

Leistungsbewertung von Fertigungssystemen durch normierte Betriebskennlinien

Performance Evaluation of Manufacturing Systems by Normalised Operating Curves

Gerald Weigert, TU Dresden, Dresden (Germany), gerald.weigert@tu-dresden.de

Abstract: Besides common key performance indicators mainly so called operating curves are used to assess the performance of manufacturing systems. The advantage of the operating curves is that one can study the system behaviour under varying conditions. However, the systems cannot be compared with each other so easily. To ensure the comparability of the system behaviour the operating curves must therefore be normalised. On the example of a simple simulation model a method will be introduced, to get normalised operating curves. This method is also suitable for more complex or real manufacturing systems.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Fertigungssystems ist ein zentrales Anliegen sowohl bei der Fertigungsplanung und –steuerung als auch bei der Simulation und Optimierung von Fertigungsprozessen. Häufig werden zur Bewertung spezielle Kenngrößen herangezogen. Während aber diese Kenngrößen meist nur eine Bewertung im ausgewählten Arbeitspunkt zulassen, spiegeln Betriebskennlinien das Verhalten des Systems unter unterschiedlichen Bedingungen wider und sind daher für die Optimierung der Fertigungssysteme besser geeignet. Im Unterschied zu den einfachen Kenngrößen, die man auch im laufenden Fertigungsprozess messen kann, lassen sich vollständige Betriebskennlinien nur anhand von Simulationsmodellen ermitteln, da sich Experimente im realen System aus wirtschaftlichen Gründen verbieten.

Es gibt aber noch einen weiteren Grund, weshalb die Kennlinientheorie so eng mit der Simulation verbunden ist. Der Vergleich von Fertigungssystemen ist dann besonders leicht, wenn sich deren Betriebskennlinien einfach übereinander legen lassen. Das ist aber nur dann zulässig, wenn die Koordinaten-Achsen verschiedener Systeme nicht nur bedeutungsgleich sondern auch wertgleich sind. Der Weg dorthin führt über die Normierung der Kennlinien. Die Bezugswerte, auf die sich die

Normierung bezieht, können aber in den meisten Fällen nur durch Simulationsmethoden bestimmt werden.

1.2 Literaturüberblick

Wiendahl (1997) definierte Betriebskennlinien im Zusammenhang mit seinem Trichtermodell (s. Abb. 1). Hier werden die drei logistischen Grundgrößen Bestand n , Durchsatz λ (bezeichnet als Leistung) und Verweilzeit Δt (bezeichnet als Reichweite) zueinander in Beziehung gesetzt. In der von Wiendahl vorgeschlagenen Version wird der Bestand als unabhängige Variable angenommen, von der der Durchsatz (gestrichelte Kurve) bzw. die Verweilzeit (durchgezogene Kurve) abhängig sind. Beide Kennlinien werden gewöhnlich in ein gemeinsames Diagramm eingetragen, aus dem sich ablesen lässt, bei welchem Bestand das Fertigungssystem annähernd optimal arbeitet, d.h., einen möglichst hohen Durchsatz bei möglichst kurzer Verweilzeit besitzt (s. Abb. 1, markierter Bereich).

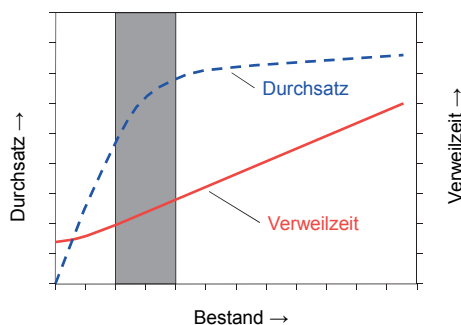


Abbildung 1: Betriebskennlinien nach Wiendahl und Nyhuis

Meier (2011) verwendet in seinem Online-Beitrag Kennlinien, die den funktionalen Zusammenhang zwischen Flussfaktor und Durchsatz (bezeichnet als Ausbringung) darstellen. Der entscheidende Vorteil: der Flussfaktor als Quotient von reiner Prozesszeit Δt_p und der Verweilzeit Δt ist bereits eine in der Produktionswissenschaft allgemein eingeführte Normierungsgröße für die Verweilzeit. Das Ziel, die Leistung unterschiedlicher Fertigungssysteme durch einfaches Übereinanderlegen ihrer Betriebskennlinien vergleichen zu können, wurde aber trotzdem nicht erreicht, wie folgendes Zitat beweist: „Ist es nun das Ziel, Produktionslinien untereinander zu vergleichen, so sind also die drei Kennzahlen Nutzfaktor, Flussfaktor und Ausbringung eigentlich nur dann vergleichbar, wenn auch die äußeren Rahmenbedingungen identisch sind. Dies ist jedoch eine höchst unrealistische Prämisse.“ Hier stört vor allem, dass für die unabhängige Variable der in Stück pro Tag gemessene Durchsatz herangezogen wird. Hoch getaktete Systeme haben dann natürlich andere Kennlinien als niedrig getaktete.

Fayed und Dunnigan (2007) beschäftigen sich mit der Bewertung von Halbleiter Fabs und stützen sich dabei auf den Zusammenhang von Verweilzeit (Cycle Time) in Abhängigkeit vom relativen Durchsatz, ausgedrückt durch den Quotienten aus absolutem Durchsatz und maximalem Durchsatz. Die unabhängige Variable bringt

sehr gut die relative Belastung des Systems zum Ausdruck und entspricht dem Verkehrswert in der Bedienungstheorie.

Der optimale Arbeitspunkt eines Fertigungssystems liegt dort, wo der Durchsatz bereits hoch, die Verweilzeit aber noch niedrig ist. Wiendahl bestimmt auf diese Weise einen optimalen Bestand im System (bestandsorientierte Steuerung), der in Abbildung 1 in dem grau gekennzeichneten Bereich liegt. Die Kennlinientheorie wurde später von Wiendahl gemeinsam mit Nyhuis weiterentwickelt, allerdings spielt dort die Simulation eher eine untergeordnete Rolle und dient insbesondere der Modell-Evaluation (siehe Nyhuis und Wiendahl 2006, 2012).

Fayed und Dunnigan gehen bei der Bestimmung des optimalen Arbeitspunkts einen anderen Weg. Sie leiten zu diesem Zweck aus ihrer Betriebskennlinie eine sekundäre Kennlinie ab, indem sie das Verhältnis von Durchsatz und Verweilzeit in Abhängigkeit vom relativen Durchsatz darstellen. Diese Kennlinie hat genau dort, wo ein relativ hoher Durchsatz mit einer relativ kurzen Verweilzeit zusammentreffen ein Maximum, aus dem dann der optimale Durchsatz abgeleitet werden kann.

Keines der drei vorgestellten Konzepte verwenden andere Kenngrößen als die eingangs eingeführten logistischen Grundgrößen Durchsatz, Bestand und Verweildauer. Die Konzepte unterscheiden sich jedoch in der Wahl der unabhängigen (Steuer-) Variablen ebenso wie im Grad der Normierung. Wiendahl verfolgt einen bestandsorientierten Steuerungsansatz und verwendet praktisch keine Normierung. Die beiden anderen Ansätze orientieren sich bei der Steuerung am Durchsatz, man könnte auch von einem leistungsorientierten Steuerungsansatz sprechen. Während Meier sich auf die Normierung der abhängigen Variable (Verweilzeit \rightarrow Flussfaktor) beschränkt, verfahren Fayed und Dunnigan genau umgekehrt (Durchsatz \rightarrow Verkehrswert). Lediglich bei der Diskussion des Einflusses der Variabilität (Hockeystick-Effekt) verwenden die beiden letztgenannten Autoren eine doppelt normierte Darstellung, indem sie den Flussfaktor in Abhängigkeit vom Verkehrswert (relativer Durchsatz) abbilden.

Für die Leistungsbewertung von Fertigungssystemen stellen sich damit folgende wichtige Fragen:

1. Wie viele bzw. welche Kennlinien werden benötigt?
2. Über welche Kenngröße wird das System gesteuert (unabhängige Variable)?
3. Wie lassen sich geeignete Bezugswerte für die Normierung ermitteln?

2 Betriebskennlinien und das Gesetz von Little

Auf die erste Frage, wie viele Kennlinien prinzipiell notwendig sind, um ein Fertigungssystem vollständig zu charakterisieren, gibt das Gesetz von Little eine eindeutige Antwort (s. Gl. 1). Little (1961) konnte die Allgemeingültigkeit eines einfachen Zusammenhangs zwischen den drei logistischen Grundgrößen Bestand, Durchsatz und Verweildauer für alle Bedienungssysteme beweisen.

$$n = \lambda \cdot \Delta t \quad (1)$$

Gleichung 1 definiert eine Sattelfläche in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, in die alle Kennlinien eingebettet sein müssen (s. Abb. 2, rechts außen). Eine solche dreidimensionale Kennlinie kann anschließend aus

unterschiedlicher Perspektive betrachtet und in zweidimensionale Diagramme übertragen werden. Abbildung 2 zeigt die beiden möglichen Diagramme aus der bestandsorientierten Perspektive (a) und der durchsatzorientierte Perspektive (b). Jede der vier Kennlinien charakterisiert das Fertigungssystem vollständig, da sich aus zwei gegebenen Kenngrößen stets die dritte eindeutig bestimmen lässt. Die von Wiendahl vorgeschlagene Darstellung von zwei Kennlinien mag zwar anschaulich und praktisch sinnvoll sein, eine mathematisch begründete Notwendigkeit dafür besteht aber nicht.

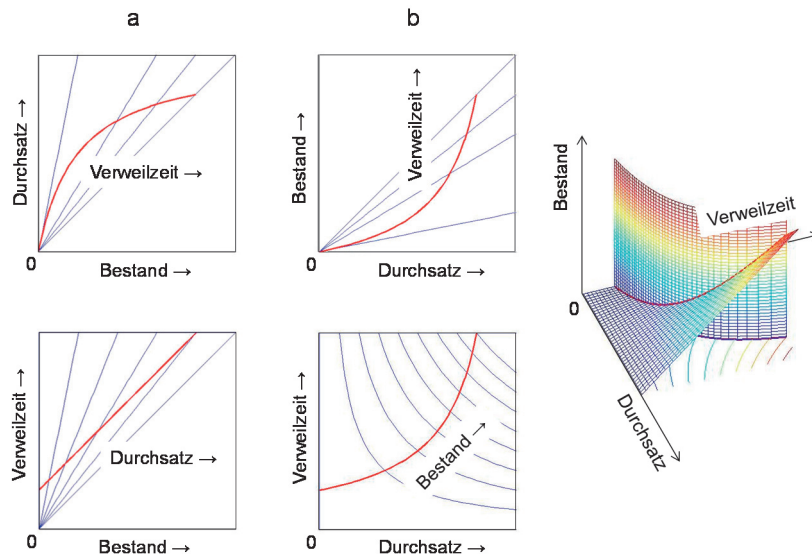


Abbildung 2: Das Gesetz von Little und die Definition von Betriebskennlinien

Die zweite Frage stellt sich bezüglich der Wahl der Steuervariablen. Hierauf lässt sich keine eindeutige Antwort geben, da prinzipiell jede der drei logistischen Basisgrößen als Steuervariable geeignet ist. Die Entscheidung, im Folgenden ausschließlich auf die Verweilzeit (abhängige Variable) in Abhängigkeit vom Durchsatz (unabhängige Steuervariable) als Betriebskennlinie zu setzen (s. Abb. 2b, unteres Diagramm), ist also aus mathematischer Sicht willkürlich.

Für die Normierung von Kennlinien ist diese Entscheidung jedoch durchaus sinnvoll, da man bei der Wahl der Bezugswerte auf die bereits etablierten Begriffe Flussfaktor und Verkehrswert zurückgreifen kann. Der Flussfaktor F (s. Gl. 2) ist der Quotient aus Verweilzeit Δt und der reinen Prozesszeit Δt_p und ist, wie gefordert, eine dimensionslose Größe. Da die Verweilzeit nicht kleiner werden kann als die reine Prozesszeit, ist der kleinste Wert, den der Flussfaktor annehmen kann, 1. Es sei noch angemerkt, dass in der Bedienungstheorie anstelle der reinen Prozesszeit üblicherweise deren Kehrwert, die Bedienungsrate μ verwendet wird.

$$F = \frac{\Delta t}{\Delta t_p} = \mu \cdot \Delta t \quad (2)$$

Für den Durchsatz λ bietet sich als Bezugsgröße der maximal mögliche Durchsatz λ_{\max} an, der im Folgenden auch als Grenzdurchsatz bezeichnet wird. Der Quotient aus beiden wird als Verkehrswert ρ bezeichnet und gibt Auskunft über die relative Belastung des Systems (s. Gl. 3).

$$\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}} \quad (3)$$

Der Verkehrswert kann nur Werte im Intervall $[0,1)$ annehmen und ist ebenfalls dimensionslos. Die normierte Betriebskennlinie beschreibt schließlich den Zusammenhang zwischen Flussfaktor und Verkehrswert (s. Gl. 4).

$$F = f(\rho) \quad (4)$$

Während die Bestimmung der reinen Prozesszeit als Bezugsgröße für den Flussfaktor im Allgemeinen keine Schwierigkeiten bereitet, erfordert die Bestimmung des Grenzdurchsatzes als Bezugsgröße des Verkehrswertes einigen rechnerischen bzw. simulativen Aufwand, wie die folgenden Ausführungen zeigen werden.

3 Normierung von Betriebskennlinien

Die Methodik zur Bestimmung normierter Betriebskennlinien soll an einem einfachen generischen Simulationsmodell demonstriert werden (s. Abb. 3). Als Simulationssystem kam der MODELLER von simcron zum Einsatz. Das Modell besteht aus vier Stationen, bestehend je aus einer Maschine und einer Warteschlange mit unendlicher Kapazität. Lediglich die Station im (markierten) Kern kann mehrere (Anzahl m) parallele Maschinen enthalten. Bei den Experimenten werden nur die Werte $m = 1$ und $m = 5$ verwendet, letzteres unter Annahme gleicher Bedienungsrate μ für jede Maschine. Der Kernstation vor- bzw. nachgelagert ist jeweils eine Maschine mit der Bedienungsrate μ_b bzw. μ_a . Ein zusätzlicher Rückführungsweig mit der Bedienungsrate μ_r und der Rückführungswahrscheinlichkeit P_r dient der Nachbildung von Ablaufschleifen, wie sie z.B. in der Halbleiterproduktion typisch sind. Der Kern wird als Engpass im Vorwärtsweig ausgelegt, d.h. $m\mu < \mu_b, \mu_a$. Das System befindet sich im dynamischen Gleichgewicht, wenn sich die Zugangsrate λ_{in} und die Abgangsrate λ_{out} die Waage halten. In diesem Fall gilt für den Durchsatz $\lambda = \lambda_{in} = \lambda_{out}$. Das Modell kann beliebig modifiziert oder erweitert werden. So kann die Warteschlangenkapazität begrenzt bzw. einzelne Stationen aus dem Modell entfernt werden. Die Stellen, an denen das Modell aufgetrennt werden kann, sind durch X gekennzeichnet. Berücksichtigt man nur den Kern, erhält man ein einstufiges Rumpffmodell, mit dem man Ein- bzw. Mehrmaschinenprobleme untersuchen kann. Entfernt man nur den Rückführungsweig, erhält man eine mehrstufige Fertigungslinie mit einem Engpass, der aus $m (= 1 \dots 5)$ parallelen Maschinen besteht. Die beiden Stationen vor und nach dem Engpass stehen stellvertretend für den gesamten Rest der Fertigungslinie.

In jedem Simulationslauf werden 200.000 Forderungen erzeugt und bearbeitet. Um nichtstationäre Abschnitte zu Beginn und am Ende auszuschließen, werden zur Messung der Kenngrößen jedoch nur 100.000 (50.001 ... 150.000) Forderungen berücksichtigt. Es wird Ergodizität vorausgesetzt, so dass ein einzelner

Simulationslauf für die Untersuchungen ausreicht. Die Anzahl von 100.000 Forderungen ist ein Kompromiss zwischen dem Anspruch nach statistischer Absicherung der Ergebnisse und der Simulationsdauer, der für den hier verfolgten Zweck völlig ausreichend ist. Die größte beobachtete relative Abweichung zwischen ein- und ausgehenden Forderungen innerhalb des Messintervalls betrug 0,07%, war meistens aber viel kleiner.

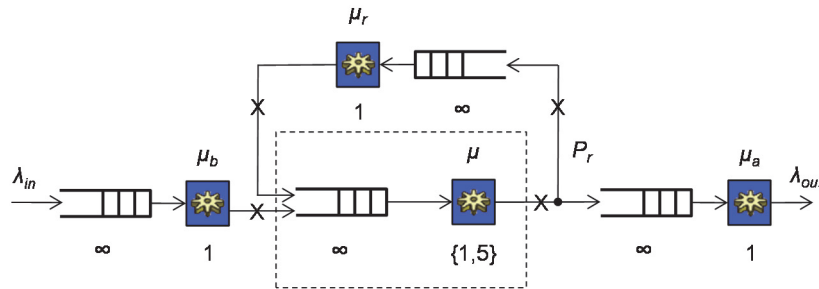


Abbildung 3: Generisches Simulationsmodell mit markiertem Engpass

Der Grenzdurchsatz λ_{max} wird am Ausgang des Systems gemessen. Dazu wird das System in einem vorbereitenden Simulationslauf zunächst stark überlastet, etwa durch gleichzeitiges Bereitstellen aller Forderungen, und anschließend die Zeitdauer, die für die Bearbeitung der 100.000 Forderungen des Messintervalls erforderlich ist, bestimmt. Für einfache Systeme kann der Verkehrswert auch berechnet werden, so z.B. für das einstufige Kernsystem, sofern die Forderungen asynchron und verzögerungsfrei verarbeitet werden. Gleichung 5 gilt für den Fall, dass alle m Parallelmaschinen die gleiche Bedienungsrate μ besitzen.

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} \tag{5}$$

Unter bestimmten Bedingungen (Poissonscher Eingangsstrom, exponentialverteilte Bedienungszeiten) kann die Betriebskennlinie aus den bekannten Gleichungen für ein M/M/m-System sogar berechnet werden, ohne dass eine Simulation erforderlich wäre (s. Gl. 6, Kiencke 2006).

$$F = 1 + \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{(m\rho)^{m-1}}{(1-\rho)m! \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^i}{i!} + (m\rho)^m} \tag{6}$$

In Abbildung 4 sind die simulierte und berechnete Betriebskennlinien (F und F/ρ) jeweils für ein M/M/1- und ein M/M/5-System gegenübergestellt. Zur besseren Unterscheidung wird die berechnete Kennlinie als geschlossener Linienzug, die simulierte Kennlinie dagegen nur durch die aus der Simulation ermittelten diskreten Werte dargestellt. Dieses Prinzip wird auch in den folgenden Diagrammen übernommen. In Abbildung 4 zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen der Theorie und der Simulation gering sind und lediglich bei hoher Systemlast in

Erscheinung treten. Darüber hinaus wird deutlich, dass ein Mehrmaschinensystem gegenüber einem Ein-Maschinen-System bei höherer Last im Vorteil ist.

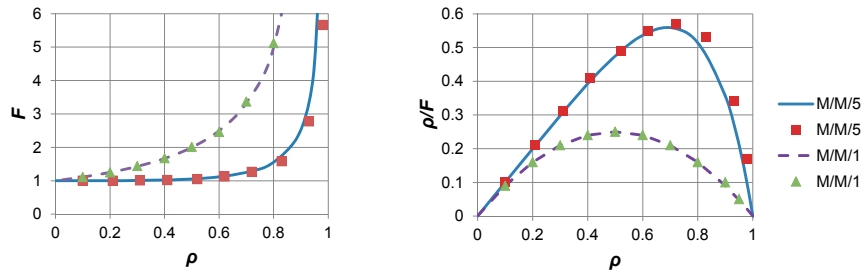


Abbildung 4: Kennlinien eines einstufigen Systems mit m parallelen Maschinen

Schon kleine Änderungen an den Systemeigenschaften führen dazu, dass Gleichung 6 nicht mehr gültig ist. Oft ist die Berechnung der Betriebskennlinie dann äußerst schwierig, wenn nicht gar unmöglich, so dass die Simulationsmethode dann als einziges Mittel zur Verfügung steht. Das lässt sich sehr gut am Beispiel der Gruppenbedienung zeigen. Wir gehen wieder vom einstufigen Kernsystem mit 5 parallelen Maschinen aus, führen aber die zusätzliche Bedingung einer Gruppenbedienung ein. Die Maschinen sollen die Bearbeitung aller fünf Forderungen einer Gruppe gleichzeitig und verzögerungsfrei beginnen. Die Forderungen werden auch geschlossen als Gruppe abgegeben, sofort nachdem die letzte Forderung der Gruppe fertig ist (Beginn und Ende der Bearbeitung synchronisiert). Bereits die Bestimmung des Grenzdurchsatzes λ_{\max} ist hier problematisch und nur für den Fall $G/D/5g$ rechnerisch trivial ($\lambda_{\max} = m\mu$). Noch schwieriger ist die Berechnung der Betriebskennlinie, zumal man sich auch noch beliebig komplizierte Gruppenbedingungen ausdenken kann. Abbildung 5 zeigt die durch Simulation erzeugten Betriebskennlinien für drei Fälle. Hier sind die Auswirkungen steigender Variabilität bei den Bearbeitungszeiten auf den Flussfaktor erkennbar (Hockeystick-Effekt bei hoher Systemlast). Wie erwartet, steigt bei Gruppenbedienung der Flussfaktor bei sinkender Systemlast wieder an.

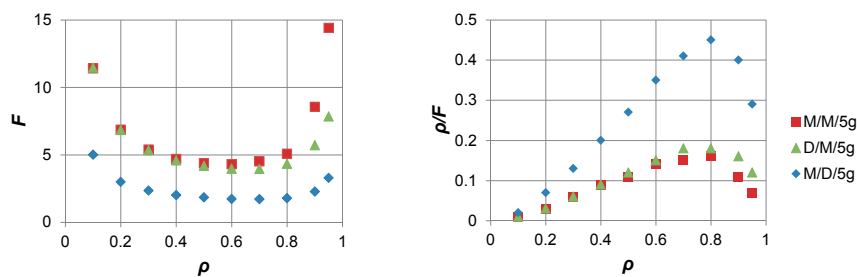


Abbildung 5: Kennlinien eines einstufigen Systems mit Gruppenbedienung

Das nächste Experiment bezieht sich auf eine mehrstufige Fertigungslinie (ohne Rückführungsweig bzw. $P_r = 0$). Der Grenzdurchsatz einer solchen Linie wird entscheidend durch den Engpass bestimmt: $\lambda_{\max} \leq \min(\mu_b, m\mu, \mu_a)$. Indem μ_b und μ_a stets größer als $m\mu$ eingestellt werden, wird der Kern zum Engpass gemacht. Für den Fall, dass alle Bearbeitungszeiten determiniert sind, gilt $\lambda_{\max} = m\mu$. Stochastische Bearbeitungszeiten lassen den Grenzdurchsatz des Systems infolge zufällig auftretender Flussabbrisse dagegen zu geringeren Werten tendieren. Der Wert $m\mu$ kann daher als obere Schranke für den Grenzdurchsatz eines G/G/m-Systems angesehen werden. Dieser Effekt sollte sich bei exponentialverteilten Bedienungs- und Ankunftszeiten besonders ausprägen, insbesondere dann, wenn sich die Bedienungszeiten zwischen Engpass und den restlichen Maschinen der Linie nur wenig voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wurden deren Bedienungszeiten nur um 10% gegenüber der Bedienungsrate des Engpasses erhöht: $\mu_b = \mu_a = 1,1 \cdot m\mu$. Dennoch konnten bei Messungen am M/M/m-System keine signifikanten Abweichungen registriert werden, so dass die obere Schranke des Grenzdurchsatzes als Bezugswert verwendet wurde. Es sei noch angemerkt, dass die vor- und nachgelagerten Maschinen ebenfalls M/M/1-Systeme sind. Abbildung 6 zeigt die simulierten Werte der Betriebskennlinie sowohl für ein M/M/1- als auch für ein M/M/5-System. Zum Vergleich sind die berechneten Kennlinien des einstufigen Modells aus Abbildung 4 eingezeichnet. Man erkennt, dass z.B. der Flussfaktor der M/M/5-Fertigungslinie im mittleren Lastbereich gegenüber dem einstufigen System deutlich erhöht ist. Diese Abweichungen sind, im Unterschied zu Abbildung 4, nicht durch statistische Effekte verursacht, sondern sind systematischer Natur.

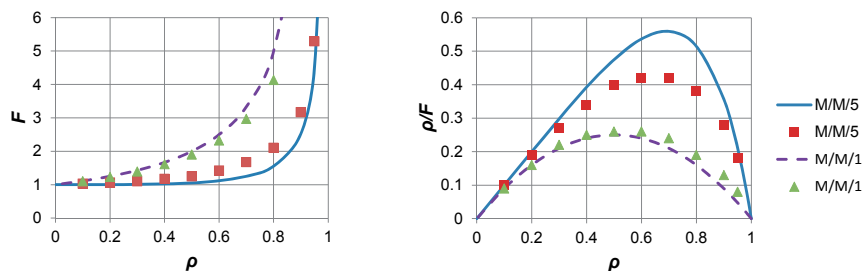


Abbildung 6: Kennlinien einer mehrstufigen Fertigungslinie

Für das letzte Experiment wurde das komplette System, einschließlich Rückführung ($P_r = 0,5$), verwendet. Der Kern wurde auf eine Einzelmaschine reduziert. Es ist charakteristisch für dieses Modell, dass die wirksamen Bedienungszeiten des Engpasses und der Rückführung auch von der Wahrscheinlichkeit P_r abhängen. Sauer (2006) benutzte so genannte Erzeugnisflussgraphen, um komplexe Fertigungsabläufe abzubilden und führte den Intensitätskoeffizienten c ein, der angibt, wie oft ein bestimmter Zweig des Graphen im Mittel von einer Forderung beansprucht wird. Jeder Zweig des Graphen steht hier für eine Station, bestehend aus Warteschlange und Maschine. Für eine einfache Fertigungsschleife ergeben sich bei $P_r = 0,5$ die Intensitätskoeffizienten $c_v = 2$ für den Vorwärtszweig und $c_r = 0,5$

für den Rückwärtszeit gemäß Gleichung 7. D.h., die Forderungen durchlaufen den Engpass im Durchschnitt zweimal. Da die vor- und nachgelagert Maschine nur jeweils genau einmal von einer Forderung beansprucht wird (beim Ein- bzw. Austritt aus dem System), gilt für $c_b = c_a = 1$. Die Rückführung wird im Durchschnitt nur von jeder zweiten Forderung durchlaufen, wobei es Forderungen geben kann, die gar nicht oder solche die mehrfach zurückgeschickt werden. Es existieren verschiedene Methoden zur Umwandlung der Struktur des Graphen sowie zur Berechnung der Intensitätskoeffizienten, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden kann (siehe auch Weigert 2013).

$$\begin{aligned} c_v &= 1/(1 - P_r) \\ c_r &= P_r \cdot c_v \end{aligned} \quad (7)$$

Die wirksame Bedienungsrate μ' eines jeden Zweiges ergibt sich aus dem Quotienten μ/c . Konkret bedeutet das für die wirksamen Bedienungsrate im Vorwärts- und Rückwärtszweig: $\mu'_v = \mu' = 0,5 \cdot \mu$ und $\mu'_r = 2 \cdot \mu_r$. Der Engpass kann, in Analogie zur einfachen Fertigungslinie, durch Vergleich der Bedienungsrate aller Zweige bestimmt werden, diesmal jedoch unter Verwendung der wirksamen Werte für die Bedienungsrate. Die Methode kann auf beliebig komplexe Graphen angewendet werden, um einen geeigneten Bezugswert für den Grenzdurchsatz zu bestimmen. Allerdings gilt auch hier, der so berechnete Wert ist streng genommen nur eine obere Schranke für den Grenzdurchsatz. Der eigentliche Wert muss durch Simulation bestätigt werden.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse von vier Simulationsexperimenten mit dem vollständigen Modell. Die Bearbeitungszeiten aller Maschinen sind determiniert. Es gilt $\mu_b = \mu_a = 1,1 \cdot \mu'$ und $\mu'_r = 4 \cdot \mu'$. Der Wert für den Grenzdurchsatz $\lambda_{\max} = \mu'$ konnte unter diesen Bedingungen bestätigt werden. Für die Betriebskennlinie M/D wurde ein Poissonscher und für D/D ein determinierter Eingangsstrom verwendet. Es muss angemerkt werden, dass auch die Kennlinie D/D aufgrund der stochastischen Rückverzweigung kein determiniertes System beschreibt. Die Kendall-Notation lässt sich auf diese Art von System nicht mehr korrekt anwenden. Man erkennt auch hier wieder den Einfluss der Variabilität (des Eingangsstroms) auf den Flussfaktor.

Nach Sauer et al. (2006) lässt sich die reine Prozesszeit (Verweilzeit nach Abzug der Wartezeiten) im System als Summe der Prozesszeiten aller Zweige des Graphen, gewichtet mit den zugehörigen Intensitätskoeffizienten berechnen. Daher liegt es nahe, ein gegebenes System auch im Layout in eine Fertigungslinie umzuwandeln. Wie bereits gezeigt, kann auf diese Weise zwar der Engpass bestimmt und der Grenzdurchsatz abgeschätzt werden, die Kennlinien der zugehörigen Fertigungslinie unterscheiden sich jedoch deutlich von der des ursprünglichen Systems, wie die mit dem Zusatz „Linie“ gekennzeichneten Kennlinien beweisen. Besonders deutlich wird der Unterschied im Fall D/D.

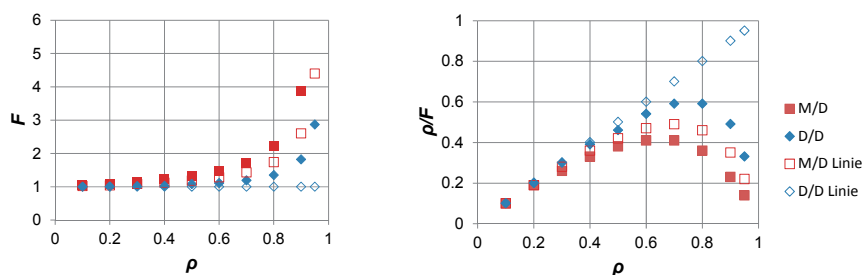


Abbildung 7: Kennlinien eines mehrstufigen Systems mit Rückführung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel eines einfachen Simulationsmodells konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, Betriebskennlinien so zu normieren, dass sie praktisch „übereinander gelegt“ werden könnten. Das ist von großem Vorteil, wenn man unterschiedliche Fertigungssysteme direkt miteinander vergleichen will. Die Bestimmung einer Kennlinie mittels Simulation ist an sich kein Problem, gehört vielmehr zum Handwerk in den Produktionswissenschaften. Die Normierung dagegen erweist sich als die größere Herausforderung. Der Grenzdurchsatz λ_{\max} als Bezugswert für den Verkehrswert kann in den meisten Fällen nur durch Simulationsmethoden bestimmt werden. Oft kann man jedoch auch analytische Methoden nutzen, um durch Berechnung von geeigneten Schrankenwerten die Simulation zu unterstützen; manchmal gelingt es sogar, den Bezugswert direkt zu berechnen.

Das untersuchte Beispielmmodell weist wesentliche Merkmale eines realen Fertigungssystems auf, ohne natürlich die Größenordnung oder Komplexität realer Systeme zu erreichen. Die Methodik allerdings ist universell und unabhängig von der Systemgröße. Sie lässt sich genauso gut auf eine Fabrik als auf eine einzelne Maschine oder Maschinengruppe anwenden. Dennoch konnte nicht auf alle Probleme eingegangen werden. Welchen Einfluss bereits eine kleine Änderung bei der Steuerung haben kann, zeigt das Beispiel der Gruppenbedienung. Es gibt unzählige, mitunter hochkomplexe Steuerregeln, die jedes Mal hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Bezugswert genau analysiert werden müssen. Blockierungen oder Verlustströme wurden ebenfalls ausgespart und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

- Fayed, A.; Dunnigan, B.: Characterizing the Operating Curve – How Can Semiconductor Fabs Grade Themselves? International Symposium on Semiconductor Manufacturing. Santa Clara 15.-17. Oktober 2007, S. 1-4.
- Kiencke, U.: Ereignisdiskrete Systeme – Modellierung und Steuerung verteilter Systeme. München, Wien: Oldenbourg 2006.

- Little, J. D. C.: A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$, *Operations Research*. 9 (1961), S. 383–387.
- Meier, K.-J.: Kennzahlen von Produktionskennlinien vergleichbar machen. Institut für Produktionsmanagement & Logistik, IPL-Magazin: 15 | Mai 2011. <http://www.ipl-mag.de/scm-daten/194-scm-daten-15> (gefunden 28.3.2013).
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistic Production Operating Curves – Basic Model of the Theory of Logistic Operating Curves. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55 (2006) 1, S. 441-444.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York, Hong Kong, London, Mailand: Springer Vieweg 2012.
- Sauer, W.; Oppermann, M.; Weigert, G.; Werner, S.; Wohlrabe, H.; Wolter, K.-J.; Zerna, T.: *Electronics Process Technology – Production Modelling, Simulation and Optimisation*. London: Springer 2006.
- Weigert, G.: *Operating Curves of Manufacturing Systems – A Theoretical Discourse*. International Conference on Flexible and Intelligent Manufacturing. Porto 26.-28. Juni 2013, S. 887-898.
- Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung – Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf der Basis des Trichtermodells*. München, Wien: Hanser 1997.