprechenden maximalen Durchsatz erzielen. Heutige Betriebssysteme arbeiten zum Teil noch mit sehr einfachen, keineswegs optimalen Strategien.

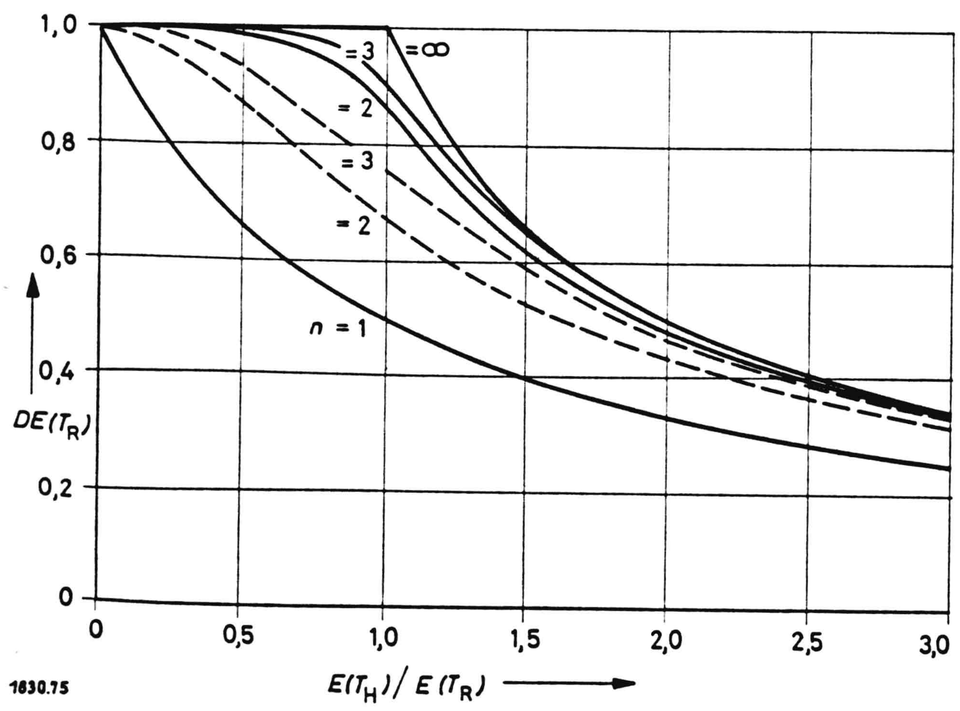

Bild 9. Rechnerkernauslastung bei n Plätzen im Zentralspeicher
Strategien:

RK-Zuteilung: optimal, ZSP-Belegung: optimal ———, FCFS — — —

Zweites Beispiel: Einfluß von Strategien auf die mittlere Antwortzeit von Aufgaben

Die Antwortzeit T_A ist die Zeit, die vom Zeitpunkt des Eintreffens im Hintergrundspeicher (Bild 3) bis zur Fertigbearbeitung der Aufgabe verstreicht. Die mittlere Antwortzeit $E(T_A)$ hängt sehr von der Belastung jenes Betriebsmittels ab, das den Engpaß der Rechenanlage bildet. In Bild 10 ist dies der Rechnerkern (wegen der Annahme $E(T_H)/E(T_R) < 1{,}0$). Dort ist die normierte mittlere Antwortzeit einer Aufgabe bei verschiedenen Strategien über dem Angebot $\lambda \cdot E(T_R)$ ($\hat{=}$ der Rechnerkernauslastung) dargestellt. Wollte man den maximalen Durchsatz erreichen, dann müßte $\lambda = D$ sein und $E(T_A)$ wäre ∞ (Polstellen der Kurven). Soll $E(T_A)$ kleiner sein, dann muß man zugunsten der mittleren Antwortzeit Durchsatz opfern. Es sind Ergebnisse für *zwei* und (zur Orientierung) *unendlich* viele Programmplätze im Zentralspeicher dargestellt. Bei unbegrenztem Zentralspeicher spielt die ZSP-Belegungsstrategie keine Rolle und kann beliebig sein. Die Kurven für zwei Plätze unterscheiden sich deshalb, weil verschiedene Kombinationen von Rechnerkern (RK)-Zuteilung und ZSP-Belegung gewählt worden sind:

RK	FCFS	opt.	opt.
ZSP	FCFS	FCFS	opt.

Will man eine geforderte bezogene mittlere Antwortzeit, etwa $E(T_A)/E(T_R) = 10$ einhalten, so darf bei der ungünstigsten Strategienkombination FCFS/FCFS nur eine Zugangsrate $\lambda < 0{,}5/E(T_R)$ zugelassen werden, bei der besten Kombination opt./opt. darf die Zugangsrate $\lambda > 0{,}7/E(T_R)$ sein. Die zulässige Zugangsrate λ ist ein Maß für die Anzahl der an ein Teilnehmerrechensystem anschließbaren Teilnehmerstationen. Man sieht damit, daß die Strategien der Betriebsmittelverwaltung einen spürbaren Einfluß (im Beispiel Faktor 1,5) auf die Bedienqualität haben.

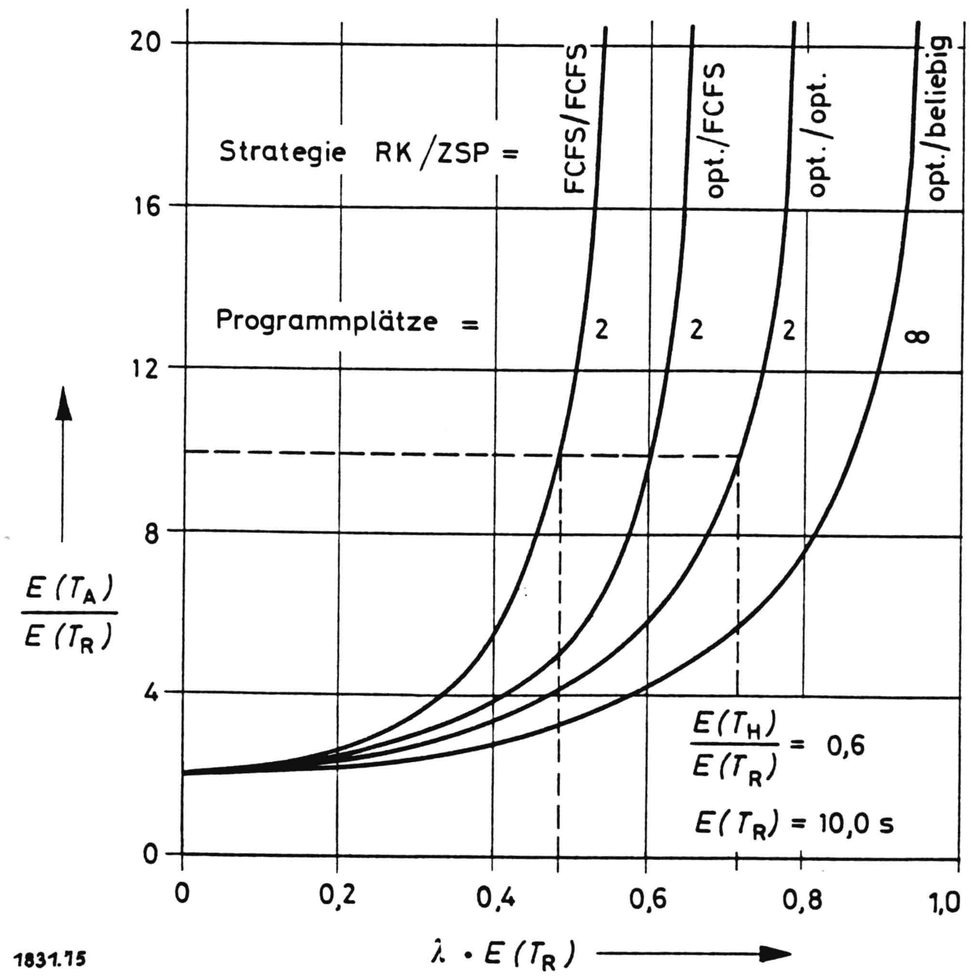

Bild 10. Bezogene mittlere Antwortzeit über dem Angebot für verschiedene Strategie-Paare RK-Zuteilung/ZSP-Belegung

Drittes Beispiel: Strategie-Maßnahmen zur gezielten Zuordnung von Bearbeitungszeit und mittlerer Antwortzeit

Bei ungestörter Abarbeitung beansprucht eine Aufgabe die Bearbeitungszeit $t = t_r - t_1$ (Bild 2a). Aus Bild 11 sieht man, daß

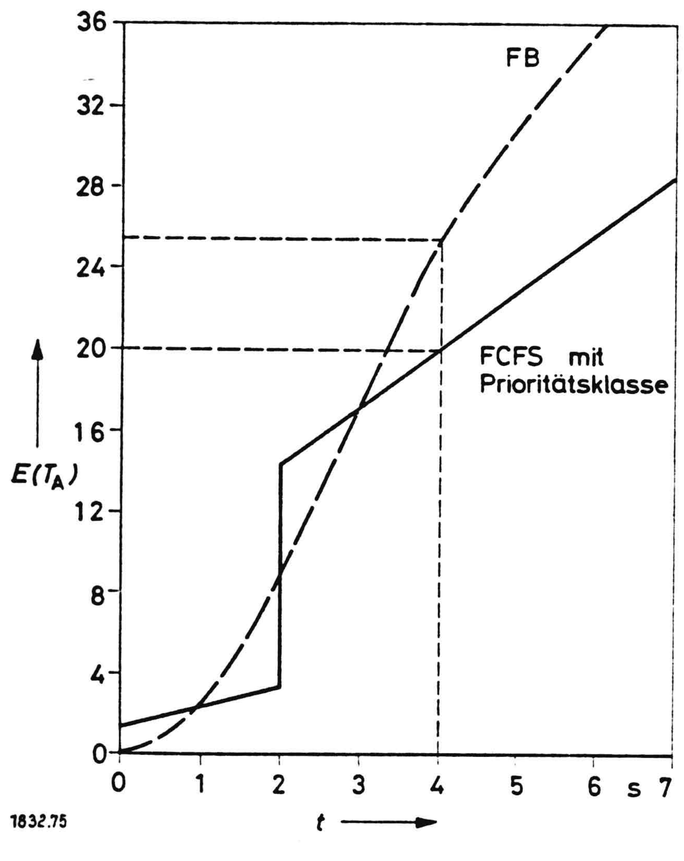

Bild 11. Mittlere Antwortzeit $E(T_A)$ über der benötigten Bearbeitungszeit für verschiedene Rechnerkern-Zuteilungsstrategien [1]

man durch Auswahl geeigneter Strategien einen Einfluß auf die Zuordnung von *tatsächlicher* Bearbeitungszeit einer Aufgabe zu ihrer *erwarteten* Antwortzeit $E(T_A)$ hat. Beispielsweise kann man für Aufgaben mit 4 s Bearbeitungszeit 20 s (oder auch 26 s) als mittlere Antwortzeit erzielen. (Das Rechner-Modell hat einen unbegrenzten Zentralspeicher, so daß nur RK-Zuteilungsstrategien betrachtet werden müssen [1]). Bedient man irgendwelche Bearbeitungszeiten bevorzugt, dann werden dafür andere Bearbeitungszeiten benachteiligt (beispielsweise ist für $2 < t < 3$ FCFS schlechter als FB [1])[3]). Bei der Betrachtung des Ergebnisses in Bild 11 muß man berücksichtigen, daß große Bearbeitungszeiten sehr viel seltener als kleinere auftreten.

Viertes Beispiel: Abhängigkeit der Antwortzeit von Strategien
Neben der erwarteten Antwortzeit $E(T_A)$ ist häufig die tatsächlich erzielbare Antwortzeit T_A interessant. Zumindest möchte man die Wahrscheinlichkeit dafür kennen, daß eine vorgegebene Antwortzeit eingehalten bzw. unterschritten wird.
Bild 12 zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Antwortzeit von Aufgaben für die optimale Strategien-Kombination *opt./opt.* (gestrichelt) und eine ungünstigere Kombination. Bei der günstigeren Strategien-Kombination ist nicht nur die bezogene mittlere Antwortzeit kleiner (3,9 s statt 6,5 s bei der ungünstigeren Kombination), sondern auch die Antwortzeitverteilung günstiger. Für die ungünstige Strategien-Kombination wird beispielsweise eine vorgegebene Antwortzeit von 4 s nur mit der Wahrscheinlichkeit 0,85 unterschritten gegenüber 0,97 bei günstigerer Kombination. Ein Ansatz zur mathematischen Formulierung der Bedienqualität wird in [6] gegeben.

[3]) FB = Feed Back (Es wird dauernd dafür gesorgt, daß jede Aufgabe gleiche Rechenzeit verbraucht hat.)

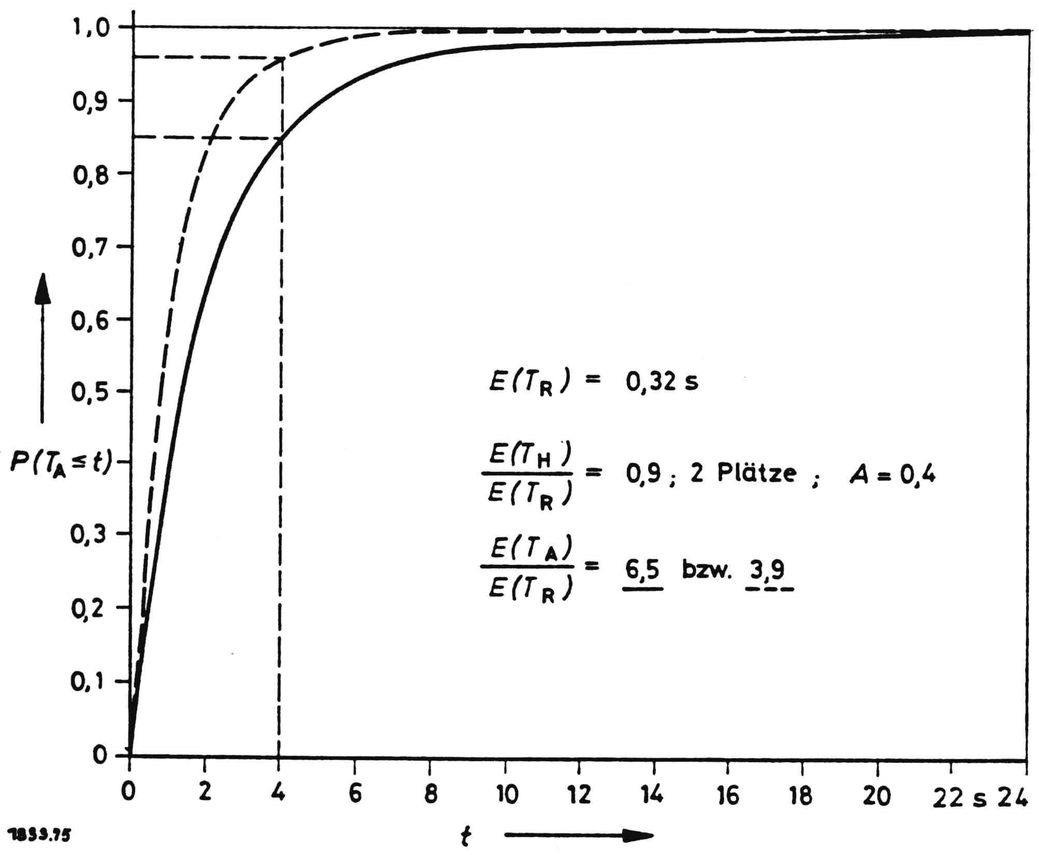

Bild 12. Antwortzeit-Verteilungen für optimale Strategien RK/ZSP (— — —) und ungünstigere Strategien (————)

3. Zur optimalen Verwaltung des Zentralspeichers

Bei den bisher angestellten Betrachtungen haben wir von Programmplätzen im Zentralspeicher gesprochen. Es gehört zu den schwierigen Problemen der Betriebsmittelverwaltung anzugeben, wieviel K-Byte ein solcher Platz groß sein muß, um die gegebenen Optimierungsziele zu erreichen. Entsprechende Aussagen sind auch für das Betriebssystem und seine Dienstleistungsprogramme notwendig. Die dynamische Festlegung der Zahl von Programmplätzen wird von der Zentralspeicher-Verwaltungsstrategie vorgenommen.

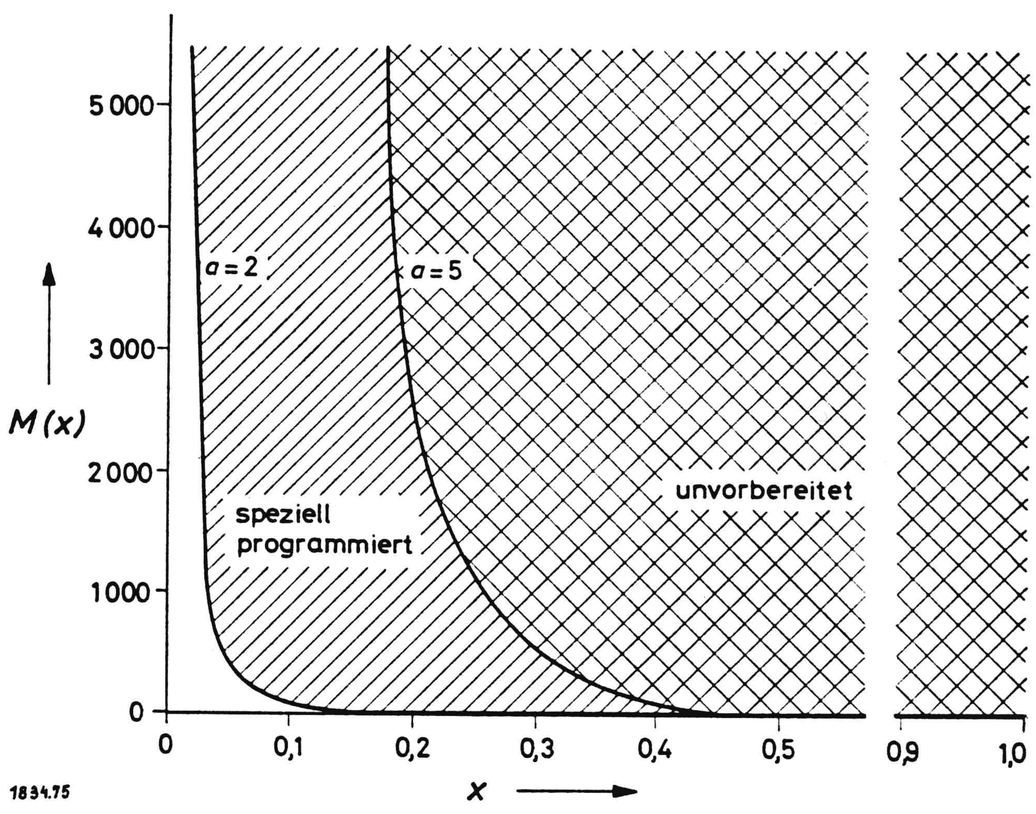

Bild 13. Näherungen $M(x) = x^{-a}$ für die Zahl der Zusatztransporte $M(x)$ wegen Platzmangel im Zentralspeicher als Funktion des Ladeanteils x für zwei Programmtypen (speziell: $a \geqq 2$ bzw. unvorbereitet: $a \geqq 5$).

Bild 13 gibt einen Überblick über das Verhalten von Programmen, wenn man sie zum Anteil x in den Zentralspeicher lädt. An der Ordinate ist die Zahl der Zusatztransporte $M(x)$ aufgetragen, die deshalb entstehen, weil ein Programm nicht vollständig geladen ist. Die beiden Kurven sind Näherungen $M(x) = x^{-a}$ an Meßkurven für verschiedene Programme. Näherungen mit $a \geqq 5$ sind typisch für Benutzerprogramme, die nicht speziell für die Bearbeitung bei ZSP-Platzbeschränkung vorbereitet sind. $2 \leqq a < 5$ ist für speziell programmierte Aufgaben erreichbar. Programme streuen in ihrer Größe. Wir betrachten im folgenden den Einfluß verschiedener Zentralspeicher-Verwaltungen auf den maximalen Durchsatz. Dazu sei eine untere Schranke für den multiprogramming-Grad vorgegeben: Ein Zentralspeicher ZSP der Größe *GR* soll gleichzeitig mindestens *n* Programme aufnehmen, auch wenn sie nicht alle vollständig Platz haben. Passen zeitweise mehr als *n* Programme vollständig in den Zentralspeicher, dann werden sie zugelassen. Man berechnet für diese Zentralspeicher-Verwaltungsstrategie bei verschiedenen Parameterwerten *n* und zwei interessierenden Beispielen $E(T_H)/E(T_R)$ für Programme vom Typ $a = 2$ eine Rechnerkernauslastung nach Bild 14 [5]. An der Abszisse steht die bezogene Zentralspeicher-Größe. Man liest ab, daß es für jede Zentralspeicher-Größe eine optimale Zahl *n* gibt. Aus der Kurvenschar für $E(T_H)/E(T_R) = 0{,}25$ liest man beispielsweise ab, daß für $GR/E(G1) < 0{,}8$ nie mehr als ein Programm teilweise geladen werden darf. Dabei

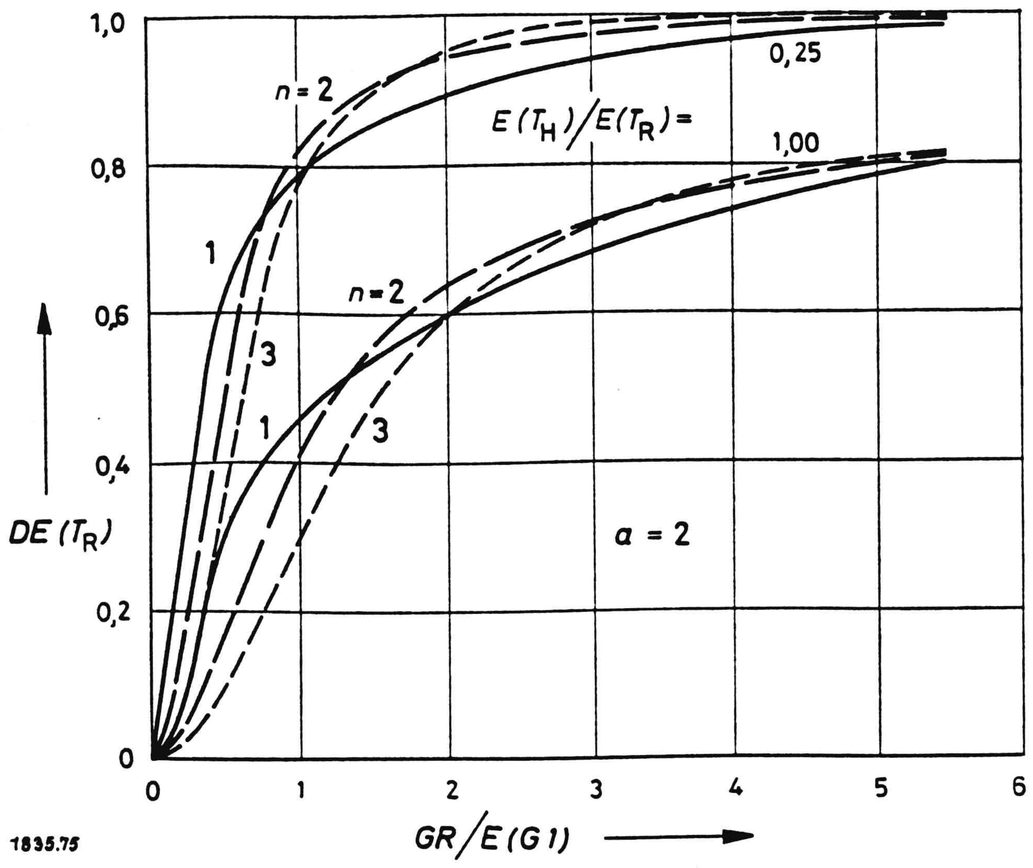

Bild 14. Rechnerkernauslastung über der bezogenen Zentralspeichergröße bei negativ exponentiell verteilter Programmgröße.

ZSP-Verwaltungs-Strategie: „mindestens n Programme laden"
GR = Größe des Zentralspeichers
$E(G1)$ = Erwartungswert der Größe eines Programms

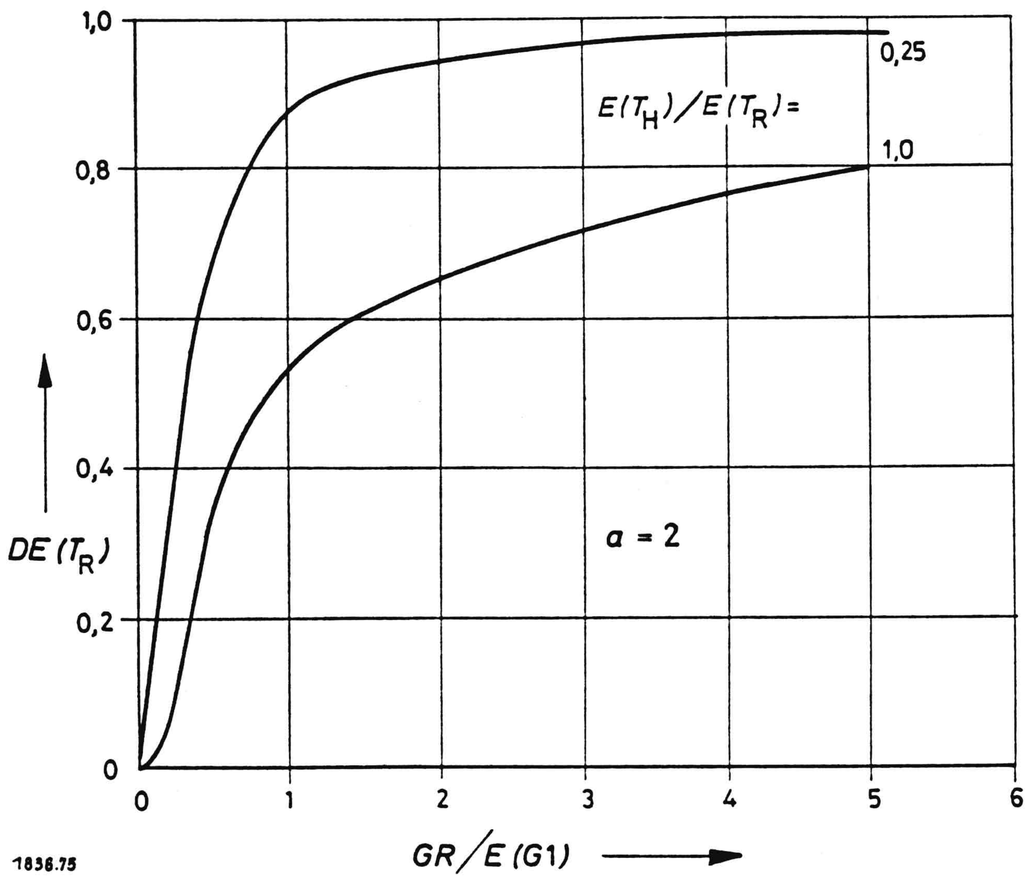

Bild 15. Rechnerkernauslastung über der bezogenen Zentralspeicher-Größe für eine gegenüber Bild 14 verbesserte Zentralspeicher-Verwaltungsstrategie

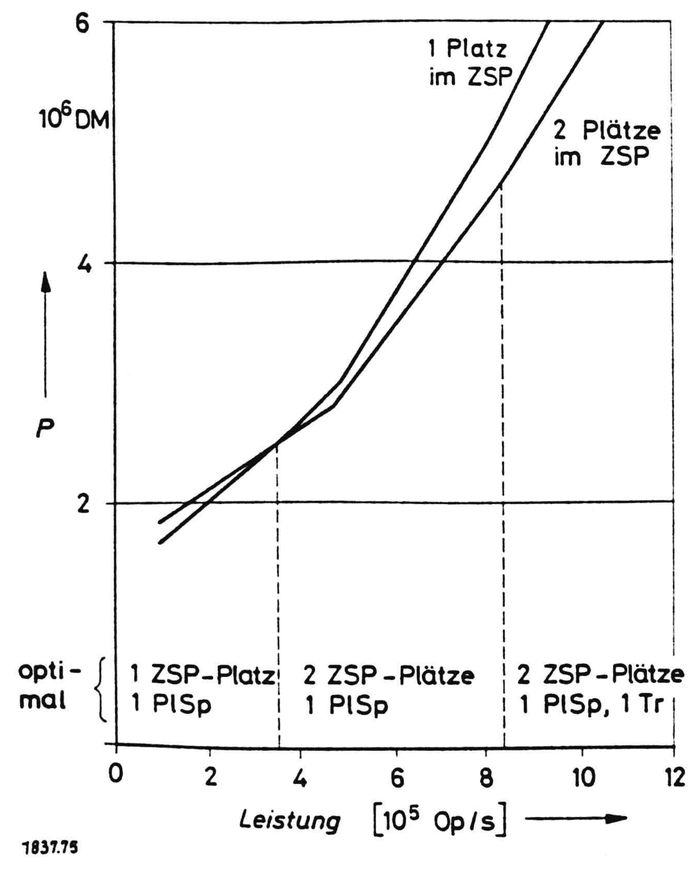

Bild 16. Preisminimale Rechenanlagen

kann es aufgrund der streuenden Programmgröße zeitweise vorkommen, daß mehrere Programme vollständig Platz haben und deshalb geladen sind. Für $0{,}8 < GR/E(G1) < 1{,}6$ müssen, wenn zwei oder mehr Programme nicht vollständig Platz haben, zwei Programme teilweise geladen werden, für $GR/E(G1) > 1{,}6$ muß $n = 3$ sein. Die eben eingeführte starre Unterteilung des Zentralspeichers in mindestens n Plätze und die Berechnung der günstigsten Zahl von Plätzen im Hinblick auf maximalen Durchsatz ist ein erster Schritt, mit dem man sich noch nicht zufrieden geben muß. Läßt man zu, daß sich die Zahl n teilweise geladener Programme dynamisch (abhängig vom aktuellen Platzbedarf der gerade zu bearbeitenden Programme) zwischen 1 und 2 einstellt, dann erhält man eine Rechnerkernauslastung entsprechend Bild 15. Der erreichte maximale Durchsatz D ist zum Teil deutlich größer, als für die jeweils beste Strategie $n = 1$ oder 2 aus Bild 14.

4. Zur Dimensionierung leistungs-preisgünstiger Rechenanlagen

Das Ziel aller Untersuchungen zu einer optimalen Betriebsmittelverwaltung ist es, Richtlinien für die Dimensionierung leistungspreisgünstiger Anlagen für gegebene Betriebsverhältnisse zu erarbeiten. Es ist bereits darauf hingewiesen worden, daß günstige Strategien bei wenigen Programmplätzen im Zentralspeicher ZSP den gleichen Durchsatz erzielen, wie ungünstige Strategien bei vielen Plätzen. Günstige Strategien helfen also, Zentralspeicher-Platz und damit Kosten einzusparen. Ebenso tragen sie dazu bei, die Verarbeitungsleistung des Rechnerkerns und die Übertragungsleistung des Kanals optimal zu nutzen.

Hat man verschiedene Rechnerkerne, Kanäle und Zentralspeicher-Typen zur Auswahl und kennt ihre Preise, dann kann man für bekannte Aufgabenprofile leistungs-preisgünstige Konfigurationen berechnen und zusammenstellen. Solche Konfigurationen sind maßgeschneidert für den jeweiligen Einsatz und erbringen in guter Näherung die geforderte Leistung (Durchsatz, mittlere Antwortzeit) bei minimalem Preis. Es soll hier allerdings nicht verschwiegen werden, daß die als Voraussetzung für die betrachteten Betriebsmittel geforderte Festlegung der Preisfunktion in Abhängigkeit von der Leistung oder Größe der Rechenanlage ein Problem für sich ist.

Die Aufbereitung von Forschungsergebnissen zur Dimensionierung endet deshalb dort, wo Zahlenwerte für diese Preisfunktionen eingesetzt werden müssen. Ein mögliches Ergebnis ist in Bild 16 dargestellt. Die zur Berechnung erforderlichen Preisfunktionen wurden geschätzt. Dort kann man für eine gewünschte Rechnerkern-Leistung ablesen wie teuer eine optimal dimensionierte Anlage mit einem oder zwei Programm-Plätzen im Zentralspeicher ist. Für jede gegebene Rechnerkern-Leistung kann man (das ist bereits im Preis erfaßt) den richtigen Zentralspeicher (mit der geeigneten Zugriffszeit) und die bestmögliche Kombination von Hintergrundspeichern (Trommel-, Plattenspeicher) angeben.

HE/FI-Ulm

Schrifttum

[1] L. Kleinrock and R. R. Muntz: Processor Sharing Queueing Models of Mixed Scheduling Disciplines for Time Shared Systems. Journ. Ass. Comp. Mach. 19 (Juli 1973) 3, pp. 464–482

[2] B. Walke: Durchsatzberechnung für Modelle mit begrenztem Arbeitsspeicher bei einem und zwei Rechnerkernen, sowie einem und zwei Transportkanälen. Elektron. Rechenanl. 15 (1973) 5, S. 223–233

[3] B. Walke: Optimierung der Arbeitsspeicherbelegung in Teilnehmerrechensystemen durch Simulation. Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN 47 (1974) 1, S. 33–46

[4] B. Walke: Entwicklung optimaler Zuteilungsstrategien für Rechner-Modelle durch Simulation und Rechnung. Elektron. Rechenanl.16 (1974) 1, S.9–17

[5] B. Walke: Dissertation, Universität Stuttgart, 1975

[6] B. Walke: Mathematische Formulierung der Bedienqualität von Teilnehmer-Rechensystemen. Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN 48 (1975) 4, S. 151–153.