

**Kapazität**

Die Kapazität bestimmt den möglichen Ausstoß an Werkstücken in einer definierten Zeit – sie wird bestimmt von Durchsatz und Verfügbarkeit:  $CAP = AV \cdot THP$

**Im stationären Zustand ist der mittlere Ausstoß des Systems stets kleiner als seine Kapazität.**

Wird dies nicht beachtet und wird das System mit voller Auslastung betrieben, so wird es instabil.

Kapazitätsberechnung mit Produktmix:

AP 1 ist ein Arbeitsplan für ein Produkt mit 2 Operationen.  
AP 2 ist ein Arbeitsplan für ein Produkt mit 4 Operationen.

Bsp. 1: Bestimmung der Fertigungskapazität

Bei gewählter Maschinenanzahl, Planauslastung und Bearbeitungszeit pro Operation wird die Kapazität berechnet. blau: Eingabeparameter

Vorgabe	Toolanzahl	#A 4	#B 3	#C 1		
AP-Oper	Tool	$U_{plan}$ [%]	ToolHrs/w	RPT [s/pcs]	CAP [pcs/w]	THP [pcs/hr]
AP 1 – Oper 1	A	0,40	268,8	270	3584	13
AP 1 – Oper 2	B	0,40	201,6	30	24192	120
<b>AP 1</b>				<b>CAP</b>	<b>3584</b>	
AP 2 – Oper 1	A	0,40	268,8	120	8064	30
AP 2 – Oper 2	B	0,25	126,0	80	5670	45
AP 2 – Oper 3	C	0,80	134,4	60	8064	60
AP 2 – Oper 4	B	0,25	126,0	40	11340	90
<b>AP 2</b>				<b>CAP</b>	<b>5670</b>	

Bsp. 2: Bestimmung der Maschinenanzahl

Bei gewähltem Startvolumen, Planauslastung und Bearbeitungszeit pro Operation wird benötigte Maschinenanzahl berechnet.

Starts [pcs/w]	AP 1 3500	AP 2 5500				
AP-Oper-Tool	$U_{plan}$ [%]	RPT [s/pcs]	VOL [pcs/w]	Load [hr]	THP [pcs/hr]	req. Tools
AP 1 – Oper 1 – A	0,40	270	3500	262,5	13	3,9
AP 1 – Oper 2 – B	0,40	30	3500	29,2	120	0,4
<b>AP 1</b>		<b>150</b>	<b>7000</b>	<b>291,7</b>	<b>24</b>	
AP 2 – Oper 1 – A	0,40	120	5500	183,3	30	2,7
AP 2 – Oper 2 – B	0,25	80	5500	122,2	45	2,9
AP 2 – Oper 3 – C	0,80	60	5500	91,7	60	0,7
AP 2 – Oper 4 – B	0,25	40	5500	61,1	90	1,5
<b>AP 2</b>		<b>75</b>	<b>22000</b>	<b>458,3</b>	<b>48</b>	
<b>Total</b>		<b>93,1</b>	<b>29000</b>	<b>750,0</b>	<b>39</b>	
notw. Toolanzahl	#A 3,9	#B 2,9	#C 0,7			
Toolauslastung	A 0,80	B 0,90	C 0,80			

$U_{plan}$ : Planauslastung der Maschinen; bestimmt ToolHrs/w

RPT: Bearbeitungszeit an der Operation (Rohprozesszeit)

VOL: Anz. zu bearbeitender Teile an der Operation

Load: Bearbeitungszeit für alle Teile (Maschinenstunden)

THP: Durchsatz/Ausstoß [Teile/Stunde]

RPT pro AP ist die Summe der mengen-gewichteten RPT  $\bar{RPT} = \frac{1}{\sum VOL_i} \cdot \sum RPT_i \cdot VOL_i$

**Cycle Time**

Die Cycle Time ist die Zeit, die ein Wertstück zur Bearbeitung einer Operation an einer Maschine benötigt. Diese Zeit beinhaltet die Bearbeitungszeit und die Wartezeit:  $CT = QT + RPT$

$$QT = \alpha \cdot \frac{U}{1-U} \cdot RPT$$

Die Cycle Time für den Durchlauf einer Folge von Operationen an mehreren Maschinen ist gleich der Summe der Cycle Time der einzelnen Operationen abzüglich überlappender Zeitanteile (z.B. Rüstzeiten).

Zeitanteile, die in die Cycle Time eingehen:

Transportzeit, Wartezeit, Bearbeitungszeit, Zeit zur Batchbildung, Zeit zur Batchbearbeitung, Zeit zur Batchauflösung, Rüstzeiten, Zeit zur Nachbearbeitung,

**Puffer**

Puffer dienen dazu Varianz/Schwankungen im Fertigungsprozess zu kompensieren.

Arten von Puffern:

**Kapazitätspuffer:** Das System muss Reservekapazität bereit halten. Es darf nicht voll ausgelastet sein.

**Zeitpuffer:** Es muss eine Zeitreserve zwischen geplantem Fertigstellungstermin und zugesagtem Liefertermin des Produktes bestehen.

**Materialpuffer:** Es müssen Teile/Werkstücke bereit stehen, die bearbeitet/geliefert werden können, wenn sich Teile/Werkstücke verspäten/nicht vorhanden sind.

Je nach Charakteristik und Ziel des Produktionssystems sind geeignete Arten bzw. Kombinationen dieser Puffer zu realisieren.

**Engpässe / Bottlenecks**

Jedes mehrstufige Produktionssystem (Bedienungssystem) verfügt über ein Bottleneck. Das Bottleneck ist der Produktionsschritt mit der kleinsten Kapazität. Die Kapazität des Bottlenecks bestimmt damit zugleich die Kapazität des Gesamtsystems.

**6 Schritte zur Kapazitätserweiterung des Bottlenecks:**

- 1) Identifiziere das Bottleneck
- 2) Das Bottleneck muss immer mit Material versorgt sein!
- 3) Vermeide hohe WIP-Mengen an anderen Stellen
- 4) Nutze die Bottleneck-Kapazität optimal aus.
- 5) Erhöhe die Kapazität des Bottlenecks
- 6) Beginne den nächsten Zyklus bei 1)

**Little's Law**

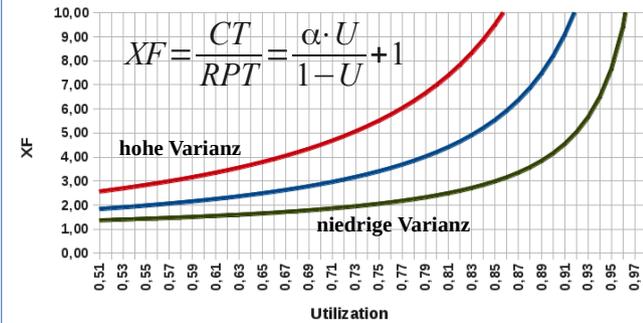
Little's Law beschreibt den Zusammenhang zwischen Materialbestand, Durchsatz und Durchlaufzeit für nicht überlastete, stabil laufende (Bedienungs-)Systeme. Little's Law gilt für Werte im längerfristigen, statistischen Mittel.

$$WIP = THP \cdot CT$$

Little's Law basiert auf der Bedienungstheorie.

**Operating Curve / Betriebskennlinie**

Darstellung des X-Faktors über der Auslastung für hohe, mittlere und geringe Variabilität  $\alpha$



Die Betriebskennlinie beschreibt das dynamische Stabilitätsverhalten einer Fertigungskette. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Cycle Time und Kapazitätsauslastung im eingeschwingenen Zustand des Systems.

**Variabilität: der Variabilitätsfaktor  $\alpha$**

Der Variabilitätsfaktor  $\alpha$  bestimmt sich als:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_e = \frac{c_a^2 + c_e^2}{2}$$

$c_a$  ist das Verhältnis von Standardabweichung der

Zwischenankunftszeit von Werkstücken zu Mittelwert der Zwischenankunftszeit

$c_e$  ist das Verhältnis von Standardabweichung der

Bearbeitungszeit zu Mittelwert der Bearbeitungszeit eines Werkstücks.

**Quellen von Varianz:**

- Materialfluss: Ziel ist ein gleichmäßiger Materialzufluss
- Prozess: Bearbeitungszeit, Bearbeitungsstabilität, Ziel ist eine gleichmäßige Bearbeitung (keine WIP-Berge versetzen)
- Mitarbeiter: Arbeitsorganisation, fachl. Qualifikation

**Wichtige Gesetzmäßigkeiten**

**Kapazität:** Im eingeschwungenen Zustand ist der mittlere Produktausstoß stets kleiner als die mittlere Kapazität des Systems.

**Auslastung:** Wird an einer Anlage die Auslastung erhöht und sonst nichts verändert, so führt dies zu einem nichtlinearen Anstieg von WIP und Cycle Time.

**Varianz:** Steigende Varianz hat stets eine sinkende Leistungsfähigkeit des Produktionssystems zur Folge. In einer Fertigungslinie, die nach dem Push-Prinzip betrieben wird, führt Varianz im vorderen Linienbereich zu einem stärkeren Anstieg der Cycle Time als Varianz im hinteren Linienbereich.

**Nacharbeit:** Bezogen auf einen bestimmten Fertigungsdurchsatz führt Nacharbeit dazu, daß sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Cycle Time ansteigen.

**Mitarbeiter I:** Menschen, nicht Organisationen, verhalten sich selbst-optimierend.

**Mitarbeiter II:** Menschen verschleifen mit der Zeit.

**Mitarbeiter III:** Verantwortung ohne entsprechende Autoritätsbefugnis wirkt demoralisierend und ist kontra-produktiv.

**Gesamt-Anlagen-Effizienz (GAE)  
(Overall Equipment Efficiency OEE)**

Diese Größe gibt an, zu welchem Anteil der Maschinenlaufzeit eine Maschine tatsächlich produziert hat. OEE ist ein Effizienzfaktor ohne Einheit.

$$OEE = f_{AV} \cdot f_{THP} \cdot f_{YIELD}$$

Verfügbarkeitsfaktor:

Anteil der Produktivzeit an der Gesamtzeit (z.B. Arbeitstag)

$$f_{AV} = T_{PROD} / T_{PLAN}$$

Leistungsfaktor:

Gemessener Durchsatz zum Maximaldurchsatz

$$f_{THP} = THP / THP_{MAX}$$

Qualitätsfaktor: Anteil guter Teile

$$f_{YIELD} = n_{GOOD} / (n_{GOOD} + n_{SCRAP})$$

**Fertigungscharakteristik**

**Fließfertigung**

Die Arbeitsplatzanordnung entspricht der Abfolge der Arbeitsschritte. Die Werkstücke werden manuell oder automatisch der Reihe nach von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz bewegt. Jedes Werkstück passiert jeden Arbeitsplatz genau ein Mal. Fließfertigung wird häufig getaktet durchgeführt.

**Werkstattfertigung**

Die Werkstücke werden manuell oder automatisch gemäß ihrem Arbeitsplan von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz bewegt. Dabei können sie auch mehrfach am gleichen Arbeitsplatz bearbeitet werden. Die Anordnung der Arbeitsplätze ist nicht an die Abfolge der Arbeitsschritte gebunden.

**Bestandkontrolle / WIP-Management**

**Push:** Die Einschleusung von Material erfolgt gemäß Produktionsplan ohne Beachtung der aktuellen Situation im Produktionssystem. Es wird davon ausgegangen, daß die Kapazitäten korrekt bestimmt und erreichbar sind. Der Startplan muß darauf abgestimmt sein und darf das System nicht vollständig auslasten. Die genaue Bestimmung und Überwachung der Durchsätze und Verfügbarkeiten der Maschinen und Operationen ist hier besonders wichtig. Der Push-Ansatz sorgt für eine planmäßige Auslastung des Systems.

**Pull:** Die Einschleusung von Material erfolgt dann, wenn ein Produktionsauftrag vorliegt und der erste Arbeitsplatz gemäß Arbeitsplan Materialbedarf meldet. Ein Arbeitsplatz bearbeitet Werkstücke dann, wenn ein nachfolgender Arbeitsplatz Bedarf an Werkstücken hat. Bei diesem Konzept wird Material bedarfsorientiert vom Ende der Fertigungskette her gezogen. Der Pull-Ansatz regelt den Materialbestand im Fertigungssystem.

**KANBAN und ConWIP** sind Realisierungen des Pull-Konzepts. KANBAN verkettet alle Arbeitsplätze sequentiell mit Hilfe von KANBAN-Karten, um so Bestandsmengen zu definieren. Jedes Werkstück an einer Operation belegt eine KANBAN-Karte. Verlässt es die Operation, gibt es die Karte frei und ein neues Werkstück kann nachfolgen. Die Menge der KANBAN-Karten limitiert den WIP – hat dementsprechend Einfluss auf die Maschinenauslastung. ConWIP funktioniert ähnlich. Der Unterschied besteht darin, daß ConWIP den Materialbestand nicht für jede einzelne Operation regelt, sondern für Fertigungsbereiche, die sich über mehrere Operationen erstrecken.

**Formelzeichen und Bedeutung**

$\alpha$	Variabilitätsfaktor für Werkstückzufluss und -bearbeitung
AV	Verfügbarkeit (Availability)
$c_a$	Varianzkoeffizient der Zwischenankunftszeit zwischen zwei Werkstücken
$c_e$	Varianzkoeffizient (rel. Standardabweichung) der Bearbeitungszeit eines Werkstücks
CAP	Kapazität (Capacity) [pcs/d]
CT	Durchlaufzeit (Cycle Time) [d]
OEE	Gesamt-Anlagen-Effizienz (Overall Equipment Efficiency)
QT	Wartezeit (Queue Time) [d]
RPT	Bearbeitungszeit (Raw process time) [d]
$T_{PROD}$	Produktivzeit – Zeit in der die Maschine Teile bearbeitet
$T_{PLAN}$	geplante Arbeitszeit (z.B. 35 Stunden/Woche)
THP	Durchsatz (Throughput) [pcs/hr]
$THP_{MAX}$	maximal erreichbarer Durchsatz bei optimaler Fertigung
U	Auslastung (Utilization)
XF	X-Faktor – Maß für die Fertigungsgeschwindigkeit
WIP	Materialbestand (Work in process) [pcs]

**Varianzanalyse**

**Quadrantenchart der Anlagenverfügbarkeit**

Anlagenverfügbarkeit und Variabilität der Anlagenverfügbarkeit haben starken Einfluss auf die Betriebskennlinie.

**Tipp:** Für jede Maschine täglich die Verfügbarkeit erfassen und mit dem Planwert vergleichen. Nach einer entsprechend langen Periode (1..3 Monate) die Varianz der Verfügbarkeit ermitteln und alle Anlagen in einen Quadrantenchart zeichnen.

