

Fei Long

**Realitätsnahe Modellierung und Analyse der
Verfügbarkeit von Produktionssystemen
in Industrie 4.0**

D 93
ISBN 978-3-948308-09-4

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. A. Nicola

Realitätsnahe Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in Industrie 4.0

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Fei Long

aus Anhui, China

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Tag der mündlichen Prüfung: 29.03.2023

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2023

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre mit meiner Unterschrift, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen dieser Arbeit, die dem Wortlaut, dem Sinn oder der Argumentation nach anderen Werken entnommen sind (einschließlich des World Wide Web und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen), habe ich unter Angabe der Quellen vollständig kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
Formelzeichen	VII
Abkürzungen	IX
Kurzzusammenfassung	XI
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	8
1.3 Lösung durch Modellierung mit Petrinetz.....	12
1.4 Forschungsfragen	13
1.5 Ziele der Arbeit.....	13
1.6 Aufbau der Arbeit	14
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	16
2.1 Entwicklungsweg zu Produktionssystemen in Industrie 4.0	16
2.1.1 Entwicklungsrichtung der Produktionssysteme	16
2.1.2 Treiber von Forschungsprojekten.....	17
2.2 Entwicklung der Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit	19
2.2.1 Entwicklung der Verfügbarkeitsanalyse.....	20
2.2.2 Entwicklung der Methoden und Modelle zur Analyse der Verfügbarkeit	24
2.3 Entwicklung der Petrinetze	25
3 Grundlagen.....	31
3.1 Begriffe in der Zuverlässigkeitstechnik	31
3.1.1 Definitionen.....	31
3.1.2 Zuverlässigkeitskennwerte.....	33
3.1.3 Badewannenkurve	34
3.1.4 Zuverlässigkeit und Kosten	35
3.2 Grundbegriffe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie	35

3.3	Grundlage in der Verfügbarkeitsanalyse.....	36
3.3.1	Definition der Verfügbarkeit.....	36
3.3.2	Zuordnung der Zeit und ihre Definitionen	37
3.3.3	Kennzahlen in der Verfügbarkeitsanalyse	40
3.3.4	Berechnung der Systemverfügbarkeit	43
3.4	Begriffe in Industrie 4.0	45
3.5	Petrinetze	47
3.6	Modellierungssoftware REALIST.....	49
4	Anforderungen an die Modellierung und Simulation	51
4.1	Grundlegende Modellierungsaspekte	51
4.2	Modellierungsebene	51
4.3	Grundlegende Modellierungselemente	53
4.4	Kenngößen des Produktionssystems	54
4.5	Anforderungen an Intelligenz.....	55
4.5.1	Vernetzung und Kommunikation	55
4.5.2	Selbständigkeit	55
4.5.3	Veränderungsfähigkeit	63
4.6	Aktivitäten und Maßnahmen.....	64
4.7	Simulationsebene.....	65
5	Vorhandene Methoden und ihre Bewertungen	66
5.1	Mathematische Modelle und Analysemethoden	66
5.2	Graphische Modellierungsmethoden	70
5.3	Bewertung der Methoden	79
5.3.1	Bewertung nach Modellierungsaspekten.....	80
5.3.2	Bewertung nach Modellierungsebene	80
5.3.3	Bewertung nach Modellierungselemente	81
5.3.4	Bewertung nach Kenngrößen des Produktionssystems	82
5.3.5	Bewertung nach Intelligenz.....	82
5.3.6	Bewertung nach Aktivitäten und Maßnahmen	83
5.3.7	Bewertung nach Simulationsaspekten	84
5.4	Zusammenfassung der Methoden und Bewertungen	85
6	Modelle und Ergebnisse	86
6.1	Analytische Vorgehensweise.....	86
6.1.1	Bewertung der Kundenanfragen mit neuen Herausforderungen.....	86
6.1.2	Leistungswirtschaftliche Risiken in der Produktion.....	91

6.1.3	Ursachenanalyse der Maschinenausfälle	91
6.1.4	Einflussfaktoren auf die Maschinenverfügbarkeit	93
6.1.5	Modellelemente und Modellierungsaspekte	95
6.2	Grundmodelle.....	96
6.2.1	Zuverlässigkeit einer Komponente mit konstanter Belastung	96
6.2.2	Zuverlässigkeit eines Systems mit zwei unabhängigen Komponenten	98
6.2.3	Zuverlässigkeit eines Systems mit zwei abhängigen Komponenten	99
6.2.4	Modellierung des Verschleißes	101
6.2.5	Modellierung der Wirkungsgradreduzierung und Erneuerung	106
6.2.6	Modelle der Verfügbarkeit mit unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien.....	106
6.2.7	Modellierung der flexiblen Produktionssysteme	109
6.2.8	Modelle der Selbstorganisation	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	118
7.1	Zusammenfassung.....	118
7.2	Ausblick.....	119
8	Literaturverzeichnis	120
9	Anhang	145

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1.1: Gewichtete Kennwerte der Hauptanforderungen an Maschinenhersteller und Anwender	3
Bild 1.2: Wettbewerbsvorteile zur Erhöhung der Verfügbarkeit	4
Bild 1.3: Vorteile der Modellierung und Simulation	6
Bild 1.4: Modellierungsvorteile bei Verfügbarkeitsanalyse	7
Bild 1.5: Diverse Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeitsanalyse	10
Bild 2.1: Petrinetze und ihre Erweiterungen	26
Bild 3.1: Produktlebenszyklus und Zuverlässigkeit	32
Bild 3.2: Die „Badewannenkurve“	34
Bild 3.3: Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Kosten	35
Bild 3.4: Grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Zeiten	37
Bild 3.5: System mit serieller Schaltung	43
Bild 3.6: System mit paralleler Schaltung	44
Bild 3.7: System mit gemischter Schaltung	44
Bild 3.8: Modell der Industrie 4.0	46
Bild 3.9: Elemente eines Petrinetzes	48
Bild 3.10: REALIST-Editor	50
Bild 3.11: REALIST-Simulator	50
Bild 4.1: Darstellung des wiederholbaren Selbstheilungskonzepts und die Verlängerung der Lebensdauer	61
Bild 4.2: Schema des Qualitätskontrollprozesses	62
Bild 4.3: Veränderungstypen der Fabrik	63
Bild 5.1: Boole-Markov-Modell	68
Bild 5.2: Beispiel der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Größe P_i	69
Bild 5.3: Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Serienstruktur mit zwei Komponenten	70
Bild 5.4: Fehlerbaum eines Getriebes	71
Bild 5.5: Beispiel für einen Zuverlässigkeitsgraph	72
Bild 5.6: Markov-Modell der Zustände einer Maschine	72
Bild 5.7: Warteschlangenmodell einer Produktionsanlage	73
Bild 5.8: Wirkmodell der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems	76
Bild 6.1: Break-even-point für die Entscheidung von Kundenanfragen	86
Bild 6.2: Stückkosten und Gesamtkosten	86
Bild 6.3: Verteilung der Anforderungen in interne und externe Sicht	87
Bild 6.4: Unterschiedliche Aspekte von Nutzer und Hersteller	87
Bild 6.5: Designauswirkungen der Produkteigenschaften in der Entwicklung auf die Herstellung, Verwendung und Instandhaltung	88
Bild 6.6: Position des Herstellers in der Lieferkette	89

Bild 6.7: Mindmap für die Entscheidungsfindung der Kundenanfragen	90
Bild 6.8: Systematisierung von Produktionsrisiken.....	91
Bild 6.9: Hauptursachen von Maschinenausfällen	93
Bild 6.10: Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit einer Maschine.....	94
Bild 6.11: Elemente der Petrinetze und Modellierungsaspekte	95
Bild 6.12: Zuverlässigkeit einer Komponente mit unterschiedlichen Parametern	97
Bild 6.13: Modell des Reihensystems mit zwei unabhängigen Komponenten	98
Bild 6.14: Modell des Systems mit zwei unabhängigen parallel geschalteten Komponenten	99
Bild 6.15: Modell des Systems mit kalter Redundanz und passivem Zustand	100
Bild 6.16: Modell des Systems mit assoziierter Ausschaltung beim Ausfall einer Komponente	101
Bild 6.17: Schematischer Verlauf des Verschleißes über die Zeit	101
Bild 6.18: Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß ohne Erneuerung	102
Bild 6.19: Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß und Erneuerung	103
Bild 6.20: Modell einer Maschine mit degressivem Verschleiß und Erneuerung	103
Bild 6.21: Modell einer Maschine mit progressivem Verschleiß und Erneuerung	104
Bild 6.22: Petri-Netz-Modell mit verschiedenen Verschleißraten und Erneuerung	104
Bild 6.23: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten ohne Ersatzteile bei 1 Replikation	105
Bild 6.24: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten bei 1000 Replikation ohne Ersatzteile	105
Bild 6.25: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten mit Ersatzteilen bei 1 Replikation	105
Bild 6.26: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten mit Ersatzteilen bei 1000 Replikation	105
Bild 6.27: Modell mit Wirkungsgrad und Erneuerung	106
Bild 6.28: Verfügbarkeit einer Maschine mit reaktiver Instandhaltung	107
Bild 6.29: Verfügbarkeit einer Maschine mit unterschiedlicher Anzahl der Ersatzteile.....	107
Bild 6.30: Verfügbarkeit einer Maschine mit passivem Zustand	108
Bild 6.31: Konzept der flexiblen Produktion	109
Bild 6.32: Konzept des Modells von flexibler Produktion.....	110
Bild 6.33: Modell C: Modell eines flexiblen Produktionssystems	111
Bild 6.34: Ergebnisse der flexiblen Produktion mit angenommenen fiktiven Werten	113
Bild 6.35: Selbstorganisation: ein Beispiel mit Wächterfunktionen und Verbotskanten	114
Bild 6.36: Selbstorganisation: ein Beispiel von ECSPN mit Prioritäten.....	116
Bild 6.37: Kumulierte Produktionsmenge in Abhängigkeit von Prioritäten	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Vergleich der organisatorischen und technischen Ausfallzeit	39
Tabelle 4.1: Aufgabenbereiche und Funktionen zur selbstorganisierenden Produktion	59
Tabelle 5.1: Warteschlangendisziplinen der Warteschlangentheorie	73
Tabelle 5.2: Übersicht der Abkürzungen der Modellierungsmethode	79
Tabelle 5.3: Bewertung nach Modellierungsaspekten.....	80
Tabelle 5.4: Bewertung nach Modellierungsebene	80
Tabelle 5.5: Bewertung nach Modellierungselemente	81
Tabelle 5.6: Bewertung nach Kenngrößen des Produktionssystems	82
Tabelle 5.7: Bewertung nach Intelligenz	83
Tabelle 5.8: Bewertung nach Aktivitäten und Maßnahmen	84
Tabelle 5.9: Bewertung nach Simulationsaspekten	84
Tabelle 6.1: Wächterfunktionen der Transition in flexiblen Modellen.....	112
Tabelle 6.2: Ergebnisse der Selbstorganisation mit Wächterfunktionen und Verbotskanten	115
Tabelle 6.3: Ergebnisse der Selbstorganisation mit Prioritäten	117
Tabelle 9.1: Systematisierung leistungswirtschaftlicher Risiken.....	145
Tabelle 9.2: Checkliste der Einflussfaktoren	146

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Verfügbarkeit	
A_{FS}	Folgeausfallrate eines Systems	
A_O	Organisatorische Ausfallrate	
A_T	Technische Ausfallrate	
A_w	Wartungsbedingte Ausfallrate	
b	Formparameter der Weibullverteilung	
$f(t)$	Dichtefunktion	
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit	
N	Nicht-Verfügbarkeit	
$N(t)$	Anzahl des Ereignisses	
N_G	Gesamtnutzungsgrad	
N_T	Technischer Nutzungsgrad	
P	Symbol für Wahrscheinlichkeit	
Pr	Funktion des Poisson-Prozesses	
$R(t)$	Zuverlässigkeit	
t	Zeit	
T	Charakteristische Lebensdauer	
t_0	die ausfallfreie Zeit einer dreiparametrischen Weibullverteilung	
T_A	Ausfallzeit wegen kurzzeitig fehlender Aufträge	
T_B	Belegungszeit	
T_{BS}	Belegungszeit eines Systems	
T_C	Testzeit	
T_{FO}	Organisatorisch bedingter Folgeausfallzeit	
T_{FS}	Folgeausfallzeit eines Systems	
T_{FT}	Technisch bedingter Folgeausfallzeit	
T_N	Nutzungszeit	
T_{NS}	Nutzungszeit eines Systems	
T_O	Organisatorische Ausfallzeit	
T_{OS}	Organisatorische Ausfallzeit eines Systems	
T_R	Zeit für das Rüsten der Maschine/Anlage und das Wechseln von Betriebsmitteln	
T_T	Technische Ausfallzeit	
T_{TS}	Technische Ausfallzeit eines Systems	
T_{TW}	Wartungsbedingter Folgeausfallzeit	

T_W	Wartungszeit	
T_{WS}	Wartungszeit eines Systems	
V_T	Technische Verfügbarkeit	
λ	Ausfallrate	
μ	Durchschnittliche Lebensdauer	

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AS	Arbeitsstation
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CGSPN	Farbige verallgemeinerte stochastische Petrinetze
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
CPN	Farbige Petrinetze (Coloured Petri Nets)
CPPS	Cyber-Physical-Produktion-Systems
CPS	Cyber-physische Systeme, Care pathway simulator
CSM	Verbundene Modellierung
CTMCs	Continuous-Time Markov Chains
DEVS	Diskrete Ereignis-System-Spezifikation (Discrete Event System Specification)
DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität
DQ	Dynamische Warteschlangenmodelle
DSPN	Deterministische und stochastische Petrinetze
ECSPN	Erweiterte farbige stochastische Petrinetz (Extended Coloured Stochastic Petri Net)
ED	Enterprise Dynamics
EHW	Evolvable Hardware
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
ESPN	Erweiterte stochastische Petrinetze (Extended Stochastic Petri Net)
FB	Funktionsbaum
FCIMS	Flexible Computer Integrated Manufacturing Systems
FIFO	First In, First Out
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSPN	Flüssige stochastische Petrinetze
FT	Fehlerbaum (Fault Tree)
FTA	Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis)
GSPN	Verallgemeinerte stochastische Petrinetze (Generalized Stochastic Petri Net)
HCQPN	Hierarchische kombinierte Warteschlangen-Petrinetze
HMI	Human Machine Interface
IF	Informationsfluss
IMVP	International Motor Vehicle Programm
IOT	Internet of Things
KMP	Kundenspezifische Massenproduktion
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
LIFO	Last In, First Out
M2M	Machine to Machine
Markov	Markov-Modelle

Kurzzusammenfassung

Die schnelle Verbreitung des Internets und die rasante Entwicklung der Logistik haben die Globalisierung und Internationalisierung beschleunigt. Durch die Entwicklung und Verbreitung moderner Technologien befindet sich die Industrie an einem Wendepunkt. Um seine internationale Führungsposition und seinen Wettbewerbsvorteil zu sichern, hat Deutschland die Strategie „Industrie 4.0“ umgesetzt. Daraufhin reagierte China mit der Strategie „Made in China 2025“ und Amerika mit „Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing“. Automatisierung, Digitalisierung und Globalisierung machen die Grenzen zwischen Herstellern und Kunden transparenter. Die Globalisierung ermöglicht es den Kunden, auf dem internationalen Markt problemlos eine Vielzahl von Produkten auszuwählen und die gewünschten Produkte mit vergleichbaren Eigenschaften, dem niedrigsten Preis und ausreichender Qualität zu finden. Kunden überzeugen nicht mehr nur die universellen Produkte, sondern auch die Produkte, die zu ihrer eigenen Persönlichkeit passen und ihre Individualität zeigen. Der Trend zur Personalisierung wird immer deutlicher. Darüber hinaus ermutigen die expandierenden sozialen Netzwerke und Online-Echtzeitnachrichten die Industrie, dem Feedback und den Meinungen der Kunden mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Die Bedeutung der Kundenzufriedenheit und die Rolle der Kunden auf dem Markt nehmen deutlich zu.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung suchen die internationalen Wettbewerber nach neuen Strategien und Methoden, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Verschiedene Maßnahmen zur Steigerung von Effizienz und Effektivität wurden untersucht und umgesetzt. Es wurden verschiedene Aspekte analysiert, um die Kundenzufriedenheit zu erhöhen und die Produktionskosten zu senken und damit die Rentabilität zu steigern. Durch die Anwendung der automatisierten Technik und Technologie wird der Automatisierungsgrad des industriellen Sektors erhöht und standardisiert. Der erhöhte Automatisierungsgrad und die zunehmende Digitalisierung ermöglichen es der Industrie, kundenspezifische Produkte herzustellen. Auch die Produktqualität kann gewährleistet werden. Um auf dem internationalen Markt Fuß zu fassen und internationale Kunden zu gewinnen, muss die Industrie die kundenspezifischen Anforderungen und Wünsche erfüllen. Daher entstand die Herausforderung, variantenreiche kundenspezifische Produkte in kleinen Losgrößen effizient zu produzieren. Um die Effizienz zu steigern, sollen neue Konzepte von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 untersucht werden. In der Literatur werden vielseitige Produktionssysteme, digitale Produktion etc. vorgeschlagen, um dem Trend der Individualisierung und den zukünftigen Herausforderungen zu begegnen. Traditionelle Produktionssysteme basieren auf der Strategie der "Massenproduktion". Aufgrund der hohen Stückzahlen werden die Herstellungskosten gesenkt. Diese Produktionssysteme sind jedoch ineffizient, wenn es darum geht, personalisierte Produkte in kleinen Losgrößen herzustellen. Daher können sie die Anforderung der Individualisierung nicht erfüllen. Im Zukunftsforschungsprojekt Industrie 4.0 wurden neue Konzepte von Produktionssystemen vorgeschlagen. Kernlösung für die Erfüllung der Individualisierung ist die flexible und wandlungsfähige Produktion.

Heute besteht die Notwendigkeit, das Konzept vor der Anwendung systematisch zu analysieren, um die möglichen Herausforderungen und Risiken zu untersuchen. Die Literatur hat sich mit dem Design und den Konzepten beschäftigt. Einige haben die vereinfachten Produktionssysteme modelliert. Viele Aspekte können jedoch nicht zusammen betrachtet werden. Es gibt noch keine Methode, um Produktionssysteme unter Berücksichtigung umfassender Aspekte systematisch zu modellieren und realistische, anwendungsreife Ergebnisse zu erhalten. Eine realitätsnahe Modellierung der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 wird dann mögliche Fragestellungen zur Reduzierung von möglichen Verlusten, Schäden und Risiken untersuchen. Im Anschluss daran können konkrete Maßnahmen zur Optimierung der Produktionssysteme vorgeschlagen werden. Für die Auswahl einer geeigneten Methode zur Modellierung von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 werden die Fähigkeiten der vorhandenen Methoden zur Modellierung der spezifischen Eigenschaften von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 in Bezug auf Netzwerkfähigkeit, Kommunikation, künstliche Intelligenz und Anpassungsfähigkeit bewertet. Die Auswertungen zeigen, dass das Petrinetz für die Modellierung der Produktionssysteme in der Industrie 4.0 sehr gut geeignet ist.

Das Hauptziel der Arbeit ist es, die Verfügbarkeit von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 mit Petrinetz realistisch zu modellieren. Durch die Modellierung der Produktionssysteme können die möglichen Probleme im Konzept untersucht werden, um mögliche Verluste, Schäden und Risiken zu reduzieren. Anschließend kann eine konkrete Maßnahme zur Optimierung der Produktionssysteme vorgeschlagen werden.

Abstract

Realistic modeling and analysis of the availability of production systems in industry 4.0

The rapid spread of the Internet and the rapid development of logistics have accelerated globalization and internationalization. The development and spread of modern technologies is turning industry into a turning point. In order to secure its international leading position and competitive advantage, Germany has implemented the Industry 4.0 strategy. After that, China responded with the Made in China 2025 strategy and America with the Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing. Automation, digitalization and globalization are making the boundaries between manufacturers and customers more transparent. Globalization enables customers to easily select and display a wide variety of products in the international marketplace, and to find desired products with comparable features, the lowest price and sufficient quality. Customers no longer only convince the universal products, but also the products that match their own personality and show their individuality. The trend of personalization is becoming increasingly apparent. In addition, the expanding social network and online real-time news are encouraging the industry to pay more attention to customer feedback and opinions. The importance of customer satisfaction and the role of customers in the market are increasing significantly. Against the background of globalization, international competitors are seeking new strategies and methods to remain competitive. Various measures to increase efficiency and effectiveness were investigated and implemented. Various aspects were analyzed to increase customer satisfaction and to reduce production costs and thus increase profitability.

By applying the automated technology and method, the degree of automation of the industrial sector is increased and standardized. The increased level of automation and the increasing digitization allow the industry to manufacture customized products. The product quality can also be guaranteed. In order to enter the international market and win international customers, the industry must meet the customer-specific requirements and wishes. Therefore, the challenge arose to efficiently produce variant-rich customer-specific products in small lot sizes. To increase efficiency, new concepts of production systems in Industry 4.0 are to be investigated. In the literature, versatile production systems, digital production, etc. proposed to counter the trend of individualization and future challenges. Traditional production systems are based on the "mass production" strategy. Due to high quantities, the manufacturing costs are reduced. These production systems are then inefficient to produce personalized products in small lot sizes. Therefore, they cannot meet the requirement of individualization. New concepts of production systems were proposed in the future research project Industry 4.0. Core Solution for the fulfillment of individualization is the flexible and versatile production.

Today, there is a need to systematically analyze the concept prior to application to examine the potential challenges and risks. The literature dealt with the design and the concepts. Some modeled the simplified production systems. However, many aspects cannot be considered together. There is no method yet to systematically model production systems, taking into

account comprehensive aspects, and to obtain realistic, application-ready results. Realistic modeling of the availability of production systems in Industry 4.0 will then examine potential issues to reduce potential losses, damage and risks. Subsequently, a concrete measure to optimize the production systems can be proposed. The capabilities of the existing methods for modeling the specific characteristics of production systems in Industry 4.0 in terms of network capability, communication, artificial intelligence, and adaptability are evaluated for selecting a suitable method for modeling production systems in Industry 4.0. The evaluations show that Petri net is very suitable for the modeling of the production systems in Industry 4.0.

The main goal of the work is to realistically model the availability of production systems in Industry 4.0 with Petri net. By modeling the production systems, the potential problems in the concept can be examined to reduce potential losses, damage and risks. Subsequently, a concrete measure to optimize the production systems can be proposed.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Trends in Richtung Industrie 4.0

Die weltwirtschaftliche Position Deutschlands hängt entscheidend von seinen industriellen Exporten ab. Das produzierende Kerngewerbe trägt etwa die Hälfte zu den Exporten bei [295]. Darüber hinaus hat sich der Anteil der Bruttowertschöpfung im Dienstleistungsbereich in letzten Jahren deutlich gestiegen, was auf prosperierende industrielle Kunden basiert. Die Unternehmen des produzierenden Gewerbes erwirtschafteten etwa ein Drittel der gesamten Bruttowertschöpfung und ist Kern der volkswirtschaftlichen Leistungskraft Deutschlands [295]. Die rapide Verbreitung der modernen Technologien in den letzten Jahrzehnten haben die Globalisierung und Digitalisierung stark gefördert, was die Industrie zum Wendepunkt treibt. Vor dem Hintergrund der umweltfreundlichen und nachhaltigen Entwicklung sind Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz und Effektivität zu implementieren. Um die Wettbewerbsvorteile auf dem regionalen und internationalen Markt zu bleiben, erfordern die Herstellung, Instandhaltung und laufende Verbesserung in der Industrie eine leistungsfähige und innovative industrielle Produktionsbasis. Um die heutige rasant entwickelnde Wirtschaft zu unterstützen, wurde die Industrie so stark gefördert, dass die vierte industrielle Revolution, die Industrie 4.0, zum Ausbrechen tendiert [5].

Deutschland spezialisiert sich auf die Forschung, Entwicklung und Fertigung innovativer Produktionstechnologien und verfügt über die Fähigkeit, komplexe industrielle Prozesse zu steuern [5]. Als einer der weltweit konkurrenzfähigsten Industriestandorte und gleichzeitig führenden Fabrikaurüster ist Deutschland befähigt, die Potenziale der Industrie 4.0 zu erschließen. Um die internationale führende Position und Wettbewerbsvorteile zu sichern, hat Deutschland die Strategie Industrie 4.0 zur Umsetzung gebracht [5]. Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt in der Hightech-Strategie der Bundesregierung Deutschland. Der Begriff Industrie 4.0 steht für eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen. Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, in Echtzeit optimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie bspw. Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.

Initiiert durch das zukünftige Strategieprogramm „Industrie 4.0“ wird davon ausgegangen, dass dieser Trend zur vierten industriellen Revolution führen könnte [5]. Dieser Trend ist auch in anderen Ländern und auf der ganzen Welt zu beobachten. Nach Deutschland reagierte China mit der Strategie Made in China 2025 [44] und Amerika mit Strategie für die amerikanische Führungsrolle in Advanced Manufacturing (Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing) [220].

Herausforderung für die Produktionssysteme

Industrie 4.0 ist ein neuer Ansatz, um eine hochflexible und effiziente Produktion zu erreichen [5]. Aufgrund der verkürzten Produktlebenszyklen und der zunehmenden Schwankung von Markt und Nachfrage muss die Produktion eine Vielzahl von Produkten, Designs und Volumenschwankungen anbieten. In den letzten Jahren wurde die Massenpersonalisierung als einer der Haupttreiber für die nächste Transformation der Weltwirtschaft angesehen [143; 312]. Die Industrie 4.0 ist durch eine starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hochflexiblen Produktion gekennzeichnet [263]. Die Individualisierung ist unter Alterung der Gesellschaft, Wissen, Nachhaltigkeit, Globalisierung, Urbanisierung, Finanzen und Verschulden der Staaten einer der acht wichtigsten globalen Megatrends, die direkte Auswirkungen auf die Produktion haben [341]. Um dem Anspruch der Individualisierung gerecht zu werden, muss eine kundenorientierte, hochflexible und effiziente Produktion implementiert werden.

Kerne der Industrie 4.0 sind technische Integration von Cyber-Physical Systems in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen [5]. Mit der effektiven Logistik und dem umfassend angewendeten Internet wird die verteilte Industrie flexibel miteinander vernetzt. Ein sehr neuer und wichtiger Trend ist der Aufbau „Cyber-Physischer Systeme“ und die Kombination von Produktionssystemen mit dem „Internet der Dienste und Dinge“, um eine hochflexible und effiziente Produktion zu erreichen [5; 203]. Die zukünftigen Produktionssysteme sind mit Industrie 4.0 verbunden und werden hier als Produktionssysteme in Industrie 4.0 bezeichnet. Als zukünftige Produktionssysteme werden die wandlungsfähige Produktion, vernetzte Produktion, digitale Produktion, lernfähige Produktion und Nachhaltigkeit im Lebenszyklus des Systems Produktion vorgestellt [19; 340–343]. Diese Konzepte weisen auf die Entwicklungsrichtung der Produktionssysteme in Industrie 4.0 hin.

Mit der zunehmenden Marktsättigung verwandelten sich die Märkte in Käufermärkte, die die Hersteller zur Produktdifferenzierung zwangen [34]. Entsprechend den Kundenerwartungen auf dem globalen Markt ist der Bedarf nach variantenreichen Produkten zugenommen. Die damit verbundene Wettbewerbsverschärfung führt den Unternehmen zu einem steigenden Kosten- und Leistungsdruck. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu verstärken und die Wettbewerbsposition auf dem internationalen Markt zu erhalten, steht die Industrie vor der Herausforderung, variantenreiche kundenspezifische Produkte auf einem hohen Qualitätsniveau in kleiner Losgröße effizient zu herstellen. Um diese Herausforderung zu bewältigen ist eine Voraussetzung der höheren Flexibilität sowie Senkung der Bestände und Durchlaufzeiten zu erfüllen. Unter diesen Umständen werden eine ständig steigende Automatisierung und zunehmende Komplexität der Maschinen und Anlagen sowie eine verbundene Umstrukturierung der betrieblichen Organisationsformen gefördert. Mit dem

Trend der Regionalisierung und Personalisierung in den letzten Jahrzehnten wurden die Produktionssysteme immer komplizierter. Durch die Forderungen der Vergangenheit zu einer verstärkten Automatisierung und Integration von Produktionsanlagen hat sich die Komplexität erhöht und damit die Anfälligkeit der Maschine für Ausfälle und Qualitätsverluste gesteigert. Dies führt unter Berücksichtigung eines ganzheitlichen Ansatzes dazu, dass bei Messung der Leistungserbringung sämtliche Verfügbarkeits-, Nebennutzungs- und Qualitätsverluste berücksichtigt werden müssen. Diese Verluste entstehen nicht nur direkt an der Maschine, sondern haben ihre Ursache auch im Zusammenspiel mit dem Bedienpersonal und den organisatorischen Abläufen in der Produktion.

Zunehmende Anforderungen an Maschinenhersteller und Anwender

Bei wettbewerbsfähigen Unternehmen müssen sie schnell, kostengünstig und termingerecht liefern. Dynamische Einflüsse stellen das Unternehmen jedoch vor vielfältige Herausforderungen, die die Erreichung der genannten Ziele erschweren. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Anforderungen an das Produkt hinsichtlich Innovation und Qualität sowie aus Sicht des Marketings erfüllt sind. Im Kern der vorwiegend logistischen Betrachtungen steht eine effiziente Auftragsabwicklung, an die Anforderungen aus folgenden Blickwinkeln gestellt werden [10]: Produktsicht, Technologiesicht, Markt- und Gesellschaftssicht, Prozesssicht und Netzwerksicht.

Das Bild 1.1 zeigt die gewichteten Kennwerte der Hauptanforderungen an Maschinenhersteller und Anwender aus der Befragung in „ZuPack“ [45].

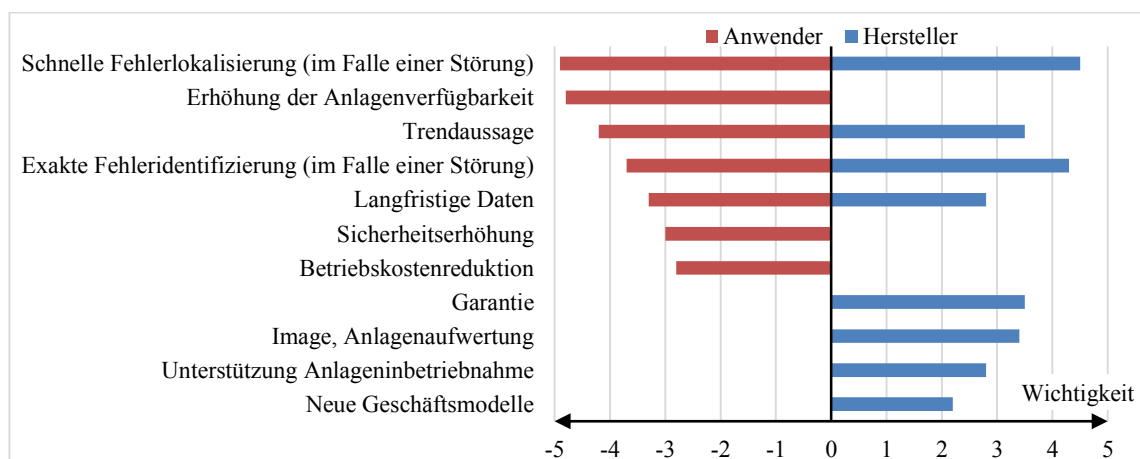


Bild 1.1: Gewichtete Kennwerte der Hauptanforderungen an Maschinenhersteller und Anwender in Anlehnung an [45]

Der Anwender sieht den höchsten Nutzen eines Überwachungssystems in einer Verfügbarkeitserhöhung seiner Anlage. Als Basisvoraussetzung ist die anbahnende Fehler erkennen zu können, schon bevor es zur Störung kommt. Wenn das Überwachungssystem sein Instandhaltungspersonal auch bei der „Fehlerlokalisierung“ unterstützen kann, hat es für den Anwender den höchsten Nutzen. Mit etwas geringerer Bewertung, aber ebenfalls wichtig werden „Trendaussagen“ des Systems gesehen, weil dies die Abschätzung von demnächst

anstehenden Instandhaltungsmaßnahmen gestattet. Als wichtig wird auch die „exakte Fehleridentifizierung“ gesehen. Dem Anwender oder Servicetechniker kann diese erweiterte Aussage u.U. sehr nützlich sein. Der Maschinenhersteller bewertet grundsätzlich ähnlich wie der Anwender. Deutlich wichtiger als Trendaussagen ist dem Maschinenhersteller die Möglichkeit, mit einem Überwachungssystem Aussagen zur „exakten Fehleridentifizierung“ machen zu können. Dies begründet sich auch darin, dass der Maschinenhersteller oftmals nur bei kritischen Fehlern vom Anwender zu Rate gezogen wird. Weiterhin spielen Gewährleistungsfragen eine Rolle; denn oftmals ist zu klären, ob ein Fehler anwenderverursacht ist (Überlastung, Fehlbedienung, ...) oder auf ein Bauteilversagen zurückzuführen ist. Aus der Langzeitaufzeichnung kann auch der Maschinenhersteller Nutzen ziehen, z.B. für neue Dienstleistungs- und Geschäftsmodelle (Unterstützung der lokalen Instandhaltung, Übernahme der Wartung, Remote Service).

Wettbewerbsvorteile der hohen Verfügbarkeit

Das Bild 1.2 stellt die Wettbewerbsvorteile zur Erhöhung der Verfügbarkeit grafisch dar.

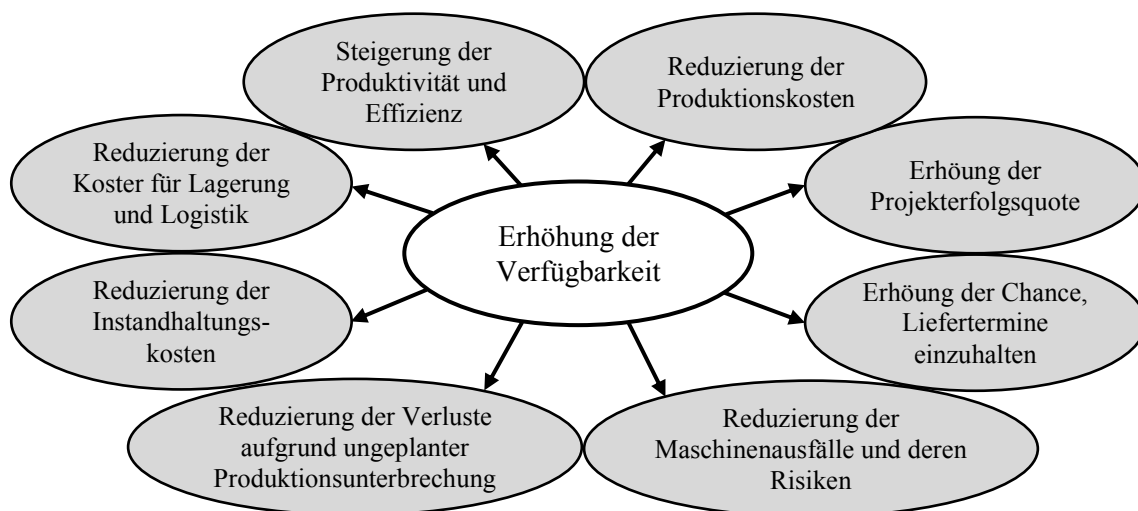


Bild 1.2: Wettbewerbsvorteile zur Erhöhung der Verfügbarkeit

Die von heutigen Produktionssystemen abverlangte große Flexibilität und hohe Produktivität führen zu einer gesteigerten Abhängigkeit der Unternehmen von der Verfügbarkeit der Maschinen und Anlagen. Diese Abhängigkeit lässt sich auf die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Maschinenkomponenten herunterbrechen. Neben dem Wirkungsgrad ist die Verfügbarkeit der produktionstechnischen Anlage mit der Forderung nach optimalen wirtschaftlichen Eigenschaften eng verknüpft. Die Fortschritte der Produktionswirtschaft in Form verbesserter Wirkungsgrade und höherer Verfügbarkeiten gehen einher mit Fortschritten der Sicherheitstechnik, wodurch die Unfälle an produktionstechnischen Anlagen auf ein Minimum zurückgegangen sind. Bei Berücksichtigung der für Planung, Bau und Betrieb der Anlage aufzuwendenden Kosten kann abgeschätzt werden, ob eine Erhöhung der Verfügbarkeit wirtschaftlich von Nutzen ist. Die Schadenskosten für einen Tag Stillstand können bei mehreren Tausend Euro liegen. Teilweise steht bei längerem Maschinenstillstand

jedoch nicht nur der finanzielle Schaden im Vordergrund, sondern der mögliche Verlust eines Kunden bei nicht fristgerechter Erfüllung des Auftrages. Zudem besteht bei nicht ordnungsgemäßer Maschinenfunktion die Möglichkeit qualitativ ungenügende und mit minimalen Mängeln versehene Produkte auszuliefern, was ebenfalls zu einer Reklamation beim Endkunden führt. Innerhalb der Garantiezeit der Maschinen und Anlagen übernehmen die Hersteller die Kosten der Reparaturservice, jedoch nicht die Folgeschäden wie Produktionsabbruch. Einerseits fallen hohe Anschaffungskosten an, sodass jeder Stillstand einen wesentlichen betriebswirtschaftlichen Verlust bedeutet. Andererseits bewirken die zunehmende Kopplung der Produktionsabläufe mehrerer Unternehmen in einer Supply Chain und die damit einhergehende Reduzierung von kapitalbildenden Lagerbeständen, einen erhöhten negativen Effekt bei Ausfall eines Produktionssystems [190].

Um sich dem sich ständig verändernden Markt anzupassen und im globalen Wettbewerb zu bestehen, sind für die Industrie heute vielfältige Anforderungen wie hohe Produktivität, ressourcenschonende Produktion und hohe Flexibilität erforderlich [19]. Neben Aspekten wie Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit spielen zunehmend auch die Kosten für das Betreiben der Maschine eine entscheidende Rolle. Unter diesen Umständen sind die Gesamtkosten der Produktionsmaschinen und –anlagen während ihres gesamten Lebenszyklus zu einem Schwerpunkt der Investitionsentscheidungen in Produktionssystemen geworden. [354] Neben den reinen Investitionskosten für die Maschinen und Anlagen nimmt die Rolle der Kosten in der Betriebsphase zu. Die Kosten in der Betriebsphase hängen erheblich vom Aufwand zur Sicherstellung, Aufrechterhaltung und Wiederstellung einer hohen Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit der Produktionssysteme ab. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen wird die Sicherstellung einer zuverlässigen Funktion des gesamten Produktionssystems aufgrund der immer komplexeren Maschinen und Anlagen immer wichtiger und anspruchsvoller.

Zur Sicherung des Produktionsstandortes Deutschland ist es notwendig, die Produktion bei gleich bleibend hoher Qualität kostengünstiger zu gestalten. Hier spielt u.a. die Verfügbarkeit der Produktionsanlagen, besonders in der Großserienproduktion, eine Rolle. Der Ressourcenschonende Einsatz der Produktionsmittel in Verbindung mit einer hohen Verfügbarkeit kann zu erheblichen Kosteneinsparungen und damit zu einem Wettbewerbsvorteil führen [248]. Maschinenbauer, die eine hohe Verfügbarkeit ihres Produktes gewährleisten können, haben einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Mitbewerbern, denn die Kaufentscheidung für eine Maschine wird heute neben den technischen Parametern und Investitionskosten zunehmend durch die Kosten für das Betreiben der Anlage (TCO, Total Cost of Ownership) bestimmt.

Hinsichtlich komplexerer Entscheidungsvorgänge ist die Anforderung an Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit in der Nutzungsphase der Systeme gestiegen. Dies gilt nicht nur für Maschinen- und Anlagenhersteller, sondern auch für den Betreiber. Die Anwender erwarten vor dem Kauf einer Maschine Auskünfte zu Wartungsintervallen, Standzeiten bzw. Intervallen zum Austausch von Komponenten und teilweise auch Zusicherung für gesicherte Produktionszeit. Kurzfristige Vorwarnungen im Bereich von Minuten sind wenig hilfreich. Es gibt einen hohen Bedarf für mittel- und langfristige Vorwarnungen (ca. 1 Woche), da diese die Abstimmung der Instandhaltung auf die Produktion ermöglichen und somit zum Erhöhen der Verfügbarkeit beitragen [45]. Deshalb wird eine uneingeschränkte Verfügbarkeit und

Zuverlässigkeit gefordert, die teilweise bereits vom Anwender in das Pflichtenheft neuer Maschinentypen aufgenommen wird und vom Hersteller zugesichert werden muss.

Die Hersteller sind selbst Maschinen- und Anlagenbetreiber, die ihre Produktionssysteme hinsichtlich der Verfügbarkeit und der gesamten Herstellungskosten optimieren müssten. Von anderer Seite können sie den Kunden Produkte mit hoher Verfügbarkeit anbieten, um Wettbewerbsvorteil und -position zu gewinnen. Durch eine Erhöhung der Verfügbarkeit können für die Betreiber solcher Maschinen die Kosten für Wartung und Instandhaltung reduziert und damit letztendlich die Stückkosten verringert werden. Somit ergibt sich ein Wettbewerbsvorteil sowohl für die Maschinenhersteller als auch für die Maschinenbetreiber [248].

Vorteile der Modellierung und Simulation

Modellierung und Simulation bieten diverse Vorteile, siehe Bild 1.3.

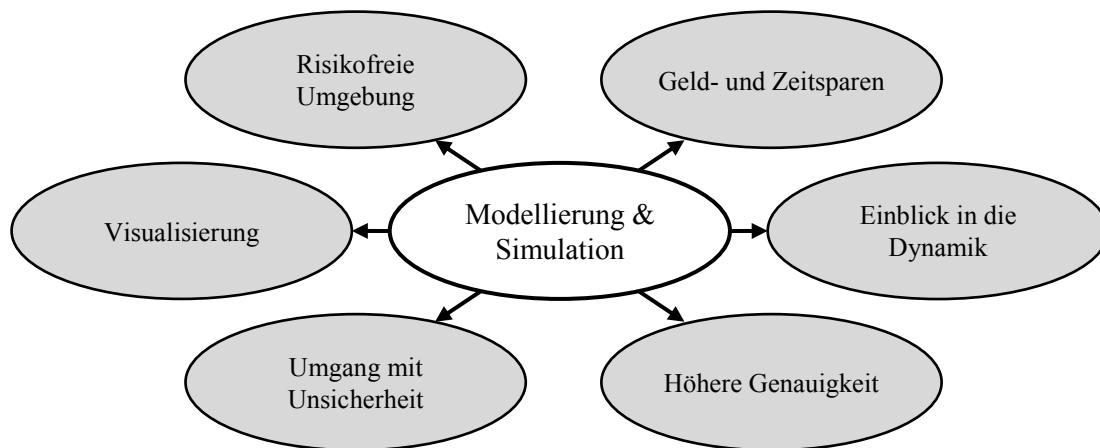


Bild 1.3: Vorteile der Modellierung und Simulation

Risikofreie Umgebung: Die Simulationsmodellierung bietet eine sichere Möglichkeit, verschiedene "Was-wäre-wenn"-Szenarien zu testen und zu untersuchen. Die richtige Entscheidung kann getroffen werden, bevor Änderungen in der realen Welt vorgenommen werden.

Geld- und Zeitsparen: Virtuelle Experimente mit Simulationsmodellen sind kostengünstiger und benötigen weniger Zeit als Experimente mit realen Anlagen.

Visualisierung: Simulationsmodelle können in 2D/3D animiert werden, sodass Konzepte und Ideen leichter überprüft, kommuniziert und verstanden werden können.

Einblick in die Dynamik: Im Gegensatz zu tabellen- oder serverbasierten Analysen ermöglicht die Simulationsmodellierung die Beobachtung des Systemverhaltens im Zeitverlauf auf jeder Detailstufe. Als Beispiel kann die Lagerplatzauslastung zu jedem beliebigen Zeitpunkt überprüft werden.

Höhere Genauigkeit: Ein Simulationsmodell kann viel mehr Details erfassen als ein analytisches Modell, was eine höhere Genauigkeit und präzisere Prognosen ermöglicht.

Umgang mit Unsicherheit: Die Ungewissheit über den Zeitpunkt und das Ergebnis von Vorgängen lässt sich in Simulationsmodellen leicht darstellen, wodurch das Risiko gemessen und robustere Lösungen gefunden werden können.

Zunehmende Bedeutung der Modellierung bei Verfügbarkeitsanalyse

Bis Anfang der 80er Jahre wurden die Verfügbarkeitsanalysen überwiegend mit statistischen Methoden durchgeführt [120; 247; 270; 320]. Ab Ende des 80er Jahre wurden mathematische Modelle, Methoden und Algorithmen zur Analyse der Verfügbarkeit [156; 187; 305] verwendet, somit könnten die Anwendungsmöglichkeiten der Analyseergebnisse aus statistischen Daten und deren Nutzung erweitert werden. Heutzutage spielen die probabilistische Modellierung und Simulation eine immer bedeutendere Rolle bei der Verfügbarkeitsanalyse [77; 91; 104; 125; 141; 151; 166; 193; 194; 212; 256; 334]. Die Analyse der Betriebsdauer (Time to Failure) und Dauerverfügbarkeit (long-run availability) basierte auf der Annahme des zufälligen (poissonartigen) Ausfalls. Somit werden die praktischen Anwendungsfälle der Analyseergebnisse erweitert. Angesichts immer komplexer werdender Produktionsabläufe sowie auch vielschichtiger Unternehmensstruktur überschneiden sich an vielen Stellen die Zuordnungsmöglichkeiten verschiedener Methoden, Technologien und Strategien. Die Studien zeigen gemeinsam, dass neuartige Produktionsmethoden wie z.B. Simulationstechnik, realitätsnahe Modellierung, Virtual Reality und Visualisierungstechniken eine immer höhere Bedeutung bei der Produktion der Zukunft gewinnen können [38; 141]. Die realitätsnahe Modellierung ermöglicht es, Verfügbarkeitsverlauf von verschleißgefährdeten und zufällig ausfallenden Komponenten zu analysieren und vorauszusagen. Das folgende Bild 1.4 beschreibt die Vorteile der Modellierung bei Verfügbarkeitsanalyse von Produktionssystemen.

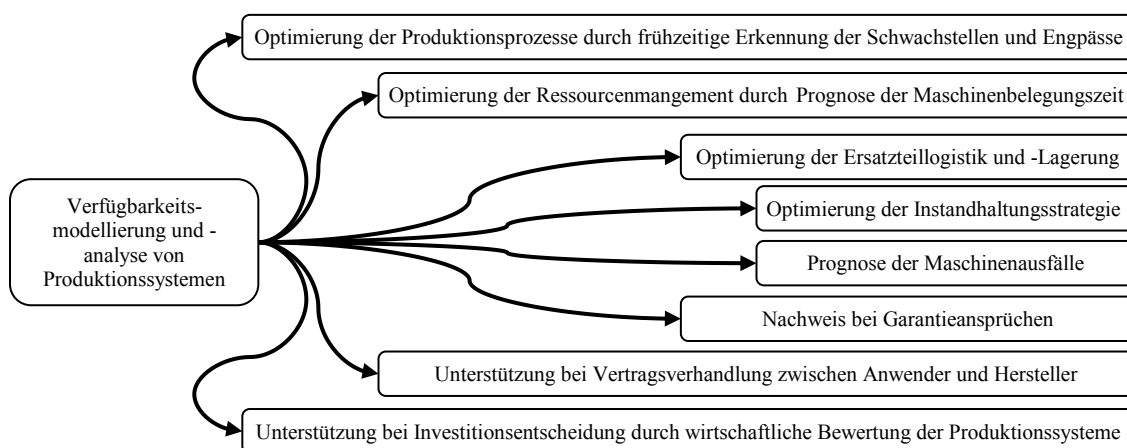


Bild 1.4: Modellierungsvorteile bei Verfügbarkeitsanalyse

1.2 Problemstellung

Dynamische und komplexe Aufgaben

Viele reale Aufgaben sind dynamisch und höchst komplex, weil sie folgende Aspekte beinhalten [54]:

1. Zeitverzögerungen (z.B. zwischen Verpflichtungen auf eine Aktion und die Folgen dieser Aktion),
2. Mehrfachrückkopplungsprozesse,
3. Nichtlinearitäten (d.h. Beziehung zwischen Einkommen und Einkommensteuer in einem degressiven Steuersystem ist nicht linear),
4. Unsicherheiten (z.B. Die Nachfrage eines neuen Produktes ist eine Unsicherheit, die die Mehrheit der Unternehmen hat).

Kostenintensive Zustandsüberwachung für KMU

Die statistische Verfügbarkeitsanalyse basierte auf die gesammelten Daten in der Vergangenheit, die aus konkreten Produktionssystemen mit spezifischen Maschinen und Anlagen in bestimmten Bereichen stammten. Abgesehen von der begrenzten Datenquelle und deren eingeschränktem praktischen Wert sind die Analyseergebnisse für dieselben Maschinen und Anlagen nützlich, während sie für ähnliche oder andere Systeme nur von bedingtem oder gar keinem Nutzen sind. Da alle theoretischen Analysen und der praktische Nutzungswert der Analyseergebnisse basieren auf realen statistischen Daten, besteht die erste Herausforderung darin, ausreichende Daten aus praktischer Produktion zu gewinnen. Infolgedessen werden heutzutage immer mehr Sensoren an Maschinen und Anlagen installiert. An den auf dem Markt bestehenden Maschinen wird die verbaute Sensorik vielfach nur zur Erkennung von Referenzpositionen oder zur Produktnachverfolgung genutzt. Sensoren zur Erkennung von Maschinenfehlern sind kaum verbaut. Mit der Verbreitung elektronischer Steuerungssysteme verfügen elektrische Antriebe über integrierte Fehlerwarnsysteme. Verglichen hierzu werden mechanische Komponenten wenige überwacht. Seit einigen Jahren kommt die Zustandsüberwachung, das sogenannte Condition Monitoring, immer mehr zum Einsatz. Zur Bewertung des Zustands eines Maschinenelements können die Belastung aus Antriebsdaten kumulativ ermittelt werden [133]. Mit integrierter Sensorik kann eine Maschine oder Anlage rund um die Uhr online überwacht werden. Die Maschinenverfügbarkeiten können über 95% bei einem gleichzeitig geringen Personaleinsatz erreichen [45]. Vorteilhaft wird die Zustandsüberwachung in Kombination mit Teleservice zudem im weltweiten Einsatz in entfernten Regionen oder an schwer erreichbaren Orten eingesetzt, wo im Schadensfall der Zugang für Mitarbeiter und Material schwierig ist. Als Verfahren zur Ermittlung des Zustands werden in der Praxis die Schwingungsanalyse, vibroakustische Verfahren, Thermographie oder Ölanalysen genutzt [45]. Zustandsüberwachung spielt immer größere Rolle. Anomale Signale können rechtzeitig entdeckt und behandelt werden. Somit können die resultierenden Maschinenstörungen reduziert bzw. vermieden werden. Jedoch hat die zustandsorientierte Instandhaltung verschiedene Hemmnisse bei der Einführung: häufig noch die technisch schwierige Zustandsermittlung, die hohen Kosten (z.B. Sensorik), der Integrationsaufwand (insbesondere Verkabelung, Einbindung in das Firmennetzwerk) und die aufwendige

Qualifizierung des Instandhaltungspersonals [279]. Da die Online-Zustandsüberwachung sehr kostenintensiv ist, rentiert sie sich vor allem für industrielle Großanlagen wie z.B. Kraftwerke, Windkraftanlagen, Walzwerke oder Bergbaueinrichtungen. Eine Besonderheit der deutschen Industrie sind die geografisch verteilten kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), die eine unerlässliche Rolle in der Industrie spielen. Diese Nachteile der Zustandsüberwachung sind für KMU besonders offensichtlich.

Begrenzte Parameterauswahl der Zustandsüberwachung

Aufgrund der Komplexität der Maschinen und Systeme müssen viele verschiedene Signale überwacht werden. Einige dieser Signale ändern sich abrupt und andere allmählich. Von den letzteren werden sich einige schneller ändern als andere. Es fallen Entscheidungen über die Periodizität der Messung, die Kritikalität des Parameters und darüber, wer welche Informationen erhalten soll. In einem komplexen System ist es derzeit unmöglich, alle Parameter in Betrachtung zu überwachen. Folglich muss eine begrenzte Auswahl getroffen werden. Dies sollte auf den verfügbaren Informationen zu Ausfällen, deren Häufigkeit und den daraus resultierenden Ausfallzeiten beruhen. Wenn eine Entscheidung in Bezug auf die wesentlichen Ausfälle gemacht wird, bleibt es weiterhin die Entscheidung, welcher Parameter für den Ausfall empfindlich ist. In bestimmten Fällen ist der Parameter leicht definierbar. Die komplexeren Fälle müssen jedoch von sich aus untersucht werden.

Umfassende Abhängigkeiten und Zwangskopplungen

Komplexe Produktionsmaschinen bieten kaum Möglichkeiten, einzelne Komponenten in einem Testbetrieb zu überprüfen, da sie fast alle durch umfassende Abhängigkeiten und Zwangskopplungen miteinander verbunden sind. Würden etwa zyklische Testläufe der Anlage eingeführt, um ihren Zustand zu überprüfen, könnten dabei zwar eine Vielzahl von steuerungsinternen Daten gesammelt werden, gerade durch die Abhängigkeiten würden viele Indikatoren für fehlerhafte und übermäßig belastete Komponenten aber verborgen bleiben, oder nicht genau genug eingegrenzt werden können. Ein entsprechend aufwändiger Testbetrieb zur Fehlersuche in der Anlage zieht immer einen zeit- und kostenintensiven Produktionsausfall nach sich, der meistens nicht toleriert werden kann. Gerade bei hoch taktenden Maschinen im Mehrschichtbetrieb ist es unverzichtbar, drohende Ausfälle parallel zur Produktion mit einer genügenden Vorlaufzeit zu erkennen, um die notwendigen Maßnahmen in der nächsten planmäßigen Stillstandsperiode vorbeugend durchführen zu können [45]. Der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht vor allem bei der Herstellung des Zusammenhangs zwischen Messsignalen und Verschleißzustand der Maschine, d.h. bei der Interpretation der Messsignale [248]. Das Forschungsrisiko ist begründet durch die unterschiedlichen Verfahren bei der spannenden Bearbeitung (Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen) und die damit verbundene Herausforderung, allgemeingültige, vom Verfahren weitgehend unabhängige Verschleißkennwerte zu ermitteln. Damit bleibt die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Maschinen gewährleistet, wodurch die Nutzung der Projektergebnisse durch viele Maschinenhersteller möglich sein sollte.

Dynamische Systemstruktur

Die herkömmlichen Produktionssysteme basieren auf der Strategie „Massenproduktion“. Durch hohe Stückzahl werden die Herstellungskosten reduziert. Um personalisierte Produkte in kleiner Losgröße effizient herstellen zu können, müssen sich die Produktionssysteme an die ständigen Systemstrukturänderungen flexibel anpassen [328]. Die herkömmlichen Produktionssysteme benötigen sehr viel Zeit und Aufwand für die Anpassungen und können diese Anforderung nicht mehr erfüllen. In dem zukünftigen Forschungsprojekt Industrie 4.0 wurde neue Konzepte von Produktionssysteme vorgeschlagen. Kerne Lösung zur Erfüllung der Individualisierung ist die flexible und wandelfähige Produktion [5]. Das Konzept der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit hat weitreichende Auswirkungen auf die Gestaltung von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 und ist nach wie vor eine Herausforderung in der Modellierung. Um die potenziellen Herausforderungen und Risiken zu untersuchen, entsteht deshalb heutzutage die Notwendigkeit, das Konzept vor der Anwendung systematisch zu analysieren. In der Literatur wurden das Design und die Konzepte der anpassungsfähigen Produktionssysteme behandelt. Einige modellierten die vereinfachten Produktionssysteme. Viele Aspekte können jedoch nicht zusammen berücksichtigt werden. Die Systeme mit starrer Struktur, die entweder in Reihe oder parallel geschaltet sind oder eine Mischstruktur aus beiden aufweisen, können modelliert werden. Die Systeme mit dynamischer Struktur können jedoch noch nicht modelliert werden.

Diverse Einflussfaktoren

Diverse Einflussfaktoren sind zu berücksichtigen. Einflussfaktoren der Verfügbarkeit sind die Zuverlässigkeit der Maschinen, die Instandhaltung und Ersatzteile etc.

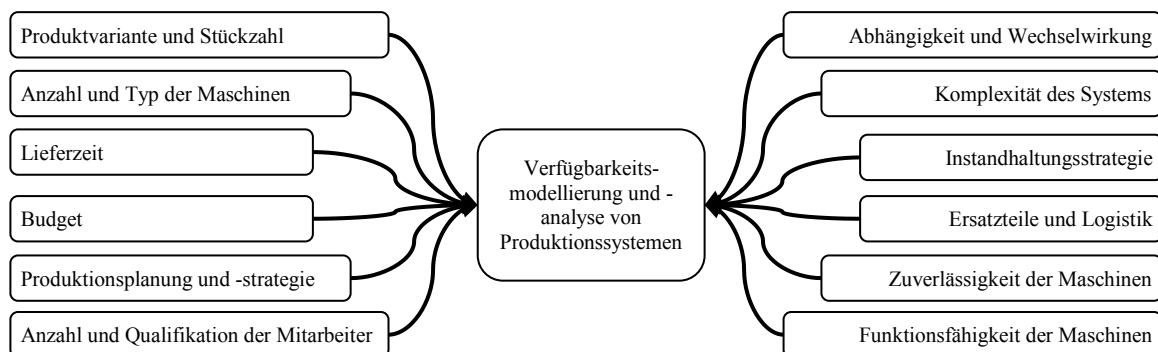


Bild 1.5: Diverse Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeitsanalyse

Herausforderungen für die Modellierung

Für die Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit von den Produktionssystemen in Industrie 4.0 sind zuerst die Produktionssysteme in Industrie 4.0 zu analysieren. Die erstellten Modelle der Produktionssysteme schaffen eine Basis für die Analyse der Verfügbarkeit. Die Produktionssysteme in Industrie 4.0 verfügen über spezielle Eigenschaften wie Wandlungsfähigkeit, Intelligenz usw., die für die Modellierung sehr abstrakt sind. Deshalb müssen die Eigenschaften der Produktionssysteme in Industrie 4.0 intensiv analysiert werden.

Die herkömmlichen Produktionssysteme werden bei der Modellierung als vereinfachte Modelle betrachtet. Im Vergleich zu den Faktoren innerhalb der Systeme spielen die Faktoren außerhalb der Systeme eine geringe Rolle und können deshalb vernachlässigt werden. Die Strukturen der herkömmlichen Produktionssysteme sind starr festgelegt. Deshalb sind die Zusammenhänge zwischen den Komponenten der Systeme klar und deutlich. Um an die ständigen Veränderungen von Markt und Kunden anpassen zu können, sollen die Produktionssysteme in Industrie 4.0 flexibel und wandlungsfähig sein. Die Strukturen der Produktionssysteme sollen deshalb nicht mehr starr, sondern flexibel und wandlungsfähig bleiben [328]. Die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktionssysteme müssen bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Die Produktionsprozesse in herkömmlichen Produktionssystemen sind nach den Anforderungen von Kunden definiert und bleiben dann bis Ende der Produktion unveränderlich. Während der Produktion werden die Veränderungen der Anforderungen von Hersteller entweder direkt abgelehnt oder mit zusätzlichen Kosten vorgenommen. In Industrie 4.0 sollen die Produktionssysteme die Fähigkeit haben, sich ständig an die Veränderungen der Kundenanforderung anzupassen, wobei die Veränderungen in der Regel stochastisch erfolgen. Den Veränderungen entsprechend müssen die Produktionssysteme flexibel rekonfiguriert werden. Deshalb werden die Strukturen der Produktionsprozesse auch flexibel verändert. Das verlangt neben lückenloser Planung und rechtzeitiger Entscheidungsfindung auch optimale Organisation. Bei der Modellierung eines solchen anpassungsfähigen Produktionssystems müssen die zufälligen Veränderungen berücksichtigt werden. Zurzeit gibt es leider noch keine Modelle, die die zufälligen Veränderungen und deren Wechselwirkungen modellieren können.

Eine Besonderheit der Produktionssysteme in Industrie 4.0 ist die starke globale Vernetzung durch Logistik und Internet. Der Markt, die Kunden und die Lieferanten außerhalb der Produktionssysteme können unmittelbar auf die Produkte beeinflussen. Außerdem können die Wirtschaft, die Technologie und sogar die Politik mittelbar auf die Produkte beeinflussen. Deshalb sollen die Faktoren außerhalb der Systeme bei der Modellierung und Analyse ebenfalls berücksichtigt werden. Wegen der starken Vernetzung und den flexiblen Strukturen sollen die Systemkomponenten möglichst effektiv miteinander und mit den Systemen verknüpft sein. Dabei spielen die Identifizierung und die Lokalisierung sowie die Kommunikation zwischen den Komponenten und Systemen eine bedeutende Rolle. In Industrie 4.0 dürfen die Komponenten der Systeme sogar autonom oder teilautonom Entscheidungen in die Hand nehmen. Bei der Modellierung müssen diese Faktoren auch berücksichtigt werden.

Die Produktionssysteme in Industrie 4.0 sollten möglichst wirtschaftlich, effizient und effektiv sein und könnten so schnell wie möglich auf die Situationsänderungen, wie zum Beispiel kurzfristige Änderungswünsche von Kunden, reagieren. Die zukünftigen Produktionssysteme werden über die Eigenschaften von hoher Wandlungsfähigkeit, starker Vernetzung usw. verfügen. Deshalb steht die Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit von den Produktionssystemen in Industrie 4.0 vor umfangreichen Herausforderungen. Um die Herausforderungen in Industrie 4.0 zu bewältigen, sollen neue Regeln und Prinzipien in die Modellierung eingebracht werden. Das erfordert eine neue Modellierungssprache und -methode.

Die Kombination und Verknüpfung mit „Cyber-Physical Systems“ und „Internet of Services and Things“ in Produktionssystemen führt unmittelbar zu den notwendigen Änderungen und Aktualisierungen der Produktionssysteme. Aus diesem Grund weisen die Produktionssysteme in Industrie 4.0 einige Besonderheiten auf, die neue Herausforderungen und Anforderungen an die Modellierung und Analyse der Produktionssysteme und deren Verfügbarkeit stellen. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, sollten die Modellierungsmethoden die Besonderheiten von Produktionssystemen in Industrie 4.0 berücksichtigen können.

In der Zukunft beschäftigt sich das Produktionssystem sowohl mit einer Erhöhung der Produktivität als auch mit der Verschlankung der Arbeitsabläufe auf eine höhere Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.

Einschränkung der vorhandenen Modelle

Einige Modelle, wie Markov-Modell und Boole-Markov-Modell, wurden in den letzten Jahrzehnten verwendet, um die Verfügbarkeit der Systeme zu modellieren und zu prognostizieren. Die Modelle setzten jedoch starke Vereinfachungen voraus und erfordern meist Beschränkungen. Deshalb sind sie meistens für einfache Systeme geeignet. Die üblicherweise verwendeten Annahmen über den So-gut-wie-neu-Zustand nach Instandhaltungsmaßnahmen oder über zeitunabhängige Überlebenswahrscheinlichkeiten bzw. Ausfallraten können das wirkliche Verhalten von Komponenten und Systemen nicht genau genug beschreiben. Weil sich die Systeme dynamisch verhalten und die Zustände der Systeme ständig verändern, sind die Analyseergebnisse eingeschränkt für die Anwendung zur Optimierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, sollten die Modellierungsmethoden in der Lage sein, die Eigenschaften von Produktionssystemen in der Industrie 4.0 realitätsnahe zu berücksichtigen. Die bisher bekannten Analyse- und Modellierungsmethoden können die Aspekte von Industrie 4.0 nicht in ausreichendem Maße berücksichtigen. Es gibt noch keine Methode oder Methodik, die die Produktionssysteme in Industrie 4.0 systematisch mit Berücksichtigung umfassender Aspekte modellieren kann, um die Verfügbarkeit der Produktionssysteme zu prognostizieren und realitätsnahe anwendungsfähige Ergebnisse zu bekommen.

1.3 Lösung durch Modellierung mit Petrinetz

Neben Forschung und Entwicklung müssen für die Umsetzung von Industrie 4.0 auch industriepolitische und industrielle Entscheidungen getroffen werden. Adäquate Planungs- und Erklärungsmodelle der immer komplexer werdenden Produkte und Produktionssysteme sind eine Basis, um die zunehmende Komplexität zu beherrschen. Weiter steigende Anforderungen an die Produktivität von Fertigungsanlagen stellen den Werkzeugmaschinenbau sowie auch die Hersteller von Steuerungs- und Antriebstechnik zunehmend vor neue Herausforderungen: Komplexe mechanische Abläufe werden durch Applikationssoftware mit ständig steigender Funktionalität gesteuert. Um auf diesem Weg die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Werkzeugmaschine zu erhöhen, fällt der Simulation in zunehmendem Maße eine Schlüsselrolle zu. Simulation erhöht die Produktivität und Verfügbarkeit [194].

Das Ausfallverhalten einer Maschine ist ein stochastischer Prozess, den man modellieren kann, um die Maschinenausfälle zu prognostizieren und die durch Maschinenausfälle resultierenden Verluste möglichst zu reduzieren. Die Modellierung bietet die Möglichkeit, die Produktionssysteme realitätsnahe zu modellieren und anwendbare praktische Ergebnisse zur Optimierung der Systeme anzubieten. Durch Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit der Maschinen und Systeme können die möglichen Maschinenausfälle und Schwachstellen und Engpässe der Systeme prognostiziert werden.

Die hochgradige Vernetzung der Produktionssysteme ermöglicht eine hohe Flexibilität des Produktionsprozesses und der hoch integrierten Instandhaltungsabläufe. Für die Analyse deren Verfügbarkeit müssen die flexiblen Abläufe, die Kommunikation, die Entscheidungsprozesse, zahlreiche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen im System usw. berücksichtigt werden. Erst damit ist es möglich, die Auswirkungen des Produktionsprozesses oder der Instandhaltungsstrategie auf die operative Verfügbarkeit zu bewerten.

Die Fähigkeiten der vorhandenen Methoden zur Modellierung der speziellen Eigenschaften von Produktionssystemen in Industrie 4.0 in Bezug auf Netzwerkfähigkeit, Kommunikation, künstliche Intelligenz und Anpassungsfähigkeit werden in der Studie [173] bewertet. Es dient als Kriterium für die Auswahl einer geeigneten Methode zur Modellierung von Produktionssystemen in der Industrie 4.0. Die Bewertungen nach den Eigenschaften des Produktionssystems mit Berücksichtigung unterschiedlicher Modellierungsaspekten und Simulationsaspekten zeigen, dass Petrinetz für die Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0 sehr geeignet ist [173].

1.4 Forschungsfragen

Um die Logik der Arbeit zu verdeutlichen, werden folgende Forschungsfragen gestellt und im Lauf der Arbeit beantwortet.

1. Welche speziellen Eigenschaften haben die Produktionssysteme in Industrie 4.0? Wie kann man diese Eigenschaften modellieren?
2. Welche Aspekte sind bei der Modellierung der Verfügbarkeit zu berücksichtigen, um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen?
3. Welche Methoden/Algorithmen können verwendet werden, um die Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0 zu ermöglichen.
4. Welche Vorteile kann man durch Modellierung der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in Industrie 4.0 erzielen?

1.5 Ziele der Arbeit

Die Analyse und Prognose der Verfügbarkeit auf Basis der Modellierung von Produktionssystemen in Industrie 4.0 können die Entscheidungsfindungen zwischen unterschiedlichen Produktionsstrukturen und -abläufen und verschiedenen

Instandhaltungsstrategien unterstützen. Ebenso lassen sich die Anforderungen bezüglich der Logistik und notwendiger Ressourcen ableiten. Daher ist die Entwicklung einer leistungsfähigen Methode zur Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in Industrie 4.0 notwendig.

Um das zu ermöglichen, sind zuerst die aktuellen Anforderungen und Wünsche von Herstellern und Kunden und die neueste Wissenschaft und Technologie zu analysieren. Damit können wichtige Funktionen und Eigenschaften von Produktionssystemen in Industrie 4.0 zusammengefasst werden. Nach den Funktionen und Eigenschaften sind die benötigten Modellierungselemente und Algorithmen zu untersuchen. Zuletzt sollte eine intelligente Methode und ein praktisches Modell entwickelt werden. Beispiel wäre eine Selbstoptimierende Methode. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen zunächst die vorhandenen Methoden und deren Potenziale analysiert werden. Dann können die bestehenden Methoden optimiert und erweitert werden.

Das Hauptziel der Arbeit ist, eine neue Methode zur realitätsnahen Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0 zu entwickeln. Durch Modellierung der Produktionssysteme können die Verfügbarkeiten der Produktionssysteme analysiert und die potenziellen Probleme der Produktionssysteme in Industrie 4.0 untersucht werden. Anschließend können konkrete Maßnahmen zur Optimierung der Produktionssysteme vorgeschlagen werden, um die möglichen Verluste, Schaden und Risiken zu reduzieren. Ziel der Arbeit ist, das Produktionssystem in Industrie 4.0 technisch und wirtschaftlich zu betrachten. Das Ziel kann wie folgt unterteilt werden:

1. Analyse der speziellen Eigenschaften von Produktionssystemen in Industrie 4.0;
2. Analyse der Aspekte von Verfügbarkeit für realitätsnahe Modellierung;
3. Bewertung der Modellierungsfähigkeiten von vorhandenen Methoden;
4. Suche passender Elemente zur Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0;
5. Erstellung einer Konzeption zur Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0;
6. Verfügbarkeitsorientierte Modellierung der Produktionssysteme;
7. Optimierung der Schwachstellen und Engpässe in Produktionssystemen durch Analyse der Produktionsunterbrechung aus der Folge von Maschinenausfällen;
8. Analyse der Schadenshäufigkeit sowie Instandhaltungskosten;
9. Analyse der Ausfallzeiten, Folgeausfallzeiten, Belegungs- und Nutzungszeiten;
10. Unterstützung der Vertragsverhandlungen zwischen Anwendern und Maschinen-/Anlagenlieferanten sowie der innerbetrieblichen Optimierungen.

1.6 Aufbau der Arbeit

Das Kapitel **Stand der Wissenschaft und Technik** gibt einen Überblick über die Entwicklung der Produktionssysteme. Vorhandene Forschungsarbeiten im Bereich der Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit sind erklärt.

Im Kapitel **Grundlagen** werden die grundlegenden Begriffe und Definitionen aus der Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie erklärt. Einige wichtige Begriffe in Industrie 4.0 sind beschrieben.

Das Kapitel **Anforderungen an die Modellierung und Simulation** beschreibt diverse Aspekte zur Modellierung der Produktionssysteme.

Das Kapitel **Vorhandene Methoden und ihre Bewertungen** stellt die mathematischen und graphischen Methoden und Modelle vor. Anschließend sind die Methoden nach den Anforderungen bewertet.

Im Kapitel **Modelle und Ergebnisse** werden alle Modelle und Ergebnisse erklärt. Dabei werden der Lösungsansatz und die Vorgehensweise zur Modellierung der Verfügbarkeit von Produktionssystemen vorgestellt.

Zum Schluss werden die Zusammenfassung und Ausblick gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Entwicklungsweg zu Produktionssystemen in Industrie 4.0

2.1.1 Entwicklungsrichtung der Produktionssysteme

Im letzten Jahrhundert hat sich die Entwicklung der Produktionssysteme sehr stark beschleunigt: zunächst von der handwerklichen Produktion in die klassische industrielle Produktion am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts, danach in die schlanke Produktion in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts und schließlich in die wandlungsfähige Produktion in den letzten zehn Jahren [243].

Im Laufe der Geschichte wurden die Produktionssysteme stark gewandelt. Neben kontinuierlichen kleineren Anpassungen der Theorien und deren Ansätze ist es im Laufe der Zeit auch zu umfassenden Änderungen und epochalen Umbrüchen gekommen [243 S. 39] [357]. Am Anfang wurden häufig unkoordiniert gewachsene Insellösungen entstanden und Optimierungen in Teilbereichen der Produktion durchgeführt. Dann wurden immer modernere Produktionssystemkonzepte zur Gesamtoptimierung entwickelt. Weiter werden einige wichtige Produktionssysteme kurz beleuchtet. Die handwerkliche Produktion war bis Anfang des 20. Jahrhunderts dominierend. Und dann begann die industrielle Revolution wegen der Entstehung der Manufakturen. In diesem Fall wurden die Fabriken eingerichtet. Was führt dazu, dass die handwerkliche Produktion zur klassischen industriellen Produktion transformiert wurde. Inzwischen wird die Produktionseffizienz auch erheblich erhöht. *Frederick W. Taylor* (1856-1915) konzipierte die Arbeitsteilung und Fließbandfertigung bzw. leitete eine neue Phase der industriellen Produktion ein [243 S. 40]. Eine technologieorientierte Produktion entwickelte sich am 50er Jahren. Die realisierte durch die Fertigung mit numerisch gesteuerten Maschinen (Numerical Control – NC). Mithilfe des Einsatzes der Computer zur Steuerung von Maschinen (Computerized Numerical Control – CNC) eröffnete eine neue Art von Fertigung in eine automatisierte Produktion. Dann wird ein CIM-Konzept (Computer Integrated Manufacturing) mit dem zunehmenden Einsatz der Computer-Techniken eingeführt. Das Toyota-Produktionssystem wurde nach dem Zweiten Weltkrieg in Japan schnell entwickelt. In dem gleichen Zeitraum entwickelt sich das auch in Europa und USA in Einklang. Im Toyota-Produktionssystem stand es, die Verschwendungen in der Produktion im Mittelpunkt zu vermeiden. Im Jahr 1979 fang eine Benchmark Studie „International Motor Vehicle Programm“ (IMVP) im Massachusetts Institute of Technology (MIT) an, welche schließlich der Auslöser für den Ansatz der „Lean Production“ und auch sogenannte „Schlanke Produktion“ als Bündel von Best-Practise-Vorgehensweisen japanischer Unternehmen war [243 S. 40]. Zur Erhöhung der Effektivität bei wachsender Produktvielfalt wurde die schlanke Produktion weit verbreitet. Mit der rasanten Popularisierung des Computers und Internets gewinnt die digitale Produktion [342] immer

mehr an Bedeutung. Zu dieser Gelegenheit hat ein Ausdruck Wandlungsfähigkeit im Kontext der Forschung an Bedeutsamkeit gewonnen. Dies wandlungsfähige Produktionssystem kann an die Herausforderungen vonseiten turbulenter Unternehmensumfeld unverblümt verbiegen.

2.1.2 Treiber von Forschungsprojekten

Um wettbewerbsfähig zu bleiben, hat die Industrie in den letzten Jahrzehnten neue Methoden und Strategien zur Verbesserung der Qualität und Optimierung der Kosten entwickelt. Diverse Aspekte zur Reduzierung der Herstellungskosten und Erhöhung der Kundenzufriedenheit und Rentabilität wurden untersucht. Bereits im Jahr 1996 wurde ein thematischer Rahmen „Factory for the Future“ (FACTORY) zur Weiterentwicklung der Produktion in Europa abgesteckt [38]. Als Schwerpunkte wurden die Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses, dynamische, flexible und robuste Fertigungssysteme, umweltgerechte Produkte und Produktionsprozesse u.a. geeinigt. Die amerikanische Studie „Next-Generation Manufacturing (NGM) – A Framework for Action“ von 1997 [217] und die japanische Studie „Leitfaden zur Forschung in der technischen Produktionswissenschaft, -planung und -steuerung an der Schwelle zum 21. Jahrhundert“ geben einen klaren Überblick über die Entwicklungstendenzen in den USA und Japan [38]: Zum Bestehen im Wettbewerb der nächsten Generation soll das Unternehmen des nächsten Jahrtausends die Kernkompetenzen und Schlüsselfunktionen in der mitarbeiterbezogene, der geschäftsprozessbezogene, der technologiebezogene und der kooperationsbezogenen Bereich erreichen [38]. Die Studien in USA, Japan und Europa zeigen die Tendenzen der zukünftigen industriellen Produktion: Die Schwerpunkte von Forschung, Entwicklung und Produktion können aus den Unterschieden in den Prognosen abgeleitet werden. Als Element der Wertschöpfung wird die Nachhaltigkeit ein wesentlicher Faktor für die Produktion des nächsten Jahrtausends sein. Der Akzent in der Produktion der Zukunft wird auf Innovationen und Strategien für einen schnellen Wandel liegen. Flexibilisierung und Globalisierung werden wichtige Ziele für die Industrie bleiben. Der Aspekt der Kundenorientierung wird am deutlichsten hervorgehoben [38]. Die japanischen Forscher sehen den Beginn einer Wechsellperiode zu „Flexible Computer Integrated Manufacturing Systems“ (FCIMS) etwa im Jahr 2015 [38]. Designtechnik für regional angepasste Produkte und Produktionssysteme mit menschengerechter Gestaltung sind zwei der Hauptforschungsfelder an der Schwelle zum 21. Jahrhundert [38]. Die bisherigen Produktionssysteme können durch Flexibilisierung und hochwertige Automatisierung weiterentwickelt werden.

In letzten Jahrzehnten wurde das thematische Programm „Wettbewerbsorientiertes und nachhaltiges Wachstum“ [38] zunehmend betrachtet. Zum zentralen Ziel des Rahmenprogramms des Umweltschutzes ist die Erhaltung des Ökosystems durch einen besseren Umgang mit natürlichen Ressourcen und durch die Reduzierung von Emissionen ein wesentlicher Faktor, der in der Produktion zu berücksichtigen sein wird. Seit ca. zwei Jahrzehnten sind grundlegende Veränderungen in den Rahmenbedingungen industrieller Produktion gekommen. Stichworte zur Charakterisierung des Wandels sind [38]: rapide Ausbreitung neuer Technologien, Auftreten neuer offensiver Wettbewerber, eine als Globalisierung bezeichnete immer dichtere Vernetzung der weltwirtschaftlichen Güter-, Informations- und Kapitalströme, tief greifende Veränderungen im Käuferverhalten und zunehmende erkannte Notwendigkeit eines nachhaltigen, auf Dauer tragfähigen

Wirtschaftens. Die bewährten Strategien industrieller Produktion sind allein nicht dazu geeignet, die mit dem Wandel verbundenen neuen Herausforderungen zu bewältigen. Zur Verstärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen und damit des Wirtschaftsstandorts Deutschland hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Fördermittel für verschiedene Verbundprojekte frei gestellt. Durch die Förderungsprojekte sollen produzierende Unternehmen besser in die Lage versetzt werden, auf Veränderungen rasch zu reagieren und den erforderlichen Wandel aktiv mitzugestalten [38]. Das BMBF-Rahmenkonzept „Produktion 2000 plus – Visionen und Handlungsfelder für die Produktion in Deutschland“ zeigte mit erfolgreichen Verbundprojekten, dass Forschung und Entwicklung große Teile der deutschen Industrie bei ihrer strategischen Neuorientierung unterstützen kann [37]. Diese von Industrie und Wissenschaft getragene Untersuchung hat die aus heutiger Sicht einzuschlagenden Forschungsrichtungen aufgezeigt. Die Untersuchung weist Forschung, Entwicklung und Qualifizierung eine Schlüsselrolle für eine zukunftssichere Produktion in Deutschland zu. Darauf wurde das neue BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ [38; 39] zur Stärkung der Produktion in Deutschland und ihrer Wettbewerbsfähigkeit aufgebaut, das im Oktober 1999 gestartet wurde. Mit diesem Programm fördert das BMBF kooperative, vorwettbewerbliche Forschungsvorhaben. Die im Rahmenkonzept genannten Themenfelder wurden von Experten aus Industrie und Wissenschaft mit der Untersuchung „Produktion 2000plus“ aufgezeigt und waren Gegenstand vorangegangener Bekanntmachungen. Diese Bekanntmachung greift mit dem Produktionsanlauf ein weiteres Themenfeld von großer Bedeutung für eine wettbewerbsfähige Produktion auf. Insbesondere soll zur flexiblen, schnellen Erfüllung von individuellen Kundenanforderungen beigetragen werden. Gefördert werden ausgewählte Verbundprojekte im Themenfeld schneller Produktionsanlauf in der Wertschöpfungskette [39]. Zu vorgelagerten Prozessen wie strategische Entscheidungsfindung, Produkte- und Technologieentwicklung, Zuliefernetzgestaltung, Anlagen- und Fabrikplanung oder Erprobung der Muster sowie zu nachfolgenden Prozessen wie Serienproduktion, Vertrieb oder Kundenbetreuung ist ein intensiver Informations- und Erfahrungsaustausch unerlässlich. Die Forschungsergebnisse sollen zur Beherrschung des Produktionsanlaufs komplexer Produkte mit kurzen Produktionszyklen, vornehmlich verkürzter Entwicklungszeit, global verteilten Produktionsstandorten und hoher Variantenvielfalt bei gesicherter Qualität, Termintreue und niedrigen Kosten beitragen [39].

Mit der Entwicklung der Produktionssysteme wandelte sich die Produktionsstrategie von Massenproduktion über kundenspezifische Massenproduktion zur Massenpersonalisierung [159]. Am Ende des achtzehnten Jahrhunderts führte die erste Massenproduktion durch Maschinen zur ersten industriellen Revolution. Im späten zwanzigsten Jahrhundert hat kundenspezifische Massenproduktion (KMP) als eine wichtige strategische Initiative viel Aufmerksamkeit von der Wissenschaft und Industrie erregt [99; 231]. Beherrschung komplexer Systeme wird als einer der wichtigen Handlungsfeldern vom Arbeitskreis Industrie 4.0 betrachtet [5].

Das Umfeld für das Produzieren unterliegt derzeit einem beschleunigten Wandel. Neben Forschung und Entwicklung müssen für die Umsetzung von Industrie 4.0 auch industriepolitische und industrielle Entscheidungen getroffen werden. Der Arbeitskreis Industrie 4.0 sieht Handlungsbedarf in folgenden acht wichtigen Handlungsfeldern [5]:

Standardisierung und Referenzarchitektur, Beherrschung komplexer Systeme, flächendeckende Breitbandinfrastruktur für die Industrie, Sicherheit, Arbeitsorganisation und –gestaltung, Aus- und Weiterbildung, rechtliche Rahmenbedingungen und Ressourceneffizienz. Die produzierenden Unternehmen in Deutschland müssen in der Lage sein, mit dem Wandel fertig zu werden und die darin liegenden Chancen zu nutzen. Das heißt: Die Unternehmen müssen die eigene Wandlungsfähigkeit und Marktorientierung als Wettbewerbsfaktoren klar erkennen und zielgerichtet entwickeln. Hierfür muss die Gesamtstrategie eines produzierenden Unternehmens an mehreren Eckpunkten gleichzeitig ansetzen und eine ganzheitliche Vorgehensweise fördern. Dadurch entstehen der Bedarf und die Chance, die Produktionssysteme ganzheitlich zu betrachten. Um die Entwicklungsrichtung der Produktionssysteme unter Berücksichtigung ihrer hohen Komplexität zu analysieren und vorherzusagen, wurde die Strategie vorgeschlagen, die Produktion als System zu betrachten [341].

Die Anforderungen an Produktionsmaschinen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit steigen ständig. Um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, müssen verschiedene Aspekte wie hohe Produktivität, Individualität und Flexibilität in der Produktion berücksichtigt werden [19]. Durch die Verwertung der Projektergebnisse von VIPRO [248] sollen Maschinenhersteller in der Lage versetzt werden, ihre Maschinen mit zusätzlicher Funktionalität hinsichtlich vorbeugender, zustandsabhängiger Instandhaltung anzubieten. Heutzutage werden häufig die Motion-Control-Steuerungen bei Produktionsmaschinen genutzt. Beispiele sind das Forschungsprojekt „IMS Simon – Sensor Fused Intelligent Monitoring Systems for Machining“ [138], „ISPI – Intelligente Spindeleinheit“ und „ZuPro“ [32] sowie „VerStand“ [280]. Mit dem Ziel, die Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit von Produktionssystemen zu unterstützen, hatte das BMBF im Jahr 2005 einen Wettbewerb bekannt gegeben [248]. Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zeigen, dass die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen und damit des Wirtschaftsstandorts Deutschland durch Verbesserung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit von Produktionssystemen verstärkt werden können.

2.2 Entwicklung der Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist eine entscheidende Kenngröße zur objektiven Charakterisierung des Leistungsgrades von Produktionssystemen. Unter Verfügbarkeit können viele wichtige Faktoren in Produktionssystemen und ihre Zusammenhänge untersucht werden. Deshalb gewinnt die Verfügbarkeit zunehmende Bedeutung bei der Untersuchung von Produktionssystemen [249]. Hinsichtlich der komplexeren Entscheidungsvorgänge nehmen die Anforderungen an das Wissen und die Fähigkeiten der Maschinen- und Anlagenbauer sowie -betreiber zur Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit in der Nutzungsphase der Produktionssysteme zu. Der wirtschaftliche Einsatz hochwertiger Maschinen und Anlagen zur Ermöglichung automatisierter Produktion setzt eine möglichst hohe Nutzung und damit hohe Verfügbarkeit voraus.

Sowohl technische als auch organisatorische Ursachen können zur Maschinenstillstandszeit (-ausfälle) und Produktionsunterbrechung führen, die so schnell wie möglich identifiziert und lokalisiert werden müssen, um die Fehler und Störungen rechtzeitig mit korrekten Maßnahmen zu beseitigen und ggf. Vorbeugungsmaßnahmen zu treffen. Dadurch können die wegen Produktionsunterbrechung resultierenden Verluste und Schaden reduziert werden. Somit entstand der Bedarf, die Verfügbarkeit neben dem Nutzungsgrad und den Ausfallraten der Maschinen durch Erkennung der organisatorischen, technischen und der durch Wartung bedingten Ausfallzeiten zu ermitteln.

2.2.1 Entwicklung der Verfügbarkeitsanalyse

Zuverlässigkeit in den Betrieb ist die Grundlage von Arbeitssicherheit und Umweltschutz [105], die seit Anfang der 1980er Jahren in der Energietechnik betrachtet wurde [320]. Die Verfügbarkeitsanalyse wurde im 1980er Jahren auf die Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse bei energietechnischen Anlagen (in der Erdöl- und Erdgasproduktion, Kernkraftwerken) erweitert [320] und zur Schwachstellenanalyse technischer Anlagen verwendet [255]. Um im heutigen immer härter werdenden Wettbewerb zu überleben und zu entwickeln, werden bei der Planung und Betrieb komplexer Systeme mehrere Faktoren berücksichtigt. Um ein Gleichgewicht zwischen Qualität und Wirtschaftlichkeit zu finden und die Wettbewerbsfähigkeit zu erzielen, werden die Faktoren Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit zusammen betrachtet [41; 48; 64; 150; 163; 201; 271; 275; 294; 348]. Die Verfügbarkeitsanalyse spielt zunehmende Bedeutung in sicherheitsrelevanten Systemen und Produktionssystemen. Die Verfügbarkeit ist eine inhärente Eigenschaft, die heutzutage immer mehr in technischen Geräten, Maschinen und Anlagen [255; 266; 274; 291; 296; 298; 299; 320; 324; 329] und technischen Systemen [68; 91; 98; 111–113; 153; 181; 211; 250; 283; 323] mit der Zuverlässigkeitstechnik zusammen untersucht wird. Es beinhalten chemische Anlagen [107], Automatisierungssysteme [128], Fahrzeuge [140], Elektronik [261], verfahrenstechnischen Systemen [98], Energietechnik [292] u.a. Dabei wurden die technischen Systeme als stochastische Systeme behandelt [224].

Seit den frühen 60er Jahren untersuchten die Forscher und Wissenschaftler das Thema Verfügbarkeit des reparierbaren Systems [95; 207]. Einfache parallele (redundante) Systeme wurden mit der Annahme untersucht, dass die Maschinenausfälle sofort identifiziert und die Reparaturen unmittelbar durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit umfasst nicht nur die Zuverlässigkeit (engl.: reliability), sondern auch Aspekte der Instandhaltbarkeit. Unter diesem Sinn wurde in der Vergangenheit zuerst die Verfügbarkeit der Maschinen und Anlagen im Bereich Energie und Stahlindustrie untersucht, zum Beispiel die Verfügbarkeit von großen Kraftwerksanlagen [126; 193; 211; 218; 244; 265; 323; 329–331; 360] und Hüttenwerksanlagen [28; 108]. Die frühen Literaturen stammen aus Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB) [218; 330; 331], Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) [325–327], Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [12; 36; 50] und VDI-Gesellschaft Energietechnik [320]. Die Themen wie Bruchmechanik, strahleninduzierte Versprödung, Thermoschock, rissauslösende Faktoren u.a. werden zu Bruchausschluss, Schadensverhütung, Beurteilung und Qualifikation der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Bauteilen und Anlagen untersucht [2; 292; 323]. Zur Analyse des Verhaltens von Komponenten und Systemen bei dynamischer

Beanspruchung und erhöhten Belastungen wurde Lebensdauermanagement eingeführt, das die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Komponenten und Systemen behandelt. Dann wurden die untersuchten Bereiche erweitert auf Chemie [92; 107; 161], mobile Arbeitsmaschine und Fahrzeuge [26; 103; 140; 225; 274], Elektronik [261; 293], Humankapital [264], Windenergieanlagen [334], IT-Service [27; 127; 147], Software [301], EDV- und Rechnersystemen [35; 104; 202; 207; 228; 262], Optik [47], Cloud Computing [18] usw. Die (intra-) Logistik- und Transportsysteme [15; 76; 85; 119; 181–183; 256; 305] sind ein Schwerpunkt der Studien im Bereich der Verfügbarkeitsuntersuchung. Besonders wurden z.B. die Transport- und Lageranlagen [25; 88; 111–114; 123], die Materialfluss- und Warenverteilssysteme [25; 69; 134] und (global) verteilte Lagersysteme [86; 246; 318] behandelt. VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss, Logistik untersuchte die Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen [321; 322]. Ein weiterer Schwerpunkt der Verfügbarkeitsstudien liegt bei technischer Anlagen und Geräten, insbesondere den Fertigungs- und Produktionsanlagen [40; 60; 189; 255; 266; 273; 285; 296; 299; 314]. Dabei fokussierten viele Studien auf die Werkzeugmaschinen [33; 65; 71; 81; 115; 194; 200; 214; 245; 346]. Einige Studien behandelten die Automatisierungssysteme [128; 262; 273; 290; 296] und Montagesysteme [290; 345] und Prüfsysteme [290]. Seit den letzten drei Jahrzehnten hat es angefangen, die Verfügbarkeit für komplexe, technische Systeme [68; 91; 120; 250; 270; 282; 290; 356] und Produktionssysteme [8; 83; 116; 122; 188; 190; 191; 239; 254; 286; 333; 358] zu forschen. *Winfried G. Schneeweiss* behandelte 1971 die Verfügbarkeit und mittlere Betriebszeit komplexer reparierbarer Systeme [270]. Im 1978 berücksichtigte *Diethard Reisch* die Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanforderungen bei der Planung von Maschinensystemen [250]. Seit Ende des 20. Jahrhunderts fokussierten immer mehr Studien auf das Problem in der Ablaufplanung mit beschränkter Verfügbarkeit [31; 162; 167; 168; 180; 260; 267]. Maschinenplanung (Machine scheduling) [167; 168; 180; 260; 267] ist ein Schwerpunkt bei der Verfügbarkeitsanalyse in Produktionssystemen.

Aktuelle Forschungen betreffen die Ermittlung, Optimierung und Erhöhung der Gesamtverfügbarkeit in Produktionssystemen, wie zum Beispiel Fließproduktionssystemen [8]. *Schütz und Vogel-Heuser* entwickelten eine SPS-basierte Softwareagent zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Produktionsanlagen [284; 285]. Aufbauend auf den Ergebnissen des DFG-Projekts AVE („Agenten für flexible und verlässliche, eingebettete Echtzeitsysteme“) wurde eine werkzeugunterstützte Vorgehensweise realisiert, die eine modellbasierte Entwicklung und automatische Implementierung SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung)-basierter Softwareagenten ermöglicht. Diese Softwareagenten sind in der Lage, die Verfügbarkeit einer Produktionsanlage durch die Implementierung von Softsensoren zu erhöhen. Die Modellierungsansätze und Beschreibungsformen basieren dabei auf den Notationen der Systems Modeling Language (SysML), einer objektorientierten Modellierungssprache, die auf die Beschreibung von technischen Systemen angepasst ist. Als historische Soziologie des Konsums wurde die Verfügbarkeit der Dinge untersucht [277]. Neue Themen bezüglich der Verfügbarkeit sind bspw. die Verfügbarkeit mit Aussagewahrscheinlichkeit [205], und die Nutzungsverhalten von Sharing-Systemen [308].

Zur Ermittlung und Erhöhung der Verfügbarkeit haben die Wissenschaftler unterschiedliche Maßnahmen durchgeführt. Diverse Konzepte und Designs bezüglich hoher Verfügbarkeit wurden vorgestellt [3; 6; 9; 11; 22; 52; 76; 97; 106; 117; 118; 136; 139; 148; 164; 185; 186;

229; 268; 304; 306; 316]. Seit den frühen 1970er Jahren fokussierten einige Wissenschaftler zur Steigerung der Verfügbarkeit auf die Maschinenlebensdauer [28; 108; 241]. Die Maschinenlebensdauer hängt von der Belastung ab, wobei die Verfügbarkeit eben lastabhängig ist [81; 338]. Einige Studien [26; 28; 56; 81; 208; 338] behandelten die Wirkungen der Belastung auf die Verfügbarkeit. *S. Böttcher* analysierte 1972 die Wirkung der dynamischen Beanspruchungen auf die Lebensdauer und Verfügbarkeit der Anlagen [28]. Im BMBF geförderten Projekt OPTILAST [208] wird die Überlastbegrenzung zur Steigerung der Verfügbarkeit behandelt. Ab 1980er berücksichtigte ein Teil der Forschungen von Verfügbarkeitsanalyse die Betriebsereignisse [360] und Ausfälle [81; 265; 272] wie zum Beispiel die Ausfalldauerlinie [265], die Kollisionen im Arbeitsraum moderner Fertigungsmittel [298], die Ausfallhäufigkeit [272], die Ausfallursache [81], und die Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation [26]. Softwarefehler und Ihre Auswirkungen auf die Systemverfügbarkeit wurden auch behandelt [301]. Zur Kostenoptimierung der Reservegeräte und Ersatzlager mit vorgegebener Mindestverfügbarkeit wurde die Ersatzstrategie für Systeme aus reparierbaren Elementen [222] untersucht. Einige Studien beruhten auf die Systemstruktur, zum Beispiel die Kopplung von Einzelrechnern mit Busstruktur in Prozessrechnersystemen [202], Konzepte mit paralleler Schaltungsstruktur am Beispiel der festoxidkeramischen Brennstoffzelle [293]. 1978 hat *Franz Schumacher* die Verfügbarkeit von Verarbeitungssystemen mit paralleler und serieller Struktur und mit Zwischenlagern untersucht [282]. *Kistner* untersuchte 1982 die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit redundanter Systeme mit vorbeugender Wartung [153]. Seit 1980er fingen einige Wissenschaftler an, Diagnosesysteme [33; 53; 65; 110; 155; 225; 244; 262; 286] zur Analyse und Erhöhung der Verfügbarkeit zu verwenden. Zum Beispiel verwendete *Seifert, Hans-Jörg* modellgestützte Diagnose 1991 zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Fertigungsanlagen komplexer Produktionssysteme [286]. In Diagnosesystemen werden Fehler und Störungen in verschiedenen Bereichen und ihre Wirkungen untersucht. Beispiele sind die Werkstückfehler und Messfehler [244]. Um Überlast zu sichern, hat es angefangen, den Prozess zu überwachen. Fehlerdiagnose [124; 262] konnte eine bedeutende Rolle bei der Verfügbarkeitsanalyse in Automatisierungssystemen gewinnen. Um die Ausfallursachen zu identifizieren, Ausfallzeiten zu verkürzen und technische Verfügbarkeit wiederherzustellen wurde Störungsüberprüfung mit Entstörkarten eingesetzt [93]. Zur Unterstützung der Diagnose und Service wurde modernes Diagnosesystem 2010 eingesetzt [110]. Durch Ferndiagnose der Störungen und zielgerichtete Entstörung können die effektive Störungszeit verkürzt werden. Somit wird der Instandhaltungsaufwand reduziert. Neben der schnellen und effizienten Entstörung können auch präventive Instandhaltungen ermöglicht werden. Zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit liefert ein Teil der Studien Beiträge durch neue Konzepte, z.B.: das Konzept mit eigenerregten Kühlmittelströmungen für Kabelanlagen [135], und das Konzept mit selbstanpassender Lagerregelung für Vorschubantrieben [114]. In den 1980er Jahren berücksichtigte man schon das Thema der Instandhaltung [103]. *M. Gleißner* untersuchte die Stromrichterstrukturen zur Steigerung der Verfügbarkeit durch Fehlertoleranz [100]. Der zunehmende Wettbewerb führt zu einer stärkeren Kosten-Nutzen-Optimierung der Verfügbarkeit, wie z.B. Entwicklung eines Steuerungsinstrumentes zur Minimierung der Leerkosten und zur konsequenten Anpassung der Verfügbarkeit an die erwartete Nachfrage [360]. Die aktuelle Studie umfasst die Überwachung der Maschinenverfügbarkeit in Cloud-Produktion [337].

Seit Ende des zwanzigsten Jahrhunderts gewinnt die Verfügbarkeitsplanung und -Management an Bedeutung. Am Ende der 1980er Jahren wurden die Anforderungen an Verfügbarkeit bei der Systemplanung behandelt [250]. Danach wird wissensbasierte Verfügbarkeitsplanung entwickelt [165]. Ab Mitte der 1990er Jahren entstanden das ganzheitliche Verfügbarkeitsmanagement in Verbindung mit Qualitätsmanagement [70]. Auf Basis der Planung wurden Service und Instandhaltung im Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen hinzugefügt [191]. Vor Kurzem wurden wertorientiertes Verfügbarkeitsmanagement [89] und ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement in Projekt VeraPro [190] vorgeschlagen. Dabei wurden die realen Nutzungs-, Verschleiß- und Abnutzungsverhältnisse betrachtet. Mit erweiterter Betrachtung der administrativen Prozesse in kleinen und mittleren Unternehmen wurde Verfügbarkeitsmanagement von Bearbeitungssystemen untersucht [239]. Verfügbarkeitsorientierte Zuverlässigkeitsuntersuchung wurde 1979 von *Jürgen Nachtkamp* vorgeschlagen, um die Eigenbedarfsversorgung zu berücksichtigen [211]. Um die Verfügbarkeit zu erhöhen, wurde in letzten Jahrzehnten die Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung [278; 280] vorgeschlagen.

In der Vergangenheit wurden die Themen Flexibilität und Verfügbarkeit [80; 144; 315] zusammen diskutiert. Die Verfügbarkeit von flexiblen Fertigungssystemen [40; 116; 122; 188] wurde analysiert. Die Studie [188] zeigt, dass die Verfügbarkeit durch Flexibilität erhöht werden kann. Auf Basis der Zustandsüberwachung und Monitoring [157; 179; 206; 208; 307] wurden verschiedene Projekte in großer Industrie durchgeführt. Ein der Projektziele ist, praktische Forschungsergebnisse für die KMU zur Anwendung zu bringen. Denn es für die KMU aus Wirtschafts- und Technischeinschränkung unpraktisch ist, selbst solche Projekte durchzuführen. *C. Munzinger* und *M. Schopp* erhöhten die Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung [208]. *G. Raunik* fokussierte auf die Schwingungsmessungen an Elektromotoren-Wälzlager und führte Schwingungsdiagnose zur Unterstützung der zustandsorientierten Instandhaltung und zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Aggregate durch [244]. Mit Entwicklung der Zustandsüberwachung wurden zunehmend die Prognose und Vorhersage der Verfügbarkeit untersucht [27; 129; 206; 214]. Ab dem Beginn des 21. Jahrhunderts wurde die organisatorische Verfügbarkeit [60; 79; 82; 83; 144; 147; 214] zunehmend berücksichtigt. Die Leistungsverfügbarkeit [119; 256; 353] gewinnt zunehmend seine Bedeutung in Produktentwicklung und Logistiksysteme. Die Verfügbarkeit wurde als ein Wettbewerbsfaktor zur Steigerung der Produktivität betrachtet [249] und konnte eine Rolle bei der Finanzentscheidung spielen [297].

Die Literaturen [7; 42; 59; 102; 192; 258; 309] zeigen, dass die Methode der Lebensdauervorhersage bei der Verfügbarkeitsanalyse zunehmend an Bedeutung gewinnt. Bereits am Anfang der 70er Jahre wurde die Methode der kontinuierlichen Lebensdauervorhersage [42] zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Bauelemente und Systeme eingeführt. Die auf einen Gerät einwirkenden Beanspruchungen während des Betriebs des Geräts, die bedeutenden Größen (z. B. Vibrationen, Geräusche usw.), die Änderung der Umgebungsbedingungen außerhalb der Anlage, der wahrscheinliche Verlust der Festigkeit (Grad der Abnutzung) und die Veränderung der Ausfallrate wurden berücksichtigt, um kontinuierliches Vorhersagen der verbleibenden Lebensdauer des Geräts zu ermöglichen. Goode et al. [102] unterteilten den Maschinenlebenszyklus in stabile Zone

und Fehlerzone mithilfe der statistischen Prozesssteuerung und beschrieben die Prozesse mit Weibullverteilungen, die nach den statistischen Daten angepasst werden. Basierend auf den beiden angepassten Verteilungen und dem Zustandsüberwachungsprozess wurde die Lebensdauerprognose abgeleitet.

2.2.2 Entwicklung der Methoden und Modelle zur Analyse der Verfügbarkeit

Bis Anfang der 80er Jahre wurden die Verfügbarkeitsanalysen anders als die probabilistische Zufallsanalyse überwiegend mit statistischen Methoden durchgeführt [120; 247; 270; 320]. Zum Ersten lässt sich das Wartungs- oder Reparaturkonzept aus der Auswertung von Komponentenausfällen oder Reparaturen mithilfe der Datenanalyse optimieren. Zum Zweiten werden die notwendigen Stillstandszeiten für alle möglichen Reparaturen, Tests etc. ausgenutzt. Zum Dritten wird die Entscheidungsfindung von Systemänderungen in Verbindung mit Kostennutzenanalysen durch probabilistische Systemanalysen durchgeführt.

Ab Ende des 80er Jahre wurden mathematische Modelle, Methoden und Algorithmen, wie das Markoff-Modell [156; 305] und das Warteschlangen-Netzwerkmodell [156; 187], verwendet, um die Verfügbarkeit reparierbarer Systeme zu analysieren. Danach wurden zunehmend probabilistische Modellierung und Simulation zur Analyse der Verfügbarkeit eingesetzt [77; 91; 104; 125; 151; 166; 193; 194; 212; 256; 334]. Um das Verhalten eines Systems in einem Modell zu simulieren, wird die Methode Monte-Carlo [91; 212; 259; 281] verwendet. In der Literatur [184] werden die Methoden zur Verfügbarkeitsermittlung zusammenfassend vorgestellt. Die Methoden werden in analytische (z.B. Fehlerbaum, Zuverlässigkeitsblockdiagramme), quantitative (z.B. Markov-Ketten, Regressionsmodelle) und qualitative Methoden (z.B. FMEA, Lebenszykluskostenanalyse, Risikobewertung) unterteilt.

Zur anschaulichen Darstellung der Systemstruktur und der Zusammenhänge zwischen den Systemelementen wurde die Kategorie graphische Modellierungsmethode eingeführt. In der Literaturen [16; 23; 142; 184; 227; 236–238; 251; 311] werden die allgemein existierenden graphischen Modellierungsmethoden vorgestellt, die häufig im Bereich der Zuverlässigkeitstechnik eingesetzt werden. Mehrere Methoden wie Markov-Modelle (MM) oder Unified Modeling Language (UML) [311] und verschiedene High-Level-Modellierungsmethoden, z. Coloured Petri Nets (CPN) [142] und Extended Coloured Stochastic Petri Nets (ECSPN) [237] werden vorgestellt. *Dieter Vetterkind* [329] verwendete die graphen-theoretischen Methoden der Signalflussgraphen und der stochastischen Entscheidungsnetzwerke zur Beschreibung von wichtigen zuverlässigkeitsrelevanten Zufallsprozessen und zur Prognose und Entscheidungshilfe für die Instandhaltung und die Steuerung und Planung der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Anlagen. Dabei werden die mehrstufigen und / oder nicht-markoffschen Prozesse, wie die zeit- und belastungsbedingten Verschlechterungsprozesse beschrieben und die stochastischen Verschleiß- und Beanspruchungsvorgänge und die teilweisen und teil-erfolgreichen Erneuerungsvorgänge modelliert.

Zahlreiche Studien haben die Verfügbarkeit komplexer Systeme untersucht. Die Forschung von *Loganathan et al.* [172] zeigt, dass die meisten Studien konstante Versagens- und

Reparaturraten basierend auf dem Markov-Modell untersuchten. *Loganathan et al.* verwendeten ein Semi-Markov-Modell, um die Verfügbarkeit von Fertigungssystemen zu analysieren. Mit diesem Modell können variable Fehler oder Reparaturraten berücksichtigt werden. Verschiedene Elemente auf verschiedenen Hierarchieebenen des Systems werden im Modell berücksichtigt. Flexibilität und ihr Einfluss auf Produktivität und Verfügbarkeit werden jedoch in ihrer Arbeit nicht analysiert. Flexibilität ist immer noch ein Hindernis für die Modellierung der Produktionssysteme und die Analyse ihrer Produktivität und Verfügbarkeit. Zur Vorhersage der Verfügbarkeit verwendeten *Bosse et al.* das Petrinetz [27].

2.3 Entwicklung der Petrinetze

Das Petrinetz ist ein mathematisches Modell von Zustandsdiskreten Systemen und eine Methode, um Prozesse aller Gattung abstrakt darzustellen. Ursprünglich wurden Petrinetze für die homogene und flexible Beschreibung von kommunizierenden, parallelen Prozessen in Automaten verwendet. Heute werden mit Petrinetzen komplexe Systeme mit vielfältigen Abhängigkeiten und stochastischen Charakteristika phrasiert. Die Petrinetze wurden nicht nur in der Informatik zur Modellierung verwendet, sondern auch in vielen anderen Gebieten wie theoretische Biologie, Geschäftsprozesswelt, Maschinenbau, Logistik, Fertigungsanlagen, Führungssysteme [109; 169; 238; 252; 336; 350]. Als eine grafische und mathematische Modellierungsmethode für mehrere Systeme sind Petrinetze ein vielversprechendes Werkzeug für die Beschreibung und die Untersuchung der Systeme, die als nebenläufig, asynchron, verteilt, parallel, nicht deterministisch, und stochastisch ausgezeichnet werden [209]. Als ein grafisches Werkzeug können die Petrinetze als visuelle Kommunikation verwendet werden, um die ähnlichen Flussdiagramme, Blockdiagramme und Netzwerke zu helfen [209]. Darüber hinaus werden die Elemente in diesen Netzen verwendet, um die dynamischen und nebenläufigen Aktivitäten der Systeme zu simulieren. Als ein mathematisches Werkzeug ist es möglich, die Zustandsgleichungen und die algebraischen Gleichungen sowie andere mathematischen Modelle, die das Verhalten der Systeme regieren, einzurichten. Petrinetze können sowohl von Praktikern als auch von Theoretikern verwendet werden. Somit zwischen ihnen stellen die Petrinetze ein leistungsfähiges Kommunikationsmedium dar: die Praktiker können von den Theoretikern lernen, ihre Modelle methodischer zu machen, und die Theoretiker können von den Praktikern lernen, ihre Modelle realistischer zu machen.

In den letzten Jahrzehnten wurden viele verschiedenen Erweiterungen von Petrinetzen entwickelt, zum Beispiel Hierarchie und Farben für qualitative Modellierung [350], sowie Zeitabhängigkeit (diskrete, kontinuierliche und hybride Petrinetze) und Stochastik (Selbstmodifikation in unterschiedlichen Variationen und Fuzzy-Logik) für quantitative Modellierung und Simulation [121; 169; 238; 252; 311; 313]. Heutzutage werden zahlreiche verschiedene Petrinetz-Typen für verschiedene Einsatzgebiete und Modellierungsziele entwickelt. Das Bild 2.1 zeigt die Petrinetze und deren Erweiterungen. Petrinetze existieren in verschiedenen Ausprägungen, angefangen innerhalb einfachen Stellen/Transition-Netzen über stochastische Petrinetze, verallgemeinerte stochastische Petrinetze (GSPN), erweiterte stochastische Petrinetze (ESPN), bis hin zu farbigen Petrinetzen (CPN) und ihren Erweiterungen.

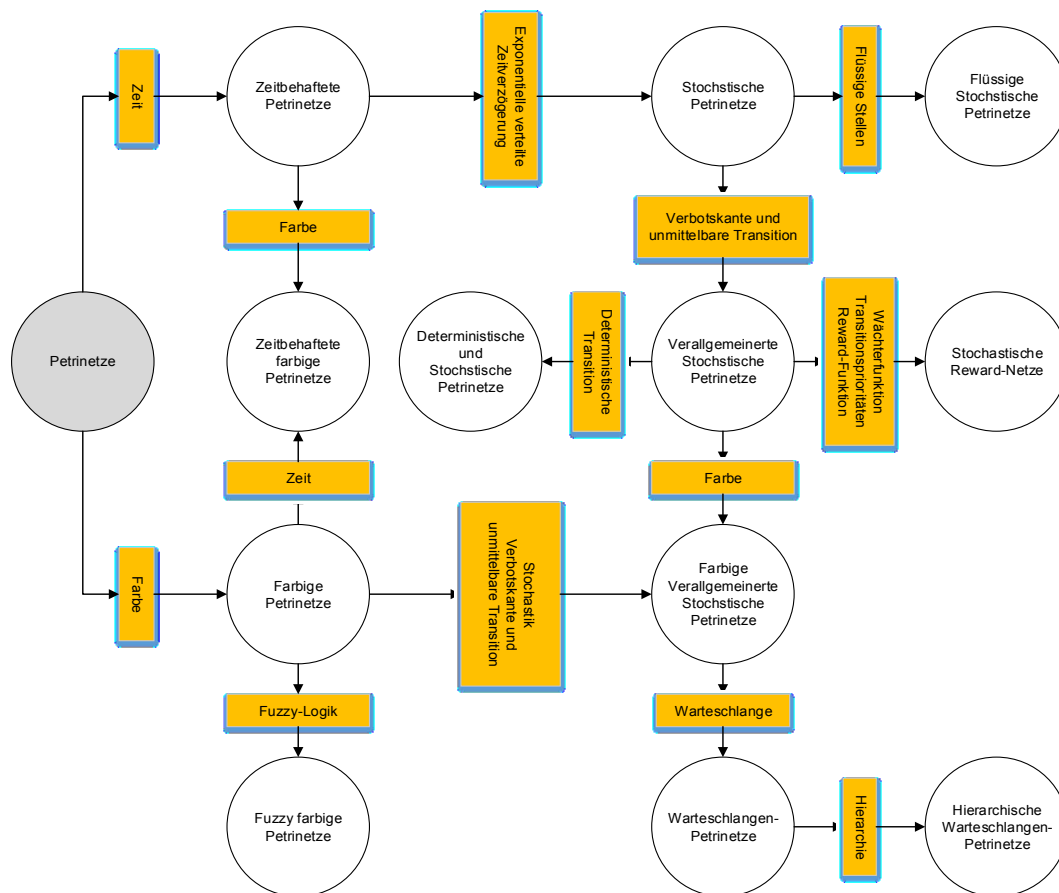


Bild 2.1: Petrinetze und ihre Erweiterungen

Die Petrinetz-Theorie wurde von *Carl Adam Petri* im Anno 1962 entworfen [227]. Die ursprünglichen Petrinetze berücksichtigten den Zeitfaktor nicht. Sie wurden verwendet, um die strukturellen Eigenschaften wie Deadlocks zu untersuchen. In den 1970er Jahren entstanden erst die zeitbehafteten Petrinetze (Time Petri Nets / Timed Petri Nets, TPN) durch die Erweiterungen der Petrinetze mit Zeitverzögerungen [30] von *Merlin* [195] und *Ramchandani* [242]. Es gibt drei grundlegende Möglichkeiten zur Repräsentierung der Zeit in Petrinetz: Schaltdauer, Haltedauer, und Aktivierungsdauer [30]. In der Regel werden Time Petri Nets mit Schaltdauer und Haltedauer sowie Timed Petri Nets und stochastische Petrinetze mit Aktivierungsdauer assoziiert. Die Haltedauer und Schaltdauer sind tatsächlich gleiche Art zur Repräsentierung der Zeit. Der einzige Unterschied ist, dass in einem Fall die Marken in den Transitionen gehalten werden, während in anderem Fall die Marken in den Stellen gehalten werden. Im Hinblick auf diesem Punkt gibt es kein Unterschied zwischen Schaltdauer und Haltedauer. Die Haltedauer wird verwendet, um die Transition aktiv über die Zeiträume zu bleiben. Somit wird die Semantik der Haltedauer näher an denen der nicht zeitbehafteten Petrinetze. Auch werden im Allgemeinen ihre Erreichbarkeitsgraphen kleiner sein. Jede Markierung ist komplizierter als die eines nicht zeitbehafteten Petrinetzes. Die Aktivierungsdauer wurde von *Merlin* eingeführt, um die erzielbaren Kommunikations-

protokolle zu modellieren [30]. Mit der Aktivierungsdauer wird das Schalten der Transition sofort erledigt. Das heißt, dass die Marken im selben Augenblick entfernt und erzeugt werden, und die Verzögerungen durch zwingende Transitionen repräsentiert, wobei die zwingenden Transitionen für eine bestimmte Zeit aktiviert werden, bevor sie schalten können.

Stochastische Petrinetze (engl. Stochastic Petri Net, SPN) ergänzen die Stellen/Transition-Netze um einen zeitlichen Aspekt via eine exponentialverteilte Schaltverzögerung τ zwischen der Aktivierung und dem Schaltvorgang einer Transition. SPN wurden im Jahr 1980 als ein Formalismus zur Beschreibung der diskreten Ereignis-Systeme eingeführt, deren dynamisches Verhalten mittels Continuous-Time Markov Chains (CTMCs) dargestellt werden kann [169]. SPN Modelle werden für die Performance und Zuverlässigkeitsbewertung vieler praktischer Systeme genutzt. Die stochastischen Petrinetze werden zuerst mit flüssigen Stellen der sogenannten flüssigen stochastischen Petrinetze und mit Verbotskante und unmittelbare Transition der sogenannten verallgemeinerte stochastischen Petrinetze erweitert. Beim Hinzufügen der deterministischen Transition in verallgemeinerte stochastische Petrinetze wird eine neue Klasse der Petrinetze: die sogenannten **deterministischen und stochastischen Petrinetze** definiert. Die verallgemeinerten stochastischen Petrinetze können auch mit Wächterfunktion, Priorität der Transition und Reward-Funktion verbinden. Diese Klasse der Petrinetze wird als stochastische Reward-Netze genannt. Durch die Erweiterung der verallgemeinerten stochastischen Petrinetze mit Farbe werden die sogenannten farbigen verallgemeinerten stochastischen Petrinetze definiert. Weiter kommen die sogenannten Warteschlangen-Petrinetze mit Warteschlange in den farbigen verallgemeinerten Petrinetze. Wegen der hierarchischen Spezifikation in den Warteschlangen-Petrinetzen wird eine neue Klasse der Petrinetze: die sogenannten hierarchischen Warteschlangen-Petrinetze definiert. Bei der stochastischen Schaltdauer wird die Transition eine kontinuierliche Zufallsvariable zugeordnet. Die Realisierungen dieser Zufallsvariablen geben die Zeit zwischen Aktivierung und Schaltung an [210]. Die naheliegendste Variante ist die Exponentialverteilung. Andere Verteilungen sind prinzipiell auch möglich. Stochastische Petrinetze können die Petrinetze mit stochastischen Prozessen assoziieren. Aufgrund der speicherlosen Eigenschaft der Exponentialverteilung der Schaltverzögerungen ist es leicht zu finden, dass SPN-Systeme isomorph zu Continuous-Time Markov Chains sind [169]. Im Besonderen wird ein Zustand in dem Markov-Prozess mit jeder Markierung in der SPN assoziiert. Außerdem wird ein Ereignis oder eine Transition in dem Markov-Prozess mit jeder Aktivierung einer Transition in der SPN assoziiert, die die entsprechende Änderung der Markierung verursacht. Obwohl SPN einen klaren und intuitiven Formalismus zur Erzeugung des Markov-Prozesses geben, haben sie den Nachteil, dass die Modelle, die auf dieser Weise konstruiert werden, sofort expandieren können.

Verallgemeinerte stochastische Petrinetze (engl. Generalized Stochastic Petri Net, GSPN) [169] respektieren Transitionen mit exponentialverteilter Schaltverzögerung τ (engl. timed transitions) und unmittelbare Transitionen (engl. immediate transitions), die ohne Schaltverzögerung schalten. Darüber hinaus werden Verbotskanten als negierte Lesekanten ebenso Gewichte und Prioritäten für fixe Transitionen eingeführt. **Die Verbotskante** [121] ist eine leistungsfähige Modellierungsfunktion und ist dafür bekannt, die Vollständigkeit der Berechnung zu bringen. **Unmittelbare Transitionen** [121] sind eine ganz besondere Art von deterministischen Transitionen mit Null-Schaltverzögerung. Zum Beispiel, die unmittelbaren

Transitionen werden sofort geschaltet, nachdem die aktiviert sind, und immer vor den (allgemeinen) deterministischen und stochastischen Transitionen geschaltet. Damit fallen für die unmittelbare Transition die Aktivierung und das Schalten zusammen. Eine Situation, in der mehr als eine unmittelbare Transition aktiviert sind, wird bei einer Simulation einer zufallsgesteuerten Auswahl getroffen. Allerdings wird ein Analyseansatz alle Wahlmöglichkeiten betrachtet. Die Grenze der GSPN auf exponentialverteilte Schaltverzögerungen der zeitbehafteten Transitionen ermöglicht nicht die Untersuchung von mechanischen oder natürlichen Systemen, die viele Male weibull-, normal- oder lognormalverteilte Leistungsparametern aufzeigen. Daher wurde das bestehende Programm der GSPN um den Aspekt beliebig verteilter, also gleichermaßen deterministischer, Schaltverzögerungen ergänzt. Diese Beschaffenheit wird als erweiterte stochastische Petrinetze bezeichnet (engl. Extended Stochastic Petri Net, ESPN). All jene Verbände von Petrinetzen verfügen über nicht unterscheidbare Marken. Beim Schaltvorgang einer Transition können deswegen etwa gleichermaßen übrige Marken gelöscht werden als die, die die Transition echt eingeschaltet haben. Die eigentliche Innovation der farbigen Petrinetze (engl. Coloured Petri Net, CPN) besteht darin, dass Marken jetzt Fakten beinhalten, die die Netzynamik beeinflussen können. Die in den Marken enthaltenen Fakten können unterdessen mithilfe der Kanten und Transitionen untereinander verknüpft, geändert und den beim Schaltvorgang neu erzeugten Marken aufgeprägt werden. Das erweiterte farbige stochastische Petrinetz (engl. Extended Coloured Stochastic Petri Net, ECSPN) basiert auf dem ESPN und dem CPN. Es kann im Gegensatz zum klassischen farbigen Petrinetz genauso kontinuierliche Zustandsgrößen aufzeigen. Die Farbe im ECSPN bezeichnet einen Datentyp, der von Seiten die Marke repräsentiert wird. Eine alleinige farbige Marke kann aus einer beliebigen diffizilen Gliederung aus mehrerlei Zahlenwerten, Buchstaben und Zeichenketten bestehen. Das ECSPN stellt hiermit Bestandteile, insbesondere für die Modellierung des Zustandsverhaltens mit Alterung, des Erneuerungsgrads, der Inspektionsstrategie und der operativen Unkosten von Systemen parat. **Deterministische und stochastische Petrinetze (DSPN)** erweitern die verallgemeinerten stochastischen Petrinetze (GSPN) mit deterministischen Transitionen [121]. **Deterministische Transitionen** (mit konstanter Schaltdauer) [121] besitzen eine deterministische Schaltverzögerung (Wartezeit), die durch einen nicht negativen reellen Wert spezifiziert. Wenn eine deterministische Transition aktiviert wird, wird ein Countdown-Timer gestartet, und der Countdown-Timer mit einer Schaltverzögerung der Transition initialisiert. Wenn die Transition deaktiviert wird, bevor der Timer Null erreicht, wird der Zeitmesser ausgeschaltet, und die Transition nicht geschaltet. Das Schalten selbst verbraucht keine Zeit. Wenn stochastische Petrinetze ohne deterministische Transitionen betrachtet werden, ist die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Schaltens von zwei Transitionen praktisch null. In den stochastischen Petrinetzen mit deterministischen Transitionen ist es möglich, dass zwei Transitionen gleichzeitig schalten können.

Im Bereich der Performance-Bewertung des Systems stellen die stochastischen Petrinetze ein leistungsfähiges Paradigma, um die Performance und Verfügbarkeit komplexer Systeme zu analysieren. Jedoch besitzen alle weit-verbreiteten SPN-Formalisten nur diskrete Zustände. Der Parameter Zeit, die kontinuierlich ist, ist kein Primärteil des Modells. Folglich wird ein neuer Petrinetztyp, die sogenannten **flüssigen stochastischen Petrinetze (FSPN)** [313], die

SPN mit flüssigen Stellen erweitern, um die kontinuierlichen Zustandsgrößen zusammen mit den diskreten Zustandsgrößen zu repräsentieren. FSPN wird erwartet, die Zustandsexplosion umgehen zu können, sowie leichter mit der großen Anzahl vom Auftreten der wahrscheinlichen Ereignisse in einer kurzen Zeitperiode zu behandeln. Es ist zu beachten, dass die Petrinetze mit kontinuierlichen Stellen wie kontinuierliche Petrinetze und hybride Petrinetze auch von anderen Autoren eingeführt, um die ähnlichen Probleme zu befassen wurden.

Stochastische Reward-Netze (SRN) [310] sind eine Erweiterung von GSPN. SRN erhöhen die Modellierungsleistung von GSPN beim Hinzufügen der Wächterfunktion, der Markierung von Kantenvielfalt, der allgemeinen Prioritäten der Transitionen und der Reward-Rate zur Netzebene. Wächterfunktion [310] ist eine boolesche Funktion, die einer Transition zugeordnet wird. Wenn die Transition alle Eingangs- und Inhibitor-Bedingungen in einer Markierung erfüllt hat, ist der Wächter bewertet. Die Transition wird als Aktivierung betrachtet, nur wenn die Wächterfunktion als wahr bewertet wird. Die Abhängigkeit der Markierung von Kantenvielfalt [310] erlaubt entweder die Anzahl von Marken, um die Aktivierung der Transition zu benötigen, oder die Anzahl von Marken, die von der Eingangsstelle entfernt werden, oder die Anzahl von Marken, die in einer Ausgangsstelle platziert werden, um aktuelle Markierung der Petrinetze haben zu können. Solche Kanten werden als variable Kardinalitätskanten genannt. Die Reward-Modelle erweitern ein Grundmodell um die sogenannte Reward-Funktion (Erlösfunktion), mit deren Hilfe die Zustände oder die Zustandsübergänge mit einem bestimmten Erlös verknüpft werden können. Das Markov-Reward-Modell (MRM) und das stochastische Reward-Netz (SRN) gehören zu dieser Kategorie.

Farbige Petrinetze (CPN) [142] ist ein High-Level-Petrinetz. Bei farbigen Petrinetzen sind die Marken nicht anonym schwarz, sondern unterschiedlich farbig. Die Marken können Informationen transportieren, bei denen es sich aber nicht unbedingt um Farben im wörtlichen Sinne handeln muss, sondern die zu einem frei definierbaren Datentyp zugehören können. Mit den unterscheidbaren Marken müssen sich die Kantengewichte bzw. Kantenbeschriftungen zwischen den Datentypen der Marken unterscheiden können. Die Beschriftung der Eingangskanten spezifiziert, wie viele Marken von welchen Datentypen für die Aktivierung der Transition benötigt werden. Schaltet eine Transition, wird ein Codesegment ausgeführt, das mit der Transition verbunden ist. Aus den Werten, die die Eingangsmarken tragen, und der Anzahl der Eingangsmarken werden die Werte für die Ausgangsmarken und deren Anzahl berechnet. Auf den Ausgangsstellen werden entsprechend der Kantenbeschriftung neue Marken erzeugt.

Farbige verallgemeinerte stochastische Petrinetze (CGSPN) [20] sind eine Erweiterung von farbigen stochastischen Petrinetzen mit unmittelbaren Transitionen. **Warteschlangen-Petrinetze (QPN)** kombinieren CGSPN mit Warteschlangen-Netzwerke durch versteckte Stationen an den besonderen Stellen von CGSPN, die die zeitbehafteten Warteschlangen-Stellen genannt werden. Aufgrund der exponentiell zunehmenden Größe vom Zustandsraum des Modells, wird eine neue Erweiterung von QPN, die sogenannten hierarchischen kombinierten Warteschlangen-Petrinetze (HCQPN), eingeführt, die die hierarchische Modellspezifikation erlauben und die hierarchische Struktur für eine effiziente numerische Analyse ausnutzen [160]. Eine Warteschlange ist eine kompakte Beschreibung eines

wahrscheinlichkeitstheoretischen Modells, in dem sich mehrere Nutzer gemeinsame Ressourcen teilen. Eine entscheidende Eigenschaft der Warteschlange ist die sogenannte „Warteschlangendisziplin“, nach der wartende Nutzer bedient werden. Mehrere Warteschlangen können zu einem Warteschlangensystem kombiniert werden.

Mit der Zeit in den farbigen Petrinetzen werden diese Petrinetze als zeitbehaftete farbige Petrinetze genannt. Die farbigen verallgemeinerten stochastischen Petrinetze können durch die Verbindung der farbigen Petrinetze mit Stochastik, Verbotskante und unmittelbarer Transition entwickelt. Weitere Petrinetze sind in den Literaturen [355] beschrieben und werden in dieser Arbeit nicht weiter erklärt.

3 Grundlagen

3.1 Begriffe in der Zuverlässigkeitstechnik

Qualität ist als Oberbegriff für alle zeitpunktbezogenen und zeitraumbezogenen erwünschten Merkmale der Beschaffenheit und Beständigkeit zu sehen [58]. Die **Qualität** gliedert sich nach dieser Abmachung in die zeitpunktbezogenen Merkmale, Güte genannt, und in die **zeitraum- bzw. ereignisbezogenen Merkmale, Zuverlässigkeit** genannt. Die Zuverlässigkeit hat einen engen Zusammenhang mit der Entwicklung der Industrie. Mit stetig zunehmender Produktkomplexität spielt die Zuverlässigkeit beim Design des Produkts und sogar Planung des Produktionsprozesses eine wichtige Rolle und muss berücksichtigt werden [26].

3.1.1 Definitionen

Funktion

Der Begriff „**Funktion**“ kann als eine genau festgelegte Klasse von Verhaltensformen einer Betrachtungseinheit gesehen werden [132]. Auf dem Gebiet der technischen Zuverlässigkeit wird die Funktion als die Erfüllung eines vorgegebenen Verwendungszweckes unter vorgegebenen Bedingungen für eine vorgesehene Zeit gesehen [57; 62]. Eine Funktion kann zumeist in ihrem Inhalt noch unterteilt werden; die kleinste hierbei mögliche Betrachtungseinheit wird Funktionselement genannt. Der Begriff Funktionsfähigkeit kann unter den Blickwinkeln Zeitpunkt oder Zeitraum gesehen werden. Das Funktionsverhalten kann zweckmäßig gegliedert werden in Funktion (Vollfunktion, Teilfunktion), Nichtfunktion, Fehlfunktion (Unterfunktion, Überfunktion) und Fehleinstellung [72].

Ausfall

Als **Ausfall** werde die unbeabsichtigte Unterbrechung der Funktionsfähigkeit einer Betrachtungseinheit bezeichnet. In der Zuverlässigkeitsanalyse benutzt man im Allgemeinen ein zweistufiges Modell, das nur die Zustände Funktion/Nichtfunktion enthält. Hiermit lässt sich eine Reihe stochastischer Zuverlässigkeitskenngrößen bilden [73; 197; 269].

Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit bedeutet die Fähigkeit oder Möglichkeit, dass eine Komponente, ein Produkt oder ein System bestimmte Funktionen unter bestimmten Bedingungen für einen bestimmten Zeitraum ohne Fehler ausführt. Bestimmte Bedingungen umfassen die Umgebungs- und Arbeitsbedingungen bei Verwendung. Bestimmter Zeitraum bezieht sich auf die Arbeitszeitdauer, mit der das Produkt verwendet wird. Mit zunehmender Arbeitszeitdauer steigt die Wahrscheinlichkeit eines Produktausfalls und die Zuverlässigkeit des Produkts

nimmt ab. Daher ist es untrennbar, von der angegebenen Arbeitszeitdauer über die Zuverlässigkeit eines Produkts anzusprechen. Bestimmte Funktionen betreffen die Funktionen und technischen Indikatoren, die das Produkt besitzen muss. Die Anzahl der erforderlichen Produktfunktionen und das Niveau der technischen Indikatoren wirken sich direkt auf das Niveau der Produktzuverlässigkeitsindikatoren aus.

Während des Konstruktions- und Applikationsprozesses wird das Produkt ständig von der eigenen und äußeren klimatischen sowie mechanischen Umgebung beeinflusst und muss dennoch normal funktionieren können. Die Zuverlässigkeit der Arbeit kann, wie im Bild 3.1 dargestellt, in inhärente Zuverlässigkeit und Zuverlässigkeit der Verwendung unterteilt werden. Die inhärente Zuverlässigkeit ist die Zuverlässigkeit, die beim Produktdesign und der Herstellung festgestellt werden muss. Das bedeutet auch die Zuverlässigkeit, die von der Auswahl der Rohstoffe und Komponenten über das Design, die Herstellung, das Testen bis hin zu den verschiedenen Stufen der Produktproduktion, basierend auf der Zuverlässigkeitsplanung, festgestellt wird. Die Zuverlässigkeit der Verwendung bezieht sich auf die Zuverlässigkeit der hergestellten Produkte, die von Faktoren wie Verpackung, Transport, Lagerung, Installation, Verwendung und Wartung beeinflusst wird.

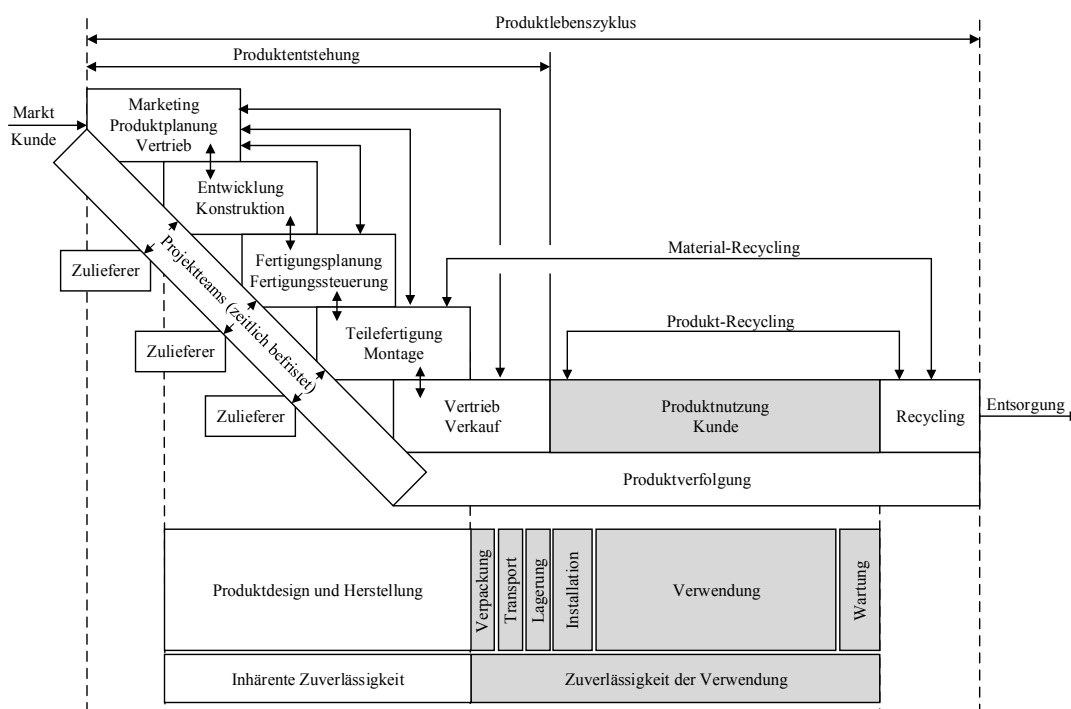


Bild 3.1: Produktlebenszyklus und Zuverlässigkeit in Anlehnung an [78]

Die Zuverlässigkeit umfasst drei wichtige Elemente: Haltbarkeit, Reparierbarkeit und Zuverlässigkeit des Designs. Die Eigenschaft vom Produkt, dass es problemlos benutzt werden kann, oder die Lebensdauer bedeutet die Haltbarkeit. Die Reparierbarkeit bedeutet, ob ein Produkt so früh und leicht wie möglich repariert werden kann, wenn es ausfällt. Viele Produkte legen großen Wert auf die Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit, sodass die Lebensdauer in der Regel durch tägliche Wartung verlängert wird. Die Reparierbarkeit des

Produkts hat viel mit der Struktur des Produkts zu tun, die mit der Zuverlässigkeit des Designs zusammenhängt. Zuverlässigkeit des Designs ist der Schlüssel zur Bestimmung der Produktqualität. Aufgrund der Komplexität des Mensch-Maschine-Systems sowie der möglichen Fehler in der Bedienung und der Betriebsumgebung besteht immer noch die Fehlermöglichkeit. Daher müssen die Benutzerfreundlichkeit und die Bedienfreundlichkeit beim Design betrachtet werden. Im Allgemeinen gilt es, dass je einfacher die Bedienung ist, desto unwahrscheinlicher es ist, Fehlfunktionen oder Sicherheitsprobleme durch menschliche Fehler oder andere Probleme zu verursachen. Auf der anderen Seite ist es sehr wichtig, erforderliche und präventive Maßnahmen zu ergreifen, falls eine Funktionsstörung oder ein Sicherheitsproblem auftritt.

3.1.2 Zuverlässigkeitskennwerte

Zuverlässigkeit ist ein wichtiger Qualitätsindikator. Um die Zuverlässigkeit quantitativ darzustellen, werden die folgenden Größen definiert.

Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist eine Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt unter festgelegten Bedingungen und innerhalb einer bestimmten Zeit seine angegebene Funktion verliert. Sie ist auch als Unzuverlässigkeit bezeichnet. Die Ausfallwahrscheinlichkeit im Zeitraum $[0, t_B)$ lässt sich durch Integral der Dichtefunktion berechnen:

$$F(t) = \int_0^{t_B} f(t) dt, \quad (3.1)$$

wobei $f(t)$ die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte ist, und t_B die Betrachtungszeit.

Zuverlässigkeit $R(t)$

Zuverlässigkeit $R(t)$ bezieht sich auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt eine bestimmte Funktion unter festgelegten Bedingungen und innerhalb einer bestimmten Zeit erfolgreich ausführt. Die Zuverlässigkeitsfunktion im Zeitraum $[0, t_B)$ lässt sich so berechnen:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^{t_B} f(t) dt. \quad (3.2)$$

Ausfallrate

Die Ausfallrate λ beschreibt das Risiko eines Teiles auszufallen, wenn es bis zu diesem Zeitpunkt überlebt hat. Sie wird zur Beschreibung des Ausfallverhaltens verwendet. Die Ausfallrate gibt die zeitliche Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeit für die jeweilige Betriebszeit an. Mithilfe der Ausfallratenkennlinie können die charakteristischen Phasen der Lebensdauer eines Bauteils beschrieben werden. Die Ausfallrate $\lambda(t)$ lässt sich durch die Ausfälle zu einer Zeit t und die Summe der noch intakten Einheiten zu der Zeit t berechnen:

$$\lambda(t) = \frac{\text{Ausfälle zum Zeitpunkt } t}{\text{Summe der noch intakten Einheit zum Zeitpunkt } t} \quad (3.3)$$

Da die Dichtefunktion $f(t)$ die Anzahl der Ausfälle und die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ die Summe der intakten Einheiten beschreibt, deshalb kann die Ausfallrate $\lambda(t)$ als Quotient dieser beiden Funktionen ermittelt werden:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.4)$$

3.1.3 Badewannenkurve

Die typische Ausfallratenkurve ist die Badewannenkurve, die in drei Bereiche unterteilt ist: Frühausfälle, Zufallsausfälle und Verschleiß- und Ermüdungsausfälle, siehe Bild 3.2 [24].

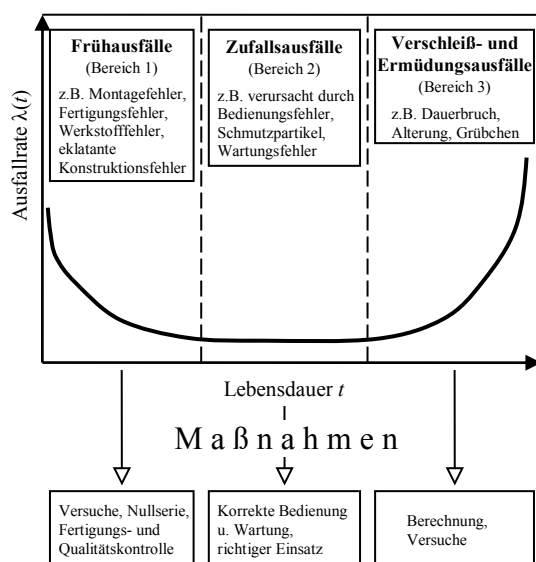


Bild 3.2: Die „Badewannenkurve“ [24]

Die Ausfallrate der Frühausfallphase ist in abnehmender Form, d. h. die Ausfallrate des neuen Produkts ist hoch, aber sie wird nach der Einlaufphase schnell sinken. Ursachen zu frühen Ausfällen sind überwiegend die Fehler durch Montage, Fertigung, Werkstoff oder Konstruktion. Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sind Versuche und eine umfangreiche Nullserie, sorgfältige Kontrolle der Fertigung und der Qualität. Die Ausfallrate der Zufallsausfälle ist ungefähr ein stabiler Wert, d. h. das Produkt hat eine stabile Nutzungsphase erreicht. Auslöse zu zufälligen Ausfällen sind die Bedienungs- oder Wartungsfehler oder Schmutzpartikel. Maßnahmen wie korrekte Bedienung und Wartung und Sicherstellung des richtigen Einsatzes des können die Zuverlässigkeit erhöhen. Die Ausfallrate der Verschleiß- und Ermüdungsausfälle liegt in einer inkrementellen Form vor,

d.h. das Produkt wird in ein hohes Alter versetzt, die Ausfallrate nimmt zu. Ursachen für die Verschleiß- und Ermüdungsausfälle sind Dauerbruch, Alterung, Grübchen etc. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit erfordert es, eine sehr genaue Berechnung der Bauteile bzw. entsprechend praxisnahe Versuche durchzuführen.

3.1.4 Zuverlässigkeit und Kosten

Eine hohe Zuverlässigkeit erfordert einen aufwendig Entwicklungskosten, während eine geringe Zuverlässigkeit zu einer hohen Ausfallwahrscheinlichkeit führen kann. Die Gesamtkosten lassen sich in Testkosten sowie Garantie- und Kulanzkosten aufteilen. Die Testkosten gehören zu den sogenannten Qualitätskosten des zu prüfenden Produkts. Garantie- und Kulanzkosten sind Kosten aus Ersatzlieferungen, Preisnachlässen, Nachbesserungen und Vertragsstrafen. Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit und den Kosten ist in Bild 3.3 dargestellt.

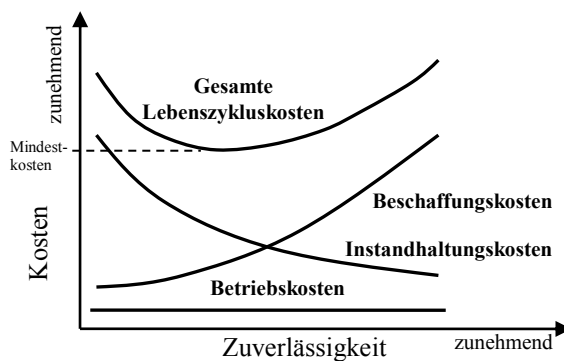


Bild 3.3: Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Kosten

3.2 Grundbegriffe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie

Exponentialverteilung

Mit der vom Anfangswert monoton abnehmenden Dichtefunktion kann die Exponentialverteilung das Ausfallverhalten beschreiben, bei dem die Ausfallhäufigkeit am Anfang sehr hoch ist und dann kontinuierlich abnimmt. Die Exponentialverteilung lässt sich berechnen durch:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad (3.5)$$

wobei λ die Lage- und Formparameter ist.

Weibullverteilung

Die Weibullverteilung kann unterschiedliches Ausfallverhalten sehr gut beschreiben [24]. Die Form der Dichtefunktion verändert sich in abhängig von dem Formparameter b deutlich. Der Formparameter b ist ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten. Bei kleinen b -Werte ($b < 1$) sind die Ausfälle ähnlich wie bei der Exponentialverteilung. Die Ausfallhäufigkeit ist am Anfang sehr hoch, nimmt nach der Zeit kontinuierlich ab. Beim Formparameter $b = 1$ ergibt sich exakt die Exponentialverteilung. Wenn der Formparameter $b > 1$ ist, beginnt die Dichtefunktion stets bei $f(t) = 0$. Die Ausfallhäufigkeit erreicht mit zunehmender Lebensdauer ein Maximum und fällt schließlich flach ab. Mit größer werdende b -Werte verschiebt sich das Maximum der Dichtefunktion immer mehr nach rechts. Die Dichtefunktion mit $b = 3,5$ ist näherungsweise wie eine Normalverteilung. Die Weibullverteilung lässt sich in eine zweiparametrische und eine dreiparametrische Verteilung untergliedern.

Die Dichtefunktion der zweiparametrischen Weibullverteilung lässt sich beschrieben durch:

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}, \quad (3.6)$$

wobei T der Lageparameter ist und die charakteristische Lebensdauer beschreibt. Vom Parameter T ist ca. die Mitte der Verteilung zu erkennen.

Die dreiparametrische Weibullverteilung hat neben den Parametern T und b den Parameter t_0 , der die ausfallfreie Zeit beschreibt. Somit können die zum Zeitpunkt t_0 beginnenden Ausfälle beschrieben werden. Der Parameter t_0 beschreibt eine Verschiebung der Kurve von Dichtefunktion entlang der Zeitachse. Die Dichtefunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung ist beschrieben durch:

$$f(t) = \frac{b}{T - t_0} \cdot \left(\frac{t - t_0}{T - t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t - t_0}{T - t_0}\right)^b}. \quad (3.7)$$

3.3 Grundlage in der Verfügbarkeitsanalyse

3.3.1 Definition der Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit (engl.: availability) ist im Allgemeinen „Grad, in dem etwas verfügbar ist“ [67] zu verstehen. Unter dieser Bedeutung wurden zur Lösung des Ressourcenverteilungsproblems die Ressourcenverfügbarkeit, besonders die Verfügbarkeit von Energierohstoffen in der Natur (z.B.: Erdöl, Erdgas, Kohle, Holz und Schwermetalle u.a.), untersucht [12; 17; 46; 50; 145; 158; 216; 219; 230; 293]. Diese Studien fokussierten sich auf den natürlichen Energievorrat und die potenzielle Nutzungsdauer der Ressourcen. Sie gehören zum Bereich der organisatorischen Verfügbarkeit.

Das Deutsche Institut für Normung DIN 40041 definiert die Verfügbarkeit als „die Wahrscheinlichkeit (nach DIN 31051 und DIN EN 13306: die Fähigkeit) einer Einheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt der geforderten Anwendungsdauer in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen erfüllen kann“ [57; 61; 63]. Ähnliche Definition der Verfügbarkeit findet man im VDI 4001-2 als „die Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit zu einem gegebenen Zeitpunkt bzw. über eine definierte Zeitspanne die geforderte Funktion unter den gegebenen Arbeitsbedingungen störungsfrei ausführt“ [319]. DIN EN 50126 definiert die Verfügbarkeit als „Die Fähigkeit eines Produktes, in einem Zustand zu sein, in dem es unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne eine geforderte Funktion erfüllen kann unter der Voraussetzung, dass die geforderten äußeren Hilfsmittel bereitstehen“ [64]. In der Zuverlässigkeitstechnik wird die Verfügbarkeit definiert als [24]: die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein System zum Zeitpunkt t oder während einer definierten Zeitspanne in einem funktionsfähigen Zustand befindet, wenn es vorschriftsmäßig betrieben und instandgehalten wurde. Zusammengefasst handelt sich die technische Verfügbarkeit um die Zuverlässigkeit einer Betrachtungseinheit und die Instandhaltung.

3.3.2 Zuordnung der Zeit und ihre Definitionen

Folgendes Bild 3.4 zeigt eine grafische Darstellung der Zeiten und ihrer Zuordnungen, die innerhalb eines Betrachtungszeitraumes an einem Bearbeitungssystem zu erfassen sind.

Betrachtungszeitraum (z.B. gesamtes Jahr, Monat, Schicht, Garantiezeit)				
Belegungszeit T_B (geplante Maschinenbelegung, z.B. entsprechend Produktionsplan)			nicht belegte Zeit (z.B. durch fehlende Auslastung)	nicht geplante Zeit (z.B. Sonn- und Feiertage)
Nutzungszeit T_N	Organisatorische Ausfallzeit T_O	Technische Ausfallzeit T_T	Wartungszeit T_W (kann sich u.U. in die nicht belegte Zeit ausdehnen)	
<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content;"> Testzeit T_C </div>				

Bild 3.4: Grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Zeiten [317]

Die Belegungszeit T_B ist der Zeitanteil innerhalb des Betrachtungszeitraums, für den eine Nutzung der Maschine/Anlage geplant ist [317]. Sie bildet die Bezugsgröße für alle Kennzahlen im Bild 3.4 und kann so berechnet werden:

$$T_B = T_N + T_O + T_T + T_W. \quad (3.8)$$

Während der Nutzungszeit T_N produziert die Maschine mit vollem Leistungsvermögen.

Organisatorische Ausfallzeit T_O

Die organisatorische Ausfallzeit T_O [317] ist die Summe aller Ausfallzeiten, die ihre Ursache in einem organisatorischen Mangel haben oder der Vorbereitung von Produktionsvorgängen dienen. Zu der Zeit T_O kann die Zeit für das Rüsten der Maschine/Anlage und das Wechseln von Betriebsmitteln T_R zuzurechnen, wenn das Rüsten bzw. das Wechseln von Betriebsmitteln, z.B. Paletten, nicht während der Nutzungszeit T_N geschieht. Zusätzlich kann die Ausfallzeit wegen kurzzeitig fehlender Aufträge T_A dazu kommen.

Technische Ausfallzeit T_T

Die technische Ausfallzeit T_T [317] beschreibt die Summe aller Ausfallzeiten, die ihrer Ursache nach dem Hersteller des Bearbeitungssystems zuzurechnen sind, das heißt ursächlich für Ausfall sind Mängel in der Konzeption oder Ausführung (z.B. Warten auf Ersatzteile, Mängel in der Dokumentation, Materialfehler). Beide Zeiteile lassen sich noch detaillierter erfassen und in einzelne Zeiten aufteilen.

Wartungszeit T_W

Unter die Wartungszeit T_W [317] fallen die nach Wartungsplan vorgesehenen Arbeiten, wie geplante Instandhaltung (Wartung und Inspektionen), Maschinenreinigung und -pflege sowie Probeläufe, die nach der Wartung nötig sind. Die geplanten Instandsetzungszeiten sind nicht T_W zuzuordnen. Die vom Hersteller der Maschine/Anlage empfohlene Wartungszeit sollte bei Vertragsverhandlungen in ihrem Verhältnis zur Belegungszeit definiert und dokumentiert werden.

Verfügbarkeitszeit

Die Verfügbarkeitszeit ist die Zeitspanne, in der eine Anlage Energie umwandelt oder überträgt bzw. umwandeln oder übertragen könnte, unabhängig von der Höhe der erreichbaren Leistung. Sie ist die Differenz aus Nennzeit und Nichtverfügbarkeitszeit.

Nichtverfügbarkeitszeit

Die Nichtverfügbarkeitszeit ist die Zeitspanne, in der eine Anlage oder ein Anlagenteil aufgrund des technischen Zustands der Anlage oder des Anlagenteils nicht betrieben werden kann, aus Gründen, die innerhalb der Anlage liegen oder durch die Betriebsführung nicht beeinflusst werden können.

Zeitverfügbarkeit

Die Zeitverfügbarkeit ist der Quotient aus der Verfügbarkeitszeit einer Anlage und der Nennzeit.

Zeit-Ausfallrate

Die Zeit-Ausfallrate ist der Quotient aus der ungeplanten Nichtverfügbarkeitszeit einer Anlage und der Summe aus Betriebszeit und ungeplanter Nichtverfügbarkeitszeit.

Arbeitsverfügbarkeit

Die Arbeitsverfügbarkeit ist der Quotient aus der verfügbaren Arbeit einer Anlage und der Nennarbeit.

Vergleich der organisatorischen und technischen Ausfallzeit

In der VDI-Richtlinie 3423 wird angeführt, dass sowohl technische als auch organisatorische Ursachen zu Ausfallzeiten führen können. Daher ist es zwischen technischer Ausfallzeit T_T und organisatorischer Ausfallzeit T_O , wie Tabelle 3.1 in dargestellt, sowie entsprechend zwischen technischer und organisatorischer Verfügbarkeit zu unterscheiden [317].

Tabelle 3.1: Vergleich der organisatorischen und technischen Ausfallzeit [317]

	Organisatorische Ausfallzeit T_O	Technische Ausfallzeit T_T
Verantwortung	Anwenderverantwortung	Herstellerverantwortung
Mängel	Fehlen von Energie Fehlen von Werkstücken Fehlen von Werkzeugen Mangelnde Schulung Programmierfehler Bedienungsfehler Mangelnde Handhabung Mangelnde Wartung verzögerte Meldung von Fehlern und Unregelmäßigkeiten	Materialfehler Mängel in der Dokumentation Mängel in Konzeption oder Ausführung
Entstehende Ausfallzeit	Instandsetzung (Störungsbeseitigung)	
	Warten auf Ersatzteile	
	Warten auf Kundendienstpersonal	
	Probelauf zur Fehlerfindung	
	Probelauf nach Störungsbeseitigung	

Die Verantwortung der organisatorischen Ausfallzeit liegt bei Anwender. Mängel können z.B. sein: Fehlen von Energie, Fehlen von Werkstücken, Fehlen von Werkzeugen, mangelnde Schulung. Hierunter fallen auch Ausfallzeiten, die ihre Ursache in einem Mangel der Anlagenbedienung oder der Sicherung des Prozessablaufs haben. Dies können z.B. sein: mangelnde Handhabung, mangelnde Wartung, Programmierfehler, Bedienungsfehler, verzögerte Meldung von Fehlern und Unregelmäßigkeiten, Warten auf vorher vereinbarte

Verschleißteile und alle daraus entstehenden Ausfallzeiten für Instandsetzung (Störungsbeseitigung), Warten auf Ersatzteile, Warten auf Kundendienstpersonal, Probelauf zur Fehlerfindung, Probelauf nach Störungsbeseitigung. Die technische Ausfallzeit gehört zur Verantwortung des Herstellers. Mängel können z.B. sein: Materialfehler, Mängel in der Konzeption oder Ausführung, Mängel in der Dokumentation und alle daraus entstehenden Ausfallzeiten für Instandsetzung (Störungsbeseitigung), Warten auf Ersatzteile, Warten auf Kundendienstpersonal, Probelauf zur Fehlerfindung, Probelauf nach Störungsbeseitigung. Diese Ausfallzeiten sind Basis für Vereinbarungen zwischen Anwender und Hersteller über technische Nutzungsgrade bzw. die Verfügbarkeit von Anlagen.

3.3.3 Kennzahlen in der Verfügbarkeitsanalyse

Durchschnittliche Lebensdauer μ

Bezüglich durchschnittlicher Lebensdauer gibt es unterschiedliche Bedeutungen für Produkte, die nicht repariert werden können und die doch repariert werden können. Bei nicht reparierbaren Produkten bezieht sich die Lebensdauer auf die Arbeitszeit, bevor das Produkt ausfällt. Sie wird üblicherweise als MTTF (Mean Time to Failure) bezeichnet. Bei einem reparierbaren Produkt bezieht sich die Lebensdauer auf die Arbeitszeit zwischen zwei benachbarten Fehlern und nicht auf die Zeitdauer, bis das Produkt komplett ausfällt. Daher bezieht sich die durchschnittliche Lebensdauer für solche Produkte auf die durchschnittliche Zeit ohne Ausfall oder die Zwischenzeit zwischen Ausfällen, die als MTBF (Mean Time between Failures) erfasst wird. Die mathematischen Darstellungen sind identisch:

$$\mu = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t \quad (3.9)$$

Falls die Ausfalldichtefunktion $f(t)$ bekannt und kontinuierlich verteilt ist, kann die durchschnittliche Lebensdauer μ auch so berechnet werden:

$$\mu = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.10)$$

Ausfallrate

Die organisatorische Ausfallrate A_O gibt den Anteil der Ausfallzeit infolge organisatorischer Mängel (T_O) an und bezieht sich auf die Belegungszeit T_B [317]:

$$A_O = \frac{T_O}{T_B} \cdot 100\% . \quad (3.11)$$

Die technische Ausfallrate A_T gibt den Anteil der Ausfallzeit infolge technischer Mängel (T_T) an und bezieht sich auf die Belegungszeit T_B [317]:

$$A_T = \frac{T_T}{T_B} \cdot 100\% . \quad (3.12)$$

Die wartungsbedingte Ausfallrate A_W gibt den Anteil der Zeit an, die durch geplante Wartungsmaßnahmen (T_W) die Belegungszeit reduziert [317]:

$$A_W = \frac{T_W}{T_B} \cdot 100\% . \quad (3.13)$$

Die Summierung der Nutzungs- bzw. Ausfallgrade muss 100% ergeben.

Gesamtnutzungsgrad

Der Gesamtnutzungsgrad N_G gibt das Verhältnis von Nutzungszeit zu Belegungszeit an. Er ist ein Maß für die Effektivität der Nutzung [317]:

$$N_G = \frac{T_N}{T_B} = \frac{T_B - T_O - T_T - T_W}{T_B} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{T_O + T_T + T_W}{T_B}\right) \cdot 100\% . \quad (3.14)$$

Technische Verfügbarkeit

Die Technische Verfügbarkeit A_T gibt den prozentualen Anteil der Belegungszeit an, für den die Maschine/Anlage ohne technischen Mangel der Produktion zur Verfügung steht [317]. Sie ist identisch mit Technischer Nutzungsgrad N_T .

$$A_T = N_T = 100\% - \frac{T_T}{T_B} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{T_T}{T_B}\right) \cdot 100\% . \quad (3.15)$$

Kennzahlen in der Verfügbarkeitsanalyse von Fertigungssystemen

Ein Fertigungssystem besteht aus mehreren Produktionseinheiten (Arbeitsstationen), die lose oder starr miteinander verbunden sind. Ausfälle können entstehen durch Störungen in den einzelnen Systemkomponenten, das heißt in den Arbeitsstationen, dem Werkstückfluss, dem Werkzeugfluss und dem Informationsfluss [317]. In einem Fertigungssystem sind die Störungen aller darin eingeschlossenen Komponenten in ihren Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu beurteilen.

Zur Kennzeichnung, dass es sich um ein Fertigungssystem handelt, werden die Indizes durch den Buchstaben „S“ (System) ergänzt. In einem Fertigungssystem setzen sich die Belegungszeit T_{BS} , die Nutzungszeit T_{NS} , die organisatorische Ausfallzeit T_{OS} , die technische Ausfallzeit T_{TS} , die Wartungszeit T_{WS} , und die Folgeausfallzeit T_{FS} aus der Summer der Zeiten der dem Arbeitsfortschritt dienenden Arbeitsstationen zusammen [317]. Die

Ausfallzeiten verbundener Komponente werden berücksichtigt, soweit sie einen Einfluss auf den Arbeitsfortschritt haben.

Belegungszeit T_{BS}

Die Belegungszeit eines Systems setzt sich aus der Summe der Belegungszeiten innerhalb des Betrachtungszeitraums für alle beteiligten (das heißt dem Arbeitsfortschritt dienenden) Arbeitsstationen zusammen. Sie lässt sich so berechnen:

$$\begin{aligned} T_{BS} &= \sum T_B = \sum (T_N + T_O + T_T + T_W + T_{FS}) \\ &= \sum (T_N + T_O + T_{FO} + T_T + T_{FT} + T_W + T_{FW}), \end{aligned} \quad (3.16)$$

wobei ist: T_{FS} Folgeausfallzeit (Secondary downtime), T_{FO} Organisatorisch bedingte Folgeausfallzeit, T_{FT} Technisch bedingte Folgeausfallzeit, und T_{FW} Wartungsbedingte Folgeausfallzeit.

Die **Folgeausfallzeit** T_{FS} ist die Summe der Ausfallzeiten, die in den Arbeitsstationen als Folge von organisatorischem, technischem oder wartungsbedingtem Ausfall verbundener Komponenten wirksam entstehen [317].

$$T_{FS} = \sum (T_{FO} + T_{FT} + T_{FW}). \quad (3.17)$$

Organisatorische Ausfallzeit T_{OS}

$$T_{OS} = \sum T_O + \sum T_{FO}. \quad (3.18)$$

Technische Ausfallzeit T_{TS}

$$T_{TS} = \sum T_T + \sum T_{FT}. \quad (3.19)$$

Wartungszeit T_{WS}

$$T_{WS} = \sum T_W + \sum T_{FW}. \quad (3.20)$$

Nutzungszeit T_{NS}

$$T_{NS} = \sum T_N = \sum [T_B - (T_O + T_{FO} + T_T + T_{FT} + T_W + T_{FW})]. \quad (3.21)$$

Folgeausfallrate A_{FS} : Die Folgeausfallrate gibt den Anteil der Ausfallzeit aufgrund von Folgestörungen T_{FS} an und bezieht sich auf die Belegungszeit T_{BS} [317]:

$$A_{\text{FS}} = \frac{T_{\text{FS}}}{T_{\text{BS}}} \cdot 100\% . \quad (3.22)$$

3.3.4 Berechnung der Systemverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit A und die Nicht-Verfügbarkeit N für Systeme können gleich wie die Zuverlässigkeit derartiger Systeme berechnet werden. Sowohl für einzelne Komponente als auch für ein System gilt für jeden Zeitpunkt der Zusammenhang $A + N = 1$ und ebenso $A(t) + N(t) = 1$.

Systemverfügbarkeit serieller Schaltung

Bei System mit serieller Schaltung, siehe Bild 3.5, müssen alle Komponenten gleichzeitig verfügbar sein. Der Ausfall einer Komponente verursacht den Ausfall des gesamten Systems. Das System ist nur verfügbar, wenn alle Komponenten gleichzeitig verfügbar sind. Wenn mindestens eine der Komponenten im System nicht verfügbar ist, ist das System dann nicht verfügbar.

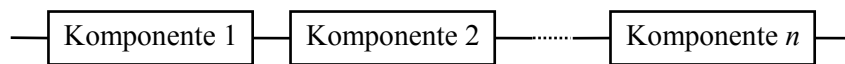


Bild 3.5: System mit serieller Schaltung

Die Systemverfügbarkeit der seriellen Schaltung A_S lässt sich berechnen:

$$A_S = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n = (1 - N_1) \cdot (1 - N_2) \cdot \dots \cdot (1 - N_n) = \prod_{i=1}^n (1 - N_i) , \quad (3.23)$$

wobei A_i die Verfügbarkeit der i -ten Komponente ist, und N_i die Nicht-Verfügbarkeit der i -ten Komponente.

Für die Berechnung der Nicht-Verfügbarkeit des Systems gilt:

$$N_S = 1 - A_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - N_i) . \quad (3.24)$$

Systemverfügbarkeit paralleler Schaltung

Bei paralleler Schaltung, siehe Bild 3.6, ist das System nur dann nicht verfügbar, wenn alle Komponenten gleichzeitig nicht verfügbar sind.

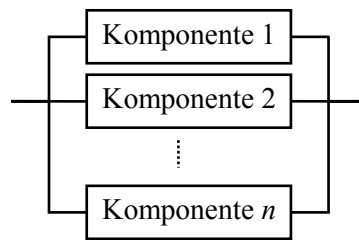


Bild 3.6: System mit paralleler Schaltung

Die Nicht-Verfügbarkeit des Systems ist das Produkt der Nichtverfügbarkeit der einzelnen Komponenten:

$$N_S = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_n = \prod_{i=1}^n N_i. \quad (3.25)$$

Somit lässt sich die Systemverfügbarkeit berechnen:

$$A_S = 1 - N_S = 1 - N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_n = 1 - \prod_{i=1}^n N_i. \quad (3.26)$$

Systemverfügbarkeit gemischter Schaltung

Mit der Verfügbarkeitsberechnung von System mit serieller und paralleler Schaltung kann die Verfügbarkeit von komplexem System mit gemischter Schaltung, siehe Bild 3.7, berechnet werden. Die Verfügbarkeit bzw. Nicht-Verfügbarkeit lässt sich schrittweise aus den Werten der elementaren Schaltungen herleiten.

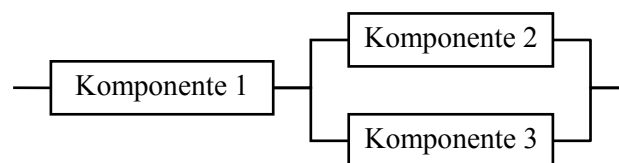


Bild 3.7: System mit gemischter Schaltung

Für die Berechnung der Systemverfügbarkeit wird die Schaltung schrittweise in einfach zu berechnende Einheiten zerlegt. Zuerst wird die Verfügbarkeit A_{23} der Parallelschaltung von Komponente 2 und Komponente 3 (Baugruppe B_{23}) aus der Nicht-Verfügbarkeit N_{23} berechnet:

$$A_{23} = 1 - N_{23} = 1 - (1 - A_2) \cdot (1 - A_3). \quad (3.27)$$

Dann lässt sich die Systemverfügbarkeit durch serielle Schaltung von Komponente 1 und Baugruppe B_{23} berechnen:

$$\begin{aligned} A_S &= A_1 \cdot A_{23} = A_1 \cdot (1 - (1 - A_2) \cdot (1 - A_3)) \\ &= A_1 \cdot A_2 + A_1 \cdot A_3 - A_1 \cdot A_2 \cdot A_3. \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.4 Begriffe in Industrie 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“ bezeichnet die vierte industrielle Revolution. Sie wurde zum ersten Mal von *Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas* und *Wolfgang Wahlster* geprägt und auf der Hannover-Messe 2011 in die Öffentlichkeit gekommen [146]. Eine Definition der Industrie 4.0 lautet: „Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt in der Hightech-Strategie der Bundesregierung, mit dem die Informatisierung der klassischen Industrie, wie z.B. der Produktionstechnik, vorangetrieben werden soll. Das Ziel ist die intelligente Fabrik (Smart Factory), die sich durch Wandlungsfähigkeit, Ressourceneffizienz und Ergonomie sowie die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse auszeichnet. Technologische Grundlage sind Cyber-physische Systeme und das Internet der Dinge.“ [347].

Laut der Plattform Industrie 4.0 [233] zeichnet sich Industrie 4.0 durch die Verzahnung der Produktion mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik aus. Die Treibkraft der industriellen Revolution ist die rasant zunehmende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. Die technische Grundlage sind intelligente, digital vernetzte Systeme, mit deren Hilfe eine weitestgehende selbstorganisierende Produktion realisiert werden soll [234]. Es ist darauf gezielt, dass Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte miteinander kommunizieren und kooperieren können. Somit können Unternehmen leichter Produkte nach individuellen Kundenwünschen herstellen. Ein weiterer Vorteil ist die Verfügbarkeit der aktuellen Informationen in Echtzeit. Dadurch kann die Wertschöpfungskette optimiert werden, was zu einer effizienteren Produktion führt [234]. Industrie 4.0 soll dazu beitragen, Prozesse ressourceneffizient zu optimieren, die Arbeitsbedingungen für die Menschen zu verbessern und preiswert individualisierte Produkte herzustellen [215].

Für die Unternehmen oder Hersteller bedeutet die Industrie 4.0, eine Smart Factory zu etablieren. Der Kern der Smart Factory ist CPPS (Cyber-Physical-Produktion-Systems) [257]. Wenn das CPS in der Produktion verwendet wird, entsteht das CPPS. In der Industrie 4.0 werden alle Maschinen in einem Netz stehen, somit können alle Maschinen miteinander kommunizieren. Mit den Unterstützungen von M2M (Machine to Machine), HMI (Human Machine Interface) und CPS kann das CPPS erreicht werden. Das folgende Bild 3.8 zeigt ein Modell der vernetzten Industrie 4.0. In der Industrie 4.0 sind alle Teilnehmer: Smart Factory,

Smart Logistics, Smart Buildings, Smart Product, Smart Grids und Smart Mobility miteinander verbunden.

Smart System: Mit dem zunehmenden Einsatz des Internets der Dinge und Dienste in der Produktion werden sich in Kombination von Smart Production, Smart Logistic, Smart Grids und Smart Products die Wertschöpfungsketten verändern und neue Geschäftsmodelle etablieren.

Internet der Dinge und Dienste [96]: Unter dem Begriff „Internet der Dinge“ (Internet of Things, IoT) ist die Verknüpfung physischer Objekte (Dinge) mit einer virtuellen Repräsentation im Internet oder einer internetähnlichen Struktur zu verstehen [5 S. 85]. Das Internet der Dienste (Internet of Services) ist als ein Teil des Internets, der Dienste und Funktionalitäten und als granulare, web-basierte Software-Komponenten abbildet [5 S. 85]. Durch Internet der Dienste ist es möglich, die einzelnen Software-Bausteine und Dienstleistungen miteinander zu integrieren. Über cloud-basierte Entwicklungsplattformen können viele internetfähige Dienstleistungen entwickelt und angeboten werden. Durch das Internet der Dinge und Dienste ist es möglich, die Fabrik mit ihrem gesamten Produktionsumfeld intelligent miteinander zu vernetzen. Internet of Things ist der Kern vom CPS, während das CPS die Grundlage der Industrie 4.0 darstellt. Das Ziel von IoT liegt darin, alle Ressourcen miteinander zu verbinden. Ein direkter Zweck davon ist die Steigerung der Effizienz und die Einsparung von Ressourcen. Mit IoT hat das CPS eine wichtige Basis für eine noch intelligentere Produktionsweise geschaffen.

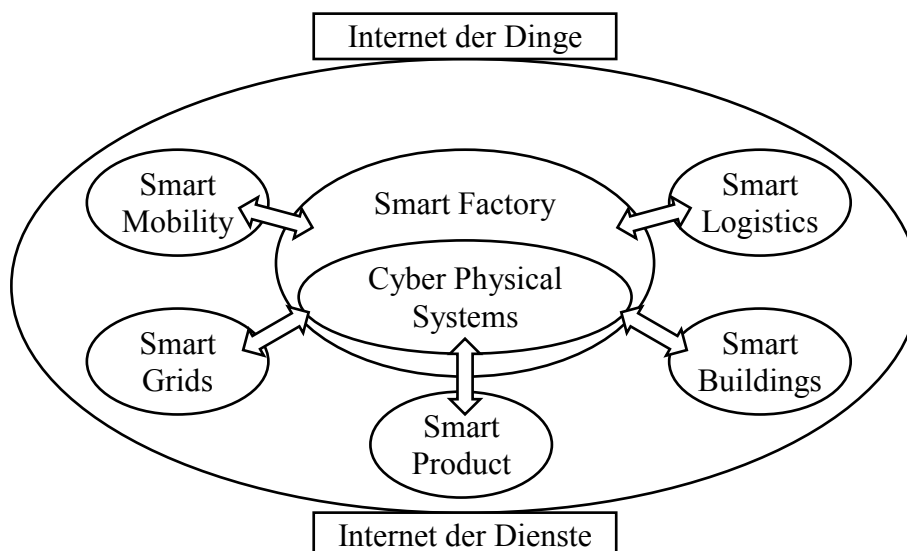


Bild 3.8: Modell der Industrie 4.0 (Quelle: in Anlehnung von [5 S. 23])

Cyber-physisches System: Unter Cyber-physisches System (CPS) ist die Verschmelzung der physikalischen Welt und der virtuellen Welt zu verstehen [5 S. 17]. CPS verbindet die virtuelle Welt und die reale physikalische Welt, sodass die physikalischen Einheiten miteinander kommunizieren können und der physikalische Gegenstand mit der virtuellen Welt interagieren kann [257]. Die Integration von Internet und physikalischer Welt ist der Kern der Industrie 4.0. CPS besteht aus drei Komponenten: physikalischen Komponenten,

intelligenten Komponenten, Netzwerk-Komponenten. Das System ist eine Kombination aus mechanischen, elektronischen und digitalen Komponenten, die über das Internet kommunizieren können [215]. Das Zusammenspiel von Elektronik, Software-Engineering, Netzwerke und Mechatronik definiert die Merkmale der CPS [94]. CPS implementiert die Interaktion und die physikalischen Prozesse durch Mensch-Maschine-Schnittstellen [131].

Intelligente Produkte: Als die Produkte für die Zukunft haben die intelligenten Produkte (IP) viele eigene Eigenschaften. Nach [198] können die intelligenten Produkte grundsätzlich wie unten charakterisiert werden:

- a. Das Produkt besitzt eine eindeutige Identifikation.
- b. Das Produkt ist in der Lage, mit der Umgebung zu kommunizieren.
- c. Das Produkt kann Daten über sich selbst speichern.
- d. Das Produkt setzt eine Sprache, um seine Funktionen, Anforderungen und Pläne zu teilen.

Das Produkt ist in der Lage, an relevanten Entscheidungsprozessen, welche sein eigenes Schicksal betreffen, teilzunehmen. Laut *Meyer et al.* (2009) [198] können die IP auch in drei Stufen geordnet werden:

1. Passiv: Das bedeutet, kooperative Objekte können Informationen nur sammeln und speichern.
2. Aktiv: Kooperative Objekte können Informationen sammeln, speichern, verarbeiten diese Informationen (auch um neues Wissen zu generieren) und rufen dieses Wissen bei Bedarf ab.
3. Intelligenter: Kooperative Objekte können vernünftig mit gesammelten und gespeicherten Daten umgehen und nehmen an Entscheidungsprozessen teil [170].

Die allgemeine Beschreibung kann so vereinfacht werden: Produktintelligenz ist ein neues industrielles Fertigungssteuerungsparadigma mit dem Kontext der Cyber-physikalischen Systemen und bietet Vorteile in Bezug auf Produktionseffizienz, Energieeffizienz, Produktqualität und Produktpassung, indem sie eine neue Art von Dienstleistungen, beispielsweise die Online-Überwachung, die Rückverfolgbarkeit, die Selbstdiagnose, Selbsterhaltung und die Fernwartung, mit dem Ziel die Kundenzufriedenheit, anbietet [170].

3.5 Petrinetze

Ein Petrinetz besteht in seiner Grundstruktur aus Stellen und Transitionen, welche über gerichtete Verbindungen in Beschaffenheit von Kanten angeschlossen sind. Die Stellen können etliche Marken enthalten, die den Zustand der Lokalität repräsentieren.

Definition

Die Petrinetze werden durch gerichtete, bipartite Netzgraphen repräsentiert. Ein Petrinetz ist formal als 5-Tupel $PN = \{P, T, J, U, M_0\}$ definiert [336]:

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$: eine finite Menge der Stellen;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_3\}$: eine finite Menge der Transitionen;

- J : eine Eingangsfunktion, die als gerichtete Kante von Stelle zu Transition definiert;
- U : eine Ausgangsfunktion, die als gerichtete Kante von Transition zu Stelle definiert;
- M_0 : die Anfangsmarkierung.

Elemente eines Petrinetzes

Alle Petrinetze besitzen vier Grundelemente: Stellen, Transitionen, Kanten und Marken [336]. Bild 2.1 stellt die Stelle, Transition, Marke und Kante grafisch dar.

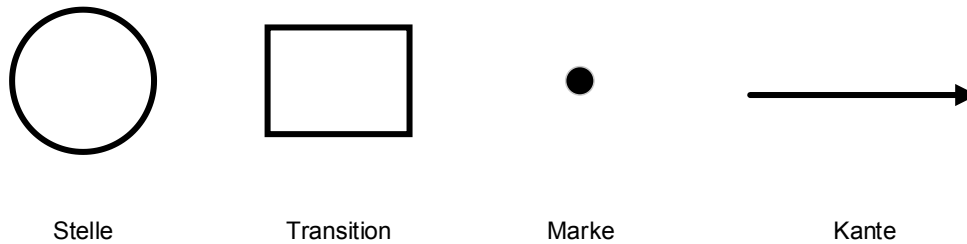


Bild 3.9: Elemente eines Petrinetzes

Statische Elemente

Stellen: Die Stellen beschreiben die Bedingungen und repräsentieren bestimmte Lokalzustände eines Systems, das mithilfe von Petrinetzen modelliert werden kann [109]. Sie besitzen einen passiven Charakter. Die Stellen werden grafisch als Kreis bezeichnet. Sie können dynamische Elemente, die sogenannten Marken, beinhalten. Die Stellen besitzen definierte Kapazitäten, die zwischen zwei Arten unterschieden werden. Die Gesamtkapazität gibt die maximale Anzahl von Marken aller Farben, welche zu einem Zeitpunkt in einer Stelle existieren dürfen. Die Einzelkapazität repräsentiert die Anzahl der maximal zulässigen Markenarten (Farben) zu einem Zeitpunkt in einer Stelle. Die reale Markenanzahl überschreitet auf keinen Fall die Gesamtkapazität.

Transitionen: Die Transitionen beschreiben die aktiven Komponenten eines Prozesses [109]. In den Transitionen können Marken erzeugt, verbraucht, transportiert oder verändert werden. Das Ausführen einer Transition wird als Schalten bezeichnet. Wenn eine Transition geschaltet wird, werden die Marken der Stellen im Vorbereich einer Transition nach bestimmten Regeln in die Stellen des Nachbereiches bewegt. Die Transitionen werden in Petrinetzen als Rechteck dargestellt.

Kanten: Die Kanten zeigen den Weg der bestimmten Marken von einer Bedingung (Stelle) zu einem Ereignis (Transition) oder umgekehrt [109]. Sie stellen somit die Beziehungen zwischen den Lokalzuständen und deren Übergängen dar. Die Kanten werden grafisch als Pfeil bezeichnet. Die Vor- und Nachkanten lassen sich unterscheiden. Eine Vorkante ist die Kante, die bei der Verbindung einer Stelle mit einer Transition entsteht. Eine Nachkante entsteht hingegen bei der Verknüpfung einer Transition zu einer Stelle.

Dynamische Elemente

Marken: Die Marken stellen die dynamischen Elemente innerhalb eines Petrinetzes dar [109]. Sie durchlaufen durch das Netz und werden von Stelle zu Stelle durch das Schalten der Transitionen weitergegeben. Bei der Initialisierung können in Stellen die Anfangsmarkierungen vorhanden sein. Dabei ist eine Anfangsmarkierung als eine bestimmte Anzahl von Marken zu verstehen, die beim Start der Simulation in den Stellen vorhanden sind. Ohne diese Anfangsmarkierung ist keine Transition schaltfähig und somit keine Simulation möglich. Die Marken werden grafisch als Punkt bezeichnet.

Schaltregel

Die Ausführung eines Petrinetzes wird durch die Anzahl und die Verteilung der Marken in den Petrinetzen gesteuert. Durch die Änderung der Verteilung von Marken an den Stellen, die das Auftreten von Ereignissen oder die Ausführung von Operationen widerspiegeln können [336].

- Aktivierungsregel der Transition: Eine Transition T kann dann aktiviert werden, wenn jede Eingangsstelle P von Transition T die Anzahl der Marken enthält, die mindestens gleich dem Gewicht der gerichteten Kante ist. Diese Kante verbindet die Stelle zu Transition.
- Schaltregel: Nur aktivierte Transition kann geschaltet werden. Das Schalten der aktivierten Transition T entfernt die Anzahl von Marken von jeder Eingangsstelle, die gleich dem Gewicht der gerichteten Kante ist, die die Stelle zu der Transition verbindet. Das Schalten der aktivierten Transition T erzeugt auch eine Anzahl der Marken in jeder Ausgangsstelle P , die gleich dem Gewicht der gerichteten Kante, die die Transition zu der Stelle verbindet.

Es ist zu beachten, dass nur die aktivierte Transition geschaltet werden kann. Wenn eine Transition geschaltet wird, bleibt die Anzahl der Marken in jeder Stelle immer nicht-negativ sein.

Bei der Modellierung eines physikalischen Systems sind einige grundlegende Situationen häufig angetroffen. Beispiele sind **sequentielle Ausführung** [336], **Synchronisation** [336], **wechselseitiger Ausschluss** [336], **Konfliktfreiheit** [109], **Nebenläufigkeit** [302]. Die grundlegenden Eigenschaften sind in vorhandenen Literaturen beschrieben. Beispiele der Eigenschaften sind die **Lebendigkeit** [109], die **Erreichbarkeit** [109], die **Beschränktheit** [302], die **Sicherheit** [109], die **Kausalität** [302].

3.6 Modellierungssoftware REALIST

Die REALIST-Software wurde entwickelt, um die Petri-Netze zu modellieren und zu simulieren. Anschließend können die Simulationsergebnisse zur Bewertung der Modelle analysiert werden. Diese Software besteht aus zwei Paketen. Das eine ist REALIST-Editor, mit dem man Petri-Netz-Modelle aufbauen kann. Die Daten des Modells werden als PNML-Datei gespeichert. Das andere ist REALIST-Simulation. Mit dem Simulator können die als PNML-Datei gespeicherten Modelle simuliert werden. Die statistischen und stochastischen

Berechnungen mit Monte-Carlo-Simulation werden mit dem Simulator durchgeführt. Anschließend bekommt man die Ergebnisse grafisch und numerisch, die zur Bewertung und Verifizierung der Petri-Netz-Modelle verwendet werden können. Die detaillierten Inhalte der Software sind in [212; 213] beschrieben.

Zahlreiche komplexe Modelle lassen sich mit REALIST-Software modellieren und simulieren. Stochastische Prozesse können mit diversen Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Dazu können auch Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen berücksichtigt werden. Die weiteren Eigenschaften sowie Anwendungsbeispiele findet man in [237; 238; 252; 253; 311; 359].

Das REALIST-Programmpaket

Das REALIST-Programmpaket gestattet die Erfassung, Begutachtung und Auswertung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit komplexer Systeme. Es wurde im Zuge eines DFG-Forschungsprojektes am Institut für Maschinenelemente (IMA) im Forschungsbereich Zuverlässigkeitstechnik der Universität Stuttgart realisiert [213]. Das REALIST-Programmpaket beinhaltet die Programme REALIST-Editor (siehe Bild 3.10) und REALIST-Simulation (siehe Bild 3.11). Als Verbindung der beiden Bestandteile dienen die Dateien im PNML-Dateiformat, welche einen flexiblen und einfachen Datenaustausch vergewissern.

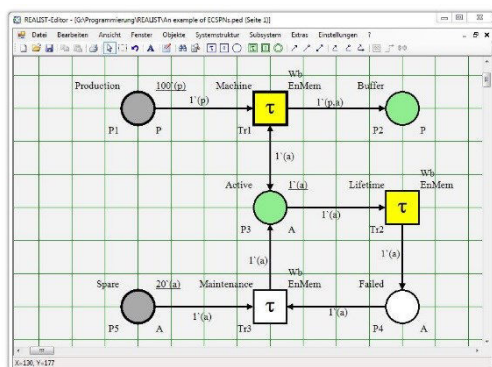


Bild 3.10: REALIST-Editor

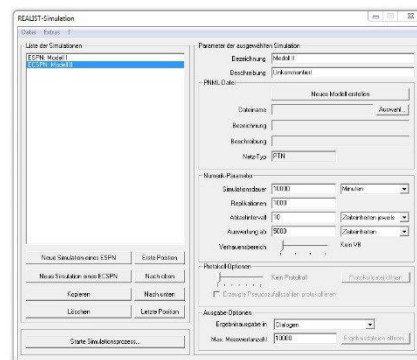


Bild 3.11: REALIST-Simulator

Der REALIST-Editor ist ein grafischer Editor mit einer bequemen Benutzeroberfläche. Er dient zum Einrichten von erweiterten stochastischen Petrinetzen (engl. Extended Stochastic Petri Net, ESPN) oder erweiterten farbigen stochastischen Petrinetzen (engl. Extended Coloured Stochastic Petri Net, ECSPN) im Verbund mit Zuverlässigkeitsblockdiagrammen. Nach Fertigstellung eines ESPN bzw. ECSPN und Auswahl der auszuwertenden Teile wird das Web in eine PNML-Datei (Petri Net Markup Language) exportiert [212]. Der REALIST-Simulator importiert die erstellte PNML-Datei. Nach Eingabe der ausgewählten Simulationsparameter kann die Begutachtung des ESPN bzw. ECSPN durchgeführt werden. Die Lösungen der Untersuchung werden in Beschaffenheit von Grafiken und Textdateien dargestellt. Der REALIST-Simulator verfügt über eine Stapelverarbeitung für die automatisierte Abarbeitung mehrerer Simulationsaufgaben und eine deutlich gegliederte Benutzeroberfläche für die Eingabe der Simulationsparameter und deren Speicherung in einer Projektdatei.

4 Anforderungen an die Modellierung und Simulation

4.1 Grundlegende Modellierungsaspekte

Bei der Modellierung sollen einfache Bedienung, einfache Darstellung und geringer Aufwand erzielt werden. Grundlegende Aspekte bei der Modellierung sind:

- **Benutzerfreundlichkeit:** Die Benutzerfreundlichkeit beschreibt die einfache Bedienung bei Modellaufbau, wie neue Elemente zu erzeugen, Elemente zu verbinden, Elemente zu verschieben, Elemente zu löschen, Elemente zu benennen, Eigenschaften der Elemente hinzuzufügen.
- **Wiederholbarkeit:** Gleiche oder ähnliche Elemente lassen sich leicht kopiert werden.
- **Übersichtlichkeit:** Unterschiedliche standardisierte Elemente, genaue Positionierung im Koordinatensystem, verschiedene Detaillierungsgrad sollen zum Zweck der guten Übersichtlichkeit vorhanden sein.
- **Übertragbarkeit:** Bei ähnlichen Systemen soll die methodische Vorgehensweise beibehalten werden. Durch einfachen Austausch oder Anpassung der Elemente und ihrer Parameter soll das Modell eines Systems auf ein anderes System übertragen werden.
- **Anpassungsfähigkeit:** Die vorhandenen Modelle sollen bei Änderung des Systems oder für andere Systeme leicht angepasst werden.
- **Überprüfbarkeit:** Die Eigenschaften der Elemente und die Verbindungen sollen leicht überprüft werden, um die Bedienungsfehler zu vermeiden.
- **Konfigurierbarkeit:** Die Konfigurierbarkeit bezieht sich im Rahmen eines technischen Systems auf die Aufbaustruktur, die technischen Auslegungen sowie die funktionellen Beziehungen zwischen den Komponenten. Die verschiedenen Konfigurationsszenarien sollen mittels der Modellierungsmethoden dargestellt werden. Darüber hinaus können die vielfältigen Vorgänge von Konfigurationsszenarien durch Modellierungsmethoden auch simuliert werden.

4.2 Modellierungsebene

Die Modellierungsebenen werden im Allgemeinen durch Anforderungen und Anforderungserfüllungen auf Systemebene und Komponentenebene unterteilt.

Komponentenebene

Die Komponentenebene befasst die Komponentenzustände, die Beschreibung des Komponentenausfallverhaltens und mögliche Ausfallabhängigkeiten. Diese drei Punkte sind

die wichtigen Bewertungspunkte. Die Komponentenzustände kann man z.B. in „Frei“, „in Betrieb“ und „Kaputt“ unterteilen. Eigenschaften des Systemelements sind:

- **Anzahl und Typ der Elemente:** Mit der Erhöhung der Anzahl an Elementen wird die strukturelle bzw. statische Komplexität zugenommen, wie z. B. durch eine hohe Anzahl an Arbeitsstationen mit vielfältigen Materialflüssen, eine hohe Anzahl unterschiedlicher Produkte, sowie verschiedenste Fertigungsprozesse zu einer hohen strukturellen Komplexität. Die Anzahl von Elementen stellt einen wichtigen Punkt zur Bewertung der vorhandenen Methoden dar.
- **Kompetenz des Elements:** Die Kompetenz eines Elements beschreibt, ob und wie gut das Element die gegebenen Aufgaben erledigen kann. Als Bewertungskriterien können die Richtigkeitsquote und Effizienz verwendet werden.
- **Aufgabenvielfalt des Elements:** Die Aufgabenvielfalt eines Elements zeigt, wie viele unterschiedliche Aufgaben ein Element bei der Produktion erledigen kann.
- **Verantwortung des Elements:** Die Verantwortung eines Elements deutet hin, die Gewichtung des Elements im System bei der Produktion zu übernehmen. Die Verantwortung des jeweiligen Elements beinhaltet: den Informationsfluss vollständig zu übertragen, einen Befehl effektiv durchzuführen und das ganze System richtig und effizient zu unterstützen.
- **Vernetzungsgrad des Elements:** Der Vernetzungsgrad eines Elements bezeichnet, wie viele Verbindungen das Element mit anderen Elementen im System hat. Die Vernetzung ermöglicht eine Kommunikation sowie den Austausch von Informationen und Daten zwischen den Elementen. Es deutet den Wirkungsbereich des Elements im System hin.

Systemebene

In der Systemebene soll die Systemzustände und Systemstruktur betrachtet werden. Der Systemzustand beschreibt den aktuellen Zustand des Systems. Der Systemzustand basiert auf dem Komponentenzustand. Mittels der Anwendung von booleschem Systemmodell wird der Systemzustand aus den Komponentenzuständen ermittelt. Die Systemstruktur wird in der Systemtheorie als die Gesamtheit der Elemente eines Systems und deren Auslegungen definiert. Die Systemstruktur wird durch die Grundlage aller dynamischen Verhalten und interaktiven Beziehungen innerhalb des Systems aufgebaut.

- **Dezentralisierungsgrad:** Der Dezentralisierungsgrad ist der Quotient der im Prozessteam integrierten Funktionen mit den zur ganzheitlichen Bearbeitung von Primäraufgaben erforderlichen Funktionen. Der Dezentralisierungsgrad lässt sich als objektiv messbar Größe für den Umfang von Integration der Fachaufgaben für die ganzheitliche Aufgabenausführung festlegen.
- **Integrationsgrad**
- **Modularisierungsgrad**
- **Abhängigkeiten:** Beispiele der Abhängigkeiten sind die Ausfallabhängigkeit, Instandhaltungsabhängigkeit und Produktionsabhängigkeit.
- **Wechselwirkungen**

4.3 Grundlegende Modellierungselemente

Ablauf

Der Ablauf zeigt die Orientierung und den Weg zum Ziel. Mit dem Ablauf ist es möglich, die Leitlinien und die Struktur des Systems zu überblicken. Als Beispiel werden der zeitliche Ablauf, der Funktionsablauf und der Betriebsablauf erklärt.

- **Abbildung des Materialflusses**
- **Abbildung des Informationsflusses**
- **Zeitlicher Ablauf:** Die Zeit kann als Referenz und Maßstab zur Beurteilung verwendet werden. Häufig werden die Zustandsänderungen mit einem zeitlichen Ablauf beschrieben. Sobald die Zustände mit der Zeitachse beschrieben werden, ist es dann möglich, die Zustände sowohl horizontal (Zeitänderung) als auch vertikal (Zustandsänderung) miteinander zu vergleichen.
- **Prozessablauf:** Produktionssequenz
- **Funktionsablauf**
- **Betriebsablauf**

Struktur

- **Systemstruktur**
- **Funktionsstruktur:** Die Komponenten bilden sich kooperativ funktionell zusammen zu einem System. Durch die Funktionsabläufe kann eine Funktionsstruktur abgebildet werden. Mit der Funktionsstruktur ist es sehr anschaulich zu erkennen, wie sich die Funktionen zusammensetzen und verlaufen. Die Funktionsstruktur erleichtert, die Komponenten im System zu orientieren und zu lokalisieren.
- **Zuverlässigkeitsstruktur**
- **Produktionsstruktur**
- **Hierarchie:** Unter Hierarchie versteht man ein System von Elementen, die einander über- bzw. untergeordnet sind. Damit kann man die ganzen Elemente zuordnen. Grundsätzlich ist es mittels Hierarchie einfache Netzwerkstrukturen zu erfassen.

Zustand

- Systemzustand
- Komponentenzustand
- Zustandsänderung
- Zustandsübergang
- Zeitabhängige Ausfallraten
- Zeitabhängige Übergangsraten

Regel

Diverse Regeln sind bei der Modellierung zu berücksichtigen.

- Konkurrenz
- Warteschlange

- Nebenläufigkeit
- Synchronisation
- Priorisierung
- Gewichtung

Parameter

- Unscharfe Information
- Dynamische Werte
- Stochastische Prozesse
- Nicht-lineare Dynamik

4.4 Kenngrößen des Produktionssystems

Zeit

Die Zeit hat eine eindeutige, unumkehrbare Richtung und ist deshalb sehr geeignet dafür, die Abfolge der Ereignisse zu beschreiben. Die Zustände der Systeme sowie deren dynamischen Veränderungen können bei der Modellierung auch mit der Zeit beschrieben werden. Neben dem Zustand kann auch Kausalität mit der Zeit beschrieben werden. Es ist möglich, die Wirkung der Ereignisse von der Vergangenheit in die Zukunft zu projizieren, was eine Szenario-Technik genannt ist.

- **Globale Zeit:** Globale Zeit ist eine simulationsbezogene Zeit. Dies ist für alle durchzuführenden Vorgänge eines Modells gültig. Diese Zeit ist in der Lage, die Ermittlung der verbrauchten Zeit jedes Vorgangs und die Festlegung der Anfangszeitpunkte der jeweiligen Vorgänge zu bestimmen.
- **Schaltdauer**
- **Lebensdauer**
- **Instandhaltungsdauer**
- **Produktionsdauer**

Produktivität

Zuverlässigkeit

Verfügbarkeit

Kosten

Kapazität

Es beinhaltet die Kapazität für Material, Produkte, Ersatzteillager, Personal und Maschine.

4.5 Anforderungen an Intelligenz

4.5.1 Vernetzung und Kommunikation

Nach den Kernen der Industrie 4.0 und der Definition ist die Vernetzung eine besondere Eigenschaft der Industrie 4.0. Mit den CPSs können alle Produkte und deren Produktionssysteme in Industrie 4.0 in einem Netz miteinander verbunden werden. Durch die Vernetzung können alle verfügbaren Ressourcen und gewünschte Bedürfnisse anschaulich überblickt werden. Es entsteht eine Plattform für die Hersteller, Lieferanten und Kunden. Damit können die Unternehmen ihre Produkte weltweit verkaufen und die Kunden passende, gewünschte Produkte kaufen. Die Ressourceneffizienz kann durch verbundenes Netz und verbesserte Logistik erhöht werden, und das Risiko der Überproduktion kann reduziert werden. Die Vernetzung ist ein Grundstein der Kommunikation und ermöglicht die globale Kommunikation. Technologien zur Sprach-, Gesten- und Emotionserkennung erlauben, dass Mensch und Maschine auf intuitive Weise miteinander kommunizieren [215]. In der Arbeitswelt der Zukunft kommt es zu einer stärkeren interaktiven Kooperation zwischen Menschen und Maschinen, wobei der Mensch dennoch immer weiter in den Mittelpunkt rückt. Das verändert nicht nur die Produktionsarbeit, sondern ermöglicht auch neue Prozesse und Dienstleistungen.

Identifizierung: Um die Vernetzung von materiellen und immateriellen Dingen zu ermöglichen, ist es sehr wichtig und unerlässlich, die Dinge zuerst virtuell und real zu identifizieren. Das Ziel ist nicht nur ein Ding von anderen Dingen zu unterscheiden und zu erkennen, sondern auch die Zustände der Dinge ständig in Echtzeit zu erneuern und zu aktualisieren. Somit können die Dinge virtuell umfassend überblickt werden. Nur durch die Identifizierung kann eine Vernetzung noch nicht erreicht werden.

Echtzeit-Lokalisierung: Echtzeit-Lokalisierungssysteme (RTLS - Real Time Location System) [137] sind Systeme, welche auf Basis von Funkverbindungen kurzer Reichweite Positionsdaten übermitteln. Diese Systeme, welche mit dem Protokoll IEEE 802.15.4 (a) im 2,4-GHz-Bereich mit niedriger Datenrate arbeiten, werden für das Auffinden, Lokalisieren und Tracking von Personen, Produkten, Gegenständen und Geräten benutzt. Echtzeit-Lokalisierungssysteme erfassen die Bewegungshistorie von Objekten und dokumentieren wann, welches Objekt sich an welchem Ort befunden hat. Daraus können Rückschlüsse auf die Auslastung, Kostenzuordnung und Bevorratung gezogen werden. Neben den Vorteilen der Logistikoptimierung ist auch der Diebstahlschutz von Geräten und Gegenständen als wesentlicher Faktor von RTLS-Systemen zu nennen [137]. In der Industrie 4.0 können die intelligenten Produkte und Maschinen mithilfe der Lokalisierung die richtigen Werkzeuge sowie die benötigten Materialien selbständig auffinden. Mittlerweile ist das auch eine Methode, um eine Selbstentscheidung zu realisieren. Die Schwerpunkte der Echtzeit-Lokalisierung sind die Genauigkeit und die Effizienz.

4.5.2 Selbständigkeit

Die Selbständigkeit erfordert die Fähigkeit der Maschine, wie ein Mensch arbeiten zu können. In der Industrie kann jene Maschine als selbständig bezeichnet werden, welche alleine und

autonom eine menschliche Aufgabe erledigen kann. Um die Ziele der Industrie 4.0 realisieren zu können, muss die Maschine in der Lage sein, selbständig die Daten zu analysieren und eine entsprechende Reaktion hervorzubringen. Die Selbständigkeit besteht aus den folgenden Eigenschaften:

Erkennungsfähigkeit

Selbstlernen

Die zunehmende Nachfrage nach neuen, hochwertigen und sehr individuellen Produkten zu niedrigen Kosten und mit minimaler Time-to-Market-Verzögerung fordert die Entwicklung der Produktionssysteme, was durch die Anwendung der Lernfähigkeit des Produktionssystems ermöglicht wird. Es gibt zwei unterschiedliche Lernarten, das passive und das aktive Lernen. Passives Lernen bedeutet, dass die Informationen der Daten zu den Lernenden fließt. Allerdings kann die Maschinen durch den Einsatz des aktiven Lernens eine noch bessere Genauigkeit erreichen.

Eine entscheidende Eigenschaft der Selbständigkeit ist die Lernfähigkeit. Selbstlernen erfordert eine Abfrage-Strategie. Eine solche Strategie beinhaltet die Abfrage von Unsicherheiten (auch als Unsicherheitsprobenahme bekannt), bei dem eine einzelne Klassifizierung aus markierten Daten gelernt und anschließend zur Untersuchung der nicht markierten Daten verwendet wird. Die Menge der Daten, welche eine Annotation benötigen, um eine bestimmte Leistung zu erreichen, reduzieren, im Vergleich zum passiven Lernen aus Beispielen in einer zufälligen Reihenfolge, deutlich die Abfragen mit Unsicherheiten [300].

Die Lernfähigkeit kann mit zwei Hauptfaktoren beschreiben werden [51]: motivationale Komponenten und kognitive Lernanteile, unter die Volition, kognitive Lernstrategien und Ressourcen gefasst werden. Nicht zu vernachlässigen sind auch die lernprozessbezogenen Rahmenbedingungen (Neugier, Lernmotivation und Merkfähigkeit). Neugier wird eher als Vorstufe und Auslöser des Lernprozesses angesehen. Volitional ist eine Art der Handlung, die nicht aus einer direkten Motivation heraus entsteht. Die kognitiven Lernstrategien erfassen alle jene Prozesse, die der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -speicherung dienen [51]. Unter den Begriff fallen auch die Wahl der Lernumgebung und die Bereitschaft, sich mit neuen Problemstellungen auseinanderzusetzen.

Die Lernfähigkeit ist der größte Unterschied zwischen konventionellen und intelligenten Produkten. Es benötigt die Fähigkeit, neue Situationen oder Objekte zu erkennen und die Daten abzuspeichern. Damit kann ein Produkt immer intelligenter werden.

Die Lernfähigkeit ist auch eine Schlüsselqualität des Unternehmens, um die wirtschaftlichen Anforderungen zu erfüllen. Nachhaltiges Wirtschaften erfordert einen kompetenten Umgang mit Komplexität. Dazu bedarf es einer gehörigen Portion weitreichender Lernfähigkeit. Alleine durch die integrative Berücksichtigung von wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Leistungen und das Einbeziehen von Anspruchsgruppen sind komplexe Vorgänge und ständig sich verändernde Aufgaben und Rahmenbedingungen quasi vorgegeben. Die Kernkompetenzen der Zukunft liegen in einer weitreichenden Lernfähigkeit, im kompetenten Umgang mit Komplexität, im vernetzten, auch berufs- und

bereichsübergreifenden Denken und Wissen, im Erkennen von Strukturen und insbesondere auch in einer tragfähigen Kommunikations- und Beratungskompetenz [276].

Selbststeuerung

Dezentrale Selbststeuerungsstrategien [303] erlauben es, hierarchische Steuerungsstrategien zu entwickeln, um zeitnah und effizient auf Veränderungen im komplexen Unternehmensumfeld reagieren zu können. Dazu werden Entscheidungsfunktionalitäten auf einzelne logistische Objekte verlagert, die durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien in die Lage versetzt werden, Daten zu verarbeiten und zu bewerten, Entscheidungen zu treffen und Aktionen zu initiieren beziehungsweise mit anderen logistischen Objekten zu kommunizieren. Die Selbststeuerung logistischer Prozesse wird als eine zukunftsorientierte Möglichkeit gesehen, um die zunehmende Komplexität und Dynamik logistischer Systeme besser beherrschen zu können. Laut [351] lassen sich die selbststeuernden Maschinen in zwei Typen unterteilen. Die erste ist eine sogenannte Trivial-Maschine. Die Merkmale einer Trivial-Maschine sind:

- Das System lässt sich präzise beschreiben: es ist in seiner Wirkungsweise rekonstruierbar;
- Es funktioniert unabhängig von eigener Vergangenheit;
- Die Wirkungen sind voraussagbar, aufgrund der einfachen, d.h. linearen Kausalstruktur;
- Es gilt das Perfektionsprinzip: Abweichungen sind Störungen.

Der zweite Typ ist die nicht-triviale Maschine. Merkmale nicht-trivialer Maschinen sind:

- Soziale Systeme sind in ihrer Funktionsweise nicht restlos durchschaubar;
- Reagieren nicht nur auf den Input, sondern in erster Linie auf sich selbst, auf den eigenen Zustand;
- Sind von Geschichten abhängig;
- Weisen eine zirkuläre Kausalstruktur auf.

Die Idee der Selbststeuerung kann folgenden Thesen aufgegriffen werden [223]:

- Selbststeuerung schafft eine effiziente Prozesslenkung und wird den Aufwand zur Durchführung von Planungsfunktionen auf ein Minimum reduzieren;
- Durch Verlagerung von Entscheidungskompetenz auf einzelne logistische Objekte wird die Robustheit komplexer nicht-deterministischer Systeme erhöht;
- Selbststeuerung führt unter Einsatz neuer Technologien Informations- und Materialfluss in Produktions- und Logistiksystemen zusammen, wodurch sich die Transparenz vernetzter Materialflusstrukturen erhöht.

Die Lösung der Selbststeuerung besteht aus zwei Komponenten [10]:

- Das Aufsichtssystem, das die Entscheidungen trifft;
- Robuste adaptive Regler, der den Befehl von Aufsicht-System folgt.

Eine Schlüsselkomponente für einen autonomen Beauftragten ist die Fähigkeit, schnell Probleme in der Regelschleife zu erkennen.

Selbstoptimierung

Die Selbstoptimierung bezieht sich auf die Fähigkeit eines technischen Systems, welche neue Situationen und Veränderungen der bekannten Objekte anpassen kann. Ein selbstoptimierendes System soll sich entsprechend seines Zielsystems verhalten. Unter einem Zielsystem wird hier ganz allgemein eine Menge zueinander in Beziehung stehender Ziele verstanden. In einem System findet genau dann eine Selbstoptimierung statt, wenn durch das Zusammenwirken der enthaltenen Elemente die folgenden drei Aktionen wiederkehrend ausgeführt werden [87; 240]: Analyse der Ist-Situation, Bestimmung der Systemziele, Anpassung des Systemverhaltens.

Die in der ersten Aktion betrachtete Ist-Situation umfasst den Zustand des Systems selbst sowie alle möglichen Beobachtungen über seine Umgebung. Dabei können Beobachtungen auch indirekt durch Kommunikation mit anderen Systemen gewonnen werden. Der Zustand eines Systems beinhaltet weiterhin eventuell gespeicherte zurückliegende Beobachtungen. Ein wesentlicher Aspekt der Analyse ist die Prüfung des Erfüllungsgrads der verfolgten Ziele. Bei der Zielbestimmung in der zweiten Aktion können die neuen Ziele des Systems durch Auswahl, Anpassung oder Generierung dieser gewonnen werden. Hierbei verstehen wir unter Auswahl die Selektion einer Alternative, aus einer fest vorgegebenen, diskreten, endlichen Menge von möglichen Zielen. Eine Anpassung von Zielen dagegen beschreibt die graduelle Veränderung bestehender Ziele. Von einer Generierung der Ziele sprechen wir dagegen dann, wenn diese, unabhängig von den bisher bekannten Zielen, neu erzeugt werden. Die Anpassung des Systemverhaltens ist durch die drei Aspekte Parameter, Struktur, und Verhalten bestimmt. In der dritten Aktion wird die abschließende Rückwirkung des Selbstoptimierungskreislaufes durch Anpassung des Systemverhaltens beschrieben. Die einzelnen Fälle der Anpassung können, je nachdem auf welcher Ebene eines mechatronischen Systems wir uns befinden, sehr unterschiedlich ausfallen. Auch die Domäne, in der die Anpassung umgesetzt wird, spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Selbstentscheidungsfindung

In der Industrie 4.0 sollten die intelligenten Produkte und Maschinen die menschliche Arbeit reduzieren, sodass die Menschen ihre Zeit anders nutzen können. Entscheidungsfähigkeit ist die Fähigkeit, die Fakten bezüglich einer Entscheidung zu verstehen und abzuwägen, welche Folgen die Wahl einer Möglichkeit gegenüber einer anderen hätte, oder welche Auswirkungen die Entscheidung, nichts zu tun, hätte. Es gibt einige Voraussetzungen, welche Maschinen erfüllen müssen, um in der Lage zu sein, eigene Entscheidungen treffen zu können. Dazu gehören zum Beispiel Informationen über die betreffende Situation und involvierte Objekte. Diese Informationen könnten zum Beispiel durch die Fähigkeit Online Informationssuche bedeckt werden. Steigt die Fülle an Informationen oder gehen diese immer tiefer in die Materie hinein, das heißt die Informationen werden feiner, so wird für jeden Prozess mehr Zeit der Maschine benötigt. Eine Lösung, um den Informationsprozess zu beschleunigen, könnte die „Fuzzy-Logik“ sein. Darauf wird im weiteren Verlauf noch näher eingegangen. Richtige Entscheidungen entstehen meistens auf Basis einer Datenanalyse. Deswegen ist der Kern der Entscheidungen die Notwendigkeit, eine große Datenbank aufzubauen. Wichtige Aspekte bei der Datenanalyse sind Datenvariante, Datengeschwindigkeit, Datenvolumen und Daten Volatilität [29]. Die Datenvariante bezieht

sich auf die zunehmende Anzahl von Formaten. Die Datengeschwindigkeit bezieht sich auf die Erhöhung der Geschwindigkeit der Datenerzeugung, Datenverarbeitung und Datennutzung. Das Datenvolumen bezieht sich auf die zunehmende Anzahl von Bytes der Daten auf verschiedenen Medien gespeichert. Daten Volatilität bedeutet, dass die Datenflüsse stark inkonsistent mit periodischen Spitzen sind.

Selbstorganisation

Die Selbstorganisation [226] ist ein Prozess der Ordnungsbildung, welcher seine Ursachen in den an der Ordnungsbildung beteiligten Elementen findet und so eine eigene Empfindlichkeit gegenüber Umweltbedingungen ausprägt. Ein selbstorganisierendes System ist ein Zusammenhang von Elementen und Prozessen, welche für eine relative Dauer über selbstbezügliche Relationen, in unterscheidungs-fähiger Weise miteinander verbunden sind. Zukünftig sollen in der selbstorganisierenden Produktion, mit verteilter Intelligenz, die Objekte in der Produktion zusätzlich mit eigener Intelligenz ausgestattet werden und so Aufgaben der Koordination und Steuerung von Produktionsabläufen übernehmen können. Diese produktgesteuerte Fertigung sieht, statt der bisherigen zentralen Planung und Steuerung, ein Multiagentensystem mit der Möglichkeit zu Auktionen durch Verhandlungsmechanismen als Mittel zur Selbstorganisation vor. Die Aufgabenbereiche und Funktionen zur selbstorganisierenden Produktion sind in folgender Tabelle 4.1 [226] dargestellt.

Tabelle 4.1: Aufgabenbereiche und Funktionen zur selbstorganisierenden Produktion

Aufgabenbereich	Funktion
Fertigungsplanung	Prioritätensteuerung
	Wahl der nächsten Bearbeitungsstation
	Monitoring (Status, ToDo, Tracing)
Spanende Bearbeitung	Ablaufsteuerung
	NC-Parameter-Steuerung
	Wahl des geeigneten Prozessmodells für sensorbasierte Eigendiagnose
Montage	Montagereihenfolge (Teile)
	Montagereihenfolge (Montageschritte)
	Austausch von Teilen zwischen Bestellungen

In einem fortgeschrittenen Herstellungssystem sind die folgenden Eigenschaften zu beobachten: Sie sind offene Systeme, die sich aus dezentralen, im Wettbewerb und möglicherweise nicht kompatible Komponenten bestehen. Der Umgang mit solchen Systemen erfordert die Selbstorganisation. Ein bereits erfolgreich eingesetztes Beispiel ist die selbstorganisierende Karte (SOM) [226]. Die selbstorganisierende Karte ist ein neuronales Netzwerkmodell für Clustering hochdimensionaler Daten. Clustering ist der Prozess der Lokalisierung "interessanter" Gruppen. Es ist eine Technik, welche es ermöglicht, Gruppendaten mit ähnlichen Eigenschaften zu sortieren und kategorisieren. Es basiert auf

unbeaufsichtigtem wettbewerbsbasiertem Lernen, sodass der Lernprozess vollständig datengetrieben ist. Er beinhaltet zwei Hauptschritte:

1. Das Finden der Siegereinheit: Wenn ein Eingabemuster von der Eingabeschicht präsentiert wird, stehen die Einheiten in der Ausgangschicht in Konkurrenz zueinander. Der Sieger der Ausgangsschicht ist der, dessen Gewichte in der Nähe des Eingangsmusters in Bezug auf die euklidische Distanz liegen.
2. Aktualisieren der Gewichte: Sobald die Siegereinheit bestimmt worden ist, werden die Gewichte der Gewinneinheit und den angrenzenden Einheiten eingestellt, das heißt, in Richtung des Eingangsmusters verschoben.

Dieser Lernprozess wird wiederholt, bis der SOM die gewünschte Genauigkeit erreicht oder bis eine vorgegebene, maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist. Nachdem der Lernvorgang abgeschlossen ist, wird eine Karte derart ausgebildet, dass die Topologie der Originaldaten gewahrt wird. Mit dieser Karte können Komponentenkarten generiert werden, um bei der Kontrolle mögliche Korrelationen zwischen den Dimensionen in den Eingangsdaten zu unterstützen.

Selbstkalibrierung

In der Industrie 4.0 sollten die intelligenten Produkte und Maschinen für eine lange Zeit, ohne menschliche Überwachung, selbständig arbeiten. Aus diesem Grund spielt die Wiederholungsgenauigkeit eine wichtige Rolle. Wird eine hohe Wiederholungsgenauigkeit über lange Zeiträume hinweg gefordert, so können auf diese Weise Drifteffekte zuverlässig mithilfe der automatischer Selbstkalibrierung [361] kompensiert werden, welche zum Beispiel durch Schwankungen der Umgebungsbedingungen hervorgerufen werden können. Die Ungenauigkeit bei stationären, geometrischen Variationen wird von geometrischen Variationen und Kopplungseffekten aufgrund der Gelenke und designabhängigen Positionsgrenzen eines Industrieroboters oder Fehlausrichtungen der Komponenten verursacht. Die Gruppe der dynamischen Fehler definiert die Vibrationen, die aus den Bewegungen selbst oder Interaktionen bestehen. Weiter gibt es Fehler durch Prozesslasten innerhalb dieser Gruppe der Interaktionskräfte. Das dynamische Verhalten wird hauptsächlich durch die kinematische Struktur und die Lagerbedingungen entschieden. Vibrations- und Dämpfungsverhalten beeinflussen sowohl die Produktqualität als auch die Produktionsgeschwindigkeit. Die Ungenauigkeit durch thermische Eigenschaften besteht aus einer Verzerrung im Maschinendesign und den Erweiterungen der Lager und Achsen.

Vor der Kalibrierung muss zunächst der Fehler klassifiziert werden. Die erzielbare Genauigkeit innerhalb eines Produktionsprozesses wird oft als ein Grad der Übereinstimmung zu definierten Formen und Abmessungen beschrieben. Grundsätzlich lassen sich die mechanischen Fehler in drei Kategorien unterteilen [361]: der dynamische Fehler, der stationäre geometrische Fehler sowie der Thermalfehler. Die Ungenauigkeit bei stationären geometrischen Variationen und Kopplungseffekte aufgrund von Gelenken, werden durch konstruktionsbedingte Positionsgrenzen der industriellen Roboter sowie Fehlausrichtungen der Komponenten verursacht. Die Gruppe der dynamischen Fehler definiert die Vibrationen, welche durch Bewegungen oder Interaktionen erzeugt werden. Der Fehler wird durch Prozesslasten innerhalb dieser Gruppe von Interaktionskräften berücksichtigt. Das

dynamische Verhalten wird hauptsächlich durch die Kinematik und die Lagerbedingungen bestimmt. Das Schwingungs- und Dämpfungsverhalten beeinflusst die Produktqualität und die Produktionsgeschwindigkeit. Ungenauigkeiten durch thermische Eigenschaften entstehen vor allem durch Verzerrung im Maschinendesign und Erweiterungen der Lager und Achsen.

Selbstheilung

Die Umgebung beeinflusst die Leistung digital integrierter Schaltkreise in elektronischen Systemen. Werden die elektronischen Systeme gestört, treten Fehlfunktionen auf, welche dazu führen können, erhebliche Verluste und Sachschäden aufzutreten. Vorteil der Selbstheilung von Maschinen ist vor allem die Kostenreduzierung. Die Selbstheilung kann die Zuverlässigkeit der Maschinen erhöhen und somit die Aufwand reduzieren. Deswegen ist eine kostenoptimale Zuverlässigkeitstestplanung sehr wichtig. Mit einer höheren Zuverlässigkeit verlängert sich die Lebensdauer der Maschinen. Bild 4.1 [339] zeigt eine schematische Darstellung des wiederholbaren Selbstheilungskonzepts und die Verlängerung der Lebensdauer.

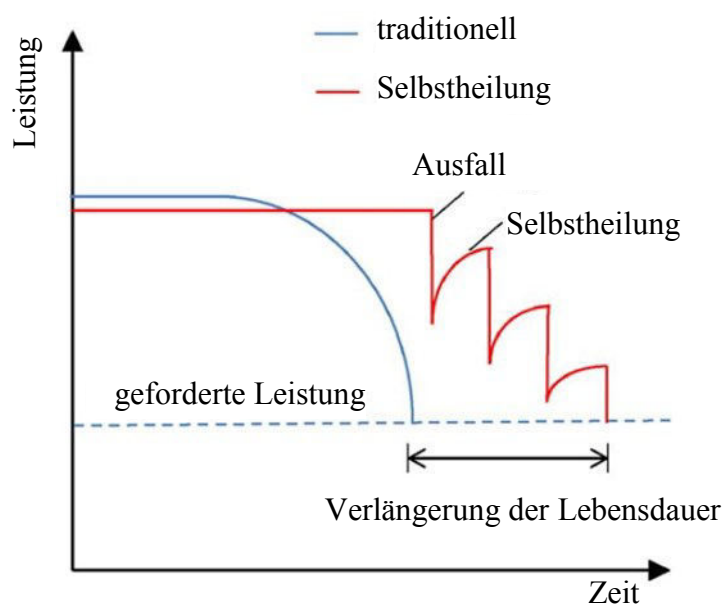


Bild 4.1: Darstellung des wiederholbaren Selbstheilungskonzepts und die Verlängerung der Lebensdauer [339]

Es gibt zwei Lösungen für intelligente Maschinen, sich selbst zu reparieren. Eine Lösung läuft über einen Algorithmus. Mit einer passenden Methode könnten sich die Fähigkeiten des Reparaturs modellieren lassen. Eine andere mögliche Lösung ist das Verwenden von bestimmten Materialien, wie spezieller Kunststoff. Einige bestimmte Materialien lassen sich einfach selbst reparieren. Eine weitere Lösung ist die neue Selbstreparaturtechnologie auf Basis der Evolvable Hardware (EHW) und der Reparation Balance Technology (RBT) [130]. Hier werden evolutionäre Algorithmen als ein Werkzeug für die kombinatorische Optimierung und die globale Suche der EHW benutzt. EHW hat ein starkes Potenzial bei der

Robustheit, ist selbstorganisierend und selbstanpassend. Seine Formeln bestehen aus den evolutionären Algorithmen in Kombination mit programmierbaren, logischen Laufwerken, was der Evolvable Hardware entspricht. Bei der RBT könnte der ursprüngliche Fehler im konsistenten Ausgangssignal durch eine zusätzliche Gleichrichtungsschaltung (RTC) in den Ausgangsanschlüssen korrigiert werden, wenn die Schaltausgangsantwort nicht zu dem erwarteten Ausgang passt.

Qualitätskontrolle

Die Qualität der Produkte ist eines der wichtigsten Anliegen der Industriekonjunktur. Die Entwicklung von technischen Lösungen und der ständigen Veränderungen in der Produktion basiert auf der kontinuierlichen Verbesserung der qualitativen, wirtschaftlichen sowie funktionalen Aspekte. Die Fähigkeit der Qualitätskontrolle hat besonders im Logistikbereich ein enormes Potenzial. Die Inspektion beinhaltet Qualitätsmessungen, bei welchen zwei Entscheidungen zu treffen sind. Zum einen muss entschieden werden, ob das Produkt die Qualitätsanforderungen erfüllt. Falls dies nicht zutreffend ist, so wird das Bauteil erneut produziert oder es wird, falls möglich, nachgebessert. Diese Entscheidung wird anhand einer breiten Akzeptanzspanne gefällt. Die Verwendung eines niedrigen noch akzeptierten Bereichs bewirkt, dass viele Produkte als defekt gelten, die jedoch, welche als gut eingestuft werden, haben eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, dass sie tatsächlich die Qualitätsanforderungen erfüllen. Die Auswahl eines hohen Wertes führt zu einer höheren Ausschussquote, hat jedoch weniger Risiko, dass die Produkte Defekte aufweisen. Dies bewirkt, dass die Fehlerrate der Gesamtqualität im niedrigen Bereich liegt. Die zweite Entscheidung der logistischen Qualitätskontrollfunktion ist eine Neukalibrierung des Mikrofertigungsverfahrens, falls der Prozess außer Kontrolle geraten ist. Diese Entscheidung basiert auf der Geschichte der Qualitätsmessungen und wird über eine Neukalibrierungsschwelle parametrisiert. Während der Rekalibrierung ist die Maschine nicht für die Verarbeitung verfügbar. [339]

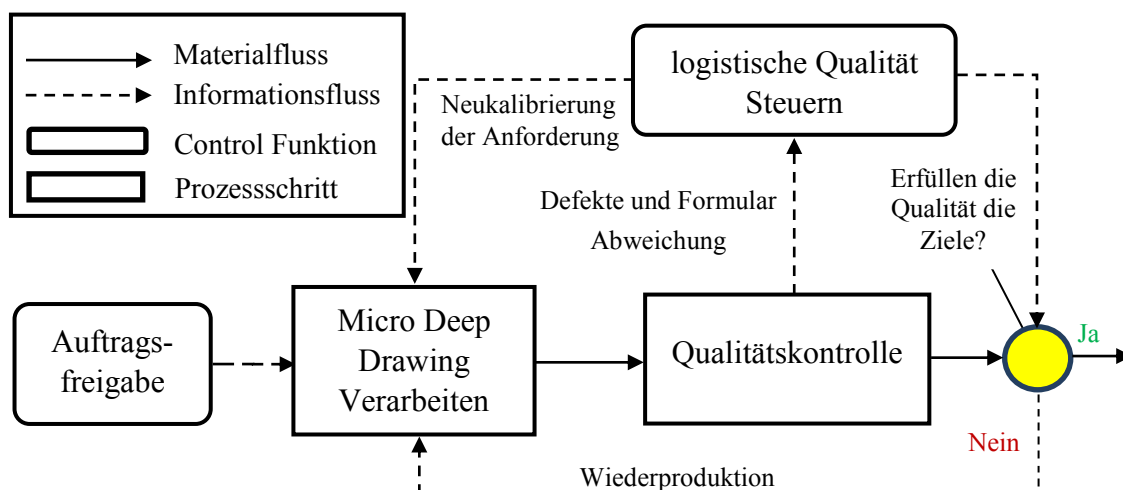


Bild 4.2: Schema des Qualitätskontrollprozesses [339]

Bild 4.2 [339] zeigt den Verlauf der Qualitätskontrolle. Am Anfang steht immer die Auftragsfreigabe, der Auftrag wird gegeben und durch den Hersteller bearbeitet. Danach

kommt die Qualitätskontrolle. Die Materialien werden auf Basis der Anforderungen bewertet, ob sie die Qualität erfüllen. Falls dies zutrifft, so sind die Produkte fertig. Falls nicht, werden die Produkte neu bearbeitet und daraufhin nochmal neu bewertet.

4.5.3 Veränderungsfähigkeit

Die Situationen am globalisierten Markt verhalten sich dynamisch und verändern sich heutzutage immer schneller. Die Produktionssysteme in Industrie 4.0 müssen sich auch an die Veränderungen anpassen. Das entscheidet, dass die Produktionssysteme nicht an der Eigenschaft von Veränderungsfähigkeit mangeln können. Neue Rahmenbedingungen im Umfeld der Produktion treiben es voran, dass die Veränderungsfähigkeit von Unternehmen ein entscheidender Schlüsselfaktor wird. Weiter wird die Veränderungsfähigkeit in diesem Abschnitt behandelt.

Typen der Veränderungsfähigkeit

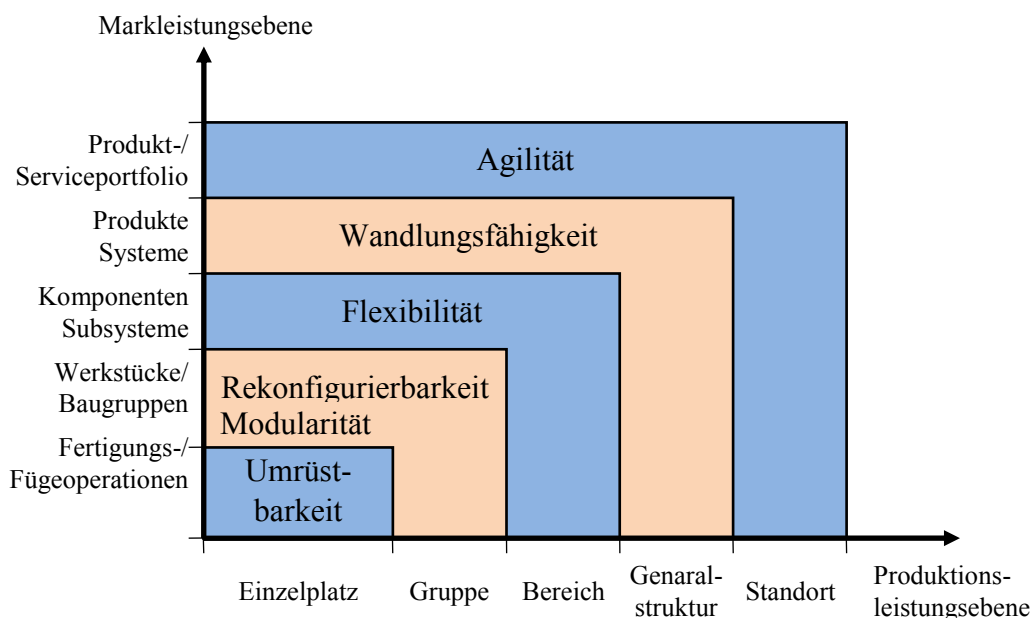


Bild 4.3: Veränderungstypen der Fabrik in Anlehnung von [243 S. 49] [344]

Die *Flexibilität* bezeichnet die Fähigkeit, einen ganzen Produktions- oder Logistikbereich an neue (aber ähnliche) Produkte einer Produktfamilie mit entsprechender Planung, Einrichtung und Optimierung der Fertigungsverfahren, Materialflüsse und Logistikfunktionen unter mittlerem zeitlichem Aufwand anzupassen.

Die *Wandlungsfähigkeit* wird definiert als die Fähigkeit einer Fabrik oder eines Produktionssystems, sich auf eine andere (ähnliche) Produktfamilie umzustellen und die Produktionskapazität entsprechend zu verändern. Das erfordert strukturelle Eingriffe in die Produktions- und Logistiksysteme, sowie Eingriffe in die Gebäudestruktur, deren Einrichtungen und die Aufbau- und Ablauforganisation bzw. in den Personalbereich. Die

Veränderung und Umstellung setzt einen längeren Planungsvorlauf voraus, sollte aber in verhältnismäßig kurzer Zeit durchzuführen sein.

Die *Agilität* bezeichnet die strategische Fähigkeit eines ganzen Unternehmens, neue Märkte zu erschließen, und durch eine entsprechende Standortverteilung die erforderliche Marktleistung und die notwendige Produktionsleistung zu entwickeln. Das erfordert neben einem wandlungsfähigen Produktionssystem auch Management-, Finanzierungs- und Organisationsfähigkeiten.

4.6 Aktivitäten und Maßnahmen

Betriebsstrategie

- Integration
- Kooperation

Echtzeit-Überwachung

Eine Echtzeit-Überwachung für die Vorgänge des dynamischen Verhaltens eines Modells ist ganz wichtig. Mittels Echtzeit-Überwachung kann ein besseres Verständnis des Systemverhaltens im Laufe der Zeit ermöglicht werden. Damit können die Fehlerfindung und Ursachenanalyse einfach realisiert werden.

Ausfallen

- **Alterung (Ageing):** Auswirkungen schädlicher Faktoren: Temperatur, Chemikalien, Korrosionswirkung
- **Verschleiß / Abnutzung:** Mechanische Verunreinigungen, erhöhte Belastung

Verbesserungsmaßnahmen

- **Designverbesserung:** Hervorragendes Design ist der erste und wichtigste Aspekt zur Verlängerung der Lebensdauer von Maschinen. Andere Aspekte für Designverbesserung sind komfortable Bedienung, anspruchsvolle/hohe Leistung und hohe Lebensdauer und Robustheit, Wartungsfreundlichkeit (leicht zu reparieren, kostengünstige Schnellreparaturen) und Einsatz neuer Materialien.
- **Betriebsverbesserung:** Reinigung, Schmierung, Kühlung
- **Erneuerung:** Erneuerungsgrad

Instandhaltungsebene

Der Instandhaltungsebene lassen sich der Instandhaltungsstrategie, den Aktivitäten bei dem Instandhaltungsprozess sowie möglichen Instandhaltungsabhängigkeiten zuordnen.

- **Instandhaltungsstrategie:** Die Instandhaltungsstrategie ist mit dem Zweck zu einer wirtschaftlichen, zeitsparenden Durchführung der Instandhaltung für mehrere Komponenten.

- **Reaktive Instandhaltungsstrategie** (Schadensabhängige Instandhaltungsstrategie)
- **Vorbeugende Instandhaltungsstrategie** (Präventive Instandhaltungsstrategie)
- **Vorausschauende Instandhaltungsstrategie** (Prädiktive Instandhaltungsstrategie)
- **Aktivitäten bei dem Instandhaltungsprozess**
- **Mögliche Instandhaltungsabhängigkeiten:** Die Instandhaltungsabhängigkeit bedeutet eine Abhängigkeit des Instandhaltungsverhaltens einer Komponente von anderen Komponenten. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen den Instandhaltungsmaßnahmen und den Systemkomponenten in den Systemen.

Produktionsstrategie

- **Kostenorientierte Produktion**
- **Lieferzeitorientierte Produktion**
- **Kapazitätsorientierte Produktion**

4.7 Simulationsebene

Mittels der Simulation werden die realitätsnahen Verhalten durch die Modelle durchgeführt, um das reale System gut kennenzulernen. Es gibt dabei auch einen Vorteil, dass man durch Simulation die alternative Implementierung überprüfen / auswählen kann. Dann wird eine optimale Konfiguration des Systems bestimmt.

- **Konfigurationsfähigkeit:** Parameteränderung, Ergebnisdarstellung
- **Datenanalyse:** Wenn die Daten über die im Lauf der Zeit verändernde Markenbesetzung von Komponente vorhanden sind, wird durchschnittliche Markenbesetzung von Komponente mittels der Formen ermittelt. Dabei können sich der maximale Wert und der minimale Wert mittels der Datenanalyse ermitteln lassen.
- **Fehlerfindung:** Die Fehlerfindung ist eine wichtige Aufgabe von Simulation. Es ist mittels der Simulation zu beobachten, ob alle Simulationsprozesse in einem System gerecht durchgeführt werden kann. Wenn die ungewünschten Umstände bei der Simulation auftreten, werden die entsprechenden Fehler auch bei realen Systemen gezeigt.
- **Genauigkeit:** Die Genauigkeit spielt immer eine wichtige Rolle bei der Simulation in einem System. Bei der Simulation erwartet man, die technischen Parameter und Kenngrößen des technischen Systems realitätsnahe in den Modellen zu erzählen. Durch Integration geeigneter Techniken werden die vielfältigen komplexen Datenarten bei der Simulation definiert, verarbeitet und protokolliert. Deshalb wird eine hohe Genauigkeit als die Basis zur Erhöhung des Detaillierungsgrads bei der Simulation betrachtet.
- **Aufwand:** Der Aufwand beschreibt die Simulationsmächtigkeit. Es ist mit dem Zweck, durch möglichst wenige vorzugebenden Parametern, Deklarationen, Funktionen, möglichst einfache Bedienung sowie möglichst kurzen Zeitaufwand die Simulationsaufgaben erfolgreich zu erledigen.

5 Vorhandene Methoden und ihre Bewertungen

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Modelle, Methoden und Tools zur Modellierung und Analyse der Produktionssysteme und Verfügbarkeit beschrieben. Die Modelle und Methoden unterteilen sich in mathematische Modelle und graphische Modellierungsmethoden. Die Simulationstools sind separat in einem Abschnitt zusammengefasst. Zuletzt werden die Methoden, Modelle und Tools nach den Anforderungen bewertet.

5.1 Mathematische Modelle und Analysemethoden

Boolesches Modell

Das boolesche Modell dient zur Berechnung der Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit des Systems durch die Verknüpfung der Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit der Komponenten auf der Basis der Zuverlässigkeitsstruktur [24 S. 168]. Eine der Voraussetzungen ist es, dass die Komponenten stochastisch unabhängig voneinander sind. Weitere Voraussetzung ist, dass die Anzahl der möglichen Zustände auf zwei begrenzt wird.

Poisson-Prozess

Poisson Prozess ist auch ein wichtiger stochastischer Prozess. Er ist nach *Siméon Denis Poisson* als stochastischer Prozess genannt. Darüber wird es kurz erzählen. Der Prozess ermittelt die Häufigkeit von bestimmten Zufallsereignissen bei einem bestimmten Zeitintervall, wie zum Beispiel stellt $N(t)$ die Anzahl des Ereignisses im Zeitintervall $[0, t]$ dar. Der Poisson Prozess ist ein stochastischer Prozess mit dem Parameter λ und $\{N(t), t \geq 0\}$. Es wird mit folgenden Bedingungen beschränkt:

1. $N(0) = 0$,
2. Der Prozess stellt unabhängigen und festen Zuwachs zur Verfügung. Das bedeutet, für alle $t, s > 0$, ist die Verteilungsfunktion von $N(t + s) - N(s)$ identisch mit der von $N(t)$. Wenn man die zwei disjunkten Intervalle $[t_1, t_2]$ und $[t_3, t_4]$ betrachtet, ist die Verteilungsfunktion von $N(t_2) - N(t_1)$ unabhängig von der $N(t_4) - N(t_3)$.
3. $\lim_{t \rightarrow 0} \Pr(N(t) = 1) / t = \lambda$; $\lim_{t \rightarrow 0} \Pr(N(t) \geq 2) / t = 0$.

Hierbei entspricht der Parameter λ mittlerer Anzahl der zufälligen Ereignisse mit dem Intervall $[0,1]$.

Markov-Prozess

Für die Abbildung von Systemen mit mehreren möglichen Zuständen steht der Markov-Prozess zur Verfügung [24 S. 365]. Der Markov-Prozess ist für die exponentialverteilte

Systemzustandsdauer mit konstanter (zeitunabhängiger) Übergangsrate geeignet. Im Fahrzeug- und Maschinenbau kann die Weibullverteilung das reale Ausfallverhalten am besten beschreiben. Deshalb kann der Markov-Prozess nur beschränkt bei der Modellierung der Systeme benutzt werden. Der Markov-Prozess ist ein homogener Poisson Prozess. Er ist auch ein stochastischer Prozess $\{X_t \mid t \geq 0\}$, wobei eine Gleichung für alle $s, t \geq 0$ gilt:

$$Pr(X(s+t) = x \mid X(u), (0 \leq u \leq t)) = Pr(X(s+t) = x \mid X(t)) \quad (5.1)$$

Ein Markov-Prozess ist ein gedächtnisloser Prozess. Das bedeutet, um die zukünftigen Ereignisse herzusagen, kann man nur das Wissen über den aktuellen Zustand nutzen. Der Markov-Prozess kann im Bereich von Warteschlangen eingesetzt werden. In Produktionssystemen wird der stochastische Prozess als ein wichtiges Analyseinstrument in vielen Bereichen weit angewendet. Z.B. spielt der stochastische Prozess im Bereich von Wartesystemen, Lagerhaltung sowie Ressource Management eine wichtige Rolle.

Markov-Ketten

Die Markov-Ketten sind einfache zeit-diskrete stochastische Prozesse. Im Folgenden wird die Definition von Markov-Ketten beschrieben. Ein zeit-diskreter stochastischer Prozess $(X_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$ mit abzählbarem Zustandsraum I wird als Markov-Ketten bezeichnet. Die Bedingung wird für alle Zeitpunkte $n \in \mathbb{N}_0$ und alle Zustände $i_0, \dots, i_{n-1}, i_n, i_{n+1} \in I$ erfüllt:

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} \mid X_0 = i_0, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}, X_n = i_n) = P(X_{n+1} = i_{n+1} \mid X_n = i_n) \quad (5.2)$$

Dies wird als Markov-Eigenschaft bezeichnet und drückt die Gedächtnislosigkeit aus. Dabei ist die Entwicklung des Prozesses nur von dem zuletzt beobachteten Zustand abhängig. Sie ist von sonstigen Vorgeschichten unabhängig. Die Wahrscheinlichkeit $P(X_{n+1} = i_{n+1} \mid X_n = i_n)$, wobei das Vorliegen von i_n und der Nachfolgezustand i_{n+1} angenommen werden, wird als Übergangswahrscheinlichkeit des Prozesses bezeichnet. Man kann von einer homogenen Markov-Kette sprechen, wenn die Übergangswahrscheinlichkeiten unabhängig von dem Zeitpunkt n sind. Andernfalls ist sie die inhomogene Markov-Kette [335]. Die Markov-Kette wird als Grundlage der Entwicklung der Methoden in Produktionssystemen betrachtet. Beispielsweise werden Markov-Reward-Modelle häufig in der Leistungs- und Zuverlässigkeitsbewertung eingesetzt. Darüber hinaus unterliegen den Zuständen X_n der Markov-Kette eine Bewertung in Form des erzielten Gewinns oder der anfallenden Kosten. Wie z. B. können Bestell-, Lager-, und Fehlmengenkosten in einem Lager in Abhängigkeit von Lagerbestand anfallen.

Semi-Markov-Prozess

In der Praxis sind die Übergangsraten der Zustände in Systemen nicht immer konstant, sondern häufig zeitabhängig. Für die Zustandsdauer mit zeitabhängiger Übergangsrate ist der Semi-Markov-Prozess anwendbar [24 S. 389].

Boole-Markov-Modell

Besteht ein System aus voneinander unabhängigen, reparierbaren Systemelementen, kann ein sogenanntes Boole-Markov-Modell gebildet werden [24 S. 374]. Die reparierbaren Systemelemente bilden ein reparierbares System. Mit dem Markov-Modell kann die Dauerverfügbarkeit der einzelnen Systemelemente ermittelt werden. Die Systemelemente verknüpfen sich nach dem booleschen Modell miteinander. In folgendem Bild 5.1 wird das Boole-Markov-Modell dargestellt:

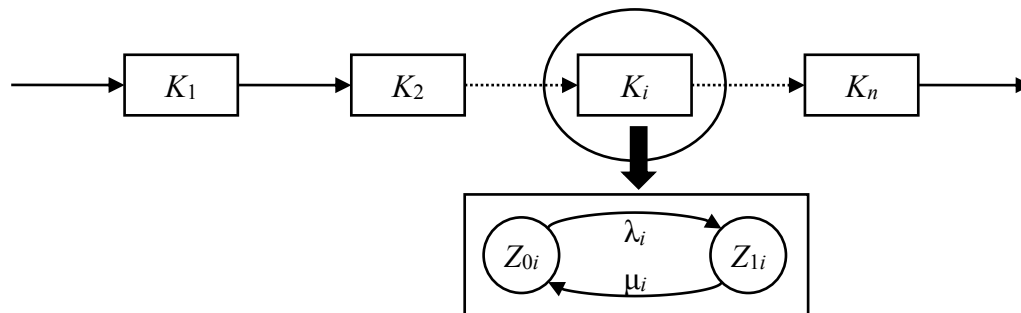


Bild 5.1: Boole-Markov-Modell
(Quelle: [24 S. 374])

Erneuerungsprozess

Gewöhnliche Erneuerungsprozesse zählen zu der Klasse der stochastischen Punktprozesse und beschreiben das Grundmodell einer einzelnen Komponente im Dauerbetrieb [24 S. 375]. Bei jedem Ausfall wird die Komponente durch eine neue identische Komponente ersetzt. Der Erneuerungsprozess eignet sich für zeitabhängige Ausfall- und Reparaturraten.

Systemtransporttheorie

Die Systemtransporttheorie ist eine allgemeine Theorie zur Verfügbarkeitsanalyse. Nach dieser Theorie sind die Zustandsübergänge im System von der gesamten Vorgeschichte des Prozesses abhängig [237 S. 10]. Eine Anwendungsbeschränkung der Systemtransporttheorie liegt daran, dass die mathematische Beschreibung durch diese Theorie sehr komplex ist.

Numerische Analyse

Die numerische Analyse stellt ein Verfahren dar, ein System mit mathematischen Methoden und Algorithmen oder Verfahren zu analysieren und die Probleme numerisch zu lösen. Für viele mathematische Probleme (z.B.: Optimierungsproblem) existieren eine Vielzahl numerischer Verfahren und Algorithmen. Zur Lösung der Probleme wird häufig approximative Berechnung mithilfe von Computern verwendet. Das ist jedoch ein Näherungsverfahren und kann keine exakte Lösung liefern. Die numerische Analyse wird häufig für einfache, kleine Systeme verwendet. Für große Systeme mit vielen Komponenten ist die numerische Analyse zu aufwändig.

Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Methode, auch bekannt als statistische Simulationsmethode, basiert auf Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik. In dieser Methode werden Zufallszahlen, oder häufigere Pseudozufallszahlen, verwendet, um viele Rechenprobleme zu lösen. Dem gegenüber steht der deterministische Algorithmus. Monte-Carlo-Methode lässt sich grob in zwei Kategorien verteilen. Eine besteht darin, dass das Problem inhärente Zufälligkeit hat und der Zufallsprozess direkt durch die Rechenleistung des Computers simuliert werden kann. Beispiel ist der Transmissionsprozess von Neutronen im Reaktor in der Kernphysikforschung [259]. Bild 5.2 zeigt ein Beispiel der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Größe π . Die Kreiszahl π wird mit der Monte-Carlo-Methode angenähert bestimmt durch das Vierfache der Wahrscheinlichkeit, mit der ein innerhalb des Quadrats zufällig gewählter Punkt in den Kreis fällt. Aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen sinkt mit steigender Anzahl von Experimenten die Varianz des Ergebnisses. Die andere Kategorie besteht darin, dass das zu lösende Problem in eine zufällig verteilte Anzahl von Charakteristik umgewandelt werden kann, z. B. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Zufallsereignisses oder der erwartete Wert einer Zufallsvariablen. Die Wahrscheinlichkeit von Zufallsereignissen wird durch Zufallsstichproben geschätzt, oder alternativ die numerische Charakteristik von Zufallsvariablen durch die numerische Charakteristik der Stichproben geschätzt und sie werden als Lösungen für das Problem verwendet. Diese Methode wird meistens zur Lösung komplexer, mehrdimensionaler Integralprobleme verwendet.

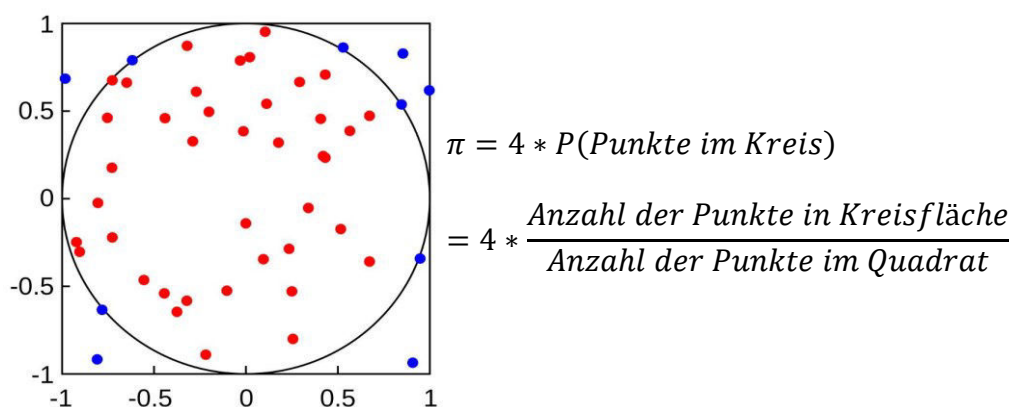


Bild 5.2: Beispiel der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Größe π

Der Problemlösungsprozess der Monte-Carlo-Methode lässt sich in drei Hauptschritte zusammenfassen: Konstruieren oder Beschreiben eines probabilistischen Prozesses, Implementieren von Stichproben anhand einer bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilung und Erstellen verschiedener Schätzer.

Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Lösung praktischer Probleme umfasst zwei Hauptaspekte [49]:

- 1) Wenn die Monte-Carlo-Methode zur Simulation eines Prozesses verwendet wird, muss Zufallsvariablen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung generiert werden.

- 2) Statistische Methoden werden verwendet, um die numerische Charakteristik des Modells abzuschätzen, damit eine numerische Lösung für das tatsächliche Problem ermittelt werden kann.

Die Monte-Carlo-Methode hat sehr starke Adaptionfähigkeit und die Komplexität der Geometrie des Problems hat wenig Einfluss darauf. Die Konvergenz des Verfahrens bezieht sich auf die Konvergenz im Sinne der Wahrscheinlichkeit, sodass die Zunahme der Problemdimension die Konvergenzgeschwindigkeit nicht beeinflusst. Außerdem ist die Speichereinheit auch sehr wirtschaftlich. Sie sind die Vorteile, wenn diese Methode bei großen und komplexen Problemen eingesetzt wird. Mit der Entwicklung elektronischer Computer und der zunehmenden Komplexität wissenschaftlicher und technologischer Probleme wird die Anwendung der Monte-Carlo-Methode daher immer umfangreicher. Es löst nicht nur die schwierigen und komplizierten mathematischen Berechnungsprobleme, wie z. B. multiple Integralberechnung, Differenzialgleichungslösung, Integralgleichungslösung, Eigenwertberechnung und nicht-lineare Gleichungslösung. Darüber hinaus findet es auch in der statistischen Physik, Kernphysik, Vakuumtechnik, Systemwissenschaft, Informationswissenschaft, Versorgungswirtschaft, Geologie, Medizin, Zuverlässigkeit und Informatik sehr viele erfolgreiche Anwendungen [53].

5.2 Graphische Modellierungsmethoden

Die graphischen Modellierungsmethoden ermöglichen eine grafische Darstellung des Systemmodells. Dadurch ist es möglich, komplexe Systeme anschaulich zu analysieren. In den Literaturen [237; 311] wurden vielfältige graphischen Modellierungsmethoden zur Analyse der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit erklärt. Weiter werden die Modellierungsmethoden zusammenfasst aufgelistet.

Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (engl.: Reliability Block Diagramm, RBD) gehört zur Kategorie der kombinatorischen Zuverlässigkeitsmodelle [237 S.21]. Durch das RBD kann die logische Abhängigkeit des Systemzustands von den Zuständen seiner Komponenten beschrieben werden. Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm wird häufig verwendet, um die Systemstruktur oder die Zuverlässigkeitsstruktur graphisch darzustellen. Das folgende Bild 5.3 zeigt beispielhaft ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Serienstruktur mit zwei Komponenten.

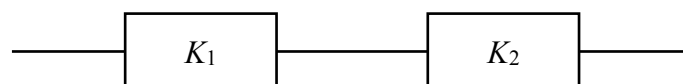


Bild 5.3: Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Serienstruktur mit zwei Komponenten

Fehlerbaum

Der Fehlerbaum (engl.: Fault Tree, FT) stammt aus der Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault Tree Analysis, FTA). Ein Fehlerbaum ist die graphische Darstellung der booleschen Strukturfunktion eines Systems in schnittorientierter Darstellung und zeigt die kombinatorischen Verknüpfungen zwischen einem definierten Top-Ereignis und dessen Ursachen in einem System [4 S. 45].

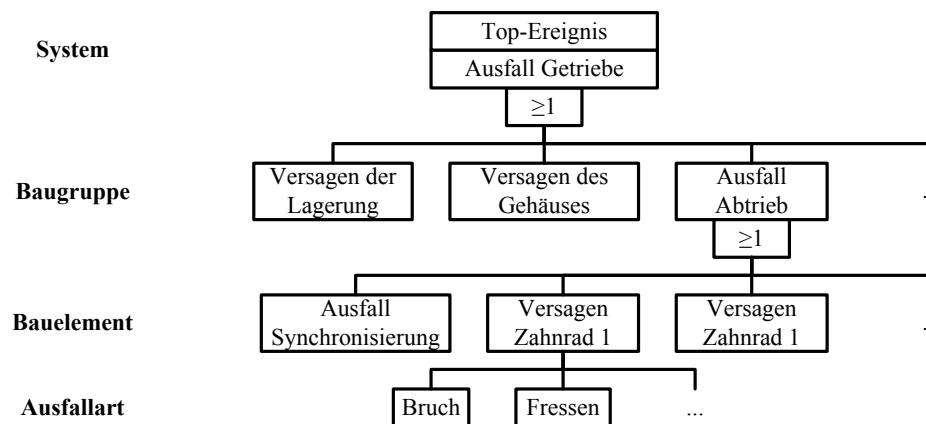


Bild 5.4: Fehlerbaum eines Getriebes in Anlehnung von [4 S. 46] [24 S. 166]

Durch den Fehlerbaum können die logischen Zusammenhänge von Fehlern (Negativlogik) dargestellt werden, die zu einem unerwünschten Top-Ereignis führen. Der Fehlerbaum repräsentiert einen ausfallorientierten Ansatz der Systemmodellierung. Das obenstehende Bild 5.4 stellt einen Fehlerbaum eines Getriebes als Beispiel dar. Das Top-Ereignis (der Ausfall des Getriebes) wird zunächst in einzelne Baugruppen unterteilt. Die Ausfälle der Baugruppen verursachen den Ausfall des gesamten Getriebes und sind durch eine ODER-Verknüpfung verbunden. Dann wird der Ausfall der Baugruppe Abtrieb weiter untersucht. Auf diese Weise können alle möglichen Fehler im System analysiert werden.

Funktionsbaum

Der Funktionsbaum hat im Prinzip die gleiche Vorgehensweise wie der Fehlerbaum. Anstatt die Negativlogik (die Ausfallwahrscheinlichkeit) zu analysieren, wird bei dem Funktionsbaum eine Positivlogik (die Systemzuverlässigkeit) untersucht.

Zuverlässigkeitsgraph

Der Zuverlässigkeitsgraph (engl.: Reliability Graph, RG) beschreibt Systeme anschaulich und wird speziell zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Netzwerken eingesetzt [24 S. 179]. Mit folgendem Bild 5.5 wird ein Zuverlässigkeitsgraph als Beispiel dargestellt. Ein Zuverlässigkeitsgraph ist ein gerichteter azyklischer Graph mit einem Eingangsknoten *EK* und einem Ausgangsknoten *AK* [4 S. 39]. Jeder Block stellt eine Zuverlässigkeitseigenschaft einer Komponente dar. Wenn eine Komponente mehrere unabhängige Ausfallarten hat, kann jede separat durch einen Block dargestellt werden. Der Ausfall einer Komponente wird durch

die Unterbrechung einer Kante gekennzeichnet. Ein System ist dann funktionsfähig, wenn es mindestens einen Kantenzug mit nicht ausgefallenen Komponenten von EK nach AK gibt.

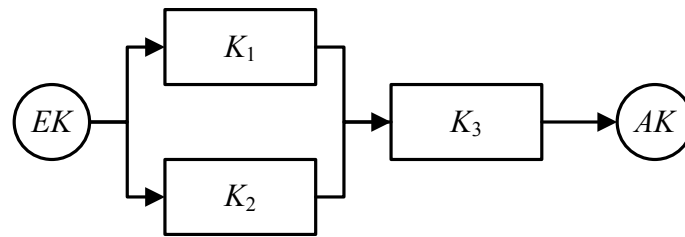


Bild 5.5: Beispiel für einen Zuverlässigkeitsgraph

Markov-Modelle

Die Markov-Modelle stellen eine grundlegende Klasse stochastischer Prozesse dar, die auf Markov-Ketten beruhen [311 S. 13]. Das folgende Bild 5.6 stellt ein Markov-Modell der Zustände einer Maschine dar. Durch die Markov-Modelle können die möglichen Zustände und die möglichen Übergänge zwischen den Zuständen in einem System dargestellt werden. Die Zustandsgraphen verwenden Knoten und Kanten zur grafischen Darstellung der Systeme. Die Knoten geben die möglichen Zustände des Systems an. Die gerichteten Kanten sind mit Übergangsraten gekennzeichnet und beschreiben die möglichen Zustandsübergänge. Die Markov-Modelle sind nur für die Systeme verwendbar, deren Komponenten konstante Ausfall- und Reparaturraten besitzen.

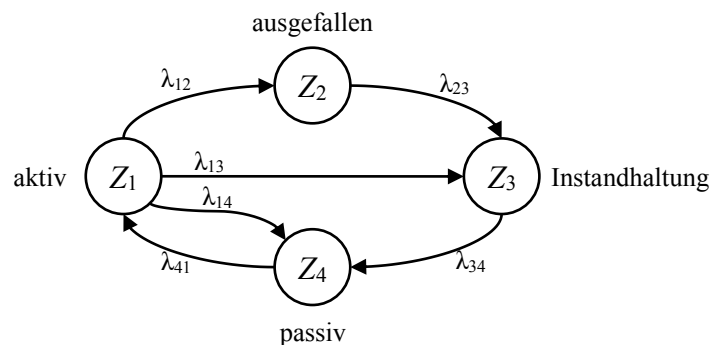


Bild 5.6: Markov-Modell der Zustände einer Maschine

Reward-Modelle

Die Reward-Modelle erweitern durch die sogenannte Erlösfunktion (Reward-Funktion) ein Grundmodell. Mit der Erlösfunktion können die Zustände und die Zustandsübergänge mit einem bestimmten Erlös verknüpft werden. Das Markov-Reward-Modell (MRM) und das stochastische Reward-Netz (SRN) gehören zu dieser Kategorie [237 S. 37].

Warteschlangenmodelle

Warteschlangenmodelle sind eine der ältesten und bekanntesten Modellierungskonzepte. Heute finden Warteschlangenmodelle in unterschiedenen Bereichen Anwendung. Besonders in der Logistik und Produktion werden die sehr häufig verwendet. Mit den Warteschlangenmodellen können die Warteschlangenaspekte beschrieben werden. Das folgende Bild 5.7 stellt ein Warteschlangenmodell einer Produktionsanlage als Beispiel dar.

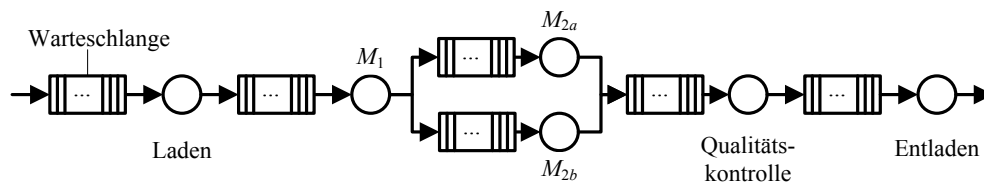


Bild 5.7: Warteschlangenmodell einer Produktionsanlage

Quelle: in Anlehnung von [311 S. 12]

In den Warteschlangen warten die ankommenden Objekte. Mit Warteschlangennetzen können komplexe Systeme modelliert werden. Zur Modellierung der Konflikt- und Konkurrenzsituationen werden zusätzliche Angaben, wie Prioritäten, zu den Warteschlangenmodellen ergänzt. Das Modell „Warteschlange“ und das Warteschlangen-Petrinetz zählen zu den Warteschlangenmodellen.

- **Warteschlange** (engl.: Queue, Q): Eine Warteschlange beschreibt ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell, in dem sich mehrere Nutzer gemeinsame Ressourcen teilen [237 S. 38]. Nach der sogenannten „Warteschlangendisziplin“ werden die wartenden Nutzer bedient.
- **Warteschlangen-Petrinetz** (engl.: Queueing Petri Net, QPN): Das Warteschlangen-Petrinetz ist eine Kombination von Petrinetzen und Warteschlangen.

In der folgenden Tabelle werden die Warteschlangendisziplinen der Warteschlangentheorie vorgestellt [90].

Tabelle 5.1: Warteschlangendisziplinen der Warteschlangentheorie

Abkürzung	Warteschlangendisziplin	Erklärung
FIFO	First In, First Out	Die Bedienung erfolgt in der Reihenfolge der Ankünfte.
LIFO	Last In, First Out	Die Bedienung erfolgt in umgekehrter Ankunftsreihenfolge.
SIRO	Selection In Randon Order	Die Bedienung erfolgt nach zufälliger Auswahl.
PRI	Priority	Die Bedienung erfolgt nach extern vorgegebenen Prioritäten.

Dynamische Warteschlangenmodelle

Die komplexen Warteschlangennetzwerke können meist durch die Simulation analysiert werden. Dadurch wird das zeitliche Verhalten der Kenngrößen des Warteschlangenmodells explizit erfasst. Das heißt, wenn die deterministischen Zugangsraten und Bedienraten bestimmt werden, kann das komplexe Verhalten eines Produktionssystems durch Warteschlangenmodelle analysiert werden. *Dooley* und *Benjaafar* [66] bauen ein Warteschlangenmodell auf und simulieren ein einfaches Produktionssystem. Dabei lässt sich der Teilezugang durch eine stochastische Verteilung modellieren. Die Zeitreihen der Durchlaufzeit und der Abgangsintervalle werden durch eine Variante der Versatzzeitmethode in einem zweidimensionalen Zustandsraum aufgetragen. Dabei berechnet es für die entsprechenden Strukturen Lyapunov-Exponenten und Korrelationsdimensionen [66]. Außerdem wird ein deterministisches Warteschlangenmodell eines Produktionssystems mit Materialrückflüssen von *Beaumariage* und *Kempf* [21] simuliert. Performance und Dynamik des Modells werden untersucht. Damit können der Einfluss von unterschiedlichen Freigaberegeln und Prioritätsregeln sowie von verschiedenen Anfangsbedingungen und Störungen auf die Durchlaufzeiten und die Abgangsintervalle analysiert werden. Das Ergebnis zeigt, dass kleine Änderungen der Steuerungsregeln oder Warteschlangenzustände zu großen Effekten hinsichtlich der Komplexität von Abgangsintervallen und der Durchlaufzeiten führen. Dieses Verhalten wird als Chaos bezeichnet. Darüber hinaus besteht es auch ein anderes Ergebnis, dass die Komplexität der Abgangsintervalle durch sowohl Verminderung der Belastung des Systems als auch Auflösung der Materialrückflüsse stark abgenommen werden kann. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss auf die Durchlaufzeiten davon unabhängig [21]. Mit Warteschlangenmodelle modelliert *Katzorke* [149] ein dynamisches Arbeitssystem mit Materialrückflüssen. Dabei werden zwei unterschiedliche Produkte in zwei Fertigungsstufen bearbeitet. Für das System ergeben sich drei qualitativ verschiedene Modi wie unter-, aus- und überbalanciert, welche abhängig von den Verhältnissen zwischen Freigabeperiode und Bearbeitungszeit des jeweiligen Teils sind. Die Ergebnisse sind so dargestellt, dass durch die Berechnung der Autokorrelationsfunktionen der Symbolreihen sowohl das unterbalancierte System als auch das ausbalancierte System quasiperiodisches Verhalten zeigen. Im Gegensatz dazu zeigt das überbalancierte System eine Autokorrelationsfunktion, welche auf eine komplexere Dynamik als Quasi-Periodizität geschlossen wird.

Structured Analysis and Design Technique

Die Structured Analysis and Design Technique (SADT) wurde in den 80er Jahren von *D.T. Ross* als grafisches Beschreibungsmittel für komplexe Systeme entwickelt, mit dem sowohl Funktionen als auch Datenströme abgebildet werden können [311 S. 7]. Sie ist für eine graphische Darstellung von funktionalen Abläufen geeignet. SADT gliedert sich in Funktions- bzw. Aktivitätsmodell und ein Datenmodell. Die Aktivitäten, die durch Menschen, Maschinen, Rechner oder Algorithmen wahrgenommen werden, lassen sich mit dem Aktivitätsmodell modellieren. Und die für die Modellierung von Aktivitäten verwendeten Daten, Objekten und Gegenständen werden mit Datenmodell modelliert. In einem SADT-Diagramm werden nur logische Verknüpfungen, aber keine zeitlichen Abläufe dargestellt, deshalb können die dynamischen Veränderungen nicht modelliert werden.

Ereignisgesteuerte Prozessketten

Die Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) ist ein weiteres Beschreibungsmittel zur Darstellung von Abläufen. Eine EPK besteht aus drei Komponenten: den Ereignissen, den Funktionen und den Verknüpfungen [311 S. 8]. Die Ereignisse und die Funktionen können miteinander verknüpft werden. Die Verknüpfungen sind AND-, OR-, und XOR-Verknüpfung. Der zeitliche Ablauf von Prozessen kann mithilfe der EPK einfach und verständlich dargestellt werden. EPK kann ein System nur bis zu einem begrenzten Detaillierungsgrad darstellen und ist für komplexe Prozessabläufe nicht geeignet.

Diskrete Ereignis-System-Spezifikation

Diskrete Ereignis-System-Spezifikation (DEVS: Discrete Event System Specification) [152] ist ein modularer und hierarchischer Formalismus zur Modellierung und Analyse allgemeiner Systeme, bei denen es sich um diskrete Ereignissysteme handeln kann, die durch Zustandsübergangstabellen beschrieben werden können, und um Systeme mit kontinuierlichem Zustand, die durch Differenzialgleichungen beschrieben werden können, sowie um hybride Systeme mit kontinuierlichem Zustand und diskretem Ereignis. DEVS ist ein zeitgesteuertes Ereignissystem.

Programmablaufplan

Der Programmablaufplan (PAP) [311 S. 8] stellt die logische Reihenfolge der zu Lösung einer Problemstellung erforderlichen Schritte dar. Das Beschreibungsmittel ist eine Anzahl von Symbolen für Ein- und Ausgabe und Verzweigungen. Die Symbole sind mit Pfeilen verbunden, deren Richtung die Ablaufrichtung angibt. Bei der Erstellung wird nur der schrittweise Ablaufweg dargestellt. Die Ablaufpläne von größerem Problem können in mehreren Schritten erstellt werden. Die Programmablaufpläne wurden für lineare Programmierung entworfen und sind deshalb für strukturierte oder objektorientierte Modellierung von komplexen Problemen nicht geeignet.

Unified Modeling Language

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine semi-formale Sprache zur Spezifikation, Visualisierung, Konstruktion und Dokumentation von Softwaresystemen und auch Geschäftsmodellen [311 S. 10]. Für die Analyse steht eine Vielzahl von Diagrammen zur Verfügung. Die Diagramme können in zwei Gruppen unterteilt werden: statische Modelle (Strukturmodelle) und dynamische Modelle (Verhaltensmodelle). Die statischen Modelle dienen zur Abbildung der Struktur von Objekten in einem System. Die dynamischen Modelle sind für die Abbildung des Verhaltens der Objekte in einem System gebaut. Mithilfe der UML können verschiedene Diagramme erstellt werden, um Hierarchien, Aktivitäten, parallele und sequentielle Abläufe und Zustände und zeitliches Systemverhalten darzustellen. Die Zustands- und Aktivitätsdiagramme sind verwandt mit den Petrinetzen und können in die Petrinetze übersetzt werden [311 S. 11].

Wirkmodell

Ein Wirkmodell [221] kann alle theoretisch mögliche Verbindungen von Produktionssystemebenen, Wandlungsbefähigern und Rezeptoren ableiten. Für die Beschreibung und Strukturierung besteht das Wirkmodell aus vielen Kuben. Jeder Würfel des Kubus beschreibt einen spezifischen Wirkzusammenhang. Zur Reduzierung der Komplexität der Wirkzusammenhänge werden die unzulässigen Kombinationen im Vorhinein ausgeschlossen. Dabei wird die Eigenschaft der Mobilität für technische Ressourcen aufgewiesen. Aber bei einem Organisationsmodell ist es in der Fabrik jedoch nicht möglich. Die Kombination kann daher aus den Betrachtungen ausgeschlossen werden [221].

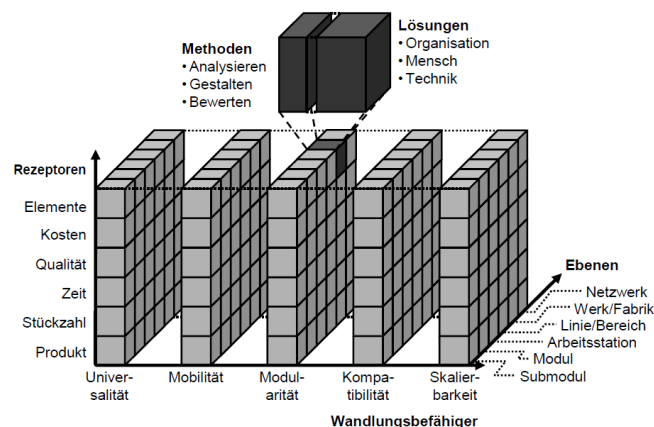


Bild 5.8: Wirkmodell der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems[221]

ECSPN

Die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (ECSPN, engl.: Extended Coloured Stochastic Petri Nets) [237] vereinen die Eigenschaften aus den erweiterten stochastischen Petrinetzen und den farbigen Petrinetzen. Mathematisch wird ein ECSPN nach [237] wie folgt als n -Tupel definiert:

$$ECSPN = (\Sigma, V, GV, CC, P, PC, QP, TR, G, D, FP, \Pi, W, A, AT, E, AF, I, IGV, ICC, CV, CF, RP, RPP, RT, RTTR), \quad (5.3)$$

wobei:

- $\Sigma = \{\sigma_i\}$, $i=1(1)N_\Sigma$, eine Menge von Farben σ , die den Typ „bool“, „int“, „real“, „string“ und „product“ besitzen,
- $V = \{v_i\}$, $i=1(1)N_V$, eine Menge von lokalen Variablen v ,
- $GV = \{gv_i\}$, $i=1(1)N_{GV}$, eine Menge von globalen Variablen gv ,
- $CC = \{cc_i\}$, $i=1(1)N_{CC}$, eine Menge von Kostenvariablen cc , in denen zeitabhängige, stückzahlabhängige und fixe Kosten zusammengeführt werden können,
- $P = \{p_i\}$, $i=1(1)N_P$, eine endliche Menge von Stellen p , die mit Marken belegt sein können,

- $PC: P \rightarrow \Sigma$, eine Farbenfunktion, die einer Stelle eine bestimmte Farbe zuordnet, welche Element der deklarierten Farbenmenge Σ ist,
- $QP: P \rightarrow \{\text{"Normal"}, \text{"FIFO"}, \text{"FIFO with Priority"}\}$, eine Funktion, die einer Stelle eine von drei Warteschlangendisziplinen zuordnet,
- $TR = \{tr_i\}, i=1(1)N_{TR}$, eine endliche Menge von Transitionen, die entweder unmittelbar oder zeitbehaftet sind,
- G , eine Funktion, die den Transitionen eine von TR definierte boolesche Wächterfunktion zuweist,
- $D: TR \rightarrow \{T_D, F_D(t)\}$, eine Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen eine Schaltverzögerung d zuweist; dies kann ein deterministischer (konstanter) Wert T_D oder eine Verteilungsfunktion $F_D(t)$ mit den entsprechenden Parametern sein,
- $FP: TR \rightarrow \{\text{"Enabling Memory"}, \text{"Age Memory"}, \text{"Age Influence"}\}$, eine Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen ein Schaltverfahren zuweist,
- $\Pi: TR \rightarrow \mathbb{N}_0$, eine Funktion, die den Transitionen eine Schaltpriorität zuweist,
- $W: TR \rightarrow \mathbb{N}$, eine Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen ein Gewicht zur Bestimmung der Schaltwahrscheinlichkeit zuweist,
- $A = \{a_i\}, i=1(1)N_A$, eine endliche Menge von Kanten a , mit $A = (P \times TR) \cup (TR \times P)$, d. h. eine Kante verbindet entweder eine Stelle mit einer Transition (Pre-Kante) oder eine Transition mit einer Stelle (Post-Kante),
- $AT: A \rightarrow \{\text{"Normalkante"}, \text{"Lesekante"}, \text{"Verbotskante"}\}$, eine Funktion, die den Kanten eine Kanteneigenschaft zuweist,
- E , eine Funktion, die den Kanten eine Kantenausdrucksfunktion zuweist mit $E \in [A \rightarrow \mathbb{N}]$, d. h. jede Kante hat ein ganzzahliges Attribut größer Null,
- $AF: A \rightarrow \{\text{"AgeEnter=v"}, \text{"Priority=v"}, \text{"Set(gv=x)}\}$ mit $x \in \mathbb{N}_0$, eine Funktion, die den Kanten eine Kantenfunktion zuweist,
- I , eine Initialisierungsfunktion von P mit $I \in [P \rightarrow \mathbb{N}_0]$, d. h. jede Stelle hat ein ganzzahliges Attribut, welche die Zahl der Marken für die Anfangsmarkierung des Petrinetzes bezeichnet,
- $IGV: GV \rightarrow \mathbb{N}_0$, eine Initialisierungsfunktion der globalen Variablen,
- $ICC: CC \rightarrow \mathbb{R}$, eine Initialisierungsfunktion der Kostenvariablen,
- CV , eine Funktion, die den Stellen und Transitionen eine Kostenvariable zuweist,
- CF , eine Funktion, die den Stellen und Transitionen einen Kostenfaktor zuweist,
- $RP = \{rp_i\}, i = 1(1)N_{RP}$, eine endliche Menge von Referenzstellen rp ,
- $RPP: RP \rightarrow P$, eine Funktion, die einer Referenzstelle eine bestimmte Stelle zuordnet,
- $RT = \{rt_i\}, i = 1(1)N_{RT}$, eine endliche Menge von Referenztransitionen rt ,
- $RTTR: RT \rightarrow TR$, eine Funktion, die einer Referenztransition eine bestimmte Transition zuordnet.

Nach [237] erfolgt die Modellierung des ECSPN über:

- Deklarationen mit den Variablen Σ, V, GV und CC ,
- eine symbolische Darstellung von den Stellen P , Referenzstellen RP , Transitionen TR , Referenztransitionen RT und Kanten A sowie deren Eigenschaften QP und AT mithilfe von Netzgraphen,

- Netzbeschriftungen mit PC , I , QP , CV und CF für die Stellen P , RPP für die Referenzstellen RP , mit G , D , FP , W , II , CV und CF für die Transitionen TR , $RTTR$ für die Referenzstellen RT und mit E und AF für die Kanten A .

Die Anwendungen der ECSPN sind in den Literaturen [237; 252; 311] vorgestellt.

Verbundene Modellierung

Die verbundene Modellierung (CSM) [238] bedeutet die Kombination von verschiedenen optimalen Modellierungsmethoden zur Beschreibung von unterschiedlichen Aspekten eines Systems. Dabei gibt es ein Beispiel: Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (RBD) kann die Zuverlässigkeitsstruktur eines Systems am besten darstellen. Und das erweiterte farbige stochastische Petrinetz (ECSPN) ist in der Lage, die Zustandsaspekte, die zeitlichen Abläufe sowie die Ausfall- und Instandhaltungsabhängigkeiten am besten darzustellen. So entstand die verbundene Modellierung des realitätsnahen Systemmodells (engl.: Conjoint System Modell, CSM).

5.3 Bewertung der Methoden

Die in vorherigen Abschnitten vorgestellten Modelle und Methoden wurden zur Berücksichtigung vielfältiger Aspekte unter verschiedenen Gesichtspunkten entwickelt. Für eine realitätsnahe Modellierung der Produktionssysteme bzw. die Ermittlung der Verfügbarkeitskennwerte müssen sämtliche Aspekte berücksichtigt werden, die unmittelbar oder mittelbar auf die Produktionssysteme bzw. deren Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit beeinflussen können. Die bisher bekannten Modellierungsmodelle und -methoden können eingeschränkt oder nicht optimal für die Modellierung der Produktionssysteme eingesetzt werden. Daher ist es nötig, zuerst die Modellierungsmodelle und -methoden nach den wichtigen Modellierungsaspekten der Produktionssysteme zu bewerten, um passende Methoden auszuwählen. Danach werden die ausgewählten Methoden weiter untersucht und ggf. erweitert. Durch die Analyse der Modellierungsmethoden ist es auch möglich, neue Idee oder Methode zu entwickeln.

Denn die mathematischen Modelle und Methoden setzen stark Vereinfachungen voraus und haben meist Beschränkungen, sie werden hier nicht weiter behandelt. Zur Bewertung werden die graphischen Modellierungsmethoden ausgewählt. Einige Petrinetze, die eng mit der Produktionssysteme verbunden sind, werden auch behandelt. Bei der Bewertung werden die Abkürzungen der Modellierungsmethoden verwendet. In folgender Tabelle 5.2 werden die Abkürzungen erklärt.

Tabelle 5.2: Übersicht der Abkürzungen der Modellierungsmethode

Abkürzung	Modellierungsmethode	Abkürzung	Modellierungsmethode
RBD	Zuverlässigkeitsblockdiagramm	Q	Warteschlange
FT	Fehlerbaum	DQ	Dynamische Warteschlangenmodelle
FB	Funktionsbaum	WM	Wirkmodell
RG	Zuverlässigkeitsgraph	ECSPN	Erweiterte farbige stochastische Petrinetze
Markov	Markov-Modelle	CSM	Verbundene Modellierung
Reward	Reward-Modelle	CPS	Care pathway simulator
SADT	Structured Analysis and Design Technique	ED	Enterprise Dynamics
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten	MSS	Micro Saint Sharp
DEVS	Diskrete Ereignis-System-Spezifikation	MS4 Me	MS4 Modeling Environment
PAP	Programmablaufplan	Plant	Plant Simulation
UML	Unified Modeling Language		

Die Modellierungsaspekte der Produktionssysteme werden im Kapitel 3.6 detailliert behandelt. Zur Bewertung der vorgestellten Modellierungsmethoden werden auf Basis der Literatur [173] einige wichtigen Aspekte ausgewählt und erweitert.

5.3.1 Bewertung nach Modellierungsaspekten

Die Tabelle 5.3 stellt die Bewertung der Methoden nach den grundlegenden Modellierungsaspekten dar. Es ist zu erkennen, dass die grafischen Methoden ähnliche Benutzungsfähigkeiten haben.

Tabelle 5.3: Bewertung nach Modellierungsaspekten

Modellierungsmethoden		Bewertungskriterien															
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM
Grundlegende Modellierungsaspekte	Benutzerfreundlichkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Wiederholbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Übersichtlichkeit	+	+	+	+	0	0	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+
	Übertragbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Anpassungsfähigkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Überprüfbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Konfigurierbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

5.3.2 Bewertung nach Modellierungsebene

Tabelle 5.4 beinhaltet die Bewertung der Methoden nach den Modellierungsebenen.

Tabelle 5.4: Bewertung nach Modellierungsebene

Modellierungsmethoden		Bewertungskriterien															
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM
Modellierungsebene	Komponenten-ebene	Anzahl und Typ der Elemente	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		Kompetenz des Elements	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+	+
		Aufgabenvielfalt des Elements	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+	+
		Verantwortung des Elements	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+	+
		Vernetzungsgrad des Elements	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+	+
	Systemebene	Dezentralisierungsgrad	-	-	-	-	0	0	-	-	0	0	0	0	+	+	+
		Integrationsgrad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		Modularisierungsgrad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+
		Abhängigkeiten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+
		Wechselwirkungen	-	0	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	+	+

Die Methoden WM, ECSPN und CSM haben im Vergleich zu anderen Methoden deutliche Vorteile bei der Beschreibung von Modellierungsebenen, denn sie die Eigenschaften der Elemente detailliert beschreiben können.

5.3.3 Bewertung nach Modellierungselemente

Die Fähigkeiten der Methoden zur Beschreibung der grundlegenden Modellierungselemente sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Bewertung nach Modellierungselemente

Modellierungsmethoden		Bewertungskriterien																
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM	
Modellierungselemente	Ablauf	Materialfluss	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Informationsfluss	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Zeitlicher Ablauf	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	0	+	+
		Prozessablauf	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Funktionsablauf	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Betriebsablauf	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	Struktur	Systemstruktur	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Funktionsstruktur	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Zuverlässigkeitsstruktur	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Produktionsstruktur	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
		Hierarchie	-	-	-	-	0	0	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+
	Zustand	Systemzustand	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
		Komponentenzustand	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
		Zustandsänderung	-	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
		Zustandsübergang	-	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
		Konstante Ausfallraten	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+
		Zeitabhängige Ausfallraten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	+	+	+
		Zeitabhängige Übergangsraten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	+	+	+
	Regel	Konkurrenz	-	-	-	-	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+
		Warteschlange	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+
		Nebenläufigkeit	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
		Synchronisation	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
		Priorisierung	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+
		Gewichtung	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	+	+	+
	Parameter	Unschärfe Information	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		Dynamische Werte	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	+	-	+	+	+	+
		Deterministische Prozesse	-	-	-	-	+	+	+	+	-	0	+	-	+	+	+	+
Stochastische Prozesse		-	-	-	-	+	+	0	0	-	-	0	-	-	+	+	+	
Nichtlineare Dynamik		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	

Generell können die meisten Methoden die Aspekte Ablauf, Struktur und Zustand gut modellieren. Die Unterschiede liegen in den Modellierungsfähigkeiten für Zustandsänderung, Regeln und dynamische Parameter. Im Vergleich zu anderen Methoden haben WM, ECSPN und CSM ein Element zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens und deshalb ihre Vorteile.

5.3.4 Bewertung nach Kenngrößen des Produktionssystems

Durch die Bewertung nach Kenngrößen des Produktionssystems können die quantitativen Aspekte eines Produktionssystems betrachtet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.6 beschrieben. Mit dem Element zur Modellierung von dynamischen Verhalten haben WM, ECSPN und CSM die Vorteile.

Tabelle 5.6: Bewertung nach Kenngrößen des Produktionssystems

Modellierungsmethoden		Bewertungskriterien																
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM	
Kenngrößen des Produktionssystems	Zeit	Globale Zeit	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	+	-	+	+	+	+
		Schaltdauer	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	+	-	+	+	+	+
		Lebensdauer	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	0	-	+	+	+	+
		Instandhaltungsdauern	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	0	-	+	+	+	+
		Produktionsdauer	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	0	-	+	+	+	+
	Produktivität		-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	+	+	+
	Zuverlässigkeit		+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
	Verfügbarkeit		-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	+	+	+
	Kosten		-	-	-	-	0	+	0	0	-	-	-	-	0	+	+	+
	Kapazität		-	-	-	-	0	+	+	+	-	-	-	-	0	+	+	+

5.3.5 Bewertung nach Intelligenz

Die Aspekte Vernetzung, Kommunikation, Selbständigkeit und Veränderungsfähigkeit sind berücksichtigt bei der Bewertung nach Intelligenz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.7 vorgestellt.

Die Vernetzung, Kommunikation und Veränderungsfähigkeiten können mit WM, ECSPN und CSM modelliert werden. Die Selbständigkeit ist noch eine Herausforderung für alle Methoden. Es ist zu erkennen, dass ECSPN und CSM das Potenzial zur Modellierung der Selbständigkeit haben. Denn die beiden Methoden verfügen über die Elemente und die Fähigkeit zur Beschreibung von diversen Regeln und Algorithmen.

Tabelle 5.7: Bewertung nach Intelligenz

Modellierungsmethoden		Bewertungskriterien																
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM	
Anforderung an Intelligenz	Vernetzung und Kommunikation	Identifizierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
		Echtzeit-Lokalisierung	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	-	-	+	+	+
	Selbständigkeit	Erkennungsfähigkeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+	
		Selbstlernen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
		Selbststeuerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
		Selbstoptimierung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
		Selbstentscheidungsfindung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
		Selbstorganisation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
		Selbstkalibrierung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
		Selbstheilung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
	Qualitätskontrolle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
	Veränderungsfähigkeit	Rekonfigurierbarkeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		Flexibilität	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		<i>Struktur</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		<i>Variant</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		<i>Stückzahl</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		<i>Materialfluss</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		Wandlungsfähigkeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
		<i>räumlich</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>strukturell</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	
<i>technisch</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+		
<i>zeitlich</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+		

5.3.6 Bewertung nach Aktivitäten und Maßnahmen

Die Bewertungsergebnisse nach Aktivitäten und Maßnahmen sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Die meisten Methoden haben die Fähigkeit, die Betriebsstrategie und Instandhaltung zu modellieren.

Bei der Beschreibung von Maschinenausfällen wie Alterung und Verschleiß, Verbesserungsmaßnahmen und Produktionsstrategie sind dynamische Verhalten und die Kenngrößen der Produktionssysteme zu berücksichtigen. Dafür sind die Methoden WM, ECSPN und CSM geeignet.

Tabelle 5.8: Bewertung nach Aktivitäten und Maßnahmen

		Modellierungsmethoden																	
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM		
Bewertungskriterien																			
Aktivitäten und Maßnahmen	Betriebsstrategie	Integration	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+	+	+
		Kooperation	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
	Echtzeit-Überwachung		-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	0	-	0	+	+	+	
	Ausfällen	Alterung	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	-	-	+	+	+	
		Verschleiß / Abnutzung	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	-	-	+	+	+	
	Verbesserungsmaßnahmen	Designverbesserung	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	-	0	+	+	+	
		Betriebsverbesserung	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	-	0	+	+	+	
		Erneuerungsgrad	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	-	0	+	+	+	
	Instandhaltungsebene	Instandhaltungsstrategie	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
		Instandhaltungsprozess	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
		Instandhaltungsabhängigkeiten	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
	Produktionsstrategie	Kostenorientierte Produktion	-	-	-	-	-	-	0	+	-	-	-	-	0	+	+	+	
		Lieferzeit-orientierte Produktion	-	-	-	-	-	-	0	+	-	-	0	-	0	+	+	+	
		Kapazität-orientierte Produktion	-	-	-	-	0	0	+	+	+	0	0	-	0	+	+	+	

5.3.7 Bewertung nach Simulationsaspekten

Die Simulationsaspekte beinhalten die Benutzungsfreundlichkeit der Software und die Fähigkeit zur Darstellung der Ergebnisse. Diese Aspekte sind in überwiegendem Maße von der Software abhängig.

Tabelle 5.9: Bewertung nach Simulationsaspekten

		Modellierungsmethoden																
		RBD	FT	FB	RG	Markov	Reward	Q	DQ	SADT	EPK	DEVS	PAP	UML	WM	ECSPN	CSM	
Bewertungskriterien																		
Simulations-ebene	Konfigurationsfähigkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Datenanalyse	-	-	-	0	0	0	+	+	0	-	0	-	0	+	+	+	
	Fehlerfindung	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	
	Genauigkeit	0	0	0	0	0	0	+	+	-	-	-	-	-	0	+	+	
	Aufwand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	

5.4 Zusammenfassung der Methoden und Bewertungen

In vorherigen Abschnitten werden die Modellierungsmethoden nach den ausgewählten Aspekten bewertet. Durch die Bewertungen ist es zu erkennen, dass die Petrinetze bessere Eigenschaften für die Modellierung der Produktionssysteme als andere Methoden haben. Dabei sind die Methoden ECSPN und CSM besonders für die Modellierung der Produktionssysteme geeignet. Die ECSPN und CSM können im Allgemeinen die meisten Anforderungen und Eigenschaften berücksichtigen. Die CSM sind verbundene Modelle aus RBD und ECSPN. Deshalb werden die ECSPN zuerst für die Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0 ausgewählt.

6 Modelle und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Modelle zur Analyse der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in Industrie 4.0 vorgestellt. Einige wichtigen Aspekte werden in separaten Grundmodellen behandelt. Anschließend werden die Ergebnisse erläutert.

6.1 Analytische Vorgehensweise

6.1.1 Bewertung der Kundenanfragen mit neuen Herausforderungen

Herkömmliche Methode zur Kalkulation der Kundenanfragen

Wenn ein Hersteller eine Anfrage von einem Kunden bekommt, hilft erst der Break-even-point (siehe Bild 6.1) bei der Entscheidungsfindung, ob die Anfrage angenommen werden kann. Die Stückkosten und die Menge lassen sich grob nach Bild 6.2 abschätzen. Diese vereinfachte Methode ist zum einen erfahrungsabhängig, zum anderen nur für Serienprodukte gültig.

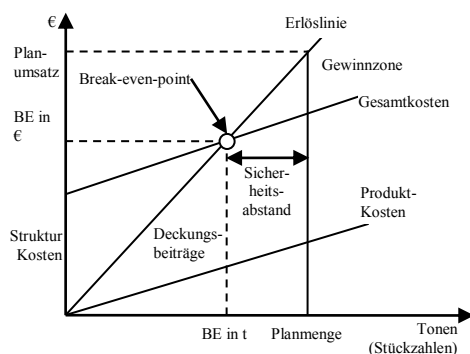


Bild 6.1: Break-even-point für die Entscheidung von Kundenanfragen

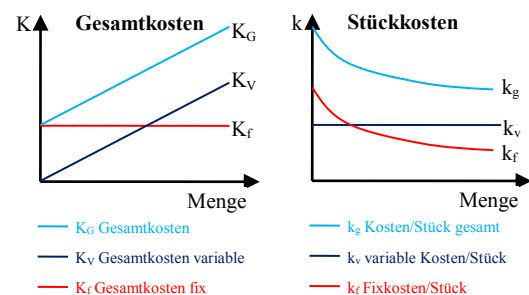


Bild 6.2: Stückkosten und Gesamtkosten

Für neue oder ähnliche, aber anzupassende Produkte sind viel mehr Aspekte bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Beispiele sind die Entwicklungskosten, die Herstellbarkeit. Des Weiteren steht man vor einem Trend, Anfrage mit variantenreichen Produkten und kleiner Losgröße zu bekommen. Für die Entscheidungsfindung solcher Anfrage wird neue Methode zur Kalkulation der Wirtschaftlichkeit benötigt.

Verteilung der Anforderungen

In erster Linie sind die Anforderungen zu analysieren. Die Anforderungen können wie in Bild 6.3 dargestellt, in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen verteilt werden.

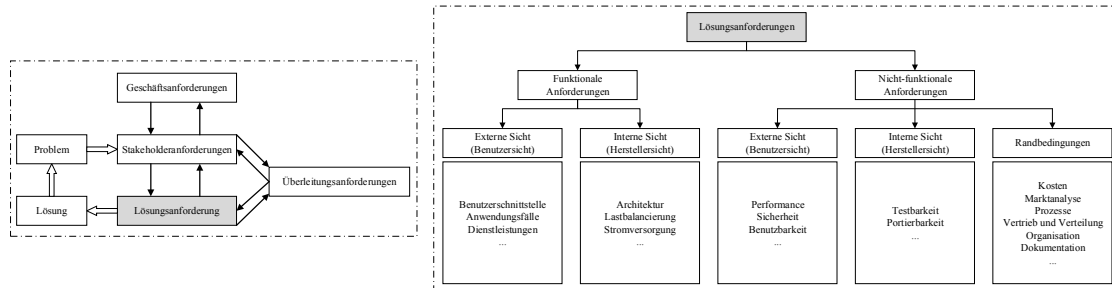


Bild 6.3: Verteilung der Anforderungen in interne und externe Sicht

Hinsichtlich der Nutzer und Hersteller sind unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen, siehe Bild 6.4.

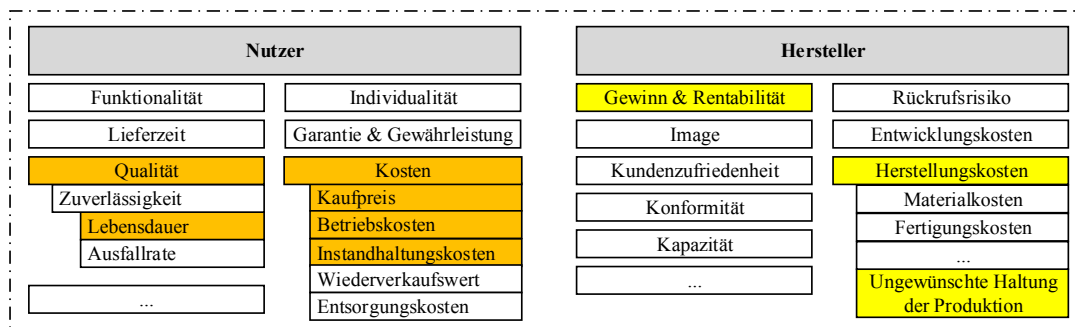


Bild 6.4: Unterschiedliche Aspekte von Nutzer und Hersteller

In Bezug auf den Produktlebenszyklus sind mehr Aspekte bei der Produktentwicklung, Produktherstellung und Produkthanwendung zu betrachten. Bild 6.5 stellt die Designauswirkungen der Produkteigenschaften in der Entwicklung auf die Herstellung, Verwendung und Instandhaltung dar. Die Verfügbarkeit einer Maschine ist zum einen von der inhärenten Zuverlässigkeit, die bei der Entwicklung und Herstellung festgelegt wird, zum anderen von der Zuverlässigkeit der Anwendung abhängig.

Nach den Maschineneigenschaften können unterschiedliche Anwendungsstrategien festgelegt werden. Darauf kann man entsprechende Instandhaltungsstrategie verwenden.

Um die Verfügbarkeit der Maschine analysieren zu können, muss man die Produkteigenschaften bei den Design- und Herstellungsprozessen berücksichtigen. Weiter sind die Anwendungsfälle und die Instandhaltung zu berücksichtigen.

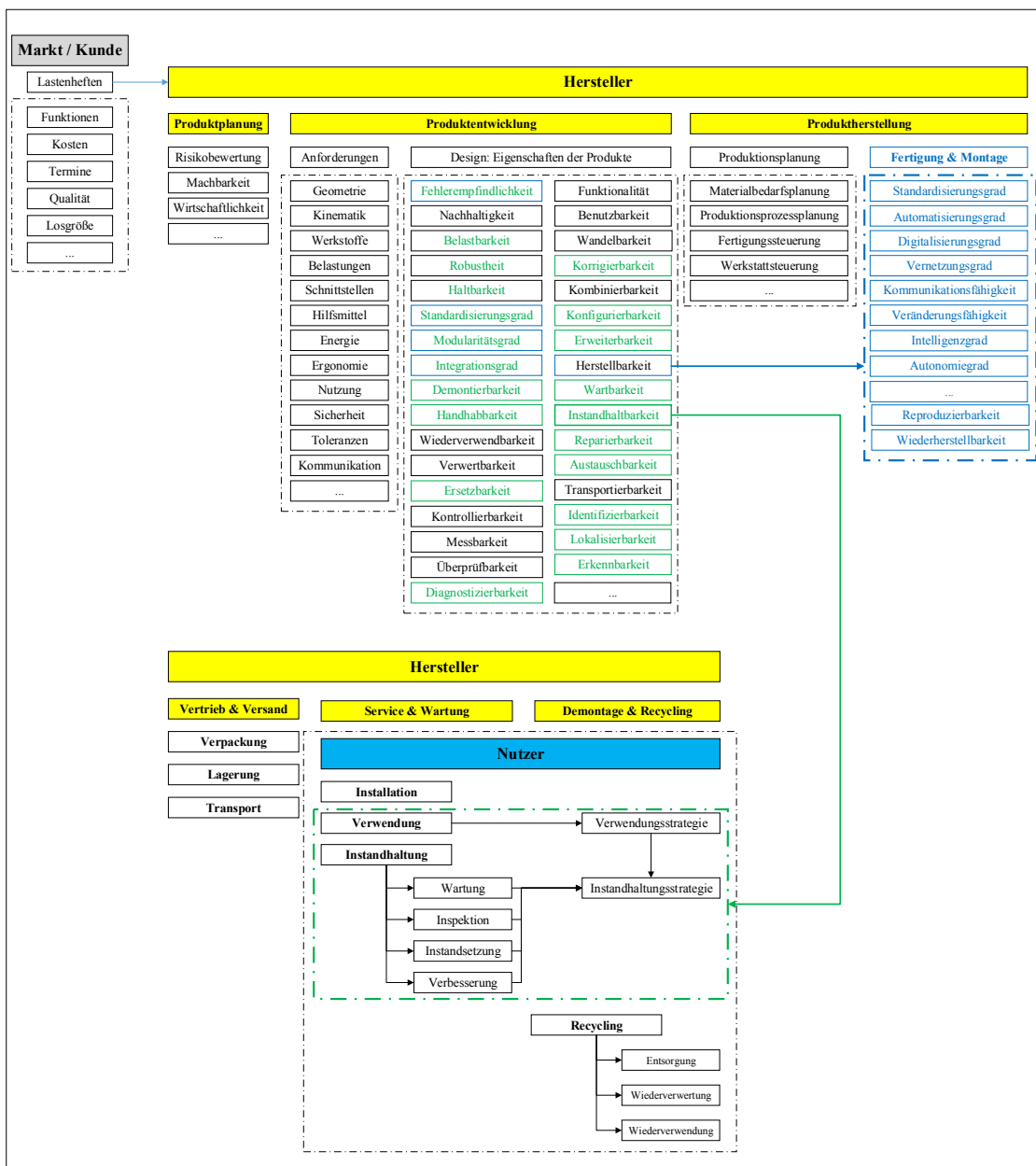


Bild 6.5: Designauswirkungen der Produkteigenschaften in der Entwicklung auf die Herstellung, Verwendung und Instandhaltung

Neue Herausforderungen

Die erste Herausforderung besteht darin, die Entwicklung der neuen oder anzupassenden variantenreichen Produkte zeitlich und wirtschaftlich zu kalkulieren.

Generell ist ein Produkthersteller ein (kleines) Teil der Lieferkette. Wenn ein Hersteller ein Produkt A (eine Maschine oder Werkzeug etc.) verwendet, um ein Produkt B herzustellen, ist der Hersteller von Produkt B, wie im folgenden Bild 6.6 dargestellt, selbst der Verwender von Produkt A. Zwischen dem Hersteller und Verwender werden die Anforderungen wie Kosten,

Lieferzeit, Qualität etc. im Vertrag vereinbart. In diesem Kontext sind die Entwicklungszeit und -kosten eines Herstellers nicht nur von internen Faktoren, sondern auch von den Lieferanten abhängig.

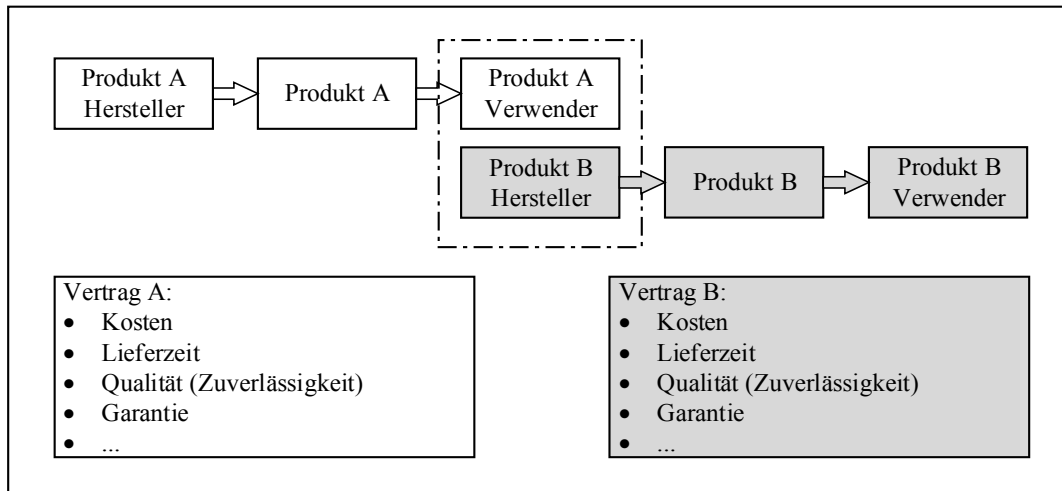


Bild 6.6: Position des Herstellers in der Lieferkette

Weitere Herausforderung liegt bei der Herstellung der Produkte. Vor der Herstellung sind noch Entscheidungen zu treffen.

Mindmap für die Entscheidungsfindung der Kundenanfragen

Im Bild 6.7 ist die Logik für die Entscheidungsfindung der Kundenanfragen dargestellt. Neben wirtschaftlicher Aspekt sind die technischen und organisatorischen Aspekte zu berücksichtigen. Alle Möglichkeiten wie Beschaffung neuer Maschine oder Produktionslinien, Anpassung der vorhandenen Maschinen und Produktionslinien und Wiederverwendung gebrauchter Maschine als Ersatzteile können untersucht werden, um das Potenzial und Risiko zu bewerten.

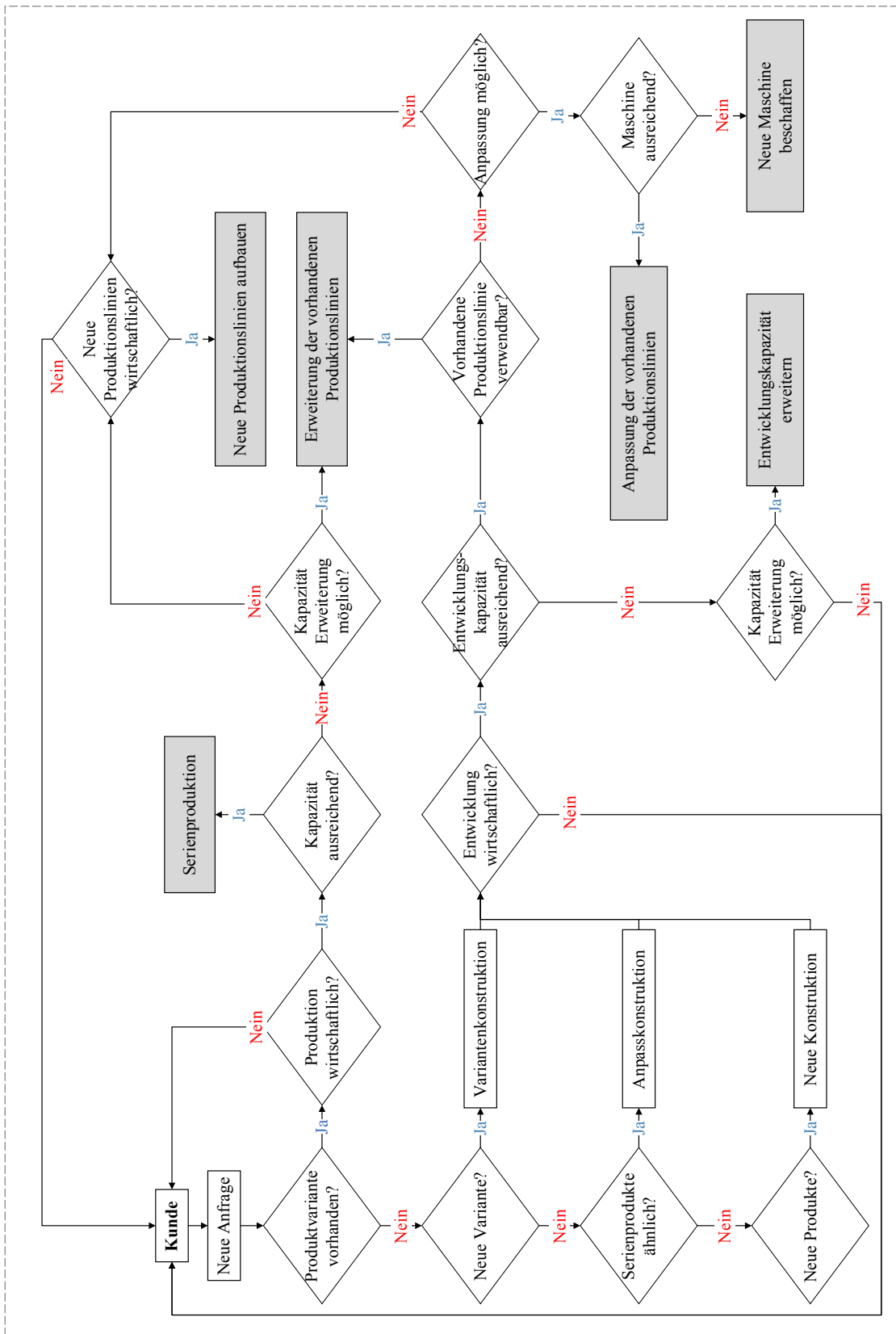


Bild 6.7: Mindmap für die Entscheidungsfindung der Kundenanfragen

6.1.2 Leistungswirtschaftliche Risiken in der Produktion

In den Literaturen [196; 349] wurden die leistungswirtschaftlichen Risiken in der Produktion beschrieben. Eine Übersicht der Risiken ist in der Tabelle 9.1 [196] im Anhang dargestellt. Hinsichtlich der Modellierung und der Bedeutung für die Verfügbarkeitsanalyse können in dieser Arbeit die Risiken in Personen, Sache, Prozess, Transport, Lager und Liefer berücksichtigt werden. In der Literatur [349] wurde die Produktionsrisiken in Produktionsfaktorenrisiken, Produktionsprozessrisiken und Produktrisiken unterteilt, siehe Bild 6.8 [349]. Nach dieser Kategorie können in dieser Arbeit die Risiken in Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoff, Produktionsprogramm, Losgröße, Betriebszeit, Qualität und Quantität berücksichtigt werden. Die Produktionsverfahren und Standort sind strategische Aspekte und werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

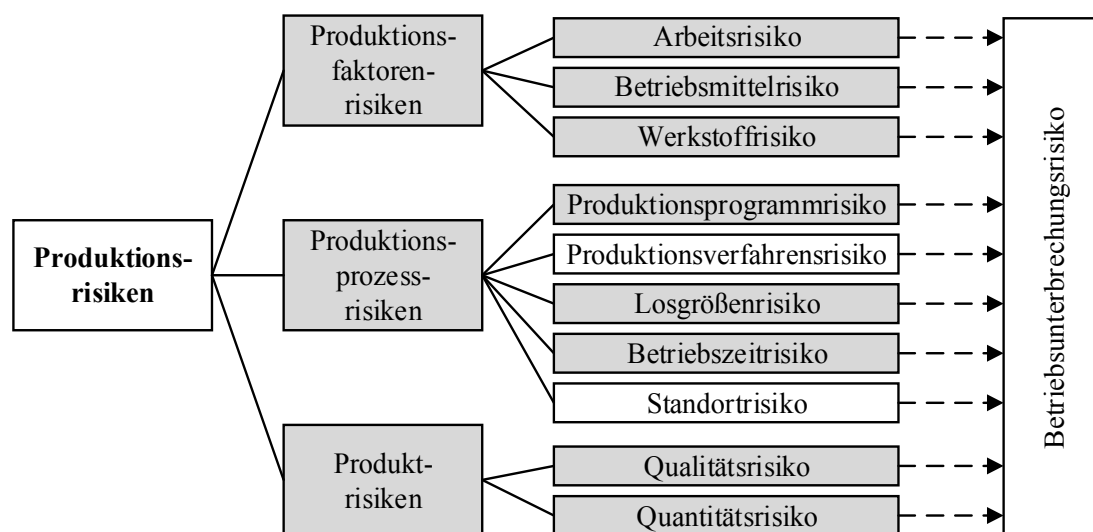


Bild 6.8: Systematisierung von Produktionsrisiken [349]

Nach den Kategorien können die Einflussgrößen auf die Risiken in der Produktion in Anlehnung an [349] in Maschinen und Anlagen, Produktionsprozess, Produktionsprogramm, Logistik, Mitarbeiter, Lieferantenqualität unterteilt werden. Diese Einflussgrößen werden zur Verfügbarkeitsanalyse bei der Modellierung der Produktionssysteme berücksichtigt.

6.1.3 Ursachenanalyse der Maschinenausfälle

Die Maschinenausfälle können Folgekosten wie direkte Produktionsausfallkosten, zusätzlicher Energieverbrauch, erhöhte Umweltbelastung, Qualitätseinbußen, Imageverlust, Verlust von Marktanteilen und Konventionalstrafen verursachen [1]. Durch Reduzierung und Vermeidung von Ausfällen, gezielte Durchführung von Schadens- und Schwachstellenanalysen und entsprechenden Gegenmaßnahmen können höchste Anforderungen an die Prozesssicherheit und Verfügbarkeit sowie an die Qualität der hergestellten Produkte bei gleichzeitiger Reduzierung der Instandhaltungskosten erreicht werden. Zustandsorientierte Instandhaltung ermöglicht es, die entsprechenden Teile möglichst exakt am konkreten Abnutzungsgrad des Objekts, das heißt erst kurz vor dem Auftreten eines

Schadens, auszutauschen und somit die Ausfall- und Wartungskosten zu reduzieren. Voraussetzung ist, dass die Schwachstellenanalyse sorgfältig geplant, qualitativ hochwertig dokumentiert und ausgewertet wird. Dafür sind die Schäden an der Maschine zuerst zu analysieren.

Schäden an der Maschine

Mit zunehmender Komplexität erhöht sich die Gefahr von Ausfällen einzelner Baugruppen mit unterschiedlicher Lebensdauer ihrer Komponenten. Die Ausfälle treten in Kombination verschiedener Schädigungsprozesse auf und sind oft erst nach unterschiedlichen Beanspruchungszeiten bemerkbar. Aufgrund der Vielzahl an Baugruppen und Bauteilen und ihrer unterschiedlichen Beanspruchung können komplexe Anlagen ein stark von der klassischen Badewannenkurve abweichendes Ausfallverhalten zeigen. Die durch Inbetriebnahme gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen zur Zustandsbeurteilung und Fehlerbeseitigung können zu einer ständigen konstruktiven Verbesserung der komplexen Anlagen führen. Die Schäden an einer Maschine können an mechanischen, elektrischen und elektronischen Bauteilen auftreten.

Ursachen der Ausfälle von mechanischen Bauteilen

Die Ausfälle von mechanischen Bauteilen können verursacht werden durch Reibung, Verschleiß, Korrosion, Alterung, Risse und Brüche durch Überlast, Lockerung und Verlagerung ursprünglich festsitzender Teile, Festsitz ursprünglich zueinander beweglicher Teile, unzulässige Spielvergrößerung etc. [1]. Die Maschinen können statischen und dynamischen Belastungen unterliegen. Die statisch belasteten Bauteile können verformt werden, wodurch sich die Lage verändert. Dynamische Belastungen können durch Schwingungen entstehen, die negative Auswirkungen auf Arbeitsgenauigkeit, Maßhaltigkeit, Oberfläche und Werkzeugverschleiß und die Umgebung haben. Außerdem können Schwingungen zur Lockerung ursprünglich unbeweglicher Teile führen. Thermische Störgrößen können auch zu Maschinenausfällen führen. Beispiel ist die ungenügende Wärmeabfuhr von Antriebssystemen. Ungenügende Wartung und Pflege sowie Fehlbedienung können auch die Ursachen der Maschinenausfälle sein.

Hauptursachen für den Ausfall elektrischer und elektronischer Bauelemente

Hauptursachen für den Ausfall elektrischer und elektronischer Bauelemente sind [1]:

- Stromunterbrechungen,
- Isolationsdurchschlag,
- Überspannungen
- Kontaktschäden,
- Verschmutzungen
- Differenzen von Spannung, Stromstärke und Widerstand gegenüber dem Sollzustand
- Ausfall kompletter elektronischer Bauelemente
- Mechanische Schäden an Leitungen: Quetschung, Leitungsbruch, thermische Beanspruchung.

Äußere Einflussfaktoren wie Schwingungen und Feuchtigkeit können auch die elektrischen Störungen verursachen.

Hauptursachen von Störungen und Ausfällen an Maschinen und Anlagen

Hauptursachen von Störungen und Ausfällen an Maschinen und Anlagen können in folgende Kategorien unterteilt werden, die grafisch in Bild 6.9 dargestellt werden, [1]:

- der Mensch (Qualifikation, Fehlbedienung, Motivation etc.)
- die Maschine (Konstruktion, Verkettung, Betriebsstunden etc.)
- das Management (Organisation, Mittelbereitstellung etc.)
- die Umwelt (Temperatur, Staub, Feuchtigkeit etc.)
- das eingesetzte Material (Verschleiß, Korrosion, Ermüdung, Alterung etc.)
- die Methode und Strategie (Inspektion, Wartung, Instandsetzung, Schwachstellenanalyse)
- die Messtechnik (Sensorik, Signalverarbeitung, Signalauswertung etc.).

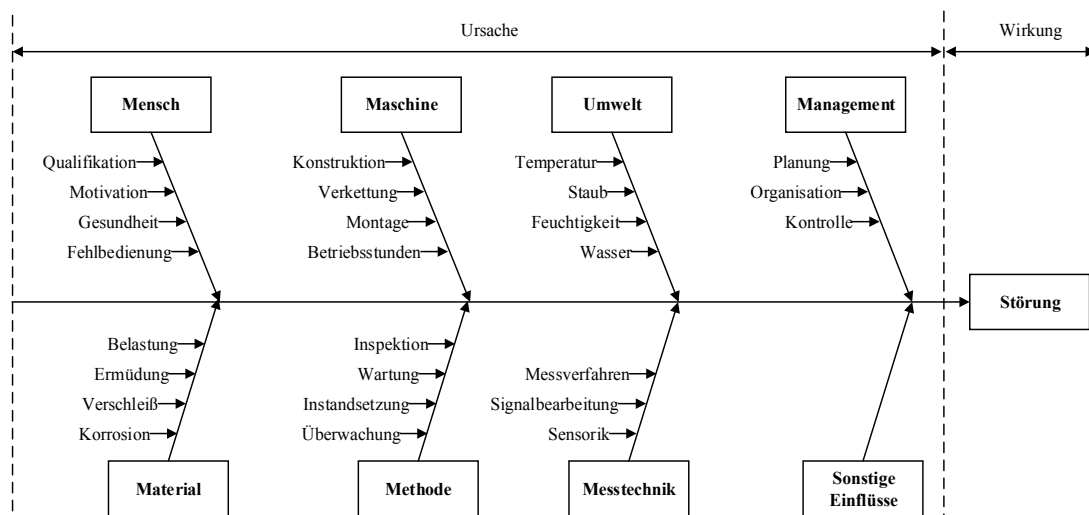


Bild 6.9: Hauptursachen von Maschinenausfällen

6.1.4 Einflussfaktoren auf die Maschinenverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit eines Produkts hängt von vielen Faktoren ab, die voneinander abhängig sind. Ein Beispiel für die Checkliste der Einflussfaktoren ist als Tabelle 9.2 in Anhang vorgestellt. Bild 6.10 zeigt ein grafisches Modell zur Verteilung der verschiedenen Faktoren auf verschiedene Kategorie und zur Verdeutlichung deren Beziehungen.

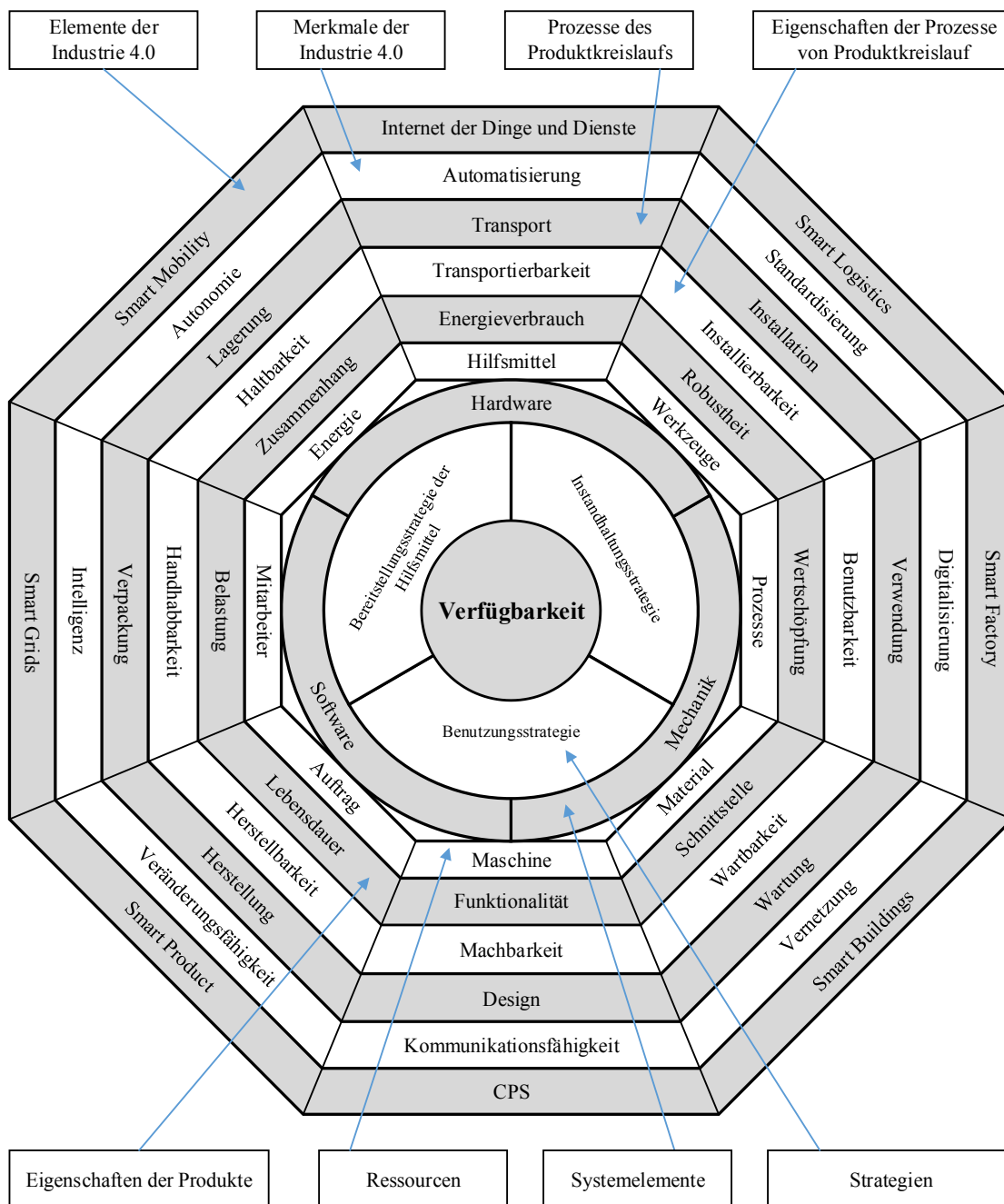


Bild 6.10: Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit einer Maschine

Zunächst sind die Prozesse des Produktkreislaufs auszuwählen, die auf die inhärente Zuverlässigkeit und die Zuverlässigkeit der Verwendung beeinflussen können. Die Eigenschaften der Prozesse in Produktkreislauf können dann als Indikator für der Modellierung verwendet werden. Des Weiteren sind die Eigenschaften der Produkte gelistet, die im Design-Prozess festgelegt sind. Die von dem Produkt verwendeten Ressourcen bestimmen die Verfügbarkeit des Produkts. Die Funktionen eines Produkts basieren auf die Funktionen der Baugruppen, hier nämlich Hardware, Software und Mechanik. Außerdem ist

die Verfügbarkeit eines Produkts von den Nutzungs- und Instandhaltungsstrategie sowie die Bereitstellung der Hilfsmittel abhängig.

6.1.5 Modellelemente und Modellierungsaspekte

Folgendes Bild 6.11 zeigt die Zuordnungsmöglichkeiten in Bezug auf die Elemente von Petrinetz und die Modellierungsaspekte.

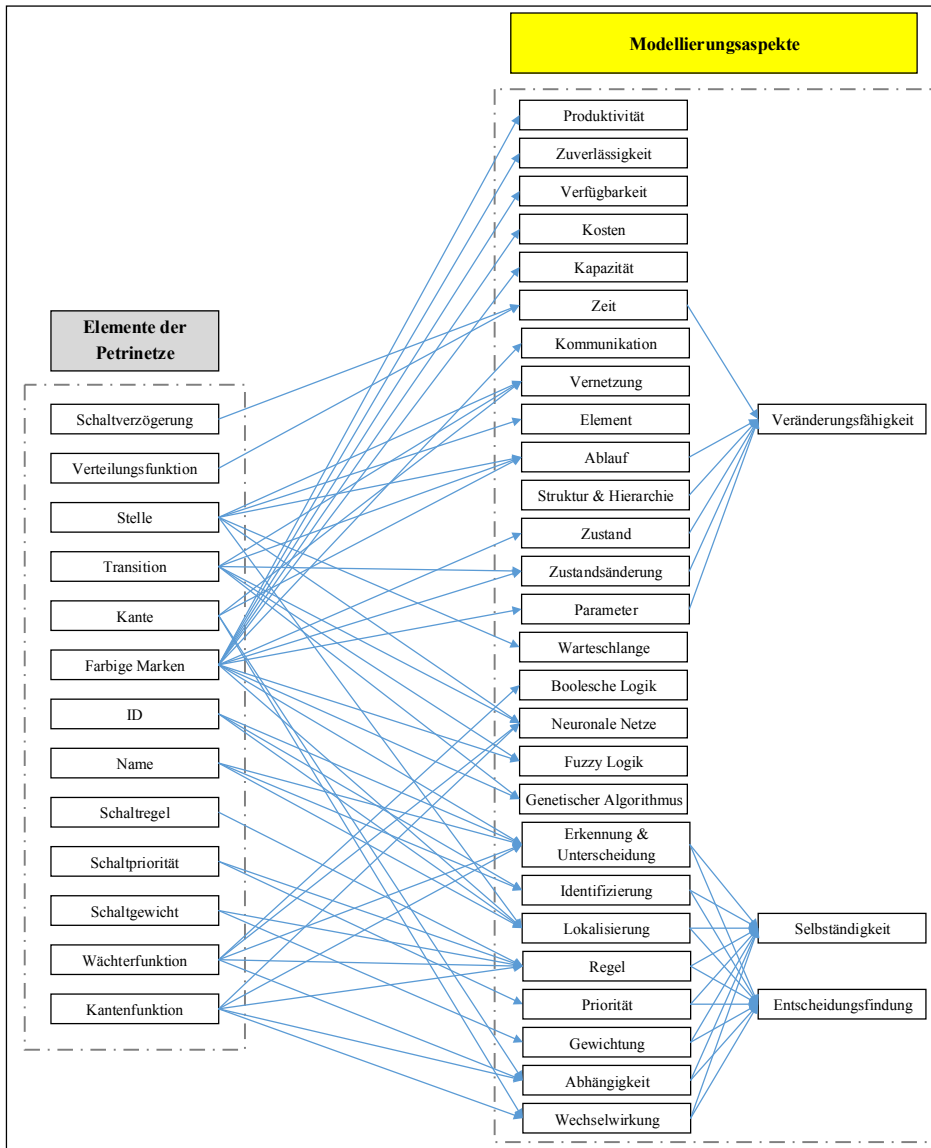


Bild 6.11: Elemente der Petrinetze und Modellierungsaspekte

Die im Kapitel 4 beschriebenen Modellierungsaspekte enthalten die Eigenschaften und die Kenngrößen zur Beschreibung der Produktionssysteme in Industrie 4.0. Die Bewertungen im Abschnitt 5.3 zeigt, dass die Methode Petrinetz für die Modellierung der Produktionssysteme sehr geeignet ist.

Mit den Modellelementen Schaltverzögerung und Verteilungsfunktion kann die Zeit modelliert werden. Die Basiselemente der Petrinetze: Stelle, Transition und Kante ermöglichen umfangreiche Anwendungsmöglichkeiten. Sie können die Aspekte Struktur und Hierarchie, Vernetzung, Ablauf etc. abbilden. Die farbigen Marken können diverse Informationen beinhalten und damit die Kenngrößen der Produktionssysteme wie Produktivität, Kosten, Kapazität etc. beschreiben. Die Modellelemente, Schaltregel, Schaltpriorität, Schaltgewicht, Wächterfunktion und Kantenfunktion können zur Modellierung der Logik und der Algorithmen verwendet werden, die für die Abbildung der speziellen Eigenschaften wie Selbstständigkeit und Entscheidungsfindung entscheidend sind.

6.2 Grundmodelle

Für die genaue Analyse müssen Einzelgrundmodelle erstellt werden, um die einzelnen Ursachen von Maschinenausfällen zu modellieren. Hinsichtlich der Verfügbarkeit werden die Aspekte Zuverlässigkeit, Abhängigkeit, Verschleiß, Flexibilität und Selbstorganisation in folgenden Modellen behandelt.

6.2.1 Zuverlässigkeit einer Komponente mit konstanter Belastung

In folgenden Modellen bleibt die Belastung der Komponente konstant, sodass der Lebensdauerverbrauch im Betrachtungszeitraum für jede Komponente gleich verläuft. Im Bild 6.12 sind ein Modell zur Modellierung der Zuverlässigkeit einer Komponente und die Modellierungsergebnisse mit unterschiedlichen Parametern dargestellt. Bild 6.12.a zeigt das Petri-Netz-Modell zur Modellierung einer Komponente mit zwei Zuständen. Die Stelle S1 modelliert den aktiven Zustand, während Stelle S2 den defekten Zustand. Die Zustandsänderung von aktiv zu defekt, die dem Lebensdauerverbrauch der Komponente entspricht, wird mit der Transition TrK1 modelliert. Das Modell wird mit unterschiedlichen Parametern simuliert. Die Ergebnisse sind in Bildern Bild 6.12.b bis Bild 6.12.e als Referenz für weitere Modelle dargestellt. Die Anzahl der Simulationsreplikation ist 1000.

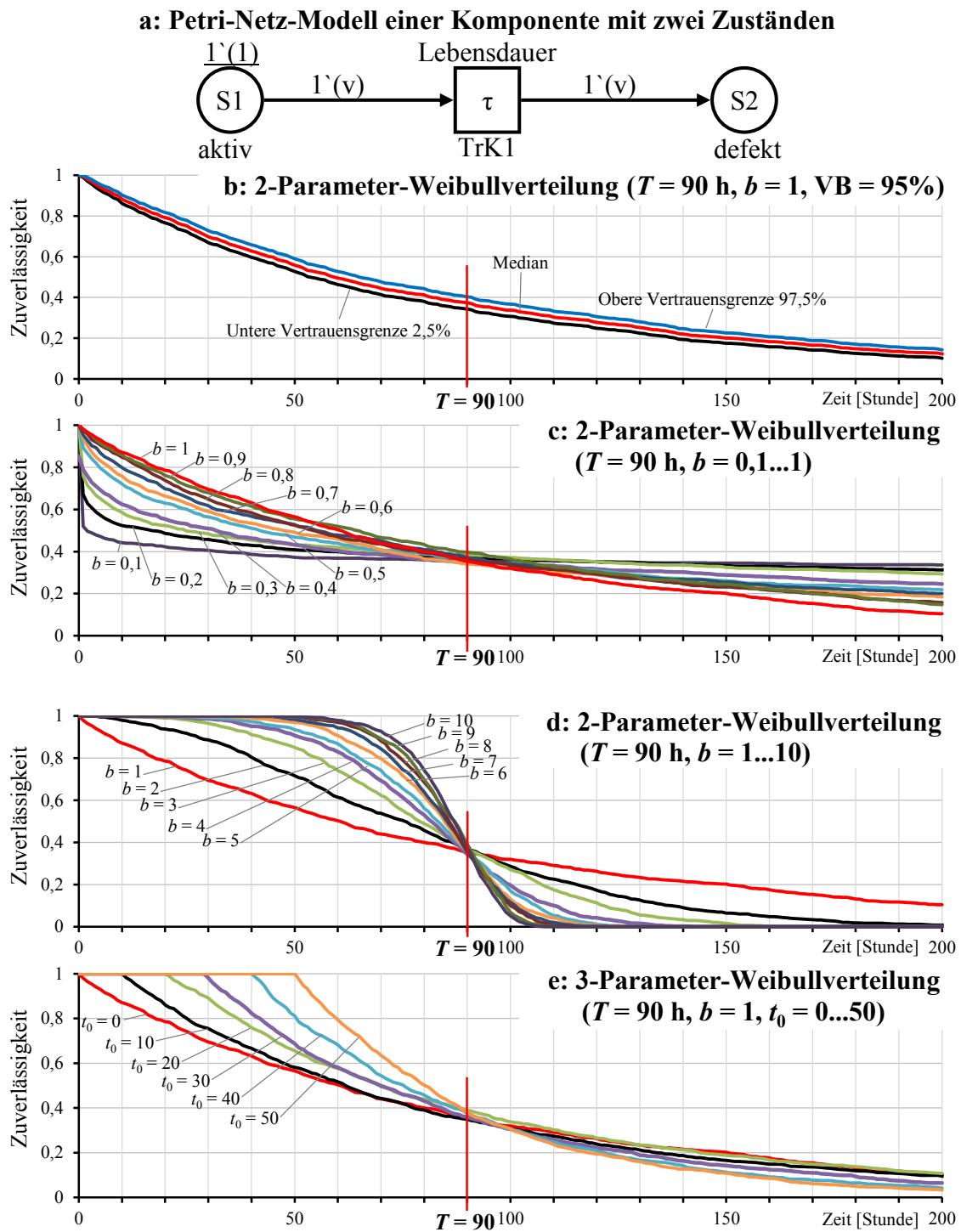


Bild 6.12: Zuverlässigkeit einer Komponente mit unterschiedlichen Parametern

6.2.2 Zuverlässigkeit eines Systems mit zwei unabhängigen Komponenten

Die folgenden Modelle modellieren eine Maschine / ein System mit zwei unabhängigen Komponenten, die seriell (Bild 6.13.a) oder parallel (Bild 6.14.a) geschaltet werden. In diesen Modellen werden zwei Komponenten: Komponente 1 und Komponente 2 als „Insel“ betrachtet. Die zwei Komponenten haben jeweils eigene Funktion, zwischen den es keinen Zusammenhang gibt. Das heißt: wenn eine Komponente ausfällt, wird andere nicht beeinträchtigt. Die Lebensdauer von Komponente 1 und Komponente 2 werden mit gleicher Verteilungsfunktion (2-Parameter-Weibull, $T = 90$ h, $b = 1$) beschrieben.

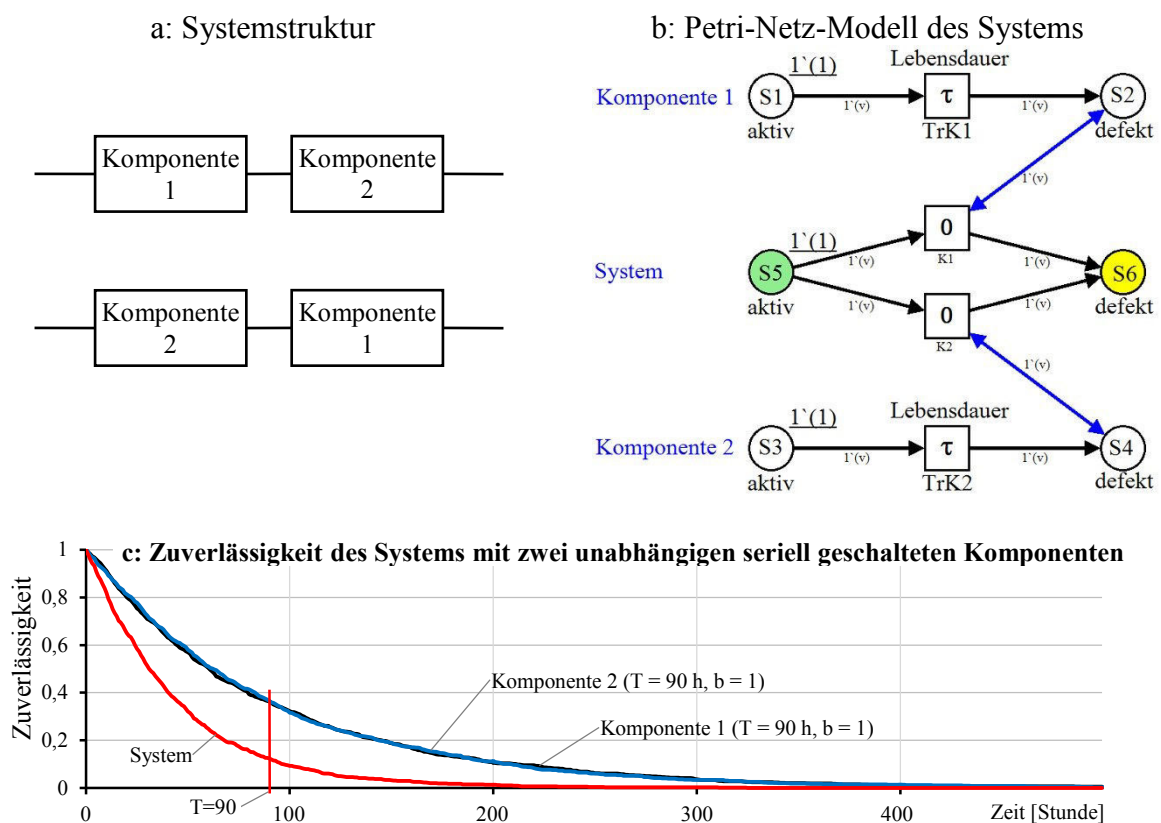


Bild 6.13: Modell des Reihensystems mit zwei unabhängigen Komponenten

Im Bild 6.13.b wird ein Petri-Netz-Modell zur Analyse zwei unabhängiger seriell geschalteten Komponenten dargestellt. Beim Ausfall eine der beiden Komponenten wird das System defekt sein. Bild 6.13.c zeigt die Simulationsergebnisse mit 1000 Replikationen. Denn die Lebensdauer der Komponenten mit gleicher Verteilungsfunktion beschrieben werden, überlappen sich die Zuverlässigkeitskurven der beiden Komponenten. Es ist zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit des Systems niedriger als die der Komponenten ist.

Im Bild 6.14.b wird ein Petri-Netz-Modell zur Analyse des Systems mit zwei unabhängigen parallel geschalteten Komponenten (System mit heißer Redundanz) dargestellt. Nur beim Ausfall der beiden Komponenten wird das System erst defekt sein. Bild 6.14.c zeigt die

Simulationsergebnisse mit 1000 Replikationen. Es ist zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit des Systems höher als die der Komponenten ist.

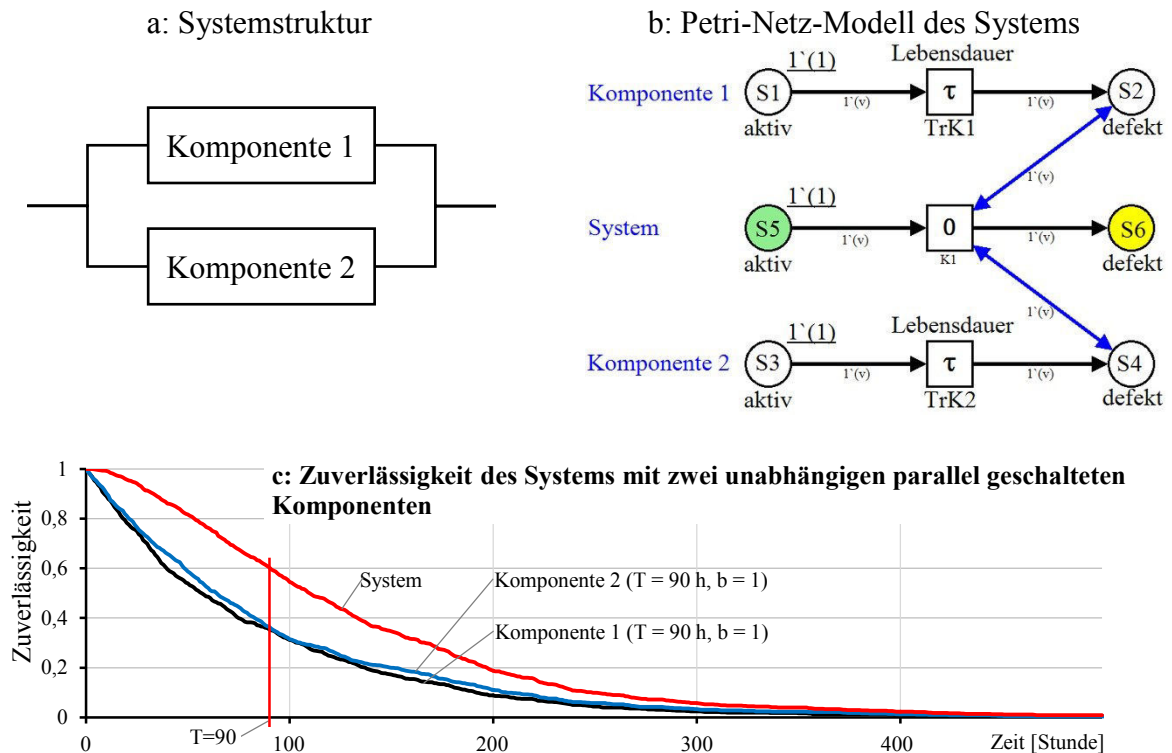
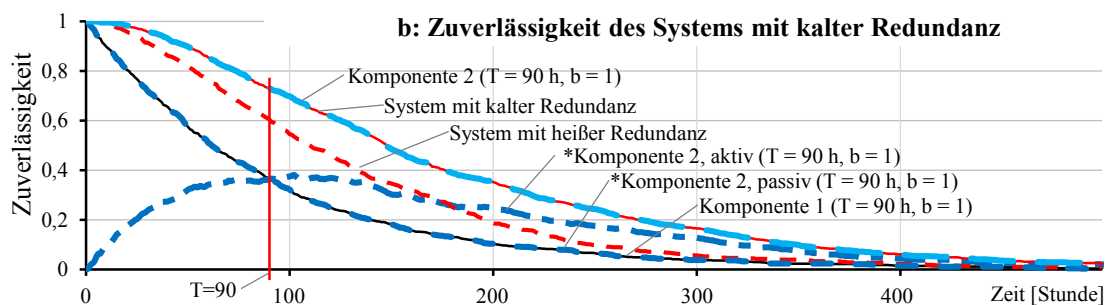
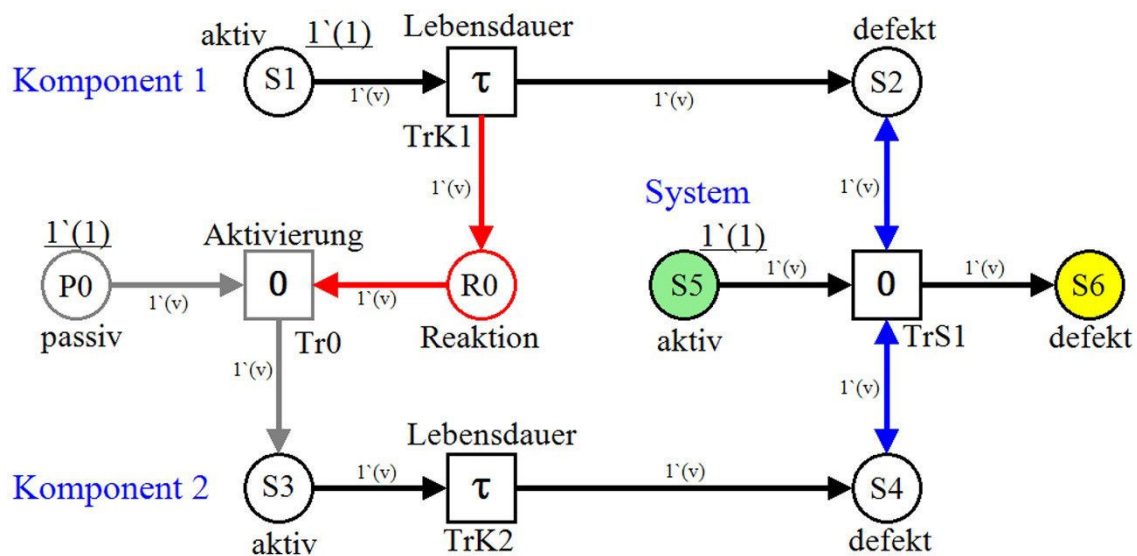


Bild 6.14: Modell des Systems mit zwei unabhängigen parallel geschalteten Komponenten

6.2.3 Zuverlässigkeit eines Systems mit zwei abhängigen Komponenten

In der Literatur [176] wurden die Interaktionen in redundanten Produktionssystemen mit ECSPN modelliert. Im Folgenden werden Modelle zur Untersuchung der Systemzuverlässigkeit mit Berücksichtigung der Abhängigkeit und Wechselwirkung vorgestellt. Dabei werden die Systeme mit abhängigen Komponenten analysiert. Der Ausfall einer Komponente hat Wirkungen auf die andere.

Das folgende Modell im Bild 6.15 oben handelt sich um ein System mit kalter Redundanz, bei der die Komponente 2 erst nach dem Ausfall von Komponente 1 eingesetzt wird. Zuerst ist nur Komponente 1 aktiv, bis deren Lebensdauer bis zum Ausfall verbraucht wird. Dazwischen befindet sich die Komponente 2 in passivem Zustand, bei dem die Lebensdauer nicht verbraucht wird. Die Zuverlässigkeit der Komponente 2 besteht aus zwei Teilen: die Zuverlässigkeit im passivem und aktivem Zustand. Sie ist gleich wie die Zuverlässigkeit des Systems, wie es im Bild 6.15 unten dargestellt wird. Es ist zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit des Systems mit kalter Redundanz deutlich höher als das System mit zwei unabhängigen Komponenten (System mit heißer Redundanz) ist. Bei dem System mit heißer Redundanz zielt es jedoch auf maximale Produktivität ab.



*Durchschnittliche Aktivierungsanzahl

Bild 6.15: Modell des Systems mit kalter Redundanz und passivem Zustand

In Praxis findet man häufig die Maschinen, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen, aber nicht reparierbar sind. Nach dem Ausfall werden die Maschinen entsorgt. Zur Untersuchung der Zuverlässigkeit solcher Maschinen werden folgende Modelle zur Modellierung eines Zwei-Komponenten-Systems mit assoziierter Ausschaltung beim Ausfall einer Komponente aufgebaut, die im Bild 6.16.a (Reihensystem) und Bild 6.16.b (paralleles System) dargestellt sind. Beim Ausfall einer der Komponenten wird die andere sofort ausgeschaltet, sodass die Restlebensdauer der anderen Komponente nicht verbraucht wird. Dies führt zu der Konsequenz, dass die Zuverlässigkeit der Komponenten in diesen Modellen niedriger als die der Komponenten in allen anderen Systemen ist. Die Zuverlässigkeit von diesen Modellen ist ebenfalls am niedrigsten im Vergleich zu anderen Modellen, wie Bild 6.16.c zeigt. Es ist auch zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit des Systems und der Komponenten identisch sind. Das heißt, die Systemzuverlässigkeit von der schwächsten Komponente abhängt.

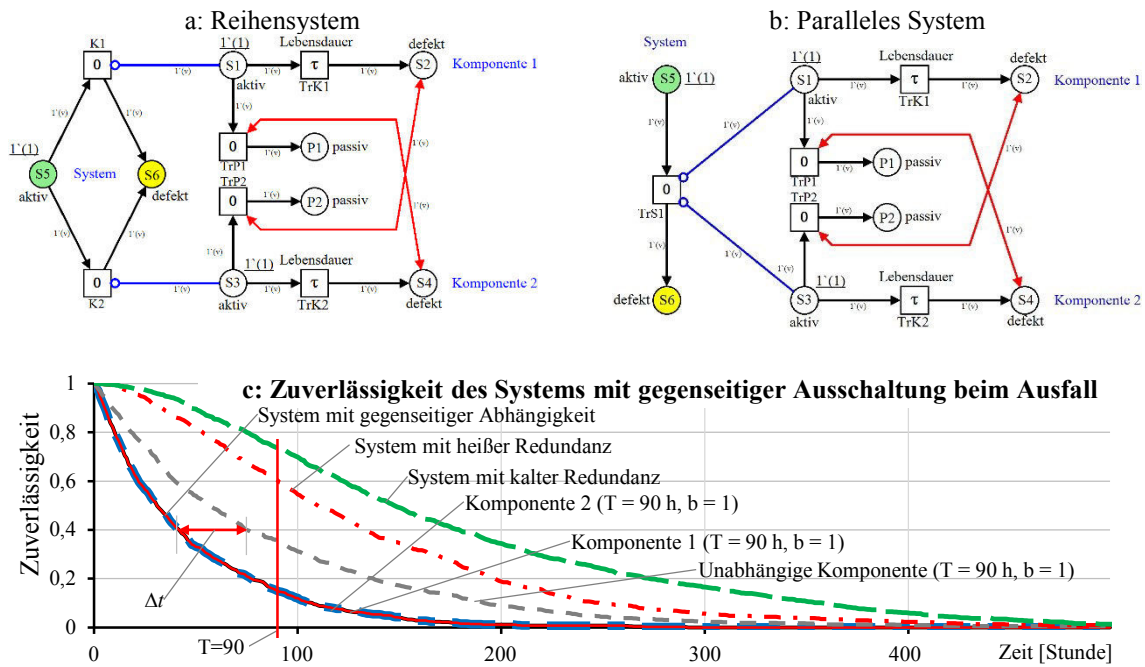


Bild 6.16: Modell des Systems mit assoziierter Ausschaltung beim Ausfall einer Komponente

6.2.4 Modellierung des Verschleißes

Verschleiß begleitet die Fertigungsprozesse und ist eine der Hauptursache für den Maschinenausfall. Typisches Beispiel ist der Verschleiß der Werkzeuge wie Bohrer, Fräser usw. Das Bild 6.17 zeigt schematisch den Verlauf des Verschleißes über die Zeit. Der Verschleiß kann in drei Bereiche: degressiven, linearen und progressiven Bereich unterteilt werden. Mit erhöhter Fertigungsgeschwindigkeit ($v_1 > v_2 > v_3$) erreichen die Werkzeuge schneller die definierte Verschleißgrenze ($T_1 < T_2 < T_3$).

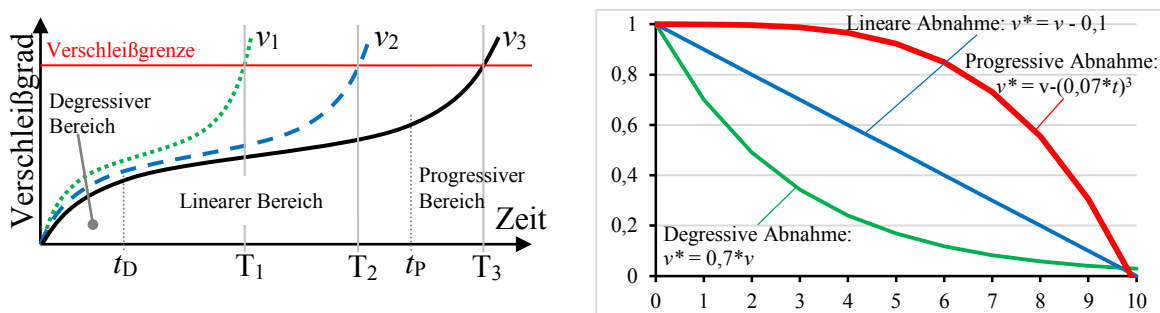


Bild 6.17: Schematischer Verlauf des Verschleißes über die Zeit in Anlehnung an [154]

Um den Verschleiß zu modellieren, werden die verschiedenen Bereiche separat betrachtet. Degressiver Bereich entspricht der frühen Verwendungsphase. Bei linearem Bereich können relative konstant Produktqualität erzielt werden. Progressiver Bereich weist abnehmenden

Wirkungsgrad und zunehmende Verschleißgeschwindigkeit sowie somit erhöhte Belastung der Maschine und Fertigungszeit hin.

1. Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß ohne Erneuerung

Mit dem Modell in Bild 6.18.a wird eine Maschine mit unterschiedlichen Verschleißraten simuliert. Die Transition TrV1 mit dem Name „Verschleiß“ simuliert den linearen Verschleißprozess. Mit der Kantenfunktion „Set(ab=ab-0,01)“ können die Verschleißrate variiert werden. Die Transition TrU1 mit Name „Überwachung“ überwacht den Zustand des Verschleißes. Sobald der Verschleißrat 80% erreicht, wird die Maschine als Totalschaden betrachtet. Die Ergebnisse mit unterschiedlichen Verschleißraten werden im Bild 6.18.b dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Maschinenverfügbarkeit stark von dem Verschleißrat abhängig ist. Mit reduziertem Verschleißrat erhöht die Maschinennutzzeit progressiv.

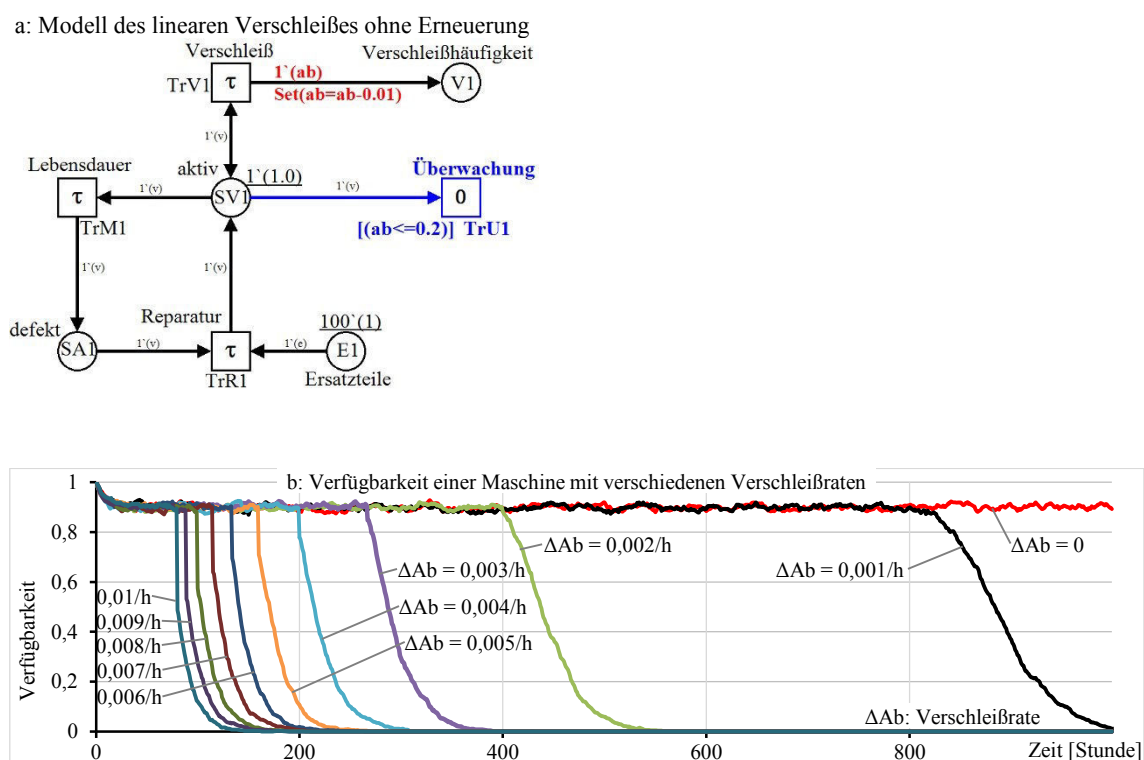


Bild 6.18: Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß ohne Erneuerung

2. Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß und Erneuerung

Folgendes Modell in Bild 6.19 bildet den linearen Verschleiß mit Erneuerungsprozess ab. Annahme dieses Modells ist, dass der Verschleiß der Maschine keine Wirkung auf die Produktivität der Maschine hat. Nach dem Maschinenausfall wird die Maschine durch Reparatur erneuert. Eine Verschleißgrenze von mindestens 20% der neuen Maschine ist vorgenommen. Bei Überschreitung der Verschleißgrenze wird die Maschine repariert und erneuert. Von dem rechten Bild ist es zu erkennen, dass die Dauerverfügbarkeit der Maschine mit Verschleiß trotz der ständigen Erneuerung niedriger als die ohne Verschleiß ist. Außerdem steigt die Dauerverfügbarkeit mit erhöhtem Erneuerungsgrad.

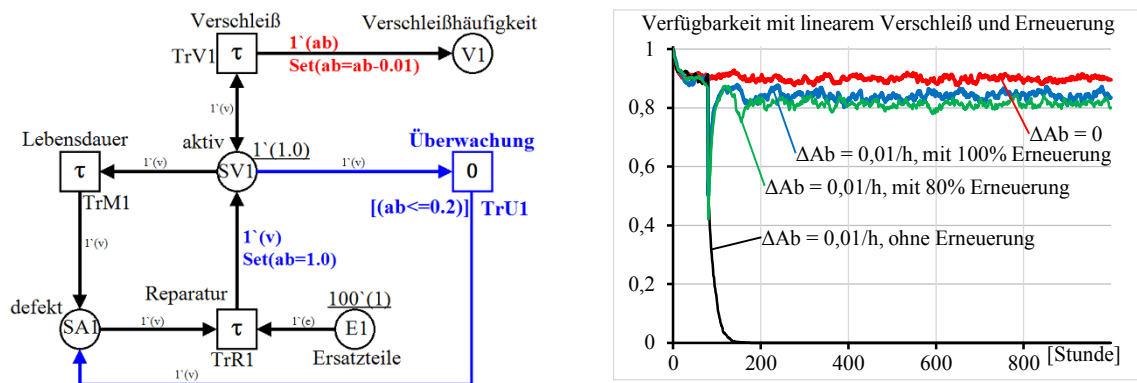


Bild 6.19: Modell einer Maschine mit linearem Verschleiß und Erneuerung

3. Modell einer Maschine mit degressivem Verschleiß und Erneuerung

Degressiver Verschleiß mit Erneuerung ist in folgendem Modell in Bild 6.20 abgebildet. Als Beispiel wird der Verschleiß mit 1 und 10 Prozent pro Prozess vorgenommen. Zum Vergleich wird es mit unterschiedlichen Erneuerungsgraden modelliert.

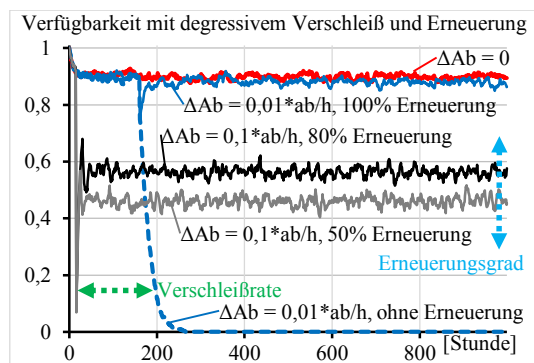
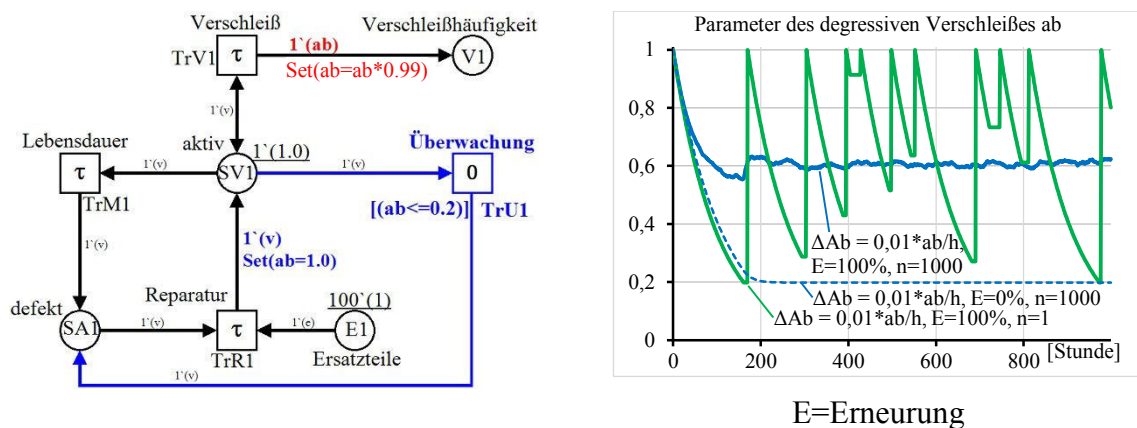


Bild 6.20: Modell einer Maschine mit degressivem Verschleiß und Erneuerung

4. Modell einer Maschine mit progressivem Verschleiß und Erneuerung

Das folgende Modell bildet den progressiven Verschleiß ohne und mit Erneuerung ab. Dabei ist der Verschleißwert $ab = 1 - (0,001 * t)^3$.

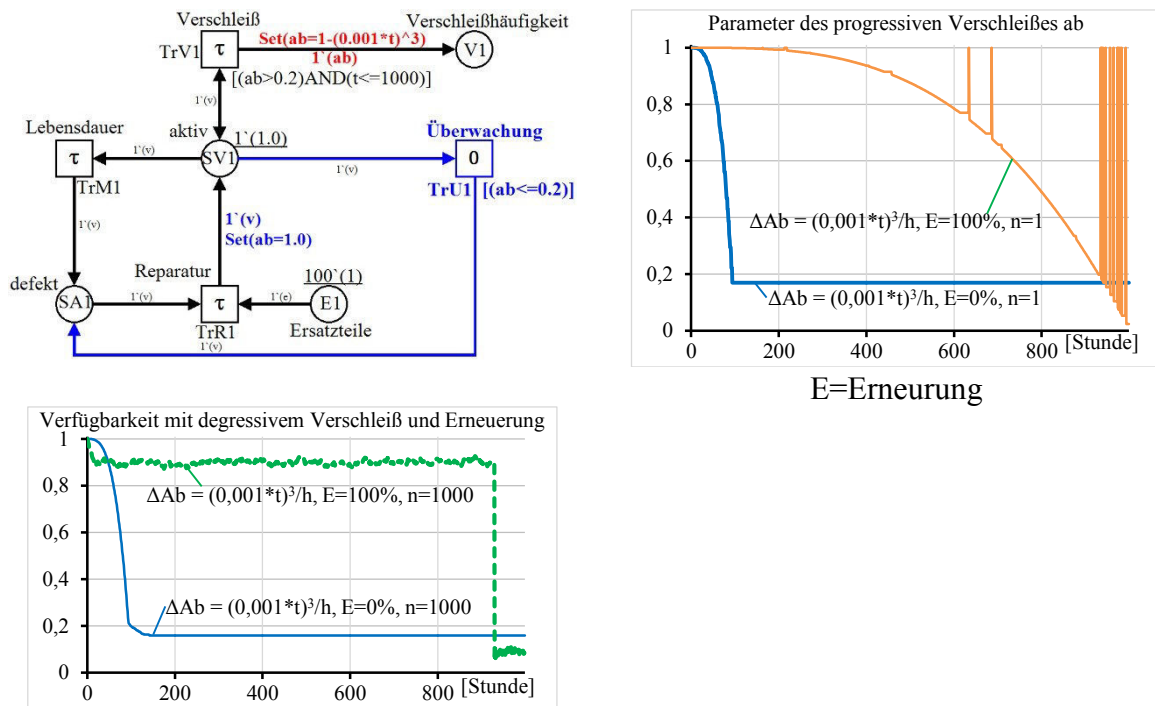


Bild 6.21: Modell einer Maschine mit progressivem Verschleiß und Erneuerung

5. Modell einer Maschine mit verschiedenen Verschleißraten und Erneuerung

Bild 6.22 zeigt ein Modell zur Abbildung der verschiedenen Verschleißraten mit Erneuerung.

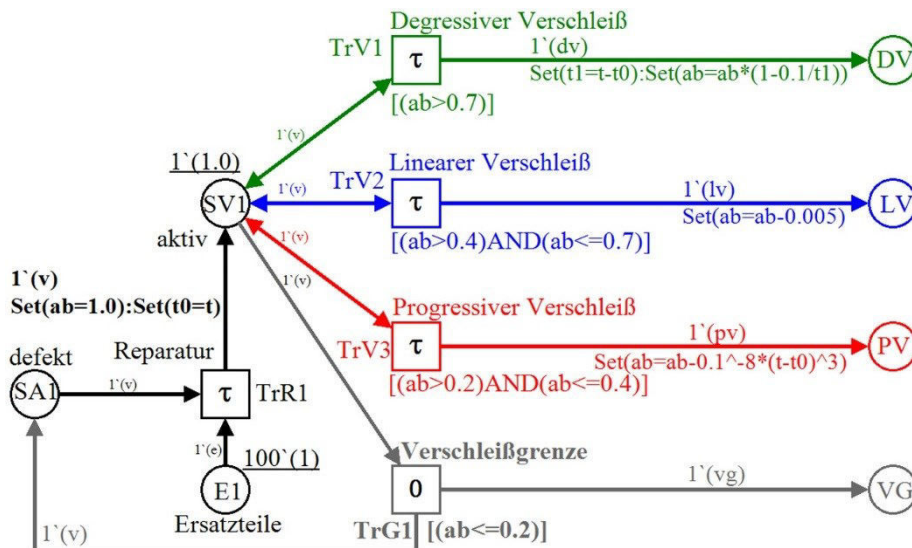


Bild 6.22: Petri-Netz-Modell mit verschiedenen Verschleißraten und Erneuerung

Die Ergebnisse ohne Ersatzteil bei 1 Replikation sind in folgendem Bild 6.23 vorgestellt. Die Ergebnisse mit 1000 Replikation sieht man im Bild 6.24.

Bild 6.25 und Bild 6.26 zeigen die Modellierungsergebnisse mit Ersatzteilen bei 1 und 10000 Replikationen.

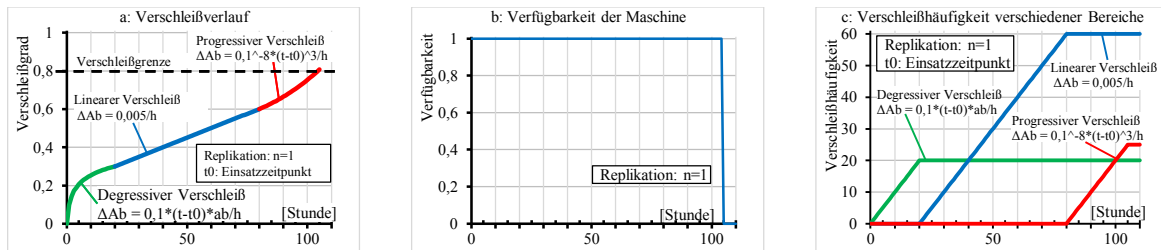


Bild 6.23: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten ohne Ersatzteile bei 1 Replikation

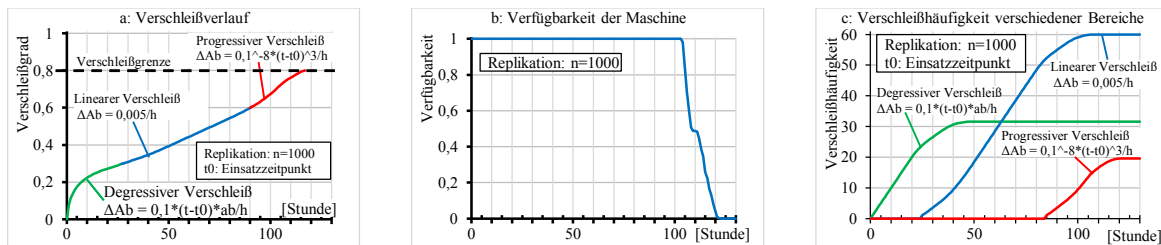


Bild 6.24: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten bei 1000 Replikation ohne Ersatzteile

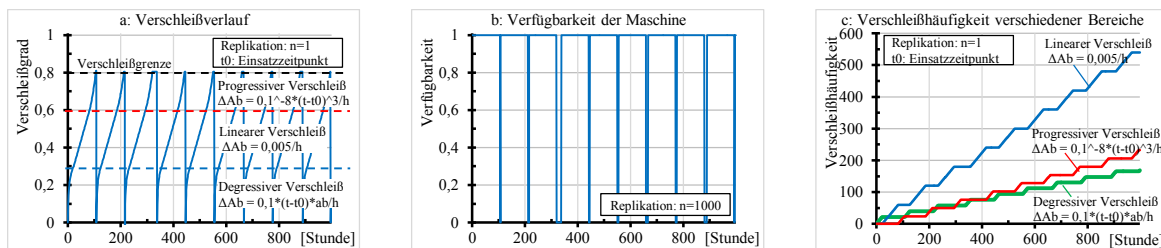


Bild 6.25: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten mit Ersatzteilen bei 1 Replikation

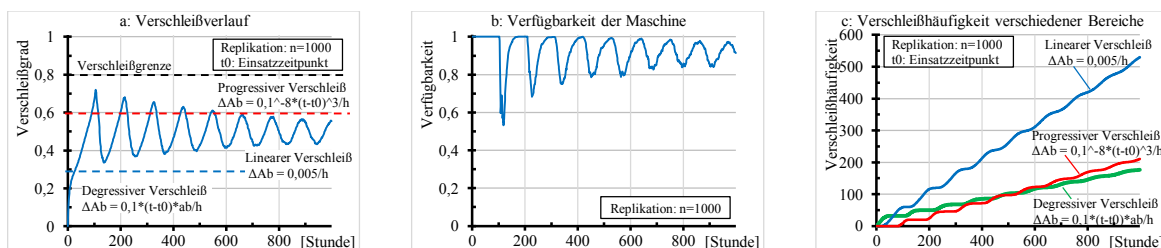


Bild 6.26: Modellergebnisse mit verschiedenen Verschleißraten mit Ersatzteilen bei 1000 Replikation

6.2.5 Modellierung der Wirkungsgradreduzierung und Erneuerung

Das folgende Bild 6.27 zeigt ein Modell einer Maschine mit Berücksichtigung der Wirkungsgradreduzierung nach einem Ausfall und Wirkungsgradverbesserung nach der Reparatur. Nach Ausfall der Maschine wird der Wirkungsgrad der Maschine reduziert. Nach der Reparatur wird der Wirkungsgrad zu originalem Level zurückgebracht. Das rechte Bild beschreibt die Ergebnisse der Maschinenverfügbarkeit. Es ist zu erkennen, dass die Verfügbarkeit mit 100% Erneuerungsgrad gleich wie die Verfügbarkeit ohne Wirkungsgradreduzierung ist. Die Wirkungsgradreduzierung wegen Ausfall wird durch Reparatur vollständig kompensiert und hat die Verfügbarkeit der Maschine nicht beeinflusst. Mit diesem Modell kann die Leistungsreduzierung auch simuliert werden. Es ist zu bemerken, dass die Verfügbarkeitsreduzierung durch die Wirkungsgradreduzierung erfolgt. Der Erneuerungsgrad hat in diesem Modell bis zum 25% (>25%, da $0,8 \cdot 0,25 = 0,2 \rightarrow$ Recycling) keinen Einfluss auf die Verfügbarkeit.

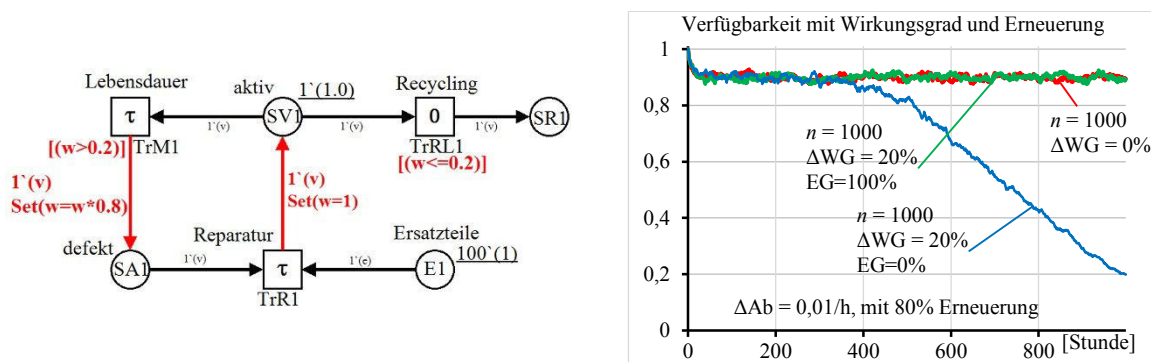


Bild 6.27: Modell mit Wirkungsgrad und Erneuerung

6.2.6 Modelle der Verfügbarkeit mit unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien

Verfügbarkeit einer Maschine mit reaktiver Instandhaltung

Reaktive Instandhaltung ist eine konventionelle Instandhaltungsstrategie, bei der die Instandsetzung nach Ausfall durchgeführt wird. Das folgende Bild 6.28 links zeigt ein Petri-Netz-Modell zur Modellierung einer Maschine mit zwei unterschiedlichen Zuständen und deren Lebensdauerverbrauch und Reparatur mit Ersatzteilen. Das Bild rechts stellt die Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Replikationsanzahlen dar. Der Lebensdauerverbrauch wird mit als Transition TrM1 mit 2-Parameter-Weibullverteilung (Formparameter $b = 1$, Lagerparameter $T = 90$) beschrieben, wobei die Reparatur als Transition TrR1 mit 2-Parameter-Weibullverteilung ($b = 1$, $T = 10$) modelliert wird.

Die Ergebnisse mit einer Replikation ($n = 1$) sind aus einer zufälligen Simulation entstanden. Die mit roter Linie dargestellten Ergebnisse sind durchschnittliche Werte von tausenden Replikationen ($n = 1000$). Sie entsprechen die Dauerverfügbarkeit der Maschine. Es ist zu

erkennen, dass die Linie bei 0,9 schwankt. Das bedeutet, die Dauerverfügbarkeit der Maschine bei 90% liegt.

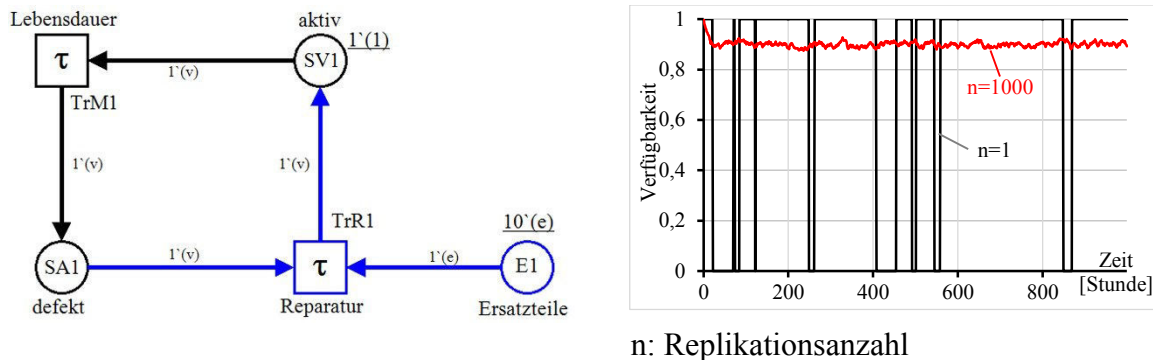


Bild 6.28: Verfügbarkeit einer Maschine mit reaktiver Instandhaltung

Bei der reaktiven Instandhaltung spielt die Anzahl der Ersatzteile entscheidende Rolle bei der Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit. Dementsprechend entsteht die Anforderung an die Lagerfläche für Ersatzteile. Die Abhängigkeit zwischen Verfügbarkeit und Anzahl der Ersatzteile lässt sich mit variiert Anzahl der Ersatzteile analysieren. Die Ergebnisse werden in folgendem Bild 6.29 dargestellt. Die Ergebnisse mit null Ersatzteile entsprechen die Zuverlässigkeit der Maschine. Es ist zu erkennen, dass die Maschinendauerverfügbarkeit mit zunehmender Anzahl der Ersatzteile steigt. Jedoch ist diese Steigerung ab 10 Ersatzteile nicht mehr so deutlich. Deshalb lässt sich folgende Schlussfolgerung ziehen, dass die optimale (wirtschaftlichste) Anzahl der Ersatzteile zur Erreichung maximaler Dauerverfügbarkeit bei neu liegt.

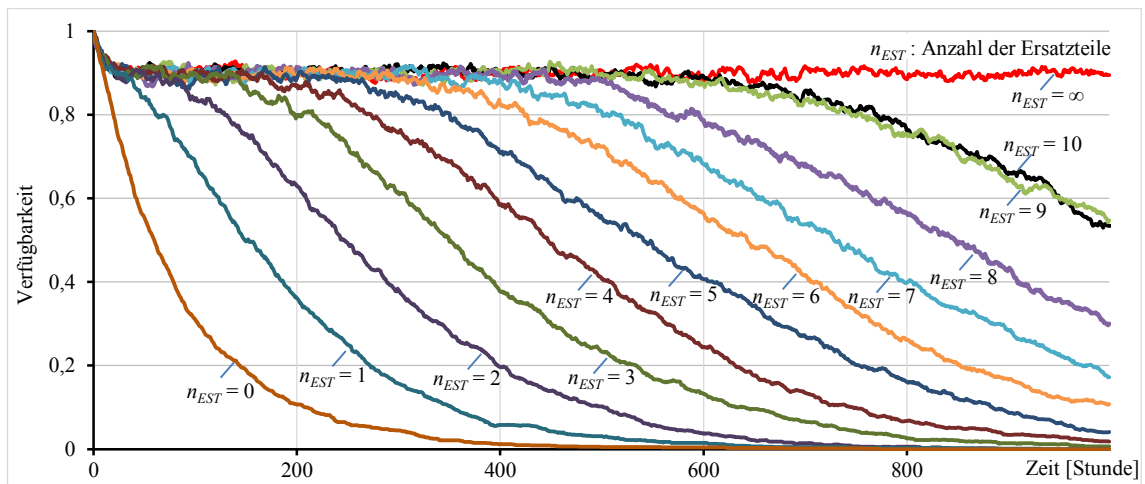


Bild 6.29: Verfügbarkeit einer Maschine mit unterschiedlicher Anzahl der Ersatzteile

Verfügbarkeit einer Maschine mit präventiver Instandhaltung

Die reaktive Instandhaltung ist eine Basisstrategie, bei der die Instandhaltungsmaßnahmen erst nach dem Maschinenausfall durchgeführt werden. Zur Reduzierung der aus Ausfall resultierende Schaden und Verluste wird häufig die präventive Instandhaltung verwendet, bei der die Wartung und Inspektion in definierten Zeitintervallen durchgeführt werden. Bei der Zeitintervallfestlegung spielt die Erfahrung des Wartungspersonals eine entscheidende Rolle. In diesem Abschnitt wird ein Modell mit präventiver Instandhaltung auf Basis des Modells mit reaktiver Instandhaltung aufgebaut. Anschließend werden die Ergebnisse erklärt. Bevor das Modell mit präventiver Instandhaltung vorgestellt wird, werden zuerst einige Basismodelle zur Ermöglichung der Modellierung von präventiver Instandhaltung erklärt.

Modell einer Maschine mit passivem Zustand

Die Wartung und Inspektion können entweder während der Betriebszeit oder bei Maschinenstillstand durchgeführt werden. Das folgende Modell berücksichtigt die Wartung und Inspektion bei Stillstand mit einem konstanten Intervall von 20 Stunden. Die anderen Parameter sind gleich wie die in letzten Modellen. Für den Maschinenstillstand ist der passive Zustand der Maschinen zu modellieren. Anstatt der zwei Zustände im Modell mit reaktiver Instandhaltung hat die Maschine in diesem Modell drei Zustände: aktiv, defekt und passiv, die in folgendem Bild 6.30.a mit Petri-Netz modelliert werden.

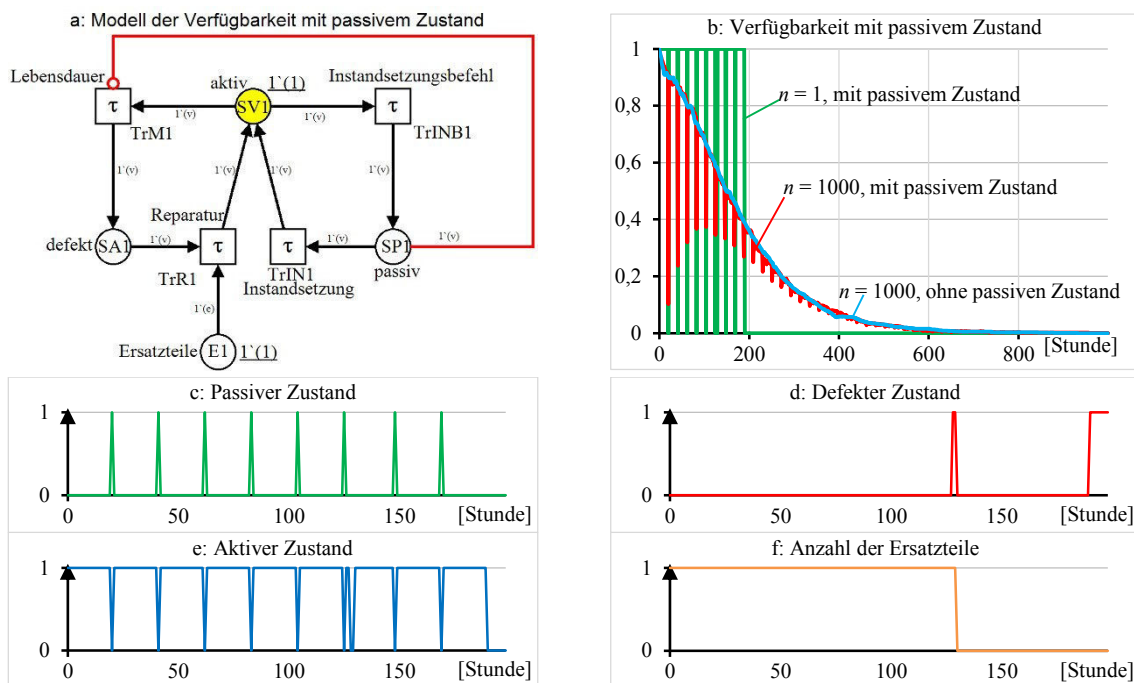


Bild 6.30: Verfügbarkeit einer Maschine mit passivem Zustand

Im passiven Zustand wird die Maschinenlebensdauer nicht mehr verbraucht. Das wird im Modell durch die rot markierte Verbotskante realisiert. Das Bild 6.30.b veranschaulicht die Ergebnisse der Maschinenverfügbarkeit mit passivem Zustand und einem Ersatzteil. Zum Vergleich werden die Ergebnisse ohne passiven Zustand hinzugefügt. Es ist zu erkennen, dass

die Verfügbarkeit mit passivem Zustand schlechter als die ohne passiven Zustand ist. Jedoch nähert sich die Verfügbarkeit mit passivem Zustand der Verfügbarkeit ohne passiven Zustand an. Die Ergebnisse des passiven Zustandes werden im Bild 6.30.c dargestellt. Sie entsprechen der Anzahl der Wartung und Inspektion. Bild 6.30.d beschreibt den defekten Zustand. Es ist zu erkennen, dass die Maschine bei 130 Stunden und 190 Stunden ausfällt. Da es nur ein Ersatzteil gibt, kann die Maschine nur einmal repariert werden. Deshalb bleibt die Maschine nach 190 Stunden defekt. Der aktive Zustand ist im Bild 6.30.e dargestellt. Er entspricht dem Zustand gegenüber der Zustandskombination aus passivem und defektem Zustand.

Es ist zu achten, dass in diesem Modell nur die Maßnahmen der Wartung und Inspektion ohne Berücksichtigung deren Wirkung auf die Maschine modelliert werden. Die Wirkung der Wartung und Inspektion wird in weiterem Modell berücksichtigt.

6.2.7 Modellierung der flexiblen Produktionssysteme

In Bezug auf einer realitätsnahen Modellierung der Verfügbarkeit ist die flexible Produktion noch zu untersuchen. In den Literaturen [175; 177; 178] wurde die Entwicklung eines Modells zur Modellierung der Flexibilität in Produktionssystemen mit erweiterten farbigen stochastischen Petri Netzen (Extended Coloured Stochastic Petri Netze, ECSPN) vorgestellt. Im Vergleich zu den Modellen mit fester Systemstruktur kann dieses ECSPN-Modell flexible Strukturen und damit flexible Produktionsprozesse simulieren. Verschiedene Maschinenkombinationen können erzielt werden, um die Produktion verschiedener Varianten mit unterschiedlichen Prozessen zu modellieren.

Konzept der flexiblen Produktionssysteme

In früheren Untersuchungen wurden die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit statischer Systeme häufig anhand mathematischer Methoden oder Modellierungsmethoden analysiert. Voraussetzung ist, dass die objektiven Modelle statisch sind. Systeme verhalten sich jedoch dynamisch und erfordern veränderbare Modelle. Manuell geänderte Modelle erfordern viel Arbeit. Eine Möglichkeit, ein automatisches Modell zu realisieren, besteht darin, ein flexibles Modell zu erstellen. Weiter wird ein flexibles Modell zur Analyse eines Produktionssystems mit flexibler Struktur und flexiblen Varianten vorgestellt.

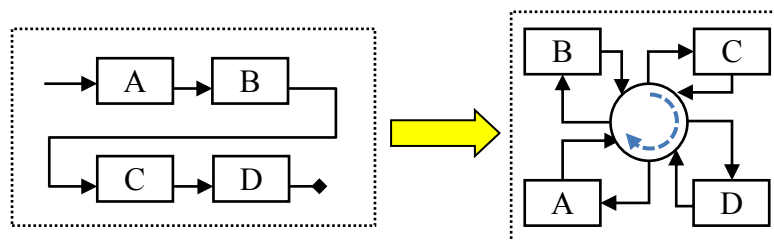


Bild 6.31: Konzept der flexiblen Produktion [175; 177; 178]

Um die Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme zu erhöhen und die Modellierung der Herstellung von diversen Produktvarianten zu ermöglichen, wird eine flexible Produktion benötigt. Das Bild 6.31 rechts illustriert ein Konzept der flexiblen Produktion [175; 177; 178].

Die Maschinen werden nicht nacheinander, sondern durch ein als Kreis dargestelltes Verteilzentrum verbunden. Alle Maschinen werden als Individuen betrachtet und sind unabhängig von anderen. Dadurch können die Prozesse flexibel gestaltet werden. Die Systemstruktur wird in diesem Konzept abgeschafft. Somit sind die durch Strukturveränderung entstandenen Probleme nicht mehr vorhanden.

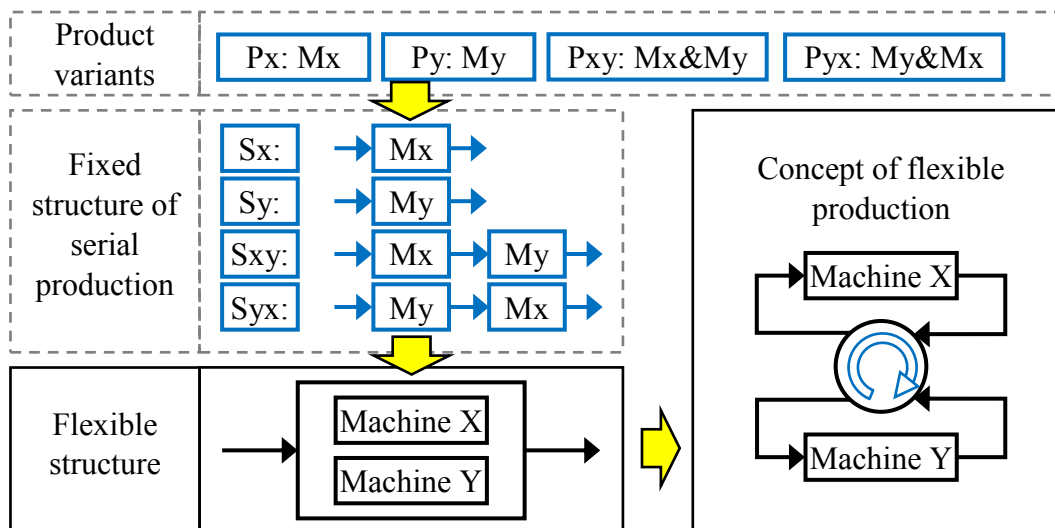


Bild 6.32: Konzept des Modells von flexibler Produktion [175; 177; 178]

Die Herstellung von drei Produktvarianten wird untersucht. "P" ist das Produkt, "M" ist die Maschine und "S" ist die Struktur des Produktionssystems. Die Alphabete x und y stellen zwei unterschiedliche unabhängige Prozesse dar, die von den Maschinen X und Y verarbeitet werden. Durch die Kombination dieser Prozesse können verschiedene Produktvarianten erzeugt werden. Zum Beispiel wird das Produkt 'Pxy' von Maschine X und Maschine Y erzeugt, während 'Pyx' von Maschine Y und X. Um die Flexibilität zu modellieren, muss die Reihenfolge der Prozesse flexibel sein. Um die Produktion verschiedener Produkte zu modellieren, müssen unterschiedliche Systemstrukturen generiert werden, was zu einer komplexen Modellierung führt. Die variable Struktur ist eine Herausforderung für die Modellierung des Produktionssystems, insbesondere für komplexe Systeme. Eine feste Struktur beschränkt sich auf die Realisierung realistischer Produktionen. Daher ist es notwendig, ein flexibles Modell mit allen möglichen festen Strukturen zu entwerfen. Die Abfolge der Prozesse sollte im Modell flexibel sein und die Strukturen des Systems sollten aufgelöst werden. Die Maschinen sind unabhängig und können bei Bedarf umgeschaltet werden. Daher können alle Strukturen mit diesem Modell simuliert werden.

Modell der flexiblen Produktionssysteme

Das Bild 6.33 zeigt ein Petrinetz-Modell der flexiblen Produktion mit Berücksichtigung der Warteschlange und Priorität (Modell C). Die Stelle P1 beschreibt den Auftrag der zu herstellenden Produkte. Die Produkte werden mit den Marken in Form „n'(a,b,c,d,pr)“ dargestellt. Dabei bedeutet „n“ die Anzahl der Produkte. Die Buchstaben a, b, c und d weisen die entsprechenden Prozesse hin. Die Zahl „0“ bedeutet, dass der entsprechende Prozess

durchzuführen ist. Die Zahl „1“ deutet hin, dass der Prozess entweder nicht notwendig zu bearbeiten ist oder schon bearbeitet wurde. Die Marke entspricht bspw. RFID auf dem Bauteil in der Realität mit individuellem Arbeitsplan.

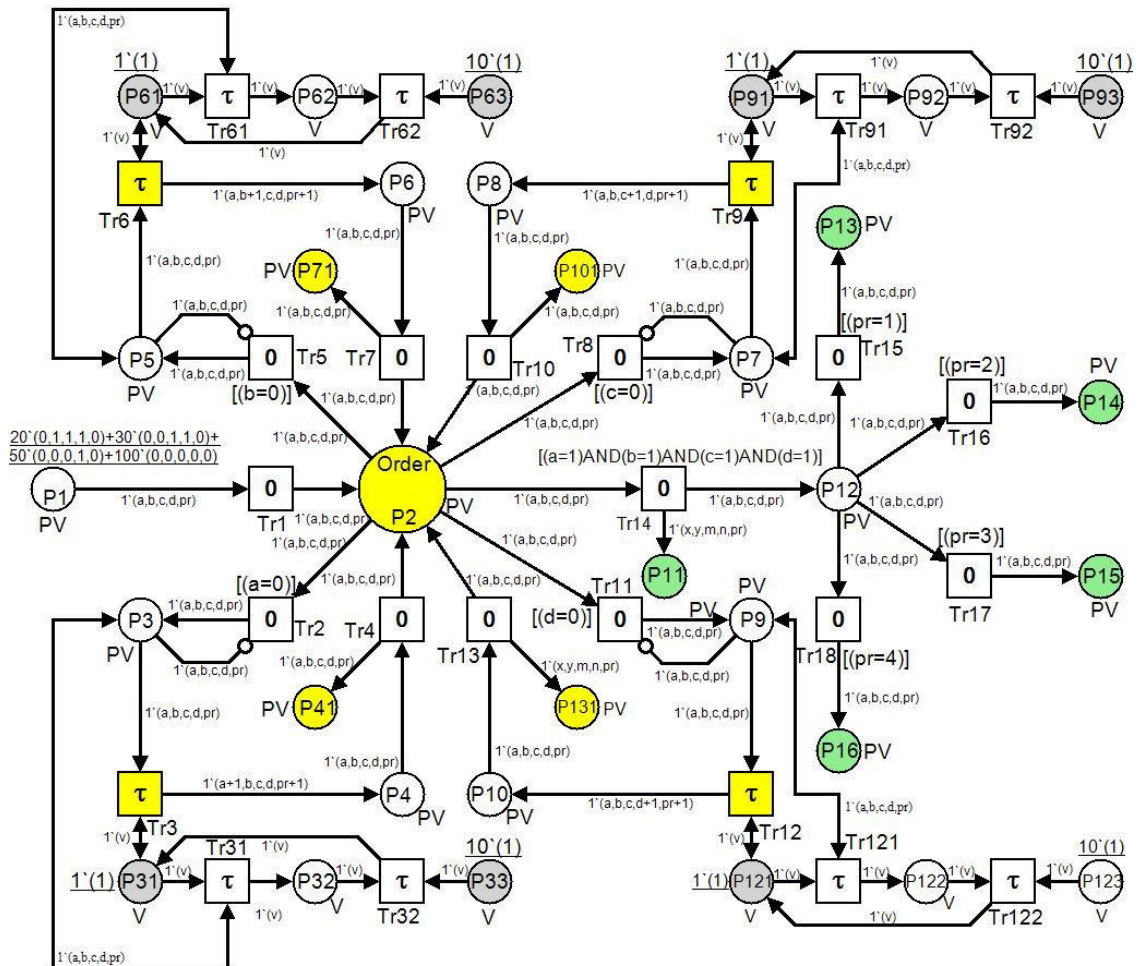


Bild 6.33: Modell C: Modell eines flexiblen Produktionssystems [177]

Die Stelle P2 entspricht dem Verteilzentrum in obigem Konzept und ist ein zentraler Puffer für alle Maschinen. Sie kann als der „Supermarkt“ in heutigen Produktionssystemen betrachtet werden. Das Warteschlangenprinzip und die Priorität dienen dazu, die zu bearbeitenden Produkte nach definierter Reihenfolge zu sortieren. Die Wächterfunktionen der Transitionen Tr2, Tr5, Tr8 und Tr11 haben die Funktion, die richtigen zu bearbeitenden Prozesse eines Produkts zu erkennen. Sie können nach Bedarf angepasst werden. Die Normalkante und die Verbotkante zwischen Tr2 und P3 bewirken, dass nur jeweils ein Produkt zu Maschine A versandt wird. Während der Bearbeitung wird kein weiteres Produkt zu dieser Maschine transportiert.

Die Transition Tr3 entspricht dem Bearbeitungsprozess von Maschine A. Sie ist durch eine Lesekante mit der Stelle P31 verbunden, die die Verfügbarkeit der Maschine A zeigt. Die Elemente zwischen P31 und P33 modellieren die Lebensdauer, die Instandhaltung und die

Ersatzteile der Maschine. Nach der Bearbeitung wird das Produkt durch den Kantenausdruck „ $l^{\backslash}(a+1,b,c,pr+1)$ “ zwischen Tr3 und P4 markiert. Die Priorität wird um eins erhöht. Die Stelle P41 dient dazu, die Produktivität der Maschine A zu bewerten. Die anderen Maschinen B, C und D sind wie die Maschine A gestaltet. Mit der Wächterfunktion in Tr14 „ $[(a=1)AND(b=1)AND(c=1)AND(d=1)]$ “ können die Endprodukte aussortiert werden. Die Elemente hinter der Stelle P12 dienen dazu, die Endprodukte nach Produktvarianten zu sortieren.

Das im Bild 6.33 dargestellte Modell der flexiblen Produktion kann durch Anpassung der Wächterfunktionen nach Tabelle 6.1 auch für eine definierte serielle Produktion verwendet werden.

Tabelle 6.1: Wächterfunktionen der Transition in flexiblen Modellen

Modell	Tr2	Tr5	Tr8	Tr11
Flexible Produktion	$[(a=0)]$	$[(b=0)]$	$[(c=0)]$	$[(d=0)]$
Serielle Produktion	$[(a=0)]$	$[(a=1)AND(b=0)]$	$[(a=1)AND(b=1)AND(c=0)]$	$[(a=1)AND(b=1)AND(c=1)AND(d=0)]$

Das Bild 6.34 (a) stellt den Vergleich der kumulierten Produktionsmengen der seriellen und flexiblen Produktion dar. Die Produktivität (Steigung der Kurve) der flexiblen Produktion (F) ist am Anfang sehr gering. Jedoch steigt sie später sehr schnell und ist am Ende am höchsten. Der S-förmige Verlauf deutet hin, dass die Prozesse stochastisch bearbeitet werden. Dagegen werden die Produkte im seriellen Modell (S) nach einer Prozessreihenfolge hergestellt. Deshalb hat es eine konstante Produktivität. Das Bild 6.34 (b) zeigt die kumulierten Produktionsmengen der jeweiligen Maschinen. Es ist zu erkennen, dass die Maschine A höchste Anzahl der Produkte zu bearbeiten hat. Deshalb hat die Maschine A auch die höchsten Instandhaltungskosten verursacht, wie im Bild 6.34 (c) dargestellt. Die Instandhaltungskosten sind proportional zur kumulierten Produktionsmenge. Von der Produktionsmenge und Instandhaltungskosten von Maschine A kann man erkennen, dass die beiden Modelle gleiche Ergebnisse liefern. Bild 6.34 (d) zeigt eine Übersicht der Kosten von flexiblen Produktionssystemen mit angenommenen fiktiven Werten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kosten entsprechend einer S-Kurve steigen. Der Grund liegt darin, dass alle Prozesse stochastisch gewählt und bearbeitet werden. Die Produkte mit mehreren Prozessen müssen in der Produktionslinie so lang bleiben, bis alle Prozesse durchgeführt werden. Die Instandhaltungskosten steigen dagegen allmählich im Laufe der Zeit an, weil die Maschinen wie in seriellen Produktionssystemen nach den angewendeten Verteilungsfunktionen ausfallen. Die Instandhaltungskosten sind proportional zur kumulierten Produktionsmenge. Die Herstellungskosten der seriellen Produktionssysteme steigen linear an, wobei die Herstellungskosten der flexiblen Produktionssysteme entsprechend einer S-Kurve zunehmen.

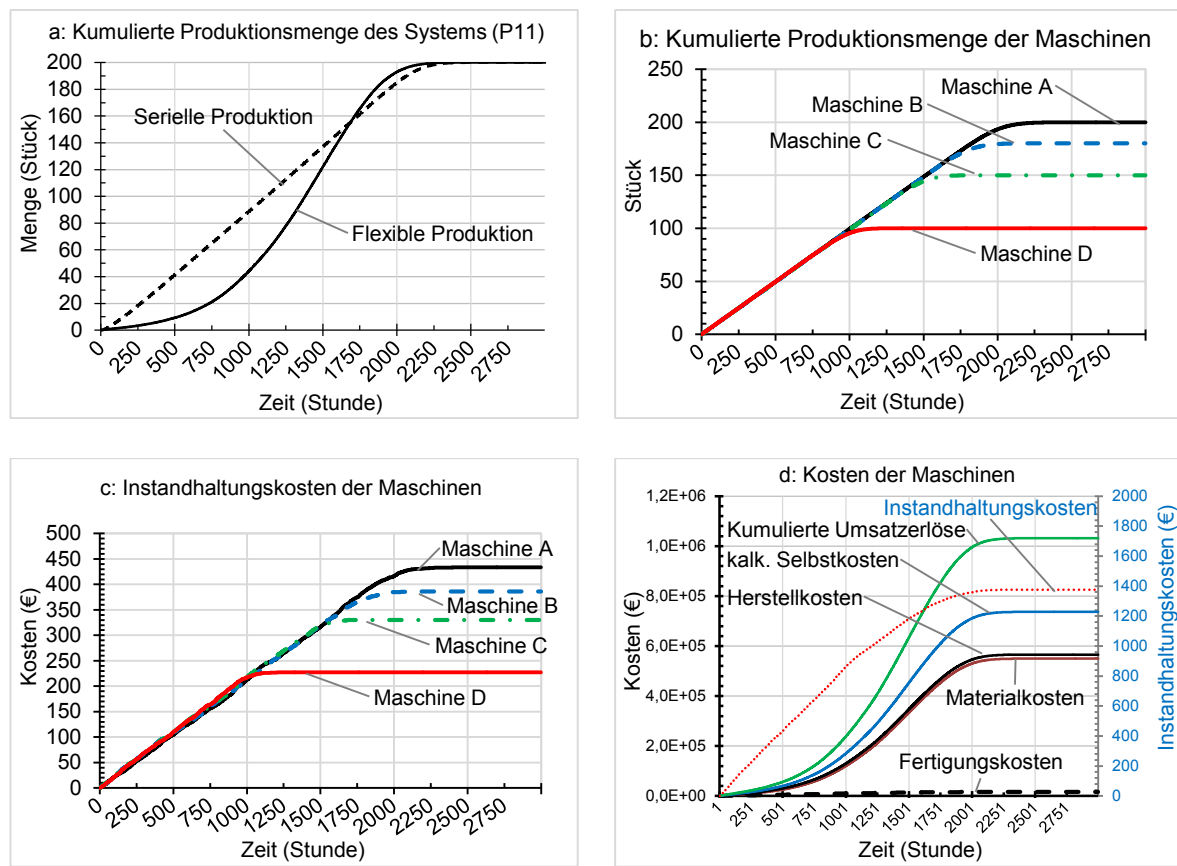


Bild 6.34: Ergebnisse der flexiblen Produktion mit angenommenen fiktiven Werten

6.2.8 Modelle der Selbstorganisation

Selbstorganisation mit Wächterfunktionen und Verbotskanten

In Produktionssystemen treten oft Optimierungsprobleme auf. Das System kann sich selbst durch autonome Selbstorganisation konfigurieren, um die optimale Lösung zu finden. Für Maschinen ist Selbstorganisation eine intelligente Fähigkeit, die die Arbeit von Menschen vereinfachen und unterstützen kann. Entsprechend den Bedürfnissen der Kunden und des Marktes sollten diverse Produktvarianten hergestellt werden. Dies erfordert oft flexible Produktionsprozesse und viele Organisationsarbeiten. Wenn ein Produktionssystem in der Lage ist, die Prozesse selbst zu organisieren, kann die Produktion viel effizienter sein. In der Literatur [174] wurde es untersucht, diese Selbstorganisation mit ECSPN unter Verwendung von Wächterfunktionen und Verbotskanten innerhalb eines bestimmten Bereichs zu modellieren. Die Anwendung von ECSPN ist in Bild 6.35 [174] dargestellt.

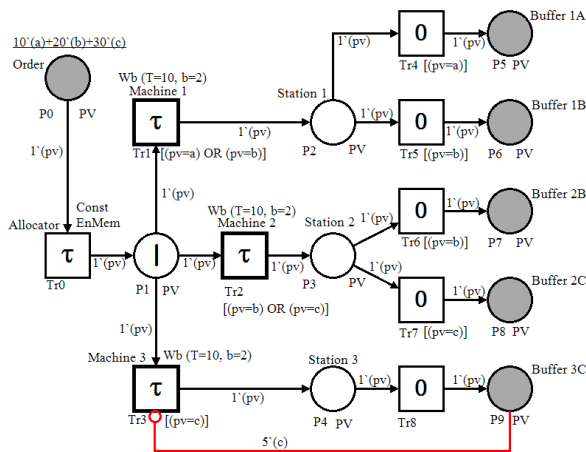


Bild 6.35: Selbstorganisation: ein Beispiel mit Wächterfunktionen und Verbotskanten [174]

Es gibt drei Produktvarianten (a, b und c) mit unterschiedlichen Stückzahlen, die von drei Maschinen produziert werden können. Die Maschine 1 kann die Varianten a und b herstellen, während die Maschine 2 die Varianten b und c, die Maschine 3 nur die Variante c herstellen kann. Die Informationen der Varianten und ihre Anzahl der Teile werden als farbige Token "10` (a) + 20` (b) + 15` (c)" beschrieben, die an der Stelle P0 (genannt Order) enthalten sind. Die Transition Tr0, die als "Allocator" bezeichnet wird, sorgt dafür, dass die Werkstücke gleichmäßig verteilt sind. Mit der Wächterfunktion [(pv = a) ODER (pv = b)] in Transition Tr1 kann nur die Produktvariante a oder b ausgewählt und an "Station 1" (Stelle P2) gesendet werden. Die Produktionszeit der Produkte ist unterschiedlich und hängt von den Varianten und den Maschinen ab. Daher wird die Maschine 1 als zwei Teile mit den Transitionen Tr4 und Tr5 beschrieben, um die verschiedenen Prozesse für die Produkte a und b zu unterscheiden. Um diesen Zweck zu erreichen, werden die Wächterfunktionen [(pv = a)] und [(pv = b)] werden in Tr4 und Tr5 im Modell verwendet. Die Maschine 2 wird auf die gleiche Weise beschrieben. Mit der Wächterfunktion können Funktionen wie Erkennung und Differenzierung modelliert werden.

Als ein weiteres Beispiel wird die Selbstkontrolle, eine der Funktionen der Selbstorganisation, durch eine spezielle Kante in ECSPN: die Verbotskante beschrieben. Im Modell verbindet diese Kante die Stelle P9 mit der Transition Tr3. Mit dem Kantenausdruck 5 '(c) kann diese Verbotskante die Funktion erfüllen, dass die Transition Tr3 bei Überschreitung von fünf c-Produkten im Puffer C nicht aktiviert werden kann. Das bedeutet, dass die Maschine 3 die Variante c nicht mehr herstellen kann.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Selbstorganisation mit Wächterfunktionen und Verbotskanten [174]

No.	1	2	3	4
Time parameters	Wb (Tr1=Tr2=Tr3=10, b=2)	Wb (Tr1=Tr2=Tr3=10, b=2)	Wb (Tr1=15, Tr2=Tr3=10, b=2)	Wb (Tr1=5, Tr2=Tr3=10, b=2)
Prohibition arc	No	Yes	Yes	Yes
Tr1 (Product a,b)	19.9	19.9	16.1	25.9
Tr2 (Product b,c)	25.0	35.1	38.9	29.1
Tr3 (Product c)	15.1	5.0	5.0	5.0
Tr4 (Product a)	10.0	10.0	10.0	10.0
Tr5 (Product b)	9.9	9.9	6.1	15.1
Tr6 (Product b)	10.1	10.1	13.9	4.1
Tr7 (Product c)	14.9	25.0	25.0	25.0
Tr8 (Product c)	15.1	5.0	5.0	5.0
P5 (Product a)	10.0	10.0	10.0	10.0
P6 (Product b)	9.9	9.9	6.1	15.9
P7 (Product b)	10.1	10.1	13.9	4.1
P8 (Product c)	14.9	25.0	25.0	25.0
P9 (Product c)	15.1	5.0	5.0	5.0

Die Ergebnisse der Modelle sind in Tabelle 6.2 gezeigt. Alle Modelle werden mit einer Simulationszeit von 1000 Stunden und 1000 Replikationen simuliert. Als Referenzgruppe wird die Simulation Nr. 1 ohne Verbotskante simuliert. Das bedeutet, dass es für die Transition Tr3 keine Begrenzung gibt und die Transitionen Tr2 und Tr3 die gleiche Wahrscheinlichkeit haben, das Produkt c herzustellen. Wie in Tabelle 6.2 gezeigt, haben die Stellen P8 und P9 die gleiche Anzahl von Produkten c. In der Simulation Nr. 2 wird eine Verbotskante mit der Kantenmarkierung 5'(c) verwendet, um die Transition Tr3 zu begrenzen. Daher können nur fünf Produkte c von der Maschine 3 bearbeitet werden, was dem Ergebnis der Stelle P9 entspricht.

Die Modelle Nr. 3 und Nr. 4 zeigen die Simulationen, in denen die Bearbeitungszeit der Maschine 1 verändert wird. In Nr. 3 wird die Bearbeitungszeit von 10 Stunden auf 15 Stunden geändert, was bedeutet, dass Maschine 1 weniger Produkte produzieren kann. Da Produkt a nur von Maschine 1 hergestellt werden kann, hat dies keine Auswirkungen auf Produkt a. Wie in Tabelle 6.2 gezeigt, gibt es 10 Produkte an Stelle P5, die durch die Transition Tr4 erzeugt werden. An der Stelle P6 gibt es nur 6,1 Stück Produkt b, 3,8 Stück weniger als in Nr. 2. In Nr. 4 wird die Verarbeitungszeit auf 5 Stunden geändert, was bedeutet, dass Maschine 1 mehr Gelegenheit haben sollte und mehr Produkte produzieren kann. Tabelle 6.2 zeigt, dass die Anzahl von Produkt b an der Stelle P6 15,9 beträgt, was 6 Stück mehr ist als in Nr. 2.

Dieses Beispiel zeigt, dass Wächterfunktionen und Verbotskanten verwendet werden können, um Selbstorganisation und Selbstkontrolle zu modellieren. Ein intelligentes Produktionssystem sollte in der Lage sein, die Produktion automatisch zu organisieren und sich selbst zu konfigurieren, um die optimale Lösung zu finden und eine effiziente Produktion zu erreichen. Daher sollte das System in der Lage sein, sich selbst zu ändern. Eine Einschränkung dieses Modells besteht darin, dass die Wächterfunktionen und Verbotskanten vom Produktionssystem selbst nicht geändert werden können. Um eine vollständige Selbstorganisation zu realisieren, muss ein viel größeres und komplexeres Modell erstellt werden.

Selbstorganisation mit Priorität

Die Priorität, die häufig in der Produktion verwendet wird, kann durch ECSPN als ein Faktor für die Selbstorganisation modelliert werden. In der Literatur [174] wurde die Priorität für die Auswahl eines gewünschten Produkts oder Prozesses verwendet. Bild 6.36 [174] zeigt ein Modell zur Herstellung von zwei Produkten a und b mit Maschinen 1 und 2. Die Maschine 1, die durch die Transition Tr1 beschrieben wird, kann die Produkte a und b produzieren, während die Maschine 2, die mit Transition Tr2 dargestellt wird, kann nur Produkt b bearbeiten. Die Priorität wird im Modell als "Pr" beschrieben. Die Transition Tr2 im Modell, die mit "Pr = 2" gekennzeichnet ist, hat eine höhere Priorität als der mit "Pr = 1" gekennzeichneten Transition Tr1. Das bedeutet, dass die Maschine 2 vorzugsweise im Vergleich zu Maschine 1 ausgewählt wird, um Produkt b herzustellen.

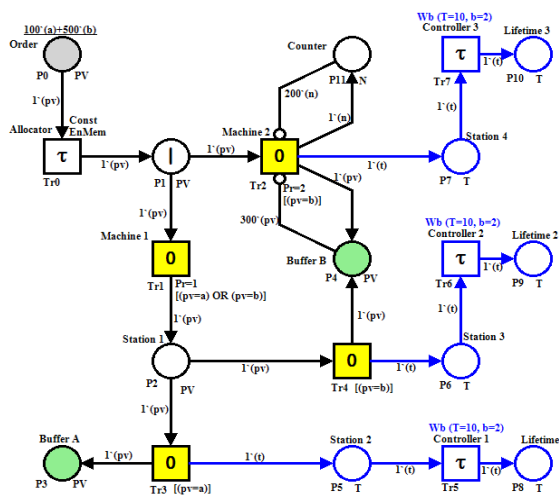


Bild 6.36: Selbstorganisation: ein Beispiel von ECSPN mit Prioritäten [174]

Das Modell der Selbstorganisation wird mit unterschiedlichen Prioritäten und Zeitparametern simuliert. Die Bearbeitungszeiten der Maschinen 1 und 2 werden getrennt mit den Transitionen Tr5, Tr6 und Tr7 modelliert. In den Modellen S1, S3 und S4 sind die Prioritäten der Maschinen 1 und 2 gleich. In den Modellen S2 und S5 ist die Priorität der Maschine 2 höher als die der Maschine 1. Die Maschine 2 wird bevorzugt, um das Produkt b herzustellen. Mit der Verbotskante zwischen "Counter" und Maschine 2 könnten nur 200 Stück Produkt b durch die Maschine 2 hergestellt werden. Dies ist der Grund, warum die Anzahl der bearbeiteten Produkte von Tr2, Tr7 und P10 in S2 und S5 200 ist.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Selbstorganisation mit Prioritäten [174]

No.	S1	S2	S3	S4	S5	
Priority	$Pr(Tr1)=Pr(Tr2)=1$	$Pr(Tr1)=1, Pr(Tr2)=2$	$Pr(Tr1)=Pr(Tr2)=1$	$Pr(Tr1)=Pr(Tr2)=1$	$Pr(Tr1)=1, Pr(Tr2)=2$	
Time parameters	$Wb(T(Tr5)=T(Tr6)=T(Tr7)=10, b=2)$	$Wb(T(Tr5)=T(Tr6)=T(Tr7)=10, b=2)$	$Wb(T(Tr5)=T(Tr6)=15; T(Tr7)=10, b=2)$	$Wb(T(Tr5)=T(Tr6)=5; T(Tr7)=10, b=2)$	$Wb(T(Tr5)=T(Tr6)=5; T(Tr7)=10, b=2)$	
Transition	Tr1 (Product a,b)	450.2	400.0	450.2	450.3	400.0
	Tr2 (Product b)	149.8	200.0	149.8	149.7	200.0
	Tr3 (Product a)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Tr4 (Product b)	350.2	300.0	350.2	350.3	300.0
	Tr5 (Product a)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Tr6 (Product b)	350.2	300.0	350.0	350.3	300.0
	Tr7 (Product b)	149.8	200.0	149.8	149.7	200.0
Place	P3 (Product a)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	P4 (Product b)	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
	P8 (Product a)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	P9 (Product b)	350.2	300.0	350.0	350.3	300.0
P10 (Product b)	149.8	200.0	149.8	149.7	200.0	

Die kumulierte Produktionsmenge der Maschinen 1 und 2, die separat modelliert werden, sind in Bild 6.37 dargestellt.

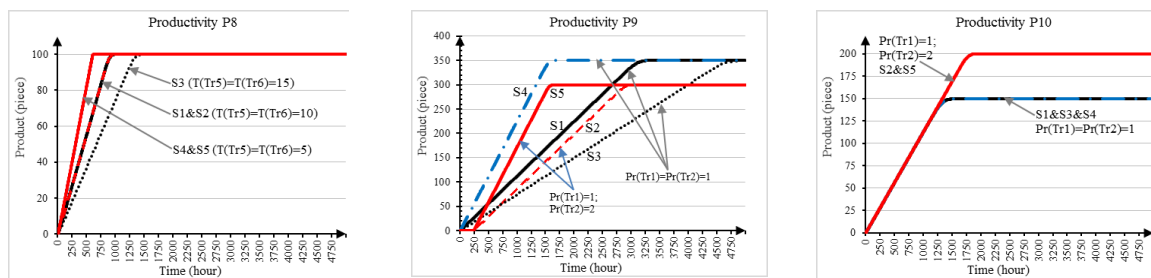


Bild 6.37: Kumulierte Produktionsmenge in Abhängigkeit von Prioritäten [174]

Eine Einschränkung dieses Modells besteht darin, dass die Prioritäten definiert und manuell geändert werden müssen. In Zukunft könnte die Maschine ihre eigenen Zustände analysieren und ihre Prioritäten automatisch ändern. Dies könnte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Eine Einschränkung des ECSPN liegt darin, dass die Zustände, insbesondere in komplexen Systemen, explodieren können. Eine mögliche Lösung wäre die Entwicklung eines automatisierten Simulationswerkzeugs zur Lösung dieses Problems.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund immer mehr verschärften Umweltschutz- und Arbeitsschutzvorschriften werden in der modernen Produktionsindustrie immer komplexere, hochautomatisierte Maschinen und Anlagen eingesetzt. Diese Maschinen und Anlagen erfordern neben intensivem Kapital auch noch immer höhere Anforderungen an die prozesssichere Verfügbarkeit und Betriebssicherheit. Die hohen Anschaffungskosten bringen nicht nur hohe Maschinenstundensätze mit sich, sondern auch steigende Stillstands- und Folgekosten. Der Schwerpunkt liegt nicht nur auf die Arbeitssicherheit, Arbeitsgenauigkeit, Leistungsvermögen, Umweltverhalten und Zuverlässigkeit, sondern auch die Verfügbarkeit.

Mit erhöhender Konkurrenz und der weiter entwickelnden Wissenschaft und Technik werden die Produktionssysteme immer größer und komplexer. Mit der fortschreitenden Beschleunigung der Industrialisierung steigen heutzutage die Anforderungen an Produktion immer auf. Die Produktionssysteme stehen vor immer schneller wachsenden Herausforderungen. Die traditionelle Fertigungsindustrie ist eindeutig nicht mehr in der Lage, die sich ständig ändernden Marktanforderungen zu erfüllen. Die Nachfrage nach flexibleren und effizienteren Produktionssystemen und Fertigungsmethoden wird unter dieser Situation immer dringender. Mit der rasanten Entwicklung der Informationstechnologie ist die effektive Simulation von Produktionssystemen unter Verwendung von Computern und Softwar ein wirksames Mittel zur Erstellung von Produktionssystemen geworden. Aus diesem Grund ist die Erforschung einer vernünftigen, effizienten und exakten Simulationsmethode für Produktionssysteme zu einem der wichtigsten Themen geworden.

Mit der zunehmenden Personalisierung der Produktionsanforderungen steigen heute die Flexibilität und Komplexität der Produktionssysteme immer auf. Unter demselben Produktionssystem können die Produktionsplanungen für unterschiedliche Produktionsanforderungen und Optimierungsziele sehr unterschiedlich sein.

Hinsichtlich der Flexibilität wurde die flexible Struktur der Produktionssysteme in Abhängigkeit von flexiblen Varianten und Stückzahlen untersucht. Um die Produktionssysteme systematisch und realitätsnah zu analysieren, wird die Modellierungsmethode Petrinetz verwendet, um die flexiblen Produktionssysteme mit Berücksichtigung der Wechselwirkung zu modellieren. Die Auswirkungen der Flexibilität auf die Produktivität und Verfügbarkeit wurden analysiert. Weiter sind die Auswirkungen der anderen speziellen Eigenschaften von Produktionssystemen auf die Verfügbarkeit zu analysieren.

7.2 Ausblick

Die Grundmodelle bieten die Möglichkeiten an, die Aspekte der Produktionssysteme einzeln zu analysieren. Weiter können die Aspekte in einem Modell zur Analyse der Verfügbarkeit modelliert werden.

Verfügbarkeitsorientierte Modellierung der Produktionssysteme in Industrie 4.0

In den Literaturen wurden verfügbarkeitsorientierte Zuverlässigkeitsuntersuchung [211] und Instandhaltung [278; 280] zur Steigerung der Verfügbarkeit beschrieben. Wie im Bild 6.10 dargestellt wird die Verfügbarkeit eines Produktionssystems von vielen diversen Faktoren beeinflusst. Um die Verfügbarkeit realitätsnah modellieren und analysieren zu können, kann ein verfügbarkeitsorientiertes Modell zur Untersuchung der Verfügbarkeit in Produktionssystemen aufgebaut werden.

Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit eines Systems mit Berücksichtigung der Restlebensdauer einer gebrauchten Maschine

Die Restlebensdauer einer (gebrauchten) Maschine kann nach der geplanten Nutzung für einen anderen Zweck aufgebraucht werden, um die Herstellungskosten der Produktionssysteme in der Zukunft weiter zu reduzieren.

Erweiterung der Software REALIST mit modularen Elementen

Für die Modellierung und Analyse komplexer Systeme ist es zu zeitaufwändig, ganzes System und alle Systemelemente mit Basiselementen von Petrinetz aufzubauen. Modulare Elemente mit diversen Parametern können die Modellierung vereinfachen.

Für Modellierung der Produktionssysteme stehen diverse kommerzielle und Open-Source Simulationstools auf dem Markt zur Verfügung. Die meisten Tools fokussieren auf die Darstellung und Optimierung der Produktionsprozesse für die Produktionsplanung. Zur Erweiterung und Optimierung der Software REALIST können folgende Software zuerst untersucht werden: AnyLogic [13], Arena [14], Care pathway simulator (CPS) [43], CPN Tools [49], Enterprise Dynamics [74], ExtendSim [75], DELMIA (Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) [55], das Simulationstool „Factor/AIM“ [171], FlexSim [84], GoldSim [101], Micro Saint Sharp [199], MS4 Modeling Environment (MS4 Me) [204], PowerDEVS [235], Plant Simulation [232], Simcad Pro [287], SimEvents [288], SIMUL8 [289], VisualSim [332], Witness [352].

8 Literaturverzeichnis

- [1] Betriebstechnik - Schäden an der Mechanik.
<https://www.wiwiweb.de/betriebstechnik/erfassen-und-bewerten-von-schwachstellen-schaeden-und-funktionsstoerungen-sowie-abschaetzen-und-begrueenden-von-auswirkungen-geplanter-eingriffe/schwachstellen-und-oder-schadensverdaechtige-stellen-von-maschinen-und-anlagen/schaeden-an-der-mechanik.html>. Zuletzt geprüft am 27.09.2022.
- [2] Bruchsicherheit und Verfügbarkeit : 13./14. Oktober 1983. Staatl. Materialprüfungsanstalt, Univ. 1983.
- [3] Verbundbetrieb in Fernwärmenetzen: Hohe Verfügbarkeit durch sicheren Betrieb. Essen: Rhein.-Westfäl. TÜV. 1988.
- [4] Abele, M.: Modellierung und Bewertung hochzuverlässiger Energiebordnetze - Architekturen für sicherheitsrelevante Verbraucher in Kraftfahrzeugen. Universität Kassel. Kassel. Dissertation. 2008.
- [5] acatech, Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. 2013.
- [6] Aggarwal, N., Ranganathan, P., Jouppi, N. P., Smith, J. E.: Configurable isolation: building high availability systems with commodity multi-core processors. In: ISCA '07 Proceedings of the 34th annual international symposium on Computer architecture. San Diego, California, USA. 2007, 35(2), S. 470–481.
- [7] Aktaa, J., Schmitt, R.: Creep fatigue lifetime prediction rules for ferritic martensitic steels: (final report task: TW2-TTMS-005a D4). Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe. 2004.
- [8] Al Hanbali, A.: Beitrag zur Ermittlung der Gesamtverfügbarkeit in Fließproduktionssystemen. Logistics Journal: Proceedings. 2011.
- [9] Amir, Y., Dolev, D., Kramer, S., Malki, D.: Transis: A communication sub-system for high availability (pp. 76-84). Hebrew University of Jerusalem. Leibniz Center for Research in Computer Science. Department of Computer Science. 1991, S. 76–84.
- [10] Anacker, H., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Iwanek, P., Schierbaum, T.: Methodology for the Identification of Potentials for the Integration of Self-optimization in Mechatronic Systems. In: *Procedia Technology*. 2014, 15, S. 17–26.
- [11] Anderson, P. E., Bunten, R. J., Higgins, W. T., Hruby, R. J., Mirabeau, S.: Multiprocessor system architecture with high availability. U.S. Patent No. 4,958,273. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 1990.
- [12] Andruleit, H., Bahr, A., Babies, H. G., Franke, D., Meßner, J., Pierau, R., Weihmann, S.: Energiestudie 2013 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von

- Energierohstoffen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. 2013.
- [13] AnyLogic: The AnyLogic Company. <http://www.anylogic.com>. Zuletzt geprüft am 20.07.2022.
- [14] Arena: Rockwell Automation. www.arenasimulation.com. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [15] Aven, T.: Availability evaluation of oil/gas production and transportation systems. In: *Reliability engineering*. 1987, 18(1), S. 35–44.
- [16] Bandow, G., Holzmüller, H. H.: "Das ist gar kein Modell!" Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2010.
- [17] Barnett, H. J., Morse, C.: Scarcity and growth: The economics of natural resource availability. RFF Press. 2013.
- [18] Bauer, E., Adams, R.: Reliability and availability of cloud computing. Hoboken, N.J: Wiley-IEEE Press. 2012.
- [19] Bauernhansl, T., Ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung · Technologien · Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2014.
- [20] Bause, F., Buchholz, P., Kemper, P.: Hierarchically Combined Queueing Petri Nets. In: *11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems Discrete Event Systems*. 1994, S. 176–182.
- [21] Beaumariage, T., Kempf, K.: The nature and origin of chaos in manufacturing systems. In: *Advance Semiconductor Manufacturing Conference*. IEEE/SEMI. 1994, S. 169–174.
- [22] Bell, C., Kindahl, M., Thalmann, L.: MySQL high availability: tools for building robust data centers. Beijing, Köln: O'Reilly. 2010.
- [23] Bertsche, B.: Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of component and system reliability; with ... and 66 tabl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008.
- [24] Bertsche, B., Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. Berlin, Heidelberg: Springer. 2004.
- [25] Böckmann, H.: Technisch-wirtschaftliche Kriterien hinsichtlich der Verfügbarkeit komplexer Lager- und Warenverteilssysteme. Technische Universität Berlin. Berlin. Dissertation. 1978.
- [26] Boog, M.: Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Dissertation. 2010.

-
- [27] Bosse, S., Splieth, M., Turowski, K.: Vorhersagemodell für die Verfügbarkeit von IT-Services aus Anwendungssystemlandschaften. In: *Wirtschaftsinformatik*. 2013, 935-949.
- [28] Böttcher, S.: Dynamische Beanspruchungen und deren Zeitverläufe in ihrer Wirkung auf die Lebensdauer und Verfügbarkeit von Hüttenwerksanlagen. Stahleisen. 1972.
- [29] Bouhouche, S., Yahi, M., Bast, J.: Combined use of principal component analysis and self organisation map for condition monitoring in pickling process. In: *Applied Soft Computing*. 2011, 11(3), S. 3075–3082.
- [30] Bowden, F. D. J.: A brief survey and synthesis of the roles of time in Petri nets. In: *Mathematical and Computer Modelling*. 2000, 31(10-12), S. 55–68.
- [31] Braun, O.: Ablaufplanungsprobleme mit beschränkter Verfügbarkeit der Prozessoren und beschränkter Anzahl der Präemtionen. Universität des Saarlandes. Saarbrücken. Dissertation. 2002.
- [32] Brecher, C. (Hrsg.): Zuverlässige Produktionsanlage (ZuPro). Band 6 der Reihe "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung". Aachen: Apprimus Verlag. 2010.
- [33] Brendel, T.: Entwicklung eines Diagnosesystems für Umformmaschinen zur Erhöhung der Verfügbarkeit. Universität Hannover. Hannover. Dissertation. 1994.
- [34] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., Rosenberg, M.: How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective. In: *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*. 2014, 8(1), S. 37–44.
- [35] Brunschede, G., Schackert, K., Troll, E., Winkler, K.: Ermittlung der Verfügbarkeit von EDV-Systemen, EDV-Anwendungen, EDV-Geräten. In: *Das Rechenzentrum*. 1984, 7(1), S. 5–22.
- [36] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): BGR Energiestudie 2018 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung (22). Hannover: 2019.
- [37] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Zwischenbilanz Rahmenkonzept „Produktion 2000“. BMBF. Referat Öffentlichkeitsarbeit. Bonn. 1997.
- [38] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen". Bonn. 1999.
- [39] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bekanntmachung von Förderrichtlinien des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-108.html>. Zuletzt geprüft am 24.05.2019.
- [40] Bunse, P., Judica, N.: Expertensysteme zur Verfügbarkeitsoptimierung flexibler Fertigungszellen. In: *ZwF*. 1989, 84, S. 211–214.

-
- [41] Buzacott, J. A., Shanthikumar, J. G.: Models for understanding flexible manufacturing systems. In: *AIIE Transactions*. 1980, 12(4), S. 339–350.
- [42] Caldarola, L.: New definition of reliability, continuous lifetime prediction, and learning processes: Presented at the Internat. NATO Conference on Reliability Univ. of Liverpool England 16 - 27 July 1973. Karlsruhe: Ges. f. Kernforschung mbH. 1973.
- [43] Care Pathway Simulator (CPS): SAASoft Ltd. www.saasoft.com. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [44] Chinas Staatsrat: Bekanntmachung des Staatsrates für Druck und Vertrieb "Made in China 2025". In: *Xinhua Nachrichtenagentur*. 2015, (28).
- [45] Christian Brecher (Hrsg.): ZuPack - Zustandsorientierte Instandhaltung von Verpackungsmaschinen. Band 5 der Reihe „Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung“. Aachen: Apprimus Verlag. 2010.
- [46] Coley, P. D., Bryant, J. P., Chapin, F. S.: Resource availability and plant antiherbivore defense. In: *Science*. 1985, 230(4728), S. 895–899.
- [47] Conrad, C., Pem, M.: Vergleich zwischen dampf- und gassterilisierbaren Optiken Kosten, Verfügbarkeit, Reparaturanfälligkeit. In: *Der Chirurg : Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin*. 1998, S. 212–214.
- [48] Corvaro, F., Giacchetta, G., Marchetti, B., Recanati, M.: Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618. In: *Petroleum*. 2017, 3(2), S. 266–272.
- [49] CPN Tools: A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets. AIS group, Eindhoven University of Technology, The Netherlands. <https://cpntools.org/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [50] Cramer, B., Andruleit, H., Babies, H. G., Rehder, S., Rempel, H., Schmidt, S., Schwarz-Schampera, U.: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Jahresbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). 2013.
- [51] Cranganu, C., Luchian, H., Breaban, M. E.: Artificial Intelligent Approaches in Petroleum Geosciences. Switzerland: Springer International Publishing. 2015.
- [52] Cully, B., Lefebvre, G., Meyer, D., Feeley, M., Hutchinson, N., Warfield, A.: Remus: High availability via asynchronous virtual machine replication. In: Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. 2008, S. 161–174.
- [53] Dal Cin, M.: Fehlertolerante Systeme: Modelle der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Diagnose und Erneuerung. Stuttgart: Teubner. 1979.
- [54] Delibašić, B. (Hrsg.): Decision support systems V -- big data analytics for decision making: First International Conference, ICDSST 2015, Belgrade, Serbia, May 27-29, 2015, proceedings. Cham: Springer. 2015, 1 online resource (xv, 111).
- [55] DELMIA: Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application. Dassault Systèmes. www.3ds.com/products/delmia/. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.

-
- [56] Dettmers, Jan und Bamberg Eva: Verfügbarkeit für die Erwerbsarbeit–Analyse von Anforderungen, Belastungen und Ressourcen. In: *Innovationsfähigkeit im demografischen Wandel*. 2013, S. 115–124.
- [57] Deutsches Institut für Normung: DIN 40041: Zuverlässigkeit – Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 1990.
- [58] DGQ, DNA, NTG, VDI: Sitzung über Zuverlässigkeits- und Qualitätsbegriffe. 1974.
- [59] Diegele, E., Munz, D., Schweinfurter, G.: Lifetime prediction for the first wall of a fusion machine: IAEA co-ordinated research programme second interim report: behaviour of first wall components under thermal fatigue-stress analysis and life assessment. Karlsruhe: 1994.
- [60] Diesch, R.: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen. Technische Universität München. München. Dissertation. 1999.
- [61] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth. 2012-09.
- [62] DIN 40042: Zuverlässigkeit elektrischer Anlagen und Geräte. Begriffe (Vornorm, 1971).
- [63] DIN EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2010. Berlin: Beuth Verlag. 2010-12.
- [64] DIN EN 50126-1: Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS-Prozess. Berlin: Beuth. 2018-10.
- [65] Doege, E., Brendel, T.: Verfügbarkeit von Tiefziehpressen verbessern mit Diagnosesystemen. In: *Bänder Bleche Rohre*. 1991, 32(2), S. 45–50.
- [66] Dooley, K. J., Benjaafar, S.: Chaos and complexity in manufacturing systems. University of Minnesota. Working paper. 1994.
- [67] Duden-online: Verfügbarkeit. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Verfuegbarkeit>. Zuletzt geprüft am 27.08.2019.
- [68] Eberlin, S., Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme: Eine Einführung in die Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2014.
- [69] Eberling, H.: Verfügbarkeit von Materialflußsystemen in der Planungsphase. In: *Fördertechnik*. 1991, 60(8).
- [70] Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten. Technische Universität München. München. Dissertation. 1995.
- [71] Ebner, C., Lang, C.: Studie zum Thema Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. Frankfurt am Main: VDW. 1991.
- [72] Edwin, K. W.: Zuverlässigkeitsforschung in der elektrischen Energietechnik. In: *Elektrizitätswirtschaft*. Elektrizitätswirtschaft. 1974, 73, S. 243–247.

-
- [73] Edwin, K. W., Traeder, G.: Zuverlässigkeitskenngrößen der elektrischen Energietechnik. ETZ. 1973, 94, S. 569–573.
- [74] Enterprise Dynamics: INCONTROL Simulation Solutions. <https://www.incontrolsim.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [75] ExtendSim: Imagine That Inc. <https://www.extendsim.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [76] Fan, C. C., Aji, S. M., Bruck, J.: Dynamic network based storage with high availability. U.S. Patent No. 7,546,354. 9 Jun. 2009.
- [77] Faulin, J.: Simulation methods for reliability and availability of complex systems. London, Heidelberg: Springer. 2010.
- [78] Feldhusen, J., Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer. 2013.
- [79] Fields, R. K., Quinn, P. R., Blackley, T.: System and method for making staff schedules as a function of available resources as well as employee skill level, availability and priority. U.S. Patent No. 5,111,391. 5 May 1992.
- [80] Fietze, S., Matiaske, W., Schult, M., Tobsch, V.: Flexibilität durch Verfügbarkeit: Abrufarbeit in Deutschland (No. 27). Berichte der Werkstatt für Organisations-und Personalforschung. 2014.
- [81] Fleischer, J., Broos, A., Wieser, J., Schopp, M.: Datenbasis für lastabhängige Prozesseingriffe-Modularisierung und Analyse von Ausfallursachen zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. In: *wt Werkstattstechnik online*. 2007, 97(7/8), S. 491–497.
- [82] Fleischer, J., Nesges Daniel: Sicherung operationeller Verfügbarkeiten durch Maschinenlieferanten. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2004, 99(12), S. 702–706.
- [83] Fleischer, J., Niggeschmidt, S., Rühl, J.: Einfluss von Serviceleistungen auf die Verfügbarkeit produktionstechnischer Anlagen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2006, 101(10), S. 561–565.
- [84] FlexSim: FlexSim Software Projects Inc. <https://www.flexsim.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [85] Follert, G., Nagel, K.: Verfügbarkeit intralogistischer Systeme. Journal: nicht-referierte Veröffentlichungen. 2006.
- [86] Ford, D., Labelle, F., Popovici, F., Stokely, M., Truong, V. A., Barroso, L., Grimes, C., Quinlan, S.: Availability in globally distributed storage systems. In: USENIX OSDI. 2010.
- [87] Frank, U., Giese, H., Klein, F., Oberschelp, O., Schmidt, A., Schulz, B., Vöcking, H., Witting, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus: Definitionen und Konzepte. Universität Paderborn. Paderborn. Forschungsbericht. 2004.

-
- [88] Franke, W.: Zur Verfügbarkeit von Transport-und Lageranlagen. In: *Fördern und Heben*. 1993, 43(5).
- [89] Franzkoch, B.: Wertorientiertes Verfügbarkeitsmanagement. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Dissertation. 2009.
- [90] Freitag, M.: Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. Universität Bremen. Bremen. Dissertation. 2005.
- [91] Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo-Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2001.
- [92] Gabriel, T., Litz, L., Schrörs, B.: Steigerung der Verfügbarkeit von PLT - Schutzeinrichtungen durch Mitbenutzung von Komponenten des Prozessleitsystems. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 2007, 79(9), S. 1440–1441.
- [93] Gail, V. (Hrsg.): *StörungsCheck : Ursachen identifizieren, Ausfallzeiten verkürzen, technische Verfügbarkeit wiederherstellen; 200 Entstörkarten für Betriebs-, Maschinen- und Anlagentechnik*. Kissing: WEKA-Media GmbH & Co. KG. 2006.
- [94] Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Jasperneite, J., Kühn, A., Trsek, H.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL. In: *it's OWL Clustermanagement GmbH*. 2014.
- [95] Gaver, D. P.: Time to failure and availability of paralleled systems with repair. In: *IEEE Transactions on Reliability*. 1963, 12(2), S. 30–38.
- [96] Gershenfeld, N., Krikorian, R., Cohen, D.: The internet of things. In: *Scientific American*. 2004, 291(4), S. 76–81.
- [97] Gesellschaft Produktionstechnik (Hrsg.): *Informationsmanagement im Fertigungsprozess: Voraussetzung für hohe Produktionsmittel-Verfügbarkeit*. Tagung Bad Nauheim 18. und 19. Oktober 1989; Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB). Düsseldorf: VDI-Verlag. 1989.
- [98] Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, TTZ (Hrsg.): *Zuverlässige Technik ist planbar: Zuverlässigkeit Verfügbarkeit und Sicherheit verfahrenstechnischer System; TTZ '97; 19. Tagung Technische Zuverlässigkeit (TTZ) Braunschweig 7. und 8. Oktober 1997*. Düsseldorf: VDI-Verl. 1997.
- [99] Gilmore, J. H., Pine, B. J.: *Markets of one: Creating customer-unique value through mass customization*. Harvard Business Press, Boston Mass. 2000.
- [100] Gleißner, M.: *Stromrichterstrukturen zur Steigerung der Verfügbarkeit durch Fehlertoleranz*. München: Dr. Hut. 2016.
- [101] GoldSim: GoldSim Technology Group LLC. <http://www.goldsim.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [102] Goode, K. B., Moore, J., Roylance, B. J.: Plant machinery working life prediction method utilizing reliability and condition-monitoring data. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2000, 214(2), S. 109–122.

-
- [103] Görlich, J.: Erhöhung der Verfügbarkeit an Baumaschinen durch Ölpflege. In: *O + P*. 1987, 31, S. 206–213.
- [104] Goyal, A., Lavenberg, S. S., Trivedi, K. S.: Probabilistic modeling of computer system availability. In: *Annals of Operations Research*. 1987, 8(1), S. 285–306.
- [105] Graf, H.-G.: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit in der Erdöl- und Erdgasproduktion. In: VDI-Berichte Nr. 454: Jahrestagung 1982 der VDI-Gesellschaft Energietechnik. Tagung Düsseldorf 1982. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. 1982, 7–17.
- [106] Graham, S., Lussier, D.: Systems and methods of high availability cluster environment failover protection. U.S. Patent No. 8,117,495. 14 Feb. 2012.
- [107] Grein, W., Braubach, H.-O., Wiesner, D.: Technische Sicherheit und Verfügbarkeit von Chemieanlagen. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 1976, 48(4), S. 281–287.
- [108] Griesbach, M.: Steigerung der Verfügbarkeit von Hüttenwerksanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Bauteillebensdauer. Verlag Stahleisen. 1971.
- [109] Gromeleit, N., Fiege, M.: Petri-Netze und ihr Einsatz als Simulationsmittel in der Fertigungssteuerung. Technische Universität Ilmenau. Fakultät für Informatik und Automatisierung. 1999.
- [110] Grundnig, G., Raschhofer, S.: Erhöhung der Verfügbarkeit durch Einsatz des Diagnosesystems FDS. In: *SIGNAL + DRAHT*. 2010, 2.
- [111] Gudehus, T.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 1: Kenngrößen der Systemelemente. In: *f+h Fördern und Heben* 26 (1976), Nr. 10, S. 1029–1033.
- [112] Gudehus, T.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 2: Kenngrößen von Systemen. In: *f+h Fördern und Heben* 26 (1976), Nr. 13, S. 1343–1346.
- [113] Gudehus, T.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 3: Grundformeln für Systeme ohne Redundanz. In: *f+h Fördern und Heben* 29 (1979), Nr. 1, S. 23–25.
- [114] Hagl, R.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Vorschubantrieben mit selbstanpassender Lageregelung. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 1991.
- [115] Hamann, R., Geyer, S.: Höhere Verfügbarkeit von Umformmaschinen. *Werkstatt und Betrieb*. 1989, 122(11), S. 925–931.
- [116] Hammer, H.: Verfügbarkeitsanalyse von flexiblen Fertigungssystemen. In: *FTK*. 1991, 91, S. 59–67.
- [117] Händler, W.: The concept of Marco-Pipelining with high availability/Ein Makro-Pipelining Konzept mit hoher Verfügbarkeit. *IT-Information Technology* 15.1-6 (1973): 269-274.
- [118] Hebert, J. E.: High availability networking with alternate pathing failover. U.S. Patent No. 6,763,479. 13 Jul. 2004.

-
- [119] Hegmanns, T., Kuhn, A., Roidl, M., Schieweck, S., Hompel, M. ten, Güller, M., Austerjost, M., Roßmann, J., Eilers, K.: Planung und Berechnung der systemischen Leistungsverfügbarkeit komplexer Logistiksysteme. *Logistics Journal: Proceedings*. 2014, 01.
- [120] Heidtmann, K.: Zur Approximation der Verfügbarkeit technischer Systeme. Fernuniversität Hagen. Hagen. Dissertation. 1981.
- [121] Heiner, M., Lehrack, S., Gilbert, D. R., Marwah, M.: Extended Stochastic Petri Nets for Model-Based Design of Wetlab Experiments. In: *Transactions on Computational Systems Biology*. 2009, S. 138–163.
- [122] Heisel, U., Hammer, H., Pritschow, G.: Influences on the availability of flexible manufacturing systems. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 1992, 41(1), S. 459–462.
- [123] Helm, R., Stölzle, W.: Optimal Shelf Availability: Effiziente Managementkonzepte zur Optimierung der Regalverfügbarkeit. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag GmbH. 2009.
- [124] Hirschmann, J.: Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2006.
- [125] Hittorff, K.: Eine Methodik zur Simulation von verfahrenstechnischen Anlagen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit. Universität Dortmund. Dortmund. Dissertation. 1989.
- [126] Hlubek, W.: Instandhaltungskonzept für Kraftwerksblöcke unter Berücksichtigung von Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Habilitationsschrift. 1985.
- [127] Hoener, P.: Maßnahmen zur Steigerung von Verfügbarkeit, Dienstgüte und Fairness in Netzen mit Client-Server-Anwendungen. Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2001.
- [128] Holleczeck, P., Vogel-Heiser, B. (Hrsg.): Sicherheit und Verfügbarkeit in Echtzeit- und Automatisierungssystemen. In: Fachtagung der GI-Fachgruppe 4.4.2 Echtzeitprogrammierung PEARL. Boppard. 28.-29. November 2002.
- [129] Horvitz, E., Koch, P., Kadie, C. M., Jacobs, A.: Coordinate: Probabilistic forecasting of presence and availability. In: *Proceedings of the Eighteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 2002, S. 224–233.
- [130] Huang, H., Ye, G., Qian, C., Schlangen, E.: Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. In: *Materials & Design*. 2016, S. 499–511.
- [131] Huber, W.: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion: Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2016.
- [132] Hubka, V.: Theorie der Maschinensysteme. Springer-Verlag. 1973.
- [133] Huf, A.: Kumulative Lastermittlung aus Antriebsdaten zur Bewertung des Zustands von Werkzeugmaschinenkomponenten. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2012.

-
- [134] Hülsen, E.: Sicherung der Verfügbarkeit einer Paketsortieranlage. VDI Berichte 833. 1990.
- [135] Hülsken, G.: Sicherer Betrieb leitergekühlter Kabelanlagen durch eigenerregte Kühlmittelströmungen. Ein neues Anlagenkonzept mit erhöhter Verfügbarkeit. Universität Duisburg. Duisburg. Dissertation. 1985.
- [136] Hwang, J. H., Balazinska, M., Rasin, A., Cetintemel, U., Stonebraker, M., Zdonik, S.: High-availability algorithms for distributed stream processing. In: IEEE, 21st International Conference on Data Engineering (ICDE'05). 2005, S. 779–790.
- [137] IBM: Transparenz und Echtzeitlokalisierung von Assets in medizinischen Einrichtungen. IBM Healthcare Sensor Solutions. 2010.
- [138] IMS-SIMON: Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining - Final Project Report. ESPRIT IV Project EP 22417 SIMON. 2000.
- [139] Iniewski, K., McCrosky, C., Minoli, D.: Network infrastructure and architecture: Designing high-availability networks. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. 2008.
- [140] Isermann, R., Beck, M.: Modellbasierte Methoden zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Fahrwerkkomponenten. VDI/VDE-Tagung AUTOREG, Baden-Baden, Germany. 2011.
- [141] Ishikawa, I.: Exercise-Induced Acute Renal Failure: Acute Renal Failure with Severe Loin Pain and Patchy Renal Ischemia After Anaerobic Exercise. Tokyo: Springer Japan. 2007.
- [142] Jensen, K.: Coloured Petri nets: A high level language for system design and analysis. In: *High-Level Petri Nets*. Springer, Berlin, Heidelberg. 1991, S. 44–119.
- [143] Jiao, J. R., SIMPSON, T. W., Siddique, Z.: Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. In: *Journal of intelligent Manufacturing*. 2007, 18(1), S. 5–29.
- [144] Joehnsen, O.: Flexibilität und Verfügbarkeit erhöhen-Anlagenweites mobiles Bedienen und Beobachten. In: *IT Production*. 2010, 9, S. 22–24.
- [145] Johnson, D. H.: The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. In: *Ecology*. 1980, 61(1), S. 65–71.
- [146] Kagermann, H., Lukas, W.-D., Wahlster, S.: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: *VDI Nachrichten*. 2011, 13(1).
- [147] Kaiser, T.: Methodik zur Bestimmung der Verfügbarkeit von verteilten anwendungsorientierten Diensten. Herbert Utz Verlag. 1999.
- [148] Kampe, M. A., Gien, M., Penkler, D., Jacquemot, C., Herrmann, F., Armand, F., Baltz, L. E.: Method and system for achieving high availability in a networked computer system. U.S. Patent No. 6,854,069. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2005.

-
- [149] Katzorke, I., Pikovski, A.: Dynamics between order and chaos in a simple re-entrant model of production dynamics. In: *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2003, 13(5).
- [150] KDT-Schriftenreihe: Kammer der Technik: Instandhaltung, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit. Zentrale Arbeitsgemeinschaft Zuverlässigkeit und Instandhaltung beim Präsidium, Bezirksverband Frankfurt. In: *Zeitschrift für Technologie und Organisation*. 1984.
- [151] Kim, D. S., Machida, F., Trivedi, K. S.: Availability modeling and analysis of a virtualized system. In: 2009 15th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. IEEE. 2009, S. 365–371.
- [152] Kim, T. G., Zeigler, B. P.: The DEVS formalism: hierarchical, modular systems specification in an object oriented framework. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 1987.
- [153] Kistner, K.-P.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit redundanter Systeme mit vorbeugender Wartung. DGOR. Springer: Berlin, Heidelberg. 1982. S. 535-541.
- [154] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren. Vol. 7. Berlin: Springer. 2008.
- [155] Knewitz, R.: 2. Internationaler S + D-Kongress: Verfügbarkeit – Diagnose – Instandhaltung. In: *Signal+ Draht*. 1994, 94, S. 26–37.
- [156] Kohlas, J.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit: Mathematische Modelle, Methoden und Algorithmen. Stuttgart: Teubner. 1987.
- [157] Kolerus, J., Wassermann, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen: Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker. Renningen: Expert. 2017.
- [158] König, C., Voß, A.: Verfügbarkeit von Energieressourcen zur Deckung des gegenwärtigen und künftigen Bedarfs. 1978.
- [159] Koren, Y.: The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2010.
- [160] Kounev, S., Spinner, S., Meier, P.: Introduction to queueing petri nets: modeling formalism, tool support and case studies. In: *Proceedings of the 3rd ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. ACM. 2012, S. 9–18.
- [161] Krüger, H.-G.: Kostensenkung durch planmäßige Instandhaltung unter Berücksichtigung der erforderlichen Verfügbarkeit. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 1983, 55(8), S. 625–629.
- [162] Kubiak, W., Błazewicz, J., Formanowicz, P., Breit, J., Schmidt, G.: Two-machine flow shops with limited machine availability. In: *European Journal of Operational Research*. 2002, 136(3), S. 528–540.
- [163] Kumar, U., Ahmadi, A., Verma, A. K., Varde, P.: Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety: An Industry Perspective. Cham: Springer. 2016.

-
- [164] Ladin, R., Liskov, B., Shriram, L., Gheorghiu, M.: Providing high availability using lazy replication. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*. 1992, 10(4), S. 360–391.
- [165] Lang, C.: Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung. Technische Universität München. München. Dissertation. 1992.
- [166] Laprie, J. C., Kanoun, K.: X-ware reliability and availability modeling. In: *IEEE Transactions on Software engineering*. 1992, 18(2), S. 130–147.
- [167] Lee, C.-Y.: Machine scheduling with an availability constraint. In: *Journal of global optimization*. 1996, 9(3-4), S. 395–416.
- [168] Lee, C.-Y.: Two-machine flowshop scheduling with availability constraints. In: *European Journal of Operational Research*. 1999, 114(2), S. 420–429.
- [169] Lei, L., Lin, C., Zhong, Z.: Stochastic Petri Nets for Wireless Networks. In: *Springer International Publishing*. 2015.
- [170] Leitao, P., Rodrigues, N., Barbosa, J., Turrin, C., Pagani, A.: Intelligent products: The grace experience. In: *Control Engineering Practice*. 2015, 42, S. 95–105.
- [171] Lilegdon, W. R., Martin, D. L., Pritsker, A. A. B.: FACTOR/AIM: A Manufacturing Simulation System. In: *SIMULATION*. 1994, 6, S. 367–372.
- [172] Loganathan, M. K., Kumar, G., Gandhi, O. P.: Availability evaluation of manufacturing systems using Semi-Markov model. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2016, 29(7), S. 720–735.
- [173] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Potentials of coloured Petri nets for realistic availability modelling of production systems in industry 4.0. In: *ESREL 2015 Conference, Zürich, Switzerland. London: Taylor & Francis Group*. 2015, S. 4455–4463.
- [174] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Modelling the production systems in industry 4.0 and their availability with high-level Petri nets. In: *Proc. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016, 28.06. – 30.06.2016, Troyes, France, IFAC-PapersOnLine*. 2016, 49(12), S. 145–150.
- [175] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Modelling the flexibility of production systems in Industry 4.0 for analysing their productivity and availability with high-level Petri nets. In: *Proc. IFAC WC 2017 Conference, 09.07. – 14.07.2017, Toulouse, Frankreich*. 2017, S. 5845–5852.
- [176] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Modelling the interaction in redundant production systems for analysing their productivity and availability with high-level Petri nets. In: *Proc. ESREL 2017 Conference, 18.06. – 22.06.2017, Portorož, Slovenia, ISBN 978-1-138-629370-0*. 2017, S. 3491–3497.
- [177] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Prognose der Verfügbarkeit von flexiblen Produktionssystemen in der Industrie 4.0. In: *28. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2017, 17.-18.05.2017, Leonberg, VDI-Berichte 2307, ISBN 978-3-18-092307-9*. 2017, S. 163–175.

-
- [178] Long, F., Zeiler, P., Bertsche, B.: Realistic modelling of flexibility and dependence in production systems in Industry 4.0 for analysing their productivity and availability. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. SAGE Publications. 2018, 232(2), S. 174–184.
- [179] Louen, C. J.: Datenbasierte Zustandsüberwachung in Personenkraftfahrzeugen mit Anwendung an einem Drei-Wege-Katalysator. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2016.
- [180] Ma, Y., Chu, C., Zuo, C.: A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. In: *Computers & Industrial Engineering*. 2010, 58(2), S. 199–211.
- [181] Maier, M.: Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeits-Theorie. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau. Dissertation. 2011.
- [182] Maier, M. M.: Verfügbarkeit intralogistischer Anlagen: Teil I: Die Entwicklung eines Kennwerts. In: *f + h Fördern und Heben*. 2010, 1(2), S. 18–22.
- [183] Maier, M. M.: Verfügbarkeit intralogistischer Anlagen: Teil II: Ein Kennwert passt sich an. In: *f + h Fördern und Heben*. 2010, 3, S. 72–75.
- [184] Malek, M., Hoffmann, G. A., Milanovic, N., Brüning, S., Meyer, R., Milic, B.: Methoden und Werkzeuge zur Verfügbarkeitsermittlung. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin. Technischer Bericht für Informatik. 2007.
- [185] Marcus, E., Stern, H.: Blueprints for high availability: Designing resilient distributed systems. New York, Weinheim: Wiley. 2000.
- [186] Marcus, E., Stern, H.: Blueprints for high availability. John Wiley & Sons. 2003.
- [187] Marianov, V., ReVelle, C.: The queueing maximal availability location problem: a model for the siting of emergency vehicles. In: *European Journal of Operational Research*. 1996, 93(1), S. 110–120.
- [188] Maschke, H.: Mit Flexiblen Fertigungssystemen zu höheren Verfügbarkeiten. In: *Werkstattstechnik*. 1988, 78, S. 109–113.
- [189] Mauderer, M.: Verfügbarkeit an Produktionsanlagen. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit. München: Herbert Utz. 1998, S. 1–10.
- [190] Meier, H. (Hrsg.): Ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen (VeraPro). Band 2 der Reihe "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung". Aachen: Apprimus Verlag. 2009.
- [191] Meier, H., Binner, S. M., Quade, N.: Planung, Service, Instandhaltung: Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen. In: *wt Werkstattstechnik online*. 2007, 97(7/8), S. 544–548.
- [192] Meng, X. Z.: Lifetime predictions of miniature fuses and semiconductor protection fuses. Eindhoven, Techn. Univ., Diss., 1995.

-
- [193] Menke, D.: Modellierung von Verfügbarkeit und Systemdynamik fossil befeuerter Großkraftwerke. Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Cottbus. Dissertation. 2003.
- [194] Menzel, T., Stöppler, G., Wagner, P., Wunsch, G.: Simulation erhöht Produktivität und Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2004, 99(10), S. 534–537.
- [195] Merlin, P.: A study of the recoverability of computer systems. University of California. Irvine, CA. Ph. D. Thesis. 1974.
- [196] Merz, M.: Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Dissertation. 2010.
- [197] Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH (Hrsg.): Technische Zuverlässigkeit: Problematik, mathematische Grundlagen, Untersuchungsmethoden, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer. 1971.
- [198] Meyer, G. G., Framling, K., Holmstrom, J.: Intelligent Products: A survey. In: *Computers in Industry*. 2009, 3, S. 137–148.
- [199] Micro Saint Sharp: Alion Science and Technology. <http://micro saintsharp.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [200] Milberg, J., Ebner, K.: Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. Abschlussbericht der AiF-Forschungsstudie 8649. Frankfurt: VDW Verlag. 1994.
- [201] MIRAM: Machine management for increasing reliability, availability and maintainability. Partners are Heckler & Koch GmbH, University of Wales, Fraunhofer IAO Stuttgart, Extech Eire, IIT Madrid, and Robotiker Bilbao. Contact Mr. A. Ruep, Heckler & Koch GmbH, Postfach 1329, D7238 Oberndorf/Neckar, Germany. 1994.
- [202] Mittmann, R.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Prozeßrechnersystemen durch die Kopplung von Einzelrechnern mit Busstruktur. Technische Universität München. München. Dissertation. 1978.
- [203] Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W.: Cyber-physical systems in manufacturing. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2016, 65 (2), S. 621–641.
- [204] MS4 Modeling Environment: MS4 Systems, Inc. <http://www.ms4systems.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [205] Müller, F., Bertsche, B.: Availability Analyses of Maintained Systems with Confidence Intervals. 2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE. 2019.
- [206] Müller, T.: Zustandsüberwachung und Verfügbarkeitsprognose in Großanlagen der Stahlindustrie. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Dissertation. 1993.
- [207] Muntz, R. R., De Souza e Silva, E., Goyal, A.: Bounding availability of repairable computer systems. Proceedings of the 1989 ACM SIGMETRICS international

-
- conference on Measurement and modeling of computer systems. Oakland, California, USA. May 23 - 26, 1989, 17(1), S. 29–38.
- [208] Munzinger, C., Schopp, M. (Hrsg.): Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung (OPTILAST). Aachen: Apprimus Verlag. 2009.
- [209] Murata, T.: Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. In: *Proceedings of the IEEE*. 1989, 77(4), S. 541–580.
- [210] Nachtigal, V.: Modellieren von Echtzeitsystemen mit GSPN. Universität Paderborn. Paderborn. Seminararbeit. 2003.
- [211] Nachtkamp, J.: Verfügbarkeitsorientierte Zuverlässigkeitsuntersuchung der Netzeinbindung und der Eigenbedarfsversorgung großer Wärmekraftwerksblöcke. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Dissertation. 1979.
- [212] Nebel, S.: Entwicklung eines Monte-Carlo Simulationsprogramms zur Analyse von verbundenen Systemmodellen. Universität Stuttgart. Stuttgart. Diplomarbeit. 2007.
- [213] Nebel, S., Chlod, M.: Das REALIST-Programmpaket. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dokumentation. 2015.
- [214] Nesges, D.: Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Dissertation. 2005.
- [215] Neugebauer, R.: Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 2018.
- [216] Newiadomsky, C., Tietze, I.: Beitrag erneuerbarer Energien zur Verfügbarkeit von Elektrizität und Wasser in Afrika: Ansätze für eine nachhaltige Entwicklung?: Innovation in der Nachhaltigkeitsforschung : ein Beitrag zur Umsetzung der UNO Nachhaltigkeitsziele. Berlin, Germany: Springer Spektrum, 2017, S. 39–59.
- [217] NGM Project Office: NGM — Next Generation Manufacturing, A Framework for Action (USA Project). In: Kosanke, K.; Nell, J.G. (Eds.): Enterprise Engineering and Integration: Building International Consensus. Research Reports Esprit. Springer Science & Business Media, 2012, S. 307–315.
- [218] Nitsch, D., Schmitz, H., VGB-Arbeitsgruppe: VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte "Wärmekraftwerke" Verfügbarkeit von Wärmekraftwerken 1985-1994. Essen: VGB Berlag. 1995.
- [219] Nitsch, J.: Struktur und Entwicklung der zukünftigen Stromversorgung Baden-Württembergs: Unter Berücksichtigung der Liberalisierung der Energiemärkte der technologischen Entwicklung der Verfügbarkeit fossiler Ressourcen und der wachsenden Bedeutung erneuerbarer Energiequellen. Stuttgart, Karlsruhe: Arbeitsgemeinschaft DLR/ISI/ZSW. März 2002.
- [220] NSTC: Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing: A Report by the SUBCOMMITTEE ON ADVANCED MANUFACTURING COMMITTEE ON TECHNOLOGY of the NATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL.

- <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/10/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf>. Zuletzt geprüft am 10.05.2019.
- [221] Nyhuis, P., Reinhart, G., Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum. 2008.
- [222] Oesterer, D.: Optimale Ersatzstrategie für ein System aus reparierbaren Elementen bei vorgegebener Verfügbarkeit. In: *Zeitschrift für Operations Research*. 1972, 16(2), B31-B40.
- [223] Oliveira, V. d., Jäschke, J., Skogestad, S.: An autonomous approach for driving systems towards their limit: an intelligent adaptive anti-slug control system for production maximization. In: *IFAC-PapersOnLine*. 2015, 48(6), S. 104–111.
- [224] Osaki, S., Nakagawa, T.: Bibliography for reliability and availability of stochastic systems. In: *IEEE Transactions on Reliability*. 1976, 25(4), S. 284–287.
- [225] Parnow, A.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Landmaschinen durch den Einsatz von Diagnosesystemen. Technische Universität Berlin. Berlin. Dissertation. 1992.
- [226] Perner, M., Algermissen, S., Keimer, R., Monner, H. P.: Avoiding defects in manufacturing processes: A review for automated CFRP production. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016, S. 82–92.
- [227] Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. Dissertation. 1962.
- [228] Pfleger, S.: Verfügbarkeit hierarchisch aufgebauter Rechner-Ringverbundsysteme. Technische Universität München. München. Dissertation. 1981.
- [229] Piedad, F., Hawkins, M.: High availability: Design techniques and processes. Upper Saddle River, N.J., London: Prentice Hall. 2001.
- [230] Piloty, R., Zschekel, H.: Elektronisches Auskunftssystem über die Verfügbarkeit von Passagierplätzen im Luftverkehr. In: *IT-Information Technology*. 1959, 1(1-4), S. 6–16.
- [231] Pine, B. J.: Mass customization: the new frontier in business competition. Harvard Business Press, Boston. 1993.
- [232] Plant Simulation: Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. www.plm.automation.siemens.com. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [233] Plattform Industrie 4.0: Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0. <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Plattform/Plattform-Industrie-40/plattform-industrie-40.html>. Zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- [234] Plattform Industrie 4.0: Was ist Industrie 4.0? <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>. Zuletzt geprüft am 17.04.2017.
- [235] PowerDEVS: Laboratory for System Dynamics and Signal Processing. Universidad Nacional de Rosario. <http://www.fceia.unr.edu.ar/lspd/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.

-
- [236] Pozsgai, P.: Entwicklung und Vergleich numerischer Verfahren zur Berechnung der Verfügbarkeit technischer Produkte. Fachhochschule Esslingen. Esslingen. Diplomarbeit. 1999.
- [237] Pozsgai, P.: Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2006.
- [238] Pozsgai, P. & Bertsche, B.: Conjoint modelling with Extended Coloured Stochastic Petri Net and Reliability Block Diagram for system analysis. In: C. Spitzer et al. (eds.), *Probabilistic Safety Assessment and Management*. London: Springer. 2004, S. 1382–1387.
- [239] Quade, N.: Verfügbarkeitsmanagement von Bearbeitungssystemen mit erweiterter Betrachtung der administrativen Prozesse in kleinen und mittleren Unternehmen. Universität Bochum. Bochum. Dissertation. 2009.
- [240] Qudrat-Ullah, H.: Better Decision Making in Complex, Dynamic Tasks: Training with Human-Facilitated Interactive Learning Environments. Cham: Springer. 2015.
- [241] Räcker, R.: Beitrag zur Steigerung der Verfügbarkeit von Grossgetrieben an Walzwerksanlagen mit Hilfe lebensdauerorientierter Berechnungsverfahren. Technische Universität Clausthal. Clausthal. Dissertation. 1986.
- [242] Ramchandani, C.: Analysis of asynchronous concurrent systems by Petri nets. Massachusetts Institute of Technology. Doctoral thesis. 1974.
- [243] Rauch, E.: Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2013.
- [244] Raunik, G.: Schwingungsmessungen an Elektromotoren-Wälzlager- und Schwingungsdiagnose an Nebenanlagen eines Wärmekraftwerkes zur Optimierung des Messaufwandes als Unterstützung der zustandsorientierten Instandhaltung und zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Aggregate. Diplomarbeit HS Lausitz, Senftenberg, 2005.
- [245] Rauscher, K.: Verfügbarkeit der Werkzeugmaschinen. In: *Werkstattstechnik*. 1989, 79, S. 329–332.
- [246] Rawat, A. S., Papailiopoulos, D. S., Dimakis, A. G., Vishwanath, S.: Locality and availability in distributed storage. In: *IEEE Transactions on information theory*. 2016, 62(8), S. 4481–4493.
- [247] Regel, R.-D.: Statistische Verfahren für die stationäre Verfügbarkeit reparierbarer Systeme. Humboldt-Universität. Berlin. Diplomarbeit. 1981.
- [248] Reimund Neugebauer (Hrsg.): Vorausschauende, zustandsabhängige Instandhaltung an Produktionsmaschinen (VIPRO). Band 7 der Reihe "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung". Aachen: Apprimus Verlag. 2011.
- [249] Reinhart, G., Milanovic N. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit: Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze. München: Herbert Utz. 1998.

-
- [250] Reisch, D.: Die Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanforderungen bei der Planung von Maschinensystemen. Universität Hannover. Hannover. Dissertation. 1978.
- [251] Reisig, W.: Petrinetze: Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer. 1986.
- [252] Rieker, T.: Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2018.
- [253] Rieker, T., Zeiler, P., Bertsche, B.: Reliability analysis of a hybrid car drive system with ECSPN. In: *IEEE 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. 2015, 1-7.
- [254] Rohde, M., Kurz, C.: Probleme der Verfügbarkeit von Maschinen der Pflanzenproduktion. In: *Deutsche Agrartechnik*. 1972, 22(3).
- [255] Rosemann, H.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Anlagen und Geräte: Mit praktischen Beispielen von Berechnung und Einsatz in Schwachstellenanalysen. Berlin: Springer. 1981.
- [256] Rossmann, J., Hompel, M. ten, Eilers, K.: Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit zellularer Intralogistiksysteme mit Hilfe von Simulations- und VR-Techniken. *Logistics Journal: Proceedings*. 2014, 01.
- [257] Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. 2016, 1278.
- [258] Rubeša, D.: Lifetime prediction and constitutive modelling for creep fatigue interaction: With 4 tables. Berlin, Stuttgart: Borntraeger. 1996.
- [259] Rubinstein, R. Y., Kroese, D. P.: Simulation and the Monte Carlo Method. John Wiley & Sons. 2016.
- [260] Sanlaville, E., Schmidt, G.: Machine scheduling with availability constraints. In: *Acta informatica*. 1998, 35(9), S. 795–811.
- [261] Schaefer, E.: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit in der Elektronik: Eine Brücke von der Zuverlässigkeitstheorie zu den Aufgaben der Zuverlässigkeitspraxis. Würzburg: Vogel. 1979.
- [262] Schäfer, M., Saenger, F.: Verfügbarkeit und Fehlerdiagnose bei verteilten Mikrorechner-Automatisierungssystemen. In: *Fortschritte durch digitale Meß- und Automatisierungstechnik*. Springer: Berlin, Heidelberg. 1983. S. 777-791.
- [263] Schäfer, S., Pinnow, C. (Hrsg.): Industrie 4.0: Grundlagen und Anwendungen; Branchentreff der Berliner Wissenschaft und Industrie. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH. 2015, 319.
- [264] Schawilye, R.: Kosten, Produktivität und zeitliche Verfügbarkeit des Humankapitals. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*. 1998, 27(3), S. 149–152.
- [265] Schenkel, G.: Die Ausfallsdauerlinie-ein Beitrag zur Frage der Verfügbarkeit vom Dampfkraftwerken. In: *El.-Wi*. 1966.

-
- [266] Schlick, G. H.: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Maschinen, Geräten und Anlagen mit Ventilen: Fallsammlung Lösungsvarianten Praxisbeispiele; mit ... 215 Literaturstellen. Renningen: Expert-Verl. 2001.
- [267] Schmidt, G.: Scheduling with limited machine availability. In: *European Journal of Operational Research*. 2000, 121(1), S. 1–15.
- [268] Schmitt, S.: Aspects of high-availability DC supply systems. Norderstedt: Books on Demand. 2018.
- [269] Schneeweiss, W.: Zuverlässigkeitstheorie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 1973.
- [270] Schneeweiss, W. G.: Einfache konstruktive Beweise der Formeln für Verfügbarkeit und mittlere Betriebszeit komplexer reparierbarer Systeme. In: *Angewandte Informatik*. 1971, 13, S. 224–228.
- [271] Schneeweiß, W. G.: Reliability modeling: (modeling in the fields of dependability availability maintainability and safety engineering). Hagen, [Norderstedt]: LiLoLe-Verl.; Books on Demand GmbH. 2001.
- [272] Schneider, F.: Netzspannungsausfälle und-einbrüche Teil 1: Verfügbarkeit und Ausfallhäufigkeit; Teil 2: Zeitliche Verteilung der Ausfälle. In: *ETZ*. 1986, 107(2), S. 60–65.
- [273] Schneider, H.-J.: Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik. Universität Karlsruhe. Karlsruhe. Dissertation. 1988.
- [274] Schneiderheinze, J.: Die Ermittlung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Landmaschinen. In: *Deutsche Agrartechnik*. 1971, 21(10).
- [275] Schneidewind, N.: Tutorial on hardware and software reliability, maintainability, and availability. New York: IEEE. 2008.
- [276] Scholz-Reiter, B., Jagalski, T., Bendul, J.: Bienenalgorithmen zur Selbststeuerung logistischer Prozesse. In: *Industrie Management*. 2007, 23(5), 7-10.
- [277] Schrage, D.: Die Verfügbarkeit der Dinge: Eine historische Soziologie des Konsums. Frankfurt am Main: Campus Verlag. 2009.
- [278] Schuh, G., Gottschalk, S., Odak, R., Kempf, M., Kupke, D.: Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2007, 102(9), S. 516–519.
- [279] Schuh, G., Kampker, A., Franzkoch, B., Wemhöner, N.: Studie Intelligent Maintenance – Potenziale zustandsorientierter Instandhaltung. Abschlussbericht. Aachen. 2005.
- [280] Schuh, G., Kampker, A., Odak, R. (Hrsg.): Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung - Stellhebel zur Steigerung der Verfügbarkeit in produzierenden Unternehmen (Verstand). Band 4 der Reihe „Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung“. Aachen: Apprimus Verlag. 2009.

-
- [281] Schulz, E., Weickert, F.: Die Krankheiten elektrischer Maschinen: Darstellung der Störungen und Fehler an Generatoren Motoren und Transformatoren und ihre Abhilfe für den praktischen Gebrauch der Installateure Monteure und Maschinenwärter. Leipzig: Jänecke. 1944.
- [282] Schumacher, F.: Verfügbarkeit von Verarbeitungssystemen mit paralleler und serieller Struktur und mit Zwischenlagern. Karlsruhe: Kernforschungszentrum. 1978.
- [283] Schüppenhauer, L.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2003.
- [284] Schütz, D., Vogel-Heiser, B.: Werkzeugunterstützung für die Entwicklung von SPS-basierten Softwareagenten zur Erhöhung der Verfügbarkeit. In: Göhner, Peter (ed.): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2013., S. 291–303.
- [285] Schütz, D., Vogel-Heuser, B.: Verfügbarkeitssteigerung von Produktionsanlagen mit Softwareagenten – Entwicklung eines durchgängigen Werkzeugs. In: Erhöhte Verfügbarkeit und Transparentere Produktion. Tagungsband Automation Symposium 2011. Vol. 2. Kassel University Press GmbH. 2011.
- [286] Seifert, H.-J.: Modellgestützte Diagnose komplexer Produktionssysteme: Ein Beitrag zur Erhöhung der Verfügbarkeit kapitalintensiver Fertigungsanlagen. Universität Bochum. Bochum. Dissertation. 1991.
- [287] Simcad Pro: CreateASoft, Inc. <http://www.createasoft.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [288] SimEvents: MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/simevents/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [289] Simul8: SIMUL8 Corporation. <https://www.simul8.com/>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [290] Sommer, S.: Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage-und Prüfsysteme. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau. Dissertation. 2005.
- [291] Staatliche Materialprüfungsanstalt Stuttgart: MPA-Seminar 25: Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik mit dem Schwerpunkt Sicherheit und Zuverlässigkeit. Integritätsnachweise Komponentenqualifikation Schadensverhütung; 7. und 8. Oktober 1999. Universität Stuttgart. Stuttgart. Seminarbericht. 1999.
- [292] Staatliche Materialprüfungsanstalt Stuttgart (Hrsg.): 29. MPA-Seminar: Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik. Stuttgart. 2003.
- [293] Stagge, H.: Steigerung der Verfügbarkeit zellengestützter elektrischer Energiequellen durch Konzepte mit paralleler Schaltungsstruktur am Beispiel der festoxidkeramischen Brennstoffzelle. Technische Universität Clausthal. Clausthal. Dissertation. 2009.
- [294] Stapelberg, R. F.: Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design. London: Springer. 2009.

-
- [295] Statistisches Bundesamt (Destatis): Statistisches Jahrbuch Deutschland und Internationales. 2018.
- [296] Stauß, P.-F.: Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Dissertation. 1986.
- [297] Stephan, E.: Die Rolle von Urteilsheuristiken bei Finanzentscheidungen: Ankereffekte und kognitive Verfügbarkeit. In: *Finanzpsychologie*. 1999, S. 101–134.
- [298] Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel unter besonderer Berücksichtigung von Kollisionen im Arbeitsraum. Technische Universität München. München. Dissertation. 1983.
- [299] Streifinger, E.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit komplexer Fertigungsanlagen (Reliability and Availability of Complex Production Facilities). In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*. 1985, 127, S. 21.
- [300] Strittmatter, P.: Die Messung von Lernfähigkeit: Experimentelle Validierung des multidimensionalen Lernprofils. Universität des Saarlandes. Saarbrücken. Arbeitsbericht aus der Fachrichtung Erziehungswissenschaft. 2001.
- [301] Sullivan, M., Chillarege, R.: Software defects and their impact on system availability: A study of field failures in operating systems. In: *FTCS*. 1991, 21.
- [302] Sultanow, E.: Graphentheoretische Beschreibung der Petrinetze. Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, 2014.
- [303] Sumetzberger, W.: Neue Herausforderungen für das Projektcontrolling aus systemischer Sicht. In: Konferenz „Zukunft des Projektmanagements“ interPM2004 26./27.03.2004, Glashütten.
- [304] Taylor, Z., Ranganathan, S.: Designing high availability systems: Design for six sigma and classical reliability techniques with practical real-life examples. Piscataway, NJ, Hoboken, New Jersey: IEEE Press; Wiley. 2014.
- [305] Ten Hompel, M., Jung, E.-N.: Markoff-Modell zur Ermittlung der technischen Verfügbarkeit intralogistischer Systeme. In: Gerhard Bandow; Hartmut H. Holzmüller (Hrsg.): "Das ist gar kein Modell!". Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Gabler. GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. 2010. S. 255-275.
- [306] Tewari, R., Dias, D. M., Mukherjee, R., Vin, H. M.: High availability in clustered multimedia servers. Proceedings of the Twelfth International Conference on Data Engineering. IEEE, 1996.
- [307] Thiel, B. v.: Entwicklung einer Methodik zur Zustandsüberwachung von Bauteilen aus sensitiven Werkstoffen. Universität Hannover. Hannover. Dissertation. 2013.
- [308] Thüne, D.: Nutzungsverhalten von Bikesharingsystemen - eine statistische Analyse unter besonderer Berücksichtigung der Verfügbarkeit. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau. Dissertation. 2017.

-
- [309] Tini, V.: Lifetime prediction of a typical rocket combustion chamber by means of viscoplastic damage modeling. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2014.
- [310] Tomek, L. A., Trivedi, K. S.: Analyses Using Stochastic Reward Nets. In: *Software Fault Tolerance*. 1995, S. 139–163.
- [311] Trost, M.: Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2008.
- [312] Tseng, M. M., Jiao, R. J., Wang, C.: Design for mass personalization. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2010, 59(1), S. 175–178.
- [313] Tuffin, B., Chen, D. S., Trivedi, K. S.: Comparison of Hybrid Systems and Fluid Stochastic Petri Nets. In: *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*. 2001, 11, S. 77–95.
- [314] Umlauf, R.: Erarbeitung von Möglichkeiten zur Sicherung und Erhöhung der Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Technische Universität Dresden. Dresden. Dissertation. 1992.
- [315] Vahle-Hinz, T., Bamberg, E.: Flexibilität und Verfügbarkeit durch Rufbereitschaft – die Folgen für Gesundheit und Wohlbefinden. In: *Arbeit: Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik*. 2009, 18(4), S. 327–339.
- [316] Van Renesse, R.; Schneider, F. B.: Chain Replication for Supporting High Throughput and Availability. In: *OSDI*. 2004, 4, S. 91–104.
- [317] VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen Begriffe, Zeiterfassung und Berechnung. Berlin: Beuth Verlag. 2011-08.
- [318] VDI 3649: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme (Calculation of availability in handling and storage systems). Berlin: Beuth Verlag. 01. 1992.
- [319] VDI 4001-2: VDI-Richtlinie 4001 Blatt 2: Begriffsbestimmungen zum Gebrauch des VDI-Handbuches Technische Zuverlässigkeit. Berlin: Beuth. 1986.
- [320] VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): VDI-Berichte 454: Jahrestagung 1982 der VDI-Gesellschaft Energietechnik. Band 1: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit; Betriebs- und Umweltschutzmessungen; Entwicklungstendenzen bei energietechnischen Anlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1982.
- [321] VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss und Logistik: Verfügbarkeit von Materialfluß-Systemen. Tagung Verfügbarkeit von Materialflußsystemen. Frankfurt, 4.-5. Mai, 1987: Tagung. Düsseldorf: VDI-Verl. 1987.
- [322] VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss und Logistik: Verfügbarkeit von Materialfluß-Systemen: Planung Betrieb Maßnahmen; Tagung Baden-Baden 18. Oktober 1990. Düsseldorf: VDI-Verl. 1990.
- [323] VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik: Gas- und Dampfturbinen: Erhöhung der Verfügbarkeit durch Schadenklärung, Werkstoffoptimierung, Bauüberwachung und Reparaturmaßnahmen. 10. VDI-Jahrestagung Schadensanalyse. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1998.

-
- [324] Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Gemeinschaftsausschuß Betriebsfestigkeit (Hrsg.): Höhere Zuverlässigkeit im Schwermaschinenbau: Beitrag der Betriebsfestigkeit für die Verfügbarkeit von Hüttenwerksanlagen; am 21. und 22. Februar 1974. Kolloquium Betriebsfestigkeit 1974, Düsseldorf. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. 1974.
- [325] Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) (Hrsg.): Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft: Elektrizitätswirtschaftliche Grundbegriffe. Verlag- und Wirtschaftsges. der Elektrizitätswerke, VDEW, 1973.
- [326] Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) (Hrsg.): Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft: Elektrizitätswirtschaftliche Grundbegriffe. Frankfurt (Main): Verl.- u. Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke. 1991.
- [327] Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) (Hrsg.): Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft. Band 5: Verfügbarkeit von Wärmekraftwerken. Frankfurt (Main): Verl.- u. Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke. 1992.
- [328] Verl, A.: Robotics & Industrie 4.0. IFR: International Federation of Robotics. VDMA. 29.09.2016.
- [329] Vetterkind, D.: Graphentheoretische Modelle zur Berechnung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Kraftwerksanlagen. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Dissertation. 1977.
- [330] VGB PowerTech e.V. (Hrsg.): Verfügbarkeit von Wärmekraftwerken 2003–2012. Technisch-wissenschaftlicher Bericht TW 103. Essen. 2013.
- [331] VGB PowerTech e.V.: Begriffe der Versorgungswirtschaft. Teil B: Elektrizität und Fernwärme. Heft 3: Grundlagen und Systematik der Verfügbarkeitsermittlung für Wärmekraftwerke. Essen: VGB PowerTech e.V. 2008.
- [332] VisualSim: Mirabilis Design Inc. <http://www.mirabilisdesign.com>. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [333] Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Erhöhte Verfügbarkeit und transparente Produktion. Tagungsband Automation Symposium 2011. Kassel: Kassel University Press. 2011.
- [334] Wagner, D. R.: Simulationsbasierte Bewertung von Verfügbarkeitsgarantien von Windenergieanlagen. Aachen: Apprimus Verlag. 2016.
- [335] Waldmann, K.-H., Ulrike, M. S.: Stochastische Modelle: Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013.
- [336] Wang, J.: Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. In: Fishwick, Paul A. (Hg.). Handbook of Dynamic System Modeling. CRC Press. 2007. S.24.1-24.16.
- [337] Wang, L.: Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013, 6(4), S. 263–273.
- [338] Wannow, K.: Beitrag zur Bestimmung der lastabhängigen Verfügbarkeit eines Inselnetzes. Berlin, Techn. Univ., Diss., 1982.

-
- [339] Weimer, D., Rippel, D., Hildebrandt, T., Lütjen, M., Scholz-Reiter, B.: A Strategy for Logistic Quality Control in Micro Bulk Production. In: *Procedia Technology*. 2014, 15, S. 323–332.
- [340] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2006.
- [341] Westkämper, E., Löffler, C.: Strategien der Produktion: Technologien Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 2016.
- [342] Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., Lentes, J.: Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013.
- [343] Westkämper, E., Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer. 2009.
- [344] Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online*. 2002, 92 (4), S. 122–127.
- [345] Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter B., Wiendahl H.-P. (eds) *Montage in der industriellen Produktion*. Springer: Berlin, Heidelberg. 2012, S. 331–364.
- [346] Wieser, J.: Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen. Universität Karlsruhe. Karlsruhe. Dissertation. 2008.
- [347] Wikipedia: Industrie 4.0. http://de.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0. Zuletzt geprüft am 31.07.2014.
- [348] Wikstrom, P., Terens, L. A., Kobi, H.: Reliability, availability, and maintainability of high-power variable-speed drive systems. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000, 36(1), S. 231–241.
- [349] Wildemann, H.: Management leistungswirtschaftlicher Risiken in der Produktion. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2005, 100.4, S. 187–191.
- [350] Will, J., Heinen, T.: Petri nets in Biology, Chemistry, and Medicine. Institute of Computer Science, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Computer Science Reports, 2002.
- [351] Windt, K.: Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik. In: Vec, M.; Hütt, M.; Freund, A. (Hrsg.): *Selbstorganisation – Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Köln: Böhlau Verlag. 2006.
- [352] Witness: Lanner Ltd. www.lanner.com. Zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- [353] Wittenstein, A.-K.: Bedarfssynchrone Leistungsverfügbarkeit in der kundenspezifischen Produktentwicklung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007.
- [354] Wolf, M.-A.: Die Lebensweg-Vorfallanalyse: Methode zur Quantifizierung der Auswirkungen nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände auf Mensch Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit über den Lebensweg von Produkten. Universität Stuttgart. Stuttgart. Dissertation. 2014.

-
- [355] Wu, Y.: Vergleich und Auswertung der bekannten Petrinetz-Tools. Universität Stuttgart. Stuttgart. Studienarbeit. 2015.
- [356] Wutschig, R.: Aktualisierung der quantifizierten Verfügbarkeit technischer Systeme durch laufende Betriebserfahrungen. Technische Hochschule Aachen. Aachen. Dissertation. 1983.
- [357] Zahn, E., Dillerup, R.: Fabrikstrategien und -strukturen im Wandel. In: Zülch, G. (Hrsg.): Vereinfachen und Verkleinern - Die neuen Strategien in der Produktion. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1994, S. 15-51.
- [358] Zeidler, D.: Methode zur verfügbarkeitsoptimierten Produktionssystemgestaltung für die Automobilindustrie. Aachen: Apprimus Verlag. 2012.
- [359] Zeiler, P., Bertsche, B.: Availability Modelling and Analysis of an Offshore Wind Turbine Using Extended Coloured Stochastic Petri Nets. In: *Proc. ESREL 2014 Conference, 14.09. – 18.09.2015, Wroclaw, Poland*. 2014, S. 1157–1165.
- [360] Zell, J.: Ansätze zur betriebsergebnisgestützten Optimierung der Verfügbarkeit von Kraftwerken. Wiesbaden: Springer. 2000.
- [361] Zhang, J., Cai, J., Meng, Y., Meng, T.: Fault self-repair strategy based on evolvable hardware and reparation balance technology. In: *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014, 27(5), S. 1211–1222.

9 Anhang

Tabelle 9.1: Systematisierung leistungswirtschaftlicher Risiken [196]

	Risikokategorie	Erläuterung/Risikoursache
Betriebsrisiken	<i>Interne Betriebsrisiken</i>	
	Personenrisiken	- Menschliches Versagen
		- Personalausfall
	Sachrisiken	- Beeinträchtigung/Beschädigung von Anlagen
		- Störung von Service- oder Sicherheitseinrichtungen
	Prozessrisiken	- Verlust durch Störung der Geschäftsabläufe
	Systemrisiken	- Ausfall von IT- Systemen (Datensicherheitsrisiken)
		- Ausfall interner Infrastruktursysteme
	<i>Externe Betriebsrisiken</i>	
	Naturrisiken	- Hochwasser, Sturm, Erdbeben, etc.
Infrastrukturrisiken	- Ausfall öffentlicher Infrastrukturen z. B. öffentliche Stromversorgung, Kommunikationsnetze, Wasserversorgungsnetze	
Rechtsrisiken	- Risiken durch Gesetzesänderungen	
	- Bußgelder oder Vertragsstrafen	
	- Schadensersatzansprüche	
Supply Chain Risiken	<i>Versorgungsrisiken</i>	
	Transportrisiko	- Verluste/Schäden an Produktionsfaktoren beim Transport vom Lieferanten zum Unternehmen
	Lagerisiko	- Beschädigung der Produktionsfaktoren im Lager
	Lieferrisiko	- Lieferausfall
		- Liefermängel
		- Schwankungen der Lieferpreise
	<i>Nachfragerisiken</i>	
	Transportrisiko	- Verluste/Schäden an den Produkten beim Transport vom Unternehmen zum Kunden
	Lagerisiko	- Beschädigung der Produkte im Lager
	Abnehmerisiko	- Verkaufsausfall
- Schwankungen in der Verkaufsmenge		
- Schwankungen im Verkauf		

Tabelle 9.2: Checkliste der Einflussfaktoren in Anlehnung an [141]

Folgende Fragen sind zu beantworten: Hat die Dimensionierung, die Temperatur, das Verpacken, etc. einen Einfluss auf das Bauteil?		Sämtliche mit „Ja“ bewerteten Einflussfaktoren sind einer detaillierten Ursachenanalyse, bspw. mit einem Ursache-Wirkungs -Diagramm (Ishikawa), der SWhy Methode, etc. zu prüfen um ggf. die tatsächlich wirkende Ursache (root cause) zu ermitteln.			
Einflussfaktoren aus der Konstruktion, aus dem Design	Ja	Nein	Einflussfaktoren aus dem System, aus Schnittstellen zur Umgebung		
	Ja	Nein	Ja	Nein	
Dimensionierung	D	D	Kundeneinsatz	D	D
Toleranzen	D	D	Umwelteinflüsse	D	D
Geometrie	D	D	Interaktion mit anderen Systemen	D	D
Materialfestigkeit	D	D	Lebensdauer	D	D
Teil-zu-Teil Variationen	D	D	Veränderungen über die Lebensdauer	D	D
Maße	D	D	Zulieferer	D	D
Merkmale	D	D	Fertigung oder Montage	D	D
Fertigungspflichten	D	D	Zukaufteile (Datenblatt)	D	D
Gewicht	D	D	Bestimmte Spezifikationen	D	D
Ausgewählte Materialien	D	D	Temperatur	D	D
Materialvorgaben	D	D	Umwelt	D	D
Standardmaterialien	D	D	Feuchtigkeit	D	D
Steuergrößen	D	D	Sonnen bzw. UV-Strahlung	D	D
Steuergröße : Materialien	D	D	Extreme Zustände	D	D
Steuergröße : Wandstärken	D	D	Kunde	D	D
Steuergröße: Design	D	D	Fehlbedienungen	D	D
Steuergröße: Oberflächendefinition	D	D	Montagekonzept	D	D
Steuergröße : Beschriftungen	D	D	Anforderungen der Produktion	D	D
Steuergröße : Positionstoleranzen	D	D	Ergonomie	D	D
Steuergröße: Abmaße	D	D	Optik	D	D
Varianten bzw. Kundenvarianten	D	D	Haptik	D	D
Zeichnung	D	D	Akustik	D	D
Daten zum Bauraum	D	D	Sauberkeit	D	D
Kennzeichnungen	D	D	Korrosion	D	D
Einbauort und Einbaulage	D	D	Druck	D	D
Formgestaltung und Design	D	D	Klimatische Anforderungen	D	D
Medienbeständigkeit	D	D	Serviceanforderungen	D	D
Chemische Anforderungen	D	D	Anlauf oder Auslösen der Funktion	D	D
Umweltverträglichkeit	D	D	Einbausituation, Einbauraum	D	D
Werkstoffauswahl	D	D			
Recyclingkonzept	D	D	Einflussfaktoren aus dem Prozess, aus der Fertigung	Ja	Nein
Ökobilanz	D	D	Transportschutz	D	D
Mechanische Anforderungen	D	D	Logistikanforderungen	D	D
Lasten	D	D	Teileschutz	D	D
Schwingungsverhalten	D	D	Verpacken	D	D
Steifigkeit und Federeigenschaften	D	D			
Verformung und Deformation	D	D			
Elektrische Anforderungen	D	D			
Datenblatt	D	D			
Spezifikationen	D	D			
Lasten- und Pflichtenheft	D	D			
Änderungen	D	D			

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnelllaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
3	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffstörungen beim Hohlrad-Verzahn mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elasto-hydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzählter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydrauliktangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengen-schmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H. Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydrauliktangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Züm	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumestrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätswissensinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräse-herstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückens strukturierte Hydraulik tangentialdichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Loseilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werksstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper- und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw-Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikelberührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichting, Gegenlaufläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Loseilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. DeLonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spirallille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und raselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festadentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenläufigen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	C. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenauflflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zu verlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaiber	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additivierten synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenauflfläche
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtringen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtringen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Remppis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehäfteter Dichtungsgegenauflflächen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung
170	J. Gözl	Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprognosen
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreier Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydrauliktangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V. Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtungen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenläufflächen und Radial-Wellendichtungen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtungen aus PTFE-Compound
193	N. Dakov	Elastohydrodynamische Simulation von Wellendichtungen am Beispiel der PTFE-Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen
194	Z. Beslic	Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben
195	St. Jetter	Zuverlässigkeitsprognose mechanischer Komponenten auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit
196	O. R. Orozco	Availability of Particle Accelerators: requirements, prediction methods and optimization
197	V. Schramm	Dependable System Development Methodology and Case Study for the LHC Beam Loss Monitoring System at CERN
198	J. Gröber	Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme
199	K. Lucan	Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse
200	F. Müller	Realitätsnahe Modellierung, Simulation und Analyse der operativen Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskennwerte technischer Systeme mit Vertrauensbereich
201	A. Ostertag	Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke
202	A. Kremer	Statistische Versuchsplanung in der Lebensdauererprobung mit Vertrauensintervallen
203	T. Herzig	Anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests
204	M. Henss	Methodik zur Konzeption, Analyse und Modellierung von Lösungen im Prognostic and Health Management (PHM)
205	Y. Gretzinger	Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von Zahnrädern durch eine adaptive Betriebsstrategie
206	A.J. Köhler	Nachweis der Wirksamkeit zeitdiskreter technischer Sicherheitsmechanismen am Beispiel des automatisierten Fahrens
207	S. Skorsetz	Methode zur Übertragbarkeit von Kraftschlussmessungen an Rollenprüfständen unterschiedlicher Skalierung
208	H. Tavakolinik	Beurteilung der Realisierbarkeit der virtuellen Kupplung in Bezug auf Abstandsregelung

