

## 2.1 Strukturgrundlagen

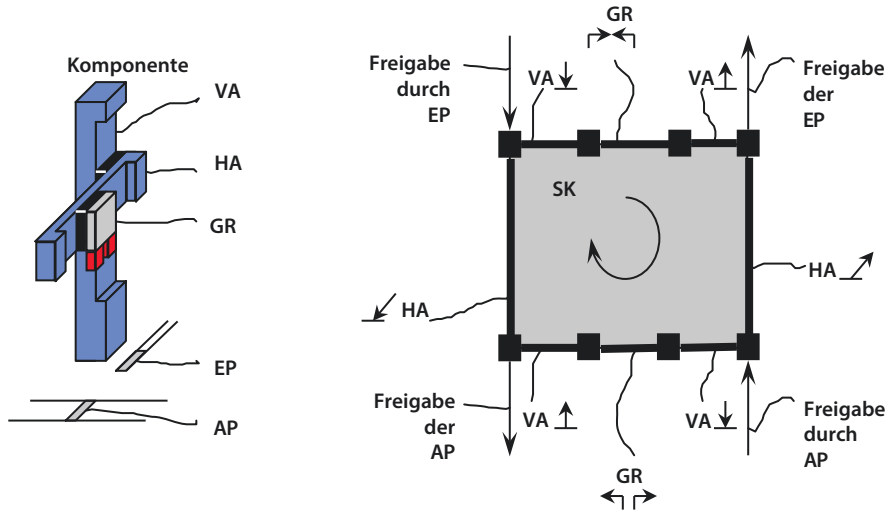
In der Produktionstechnik sind die verschiedensten Ausgestaltungen von Wertschöpfungen bekannt. Um das technische und organisatorische Betriebsverhalten dieser Wertschöpfungen analysieren und berechnen zu können, muss eine allgemeingültige Organisation des mechanischen Aufbaus der Produktionstechnik vorausgesetzt werden.

Die in Maschinen und Anlagen verwendeten Einzelteile, Artikel oder Zukaufteile (Schraube, Kabel, Sensor, Gehäuse, ...) können durch ihre Funktionalitäten die Zuverlässigkeit einer Maschine beeinflussen. Ein Einzelteil muss eine Funktion besitzen und hat durchweg das Potential zum Stören; es wird als Element **E** bezeichnet. Der mechanischen Zusammenbau mehrerer Elemente erzeugt eine Komponente **K** (Bewegungsachse, Greifer, Vereinzeler, ...) mit in der Regel reproduzierbarer Funktionalität. Die Komponente hat im Minimum zwei ansteuerbare Zustände (z. B. Achse ausfahren und einfahren) und ein element- und komponentenspezifisches Betriebsverhalten. Die mit wertschöpfender Funktion gestaltete Komponente wird als Steuer-Zelle **SZ** bezeichnet, z. B. eine pneumatisch betriebenen Linearachse mit zwei Endlagenzuständen.

Aus der zweckgebundenen Kopplung von mehreren Elementen E und Komponenten (Steuer-Zellen SZ) entsteht ein erster Steuer-Kreis SK, Abb. 2.1 (z. B. Handhabungsgerät, Vibrationswendelförderer, WT-Wechsler, etc.).

Für die Kopplung dieser Elemente E und Komponenten K gibt es entsprechend des Arbeitsplans einen konstruierten Ablauf mit Wiederholungscharakter:

- E1 Freigabe durch EP,
- K1.1 Vertikal-Achse VA runter,
- K2.1 Greifer GR zu,
- K1.2 Vertikal-Achse VA rauf,



**Abb. 2.1** Prinzip des Steuerkreises

- SK    Freigabe an EP,
- K3.1   Horizontal-Achse HA hin,
- E2    Freigabe durch AP
- K1.1   Vertikal-Achse, VA runter,
- K2.2   Greifer GR auf,
- K1.2   Vertikal-Achse VA rauf,
- SK    Freigabe an AP und
- K3.2   Horizontal-Achse zurück

Über die Endlagenmeldungen aller Komponenten können diese mittels speicherprogrammierbarer Steuerung SPS zu einem wertschöpfenden Ablauf organisiert werden. Vom Start bis zum Ende des Ablaufs, also bis zum Neustart, ist als Zyklus definiert. Ein vollständiger Ablaufzyklus wird durch die Zykluszeit beschrieben. In der betrieblichen Praxis ist ein Steuer-Kreis oder eine Steuer-Einheit über eine starre, Hand-Shake, staufähige oder lose Verkettung mit anderen Steuerkreisen verkettet. Die Definitionen der einzelnen Verkettungsarten erfolgen an der jeweiligen Stelle.

Aus Elementen E, Komponenten K und Steuer-Kreisen SK wird mittels Starr- oder Hand-Shake-Verkettung eine funktionsfähige Steuer-Einheit SE (Drehmaschine, Montageautomat, etc.) organisiert, die hinlänglich als Betriebsmittel bekannt ist. Im Normalfall ist die Wertschöpfung dieses Betriebsmittels über den Arbeitsplan exakt definiert, dennoch soll hier nicht verschwiegen werden, dass in einem Unternehmen auch Prozesse integriert sind, die durchaus vermeidbar wären; in diesem Fall wird aus der Wert-eine Kostenschöpfung.

Eine Steuer-, oder Produktions-Einheit PE wird zur Wertschöpfungs-Einheit WSE erkorren, wenn die in der SE/PE verrichtete Arbeit im Sinne der Erzeugnis-Funktionalität erfolgt ist. Ist die verrichtete Arbeit in der SE/PE nicht im Sinne der Erzeugnis-Funktionalität erfolgt, dann muss dieser Prozess als Kostenschöpfungs-Einheit KSE verstanden werden. Das Entgraten im Nachfolge-Prozess offenbart den Qualitätsmangel in der Betriebsmittelentwicklung des erstellenden Prozesses (z. B. Stanzen mit Gratbildung).

Alle verketteten Steuer-Kreise und Steuer-Einheiten, die für die Fertigung und Montage eines verpackten Erzeugnisses zwischen Wareneingang und Versand benötigt werden, werden als Steuer-, Produktions- oder Wertschöpfungs-System WSY bezeichnet. Damit generiert jedes Erzeugnis ein eigenes Steuer-System mit entsprechender Auslastung des dazugehörigen Maschinenparks.

Die Steuer-Systeme der verschiedenen Produkte, zum Teil auch mit gemeinsamer Nutzung bestimmter Betriebsmittel des Maschinenparks, bilden nun das Wertschöpfungs-Netzwerk WSN oder in physischer Form das Produktions-Netzwerk (Geschäftsfeld, Unternehmen, etc.). Alle diese Vernetzungen erschweren die Steuerung der betrieblichen Abläufe und das Ausregeln der Bestände und Termine im Unternehmen. Die definierten Organisationsformen sind in der Praxis den verschiedensten Einflüssen (dynamische Bedingungen, Verschleiß, Verschmutzung, Bedienfehler, etc.) ausgesetzt. Sämtliche physischen Organisationsformen fallen unter der Einwirkung derartiger Störeinflüsse in nicht kalkulierbaren Abständen aus. Die vom Planzustand abweichenden Störungen werden als Störereignisse oder Ereignisse bezeichnet.

Viele Elemente und Komponenten weisen ein Betriebsverhalten auf, welches in der Nutzungszeit der Produktions-Einheit nicht in Erscheinung tritt, da deren Standzeit größer als die Nutzungszeit des Betriebsmittels ist; das Ausfallen einer Schraube ist relativ selten. Viele Elemente und vor allen Dingen in der Konstellation einer Komponente neigen zum Ausfall- also Betriebsverhalten. Es gehört zum Grundverständnis des Betriebsverhaltens eines technischen Betriebsmittels, dass immer nur ein Element mit einem Ereignis die Funktionalität unterbrechen kann, da eine korrekt programmierte SPS diesen Ereignisfall zum Stoppen des Prozesses verwendet. In einem ersten Ansatz geht die Analyse des Betriebsverhaltens davon aus, dass immer das eine Element bzw. die eine Ursache zum Ausfall des Prozessablaufs führt.

Ausfallen kann in der Technik also ausschließlich ein Element als unterste Hierarchiestufe der organisierten Technik, das dann einen Ausfall über die hierarchische Verkettung auch in andere Systeme nach sich ziehen kann. Diesbezüglich können die Ursachen des Ausfalls auch nur mit Elementen oder Komponenten in Verbindung gebracht werden. Ausfallursachen stehen oftmals in kausalem Zusammenhang zum Prozess (Fügen, Pressen, Schweißen, etc.) und/oder zum Element und/oder zum Qualitäts-/Anlieferungszustand (feucht, korrodiert, verschlissen, etc.), so dass eine weitere Differenzierung durchaus sinnvoll sein kann. Innerhalb eines organisierten Zyklus können auch nacheinander mehrere Ausfälle gleicher oder verschiedener Ursachen geschehen.

Wenn allerdings der Mensch Stillstands-Ereignisse (z. B. Stopp durch Not-Aus) generiert, dann wird dies vordergründig nicht als technische Ursache betrachtet, obwohl damit

ein technisches Versagen mit Kollisionsvermeidung des Betriebsmittels verbunden sein kann, aber eben auch ein Stillstand wegen einer persönlicher Verteilzeit. Das Stillsetzen einer Maschine, allgemein Betriebsmittel, durch Menschen oder andere Maschinen wird als nicht-technische Störung, also organisatorische Störung, verstanden bzw. so behandelt.

Es ist eine Grundvoraussetzung des GMVs, dass nur Stillstände, die die Maschine selber erkennt, also nicht von außen generiert wurde, als technische Stillstände gewertet werden und die damit allein die Verfügbarkeit eines Prozesses definiert. Wenn ein Betriebsmittel in der Beschaffung ist, dann will der technische Einkauf vom Lieferanten eben diese Verfügbarkeit vertraglich abgesichert und auch geliefert bekommen und zwar ohne den Zusatzprozess der Wareneingangsprüfung. Offensichtlich ist die Prozesskette, die nach der letzten Prüfung des Herstellers noch zu erwarten ist, mit derart vielen Qualitätsmängeln behaftet, dass der Empfänger der Ware die gleiche Kostenschöpfung wiederholt.

Jeder Lieferant eines Betriebsmittels ist gut beraten, nicht nur diese Verfügbarkeit, sondern auch alle dazugehörigen Parameter über die SPS zu analysieren und auszugeben. Er wäre darüber hinaus gut beraten, sich vertraglich das Recht des Online-Monitorings via Netzwerk zu sichern, damit er selber diesen Instandsetzungsservice anbieten oder rechtzeitig aus Eigeninteresse reagieren kann, bevor das Betriebsmittel sichtbar über die Parameter aus dem Ruder läuft.

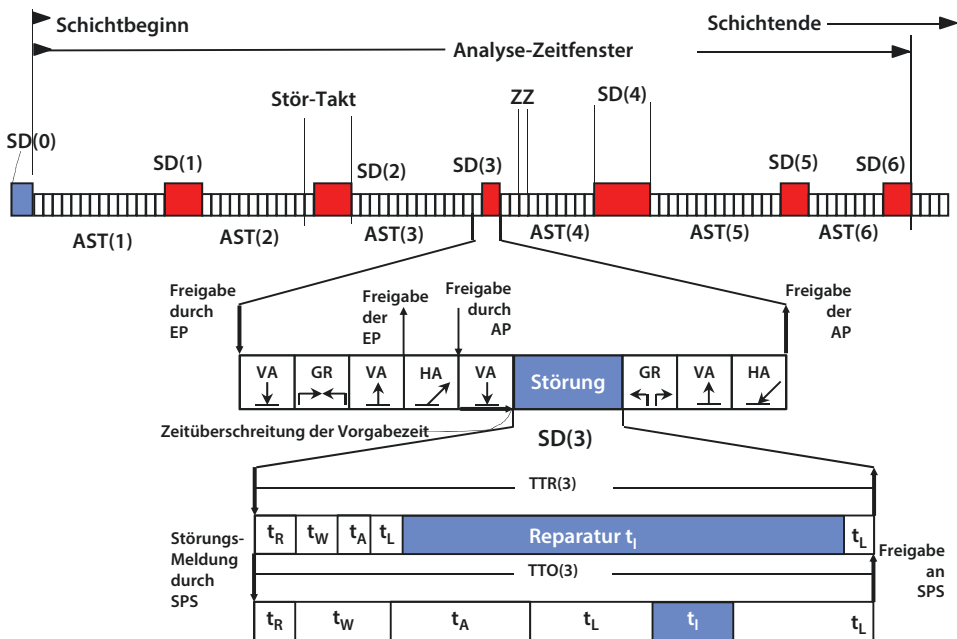
Für alle Störungen, die von außen über die eigenen Mitarbeiter oder über andere Betriebsmittel in der Verkettung gelangen, hat dieser Lieferant jedenfalls keine Verantwortung zu tragen.

---

## 2.2 Grundlegende Kennwerte

Der Ausfall eines Elements wird in der Praxis vornehmlich durch die beiden Kennzahlen **MTBF** (Mean Time Between Failures) und **MTTR** (Mean Time To Repair) ausgedrückt; beide Werte werden in Zeiteinheiten angegeben. Zur Analyse und Berechnung des Betriebsverhaltens hat zumindest der MTBF-Wert in der bekannten Form nach den nunmehr vorliegenden Erkenntnissen für getaktete Komponenten und Steuer-Kreise keine ausreichende Aussagekraft mehr.

In der oberen Darstellung in [Abb. 2.2](#) ist das Betriebsverhalten eines Steuerkreises gemäß [Abb. 2.1](#) mit den dazugehörigen Steuerzellen Vertikalachse VA, Horizontalachse HA und Greifer GR dargestellt. Jeder Produktionstechniker besitzt bereits die Erkenntnis, dass der Ausfall eines Elements oder einer Steuerzelle innerhalb eines Steuer-Kreis-Ablaufs an beliebiger Stelle geschehen kann, mittlere Darstellung. Er erfährt aber auch jeden Tag, dass dieser Steuer-Kreis viele Zyklen erfolgreich absolvieren kann, bevor das gleiche Element erneut ausfällt. Viel wahrscheinlicher ist der Ausfall eines ganz anderen Elements oder Steuerzelle in eben diesem Steuerkreis. Ein Steuer-Kreis ist also eine zyklische Ablauforganisation, die demzufolge in einem störungsfreien Betrachtungszeitraum auch



**Abb. 2.2** Detailstruktur einer Störung

eine sich stetig wiederholende Zykluszeit ZZ innehat. Mit der Vollendung der Zykluszeit ist die Wertschöpfung und damit ein Arbeitstakt abgeschlossen; es spielt dabei keine Rolle, ob die Zykluszeit durch eine Störung unterbrochen wurde, siehe Detailierung des Störaktes ZZ+SD(3). Ob mit diesem Takt ein Gut- oder Ausschussteil produziert wurde, spielt bei Betriebsverhaltensanalysen keine Rolle, da ja immer ein Teil erzeugt wurde. Im Rahmen der Zykluszeitbetrachtungen ist es wichtig, dass innerhalb der Zykluszeit eines Steuer-Kreises ein oder mehrere Elemente Störereignisse haben können, diese können innerhalb der starren Verkettung eines Ablaufdiagramms aber niemals parallel auftreten.

Es ist für die Berechnung des Betriebsverhaltens völlig unerheblich, wann die Störereignisse innerhalb des zyklischen Ablaufs stattfinden, die Ausgabe des Teils erfolgt immer am Ende des Zyklus. Hiermit wird die vereinfachende Annahme fixiert, dass die Summe aller Stör-Ereignis-Dauern am Ende des Zyklus geblockt liegend betrachtet wird.

Also: Ein Arbeitstakt mit Störung besteht aus der regulären Zykluszeit mit anschließender Stördauer und anschließender Ausgabe; diese Vereinfachung ist für alle nachfolgenden Berechnungen von Vorteil.

In einem weiteren Ansatz wird definiert, Detaillierung der Störung SD(3) in [Abb. 2.2](#), dass sich eine Störung aus den unterschiedlichsten Zeitanteilen zusammensetzen kann. Direkt nach Meldung der Störung durch die SPS (wegen Zeitüberschreitung eines Teilablaufs) hat der Prozessbediener wahrscheinlich eine gut messbare Reaktionszeit  $t_R$ , bis er den Störfall vergegenwärtigt. Durch seinen aktuellen Standort benötigt er darüber hinaus

eine messbare Wegezeit  $t_w$  bis zum Stör-Ort. Anschließend erfolgt die Analysedauer  $t_A$  des Problems inklusive notwendiger Logistikabläufe  $t_L$  (Werkzeugbeschaffung, Unterlagensichtung, etc.), um dann die eigentliche Reparatur TTR (Time-To-Repair) bzw. Instandhaltung I mit der Zeit  $t_I$  durchzuführen. Im ungünstigsten Fall folgt direkt nach der Reparatur eine weitere logistische Fehlzeit  $t_L$  (Protokoll, Werkzeuge wegbringen, etc.) bevor der Prozess wieder gestartet wird.

Aus rein praktischer Sicht kann der technische Zustand des betrachteten Prozesses eigentlich nur durch die Reparaturzeit beschrieben werden, da alle anderen Störzeitkomponenten  $t_x$  eigentlich organisatorisch bedingt sind und sich in der Regel auch nur durch optimierte Organisation beeinflussen lassen. Alle weiteren Betrachtungen gehen nun davon aus, dass die organisatorischen Fehlzeiten insoweit durch organisatorische Maßnahmen reduziert sind, dass deren Restanteile als notwendiger Bestandteil des TTR gewertet werden; somit wird für weitere Betrachtungen  $TTR = SD$  gesetzt. In den  $TTR(i)$ s steckt eine Menge Zündstoff für die Beeinträchtigung des innerbetrieblichen Friedens, weil diese Reparaturzeit eben nicht eindeutig in deren Bestandteile auseinanderdividiert werden kann. In diesen Zeiten stecken Motivation, Frustration, schlecht organisierte Zugänglichkeit, übertriebenes Sicherheitsdenken, ungenügende Schulung etc. und führen schnell zu Schuldzuweisungen durch das Management. Ein Produktionstechniker sollte regelmäßig die Reparaturzeit inkl. ihrer Zusammensetzung überwachen, auswerten und mit den Mittelwerten der SPS-erfassten Daten vergleichen. So manch ein mit dem Hersteller diskutiertes Störungsproblem ließe sich eindämmen, wenn der Anlagenführer das für diese Reparatur benötigte Werkzeug nicht aus der Werkzeugausgabe organisieren müsste.

Sollte sich herausstellen, dass die Stördauer  $SD$  ganz oder mit überwiegendem Anteil durch die organisatorisch bedingten Fehlzeiten bestimmt sind, so wird aus der Stördauer ein Ereignis Time-To-Organize  $TTO = SD$  für alle weiteren Betrachtungen.

Die Anzahl vollständiger Takte eines Steuerkreises zwischen zwei Stör-Ereignissen wird mit AST (Anzahl Störungsfreier Takte) bezeichnet. Ein Element kann logischerweise nur innerhalb seiner eigenen Funktionalität und damit innerhalb des Takts ausfallen. Der Steuer-Kreis hat also einen Teil der Ablauforganisation abgearbeitet, um direkt nach der Stillstandszeit die Ablauforganisation an dieser Stelle bis zum vollendeten Takt fortzusetzen. Mit der vorab getroffenen Konvention, dass die Störung am Ende dieses Taktes erfolgte, wird dieser störungsbehaftete Takt zum AST zählt. Selbst unter der Prämisse einer Ausschussproduktion wird dieser Takt als vollständig erfüllt betrachtet.

Zwischen Schichtbeginn und -ende existieren üblicherweise eine Menge Störungen, deren Sinnfälligkeit hinsichtlich ihrer Ereignisse einer besonderen Betrachtung unterzogen werden müssen, obere Darstellung in [Abb. 2.2](#). Der Analyse- oder Erfassungsbeginn von Betriebsverhaltensdaten beginnt mit dem Ende der Null-ten Störung  $SD(0)$ . Die erste realistische AST(1) befindet sich also zwischen dieser Störung  $SD(0)$  und der ersten Störung  $SD(1)$ . Ab hier beginnt die Anzahl der Ereignisse zu laufen. Das Analyse-Zeitfenster endet mit dem letzten Stör-Ereignis der Schicht. Zwischen der letzten Störung und dem Schichtende liefert der Prozess noch eine Anzahl störfreier Takte, die aber aus der Analyse ausgeschlossen werden, weil die letzte Störung „Schichtende“ immer organisatorisch sein wird.

Jeder Arbeitstakt, ob mit oder ohne Störung, verlangt dennoch später eine qualitative Aussage dahingehend, ob der Arbeitstakt mit der Zykluszeit ZZ ein IO (in Ordnung) oder NIO (nicht in Ordnung) produziert hat. Die Qualität des Arbeitstaktes spielt bei Betriebsverhaltens-Analysen eine untergeordnete Rolle. Ein vollendeter Takt ist und bleibt ein Takt, ob gut oder schlecht.

Mit den vorangegangenen Überlegungen kann der Zusammenhang zwischen Anzahl Störfreier Takte AST, der Zykluszeit ZZ und dem bekannten TBF (Time-Between-Failures) hergestellt werden.

$$\text{TBF}(i) = \text{ZZ} * \text{AST}(i) \quad (2.1)$$

Mit dieser Beziehung können alte TBF-Datensätze in die neuere Form umgesetzt werden, plausible Voraussetzung ist allerdings, dass die Zykluszeit noch bekannt ist. Der Vergleich gleichartiger Störungen (Greifer verliert Teil) in unterschiedlichen Steuerzellen (zwei baugleiche Greifer unterschiedlicher Lieferanten) über die TBF-Werte (z. B:  $\text{TBF}(1) = 100\text{min}$  und  $\text{TBF}(2) = 1800\text{min}$ ) sollte zwingend vermieden werden, um keine falschen Schlüsse zu ziehen. Angesichts dieser Daten würde man den Greifer des Prozesses (2) vorziehen wollen. Erst die Zusatzinformation, dass die Steuerzelle (1) mit einer Zykluszeit von  $\text{ZZ}(1) = 3\text{s}$  und die Steuerzelle (2) mit einer Zykluszeit von  $\text{ZZ}(2) = 60\text{s}$  betrieben wurde, offenbart dem Produktionstechniker die Anzahl störfreier Takte  $\text{AST}(1) = 2.000$  Takte bzw.  $\text{AST}(2) = 1.800$  Takte. Nunmehr würde der Greifer des Prozesses (1) eventuell den Vorzug bekommen. Nur mit entsprechender Detailarbeit lassen sich richtige Entscheidungen treffen; der Autor bezeichnet dieses althergebrachte Verfahren der Analyse und Aufbereitung der Daten als ein Vorgehen mit gesundem Menschenverstand.

Diese Betrachtungsweise ist erforderlich, um gleichartige Organisationsformen über den zykluszeitbereinigten Wert AST realistisch vergleichen zu können. Für den Einsatz baugleicher Linearachsen in verschiedenen Steuer-Kreisen (Montageautomat, Drehmaschine) sollte das Ausfallverhalten vergleichbar sein. Bestenfalls sollte das differente Ausfallverhalten baugleicher Elemente und Komponenten in einem Mittelwert zusammenfassbar sein.

Durch die Kombination derart gewonnener Erfahrungswerte in neuen Steuer-Kreisen können Voraussagen über das Betriebsverhalten in der Planungsphase gemacht werden, diesbezüglich können Simulationssysteme herangezogen werden. Der Autor möchte nachweisen, dass die meisten Verkettungsprobleme durchaus auch von Hand lösbar sind, wenn das Grundverständnis der Abhängigkeiten dem Betreiber bewusst gemacht worden ist.

In der Ablauforganisation des Steuer-Kreises, starre Verkettung, kann immer nur ein Element bzw. eine Komponente für die aktuelle Störung verantwortlich sein, auch wenn dadurch mehrere Ursachen in Folge und innerhalb eines Zyklus sichtbar werden. Nur die erste, auslösende Ursache wird der Stillstandszeit zugeordnet. Daraus können wir schlussfolgern, dass Störungen in einem Steuer-Kreis grundsätzlich nur seriell auftreten können.

Steuer-Kreise werden in der Regel durch Speicher-Programmierbare-Steuerungen (SPS) organisiert. Mit dem Erreichen mehrerer vereinbarter Stöorzustände (Signal fehlt, Zeitüberschreitung) unterbricht die SPS den Ablauf und geht in einen Stör-Modus über.

Die SPS kumuliert die Zeitdauer, bis der Bediener über eine Signalschnittstelle der SPS mitteilt, dass die Störung beendet ist. Die SPSen sind in der Regel so programmiert, dass diese Zeit als Reparatur- bzw. Instandsetzungszeit gewertet wird.

Wir betrachten wieder das Betriebsverhalten eines Steuer-Kreises am Beispiel des Zwei-Achsen-Handling-Gerätes gemäß Abb. 2.1; nunmehr aber mit Störungen in zwei verschiedenen Elementen bzw. Komponenten (Sensor 1; Greifer). Alternativ kann auch ein Element bzw. eine Komponente mit zwei unterschiedlichen Störursachen (Greifer verliert Teil, Greifer zerstört Teil) behandelt werden. Alternativ kann in technisch und organisatorisch bedingte Störungen unterschieden werden; das hat auf das Analyseverfahren keine Auswirkung, wohl aber auf das zu unterscheidende Ergebnis. In dem Erfassungszeitraum zwischen Schichtanfang und –ende befinden sich die bereits bekannten Störfreien Takte und die Stör-Dauern, Abb. 2.3.

Das allgemeine Analyse-Zeitfenster beginnt mit dem Ende der letzten organisatorischen Störung (schichtfrei) und endet mit dem letzten Takt in der Schicht, um die nächste organisatorische Störung einzuleiten (schichtfrei). In dem Analyse-Zeitfenster sind die beiden Stör-Arten A (blau) und B (rot) stochastisch verteilt. Die Unterscheidung der Störungsart kann global zwischen Technik (A) und Organisation (B) oder innerhalb des Oberbegriffs mit unterschiedlichen Ursachen (A: Greifer verliert Teil, B: Kabelbruch) erfolgen. Das spezifische Analyse-Zeitfenster beginnt mit der Auswahl des

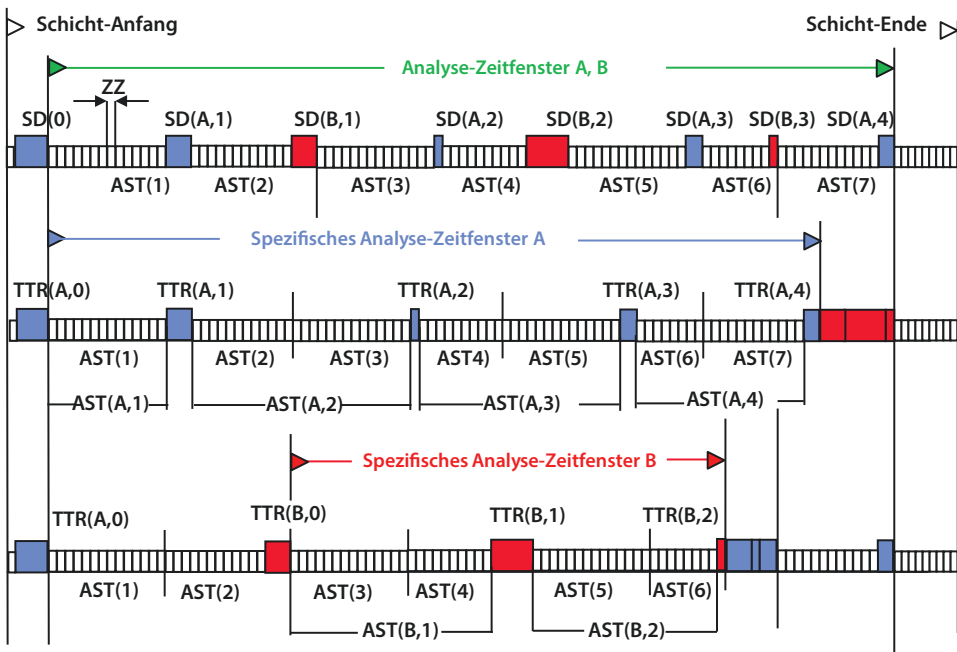


Abb. 2.3 Grundlagen zum Erfassungs-/Analyse-Zeitfenster



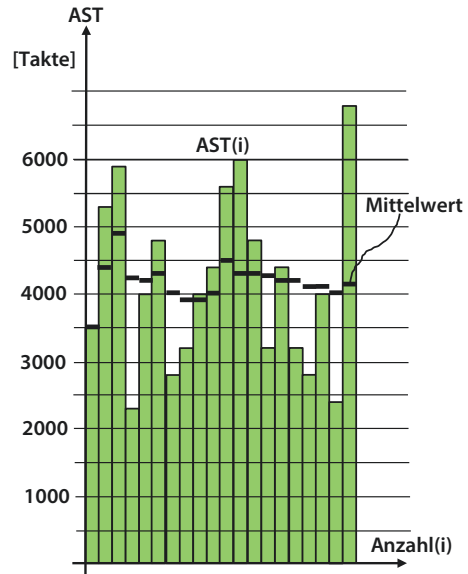
Analyseoberbegriffs oder der Ursache und am Ende der ersten Störung (dieser Spezifizierung). In der mittleren Schiene ist dies für die Ursache A dargestellt; in der unteren für B. Die erste Störung jeder Ursache wird zur Null-Störung  $TTR(x,0)$  abgewertet, so dass die spezifischen Analyse-Fenster immer mit einer Anzahl störfreier Takte beginnen und am Ende des Analysefensters mit der letzten Störung dieser Art enden. Die Aussagefähigkeit solcher Zeitfenster lässt sich mit jeder Erfassung von Daten verbessern, wenn diese Zeitfenster einfach graphisch aneinandergereiht werden. Optimale Bedingungen kann man schaffen, wenn die SPS die Datenerfassung über die Schichtdauer garantiert und diese an die Vorgängerdatei der letzten Schicht anhängt.

Mit der einheitlichen Analysephilosophie, dass die erste Störung der Art A oder B eliminiert wird und bis zur letzten Störung der gleichen Art ausgewertet wird, schaffen wir vergleichbare Daten der Prozesse. Damit müssen mindestens 2 Störungen gleicher Art innerhalb eines Erfassungszeitraums existieren, um eine verwertbare Aussage zu bekommen. Wichtig für die Vereinheitlichung ist, dass in den spezifischen Zeitfenstern die jeweiligen Fremd-Stördauern eliminiert werden. Mit diesen grundlegenden Daten des Betriebsverhaltens lassen sich alle weiteren Kennwerte des Systemverhaltens später bestimmen.

In den vorangegangenen Betrachtungen wurde die These aufgestellt, dass bei einem Übergewicht an technischer Störung das Ganze als TTR und im umgekehrten Falle als TTO gewertet wird. Nun existieren organisatorische Störungen, die eher den planerischen Störungen zuzuordnen sind. Wenn also in den Datenerfassungen das Warten auf Material zu Fehlzeiten am Prozess führt, dann wird diese wartebedingte Stördauer dem TTO zugeordnet. Ist hingegen ein Prozess nach vollendetem Takt ausgabefähig und der Kunde nicht aufnahmefähig, dann ist der Prozess blockiert, diese blockierbedingte Stördauer wird ebenfalls der TTO zugeordnet. In einer ziehenden Fertigung arbeitet der Lieferant mit größerem Nutztakt als der Kunde, so dass dieser Kunde oftmals auch nur für kurze Dauer auf Ware warten muss. Das bedeutet, dass man über die organisatorische Störung eines Prozesses durch die Art der Verkettung auch auf die technischen Probleme (ZZ,  $TTR(i)$ ) anderer Prozesse schließen kann. Grundsätzlich lässt sich erst einmal die Behauptung aufstellen, dass nur dann eine technische Störung TTR vorliegt, wenn diese durch die SPS selbst innerhalb der Steuerkreise erkannt wurde. Selbst ein NOTAUS wird in erster Linie als organisatorische Störung definiert, so lang nicht der Nachweis geführt wurde, dass eine Crash-Situation zu befürchten war. Sollten im Ablauf eines Stör-Takts verschiedene Störarten des Oberbegriffs oder der Ursachen  $TTx$  vorkommen, so werden diese mit ihren Zeitanteilen im Stör-Takt direkt aufeinanderfolgend dargestellt; die Stör-Dauer kann also durch  $SD = TTR + TTO$  gebildet werden.

Zunächst soll die Frage geklärt werden, inwieweit wie viele Einzeldatensätze  $AST(i)$ , ZZ,  $TTR(i)$ ,  $TTO(i)$  vorhanden sein müssen, um von einer gewissen Aussage-Sicherheit oder Repräsentanz der Daten ausgehen zu können. In Abb. 2.4 sind aus einer eintägigen und bereinigten Datenerfassung 20  $AST$ -Datensätze zu einer Störungs-Art A (Ursache, Element, Komponente) aufgenommen und in einem Balkendiagramm der Reihe nach aufgelistet. Dabei ist die große Schwankungsbreite der Datensätze am Anfang deutlich zu erkennen.

**Abb. 2.4** Laufzeitschwankung und Einschwingverhalten



Der erste Mittelwert ergibt sich aus der Summe aller bis dahin vorliegenden Datensätze  $AST(1)$  geteilt durch die Anzahl (1) der vorliegenden Datensätze; also ist der Mittelwert gleich dem Datensatz. Der letzte Mittelwert ergibt sich aus der Summe  $AST(1)$  bis  $AST(i)$  bezogen auf die Gesamtanzahl ( $i$ ). Bei den ersten Datensätzen pendeln die Mittelwerte noch recht gravierend. Nach ca. 10 Datensätzen schwingt sich der Mittelwert auf einen Trendwert ein, den man ruhigen Gewissens bereits als vorläufigen Mittelwert betrachten kann, weil auch ein Grob-Ausschlag nur noch geringe Wirkung zeigt. Nach 20 Datensätzen ist der Mittelwert kaum noch Schwankungen unterworfen und für die Abschätzung praktischer Umsetzungen völlig ausreichend. In der Praxis sind für ein bestimmtes Betriebsmittel in der Regel ähnliche Störartursachen zu erkennen, so dass für die Standardursachen (z. B. Greifer verliert Teil, Sensor verstellt, Druckluftschlauch abgerissen, etc.) in der Regel schon nach einem Tag oder wenigen Schichten ein Trend zu beobachten ist. Bei einem Mehrschichtbetrieb kann man auch für die gleichen Betriebsmittel unterschiedliche Betriebsverhalten erfassen. Das liegt kaum an der Tageszeit, wohl eher an den beteiligten Menschen. Desgleichen lassen sich bei der Störungsart auch die Varianten mit einbeziehen, wenn die SPS diese erkennt. Letztendlich kann noch angemerkt werden, dass alle Verstell-/Justier-Möglichkeiten eines Prozesses von der SPS überwacht werden sollten, damit ein Rückschluss des Betriebsverhaltens auf diese Veränderung gezogen werden kann.

Mit der vorangegangenen Definition der Analyse-Zeitfenster lassen sich nunmehr viele Analysen anderer Tage auf der groben Schicht-Ebene problemlos aneinanderreihen und die Datensicherheit erhöhen. Damit ist der erste AST-Wert, der niemals realistisch sein konnte, hinsichtlich seiner Wichtigkeit von nachrangigem Interesse. Allerdings muss hier

auch betont werden, dass ein Neuanfang mit Datensätzen durchaus Sinn machen kann, wenn sich ein völlig neuer Trend durch gravierende Prozessveränderungen abzuzeichnen beginnt.

Die ermittelten Einzeldaten müssen zur weiteren Verwendung als Mittelwerte aufgearbeitet werden, dazu dient ein wichtiger Hinweis: Wegen der langen Schreibweise von MAST und MTTR werden diese Daten bei Bedarf auch in kürzerer Schreibweise verwendet;

$$MT = MAST \text{ und } MR = MTTR$$

Wenn für eine beliebige Ereignis-Häufigkeit EH aufeinander folgender Datensätze ein Mittelwert gebildet werden soll, dann ergibt sich daraus die Mittelwertfunktion  $MT(x)$  in Abb. 2.4.

$$MT(x) = \frac{1}{EH} \sum_{i=1}^{EH} AST(x, i) \quad (2.2)$$

Wenn man in analoger Weise mit den Stör-Dauern  $TTR(i)$  verfährt, so lässt sich ein Mittelwert  $MR(x) = MTTR(x)$  definieren

$$MR(x) = \frac{1}{EH} \sum_{i=1}^{EH} TTR(x, i) \quad (2.3)$$

Desgleichen kann man mit der übergeordneten Stör-Art  $MO = MTTO(x)$  zur Beschreibung der Organisationsgüte verfahren. Hierbei werden die Unterarten (personalbedingte Störzeiten P, materialflussbedingte Blockierzeiten B, Materialflussbedingte Wartezeiten W, qualitätsbedingte Fehlzeiten Q (gesperrt, Ausschuss), etc.) aufsummiert.

Wenn man in analoger Weise auch die Zykluszeiten  $ZZ(i)$  über die SPS ermittelt, dann stellt der Betreiber fest, dass Zykluszeiten nicht nur beim Wertschöpfungswechsel, sondern auch zu anderen Gelegenheiten verändert werden können. In vielen Prozessen kann der Maschinenführer mit einfachsten Mitteln (Druckluft, Drehzahl, Toleranzvorgaben, etc.) die Zykluszeiten verändern; die Motive hierzu sind in der Regel auch positiv. Problem bei jeder Parameterveränderung ist, dass sich auch das Betriebsverhalten ändern wird. Um als Produktionstechniker auf der sicheren Seite zu agieren, lässt dieser sich gemäß vorangegangener Philosophie über die SPS auch den Mittelwert der Zykluszeit  $ZZ(x)$  berechnen.

$$ZZ(x) = \frac{1}{AST(x)} \sum_{i=1}^{AST(x)} ZZ(x, i) \quad (2.4)$$

Es macht unter dieser Prämisse durchaus Sinn, wenn die Datensätze eines Untersuchungszeitraums beim Wertschöpfungswechsel durch die SPS markiert werden, damit auch produktspezifische Betriebsverhaltensanalysen gefahren werden können.

Aufgrund dieser straffen Datenstruktur lassen sich ereignisorientierte Simulationssysteme mit diesen realistischen Daten füttern, um nicht nur den technischen, sondern auch

den organisatorischen Einfluss gerade in vernetzten Systemen in der Planungs- oder Verifizierungsphase sichtbar zu machen. Für eine SPS ist, wenn derart programmiert wurde, eine Erfassung und Ausweisung dieser Daten völlig problemlos.

Der technische Zustand einer Einrichtung lässt sich also durch ZZ, MR und MT ausreichend beschreiben. In der Praxis wird zur Beschreibung des technischen Zustands häufig der Begriff der Verfügbarkeit  $V(x)$ , benutzt.

$$V(x) = \frac{MT(x) * ZZ(x)}{MT(x) * ZZ(x) + MR(x)} 100\% \quad (2.5)$$

Verfügbarkeiten beschreiben also den technischen Zustand eines Elements, einer Zelle, einer Komponente oder eines Steuer-Kreises; demzufolge sollten in den benutzten Kennzahlen keinerlei organisatorische Stördauern (z. B.: Warte- und Blockierzeiten) verwendet werden. Dies kann nur sichergestellt werden, wenn der Begriff der Verfügbarkeit von Steuer-Zellen bis hin zu Hand-Shake-verketteten Steuerkreisen, also Steuer-Einheiten, verwendet wird. Die Produktionstechniker eines Unternehmens möchten in der Regel gern wissen, wie viel Produktionsverlust durch eine Ursache, ein Element, eine Zelle, ein Kreis oder eine Einheit zu verzeichnen ist, insofern definieren wir den spezifischen Verfügbarkeitsverlust  $VV(x)$ .

$$VV(x) = \frac{MR(x)}{MT(x) * ZZ(x) + MR(x)} 100\% \quad (2.6)$$

Mit dem speziellen Verfügbarkeitsverlust einer Störungsart lässt sich für die Instandhaltung ein Ranking mittels ABC-Analyse erstellen. Der Begriff der Verfügbarkeit wird bis zur Betrachtungsebene der Produktions-Einheiten verwendet, da hier das Betriebsverhalten durch starre Verkettung und Hand-Shake Verkettung beeinflusst wird; ab dieser Ebene wird das Anlagenbetriebsverhalten überwiegend durch staufähige oder lose Verkettungen mit anderen technischen Lösungen bestimmt, so dass hier deutlich mehr organisatorische Auswirkungen untereinander zu vermelden sind. Ein Prozess hat z. B. eine längere Störung, der Versorgungspuffer läuft voll und der Versorger bleibt stehen, weil er seine Ware nicht mehr loswerden kann. Ab der Betrachtungsebene der Produktions-Einheit, -System und -Netzwerk kommt neben der Verfügbarkeit der Prozess-Einheiten nun auch der Begriff des Nutzungsgrads  $N(x)$  des Gesamtsystems zum Tragen.

$$N(x) = \frac{MT(x) * ZZ(x)}{MT(x) * ZZ(x) + MR(x) + MO(x)} 100\% \quad (2.7)$$

Unter den beschriebenen Voraussetzungen kann die Verfügbarkeit  $V(x)$  eines Steuer-Kreises nur dann mit der Verfügbarkeit eines baugleichen Steuer-Kreises verglichen werden, wenn beide Betriebsverhaltensanalysen unter der Voraussetzung gleicher Zykluszeiten durchgeführt wurden. Der Umgang mit Verfügbarkeiten und Nutzungsgraden sollte eigentlich nur mit äußerster Vorsicht vonstattengehen, da es sehr schnell zu Fehlinterpretationen führen kann.

Ein autarker Steuerkreis, der für sich allein, z. B. bei einem Abnahmelauf, betrieben wird, kann nur durch seine Einzel-Verfügbarkeit definiert sein. Autarke Steuerkreise, die über staufähige oder lose Verkettung betrieben werden, werden durch ihre individuellen Verfügbarkeiten und bei gleicher Zykluszeit über einen gemeinsamen Nutzungsgrad beschrieben. Bei unterschiedlichen Zykluszeiten unterscheiden sich auch die Nutzungsgrade.

### Beispiel

Zwei Produktionsmitarbeiter wetteifern vor dem Chef um die höchsten Verfügbarkeiten bei zwei baugleichen Prozessen. Der eine Mitarbeiter des Bereichs a glänzt mit der Verfügbarkeit  $V(a) = 95\%$ . Der andere Mitarbeiter des Bereichs b duckt sich bei der Verfügbarkeit seines Prozesses  $V(b) = 90\%$ . Der Chef lässt sich von diesen Werten nicht beeinflussen und verlangt die Detail-Daten:

$$V(a) = 95\% = \frac{95 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} * 100\%}{95 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} + 5 \text{ min}}$$

$$V(b) = 90\% = \frac{100 \text{ Takte} * 0,9 \text{ min} * 100\%}{100 \text{ Takte} * 0,9 \text{ min} + 10 \text{ min}}$$

Der Mitarbeiter a ist hochmotiviert, denn seine Reparaturzeiten sind deutlich geringer als die des Kollegen; dafür hat der Mitarbeiter b seine Maschine leistungsmäßig optimiert und pro 100min Produktionsdauer schlicht und ergreifend 5 Erzeugnisse mehr produziert und trotz schlechterer Verfügbarkeit mehr zum wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens beigetragen. Verfügbarkeiten und Nutzungsgrade sind also mit äußerster Vorsicht zu genießen, wenn eine Führungskraft davon wirksame Maßnahmen ableiten möchte.

### Weiteres Beispiel

Zwei Mitarbeiter demonstrieren ihrem Chef zufrieden die gleichen Verfügbarkeiten zweier baugleicher Maschinen in unterschiedlichen Bereichen. Der Chef lässt sich nicht beeinflussen und verlangt die Detail-Daten:

$$V(a) = 90\% = \frac{90 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} * 100\%}{90 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} + 10 \text{ min}}$$

$$V(b) = 90\% = \frac{9 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} * 100\%}{9 \text{ Takte} * 1,0 \text{ min} + 1 \text{ min}}$$

Erst bei genauerem Hinsehen erkennt der Chef, dass die Daten der Maschine a im Durchschnitt alle 90min eine Störung prognostiziert und die Maschine b alle

9min. Damit wäre die Maschine a hinsichtlich des Personalaufwands durchaus für eine Mehrmaschinenbedienung geeignet. Die Maschine b dürfte wohl einen eigenen Bediener mit vollem Kosteneinsatz beanspruchen. Unterm Strich haben die Verfügbarkeiten allein keine Aussagekraft und sind mit Vorsicht zu genießen.

Jeder Produktionsbetrieb mit SPS-gesteuerten Maschinen und Anlagen ist gut beraten, wenn er zur eigentlichen Funktionalität des Ablaufs auch die Programmroutinen zur Maschinen-Daten-Erfassung MDE erwirbt. Des Weiteren ist es überaus sinnvoll, wenn zu dieser reinen Stör-Zeit- und Stör-Ort-Erfassung auch eine Stör-Ursachen-Erfassung mittels Bedienerterminal geleistet werden kann. SPSen können über die zu erreichenden Endlagensensoren in der Regel nur feststellen, dass eine Prozesskomponente den geplanten Zielort in der vorgegebenen Zeit nicht erreicht werden konnte; die SPS geht in Störung und vermittelt dem Bediener über eine Anzeige bestenfalls den Stör-Ort; die Ursachen zu diesem Stör-Ereignis können aber vielschichtig sein; das Analysieren und Definieren dieser Ursachen kann üblicherweise nur ein gut ausgebildeter Bediener leisten. Angesichts des vorangegangenen Beispiels mit den beiden Prozessen im direkten Vergleich, ist es aus Sicht der Führungskraft doch verständlich, eine vergleichbare Betrachtungsweise zu fordern. Dieser Ansatz setzt voraus, dass die Betriebsverhaltensdaten im positiven Sinne manipulierbar sind, ohne deren Sinn zu verfälschen. Wichtig bei der Veränderung eines aus ZZ, MTTR und MAST bestehenden Datensatzes ist, dass diese Manipulation nur unter der Prämisse gleicher Verfügbarkeit vorgenommen werden darf, damit das ursächliche im veränderten Verhalten wiedererkennbar und reproduzierbar bleibt.

Da die die Reparaturdauern MTTR kaum plan-/manipulierbar sind, wird man sich auf die Manipulation der Parameter der Einheits-Laufdauer ELD respektive Mean-Time-Between-Failures MTBF einstellen müssen.

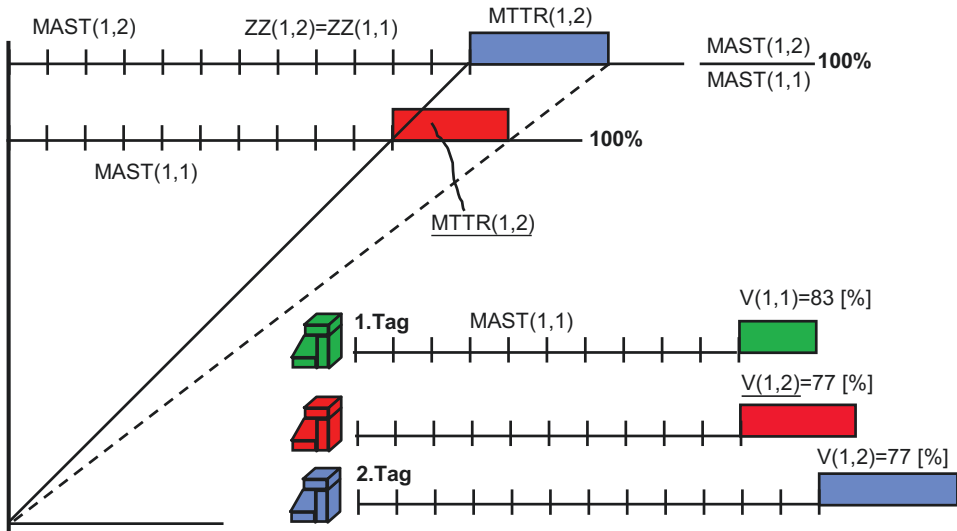
$$\text{ELD}(\mathbf{x}, \text{Ur}) = \text{MAST}(\mathbf{X}, \text{Ur}) * \text{ZZ}(\mathbf{x}, \text{Ur}) = \text{MTBF}(\mathbf{x}, \text{Ur}) \quad (2.8)$$

Unter der Prämisse gleicher Verfügbarkeiten, ergibt sich der Strahlensatz zu.

$$\frac{\text{MTTR}(\mathbf{x}, 1)}{\text{MTTR}(\mathbf{x}, \text{Ur})} = \frac{\text{MAST}(\mathbf{x}, 1) * \text{ZZ}(\mathbf{x}, 1)}{\text{MAST}(\mathbf{x}, \text{Ur}) * \text{ZZ}(\mathbf{x}, \text{Ur})} \quad (2.9)$$

Es werden nachfolgend zwei Manipulationsansätze vorgestellt, die der Praktiker bei vergleichenden Betriebsverhaltensanalysen nutzen könnte. In der ersten Variante sind die Anhängigkeiten aus Gl. 2.9 im Strahlensatz dargestellt, Abb. 2.5. Es wurde das Betriebsverhalten eines Prozesses x am Tag (i) analysiert (grüner Prozess,  $x = 1, i = 1$ ) und die Parameter ZZ(1,1), MAST(1,1), MTTR(1,1) und V(1,1) ermittelt. An einem anderen Tag ( $i = 2$ ) wurde am gleichen Betriebsmittel ( $X = 1$ ) eine weitere Betriebsverhaltensanalyse mit ZZ(1,2), MAST(1,1), MTTR(1,2) und V(1,2) gefahren (blauer Prozess).

Unter der Prämisse gleicher Verfügbarkeiten  $V(1, 1) = V(1, 2)$  während der Manipulation und zudem gleicher Zykluszeiten  $\text{ZZ}(1, 1) = \text{ZZ}(1, 2)$  wird die Mittlere

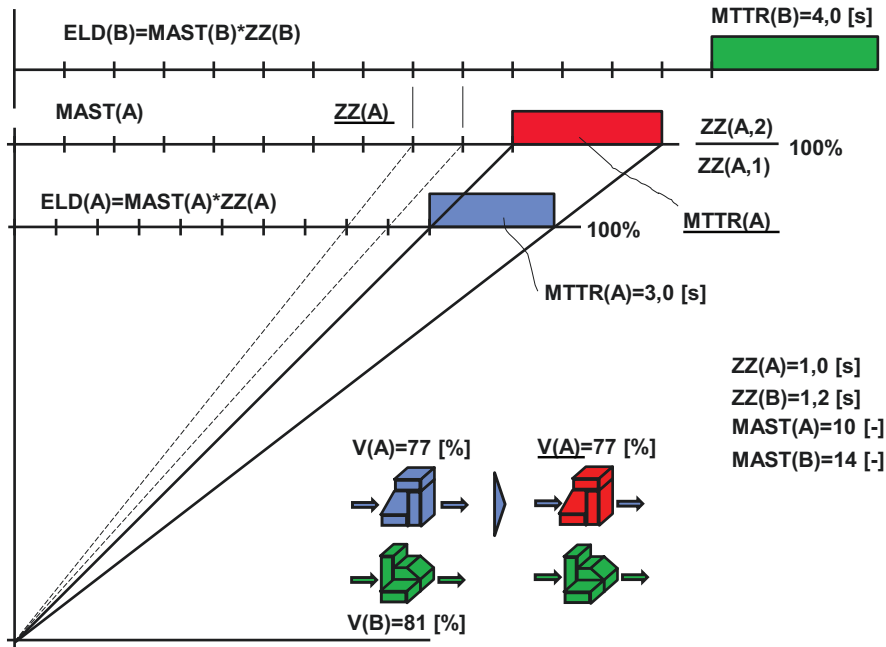


**Abb. 2.5** Schaffung vergleichbarer Datensätze

Anzahl störungsfreier Takte  $MAST(1,1)$  des ersten Tages zum Basiswert 100 % erklärt und im Diagramm mit einem sinnvollen Abstand zur Abszisse aufgetragen. Anschließend wird die Erfassung des zweiten Tages mit  $MAST(1,2)$  und  $MTTR(1,2)$  auf einer parallelen Linie mit dem Abstand  $MAST(1,2) \cdot 100 \% / MAST(1,1)$  zur Abszisse aufgetragen. Ziel ist es also, die Mittlere Anzahl störungsfreier Takte des zweiten Tages an die des ersten Tages anzupassen. Über den Strahlensatz lässt sich nunmehr die manipulierte Reparaturzeit  $MTTR(1,2)$  für die Konstellation  $MAST(1,2) = MAST(1,1)$  erzeugen. Für den Nutzer manipulierter Daten ist nun bei gleichem MAST sehr einfach zu erkennen, wer den Engpass erzeugt hat, um dann auf dieser Basis in die Tiefe zu steigen. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass diese Manipulationen zwar identische Verfügbarkeiten besitzen, aber mit manipuliertem Zeitverhalten.

Die manipulierten Datensätze dürfen auf keinen Fall mit anderen Datensätzen durch Aneinanderreihung gekoppelt werden, da in der Regel die Ereignisanzahl der jeweiligen Betriebsverhaltensdaten nicht bekannt oder mitgeführt wurden. Ist diese Ereignisanzahl jedoch bekannt, so können die einzelnen Datensätze mit eben dieser jeweiligen Häufigkeit aneinandergereiht werden, ergeben wieder ein stochastisches Gesamtverhalten und können erneut zu Mittelwerten umformuliert werden.

In der Regel geht man davon aus, dass die Leistung eines Prozesses und damit auch die Zykluszeit bei gleichem Erzeugnis über mehrere Schichten konstant bleiben. Also geht man im Normalfall davon aus, dass eine Zykluszeitmanipulation nicht vonnöten ist. Dennoch soll eine spezielle Situation nicht unerwähnt bleiben, in der eine solche Manipulation durchaus gestattet werden könnte. Mit diesen Kenntnissen wurden an zwei baugleichen Prozess-Varianten A und B, [Abb. 2.6](#), Maschinen-Daten-Erfassungen mit den Ergebnissen



**Abb. 2.6** Strahlensatz zur Datenanpassung

$$MAST(A) = 10[-], \quad ZZ(A) = 1[s] \quad \text{und} \quad MTTR(A) = 3[s]$$

und

$$MAST(B) = 14[-], \quad ZZ(B) = 1,2[s] \quad \text{und} \quad MTTR(B) = 4[s]$$

durchgeführt. Es hätte auch eine Maschine mit zwei Datenerfassungen mit Tagschicht A und Nachtschicht B gewesen sein können. Es wird also die Frage aufgeworfen, warum baugleiche Prozesse mit unterschiedlichen Zykluszeiten gefahren werden und welche Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können. Bei gleicher Technik und verändertem Parameter hat der Produktionstechniker den Wunsch, diese unterschiedlichen Datensätze zu verwenden, um das Ergebnis mit anderen Datensätzen vergleichen zu können. Ein direkter Vergleich der beiden Datensätze ist aufgrund der unterschiedlichen Zykluszeiten nicht möglich, so dass über den Umweg der Datenmanipulation eine Bewertung versucht werden soll.

Die Einheits-Laufdauer  $ELD(A) = MAST(A) * ZZ(A)$  des Datensatzes mit der kleineren Zykluszeit (Ausgangs-ELD) wird im Betriebsverhalten-Strahlensatz mit einem passenden Abstand parallel zur Abszisse platziert und zu 100 % definiert, [Abb. 2.6](#). Die zweite Einheits-Laufdauer  $ELD(B) = MAST(B) * ZZ(B)$  mit der größeren Zykluszeit



(Ziel-ELD) wird ebenfalls parallel zur Abszisse im prozentualen Verhältnis, dem sogenannten Manipulations-Faktor  $MF(A)$ , platziert.

$$MF(AB) = \frac{ZZ(B)}{ZZ(A)} \quad (2.10)$$

Anschließend wird ein Strahl vom Koordinatenursprung über das Ende der Ausgangs-ELD bis zur Ziel-ELD geführt; damit ist die manipulierte ELD(A) konstruiert.

$$\underline{ELD(A)} = MAST(A) * \underline{ZZ(A)} = MAST(A) * ZZ(B) \quad (2.11)$$

Die Mittlere Reparaturzeit  $MTTR(A)$  aus diesem Manipulationsansatz lässt sich in analoger Weise über einen Strahl ableiten. Die Umwandlung von Zykluszeiten über den Manipulationsansatz ist vom Grundsatz her mit genügender Vorsicht zu behandeln, da mit steigender Zykluszeit und konstanter Produktionsdauer die Tagesleistung nicht mehr erzielt werden kann. Unter bestimmten Voraussetzungen und mit dem deutlichen Hinweis auf derartige Manipulation kann es dennoch oftmals hilfreich sein.

So ist z. B. die Einheits-Laufdauer des manipulierten Datensatzes  $ELD(A)$  des Prozesses A deutlich kleiner als die des Prozesses B, so dass im direkten Vergleich ein Mitarbeiter des Prozesses A öfter in den Prozess mit seiner Reparatur eingreifen muss.

Allerdings wird über diese ergebnisvergleichende Rechnung auch deutlich, dass die Reparateteure am Prozess A die Reparaturzeiten deutlich besser im Griff haben. Vielleicht haben diese überhaupt oder auch nur die besseren Werkzeuge, vielleicht haben die Mitarbeiter auch nur die Sicherheitsvorkehrungen außer Kraft gesetzt und so die oftmals lästigen Nebenzeiten unterdrückt. Das sind die Fragen, die der Produktionstechniker dann stellen wird. Und wenn Optimierungsansätze sichtbar werden, dann sind sie auch für andere Betriebsmittel nutzbar. Selbstverständlich könnte ein zykluszeit-manipulierter Datensatz nun auch noch hinsichtlich der Häufigkeit manipuliert werden, so dass ein direkter Datensatzvergleich nur noch durch unterschiedliche Reparaturzeiten denkbar wäre.

Dem Produktionsingenieur sei geraten, derartige Datenmanipulationen kenntlich zu machen und nicht zu speichern, sondern sie bei Bedarf neu zu generieren. Gespeichert werden nur die Urdatensätze eines Erfassungszeitfensters, um damit entsprechenden Auswertungen individuell und neu zu formen. Jedes Zeitfenster kann durch additive Kopplung mit anderen Zeitfenstern erweitert werden, so dass die Datensicherheit jeder einzelnen Ursache kontinuierlich gesteigert wird. Die Vorteile der Betriebsverhaltensmanipulation liegen eindeutig in der Vergleichbarkeit der Daten untereinander.

Mit der rechnerischen Manipulation des Zeitverhaltens einer Produktions-Einheit ist aber der Bedarf an Bedieneraktivitäten direkt gekoppelt, so dass ein manipulierter Datensatz eine rechnerisch freie Kapazität belegen und zu falschen Begehrlichkeiten führen könnte. Wenn also die Auslastung und die Stresssituation des Mitarbeiters ermittelt werden soll, so muss zwingend mit den ursprünglich erfassten Werten gearbeitet werden.

## 2.3 Starre Verkettung

Die Grundlagen der starren Verkettung im Materialfluss sind bereits in den vorangegangenen Kapiteln und insbesondere in Abb. 2.1 angedeutet. Ein Steuerkreis, in diesem Fall das Handhabungsgerät mit Vertikal- VA, Horizontalachse HA und Greifer GR, ist ein in sich geschlossener Ablauf mehrerer Komponenten, der durch interne (Ereignisse, Zeiten) und externe Steuersignale EP und AP angeregt und auch gestoppt werden kann. Markant ist dabei, dass die Komponenten und auch der Steuerkreis selber immer wieder zum Ausgangspunkt des Ablaufstarts zurückkommt. In diesem Steuerkreis bedeutet jede Komponentenbewegung eine Teilmenge der Zykluszeit. Bedingt durch den in der Regel seriellen Ablauf können auch nur die gerade bewegten Komponenten in dieser Bewegung eine Störung erfahren. Zur Beschreibung der theoretischen Anhängigkeiten wird die Auswirkung des Einbaus einer neuen Komponente K in einen bereits vorhandenen Steuerkreis SK in Abb. 2.7 veranschaulicht.

Das stochastische Betriebsverhalten des Steuerkreises ist mit  $ZZ(i)$ ,  $AST(i)$  und  $TTR(i)$  gegeben und im oberen Betriebsverhaltensdiagramm dargestellt.

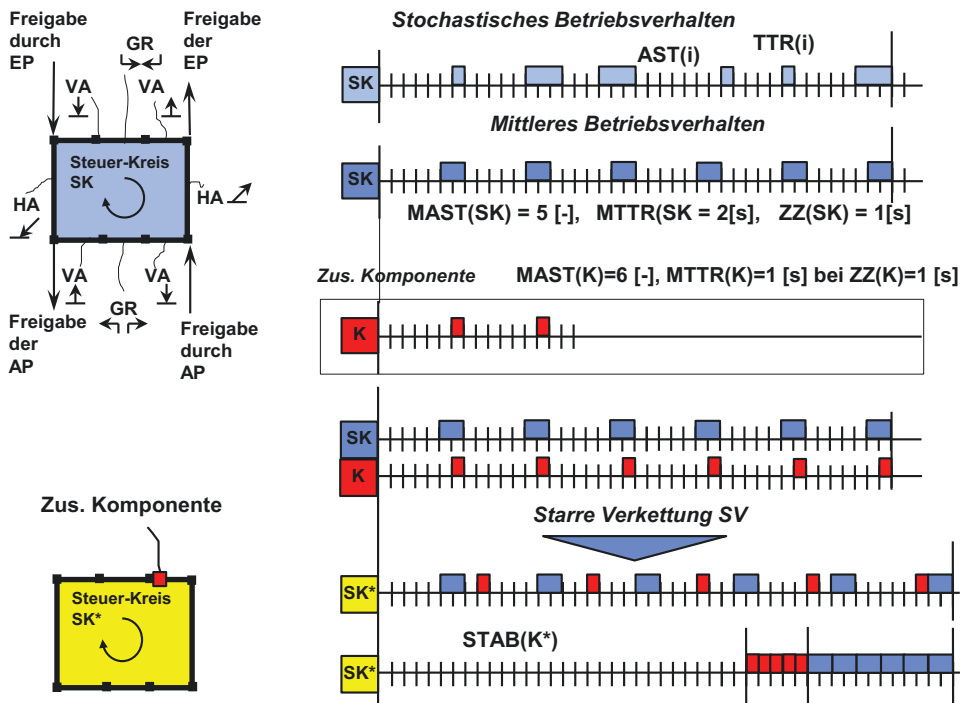


Abb. 2.7 Starre Verkettung: Steuerkreis mit Zusatzkomponente

Das mittlere Betriebsverhalten  $MAST(SK)$ ,  $MTTR(SK)$  und  $ZZ(SK)$  des Steuer-Kreis SK ist daraus ermittelt und im zweiten, darunter angeordneten, Betriebsverhaltensdiagramm skizziert. Aus beiden Darstellungen des Betriebsverhaltens resultiert die Verfügbarkeit  $V(SK) = 71,43 \%$ .

In diesen Steuer-Kreis SK wird nun eine weitere Komponente K (z. B. Kraftmesser, Schwenkachse für den Greifer, etc.) so installiert, dass diese Komponente vor dem Anregen der Vertikalachse abgefragt wird. Das Mittlere Betriebsverhalten des Sensors wurde an einem anderen Prozess mit exakt gleicher Zykluszeit ermittelt. Wenn die Komponente an einem anderen Prozess mit nicht gleicher Zykluszeit ermittelt wurde, kann diese Fremd-Zykluszeit für die neue Nutzung auf die Ziel-Zykluszeit  $ZZ(K) = ZZ(SK)$  des Prozesses manipuliert werden. Ein auf der Realität angepasster Wert ist in diesem Fall besser, als ein frei erfundener Wert.

Der Steuer-Kreis kann nun um einen weiteren Störungs-Partner, Komponente K, erweitert werden; die Verfügbarkeit dieser Komponente ergibt sich zu  $V(K) = 85,71 \%$ .

Nach der Integration der Komponente in dem Kreis werden beide Systeme nach altbewährter Art und Weise ihr spezifisches Betriebsverhalten innehaben. Der Beweis der Auswirkungen kann selbstverständlich auch unter Zuhilfenahme sehr langer stochastischer Erfassungen geführt werden. Unter Zuhilfenahme der Mittelwerte lässt sich die Beweisführung bezüglich des Betriebsverhaltensauswirkungen recht elegant gestalten. Im graphischen Beweis werden die mittleren Betriebsverhalten vom Steuer-Kreis SK und der neuen Komponente K übereinander mit gleichem Startzeitpunkt angeordnet, SK-K-Betriebsverhaltensdarstellung in Abb. 2.6. Im Rahmen der starren Verkettung, unterste Betriebsverhaltensdarstellung, beginnt der erweiterte Steuer-Kreis SK\* nun seine Stör-Arbeit. Nach dem 5-ten Takt stört erstmals der Alt-SK, nach dem 6-ten Takt die K, nach dem 10-ten Takt wieder die SK, nach dem 12-ten wieder die K, usw.

Dieses Wechselspiel an Störungen wird zu irgendeiner Taktanzahl durch die Besonderheit der seriellen Stör-Überdeckung markant unterbrochen, denn nunmehr sind in einem einzigen Stör-Takt beide Störungen in Reihe aufgetreten. Wenn man ab hier das Wechselspiel der Störungen weiterführen würde, so erkennt man den Wiederholungscharakter dieses Betriebsverhaltens. Dies ist ein charakteristisches Verhalten der starren Verkettung und die Anzahl der gefertigten Stück wird als Stabiler Zustand STZ bezeichnet. Beide Systeme erreichen diesen Zustand bei gleicher Stückzahl, so dass sich dieser aus dem Produkt der MT ( $MAST$ ) ableiten lässt. Dies gilt auch, wenn mehrere Störpartner gleichzeitig starr verkettet werden.

$$STZ = \prod_{i=1}^n MT(i) \quad (2.12)$$

Eine weitere Auffälligkeit dieser Verkettung-Art ist, dass die Anzahl der SK-eigenen Störungen  $MR(SK)$  durch die Häufigkeit des Stör-Gegners  $MT(K)$  bestimmt wird und umgekehrt. Die gesamte Stördauer  $SD(SK^*)_{SV}$  in der starren Verkettung, Index SV, ergibt

sich zu:

$$SD(SK^*)_{SV} = MT(K) * MR(SK) + MT(SK) * MR(K) \quad (2.13)$$

und die Produktions-Dauer  $PD(SK^*)_{SV}$  in der starren Verkettung zu.

$$PD(SK^*)_{SV} = STZ * ZZ(SK^*) + SD(SK^*)_{SV} \quad (2.14)$$

Das aus beiden Stör-Partnern generierte Gesamtstörbild mündet letztendlich in einer neuen Verfügbarkeit  $V(K^*)_{SV}$  dieses Gesamtverhaltens.

$$V(K^*)_{SV} = STZ / PD(SK^*)_{SV} \quad (2.15)$$

Unabhängig von der Verkettungsart muss das Verfügbarkeits-Ergebnis der Verkettung immer schlechter oder mindestens gleich sein als die schlechteste Ausgangs-Einzel-Verfügbarkeit aller Verkettungspartner. In dem vorliegenden Fall waren die Einzelverfügbarkeiten mit  $V(SK) = 71,43 \%$  und  $V(K) = 85,71 \%$  vorgegeben und ließen das Gesamtergebnis auf  $V(K^*)_{SV} = 63,83 \%$  absinken. Damit ist sehr plausibel dargestellt, dass in starren Verkettungen insbesondere auf die zu große Häufigkeit von Störpartnern geachtet werden muss, damit das Betriebsverhalten nicht plötzlich in unerwartete Tiefen absinkt.

### Beispiel

Wenn in einem Automobilwerk x Schweißroboter in einer Fertigungsstraße über einen Hubbalkentransport mechanisch und steuerungstechnisch miteinander gekoppelt sind, dann ist dieses Gesamtpaket eine einzige starre Verkettung. Alle Komponenten, Steuerzellen und Wertschöpfungseinheiten müssen dann sehr hohe Einzelverfügbarkeiten innehaben, wenn die Gesamtanlage eine Verfügbarkeit größer 80 % haben soll. Selbstverständlich kann man die Zykluszeiten reduzieren wollen, aber kleinere Zykluszeiten wirken sich in der Regel auch negativ auf das Betriebsverhalten aus. Irgendwann ist das Ende der technischen Optimierung erreicht und dann bleibt nur noch die konstruktiv-planerische Entkopplung der Prozesse.

Der Vollständigkeit halber sei hier vermerkt, dass ein über 2 Stör-Partner in starrer Verkettung gemitteltes Betriebsverhalten in einem Folgeschritt mit nächster störungswilliger Komponente im seriellen Einzelverfahren, wie beschrieben, gekoppelt werden können. Die technische Ausgestaltung eines Prozesses lässt sich beliebig ausgestalten, die dazugehörige Betriebsverhaltensstudie ebenfalls. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die bleibende Überschaubarkeit der Verkettungspartner.

Der Vollständigkeit halber sei hier aber auch vermerkt, dass mehrere Stör-Partner in einer starren Verkettung gleichzeitig, also in einem Arbeitsgang, verkettet werden können und dabei weitere Besonderheiten sichtbar werden. In [Abb. 2.8](#) sind drei solcher Prozess-Komponenten (K1, K2 u. K3) seriell-störend in Aktion.

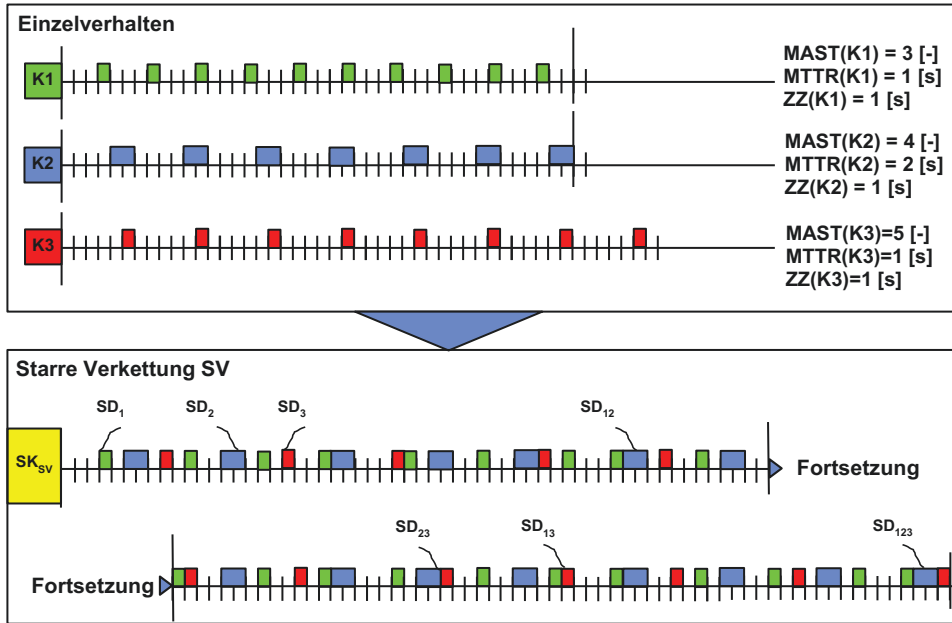


Abb. 2.8 Starre Verkettung mehrerer Komponenten

Bei zwei Stör-Komponenten hatten wir bereits die Eigenart vermerkt, dass ein Stör-Takt mit beiden Stördauern in Serie belegt wird. Bei drei Komponenten gibt es eine Trio-Störung-Art (SD<sub>123</sub>), drei unterschiedliche Duett-Störungs-Arten (SD<sub>12</sub>, SD<sub>13</sub> u. SD<sub>23</sub>) mit dazugehörigen Häufigkeiten und drei Single-Störungs-Arten (SD<sub>T1</sub>, SD<sub>T2</sub> u. SD<sub>T3</sub>) mit dazugehörigen Häufigkeiten. Insbesondere bei allen kombinierten Störungs-Arten muss die mathematische Kombinatorik berücksichtigt werden, bei mehr als drei Komponenten kann das in der manuellen Analyse schnell unüberschaubar werden.

Die Kombinatorik hat Auswirkungen auf die Ereignisanzahl aller Störungen. Zuvor lassen sich alle Stördauern dieser starren Verkettung durch nachfolgende Summe bilden, wobei festzustellen ist, dass immer die Störung einer Komponente durch die Häufigkeiten der anderen Stör-Komponenten gebildet wird und daraus die Stördauer-Summe SD(SK<sub>SV</sub>) abgeleitet wird.

$$SD(SK_{SV}) = \sum_{i=1}^n SD(i)_{SV} \quad (2.16)$$

Mit den Einzelabhängigkeiten:

$$SD(1)_{SV} = MR(1) * [MT(2) * MT(3)]$$

$$SD(2)_{SV} = MR(2) * [MT(1) * MT(3)]$$

$$SD(3)_{SV} = MR(3) * [MT(1) * MT(2)]$$

Die gesamte Produktionsdauer PD wird wieder, wie bereits am anderen Beispiel gezeigt, durch die Gesamtaktanzahl des Stablen Zustands STZ, der Zykluszeit ZZ und der Stördauer gebildet.

Da die Gesamtstördauer der starren Verkettung berechenbar geworden ist, bleibt die Frage offen, ob das durch die starre Verkettung erzeugte stochastische Verhalten wiederum durch einen Mittelwert rechnerisch darstellen lässt. Hierzu wird der Blick auf die Art der Störungs-Kombinationen geworfen. Die oben aufgeführten Single- SD(i), Duett- SD(ii) und Trio-Stördauern SD(iii) haben im Rahmen der Kombinatorik auch eindeutig definierte Ereignis-Häufigkeiten EH gemäß nachfolgender Liste, so dass daraus die Gesamt-Ereignis-Häufigkeit EH(SK<sub>SV</sub>), mit den Einzelabhängigkeiten abgeleitet werden kann.

$$EH(SK_{SV}) = \sum_{i=1}^n EH(i) \quad (2.17)$$

Mit den Einzelabhängigkeiten:

$$EH(1) = [MT(K2) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(2) = [MT(K1) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(3) = [MT(K1) - 1] * [MT(K2) - 1]$$

$$EH(12) = [MT(K3) - 1]$$

$$EH(13) = [MT(K2) - 1]$$

$$EH(23) = [MT(K1) - 1]$$

$$EH(123) = 1]$$

Da die Gesamtanzahl der gemachten Takte auch in der 3er-Konstellation mit STZ bekannt ist, kann nunmehr aus dem erzeugten stochastischen Betriebsverhalten die Mittlere Anzahl Störfreier Takte MT(SK<sub>SV</sub>),

$$MT(SK_{SV}) = STZ / EH(SK_{SV}) \quad (2.18)$$

die Mittlere Stördauer MR(SK<sub>SV</sub>),

$$MR(SK_{SV}) = SD(SK_{SV}) / EH(SK_{SV}) \quad (2.19)$$

und die Verfügbarkeit V(SK<sub>SV</sub>),

$$V(SK_{SV}) = \frac{MT(SK_{SV}) * ZZ(SK) * 100\%}{MT(SK_{SV}) * ZZ(SK) + MR(SK_{SV})} \quad (2.20)$$

mit den bereits bekannten Kennwerten unter der Bedingung gleicher Zykluszeit  $ZZ(x)$  berechnet werden. Mit der vorangegangenen Betrachtungsweise konnte nachgewiesen werden, dass starre Verkettungen mit ausschließlich seriellen Störungen berechenbar sind. Auf den Beweis der Gültigkeit mit mehr als 3 kombinierten Störpartnern wird an dieser Stelle verzichtet. Die Korrektheit dieses Verfahrens lässt sich auf anschauliche Weise mit mehreren starr verketteten SPSen leicht nachweisen.

Es muss an dieser Stelle auf ein in der Praxis und leider auch in den wissenschaftlichen Abhandlungen weit verbreitetes Verfahren der Verfügbarkeitsmultiplikation  $V^M(SK_{SV})$  hingewiesen werden.

$$V^M(SK_{SV}) = \prod_{i=1}^n V(i) \quad (2.21)$$

In dem Beispiel aus [Abb. 2.7](#) mit den Einzelverfügbarkeiten  $V(SK) = 71,43\%$  und  $V(K) = 85,7\%$  resultierte eine Gesamtbetriebsverhalten der starren Verkettung von  $V(SK_{SV}) = 63,83\%$ . Würde man das Gesamtbetriebsverhalten durch die Verfügbarkeitsmultiplikation  $V^M$  gemäß [Gl. 2.21](#) ermitteln, würde die starr verkettete Produktionseinheit nur noch mit einer Gesamtverfügbarkeit  $V^M(SK_{SV}) = 61,2\%$  betrieben werden können.

In dem zweiten Beispiel aus [Abb. 2.8](#) mit den Einzelverfügbarkeiten  $V(K1) = 75\%$ ;  $V(K2) = 66,66\%$  und  $V(K3) = 83,3\%$  resultiert eine Gesamtverfügbarkeit der starren Verkettung von  $V(SK_{SV}) = 49,2\%$ . Dies ist aus Sicht der Produktion bereits ein besorgniserregendes Ergebnis; aus der Verfügbarkeits-Multiplikation ergibt sich dahingehend bereits eine Verfügbarkeit von  $V^M(SK_{SV}) = 41,6\%$ . Damit driften die beiden Verfahren mit steigender Anzahl der Störungspartner schon deutlich auseinander. Die Verfügbarkeitsmultiplikation ist bestenfalls als Faustformel für wenige Störpartner geeignet. Die Verfechter der Verfügbarkeitsmultiplikation sollten drei SPSen in einer Realsimulation mit den Betriebsverhaltensdaten füttern, über Verschaltung der Ein- und Ausgänge zu einem Steuerkreis starr verketteten und das Gesamtergebnis betrachten. Nichts ist überzeugender als das reale Verhalten einer Maschine.

Die starre Verkettung vieler störungsanfälliger Elemente, Komponenten, Steuer-Zellen und Steuer-Kreise zu Steuer-Einheiten steigert die Gefahr schlechter Betriebsverhaltensdaten und damit die Schaffung von Engpässen in der Produktion. Mit der vorgestellten Berechenbarkeit von starren Verkettungen lässt sich das Betriebsverhalten geplanter Einheiten vorherbestimmen und im laufenden Betrieb bestehender Anlagen auch optimieren. Um aber komplexere Verkettungen beurteilen zu können, muss eine weitere Verkettungsart analysiert werden.

---

## 2.4 Hand-Shake Verkettung

Die aus [Abb. 2.1](#) bereits bekannte Handhabungstechnik mit Vertikalachse V, Horizontalachse H und Greifer G wird jetzt mit einer Zuführung für Einzelteile und einer Zuführung

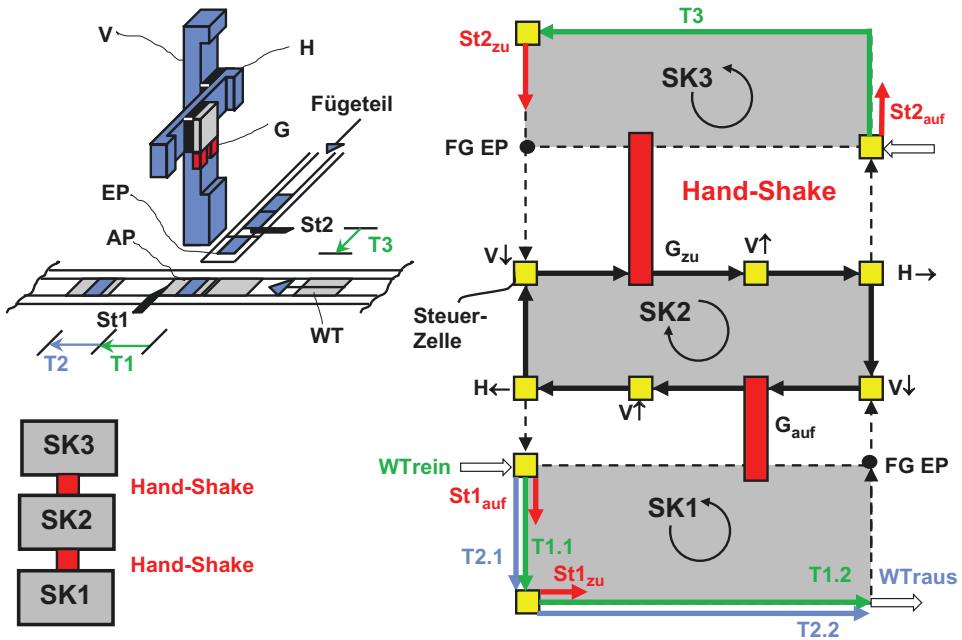


Abb. 2.9 Prinzip der Hand-Shake-Verkettung

für Werkstückträger zu einer Montage-Einheit verkettet, Abb. 2.9. In der Zuführung der blauen Einzel-/Fügeteile befindet sich ein Stopper St3, der die Vereinzelung bis in die Endlagenposition EP organisiert, aus der dann der Greifer G das Füge teil entnimmt.

Sowie der Greifer mittels Vertikalachse nach oben gefahren ist, erfolgt für diese Zuführung ein neuer Auffüllprozess der Endlagenposition EP. Dieses Auffüllen mit Stopper St2<sub>auf</sub> ausfahren, Transport T3 und Stopper St2<sub>zu</sub> einfahren, ist ein wiederkehrender Vorgang und demzufolge der Steuer-Kreis SK1. Die Zeiten vom Stopper 2 auf und dem Transport T3 liegen teilweise parallel, da in Anhängigkeit der Konstruktion mit dem Öffnen des Stoppers bereits der Transport beginnen kann. Die markanten Prozesszeiten ergeben sich z. B. aus der Innengestaltung der Pneumatik-Zylinder und dem Druck, bzw. beim Transport T2 in die Endlagenposition EP aus der Transportgeschwindigkeit der Zuführrinne und der Teilelänge.

Beim Werkstückträger-Wechsel ist eine Besonderheit des Ablaufgeschehens zu beobachten, da mit dem Aufmachen des Stoppers St1 sowohl der Abtransport des bearbeiteten Werkstückträgers als auch der Reintransport des zu bearbeitenden Werkstückträgers organisiert ist. Durch einen Eisenkern im Werkstückträger erkennt die Steuerung eine definierte Transportlänge und steuert den Stopper wieder nach oben, um den nächsten zu fangen; dieser Werkstückträgerwechsel ist bereits Standard in modernen Anlagen.

Um die sichere Übernahme des Füge teils aus der Zuführung zu garantieren, dürfen kein Element und keine Komponente des SK3 aktiv sein; es existieren also ein Akteur



SK2 und ein Stillhalter SK3 in dieser sogenannten Hand-Shake Verkettung. Das in der Endlagenposition liegende Füge­teil liefert die Freigabe für die Handshake-Aktion, in dem die Vertikalachse nach unten fährt, den Greifer schließt und die Vertikalachse wieder nach oben fährt. In dieser Position des freigemachten Kollisionsraums liefert der Steuerkreis SK2 das Freigabesignal für den Steuerkreis SK3.

Nachdem die Vertikalachse oben angekommen und anschließend der Greifer mit der Horizontalachse in die Position der Werkstückträgerbereitstellung gefahren ist, beginnt die Hand-Shake Verkettung mit dem dritten Steuer-Kreis SK1. Auch in diesem Fall ist SK2 der Akteur und SK1 der Stillhalter.

Das echte Hand-Shake findet in der Phase des Greifer Zumachens bzw. des Greifer Aufmachens statt, Abb. 2.10, dennoch gibt es um diese Wirkzone immer die Sicherheitszone des Still-Haltens, damit keine Kollisionsgefahr zwischen bewegten und/oder ruhenden Elementen besteht.

Ein Hand-Shake darf gemäß dem Ablauf- bzw. Abtaktungs-Diagramm nur dann stattfinden, wenn der Hand-Shake-Partner jeweils die Freigabe dazu erteilt hat. Folglich darf die Vertikalachse V nur dann in die Bereitstellung des Steuerkreises SK1 herun­terfahren, wenn der Transport T1.2 sein Transportende gemeldet hat. Am Ende des Hand-Shakes muss der Akteur ebenfalls eine Freigabe absetzen. Außerhalb der Hand-Shake-Situation laufen alle Steuer-Kreise quasi parallel zueinander.

Es ist in der Regel so, dass der Steuer-Kreis, der den Engpass darstellt (also in diesem Fall der Akteur SK2) fortwährend in Aktion ist. Die anderen Prozesspartner SK1 und SK3 können durchaus Zeitanteile ohne Bewegung haben, siehe die weißen Bereiche im Ablaufdiagramm. Die besondere Stopperstruktur im Materialfluss der Werkstückträger WT zeigt an, dass der unter dem WT installierte Stopper St1 nach einer kleinen Transportzeit T2.1 die Aktion St<sub>AUF</sub> wieder rückgängig gemacht wird und der WT seinen Transport für die Dauer von T2.2 fortsetzt, damit der Stopper den nächsten WT sicher fangen kann. Die beiden WT-Transporte finden also synchron statt; die Zeitanteile werden aber eindeutig durch den Raus-Transport bestimmt.

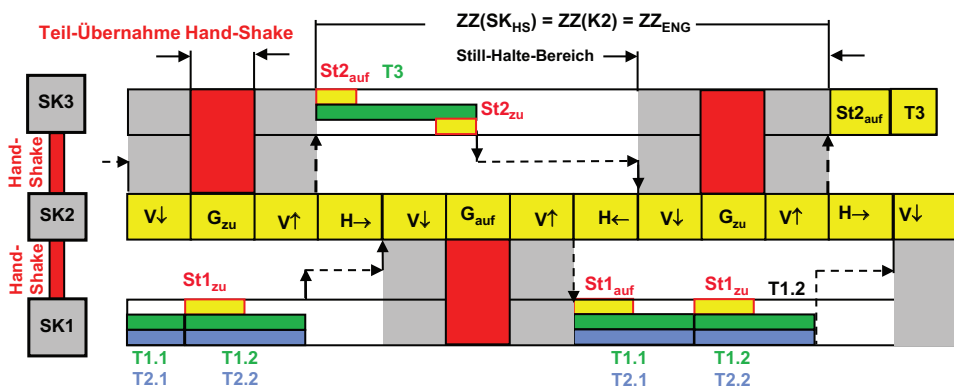


Abb. 2.10 Abtaktungsdiagramm der Hand-Shake-Verkettung

Das Transportende von WT2 wird durch einen nicht gezeigten Sensor im Ausgabeband signalisiert; der erfolgreiche Rein-Transport des WT1 und damit die Freigabe für  $V\downarrow$  wird durch einen Sensor in räumlicher Nähe des Stoppers ST1 organisiert. Der Produktionstechniker ist gut beraten, wenn er die freien Kapazitäten in den Nicht-Engpässen unter Beobachtung hat, denn Verschmutzung, Verschleiß, Verstellung von Betriebsparametern, etc. können diesen zeitlichen Spielraum schnell verbrauchen. Ein Nicht-Engpass kann so zum Engpass werden und die Zykluszeit der Steuer-Einheit vergrößern.

Deutlich wird auch, dass hier drei Parallelsysteme steuerungstechnisch so mit einander vernetzt sind, dass bei einer Störung eines Elements oder einer Komponente der gesamte Ablauf innerhalb eines geschlossenen Zyklus durch die SPS zum Stillstand führt. Hier ist die Ähnlichkeit zur starren Verkettung gegeben. Dennoch besitzt die Hand-Shake Verkettung die Besonderheit, dass in allen Steuerkreisen Stör-Ereignisse parallel stattfinden können. Dies soll am Beispiel einer Hand-Shake Verkettung dreier störbehafteter Steuerkreise demonstriert und die Berechnungsmethoden daraus abgeleitet werden. Um die Vergleichbarkeit zur starren Verkettung zu erhalten, werden die aus Abb. 2.8 bekannten Betriebsverhaltensdaten nun auch für die Hand-Shake Verkettung verwendet, Abb. 2.11.

Der erste sichtbare Unterschied zur starren Verkettung ist, dass das Gesamtverhalten nicht mehr als eine Reihe stochastisch auftretender Störungen auf einer Zeitachse

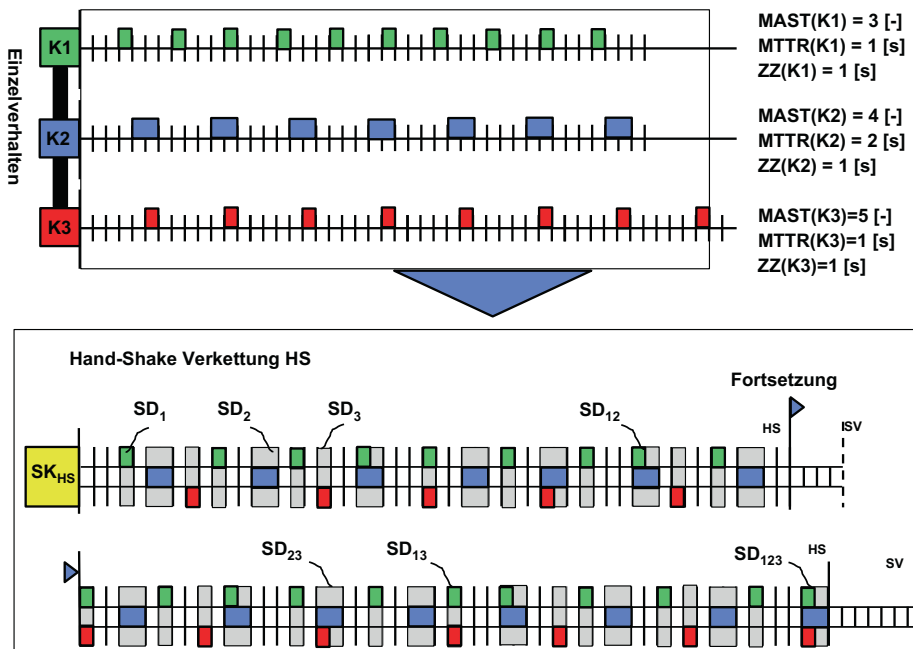


Abb. 2.11 Betriebsverhalten mit Hand-Shake-Verkettung

ist, sondern jeder Steuer-Kreis wird nunmehr durch ein eigenes Verhalten spezifiziert, wobei jeder Steuerkreis Rückwirkungen auf die anderen Steuerkreise in Form von Warten/Blockieren ausübt.

Da die SPS beim Auftreten einer Störung, das Gesamtsystem für den Bediener stoppt, werden alle nichtstörenden Kreise ebenfalls gestoppt; es ergeben sich dort so genannte und im Bild grau hinterlegte Warte- und Blockier-Zustände. Die erste Störung gemäß K1 erzeugt demnach in K2 und K3 einen Wartezustand. In dem Gesamtbetriebsverhalten des Steuerkreises im Hand-Shake  $SK_{SH}$  wird nun im Gegensatz zur starren Verkettung das reine Auftreten parallel Störereignisse sichtbar. Interessant ist hier aber auch die exakt gleiche Kombinatorik der Ereignishäufigkeiten der Störereignisse  $EH(SK_{HS})$ .

$$EH(SK_{HS}) = \sum_i^n EH(i) \quad (2.22)$$

Mit den Einzelabhängigkeiten:

$$EH(1) = [MT(K2) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(2) = [MT(K1) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(3) = [MT(K1) - 1] * [MT(K2) - 1]$$

$$EH(12) = [MT(K3) - 1]$$

$$EH(13) = [MT(K2) - 1]$$

$$EH(23) = [MT(K1) - 1]$$

$$EH(123) = 1]$$

Der Unterschied zwischen Hand-Shake Verkettung HS und starrer Verkettung SV beginnt erst bei der Betrachtung der Stördauern. Da Störungen der benachbarten Komponenten oder Steuerkreise parallel liegen können, müssen die Einzel-Stördauern  $MR(i)$  der beteiligten Komponenten einem Ranking hinsichtlich der Größe unterzogen werden, um die Auswirkungen hinsichtlich der Blockier- und Wartezustände beurteilen zu können. In dem geeigneten Fall stellt sich das Ranking der größten Stördauern wie folgt dar:

Fall A

$$MR(K2) > MR(K1)$$

$$MR(K2) > MR(K3)$$

Fall B

$$MR(K1) = MR(K3)$$

Bedingt durch das Ranking ist ein in sich geschlossener Algorithmus nicht mehr möglich. Auf der Grundlage des Rankings wird mittels Fallunterscheidung der Störverursacher die Gesamtstördauer ermittelt. Im Fall A der größten Störung  $MR(K2)$  ergeben sich die Einzelhäufigkeiten mit  $MR(K2)$ -Beteiligung wie folgt:

Fall A:

$$EH(2) = [MT(K1) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(12) = [MT(K3) - 1]$$

$$EH(23) = [MT(K1) - 1]$$

$$EH(123) = 1$$

Damit ergibt sich die mit  $MR(K2)$  gekoppelte Gesamt-Häufigkeit  $EH(2)$  zu:

$$EH(A)_{HS} = EH(2) + EH(12) + EH(23) + EH(123)$$

und die  $MR(K2)$ -gebundene Gesamt-Stördauer B zu

$$SD(A)_{HS} = MR(K2) * EH(A).$$

Mit der Gleichheit der verbleibenden Störungen im Fall B können die Einzelhäufigkeiten bestimmt

Fall B:

$$EH(1) = [MT(K2) - 1] * [MT(K3) - 1]$$

$$EH(13) = [MT(K2) - 1]$$

$$EH(3) = [MT(K1) - 1] * [MT(K2) - 1]$$

und zur Ereignishäufigkeit  $EH(B)_{HS}$  ebenfalls zusammengefasst werden:

$$EH(B)_{HS} = EH(1) + EH(13) + EH(3)$$

Die Gesamtstördauer im Fall B ist folglich:

$$SD(B)_{SH} = MR(K1) * EH(B)_{HS}.$$

Die Ergebnisse der Fallunterscheidungen werden in der Gesamt-Stördauer des Steuer-Kreises mit Hand-Shake Verkettung  $SD(SK_{HS})$  zusammengeführt.

$$SD(SK_{HS}) = \sum_{i=A}^X SD(i)_{HS}. \quad (2.23)$$

Bedingt durch die Kombinatorik sind die Ereignishäufigkeiten in der starren Verkettung und der Hand-Shake Verkettung  $EH(SK_{SH})$  identisch.

$$EH(SK_{SH}) = EH(SK_{SV}) \quad (2.24)$$

Mit dem allgemein gültigen Stablen Zustand  $STZ$ , der Gesamt-Stördauer  $SD(SK_{HS})$  und der Gesamt-Ereignishäufigkeit  $EH(SK_{HS})$  können wiederum für diesen Steuer-Kreis mit Hand-Shake Verkettung die Mittlere Anzahl Störfreier Takte  $MT(SK_{HS})$ ,

$$MT(SK_{HS}) = STZ/EH(SK_{HS}) \quad (2.25)$$

die Mittlere Stördauer  $MR(SK_{HS})$ ,

$$MR(SK_{HS}) = SD(SK_{HS})/EH(SK_{HS}) \quad (2.26)$$

und die Verfügbarkeit  $V(SK_{HS})$  ausgewiesen werden.

$$V(SK_{HS}) = \frac{MT(SK_{HS}) * ZZ(SK) * 100\%}{MT(SK_{HS}) * ZZ(SK) + MR(SK_{HS})} \quad (2.27)$$

Das in [Abb. 2.11](#) erzeugte Betriebsverhalten der Hand-Shake Verkettung offenbart deutlich, dass durch die Parallelität der Ereignisse deutlich weniger Fertigungszeit als zur starren Verkettung benötigt wird. Im vorliegenden Betriebsverhalten erzeugt die Hand-Shake Variante einige Verfügbarkeit von  $V_{HS} = 54,05 \%$ . Die starre Verkettung hatte bei gleichen Ausgangsdaten eine Verfügbarkeit von  $V_{SV} = 49,20 \%$ . Der Vorteil dieser beiden Verkettungsarten liegt klar auf der Hand, allerdings ist die Berechnung der betriebsrelevanten Daten für die starre Verkettung einfacher.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Starre- und die Hand-Shake-Verkettung üblicherweise die technischen Einrichtungen der Wertschöpfung darstellen. Es muss an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass mit dem gezeigten Beispiel eines Montageautomaten das einfachste Beispiel einer Hand-Sake-Verkettung demonstriert wurde. Mit dem Wechsel in die Fertigungstechnik wird der Umfang an zu verketteten Steuerkreisen deutlich größer und damit auch unübersichtlicher. So kann z. B. eine Drehmaschine mit dem alles verbindenden Steuerkreis  $SK(B)$  (B: Backenfutter) einerseits eine Hand-Shake-Verkettung zum Steuerkreis H1 (H1: Handhabungsautomat Ver- und Entsorgung) und andererseits zum Steuerkreis H2 (H2: Handhabungsautomaten der Werkzeuge) haben. Der Handhabungsautomat H1 kann eine Hand-Shake-Verkettung mit dem WT-Wechsler und H2 mit dem Werkzeugwechsler haben. Handhabungsautomat H2 wird darüber hinaus lose Verkettung mit dem Mitarbeiter haben, der nur bei geöffneter Klappe defekte Werkzeuge wechseln und bei Bedarf mit anderen Werkzeugen bestücken darf.

Es lassen sich sämtliche Betriebsmittel (Fertigungsmaschinen, Montageautomaten, Handhabungsgeräte, Regalförderzeuge, etc.), die über SPS organisiert oder gesteuert

werden können, über diese Verkettungsart abbilden. Übrig bleiben die noch zu klärenden Fragen, was geschieht, wenn diese Prozesse durch andere Prozesse und über andere Verkettungsstrukturen beeinflusst werden.

## 2.5 Mitarbeitereinfluss

Die Beanspruchung der prozessbegleitenden Mitarbeiter durch irgendwie geartete Störungsursachen ist in der Praxis nicht unbedingt gering, wenn man bedenkt, dass man in der Regel von 100 % der verfügbaren Kapazität bereits in der Praxis ca. 20 % für Verluste aller Art berücksichtigt bzw. abschreibt. Diese Verlustzeiten müssen einerseits mit technischen Störungen und andererseits mit organisatorischen Störungen in Verbindung gebracht werden. Bei den Technischen Störungen ist der Mitarbeiter vor Ort direkt involviert. Er kann durch Motivation (Klima, Bedienfreundlichkeit, Prämie), durch SPS-Unterstützung (Alarm, Ort-Meldung, etc.) und durch Organisation (Werkzeuge, Schulung, etc.) die Reparaturzeiten klein halten. In den fertigungstechnischen Betrieben sind die Störungen an Werkzeugmaschinen recht selten (MT sehr hoch) und die Reparaturzeiten, wenn etwas passiert, sehr hoch. Die Werkzeugmaschinen haben in der Regel recht hohe Verfügbarkeiten und der Mitarbeitereinsatz ist für Reparaturzwecke beinahe unerheblich; Ausnahmen können hier natürlich vorkommen.

In der Montagetechnik haben wir es in der Regel mit einem deutlich größeren Störaufkommen zu tun; da dies überwiegend schnell laufende Prozesse sind, ist die Häufigkeit der Ereignisse wohl an die Zykluszeit gekoppelt. Wenn man sich vergegenwärtigt, dass ein Teil im Greifer mit kleinen Beschleunigungen und kleineren Massenträgheitskräften sicherer im Greifer liegt, besteht auch nicht die Störgefahr des Teileverlusts. Einen direkten kausalen Zusammenhang zwischen Zykluszeit und MAST bzw. MT lässt sich nicht in einem Algorithmus darstellen und muss für jeden Anwendungsfall separat untersucht werden. Die Tatsache, dass Montageanlagen häufiger stören ist bekannt; es sind durchaus Anlagen in der Praxis bekannt, die in einer Schicht 150–200 technische Störungen haben. Viele von diesen Störungen werden manchmal nicht einmal sichtbar, weil der hoch motivierte Mitarbeiter die Ursachen durch eine vorbeugende Instandsetzung repariert, ohne dass die SPS überhaupt den Vorgang mitbekommt. Wenn man dem Mitarbeiter diesen Eingriff durch übertriebenes Sicherheitsdenken (Zaun, Lichtvorhang) verwehrt, dann wird dieser vorbeugende Eingriff ganz sicher zum Störereignis.

Die Frage, bei welchem Betriebsverhalten schädigende Beeinträchtigungen zu erwarten sind, kann eigentlich nur im Einzelfall und an den speziellen Parametern geklärt werden. Eine Tatsache ist auch hier prägnant, eine Verfügbarkeit von  $V1 = 90\%$  bedeutet nicht, dass der Mitarbeiter weniger Stress erleidet als der Mitarbeiter an einem Prozess mit  $V2 = 60\%$ . Nur die Betriebsverhaltenskennzahlen

$$ZZ1 = 1s, \quad MT1 = 90[-], \quad MR1 = 10s$$

$$ZZ2 = 10s, \quad MT2 = 60[-], \quad MR2 = 400s$$

offenbaren das Drama in der Mitarbeiterbelastung, da der Mitarbeiter 1 durchschnittlich alle MTBF1 = 90s eine Reparatur durchführen muss und kaum Zeit zum Durchatmen hat, wohingegen der Mitarbeiter 2 alle MTBF = 10 min eine langwierige Reparatur durchführt. Problematisch wird es für den Bediener erst, wenn er x verschiedene und in der Anlage beliebig verteilte Ursachen parallel betreuen muss. Stress entsteht erst dann, wenn das Lokalisieren einer Störung nur von der Aufmerksamkeit des Bedieners abhängt und dieser nicht durch die SPS unterstützt wird. Der Betreiber des Betriebsmittels muss dafür Sorge tragen, dass der Bediener die anstehenden Reparaturen auch effektiv durchführen kann. Die Reparatur derart kleiner Ausfälle gehört zu seinem Berufsbild; so ist er eingestellt damit wird seine Beschäftigung im Unternehmen begründet.

Es macht also keinen Sinn, genau diesen Mitarbeiter zur Erfassung, Analyse und Optimierung des Betriebsverhaltens aufzufordern. Das wäre im Ansatz vergleichbar mit der Aufforderung sich selber weg zu rationalisieren. Die Erfassung von Betriebsdaten (Ort, ZZ, MT und MR) ist alleinige Aufgabe der SPS und sollte mit dem Kauf des Prozesses so auch definiert sein. Selbst technische und organisatorische Störungen können von der SPS eindeutig lokalisiert werden. Lediglich die Verknüpfung von Störung (Symptom) und Ursache bei den Betriebsdaten sollte von anlagenneutralen Personen durchgeführt werden.

---

**Beispiel**

Die SPS erfährt über den Eingangssensor der Materialzuführung, dass kein Material mehr in der Bereitstellung vorhanden ist und signalisiert dies dem Bediener weder optisch noch akustisch. Der Mitarbeiter, der für das Auffüllen der Zuführschiene verantwortlich ist, muss sich gerade vor dem Meister wegen mangelnder Motivation verantworten und bekommt die Unterversorgung nicht mit. Die darauffolgende Störung müsste am Ende der Störung eigentlich mit der Ursache „Abgelenkt durch Meister“ quittiert werden. Da auch der Abteilungsleiter diese Störprotokolle regelmäßig zu Gesicht bekommt, wird er diese Fehlerursache vermeiden und stattdessen eine bereits bekannte Störungsart „Zuführrinne verklemmt“ in das Dialogfeld der Maschinen- und Betriebsdatenerfassung einspeisen. So wird aus einer organisatorisch bedingten Störung kurzerhand eine technische. Führungskräfte sind gut beraten, wenn sie sich ab und zu mit der Praxis vor Ort auseinanderzusetzen, damit sie die Qualität von Betriebsverhaltensanalysen auch verstehen. Falsch erfasste Ursachen führen letztendlich zu Instandhaltungsmaßnahmen, die nicht notwendig gewesen wären. Führungskräfte, die die Organisation und Steuerung ihrer Anlagentechnik so geplant, selber so herstellt oder in einem derartigen Zustand eingekauft haben, haben es salopp gesagt auch verdient, aufgrund falscher Daten Fehlentscheidungen zu treffen.

Verkettungsarten im Wertstrom schlanker  
Unternehmen

Analysen, Algorithmen und Auswirkungen auf Leistung,  
Durchlaufzeiten und Bestände

Habenicht, D.

2017, XIV, 254 S. 98 Abb., 46 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-662-54906-3